

# تلفیق داده‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی، دگرسانی و سنجش از دور به منظور معرفی پتانسیل‌های کانه‌زایی در منطقه سربیشه، خراسان جنوبی

سروش مدیری<sup>۱\*</sup>، مینا آذری‌فر<sup>۲</sup>، ثمین شمس‌الدین احمدی<sup>۳</sup> و داود رئیسی<sup>۴</sup>

۱. دانشیار دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران

۳. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران

۴. پژوهشگر پسادکتری، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران

۵. شرکت معادن و صنایع معدنی کارند صدر جهان

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۴

## چکیده

پهنه سربیشه در غرب شهر سربیشه و جنوب شرقی بیرجند، استان خراسان جنوبی، واقع است. این منطقه در زون آمیزه افیولیتی بیرجند قرار دارد و بخش شمالی کمربند فلززایی ایران‌شهر-بیرجند را شامل می‌شود. واحدهای سنگ‌شناسی منطقه شامل آمیزه افیولیتی، رسوبات رخساره فلیش، سنگ‌های آذرآواری و رسوبات کواترنری است. مطالعات ژئوشیمیایی رسوب آبراهه‌ای و شناسایی شاخص‌های ژئوشیمیایی مرتبط با ذخایر معدنی منطقه، با استفاده از نتایج تجزیه ژئوشیمیایی و به روش تحلیل مولفه‌های اصلی انجام شده است. مطالعات سنجش از دور به روش ترکیبات رنگی بر روی تصویر ماهواره استر و لندست، و همچنین تحلیل مؤلفه‌های اصلی انتخابی (کروستا) بر روی تصویر ماهواره لندست ۸، به منظور شناسایی زون‌های دگرسانی انجام شده است. خطواره‌های منطقه به روش فیلتر بالاگذر از تصویر ماهواره استر و تصویر گوگل طراحی شد. در نهایت با ایجاد لایه‌های شاهد از واحدهای زمین‌شناسی، داده‌های ژئوشیمیایی، دگرسانی و خطواره‌های گسلی و تلفیق فازی آنها مناطق مستعد کانه‌زایی عناصر نیکل، کروم، کبالت، مس، سرب، روی و منیزیت بارزسازی شد.

واژه‌های کلیدی: پتانسیل معدنی، تحلیل مولفه‌های اصلی، ترکیب داده‌ها، دگرسانی، منطق فازی.

## مقدمه

برای اکتشاف و تلفیق اطلاعات معدنی و زمین‌شناسی استفاده شد و پایه‌های اصلی این مطالعات، شناخت رابطه بین نوع خاصی از کانی‌سازی با سنگ‌های ماگمایی و توده‌های نفوذی خاص، وجود منطقه‌بندی در کانی‌سازی، رابطه میان تکامل پوسته زمین و توسعه کانسارهای خاص و رابطه میان سنگ‌شناسی و کانسنگ‌ها است

متالورژی آمیخته‌ای از مجموعه علوم مرتبط با زمین است و قانونمندی طبیعی حاکم بر چگونگی تشکیل و توزیع زمانی و مکانی کانسارها را تعیین می‌کند. متالورژی نخستین بار به‌طور گسترده در نیمه دوم قرن بیستم در کشورهای مختلف استفاده شد. در اوایل قرن بیست و یکم از متالورژی

\* نویسنده مرتبط: modabberi@ut.ac.ir

و گسل‌ها و شکستگی‌هایی که کانسارها را در خود تمرکز داده‌اند (۲) تشخیص سنگ‌های دگرسان شده گرمایی از راه آثار طیفی آنها.

در رویکرد اول فرض بر این است که ذخایر معدنی در ارتباط با واحدهای سنگی خاص و یا در محل‌هایی با الگوی شکستگی بخصوص ایجاد می‌شوند. رویکرد دوم بر این حقیقت استوار است که محلول‌های گرمایی، ایجادکننده توده‌های معدنی هستند و سنگ میزبان اطراف خود را تحت تأثیر دگرسانی‌های مختلف قرار می‌دهند. تغییرات حاصل از دگرسانی در سنگ‌ها، میزان انرژی جذب‌شده و یا بازتاب‌شده در آنها را تغییر می‌دهد و به همین دلیل، با مطالعه تصاویر ماهواره‌ای به‌خوبی می‌توان مناطق دگرسانی را شناسایی کرد (Sabins, 1999).

پهنه سربیشه به مساحت ۹۰۰ کیلومتر مربع در استان خراسان جنوبی و ۴۵ کیلومتری جنوب شرقی بیرجند واقع شده است. نویسندگان این مقاله، با استفاده از روش تلفیق فازی (حیدریان دهکردی و همکاران، ۱۴۰۰) داده‌های ژئوشیمیایی آبراهه‌ای، دگرسانی و خطواره‌های حاصل از مطالعات سنجش از دور و همچنین واحدهای موثر سنگ‌شناسی، به ارزیابی فلزایی و منابع معدنی محتمل این پهنه پرداخته‌اند. مقاله حاضر به اکتشاف سیستماتیک در منطقه سربیشه و معرفی ذخایر معدنی سولفید توده‌ای، کرومیت و منیزیت پرداخته است.

### زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در طول جغرافیایی "۱۹° ۲۳' ۵۹" تا "۳۶° ۱۹' ۴۳" ۴۵' ۵۹" و عرض "۳۲° ۱۹' ۳۶" تا "۴۰° ۳۲' ۳۳" واقع است. این منطقه بر اساس تقسیم‌بندی آقائباتی (۱۳۸۳) در زون ساختاری سیستان، شرق ایران قرار می‌گیرد. بخش مرکزی منطقه مورد مطالعه در کمربند فلیش و آمیزه رنگین شرق ایران با روند شمالی-جنوبی واقع شده است.

منطقه جوش خورده سیستان در شرق ایران، یک شاخه از اقیانوس نئوتتیس با روند تقریباً شمالی-جنوبی است (Tirrul et al., 1983). اقیانوس سیستان با استناد بر مطالعات انجام شده، در زمان کرتاسه اولیه باز شده است

(Wang et al., 2020). در پنجاه سال گذشته، نیاز جهان به مواد معدنی به شدت رو به افزایش بوده است و چالش برای تامین به موقع و کافی این نیازها، باعث شده تا جامعه معدنی به شیوه‌های مختلف در جستجوی این مواد باشد (Porwal and González-Álvarez, 2019). اکتشاف مواد معدنی گستره‌ای وسیع از فعالیت‌ها، از شناسایی منطقه امیدبخش تا ارزیابی دقیق احجام و ذخیره ماده معدنی را در برمی‌گیرد (Haldar, 2013). هدف از اکتشافات ناحیه‌ای، شناسایی مناطق مستعد کانی‌سازی به منظور اجرای عملیات اکتشاف تفصیلی و شناسایی مواد معدنی مورد نیاز برای جامعه رو به توسعه است.

مطالعات اکتشافات ژئوشیمیایی در مقیاس ناحیه‌ای، یکی از پایه‌های اساسی عملیات اکتشافی است (Demetriades et al., 2018) که در بسیاری از نقاط جهان در فاز مقدماتی اکتشاف بر اساس نمونه‌برداری از رسوبات آبراهه‌ای صورت می‌پذیرد. بنیادی‌ترین پیش‌فرض این است که هر رسوب آبراهه‌ای، معرف محصولات هوازدگی و فرسایش در بالادست محل نمونه است. همچنین به‌طور تجربی ثابت شده است که تمرکزهای بی‌هنجار فلزات در رسوبات آبراهه‌ای در اجزای ریزدانه مشاهده می‌شود. نتایج حاصل از بررسی این نمونه‌ها می‌تواند در تحلیل ایالت‌های ژئوشیمیایی و شناخت الگوهای ژئوشیمیایی ناحیه‌ای و همچنین مناطقی که در آنها احتمال کشف نهشته‌های کانساری بیشتر است، بسیار مؤثر واقع شود (Gandhi and Sarkar, 2016).

سنجش از دور در تعریف جامعی که Sabins (1999) ارائه می‌دهد، علم به دست آوردن، پردازش، و تفسیر تصاویر و داده‌های مرتبط با آنها معرفی می‌شود که از هواپیما یا ماهواره به دست آمده و برهم‌کنش میان ماده و انرژی الکترومغناطیسی را ثبت می‌کند. استفاده از ابزار سنجش از دور در اکتشاف مواد معدنی از سال‌ها پیش مورد توجه قرار گرفته و در مناطق مختلف جهان برای منابع معدنی مختلف به‌کار گرفته شده است (Abrams and Yamaguchi, 2019).

تصاویر سنجش از دور، دو کاربرد در اکتشاف مواد معدنی دارند: (۱) به نقشه در آوردن واحدهای زمین‌شناسی

و رخساره‌های رسوبی-آواری حوضه‌های کافتی و سنگ‌های آتشفشانی است که سن آن‌ها به قبل از کرتاسه تا کرتاسه پایانی نسبت داده می‌شود. سنگ‌های مافیک و اولترامافیک، شامل پریدوتیت‌ها، هارزبورژیت‌ها و سرپانتین، دونیت و دایک‌های صفحه‌ای و سنگ‌های مافیک شامل گابرو (لایه‌ای و توده‌ای)، دیاباز و اسپیلیت است. سنگ‌های پریدوتیت به رنگ سبز تیره تا قهوه‌ای هستند و در شکستگی‌ها به اکسید آهن و سیلیس آغشته‌اند. معمولاً در حاشیه گسل‌ها و حواشی توده‌های سرپانتینی شده و به‌خصوص محل تقاطع گسل‌ها، همراه کربنات، کوارتز، اپال، تالک، کلریت، سریسیت و لیستیونیت یافت می‌شود.

۲. رسوبات رخساره فلیش: در این محدوده دو نوع فلیش به سن کرتاسه پایانی و پالئوسن وجود دارد. فلیش‌های کرتاسه پایانی، در بخش آمیزه افیولیت قرار دارند و معمولاً از شیل‌های سبزرنگ، ماسه‌سنگ و شیل‌های فیلیتی تشکیل شده‌اند. فلیش‌های جوان‌تر در حاشیه شمالی منطقه آمیزه افیولیتی قرار گرفته‌اند و توسط ماسه‌سنگ، سیلتستون و شیل‌های خاکستری‌رنگ به سن ترشیری آغازین یا احتمالاً پالئوسن می‌باشند، پوشیده می‌شود.

۳. سنگ‌های آذرآواری و رسوبات جوان: تناوبی از رخساره‌های آواری شامل شیل و ماسه‌سنگ‌های سبزرنگ، ارغوانی، رادیولاریت‌های قرمز رنگ و چرت‌دار خاکستری‌رنگ، سنگ‌های آتشفشانی، میکروکنگلومرها و کنگلومرای درون‌سازندی ماسه‌سنگ‌های قهوه‌ای‌رنگ و توف است. این مجموعه سنگی از نظر زمانی مربوط به پالئوسن تا ائوسن بالایی-الیگوسن است.

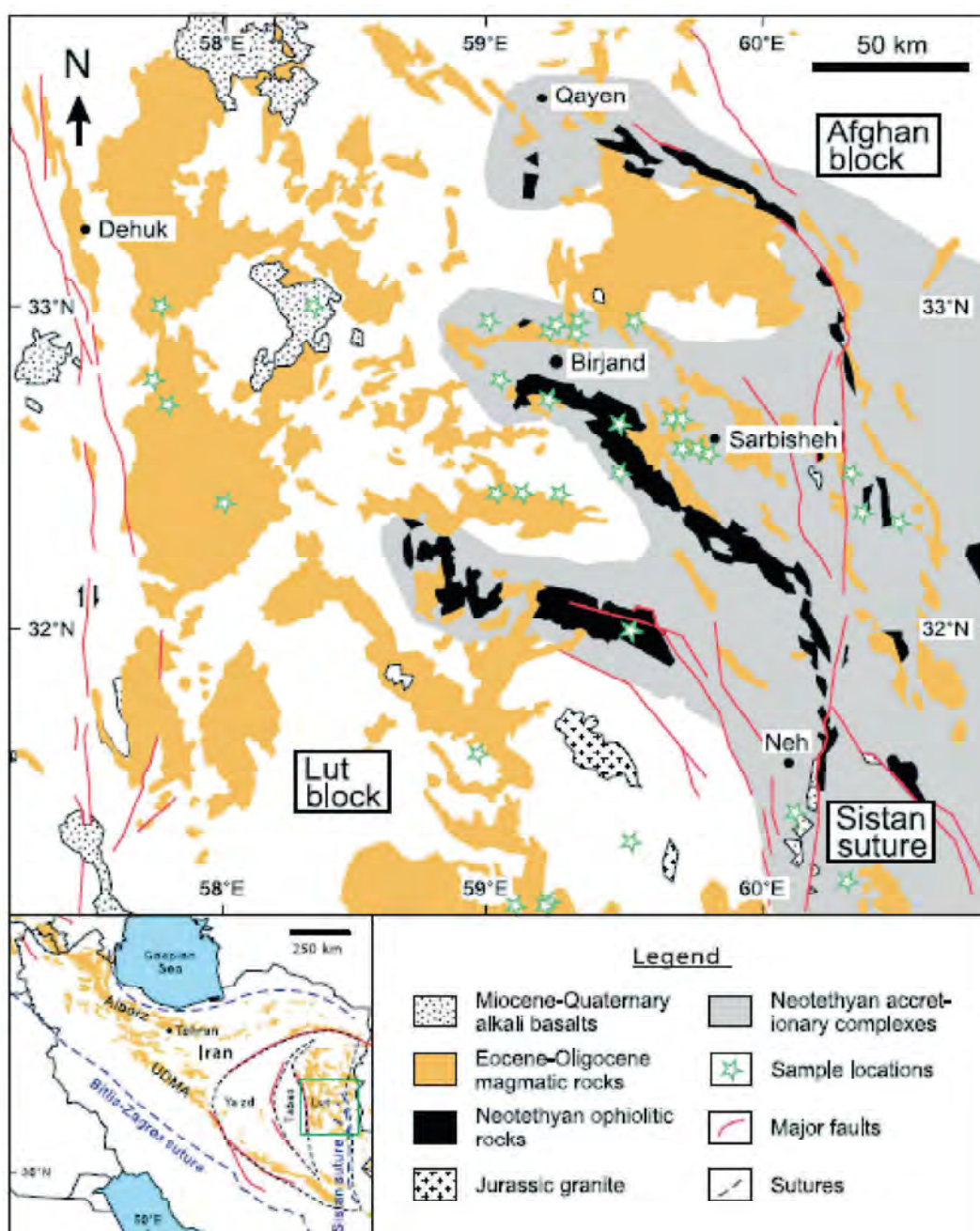
۴. رسوبات کواترنری: این رسوبات شامل مخروط افکنه‌ها، پادگانه‌های آبرفتی رودخانه‌ای و رسوبات جدید رودخانه‌ای، نهشته‌های دانه‌ریز از کلوت‌ها و دغ‌های رسی و بادرفت‌های تحکیم‌یافته و تحکیم‌نیافته که همه این سری نهشته‌ها بر روی واحدهای سنگی قدیمی‌تر منطقه قرار گرفته‌اند.

(Babazadeh and De Wever, 2004). زمان بسته شدن اقیانوس و برخورد بلوک‌های لوت-افغان میانه ائوسن یا کرتاسه پایانی پیشنهاد شده است (Saccani et al., 2010). در منطقه لوت-سیستان (۳۱ تا ۳۵ درجه شمالی و ۵۷ تا ۶۱ درجه شرقی) سنگ‌های ماگمایی ائوسن-الیگوسن رخنمون یافته‌اند (Karimpour et al., 2011). بر اساس بیرون‌زدگی‌ها، این سنگ‌ها در مساحت ۴۰۰ در ۳۰۰ کیلومتر گسترش یافته‌اند و ممکن است گستره آنها به غرب افغانستان نیز برسد (Richards et al., 2012). برخلاف ماگماتیسم در دیگر نقاط ایران که به شکل خطی یا کمربندهای ماگمایی منحنی (به عنوان مثال محدوده ارومیه-دختر و البرز) هستند، ماگماتیسم شرق ایران دارای یک الگوی پراکنده است (شکل ۱). حد شرقی ماگماتیسم شمال منطقه سیستان جوش خورده و حد غربی آن توسط گسل نایبند (گسل امتدادلغز با روند شمالی-جنوبی که در کرتاسه پایانی فعال بوده) مشخص می‌شود (Walker et al., 2009).

ماگماتیسم ائوسن-الیگوسن در شرق ایران سبب شکل‌گیری گسترده سنگ‌های آتشفشانی (گدازه‌ها و سنگ‌های آذرآواری) و سنگ‌های نیمه آتشفشانی شده است. سنگ‌های نفوذی به‌طور محدود در پلوتون‌های کوچک شکل گرفته‌اند. در منطقه جوش خورده سیستان، سنگ‌های آتشفشانی جزء جداناپذیری از چینه‌شناسی منطقه و متشکل از لایه ضخیمی از سنگ‌های رسوبی دریایی (فلیش) انباشته شده بر روی یک زیربنای افیولیتی، از کرتاسه پایانی تا ائوسن، هستند. نفوذی‌هایی که قبل‌تر از آنها یاد شد داخل سکنس‌های فلیش و افیولیت ملانژها جای گرفته‌اند (Pang et al., 2013; Modabber et al., 2019; Tarabi et al., 2019).

به‌طور کلی، واحدهای سنگ‌شناسی منطقه سریش را می‌توان به چهار بخش تقسیم کرد (شکل ۲) (اشتوکلین و همکاران، ۱۳۵۲):

۱. آمیزه‌های افیولیتی: کهن‌ترین سنگ‌های موجود در منطقه مورد مطالعه، ردیفی از سنگ‌های افیولیتی



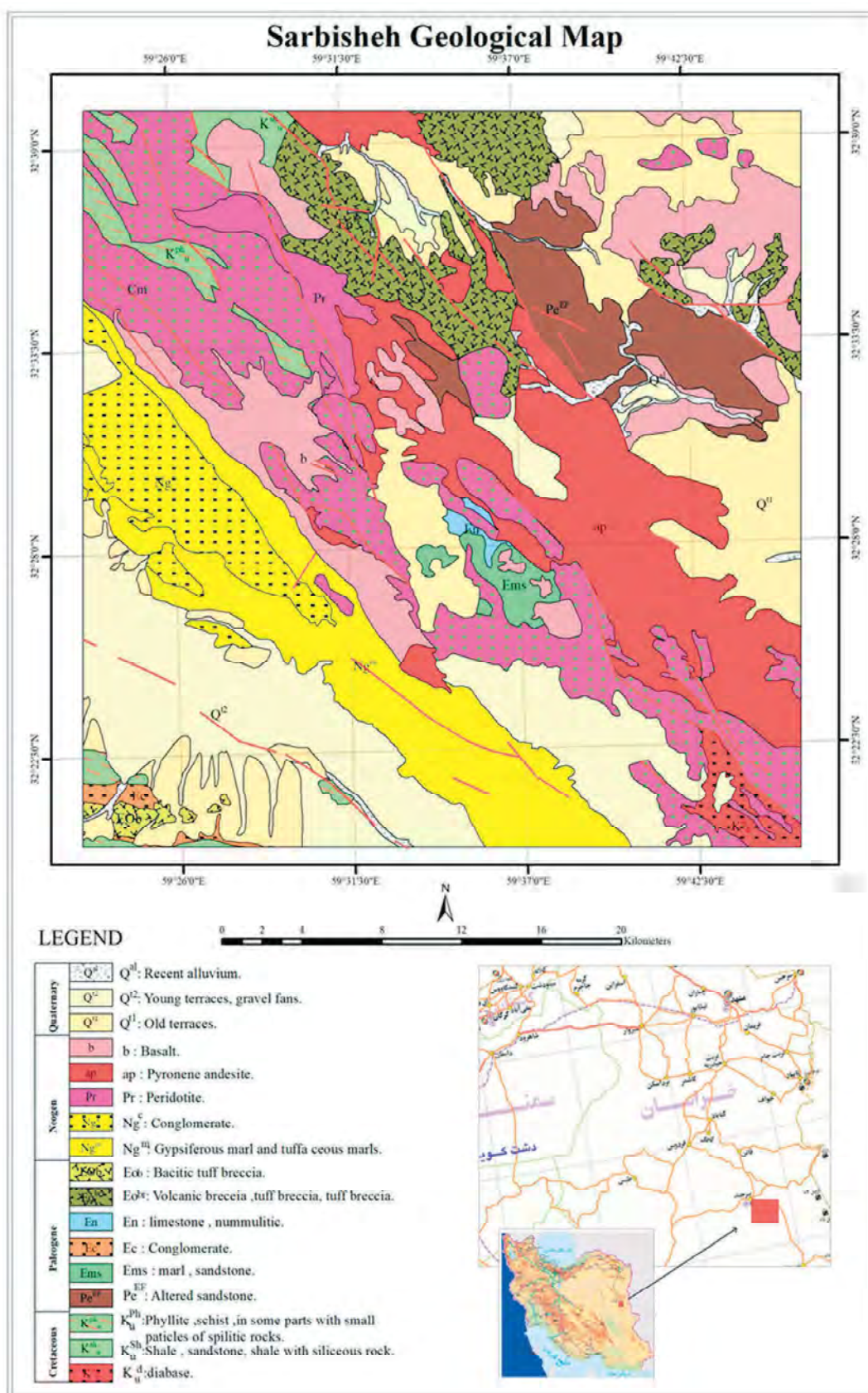
شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی شرق ایران و زون جوش خورده سیستان برگرفته از (Pang et al., 2013; Modabberi et al., 2019)

## روش مطالعه

### مطالعات سنگ‌شناسی

در انجام مطالعات متالوژنی و اکتشافات ناحیه‌ای، به‌طور معمول، لایه‌های مختلف اطلاعاتی از جمله ژئوشیمی، ساختارها و شکستگی‌ها، توپوگرافی، لیتولوژی، افزون بر اطلاعات پراکنش ماده معدنی، به‌طور مجزا و یا در ترکیب با یکدیگر تحلیل می‌شوند (Mosusu et al., 2021).

برای آماده‌سازی این لایه شاهد اطلاعاتی، ابتدا با استفاده از نقشه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی بیرجند، سهل آباد، مختاران و سریشه، نقشه پهنه سریشه در محیط GIS نقشه رقومی شده و واحدهای زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه رسم و واحدهای مهم و مرتبط با کانی‌سازی شناسایی و تفکیک شدند. سپس با استفاده از تابع Distance در محیط نرم‌افزار ARC GIS نقشه رستر



شکل ۲. نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سریشه

واحدهای زمین‌شناسی مساعد برای کانی‌سازی تهیه شد. بر اساس آنچه در مبحث زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه گفته شد و از سوی دیگر با توجه به ارتباط میان سنگ‌های رخنمون شده و تیپ‌های مختلف کانساری، قابل توجه‌ترین واحد لیتولوژیک مستعد که می‌تواند میزبان کانی‌سازی در منطقه باشد، واحدهای اولترامافیک هستند که در این پژوهش برای مدل‌سازی متالوژنی مورد مطالعه خاص قرار گرفتند.

### مطالعات ژئوشیمیایی

برای مطالعات ژئوشیمیایی، ۲۹۲ نمونه مرکب رسوب آبراهه‌ای از چهار برگه ۱۰۰/۰۰۰ بیرجند، سربیشه، مختاران و سهل‌آباد، برداشت شد. پس از مخلوط کردن و غربال کردن نمونه‌ها، اندازه سیلت و رس برای آنالیز انتخاب شدند. به منظور کاهش اثر آلودگی سطحی، نمونه‌ها از عمق نیم متری برداشت شدند. نمونه‌ها برای تجزیه ژئوشیمیایی عناصر مهم اقتصادی As, Ba, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, P, Pb, Sn, Sr, Th, Ti, U, V, W, Zn به روش ICP-OES آماده‌سازی شده و به آزمایشگاه زرآما فرستاده شدند.

### مطالعات آماری

خلاصه اطلاعات آماری و نیز تحلیل آماری داده‌های ژئوشیمیایی توسط نرم افزارهای SPSS 26 و Excel 2019 انجام گرفت. تحلیل و نتیجه‌گیری داده‌های ژئوشیمیایی بخصوص زمانی که برای تعداد زیادی از عناصر آنالیز شیمیایی شده باشند، به دلیل حجم زیاد، کار دشواری است. روش تحلیل مولفه‌های اصلی یکی از روش‌های کاهش داده است. این روش بر اساس بردارهای ویژه و مقادیر ویژه کار می‌کند و روشی است برای پیدا کردن ترکیبات خطی از متغیرهای اولیه، به صورتی که تشکیل یک دستگاه مختصات جدید بدهند. به این ترکیبات خطی، مولفه‌های اصلی گفته می‌شود (Grunsky and de Caritat, 2020). پیش از انجام عملیات تحلیل مولفه‌های اصلی، ابتدا داده‌های سنسورد به روش جایگزینی ساده، جایگزین شدند و سپس برای نرمال‌سازی، داده‌های اولیه به داده‌های لگاریتمی تبدیل شده و پارامترهای آماری برای نمونه‌های موردنظر

محاسبه شد. آزمون‌های KMO و Bartlett که شاخصی برای مقایسه مقادیر ضرایب همبستگی ساده و جزئی بر روی کلیه متغیرها هستند، محاسبه شدند. مقادیر بزرگ KMO دلالت بر تایید تحلیل مولفه‌ای دارد. برای مقادیر حدود ۰/۸ این کمیت، تحلیل مولفه‌ای بسیار مناسب، حدود ۰/۵ مناسب، ۰/۷ متعادل، ۰/۶ متوسط، ۰/۵ ناچیز و کمتر از ۰/۵ نامناسب است (Zuo, 2011). واریانس کل مقادیر ویژه، درصد واریانس و درصد تجمعی واریانس متناظر با مولفه‌ها محاسبه شده و سپس مقادیر ویژه بزرگتر از ۱ استخراج و دوران داده شدند. چهار مولفه اول، مقدار ویژه بیشتر از ۱ داشته و بیش از ۷۶٪ واریانس نمونه‌ها را در برمی‌گرفتند. چون در بسیاری از موارد، تعدادی از متغیرها به بیش از یک مولفه همبستگی دارند، تعبیر مولفه، مشکل خواهد بود. از این‌رو، روش‌هایی به‌وجود آمده‌اند که بدون تغییر میزان اشتراک باعث تعبیر ساده‌تر مولفه‌ها می‌شوند. در این بخش از روش Varimax برای دوران مولفه‌ها استفاده شده است که دورانی متعامد بر روی ضرایب مولفه‌ها صورت می‌دهد (Kaiser, 1958). این روش مقادیر نسبتاً بزرگ (قدر مطلق مقادیر) و یا صفر به ستون‌های ماتریس ضرایب مولفه‌ها اختصاص می‌دهد. در نتیجه مولفه‌هایی ایجاد می‌شوند که به شدت به متغیرها وابسته‌اند و یا مستقل از آن‌ها هستند. این امر سبب ساده‌تر شدن تفسیر مولفه‌ها خواهد شد.

مقادیر ویژه مولفه‌ها با توجه به همبستگی عناصر تفسیر شد و در نهایت از مولفه دوم، سوم و چهارم در نرم‌افزار ARC-GIS ۱۰/۸ به روش درون‌یابی IDW نقشه ژئوشیمیایی تهیه شد.

### مطالعات دورسنجی

از تصاویر ماهواره‌ای می‌توان به عنوان ابزاری نیرومند در اکتشاف ذخایر معدنی در مرحله ابتدایی و تهیه نقشه‌های دگرسانی، با هزینه کم و دقت بالا استفاده کرد (Mather and Koch, 2011; Sekandari et al., 2020). در مطالعه حاضر، برای شناسایی زون‌های دگرسانی از روش ترکیبات رنگی حقیقی و کاذب سنجنده استر و روش‌های تحلیل مولفه‌های انتخابی (کروستا) برای سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ استفاده شده است

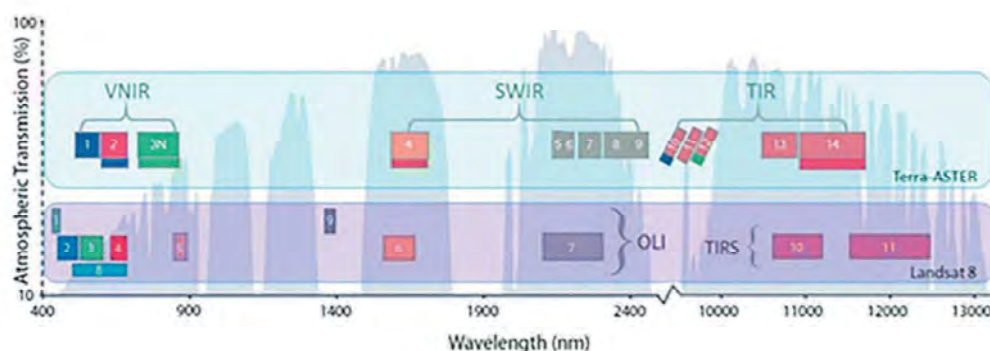
### ماهواره استر

این سنجنده در ۱۴ باند تصویربرداری می‌کند و امواج الکترومغناطیس بازتابیده شده در محدوده طیفی بین ۰/۵۲ و ۰/۸۶ میکرومتر نور مرئی فروسرخ نزدیک را در سه باند با قدرت تفکیک مکانی ۱۵ متر و در محدوده طیفی بین ۱/۶ و ۲/۴۳ فروسرخ موج کوتاه<sup>۲</sup> را در شش باند با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر ثبت می‌کند. علاوه بر این، امواج الکترومغناطیس ساطع شده از سطح زمین در محدوده فروسرخ از ۸/۱۲۵ تا ۱۱/۶۵ میکرون را در پنج باند با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر ثبت می‌کند (Abrams, 2000). محدوده بانندی سنجنده استر در شکل ۳ ارائه شده است. با توجه به اینکه تصاویر سنجنده استر در طول موج‌های متعددی برداشت می‌شوند، این امکان وجود دارد که تفکیک سنگ‌شناسی به نحو آشکاری انجام شود. یکی از ویژگی‌های بارز تصاویر استر قدرت تفکیک بالای آن در مقایسه با لندست است (Gupta, 2017).

(Safari et al., 2018; Langford, 2015). در ادامه مختصر به معرفی ماهواره‌های انتخابی پرداخته شده است.

### ماهواره لندست ۸

آخرین سری از ماهواره‌های لندست، لندست ۸ است که از سال ۲۰۱۳ شروع به کار کرد و هم‌اکنون در ارتفاع ۷۰۵ کیلومتری با مدار خورشید آهنگ به دور زمین می‌چرخد. این ماهواره دارای دو سنجنده OLI و TIRS و سنجنده OLI این ماهواره دارای ۱۱ باند است. این سنجنده تصاویری با تفکیک متوسط ۱۵ تا ۱۰۰ متر از سطح زمین و مناطق قطبی فراهم می‌آورد. سنجنده‌های OLI و TIRS ماهواره لندست ۸ نسبت سیگنال به نویز (SNR) را در عملکرد رادیومتریکی بهبود بخشیده‌اند که این مسئله در نتیجه افزایش قدرت تفکیک رادیومتریکی این تصاویر نسبت به تصاویر سنجنده پیش از خود یعنی ETM+ است (Irons et al., 2012). محدوده بانندی ماهواره لندست در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳. مقایسه محدوده بانندی تصاویر ماهواره‌های Landsat8 و ASTER

### پردازش داده‌های ماهواره‌ای<sup>۱</sup>

برای داشتن دید کلی از منطقه، ابتدا باید تصویری با دید حقیقی از هر منطقه تهیه کرد. برای ایجاد تصاویر دید حقیقی باید باندهایی از یک سنجنده که در محدوده طیفی رنگ‌های طبیعی اصلی (قرمز، سبز و آبی) قرار دارند، انتخاب و هر کدام در کانال رنگی اصلی خود قرار داده شوند (Sekandari et al., 2020).

### پیش‌پردازش داده‌های ماهواره‌ای

پیش از پردازش داده‌ها و استخراج اطلاعات، برای حذف اثرات جمعی جوی (پراکندگی) از روش کاهش تاریکی<sup>۲</sup> و سپس برای حذف اثرات ضربی جوی از الگوریتم باقیمانده‌های لگاریتمی<sup>۳</sup> استفاده شد. این الگوریتم در حقیقت نوعی روش کالیبراسیون است که تأثیرات جو، اثر سنجنده، و توپوگرافی را تا حد زیادی کاهش و تصحیح قابل قبولی بر روی تصاویر انجام می‌دهد (Ayoobi and Tangestani, 2017).

1. Visible Near Infrared (VNIR)  
2. Short Wave Infrared (SWIR)  
3. Dark subtract  
4. Log residuals

## بارسازی ساختارهای خطی و شکستگی‌ها

تصاویر ماهواره‌ای به دلیل میدان دید وسیع و توان تفکیک بالا در تشخیص ساختارهای زمین‌شناسی کاربرد وسیعی دارند. گسل‌ها و شکستگی‌ها ساختارهای خطی هستند که به عنوان خطواره در تصاویر ماهواره‌ای شناخته می‌شوند. خطواره در تصاویر ماهواره‌ای به صورت یک عنصر خطی مستقیم و قابل رویت در سطح زمین تعریف می‌شود که نشانگر پدیده‌های زمین‌شناختی زمین‌ریخت‌شناسی است (Ahmadi and Pekkan, 2021).

گسل‌ها و شکستگی‌ها از جمله عوامل موثر در تشکیل ذخایر معدنی هستند، زیرا محلول‌های گرمایی حاوی عناصر کانسارساز از طریق این شکستگی‌ها به سطح زمین راه می‌یابند. بنابراین بررسی آنها می‌تواند در شناسایی مناطق مستعد کانی‌سازی مفید و موثر باشد. از طرفی مطالعات متالورژی بدون در نظر گرفتن این ساختارهای خطی امکان‌پذیر نخواهد بود. به همین منظور، از تصاویر ماهواره‌ای اس‌تر و تصاویر گوگل برای بررسی موقعیت گسل‌ها و شکستگی‌های موجود در منطقه مورد مطالعه استفاده شد. بارسازی خطواره‌های منطقه با استفاده از فیلتر بالاگذر انجام شد و پس از ارزیابی موقعیت و شکل ظاهری خطواره‌های تشخیص داده شده و تفکیک آنها از دیگر ساختارهای خطی، این خطواره‌ها در محیط نرم‌افزار ARC GIS به صورت رقومی رسم شدند. در مرحله بعد مدل‌سازی رستر از لایه ساختارهای خطی در محیط نرم‌افزار ARC GIS با استفاده از روش Density رسم شد.

## مدل لایه‌های شاهد اطلاعاتی در منطقه مورد مطالعه

پتانسیل‌یابی مواد معدنی در منطقه مورد بررسی با استفاده از روش منطق فازی انجام شد. در مدل‌سازی فازی، نقشه‌های شاهد فازی برای ایجاد یک نقشه با مقادیر پیش‌گویانه فازی با هم ترکیب‌شده تا نواحی هدف برای اکتشافات بعدی ذخایر معدنی شناسایی شوند (Pazand and Hezarkhani, 2018; Zhang et al., 2017).

کانی‌های حاوی هیدروکسیل همچون کائولینیت، مونت‌موریلونیت، ایلیت و دیگر کانی‌های رسی و سیلیکات‌های ورقه‌ای و نیز اکسیدهای آهن نیز به شکل کانی‌هایی چون همتایت، لیمونیت و گوتیت از گسترده‌ترین محصولات دگرسانی هستند. مطالعات متعدد نشان داده است که تصاویر ماهواره‌ای اس‌تر به دلیل دارا بودن باندهای طیفی متعدد در محدوده فرورسرخ و طول موج کوتاه قابلیت زیادی در شناسایی مناطق رسی دارند (Fatima et al., 2017). برای شناسایی واحدهای مختلف سنگی و دگرسانی‌ها باید نمایش موارد فوق با استفاده از رنگ‌های مختلف صورت گیرد تا قابلیت تفکیک و شناسایی برای بیننده فراهم کند. به همین دلیل از روش ترکیبات رنگی کاذب برای شناسایی و تفکیک زون‌های دگرسانی استفاده می‌شود (Noori et al., 2019).

تحلیل مولفه‌های اصلی روشی مبتنی بر بردارهای ویژه است. با استفاده از مقادیر ویژه و بردارهای ویژه، جهت‌هایی با بیشینه تغییرپذیری شناسایی شده و سپس با تعریف متغیرهای جدید ابعاد متغیرها کاهش داده می‌شود. در این روش، رابطه بین پاسخ‌های طیفی کانی‌های هدف و مقادیر عددی استخراج شده از ماتریس بردار ویژه برای محاسبه تصاویر مؤلفه اصلی به کار گرفته می‌شود. با استفاده از این رابطه، امکان تعیین مکان‌هایی که حاوی اطلاعات طیفی خاص از کانی‌های دارای اکسید آهن و نیز کانی‌های رسی هستند، وجود دارد (Sulemana et al., 2020). در تحلیل مولفه‌های اصلی انتخابی باندهایی با بیشترین جذب و یا بازتاب برای کانی هدف انتخاب می‌شود. شرط انتخاب مولفه‌های مناسب در این روش نیز همانند روش مؤلفه اصلی استاندارد به این صورت است که در ماتریس بردارهای ویژه، باندهای مربوط به جذب و بازتابش کانی‌های هدف به‌طور هم‌زمان دارای بالاترین مقادیر بوده و همچنین این مقادیر ناهم‌علامت نیز باشند (فاطمی و رضایی، ۱۳۹۳).

پس از انجام پردازش‌های ذکر شده، نقشه دگرسانی منطقه تهیه و سپس با روش درون‌یابی فاصله معکوس وزنی از آن یک لایه رستری برای مراحل بعدی تهیه شد.

1. Inverse Distance Weighted (IDW)



است که نشان دهنده کانی‌سازی این عناصر در طبیعت و توزیع غیرنرمال عناصر است (حسنی‌پاک و شرف‌الدین، ۱۳۹۱). گستره عناصر بخصوص برای کبالت، کروم، مس و نیکل بالاتر از حدود پوسته زمین است و نشانگر تغلیظ در سنگ‌های منطقه می‌باشد. این غنی‌شدگی عناصر، به رفتار ژئوشیمیایی عنصر و فاز کانی‌شناختی آن نیز بستگی دارد که در این منطقه، کانی‌های مقاوم را تشکیل داده و به همین دلیل کروم در نمونه‌ها غلظت بالایی را نشان داده است. از سوی دیگر به توجه به بافت زمین‌شناسی و لیتولوژی منطقه مورد مطالعه، می‌توان مقادیر مس، سرب و روی را نیز به عنوان مقادیر بالاتر از حدود متعارف در نظر گرفت.

به منظور تعیین همبستگی و همراهی عناصر اندازه‌گیری شده در رسوبات آبراهه‌ای و رابطه میان عناصر، از آزمون چند متغیره تحلیلی مولفه‌های اصلی PCA استفاده شد. در این آزمون، نتایج آزمون KMO برای داده‌های منطقه ۰/۷۹۸ است که نشان دهنده مناسب بودن این روش برای این مجموعه داده‌هاست. تحلیل مولفه‌های اصلی، چهار مولفه را به دست داده که اینجا به بررسی چهار مولفه اول پرداخته می‌شود. جدول ۲ ماتریس ضرایب مولفه‌های دوران

این نقشه‌های شاهد فازی با استفاده از عملگرهای فازی مناسب تفسیر می‌شوند و نتیجه نهایی آن با دیفازی کردن مجموعه فازی ارائه می‌شود. دیفازی یا فازی‌زدایی روشی برای تبدیل اعداد فازی به اعداد قطعی است. این عملیات باعث می‌شود تا نتایج حاصل از استنتاج فازی به صورتی قابل فهم برای مخاطب ارائه شود.

لایه‌های شاهد از واحدهای زمین‌شناسی، داده‌های ژئوشیمیایی، دگرسانی و خطواره‌های گسلی تهیه شده و با استفاده از عملگر فازی ۷ تلفیق شدند. مقدار استاندارد ۷ در مطالعات اکتشافی ۰/۹ است (Bonham-Carter, 1989). بنابراین مقدار ۷ در این مطالعه ۰/۹ در نظر گرفته شد.

## بحث

### پردازش داده‌های ژئوشیمیایی محدوده مورد مطالعه

جدول ۱ خلاصه پارامترهای آماری نمونه‌های مورد بررسی را ارائه می‌دهد. بررسی این داده‌ها توزیع غیرنرمال را برای بیشتر عناصر در نمونه‌های رسوب برداشته شده نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود پارامتر کشیدگی برای بیشتر عناصر و چولگی برای تعدادی از عناصر بیشتر از ۳

جدول ۱. پارامترهای آماری نمونه‌های محدوده مورد بررسی (مقادیر بر حسب بخش در میلیون)

Element	Min	Max	Mean	SD	Kurtosis	skewness
As	۴٫۹	۲۲٫۸	۹٫۴	۲٫۷	۵	۱٫۷
Ba	۱۲۹	۵۷۵	۱۶۲	۷۴	۳	۲
Co	۷	۶۳۲	۴۴	۸۴	۱۷٫۸	۴
Cr	۵۷	۱۲۱۰	۱۱۳	۱۶۷	۱۱٫۱	۳٫۲
Cu	۱۳	۷۱	۲۵	۷	۵٫۵	۱
Mo	<۰٫۵	۲٫۵	۰٫۷	۰٫۵	-۰٫۳	-۰٫۷
Ni	۲۸	۱۱۶۸	۱۷۷	۱۹۶	۴٫۴	۲٫۲
P	۳۳۹	۷۷۷	۴۲۵	۱۱۳	-۰٫۴	۱
Pb	<۱	۴۶	۱۷	۶	۳٫۳	۱٫۲۳
Sn	۰٫۱۵	۵٫۴	۱٫۶	۰٫۷	۳٫۱	۱٫۳
Sr	۱۵۶	۶۹۴	۱۸۸	۷۸	۷٫۸	۲٫۶
Th	۳٫۶	۱۹٫۷	۵٫۶	۲٫۷	۲	۱٫۴
Ti	<۱۰	۱۳۱۰۰	۱۹۹۴	۲۶۰۰	۰٫۶	۱٫۱
U	<۰٫۵	۳٫۵	۰٫۸	۰٫۹۷	-۱٫۳	-۰٫۷
V	۵۴	۱۹۹	۷۶٫۲۲	۳۰٫۲۴	۱	۱٫۳
W	<۱	۸٫۳	۰٫۷	۱	۲۹٫۸	۵
Zn	۴۶	۱۰۴	۷۰	۱۰	۴	۲٫۸

داده شده را نشان می‌دهد.

**مولفه اول:** معرف غنی‌شدگی عناصر V, Ti, P, U, Th است که وزن بالاتر از ۰/۶ را به خود اختصاص داده‌اند. این عامل و همراهی این عناصر می‌تواند نشان‌دهنده ذخایر رادیواکتیو باشد. همان‌طور که در نتیجه بررسی پارامترهای آماری مشاهده شد، این عناصر احتمال کانی‌سازی قابل‌توجهی را در منطقه نشان نمی‌دهند و به همین دلیل در ادامه مدل‌سازی ذخایر موجود در منطقه، از این عامل چشم‌پوشی می‌شود.

**مولفه دوم:** در این مولفه عناصر Sr و Ba مقادیر بالایی را نشان می‌دهند که در رابطه با کانه‌زایی خاصی نبوده و عناصر قلیایی خاکی هستند که سنگ‌های دارای کلسیم را نشان می‌دهند.

جدول ۲. ماتریس ضرایب مولفه‌های دوران داده شده

	۱	۲	۳	۴
As	-۰/۲۷۵	-۰/۴۴۴	-۰/۵۲۴	-۰/۲۰۷
Ba	-۰/۳۰۱	۰/۸۴۱	۰/۲۸۷	۰/۱۸۹
Co	-۰/۱۴۷	-۰/۴۱۰	-۰/۷۳	۰/۸۶۵
Cr	-۰/۱۷۲	۰/۰۷۸	۰/۱	۰/۸۸۱
Cu	۰/۲	۰/۲۲۸	۰/۶۶۸	۰/۳۰۵
Mo	۰/۵۸۳	-۰/۴۱۲	۰/۱۲۶	-۰/۳۵۲
Ni	-۰/۱۱۷	۰/۰۹۸	-۰/۱۳۸	۰/۸۲۰
P	۰/۹۲۹	-۰/۱۰۴	۰/۰۳۷	-۰/۱۰۶
Pb	۰/۱۵۴	۰/۲۰۷	۰/۸۳۶	۰/۱۱۵
Sn	۰/۴۹۶	-۰/۰۷	۰/۳۵۱	-۰/۰۶۸
Sr	۰/۲۷۱	۰/۸۵۹	۰/۲۳۳	۰/۱۳۲
Th	۰/۸۴۸	-۰/۱۵۹	۰/۲۶۳	-۰/۱۷۲
Ti	۰/۹۳۸	-۰/۱۱۷	۰/۱۲۳	-۰/۱۱۱
U	۰/۹۱۵	-۰/۱۶۶	۰/۲۱۶	-۰/۱۴۴
V	۰/۸۹۴	-۰/۱۱۹	۰/۱۶۶	-۰/۱
W	-۰/۲۰۱	۰/۰۱۴	۰/۲۹	۰/۳۲۱
Zn	۰/۲۵۱	۰/۱۳۱	۰/۷۰۴	-۰/۰۱

**مولفه سوم:** عناصر Zn, Pb, Cu دارای ضریب مولفه‌ای بالایی هستند که در نگاه اول می‌توانند در ارتباط با تیپ کانسارهای پورفیری، اپی‌ترمال و یا چندفلزی باشد، اما با توجه به نبود میزبان نفوذی اسیدی تا حدواسط این احتمال رد می‌شود. با توجه به اینکه سنگ میزبان منطقه واحدهای اولترامافیک هستند، لذا این دسته می‌تواند نشانگر

سولفیدهای توده‌ای نوع قیرس با میزبان بازالتی نیز باشد. **مولفه چهارم:** معرف غنی‌شدگی Ni, Cr, Co است، این عامل به بی‌هنجاری این عناصر در توده‌های اولترامافیک منطقه نسبت داده می‌شود که به سری‌های افیولیتی و آمیزه رنگین وابسته هستند. در شکل ۴ نقشه ژئوشیمیایی تهیه شده از عناصر مولفه‌های دوم تا چهارم آورده شده است. همبستگی عناصر Ni-Cr-Co و Ti-V، در مولفه‌های بالا با نتایج تحقیقات شایسته‌فر و همکاران (۱۳۸۹) که با آنالیز ۴۳ عنصری ICP-MS از ۸۱۰ نمونه برداشت شده از منطقه سربیشه انجام شده، مشابه است.

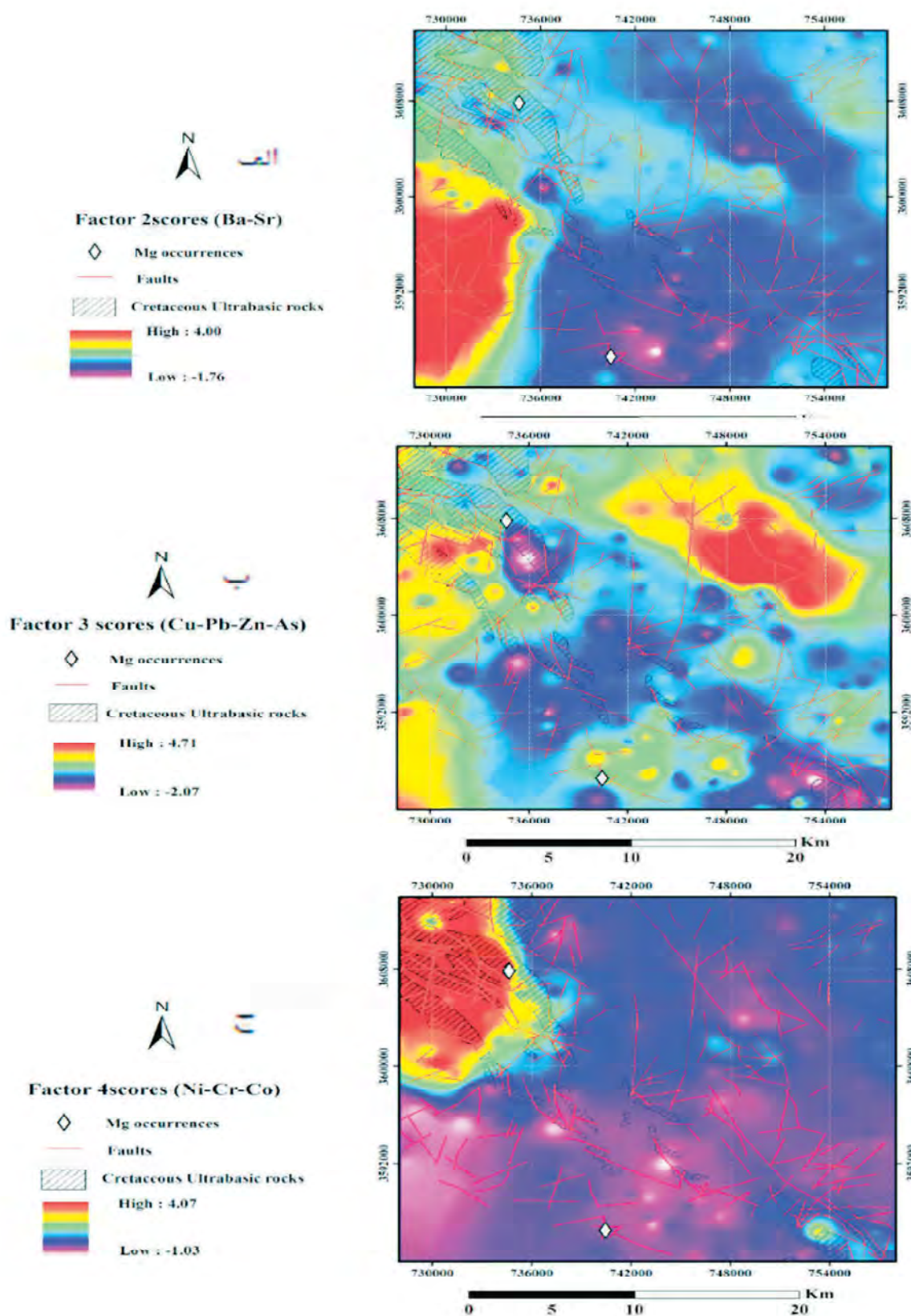
## پردازش داده‌های ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه

### ترکیب رنگی حقیقی

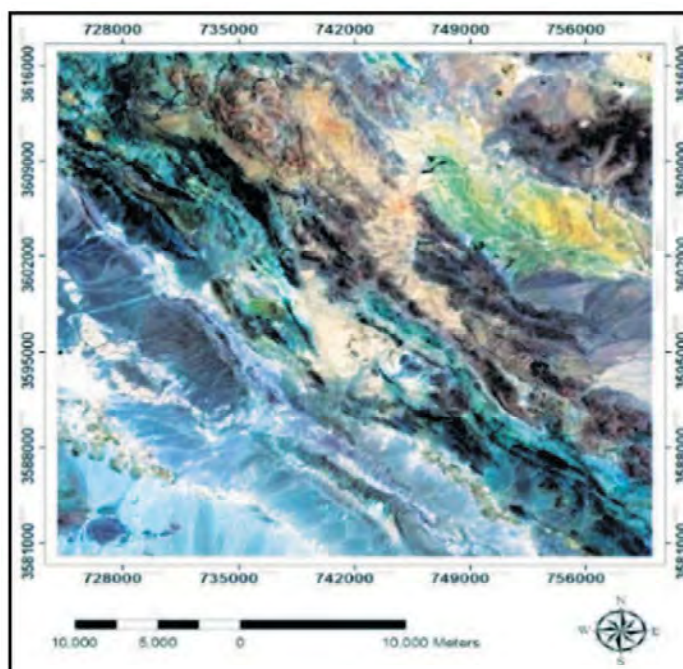
برای داشتن دید کلی از منطقه باندهای ۴ و ۳ و ۲ سنجنده OLI لندست ۸ به ترتیب در کانال‌های قرمز، سبز و آبی قرار گرفت تا تصویر ترکیب رنگی RGB=۴۳۲ ماهواره لندست ۸ در شکل ۵ برای نمایش تصویر رنگی حقیقی منطقه ایجاد شود. واحدهای تیره رنگ سنگ‌های ماگمایی منطقه و بخش‌های روشن شامل رسوبات و سنگ‌های عهد حاضر هستند.

### ترکیب رنگی کاذب

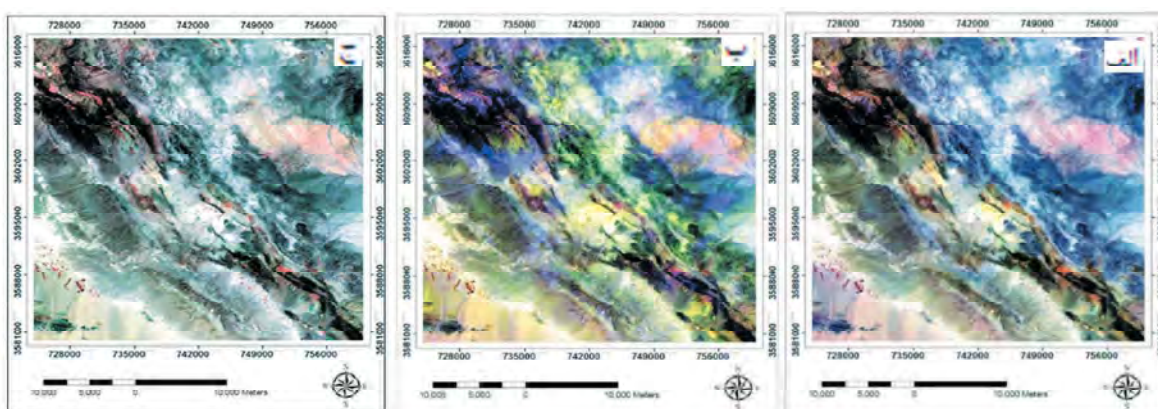
برای ایجاد تصاویر ترکیب رنگی منطقه و شناسایی زون‌های دگرسانی مرتبط با کانی‌سازی در منطقه از باندهای ۴، ۶ و ۸ سنجنده استر به ترتیب در کانال‌های قرمز، سبز و آبی، استفاده شد (احمدی و قره شیخ بیات، ۱۴۰۰). در این ترکیب رنگی RGB=468 ماهواره استر، مناطق دگرسانی پروپیلیتیک به رنگ سبز و دگرسانی آرژیلیک به رنگ صورتی نشان داده شده است. (Shirazi et al., 2018) نیز در مطالعات خود بر روی سربیشه از این ترکیب رنگی استفاده کرده است. نتیجه این ترکیب رنگی در شکل ۶-الف ارائه شده است. به همین ترتیب، ترکیب رنگی RGB=461 استر برای نمایش مناطق دگرسانی فیلیک-آرژیلیک (صورتی و زرد متمایل به صورتی) اکسیدهای آهن (آبی) (شکل ۶-ب) و ترکیب RGB=۴۵۶ استر برای نمایش مناطق دگرسانی



شکل ۴. الف) نقشه بی‌هنجاری ژئوشیمیایی عناصر عامل دوم، ب) نقشه بی‌هنجاری ژئوشیمیایی عناصر عامل سوم نشانگر حضور احتمالی ذخایر سولفید توده‌ای، ج) نقشه بی‌هنجاری ژئوشیمیایی عناصر عامل چهارم نشانگر ذخایر کرومیت موجود در منطقه



شکل ۵. ترکیب رنگی حقیقی لندست ۸ RGB=432



شکل ۶. الف) ترکیب رنگی RGB=468 سنجنده استر برای نمایش مناطق دگرسانی پروپیلیتیک (سبز کدر) و آرژلیک (صورتی)، ب) ترکیب رنگی RGB=461 سنجنده استر برای نمایش مناطق دگرسانی فیلیک-آرژلیک (صورتی و زرد متمایل به صورتی) اکسیدهای آهن (آبی)، ج) ترکیب رنگی RGB=456 سنجنده استر برای نمایش مناطق دگرسانی آرژلیک (قرمز)-آرژلیک پیشرفته (صورتی)

آرژلیک (قرمز)-آرژلیک پیشرفته (صورتی) (شکل ۶-ج) مورد استفاده قرار گرفت. همان‌طور که در تصاویر روش ترکیبات رنگی کاذب دیده می‌شود، هرکدام از زون‌های دگرسانی با یک رنگ مشخص شده‌اند که تفکیک و شناسایی محدوده دقیق آنها را فراهم می‌کند.

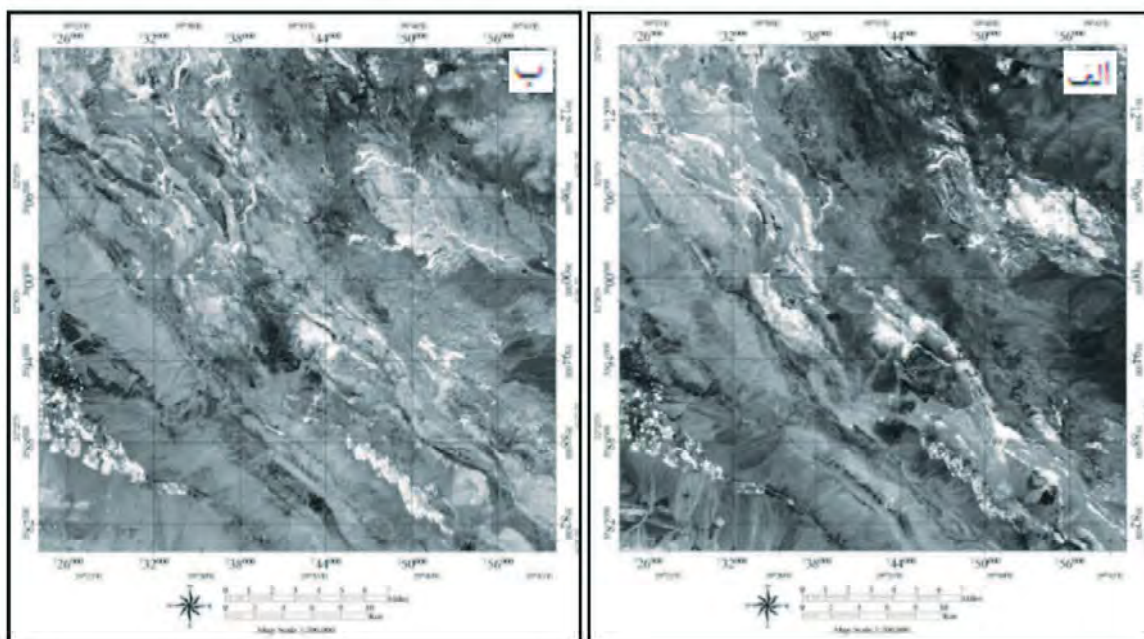
روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای انجام تحلیل مولفه اصلی انتخابی از باندهای ۲-۵-۶-۷-۸ برای تعیین دگرسانی کانی‌های رسی استفاده شد (جدول ۳ بالا). با بررسی مولفه‌های مختلف و با توجه به شرط انتخاب مولفه مناسب، مشخص شد که مولفه اصلی چهارم بهترین گزینه برای تشخیص مناطق دگرسانی رسی است. در این مولفه، کانی‌های رسی در باند ۶ بیشترین جذب و در باند ۷ بیشترین بازتابش را دارند، این مولفه معکوس شد تا در تصویر حاصل پیکسل‌های روشن نشانگر کانی‌های رسی باشند (شکل ۷-الف).

همچنین از باندهای ۲-۴-۵-۶ برای تعیین مناطق

دگرسانی کانی‌های اکسید آهن استفاده شد و با بررسی مولفه‌های مختلف و با در نظر گرفتن شرط انتخاب مولفه مناسب، مولفه اصلی چهارم برای شناسایی اکسیدهای آهن انتخاب شد (جدول ۳ پایین). در این مولفه، کانی‌های اکسید آهن در باند ۴ بیشترین جذب و در باند ۲ بیشترین بازتابش را دارند. پیکسل‌های روشن حاصل از معکوس مولفه چهارم نشانگر کانی‌های اکسید آهن هستند (شکل ۷-ب).

جدول ۳. نمایش نتایج روش کروسا برای کانی‌های رسی در بالا و نتایج روش کروسا برای نمایش اکسید آهن در پایین

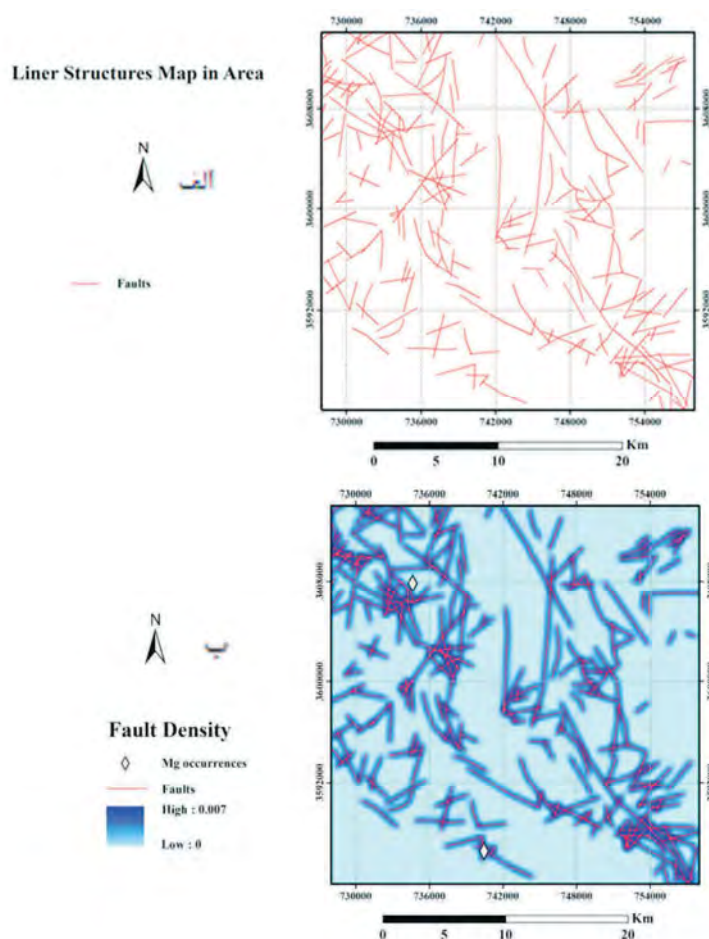
Eigenvector	Band 2	Band 5	Band 6	Band 7
PC1	۰/۲۰۲۷۳۹	۰/۴۹۹۸۳۳	۰/۵۹۱۶۳۴	۰/۵۹۹۱۹۴
PC2	۰/۰۸۴۰۱۹	۰/۸۴۷۷۷۴	۰/۳۵۷۳۳	۰/۳۸۲۸
PC3	۰/۰۹۶۷۷۱	۰/۱۷۳۸۳۲	۰/۱۸۲۵۰۳	۰/۰۲۲۲۲
PC4	۰/۰۱۲۳۹۷	۰/۰۳۵۰۵	۰/۰۶۹۹۲۷	۰/۰۳۱۵۴
Eigenvector	Band 2	Band 4	Band 5	Band 6
PC1	۰/۲۲۸۸۵۶	۰/۴۶۸۴۱	۰/۵۶۰۶۱۲	۰/۶۴۳۳۷۵
PC2	۰/۰۱۱۷۲۲	۰/۰۲۳۹۵۱	۰/۰۶۰۹۱۶	۰/۰۷۴۶۸۷
PC3	۰/۰۳۱۵۴	۰/۰۴۷۳۵۶۷	۰/۰۵۰۸۰۹	۰/۰۱۵۲۱۷
PC4	۰/۰۶۶۲۹۱۶	۰/۰۷۰۶۳۷	۰/۰۲۳۲۶۷۲	۰/۰۷۱۳۶۹



شکل ۷. الف) مولفه اصلی چهارم، پیکسل‌های روشن مقادیر کانی‌های رسی، ب) مولفه اصلی چهارم، پیکسل‌های روشن بالاترین مقادیر اکسید آهن

### بارسازی ساختارهای خطی و شکستگی‌ها

همان‌طور که در بخش روش‌ها توضیح داده شد، نقشه خطواره‌گی با روش‌های سنجش از دور تهیه شد. شکل ۸-الف و ب به ترتیب نقشه رقومی خطواره‌ها و نقشه چگالی آنها را نشان می‌دهد.



شکل ۸. الف) نقشه رقومی خطواره‌های گسلی، ب) نقشه چگالی خطواره‌ها

و قابل بررسی در کانی‌سازی منطقه واحدهای اولترامافیک هستند و این واحدها نمی‌توانند میزبان کانی‌سازی این عناصر باشند، به همین دلیل این مولفه در ادامه از مسیر مدل‌سازی حذف می‌شود. برای مدل‌سازی ذخایر منیزیت نیز به دلیل شباهت شرایط نهشته شدن ذخایر با عناصر مولفه چهارم از نقشه مولفه چهارم ژئوشیمیایی استفاده شد (شکل ۱۰).

#### آماده‌سازی لایه شاهد گسل‌ها

لایه شاهد دیگری که در مدل‌سازی پتانسیل‌یابی مواد معدنی در ناحیه مورد مطالعه بررسی شد، لایه گسل‌ها و شکستگی‌های موجود در منطقه است (شکل ۱۱). بسیاری از مناطق کانی‌سازی در امتداد زون‌های گسلی رخ می‌دهد. از این رو مطالعه ساختارهای خطی و گسل‌ها به عنوان یک لایه اطلاعاتی شاهد بسیار مهم است، البته این مسئله نیز

#### فازی‌سازی لایه‌های شاهد اطلاعاتی در منطقه مورد مطالعه

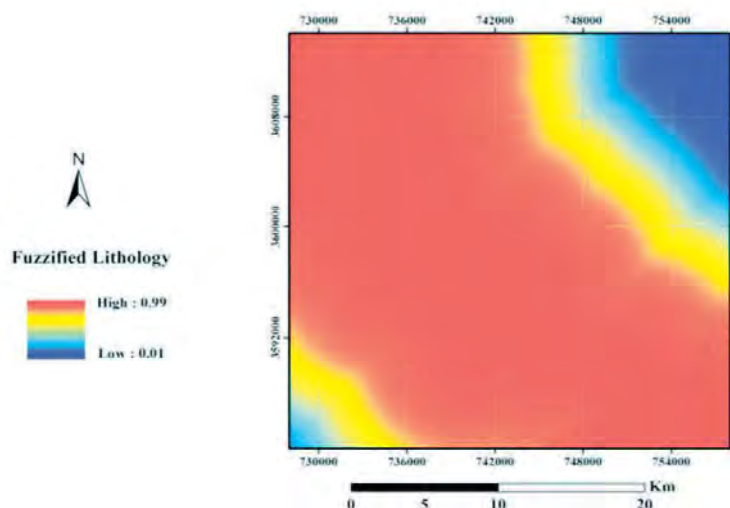
##### لایه شاهد اطلاعاتی واحدهای زمین‌شناسی

مهم‌ترین عامل در وقوع یک پتانسیل معدنی در هر منطقه واحدهای زمین‌شناسی مطلوب و مساعد کانی‌سازی است. با توجه به زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و بررسی واحدهای سنگی مستعد کانی‌سازی، واحدهای اولترامافیک به عنوان سنگ میزبان موثر در کانی‌سازی مشخص شد که نقشه رقومی شده این واحدهای سنگی در محیط نرم‌افزار ARC GIS تهیه شد (شکل ۹).

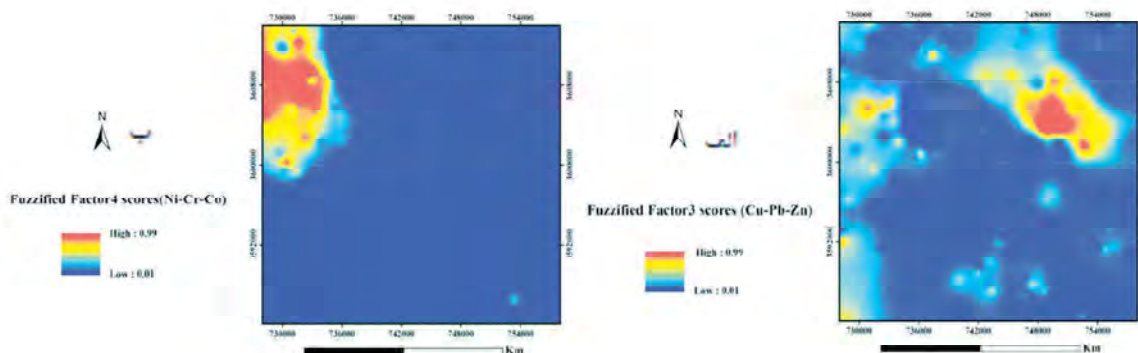
##### لایه شاهد اطلاعاتی داده‌های ژئوشیمیایی

همان‌طور که قبل‌تر بیان شد عناصر مولفه اول ژئوشیمیایی در بررسی‌های آماری کانی‌سازی قابل‌توجهی را نشان ندادند. از طرفی با توجه به اینکه واحدهای سنگی مهم

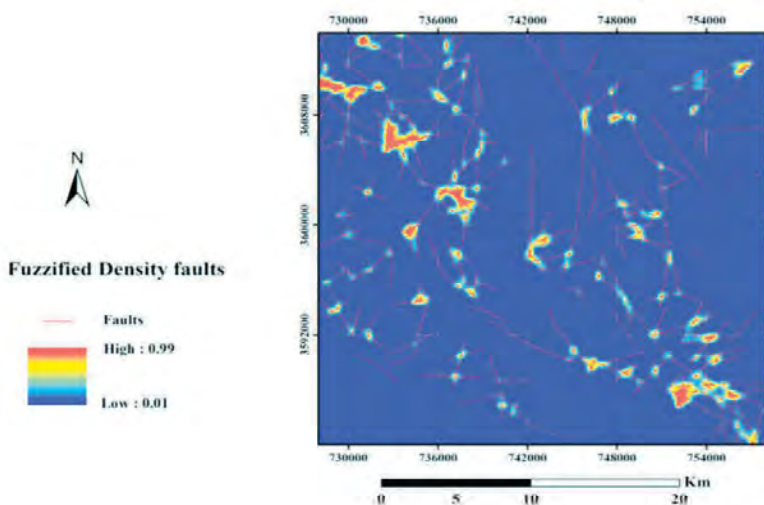
قابل توجه است که آثار گسلی همیشه با بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی منطبق نیست و این به دلیل فرایندهای زمین‌شناسی مؤثر در توزیع بی‌هنجاری‌ها و کانی‌سازی‌ها است (Wang et al., 2012). تلاقی و تراکم شکستگی‌ها در جنوب‌شرقی، مرکز و شمال‌غربی گستره بیشتر است و در شکل ۱۱ به رنگ قرمز قابل مشاهده است.



شکل ۹. لایه شاهد واحدهای الترامافیک



شکل ۱۰. الف) لایه شاهد ژئوشیمیایی عناصر مولفه سوم، ب) لایه شاهد ژئوشیمیایی عناصر مولفه چهارم

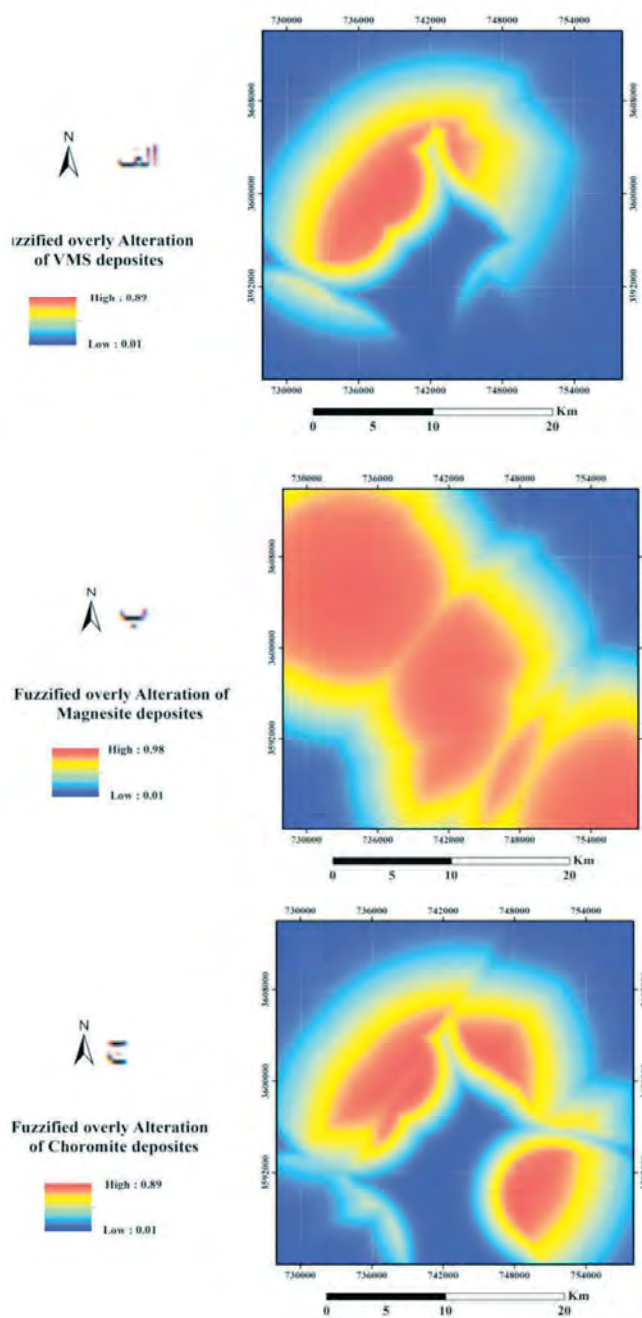


شکل ۱۱. لایه شاهد خطواره‌های گسلی

### لایه شاهد دگرسانی‌ها

موجود در هر مجموعه دگرسانی آماده می‌شود، لذا برای به دست آوردن یک نقشه واحد برای دگرسانی مرتبط با هر نوع کانی‌سازی ابتدا نقشه حاصل از هر کانی موجود در دگرسانی به صورت فازی تبدیل می‌شود، و سپس با استفاده از عملگر AND نقشه‌های حاصل با هم تلفیق شده تا برای هر نوع ذخیره معدنی یک نقشه دگرسانی برای تلفیق و مدل‌سازی داشته باشیم.

لایه شاهد اطلاعاتی آخر که در پتانسیل‌یابی ذخایر معدنی حائز اهمیت است، لایه دگرسانی‌های مرتبط با کانی‌سازی است (شکل ۱۲). دگرسانی‌های موجود در منطقه که در ارتباط با کانی‌سازی هستند با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور بارزسازی شده است. قابل توجه است که چون نقشه دگرسانی‌ها به صورت نقشه کانی‌های



شکل ۱۲. الف) لایه شاهد دگرسانی مرتبط با ذخایر سولفید توده‌ای، ب) لایه شاهد دگرسانی مرتبط با ذخایر منیزیت، ج) لایه شاهد دگرسانی مرتبط با ذخایر کرومیت



می‌شوند و در منطقه مورد مطالعه احتمال وجود آنها می‌رود (Guilbert and Park, 2007).

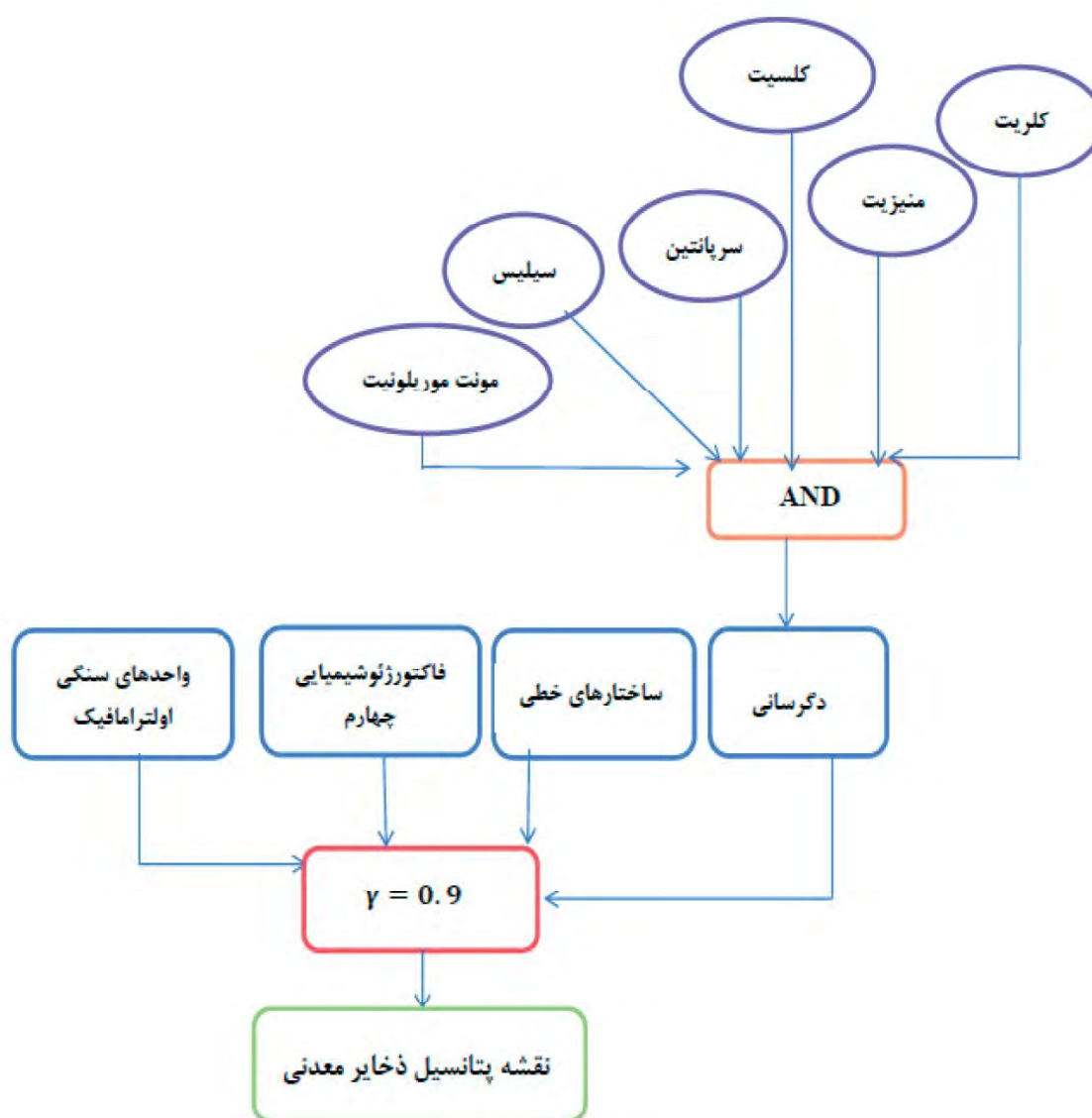
مدل مفهومی ذخایر کرومیت در شکل ۱۳ ارائه شده است. برای تهیه لایه دگرسانی مرتبط با ذخیره کرومیت از کانی‌های کلریت، منیزیت، کلسیت، سرپانتین، سیلیس و مونت‌موریلونیت استفاده شد. لایه شاهد دگرسانی به همراه سه لایه شاهد دیگر که در بخش قبل تهیه شدند با با عملکرد فازی ۷ و استاندارد ۰/۹ تلفیق شدند.

نقشه فازی هم پوشانی و نقشه دی‌فازی برای جانمایی ذخایر احتمالی کرومیت در شکل ۱۴ ارائه شد.

## تلفیق لایه‌های اطلاعاتی و مدل‌سازی متالوژنی ذخایر معدنی موجود در منطقه

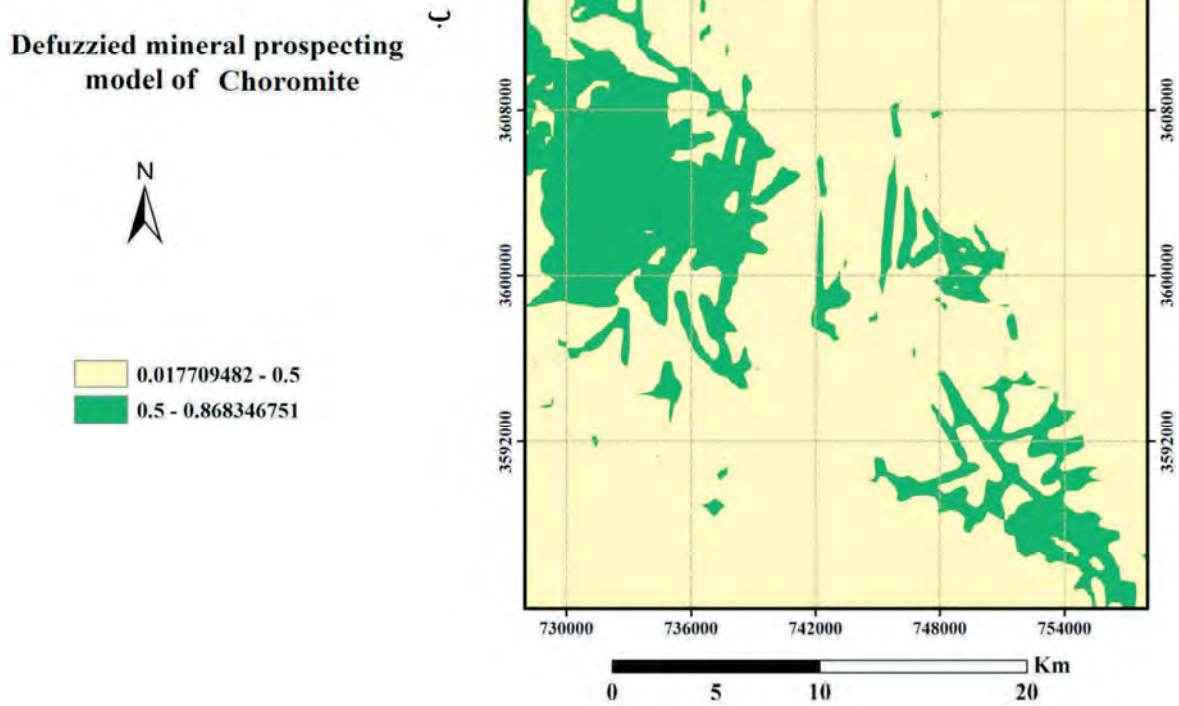
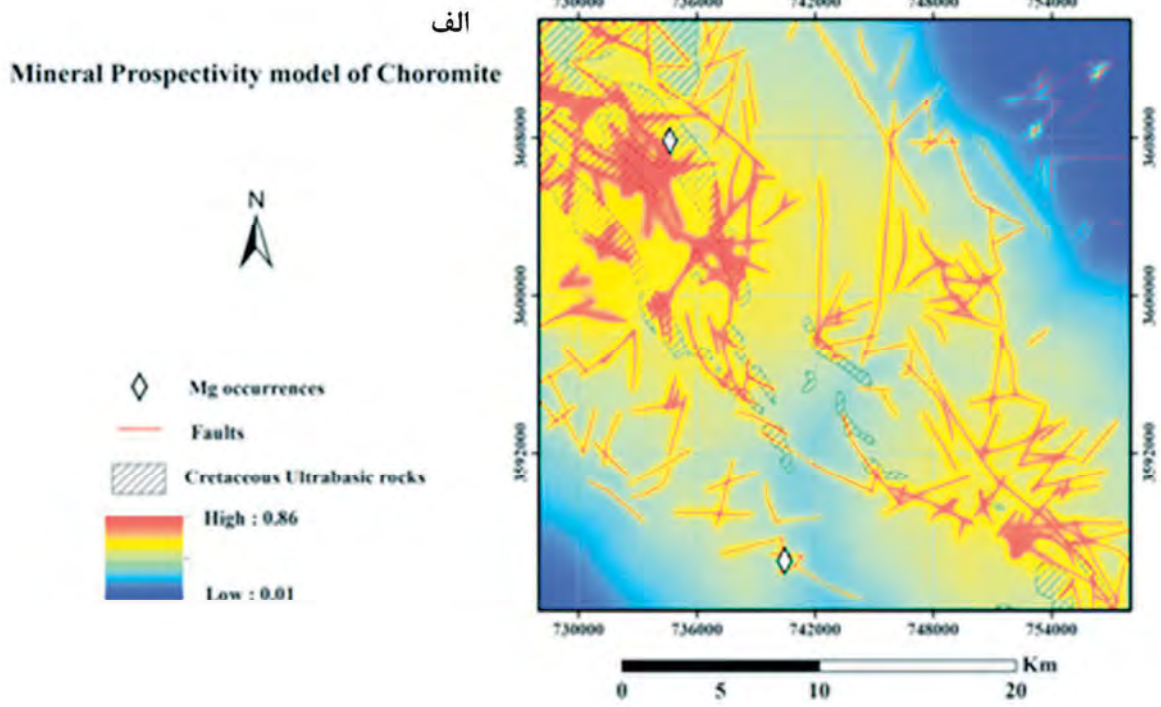
### مدل‌سازی و پتانسیل یابی ذخایر کرومیت

کانسنگ‌های کرومیت به دو صورت در سنگ‌های آذرین مافیک و اولترامافیک مشاهده می‌شود، یکی در توده‌های نفوذی مافیک لایه‌ای و دیگری در افیولیت‌ها و پریدوتیت‌های آلیبی. افیولیت‌ها شامل جایگزینی زمین‌ساختی برش‌هایی از گوشته بالایی و پوسته اقیانوسی سنگ‌های مافیک و اولترامافیک هستند که در کانون‌های گسترش بستر اقیانوس‌ها در داخل و یا روی پوسته قاره‌ای تشکیل



شکل ۱۳. مدل مفهومی ذخایر کرومیت

تلفیق داده‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی، دگرسانی و سنجش از دور ...

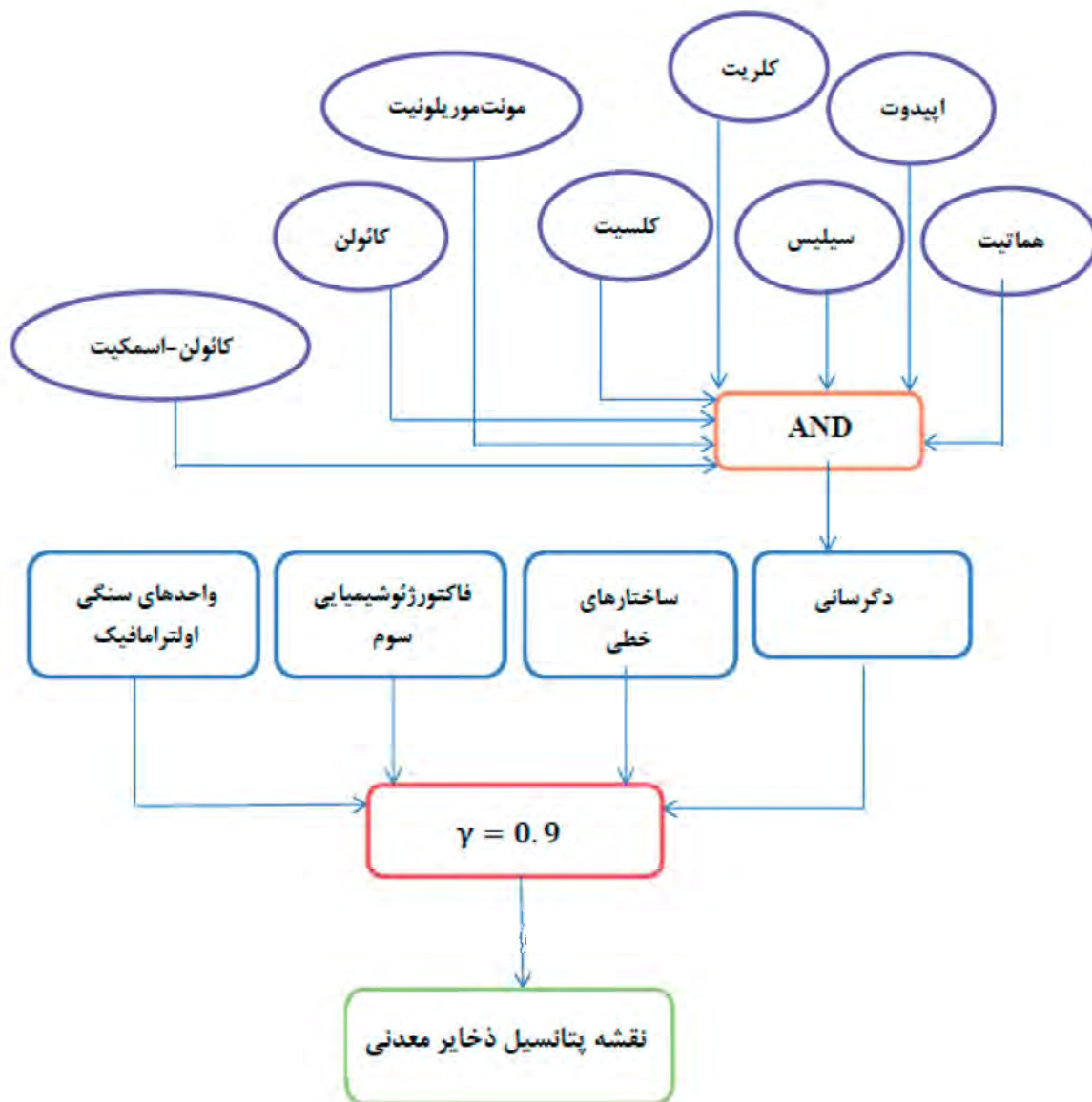


شکل ۱۴. الف) نقشه همپوشانی لایه‌های شاهد مرتبط با دخایر کرومیت، ب) دی‌فازی شده (مناطق با پتانسیل بالا به رنگ سبز هستند)

### مدل سازی و پتانسیل یابی ذخایر سولفید توده‌ای

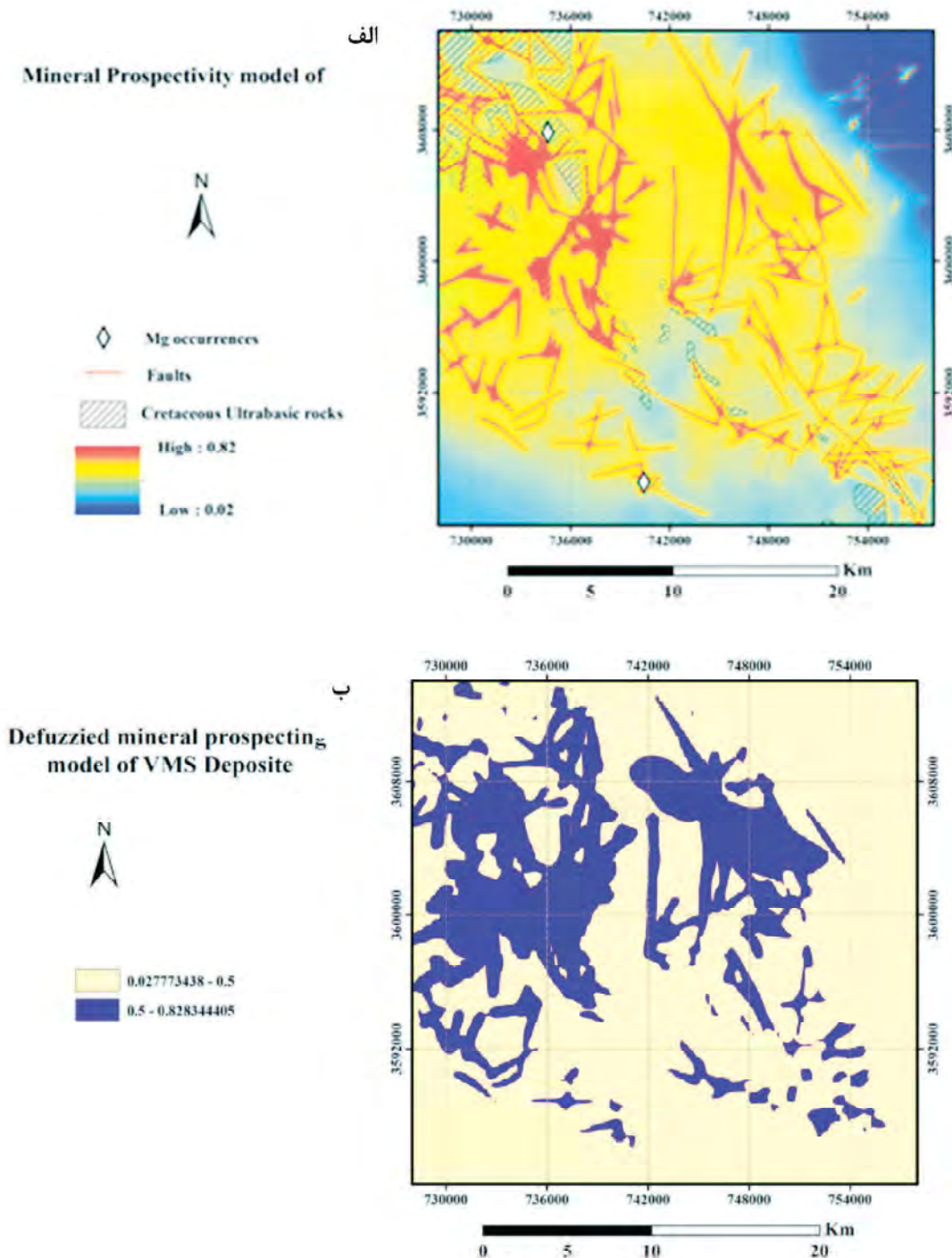
عملکرد آب‌های اقیانوسی به عنوان سیال کانسار ساز بر روی سنگ میزبان بازالتی نهشته می‌شوند و محتوی فلزی آنها عبارتند از مس، سرب و روی و همچنین گاهی دارای مقادیر کمی طلا نیز هستند (Mousivand et al., 2018). کانی‌های موثر در دگرسانی مربوط به ذخایر VMS شامل: هماتیت، اپیدوت، سیلیس، کلریت، کلسیت، مونت‌موریلونیت، کائولن و اسمکتیت است (شکل ۱۵).

این کانسارها یکی از منابع اصلی مس، روی، سرب و نقره و طلا هستند که بسته به سنگ میزبان، موقعیت زمین‌ساختی و سن به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند. با توجه به اینکه سنگ‌های میزبان کانی‌سازی در این منطقه واحدهای مافیک و اولترامافیک هستند، ذخایر VMS در صورت وجود در این منطقه، بر اساس تقسیم‌بندی نوع می‌توانند جزو ذخایر VMS (Hutchinson, 1973) قبری باشند. ذخایر سولفید توده‌ای نوع قبری، بر اثر



شکل ۱۵. مدل مفهومی ذخایر VMS

اگرچه ساختارهای خطی برای ذخایر سولفید توده‌ای که متاثر از واحدهای سنگی منطقه و سیالات کانسار ساز اقیانوسی می‌باشند چندان قابل توجه نیستند، اما چون در فرایند مدل‌سازی به روش منطق فازی وزن تمام لایه‌ها به صورت یکسان اعمال می‌شود، لایه شاهد ساختارهای خطی نیز به عنوان یکی از لایه‌های موثر در مدل‌سازی متالوژنی مورد استفاده قرار گرفت (Hosseini-Dinani and Yazdi, 2021). با تلفیق لایه‌های شاهد که در بخش قبل ایجاد شد، نقشه فازی همپوشانی و نقشه دی‌فازی برای جانمایی ذخایر احتمالی VMS تهیه شد (شکل ۱۶).



شکل ۱۶. الف) نقشه همپوشانی لایه‌های شاهد مرتبط با ذخایر سولفید توده‌ای، ب) نقشه دی‌فازی شده (مناطق با پتانسیل بالا به رنگ بنفش هستند)

## پتانسیل یابی منیزیت

پیدایش منیزیت از نظر تئوریک به سه عامل وابسته است (تقریبی ۱۳۷۸):

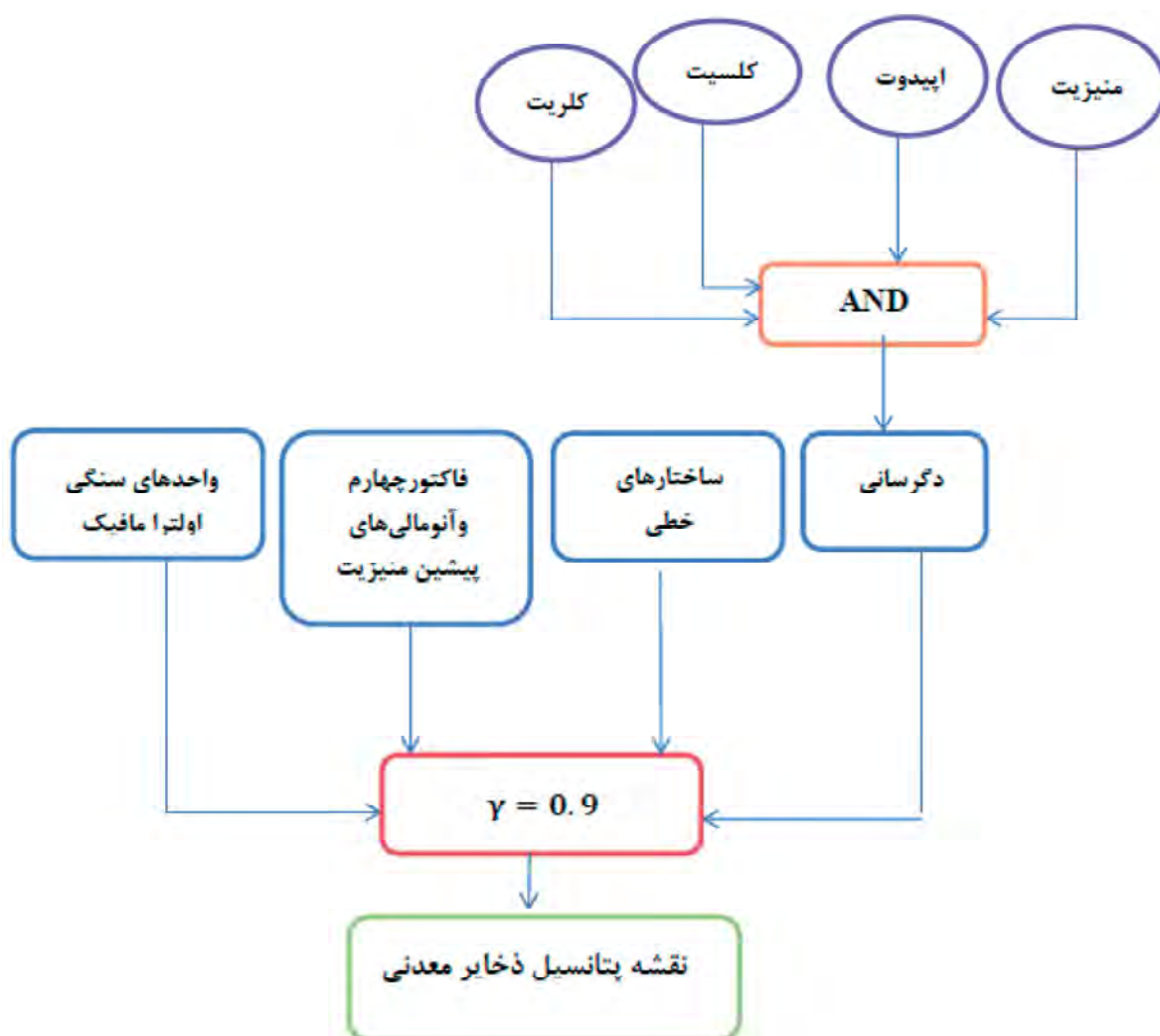
الف- سنگ مادر مناسب که تأمین کننده میزان بالایی منیزیم باشد. در اصل این سنگها اولترامافیک و سریانتینیت هستند.

ب- مناطق و ساختارهای مناسب برای نهشته شدن منیزیت، گسل های اصلی و فرعی فراوان منطقه شرق ایران بستر مناسب برای کانی سازی منیزیت را فراهم می آورند.

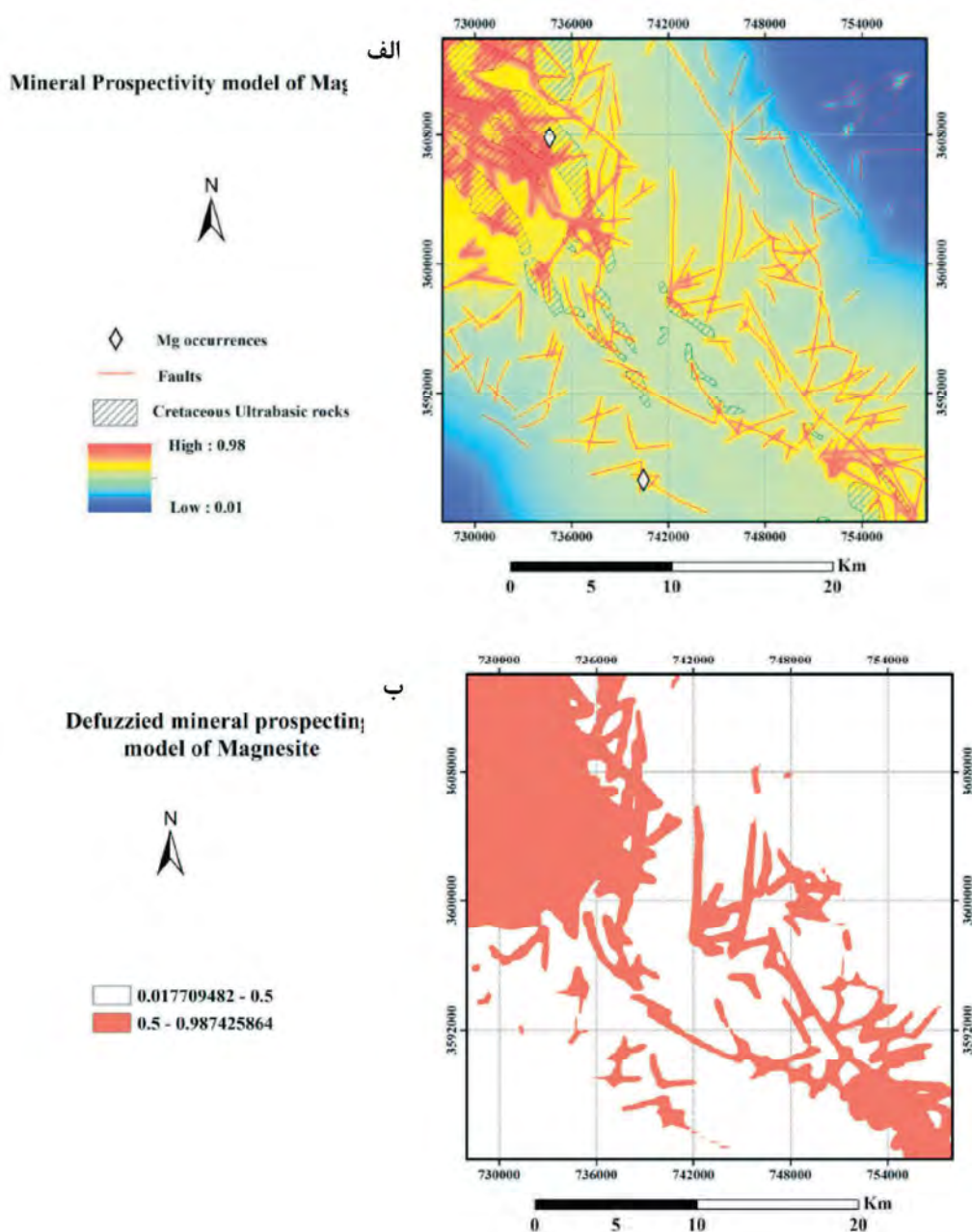
ج- وجود منبعی از انرژی گرمایی که فعال شدن محلول ها، بالا رفتن گرادیان ژئوترمال و سرعت بخشیدن و افزایش دادن واکنش محلول ها با سنگها را میسر می سازد.

کانی های دگرسانی منیزیت، اپیدوت، کلسیت و کلریت برای تهیه لایه شاهد دگرسانی تلفیق شدند. لایه شاهد ساختارهای خطی، فاکتور چهارم و واحدهای سنگی الترامافیک با مقدار استاندارد  $\gamma = 0.9$  تلفیق شدند (شکل ۱۷).

در شکل ۱۸ نقشه فازی هم پوشانی و نقشه دی فازی برای جانمایی ذخایر احتمالی منیزیت ارائه شده است.



شکل ۱۷. مدل مفهومی ذخایر منیزیت



شکل ۱۸. الف) نقشه همپوشانی لایه‌های شاهد مرتبط با ذخایر منیزیت، ب) نقشه دی‌فازی شده (مناطق با پتانسیل بالا به رنگ نارنجی هستند)

## نتیجه‌گیری

عناصر Ba, Sr, V, Ti, P, U, Th در مولفه اول عناصر، در مولفه دوم، عناصر Zn, Pb, Cu مولفه سوم عناصر، Ni, Cr, Co در مولفه چهارم مشخص شدند که با توجه به دانش قبلی گروه چهارم به عنوان عناصر دارای پتانسیل در منطقه در نظر گرفته شدند. نتیجه استفاده از روش‌های سنجش از دور از جمله ترکیب باندی، نسبت باندی و تحلیل مولفه‌های اصلی کروستا، بارسازی مناطق دگرسانی

بر اساس مطالعات اولیه زمین‌شناسی، واحدهای مافیک و الترامافیک منطقه موثرترین واحد سنگی برای تشکیل ذخایر معدنی تشخیص داده شد. از آنجا که مطالعات در فاز اولیه است برای ایجاد یک ایده کلی، مطالعات ژئوشیمیایی رسوب آبراهه‌ای و تفسیر آنها به روش تحلیل مولفه‌های اصلی انجام گرفت. در نتیجه مطالعات ژئوشیمیایی چهار گروه از

- کشور. ۱۵.
- حسنی‌پاک، ع. و شرف‌الدین، م.، ۱۳۹۱. تحلیل داده‌های اکتشافی. انتشارات دانشگاه تهران. ۱۰۱.
- حیدریان دهکردی، ن.، نیرومند، ش.، ادیب، ش.، تاج‌الدین، ح. و میرزایی، س.، ۱۴۰۰. زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، دگرسانی و پتانسیل‌سنجی کانسار لخشک، پهنه زمین‌درز سیستان بر مبنای مطالعات ژئوفیزیکی (IP/RS). فصلنامه زمین‌شناسی ایران. ۱۵، ۵۸، ۲۵-۳۹.
- شایسته‌فر، م.، جلالی، م.، دهقانی، ح.، و تقوایی‌نژاد، م.، ۱۳۸۹. پتانسیل‌یابی مواد معدنی با استفاده از پردازش‌های آماری داده‌های ژئوشیمی اکتشافی (مطالعه موردی: برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ سربیشه)، نشریه علمی پژوهشی روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن. ۶-۱۶.
- فاطمی، ب. و رضایی، ی.، ۱۳۹۳. مبانی سنجش از راه دور. انتشارات آزاده. ۳۵۰.
- مجددی، ح.، بومری، م.، و بیابانگرد، ح. ۱۴۰۰. پتروگرافی و ژئوشیمی سنگ‌های آذرین و کانی‌زایی آنتیموان در لخشک، شمال غرب زاهدان، جنوب شرق ایران. فصلنامه زمین‌شناسی ایران. ۱۵، ۵۷، ۸۷-۱۰۶.

- 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(5), 847-859.
- Abrams, M. and Yamaguchi, Y., 2019. Twenty years of ASTER contributions to lithologic mapping and mineral exploration. *Remote Sensing*, 11(11), 1394.
- Ahmadi, H. and Pekkan, E., 2021. Fault-based geological lineaments extraction using remote sensing and GIS-a review. *Geosciences*, 11(5), 183.
- Ayoobi, I. and Tangestani, M. H., 2017. Evaluation of relative atmospheric correction methods on ASTER VNIR-SWIR data in playa environment. *Carbonates and Evaporites*, 32(4), 539-546.
- Babazadeh, S. A. and De Wever, P., 2004. Early Cretaceous radiolarian assemblages from ra-

آرژیلیک، پروپلیتیک، فلیک و کانی‌های آهن‌دار بوده است. همچنین با استفاده از فیلترگذاری بالاگذر، خطواره‌های منطقه رسم شد. در نهایت با تلفیق چهار لایه اطلاعاتی سنگ‌شناسی، ژئوشیمی، دگرسانی و خطوارگی سه نقشه دی‌فازی حاوی اطلاعات مکانی به‌دست آمده است که پس از دی‌فازی‌سازی این تلفیق محدوده‌هایی با بالاترین احتمال وجود ذخایر کرومیت در شمال غربی تا جنوب شرقی گستره، سولفید توده‌ای در شمال غرب تا شمال شرق محدوده و منیزیت غالباً در شمال غرب محدوده سربیشه معرفی شدند. با تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، شناسایی و تایید صحرایی زون‌های دگرسانی و نمونه برداری ژئوشیمی در محدوده‌های مشخص شده، احتمال معرفی ذخیره معدنی اقتصادی امید بخش خواهد بود.

## سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله برای حمایت از این پژوهش، مرهون جناب آقای مهندس بهرام آقا ابراهیمی سامانی هستند که ضایعه دردناک درگذشت ایشان در ماه‌های اخیر موجب تأسف و تألم جامعه علوم زمین کشور شد. از درگاه خداوند متعال برای ایشان علو درجات و رحمت الهی آرزو مندیم. همچنین از سرکار خانم بهناز ضرغام، که زحمت تهیه نقشه یکصد هزار پهنه سربیشه را بر عهده داشتند کمال تشکر و قدردانی را داریم.

## منابع

- آقائباتی، ع.، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی کشور. ۶۴۰.
- احمدی، ر. و قره‌شیخ بیات، ع. ۱۴۰۰. تلفیق روش‌های سنجش از دور و مغناطیس‌سنجی به‌منظور اکتشاف کانسار آهن در گستره مراغ بندر چارک. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۵، ۵۹، ۴۹-۶۷.
- اشتوکلین، ی. افتخارنژاد، ع. و هوشمندزاده، ع.، ۱۳۵۲. بررسی مقدماتی زمین‌شناسی در لوت مرکزی، شرق ایران. سازمان زمین‌شناسی کشور. گزارش شماره ۲۲ف. ۸۶.
- تقریبی، م.، ۱۳۷۸. منیزیت و جایگاه آن در شرق کشور، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی

- diolarites in the Sistan Suture (eastern Iran). *Geo-diversitas*, 26(2), 185-206.
- Bonham-Carter, G. F., 1989. Weights of evidence modeling: a new approach to mapping mineral potential. *Statistical applications in the earth sciences*, 171-183.
  - Demetriades, A., Smith, D. B. and Wang, X., 2018. General concepts of geochemical mapping at global, regional, and local scales for mineral exploration and environmental purposes. *Geochimica Brasiliensis*, 32(2), 136-136.
  - Fatima, K., Khattak, M. U. K., Kausar, A. B., Toqeer, M., Haider, N. and Rehman, A. U., 2017. Minerals identification and mapping using ASTER satellite image. *Journal of Applied Remote Sensing*, 11(4), 046006.
  - Gandhi, S. M. and Sarkar, B. C., 2016. *Essentials of mineral exploration and evaluation*. Elsevier.
  - Grunsky, E. C. and de Caritat, P., 2020. State-of-the-art analysis of geochemical data for mineral exploration. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 20(2), 217-232.
  - Guilbert, J. M. and Park, C. F., 2007. *The geology of ore deposits*. Waveland Press. 985.
  - Gupta, R. P., 2017. *Remote sensing geology*. Springer 451 .
  - Halder, S., 2013. *Mineral Exploration, Principles and Applications*. Elsevier 360 .p.
  - Hosseini-Dinani, H. and Yazdi, M., 2021. Multi-dataset analysis to assess mineral potential of MVT-type zinc-lead deposits in Malayer-Isfahan metallogenic belt, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(8), 1-23.
  - Hutchinson, R. W., 1973. Volcanogenic sulfide deposits and their metallogenic significance. *Economic Geology*, 68(8), 1223-1246.
  - Irons, J. R., Dwyer, J. L. and Barsi, J. A., 2012. The next Landsat satellite: The Landsat data continuity mission. *Remote Sensing of Environment*, 122, 11-21.
  - Karimpour, M. H., Stern, C., Farmer, L. and Saadat, S., 2011. Review of age, Rb-Sr geochemistry and petrogenesis of Jurassic to Quaternary igneous rocks in Lut Block, Eastern Iran. *Geopersia*, 1 (1), 19-54
  - Kaiser, H. F., 1958. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika*, 23 (3), 187-200.
  - Langford, R. L., 2015. Temporal merging of remote sensing data to enhance spectral geolith, lithological and alteration patterns for regional mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 68, 14-29.
  - Mather, P. M. and Koch, M., 2011. *Computer processing of remotely-sensed images: an introduction*: John Wiley and Sons
  - Modabberi, S., Namayandeh, A., Setti, M. and López-Galindo, A., 2019. Genesis of the Eastern Iranian bentonite deposits. *Applied Clay Science*, 168, 56-67.
  - Mosusu, N., Bokuik, A., Petterson, M. and Holm, R., 2021. Stream Sediment Datasets and Geophysical Anomalies: A Recipe for Porphyry Copper Systems Identification—The Eastern Papuan Peninsula Experience. *Geosciences* 11 (7), 299.
  - Mousivand, F., Rastad, E., Peter, J. M. and Maghfouri, S., 2018. Metallogeny of volcanogenic massive sulfide deposits of Iran. *Ore Geology Reviews*, 95, 974-1007.
  - Noori, L., Beiranvandpour, A., Askari, G., Taghipour, N., Pradhan, B., Lee, C.-W. and Honarmand, M. 2019. Comparison of different algorithms to map hydrothermal alteration zones using ASTER remote sensing data for polymetallic vein-type ore exploration: Toroud-Chahshirin Magmatic Belt (TCMB), North Iran. *Remote Sensing*, 11(5), 495.
  - Pang, K. N., Chung, S. L., Zarrinkoub, M. H., Khatib, M. M., Mohammadi, S. S., Chiu, H. Y., ... and Lo, C. H., 2013. Eocene-Oligo-



- cene post-collisional magmatism in the Lut-Sistan region, eastern Iran: Magma genesis and tectonic implications. *Lithos*, 180, 234-251.
- Pazand, K. and Hezarkhani, A., 2018. Predictive Cu porphyry potential mapping using fuzzy modelling in Ahar-Arasbaran zone, Iran. *Geology, Ecology and Landscapes*, 2(4), 229-239.
  - Porwal, A. and González-Álvarez, I., 2019. Reprint of: Introduction to special issue on geologic remote sensing. *Ore Geology Reviews*, 108, 1-7.
  - Richards, J. P., Spell, T., Rameh, E., Raziq, A. and Fletcher, T., 2012. High Sr/Y magmas reflect arc maturity, high magmatic water content, and porphyry Cu±Mo±Au potential: examples from the Tethyan arcs of central and eastern Iran and western Pakistan. *Economic Geology*, 107., 295-332
  - Sabins, F. F., 1999. Remote sensing for mineral exploration. *Ore geology reviews* 14 (3-4), 157-183.
  - Saccani, E., Delavari, M., Beccaluva, L. and Amini, S. 2010. Petrological and geochemical constraints on the origin of the Nehbandan ophiolitic complex (eastern Iran): Implication for the evolution of the Sistan Ocean. *Lithos*, 117 (1-4), 209-228.
  - Safari, M., Maghsoudi, A. and Beiranvandpour, A., 2018. Application of Landsat-8 and ASTER satellite remote sensing data for porphyry copper exploration: a case study from Shahr-e-Babak, Kerman, south of Iran. *Geocarto international*, 33 (11), 1186-1201.
  - Sekandari, M., Masoumi, I., Beiranvand Pour, A., Muslim, A. M., Rahmani, O., Hashim, M., Zoheir, B., Pradhan, B., Misra, A. and Aminpour, S. M., 2020. Application of Landsat-8, Sentinel-2, ASTER and WorldView-3 spectral imagery for exploration of carbonate-hosted Pb-Zn deposits in the Central Iranian Terrane (CIT). *Remote Sensing*, 12 (8), 1239.
  - Shirazi, A., Shirazy, A. and Karami, J., 2018. Remote sensing to identify copper alterations and promising regions, Sarbishe, South Khorasan, Iran. *International Journal of Geology and Earth Sciences*, 4(2), 36-52.
  - Sulemana, I. A., Quaye-Ballard, J., Ntori, C., Awotwi, A., Adeyinka, O. M., Okrah, T. M. and Asare-Ansah, A., 2020. Location mapping of hydrothermal alteration using landsat 8 Data: A case of study in Prestea Huni Valley District, Ghana. *International Journal of Geography and Geology*, 9(1), 13-37.
  - Tarabi, S., Emami, M. H., Modabberi, S. and Sheikh Zakariaee, S. J., 2019. Eocene-Oligocene volcanic units of Momen Abad, east of Iran: petrogenesis and magmatic evolution. *Iranian Journal of Earth Sciences*, 11(2), 126-140.
  - Tirrul, R., Bell, I., Griffis, R. and Camp, V., 1983. The Sistan suture zone of eastern Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 94, 134-150
  - Walker, R., Gans, P., Allen, M., Jackson, J., Khatib, M., Marsh, V and Zarrinkoub, M. 2009. Late Cenozoic volcanism and rates of active faulting in eastern Iran. *Geophysical Journal International*, 177 (2), 783-805.
  - Wang, Q., Tang, G., Hao, L., Wyman, D., Ma, L., Dan, W., Zhang, X., Liu, J., Huang, T. and Xu, C. 2020. Ridge subduction, magmatism, and metallogenesis. *Science China Earth Sciences*, 1-20.
  - Wang, W., Zhao, J., Cheng, Q. and Liu, J., 2012. Tectonic-geochemical exploration modeling for characterizing geo-anomalies in southeastern Yunnan district, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 122, 71-80.
  - Zhang, N., Zhou, K. and Du, X., 2017. Application of fuzzy logic and fuzzy AHP to mineral prospectivity mapping of porphyry and hydrothermal vein copper deposits in the Dananhu-Tousuquan island arc, Xinjiang, NW China. *Journal*

of African Earth Sciences, 128, 84-96.

- Zuo, R., 2011. Identifying geochemical anomalies associated with Cu and Pb-Zn skarn mineralization using principal component analy-

sis and spectrum-area fractal modeling in the Gangdese Belt, Tibet (China). Journal of Geochemical Exploration, 111 (1-2), 13-22