



فصلنامه زمین ساخت

تابستان ۱۴۰۱، سال ششم، شماره ۲۲

doi 10.22077/JT.2023.6584.1160

بررسی الگوی شکستگی‌ها در نزدیکی پهنه برخوردی زاگرس: مطالعات سنجش از دور، ساختاری و ارتباط با کانه زایی

سید معین هاتفی^۱، علیرضا ندیمی^{۲*}

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

۲- دانشیار گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۰

منطقه سورمق در حاشیه شمال شرقی کمربند کوهزایی زاگرس که به عنوان منطقه مورد پژوهش انتخاب گردیده، شامل گسترش قابل توجهی از شکستگی‌ها و معادن مهم می‌باشد که به نظر می‌رسد ارتباطی بین آنها وجود دارد. منطقه سورمق از نظر ساختاری در بخش مرکزی پهنه سندج-سیرجان و در فاصله نزدیکی با راندگی اصلی زاگرس واقع شده است. استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور، از جمله ۱- ترکیب‌های رنگی کاذب مختلف به منظور بارزسازی خطواره‌ها و شناسایی الگوی گسل‌ها و ۲- ترکیب‌های رنگی کاذب به همراه نسبت‌گیری‌های بانندی در کنار آنالیز مؤلفه‌های اصلی به منظور مشخص‌سازی پهنه‌های دگرسانی برای شناسایی کانسار منگنز، اطلاعات ارزشمندی در مورد ارتباط بین پهنه‌های دگرسانی و الگوی گسل‌ها ارائه کرد. بررسی الگوی گسل‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و همچنین کنترل آن‌ها در مطالعات میدانی، چهار جهت کلی شامل E-W و N-S، NE-SW، NW-SE را نشان داد. نقشه تراکم گسل‌ها و گره‌های ساختاری برای شناسایی کانی‌زایی تهیه شد. براساس آنالیز فرای گره‌های ساختاری، سمت همگرایی به طور میانگین با راستای NE-SW (۲۲۰-۰۴۰) بدست آمد. تطبیق الگوی تراکم گسل، کانی‌زایی و نواحی دگرسانی با یکدیگر به شناسایی مناطق با عیار کانی‌زایی کمک کرد. در نقاطی که گسل‌های کششی با سایر گسل‌ها به ویژه گسل‌های پی‌سنگی طولی تلاقی دارند، مکان‌های مناسبتری برای کانی‌زایی و جایگزینی کانی‌ها تشکیل شده است. اندیس‌های معدنی با تراکم و غنای بالا بیشتر در نواحی خرد شده گسلی و در ارتباط با گسل آباده و سورمق و تلاقی با گسل شمالی-جنوبی گشار متمرکز هستند و با کاهش فراوانی گسل‌ها از میزان اندیس‌های معدنی کاسته می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سنجش از دور، کانی‌زایی، ساختارهای شکننده، پهنه برخوردی، کمربند کوهزایی زاگرس.

* ایمیل: a.nadimi@sci.ui.ac.ir

تلفن تماس: ۰۹۱۳۱۱۳۴۴۲۳



Study of fracture patterns near the Zagros Collisional Zone: remote sensing and structural studies and the relation with mineralization

SeyedMoein Hatefi¹, Alireza Nadimi^{2*}

1- MSc, Department of Geology, University of Isfahan, Iran

2- Associate Professor, Department of Geology, University of Isfahan, Iran

Abstract

The Surmaq region on the northeastern margin of the Zagros Orogenic Belt, which was chosen as the research area, includes a significant expansion of fractures and important mines, which seems to be related. Structurally, the Surmaq region is located in the central part of the Sanandaj-Sirjan zone and close to the Main Zagros Thrust. The use of remote sensing techniques, including 1-various false color combinations in order to highlight the lineaments as well as possible and identify the fault patterns and 2-false color combinations along with band ratios in addition to analysis the principle components in order to identify different alteration zones for manganese deposits identifications, provide valuable information about the relation between the alteration zones and the fault patterns. Study of the fault patterns using satellite images as well as their control in field studies showed four general directions. The map of faults density and structural nodes were prepared for identifying mineralization. Based on the Fry analysis of structural nodes, the convergence direction was obtained about NE-SW (040-220). Comparing the pattern of fault density, mineralization, and alteration zones with each other helped to identify areas with mineralization grades. In places where extensional faults intersect with other faults, especially longitudinal basement faults, more suitable places have been formed for mineralization and mineral replacement. Mineral indices with high density and richness are mostly concentrated in the fractured area of the faults and mostly in connection with the Abadeh and Surmaq faults and the junction with the N-S-trending Gashar Fault.

Keywords: Remote Sensing, Mineralization, Brittle Structures, Collisional zone, Zagros Orogenic Belt.

*Email: a.nadimi@sci.ui.ac.ir

Tel: +989131134423

۱- مقدمه

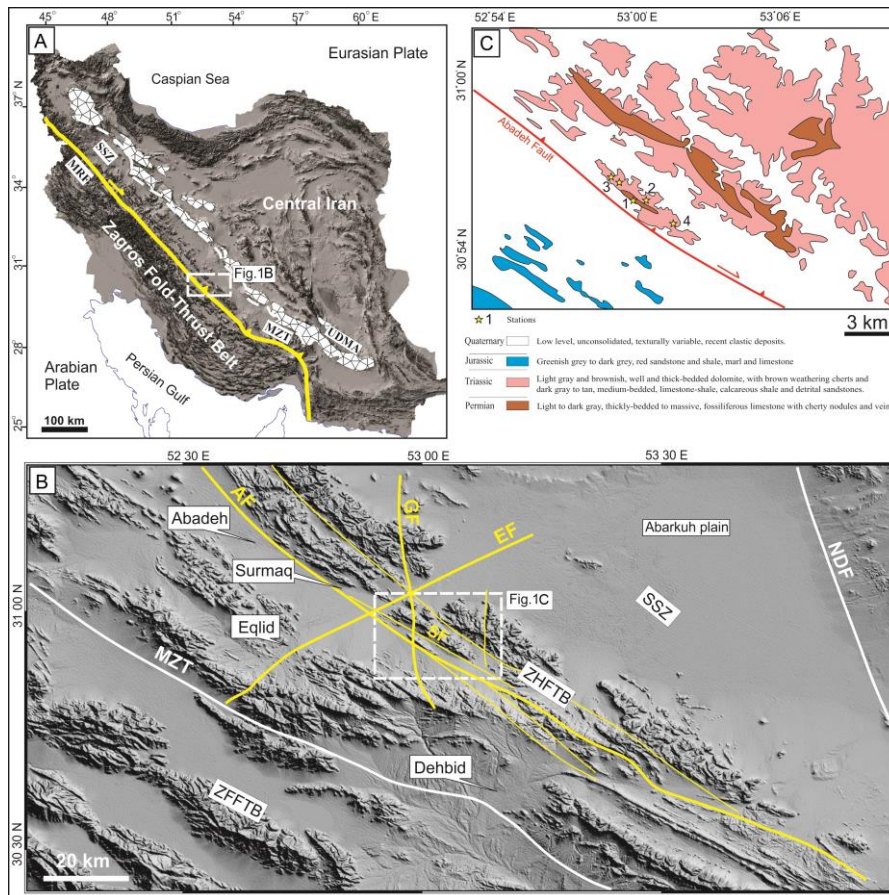
زاگرس قرار دارد (شکل ۱). گسل اصلی این منطقه گسل آباده می‌باشد که دارای امتداد شمال غرب- جنوب شرق است و مؤلفه اصلی حرکتی معکوس دارد (ارفع نیا، ۱۳۸۹). در پهنه اصلی گسل و همچنین در پهنه‌های برشی وابسته به گسل آباده ذخایر فراوانی از منگنز برجای گذاشته شده است که از هندسه گسل و گسل‌های فرعی وابسته به آن پیروی می‌کنند. مطالعات و پیشینه تحقیقاتی منطقه مورد مطالعه، محدود به مطالعات زمین‌شناسی اقتصادی (موسوی، ۱۳۹۰) بوده؛ و مطالعات سنجش از دور مهمی به منظور شناسایی گسل‌ها، پهنه‌های دگرسانی و بررسی‌های دقیق ساختاری جهت تعیین ارتباط گسل‌ها و شکستگی‌ها با کانی‌سازی و دگرسانی در منطقه صورت نگرفته است. از جمله مطالعات زمین‌ساختی که در اطراف این منطقه صورت پذیرفته، می‌توان به مطالعات مورفوتکتونیک اشاره نمود که به بررسی تکتونیک و ساختارهای گسلی فعال منطقه اقلید پرداخته است (از جمله ارفع نیا، ۱۳۸۹، و ۱۳۹۱). از مطالعات ساختاری اخیر که در این منطقه به بررسی تأثیر کوهزاد زاگرس و تأثیر حرکت صفحه عربی و شناسایی کمربند فشارشی چپگرد پرداخته، می‌توان به قنبریان و همکاران (Ghan- barian et al., 2021) اشاره نمود.

منطقه مورد بررسی در جنوب شرق سورمق، شهرستان آباده، در حاشیه شمال شرقی راندگی اصلی زاگرس قرار دارد. در این پژوهش، با استفاده از روش‌های مطالعه داده‌های سنجش از دور و انجام فیلترگذاری‌های مختلف، به همراه تلفیق نتایج با بررسی‌های صحرایی، علاوه بر شناسایی ساختارهای گسلی اصلی و فرعی و پهنه‌های دگرسانی، به ارتباط آن‌ها با یکدیگر نیز با هدف ایجاد الگویی به منظور شناسایی مناطق مستعد وجود ماده معدنی پرداخته شده است. هدف از این پژوهش، بررسی ساختارهای زمین‌ساختی و تأثیرات آن بر روی گسترش پهنه‌های دگرسانی است. همچنین با بررسی فازهای مختلف گسلش، تقدم و تأخر آن‌ها به درک بهتر از کانی‌زایی در ارتباط با تکتونیک ناحیه‌ای کمک می‌کند. به علاوه، بررسی گسل‌ها در ایجاد کانسارها به خصوص کانسارهای هیدروترمال و نحوه پیدایش آن‌ها، به شناسایی گسل‌های جدید و به خصوص گسل‌های اصلی ناحیه کمک می‌کند.

امروزه سنجش از دور در مطالعات زمین‌شناسی حائز اهمیت است بطوری که این فناوری می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد مطالعات ساختاری و اقتصادی از جمله استخراج خطواره‌ها، شناسایی پهنه‌های دگرسانی، پدیده‌های ژئومورفولوژیکی مختلف و اطلاعات ارزشمند دیگری در اختیار قرار دهد (Yet-kin, 2003, Pour and Hashim, 2012). سابقه شناسایی پهنه‌های دگرسانی با استفاده از داده‌های سنجش از دور به دهه ۷۰ میلادی بر می‌گردد (Hellman and Ram- sey, 2004). یکی از عوامل مهم و مؤثر در کانه‌زایی در هر ناحیه، گسلش و شکستگی‌های موجود می‌باشند که در حقیقت راهی برای نفوذ سیالات کانه‌دار هستند. اغلب کانه‌زایی‌ها در مناطق با شکستگی بالا و به ویژه در محل تلاقی این شکستگی‌ها اتفاق می‌افتد (Sa- bins, 1999). پهنه‌های گسلی با اشکال مختلف همانند راهرو، گذرگاه، سد و مانع در برابر سیالات کانی ساز عمل نموده و می‌توانند نقش مهمی در هدایت و شکل‌گیری کانی‌سازی داشته باشند (Berger and Drew, 1997, Tosdal, 2001, Drew, 2006).

یکی دیگر از موارد گسترده در به کارگیری داده‌های سنجش از دور، نقشه برداری واحدهای سنگی و شناسایی مناطق دگرسان شده مرتبط با تشکیل کانسار است. پژوهشگرانی چون (Abrams, et al., 1983, Rajen- dran and Nasir, 2013, Tangestani, et al., 2008) از روش‌های مختلف پردازش تصاویر به منظور بارزسازی مناطق دگرسان شده با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده Aster و ETM استفاده کرده‌اند. سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ همانند سنجنده ETM با پوشش نسبتاً وسیعی از طیف الکترومغناطیسی، امکان آشکارسازی پهنه‌های دگرسانی و مناطق دارای کانسار را در حد مطلوب فراهم می‌آورد. این پژوهشگران از روش‌های نسبت بانندی، تجزیه مؤلفه‌های اصلی، ترکیب رنگی کاذب، نقشه برداری زاویه طیفی و تجزیه طیفی کانی‌ها به منظور بارزسازی مناطق دگرسان شده و تفکیک واحدهای سنگی استفاده نموده‌اند.

منطقه مورد مطالعه در پهنه ساختاری سنندج-سیرجان و در نزدیکی حاشیه شمال شرقی کمربند کوهزایی



شکل ۱: الف: نقشه توپوگرافی ایران و موقعیت کوهزاد زاگرس و پهنه‌های ساختاری مجاور آن. اختصارات: SSZ: پهنه سندج-سیرجان، MZT: راندگی اصلی زاگرس، MRF: گسل اصلی عهدحاضر، UDMA: کمان ماگمائی ارومیه- دختر و مستطیل ناحیه آباده- دهبید را نشان می‌دهد (Nadimi and Konon, 2012a). ب: الگوی گسل‌ها در شمال کوهزاد زاگرس، در منطقه سورماق و در تصویر SRTM نشان می‌دهد. گسل‌های اصلی به عنوان پهنه جابجایی اصلی (Principle Displacement Zone) در نظر گرفته شده‌اند. گسل‌های اصلی شامل: MZT، NDF: گسل نائین-دهشیر، AF: گسل آباده، SF: گسل سورماق، GF: گسل گشار و EF: گسل اقلید هستند، اقتباس از: (Nadimi and Konon, 2012a; Sarkarinejad and Ghanbarian, 2014). براساس طبقه‌بندی Sarkarinejad and Ghanbarian (2014) زیرپهنه‌های ساختاری شامل: ZFFTB- Zagros Foreland Fold-and-Thrust Belt، ZHFTB- Zagros Hinterland Fold-Thrust Belt می‌باشد. ج: نقشه ساده شده ۱:۱۰۰۰۰۰ از منطقه مورد مطالعه، بر گرفته از نقشه ابرکوه، دهبید، اقلید و آباده از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران (GSI). ستاره موقعیت ایستگاه‌های برداشت و اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.

پهنه سنندج-سیرجان، در نزدیکی راندگی اصلی زاگرس و بر اساس مطالعه اخیر (Sarkarinejad and Ghanbarian, 2014) در زیر پهنه کمربند چین-رانده زاگرس داخلی واقع گردیده است (شکل ۱، الف و ب). گسل‌های اصلی و بزرگ این منطقه شامل گسل آباده و سورمق و شکستگی‌های فرعی مرتبط با آن‌ها هستند. راستای گسل‌های اصلی پهنه سنندج-سیرجان در نواحی مرکزی، عموماً راستای شمال غربی- جنوب شرقی با سازوکار معکوس و راستگرد دارند و بیرون‌زدگی واحدهای سنگی نیز از آن تبعیت می‌کنند (Nadimi and Konon, 2012a, b). پیرو روند این پهنه ساختاری که به موازات حاشیه جنوب غربی ایران مرکزی است و در شمال شرقی راندگی اصلی زاگرس قرار دارد، مجموع عناصر ریخت‌شناسی و ساختاری ناحیه مانند رخنمون‌ها، محور چین‌ها و گسل‌های اصلی، روند شمال غرب-جنوب شرق دارند. حرکات برشی راستگرد گسل‌های موجود در منطقه، ممکن است سبب چرخش روند برخی از واحدهای سنگی شده باشد که نتیجه آن، پدید آوردن ساختارهایی با راستاهایی از جمله شرقی- غربی است. اکثر واحدهای سنگی گوناگون به شکل ورقه‌ای، رانده شده‌اند. بر پایه مطالعات انجام شده Berberian and King 1981 و Arfania and an, 1977. Berberian and King 1981، Shahriari, 2009، راندگی اصلی زاگرس و گسل آباده، دو مرز ساختاری در منطقه مورد مطالعه هستند. گسل اصلی زاگرس در منطقه موجب شده است تا نهشته‌های آهکی- ماری الیگو-میوسن بر روی نهشته‌های آهکی ژوراسیک بالایی و در برخی بخش‌ها بر روی نهشته‌های کنگلومرای پلیو- پلیستوسن قرار گیرد. در بخش شمال شرقی منطقه سورمق، بروزدهایی از ماسه‌سنگ و شیل همراه با تناوبی از آهک‌های الیگومیوسن و کنگلومرای قرمز میوسن است که شباهت محسوسی به ویژگی‌های زمین‌شناختی ایران مرکزی دارد. بخش جنوب غربی این ناحیه، بروزدها بیشتر شامل سنگ‌های دوران اول از جمله سنگ‌های آذرین و دگرگونی، دولومیت‌های دگرگون شده، میکاشیست، آهک‌های رس‌دار می‌باشد (نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اقلید). بدین ترتیب، گسل آباده، مرز بین دگرگونی‌های ژوراسیک واقع شده در منطقه سنندج-سیرجان و نهشته‌های رسوبی پالئوزوئیک و اوایل مزوزوئیک را تشکیل داده است.

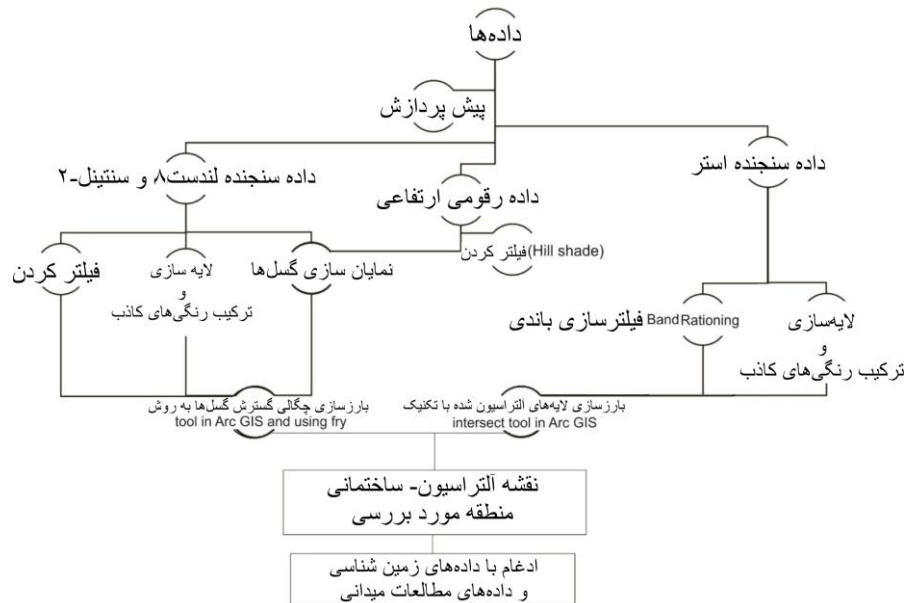
۲- مواد و روش مطالعه

تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ با پوشش زیاد منطقه و همچنین امکان ترکیب باند پنکروماتیک با دیگر باندها به همراه کمترین نویز و اختلال این امکان را فراهم آورده‌اند که مطالعات ساختاری مناسبی از طریق این تصاویر به روش سنجنش از دور انجام گردد. تصاویر Sentinel-2 نیز با قدرت تفکیک ۱۰*۱۰ متر برای بررسی خطواره‌های زمین ساختی مناسبند تا بتوان در نواحی دارای جاده و ترانشه، در کنار دیگر تصاویر از بروز اشتباه در برداشت ساختارها جلوگیری نمود. تصاویر ماهواره‌ای Aster نیز برای بررسی‌های آلتراسیون بسیار قوی و با کیفیت عمل می‌کنند. تصاویر رقومی ارتفاعی نیز با اعمال فیلترهای مناسب نیز در شناسایی ساختارهای خطی کمک شایانی می‌کنند. همه این ویژگی‌ها در کنار هم باعث شد، در این تحقیق از داده‌های سنجنده OLI لندست ۸ و تصاویر ماهواره‌ای سنجنده Aster به منظور بررسی کانساز منگنز و پهنه‌های دگرسانی موجود در منطقه مورد مطالعه، واقع در بخش جنوب شرقی سورمق استفاده شود.

همچنین به منظور بررسی ساختارهای شکننده، جهت افزایش سطح کیفیت تصاویر ماهواره‌ای و بهبود هرچه بهتر برداشت‌های ساختاری، تصاویر ماهواره‌ای سنجنده OLI با داشتن باند پنکروماتیک و قدرت تفکیک مکانی با پیکسل‌های ۱۵*۱۵ متر و تصاویر ماهواره‌ای سنجنده Sentinel-2 با قدرت تفکیک مکانی ۱۰*۱۰ متر در هر پیکسل استفاده گردید. در نتیجه این دو تصویر توانایی بالایی در بارزسازی و آشکارسازی ساختارهای زمین‌شناسی دارند. از تصاویر DEM منطقه نیز جهت برداشت گسل‌ها و شناسایی پهنه‌های شکستگی استفاده گردید. پردازش تمامی داده‌های تصاویر ماهواره‌ای و تحلیل و بررسی آن‌ها از طریق نرم افزارهای ENVI v.5.3 و Arc GIS v.10.4.1 صورت پذیرفت (شکل ۲). در نهایت با ادغام تمامی این داده‌ها و پس از آن انجام مطالعات صحرایی در ایستگاه‌های مختلف دارای کانساز منگنز، منطقه مورد پژوهش از نظر ساختارهای تکنونیک و پهنه‌های دگرسانی شناسایی شده، مورد تحلیل قرار گرفت. بررسی و تحلیل داده‌های ساختاری از طریق نرم‌افزار Faultwinkin v.8.0 و Stereonet v.10.2.9 انجام پذیرفت.

۳- زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد مطالعه از لحاظ ساختاری در بخش مرکزی



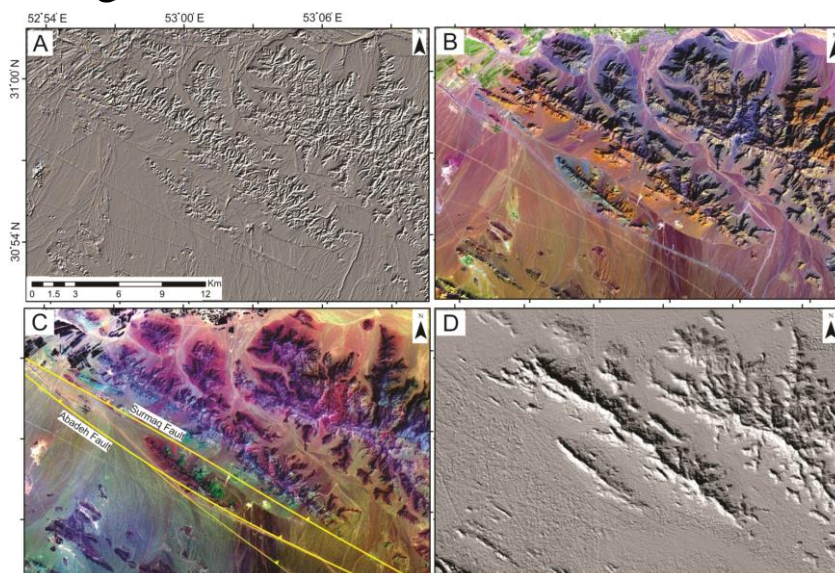
شکل ۲: نمودار روش استفاده از تکنیک‌های مختلف برای بررسی ساختارهای زمین ساختی مرتبط با کانی‌زایی و تهیه نقشه ساختمانی - آلتراسیون که با اقتباس از بیگی و همکاران (Beygi et al., 2021) انجام شد.

همانگونه که توضیح داده شد، تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ با پوشش زیاد منطقه و همچنین امکان ترکیب باند پنکروماتیک با دیگر باندها به همراه کمترین نویز و اختلال این اماکن را فراهم آورده‌اند که مطالعات ساختاری مناسبی از طریق این تصاویر به روش سنجنش از دور انجام گردد. تصاویر Sentinel-2 نیز با قدرت تفکیک 10×10 برای بررسی خطواره‌های زمین ساختی مناسبند تا بتوان در نواحی دارای جاده و ترانشه، در کنار دیگر تصاویر از بروز اشتباه در برداشت ساختارها جلوگیری کنند. تصاویر ماهواره‌ای AS-ter نیز برای بررسی‌های آلتراسیون بسیار قوی و با کیفیت عمل می‌کنند. تصاویر رقومی ارتفاعی نیز با اعمال فیلترهای مناسب در شناسایی ساختارهای خطی کمک شایانی می‌کنند. پیش از پردازش تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 و سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ و تصاویر ماهواره‌ای Aster، ابتدا تصحیحات هندسی و در برخی موارد تصحیحات رادیومتریک بر روی تصاویر ماهواره‌ای صورت پذیرفت. با استفاده از روش‌های مختلف پردازش، گسل‌ها بارزسازی و شناسایی شدند. در ادامه به منظور بررسی‌های پهنه‌های دگرسانی از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده OLI لندست ۸ و بویژه تصاویر ماهواره‌ای Aster به دلیل قدرت تفکیک بسیار بالای آن، برای بررسی پهنه‌های دگرسانی و مناطق مستعد حضور منگنز، بهره گرفته شد. در این

بر پایه مطالعه ژئوشیمیایی و کانی‌زایی انجام شده توسط موسوی (۱۳۹۰)، این ناحیه دارای ذخایر مهمی از نهشته‌های منگنز، باریت و خاک صنعتی است که تمامی این نهشته‌ها در منطقه‌ای واقع شده که به صورت یک تاقدیس با محوری با روند شمال غربی-جنوب شرقی است. یال جنوب غربی این تاقدیس را آهک‌های صورتی تا خاکستری تریاس میانی با آثار فسیلی دوکفه‌ای‌ها، تشکیل داده است. مرکز این تاقدیس را برونزدهایی از آهک‌های دولومیتی خاکستری رنگ پرمین به وجود می‌آورد. در این سنگ‌های آهکی، شکستگی‌های متعددی تحت تأثیر تکنیک پدید آمده است. سنگ میزبان ماده معدنی در منطقه سورمق، سنگ آهک با سن پرمین است که به دلیل شرایط خاص زمین‌شناسی و تکنیکی، ماده معدنی منگنز به صورت پیرولولزیت، به ندرت پسیلوملان و در برخی نمونه‌ها کریپتوملان به حالت عدسی و رگه‌ای پدیدار گردیده است (موسوی، ۱۳۹۰). در برخی مناطق زیر لایه‌های آهک دار سنگ رسوبی، یک پهنه آرژیلیکی با راستای 320° درجه قرار دارد. در کنار رگه‌های اکسیدی منگنز، لایه‌هایی از اکسید آهن با ترکیبات گوتیت و هماتیت و نیز شیبست‌های رسی شده وجود دارد که دگرسانی آرژیلیکی و هماتیتی و گوتیتی را در معدن منگنز سورمق می‌سازد.

۴- مطالعات سنجنش از دور و نرم‌افزاری ۴-۱- بارزسازی ساختارهای زمین ساختی

OLI لندست ۸ (شکل ۳ الف) و برای ترکیب رنگی کاذب بر روی سنجنده OLI از (RGBi: 7,5,2) استفاده شده (شکل ۳ ب) است. همچنین با استفاده از ترکیب رنگی کاذب (RGB: 2,12,11) بر روی تصاویر ماهواره‌ای Sen-2 (شکل ۳ ج) شکستگی‌ها و خطواره‌های گسلی شناسایی و بارزسازی گردیدند. مطالعات ساختاری این ناحیه پس از پردازش تصاویر ماهواره‌ای در دو مرحله انجام پذیرفت. در مرحله نخست گسل‌های اصلی شناسایی شدند و در مرحله دوم، خطواره‌های گسلی و شکستگی‌های فرعی مشخص شد و در نهایت مورد تحلیل قرار گرفتند. سپس با استفاده از تصویر DEM منطقه مورد مطالعه و پردازش اثر و زاویه تابش خورشید (Hill shade) بر روی آن، خطواره‌های برداشت شده، کنترل و تصحیح گردیدند (شکل ۳ د).



شکل ۳: الف: نتیجه اعمال فیلتر Directional با زاویه ۴۵ درجه، بر روی تصویر سنجنده لندست ۸، ب: ترکیب رنگی کاذب (Beygi et al., 2018) (RGBi: 7,5,2) بر روی تصویر ماهواره‌ای لندست ۸، ج: ترکیب رنگی کاذب (RGB: 2,12,11) بر روی تصویر ماهواره‌ای Sentinel-2، د: اعمال فیلتر Hill shade بر روی تصویر DEM به دست آمده از ماهواره ASTER.

به موازات این دو گسل می‌باشند. به نظر می‌رسد، نقش اساسی در تکامل ساختاری منطقه را گسل آباده و سورمق ایفا می‌کنند. الگوی گسل‌های اصلی منطقه نشان‌دهنده ساختارهای مرتبط با بالا آمدگی مانند ساختار گلی مثبت و لنزی شکل در منطقه است (Ghanbarian et al., 2021). علاوه بر آن‌ها، گسترش یک گسل بزرگ و اصلی در منطقه با راستای شمالی- جنوبی مشهود است که در بخش غربی منطقه از شمال تا جنوب با طول حدود ۵۰ کیلومتر گسترش یافته است. به نظر می‌رسد این گسل، تغییر شکل‌های نهایی منطقه را انجام داده و احتمال دارد در کانه‌زایی اثر بسزایی داشته باشد.

مطالعه جهت بارزسازی انواع ساختارهای زمین‌ساختی بر روی تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 و سنجنده OLI از فیلترهای مختلف استفاده شده است. فیلترهای بالا گذر و لبه (Edge)، مقادیر پیکسل‌هایی که دارای تغییرات ناگهانی در مقادیر درجات خاکستری هستند را تقویت نموده و جزئیات بیشتری از ساختارهای خطی همانند گسل‌ها و شکستگی‌ها، رودخانه‌ها و آبراهه‌ها را بارز می‌نمایند. بنابراین در خروجی این فیلترها ساختارهای خطی بهتر مشاهده می‌شوند. همچنین تصاویر DEM این منطقه نیز کمک شایانی در تشخیص و بارزسازی ساختارهای خطی نمود.

در این پژوهش از فیلترهای بالا گذر از نوع Directional بر روی تصاویر مقیاس خاکستری (Grayscale) سنجنده

با توجه به نقش کنترل‌کنندگی شکستگی‌ها در جایگیری ماده معدنی و گسترش دگرسانی، مناطق مهم گسلش و شکستگی، شناسایی گردید و گسل‌های اصلی منطقه با دقت بیشتری ارزیابی شد. الگوی به دست آمده از گسل‌ها، به طور کلی چهار دسته مهم و اصلی با امتداد شمال غرب- جنوب شرق، شمال شرق- جنوب غرب، شمالی- جنوبی و شرقی- غربی را نشان می‌دهد که دو دسته اول نسبتاً بیشترین فراوانی را نشان داده‌اند. گسل‌های اصلی این منطقه غالباً موازی با کوهزاد زاگرس گسترش یافته‌اند و شامل گسل‌های آباده و سورمق و چندین گسل دیگر با طول بیش از ده کیلومتر



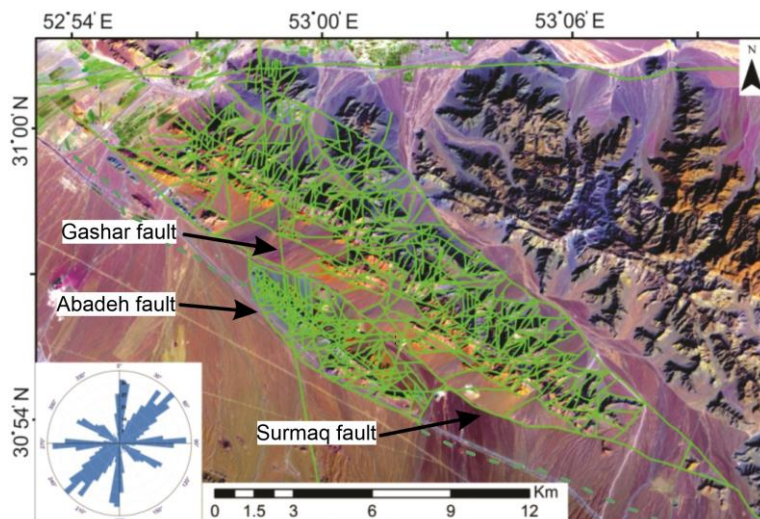
مهم در ناحیه سورمق، گسل‌های با راستای تقریباً شمالی-جنوبی است. راستای غالب این دسته از گسل‌ها با توجه به نمودار گل سرخی ترسیم شده عموماً صفر تا ۱۰ درجه است (شکل ۵ب). این سری از گسل‌ها در منطقه دارای طول زیاد بوده که گاهاً به چند ده کیلومتر نیز می‌رسند و سازوکار راستگرد و یا راستگرد نرمال را نشان می‌دهند. به نظر می‌رسد این دسته گسل به همراه گسل‌های با راستای موازی کوهزاد زاگرس سبب بالاآمدگی و تشکیل کانساز منگنز هیدروترمال در این منطقه شده‌اند.

دسته شرقی-غربی، گسل‌های با راستای شرقی-غربی، از نظر فراوانی سومین دسته از گسل‌ها را در منطقه تشکیل می‌دهند. راستای غالب این دسته از گسل‌ها با توجه به نمودار گل سرخی ترسیم شده، عموماً ۸۵ تا ۹۰ درجه بوده (شکل ۵ج)، که دارای پراکندگی نسبتاً مناسب با فواصل بیشتر نسبت به سایر دسته شکستگی‌ها هستند. تعداد کمی از این دسته جزو گسل‌های اصلی محسوب می‌گردند. این دسته گسل‌ها با سازوکار معکوس و گاهی همراه با مؤلفه امتداد لغز چپگرد، به نظر می‌رسد نسبت به دیگر شکستگی‌ها تأثیر کمتری بر کانه‌سازی و ایجاد منابع معدنی در منطقه داشته‌اند. دسته شمال غربی-جنوب شرقی، این دسته گسل‌ها به موازات ساختارهای کوهزاد زاگرس گسترش یافته و جزو ساختارهای اصلی و مهم این منطقه به شمار می‌روند. از لحاظ فراوانی در منطقه مورد پژوهش نسبت به دیگر دسته‌ها فراوانی کمتری را در نمودار گل سرخی از خود نشان می‌دهند. راستای غالب این دسته از گسل‌ها با توجه به نمودار گل سرخی ترسیم شده، عموماً ۲۹۵ درجه تا ۳۰۵ درجه بوده و معمولاً طویل، به موازات راندگی اصلی زاگرس کشیده شده‌اند (شکل ۵د). گسل‌های این دسته با سمت شیب غالب به سمت شمال شرق و سازوکار معکوس و راستگرد تأثیر زیادی در شکل‌گیری مورفولوژی این منطقه داشته‌اند. غالب این گسل‌ها در مقیاس‌های مختلف ساختارهای دم‌اسبی را امتداد مسیر خود نشان می‌دهند. به نظر می‌رسد این ساختارها نقش مؤثری در جایگزینی کانسارها و منابع معدنی در منطقه دارد و بویژه در محل تلاقی این گسل‌ها با گسل‌های دارای راستای شمالی-جنوبی کیفیت و غنای منابع کانساری و معدنی افزایش یافته است.

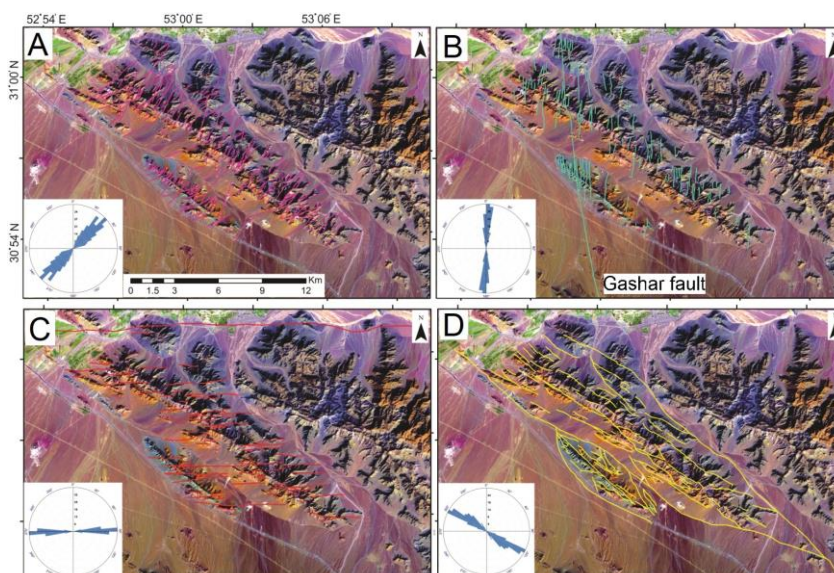
الگوی کلی حاصل از بررسی و بارزسازی دقیق‌تر خطواره‌ها و گسل‌های فرعی در این منطقه (شکل ۴)، نشان می‌دهد که تراکم و تداخل گسل‌ها به خصوص در مرکز و جنوب شرقی منطقه بالا بوده و به سمت شمال و غرب از میزان شدت تراکم و تداخل کاسته می‌شود. با توجه به نمودار گل سرخی به دست آمده از پردازش گسل‌های اصلی، علاوه بر دو پراکندگی عمده در جهت‌های شمال غربی-جنوب شرقی و شمال شرقی-جنوب غربی، دو راستای بسیار جالب و مورد اهمیت دیگر در منطقه شناسایی گردید که ممکن است در کانی‌زائی و گسترش دگرسانی نقش داشته باشند. پراکندگی با راستای شمالی-جنوبی مربوط به یک گسل اصلی است و همانگونه که گفته شد، دارای طول حدود ۵۰ کیلومتر است و در پهنه گسلی اطراف آن نیز ساختارهای موازی با آن بطور فراوان وجود دارند. این گسل از غرب روستای گشار در شمال منطقه مورد بررسی عبور کرده و برای اولین بار در این پژوهش شناسایی و گشار نامیده شد. دسته دیگر، راستای شرقی-غربی دارد و دارای طول کمتری نسبت به دسته قبلی بوده ولی در تقاطع یکدیگر با سایر گسل‌ها قرار دارند و فراوانی بالایی نشان می‌دهند. پهنه‌های برشی متعددی با راستای شرقی-غربی در منطقه سورمق توسط قبریان و همکاران (Ghanbarian et al., 2021) معرفی شده است که غالباً مربوط به تغییر شکل‌های قدیمی‌تر است.

دسته شمال شرقی-جنوب غربی، راستای غالب این دسته از گسل‌ها بر اساس نمودار گل سرخی تهیه شده، عموماً ۴۵ تا ۵۰ درجه بوده و نسبت به دسته گسل‌های دیگر طول کمتری دارند (شکل ۵الف). بیشترین فراوانی گسل‌ها در منطقه، متعلق به این دسته گسلی می‌باشد. این گسل‌ها در راستای سمت همگرایی صفحه عربی نسبت به ایران مرکزی تشکیل شده‌اند و با سازوکار نرمال و چپگرد باعث تشکیل دره‌های عمیق در ارتفاعات پهنه سندانج-سیرجان شده است (از جمله، Nadimi, 2010). گاهاً سازوکار کششی این گسل‌ها، باعث ایجاد معبر مناسبی جهت انتقال سیالات کانه‌ساز در نواحی اطراف منطقه مورد مطالعه و پهنه ارومیه-دختر شده است (از جمله، Moshtagh, et al., 2016; Beygi, et al., 2018).

دسته شمالی-جنوبی، دسته دیگر از دسته‌های گسلی



شکل ۴: الگوی کلی گسل‌ها و خطواره‌های برداشت شده در منطقه مورد مطالعه به همراه نمودار گل سرخی آن بر روی تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ با ترکیب رنگی کاذب (RGB: 7,5,2).



شکل ۵: الگوی گسل‌های برداشت شده در مطالعات سنجش از دور به همراه نمودار گل سرخی آن‌ها بر روی تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ با ترکیب رنگی کاذب (RGBi: 7,5,2)، الف: خطواره‌های با روند شمال شرقی - جنوب غربی، ب: خطواره‌های با روند شمالی - جنوبی، ج: خطواره‌های با روند شرقی - غربی، خطواره‌های با روند شمال غربی - جنوب شرقی.

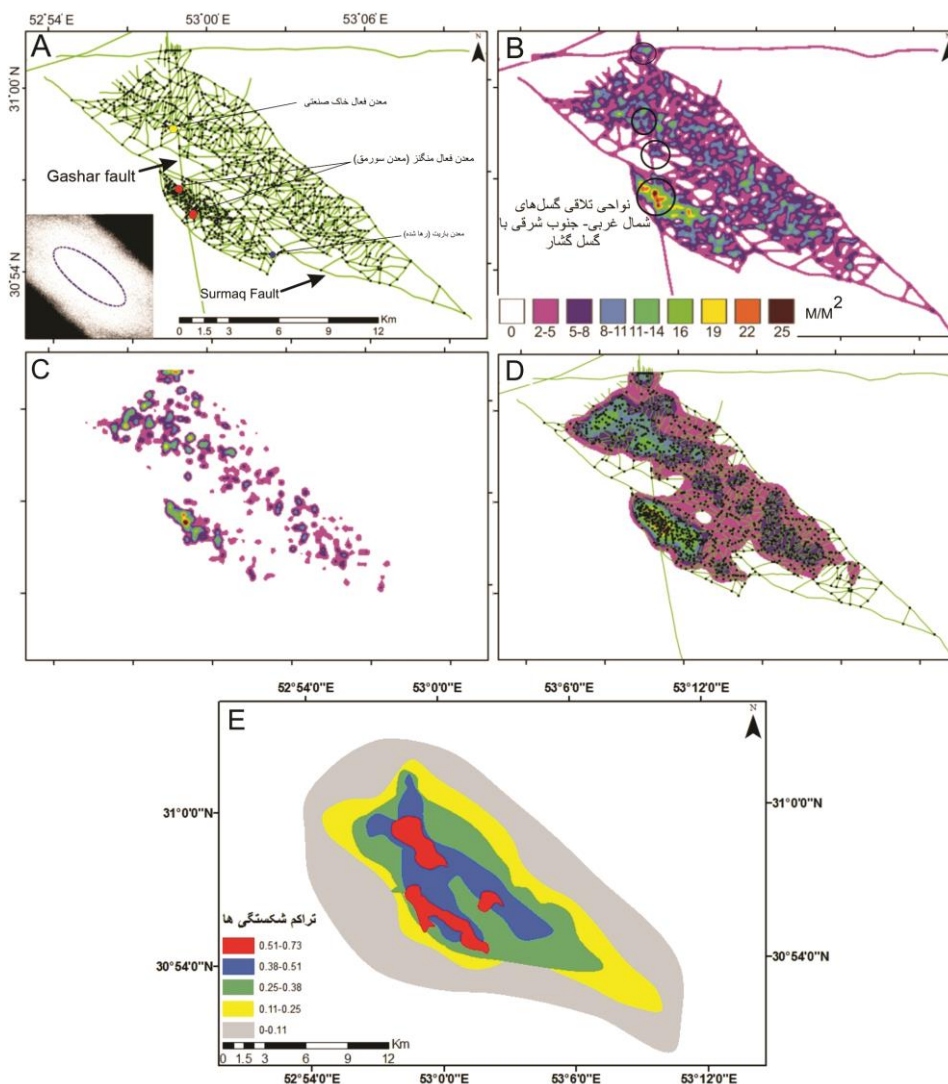
(شکل ۶الف). با توجه به الگوی آنالیز فرای انجام شده بر روی این گره‌ها (Fry, 1979)، راستای گسترش این گره‌ها در جهت شمال غرب - جنوب شرق، و همچنین سمت همگرایی مؤثر بر آن‌ها (آزیموت ۲۲۰ درجه) در این منطقه بدست آمد (شکل ۶الف). نقشه چگالی گسل‌ها بر اساس خطواره‌های گسلی بدست آمده از مطالعات سنجش از دور بر اساس متر به متر مربع (شکل ۶ب) و نقشه چگالی حضور گره‌ها از نقشه گره‌های ساختاری در هر متر مربع تهیه گردید (شکل ۶ج). با تلفیق نقشه‌های چگالی گسل‌ها و چگالی گره‌ها، یک نقشه واحد بدست آمد که

۲-۴- گره‌های ساختاری و درون‌یابی پتانسیل معدنی

با توجه به اهمیت محل تقاطع گسل‌ها و گره‌های ساختاری در منطقه و تأثیر مهم آن‌ها در نحوه جایگیری کانسارهای غنی در ناحیه، با استفاده از پراکندگی و طول گسل‌ها و گره‌های ساختاری چند نقشه تهیه گردید. این نقشه‌ها، نقشه گره‌های ساختاری (شکل ۶الف)، چگالی گسل‌ها (شکل ۶الف)، چگالی گره‌ها (شکل ۶ب) و نهایتاً نقشه تلفیق چگالی گسل‌ها و گره‌ها (شکل ۶ج) را شامل می‌شوند. در ابتدا با در نظر گرفتن محل تقاطع گسل‌ها، نقشه گره‌های ساختاری بین گسل‌ها استخراج گردید

پس از آن در نواحی مرکزی و به سمت شمال غرب منطقه، در نواحی کنتاکت گسل‌های شمال غربی- جنوب شرقی و گسل‌های شمالی-جنوبی، یک روند منسجم و کلی از چگالی بالای پتانسیل کانی زائی وجود دارد که بررسی‌های صحرایی نشان از وجود خاک صنعتی در این نواحی است. در شکل ۶، شکستگی‌های برداشت شده منطقه مورد مطالعه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، در شبکه‌ای با اضلاع ۲۰۰ متری تهیه گردید و بر اساس روش ارائه شده توسط موسوی و حسین آبادی (۱۳۹۷)، واحد شدت شکستگی در نرم افزار

بیشترین نواحی که از لحاظ ساختاری شانس تشکیل جایگزینی ماده معدنی دارد را نشان می‌دهد. این نقشه را می‌توان نقشه چگالی پتانسیل کانی زائی بر اساس شواهد ساختاری نامید (شکل ۵۶). در این نقشه به نظر می‌رسد دو دسته گسل با راستاهای شمال غربی- جنوب شرقی و شمالی-جنوبی بر تمرکز کانی زائی تأثیر بیشتری دارد. در نواحی مجاور معدن منگنز سورمق و حوالی گسل‌های سورمق و آباده بیشترین تمرکز چگالی به لحاظ پتانسیل کانی زائی وجود دارد که مطالعات صحرایی نیز این نکته را تأیید کردند.



شکل ۶: الف: الگوی گره‌های ساختاری (محل تلاقی گسل‌ها و خطواره‌ها با یکدیگر) به همراه گسل‌های برداشت شده در مطالعات سنجش از دور (Beygi et al., 2021) به همراه الگوی حاصل از آنالیز فرای (Fry, 1979) گره‌های ساختاری در منطقه مورد مطالعه. ب: نقشه چگالی (متر بر متر مربع) گسل‌های به دست آمده از مطالعات سنجش از دور در منطقه مورد مطالعه. ج: نقشه چگالی به دست آمده از گره‌های ساختاری یا محل تلاقی گسل‌ها (بیشترین میزان حضور ماده معدنی نیز در کنتاکت این مناطق است). د: نقشه چگالی درون‌یابی شده از مطالعه نقشه چگالی گره‌ها و گسل‌های منطقه مورد مطالعه. ه: نقشه هم شدت شکستگی‌ها در منطقه مورد مطالعه.

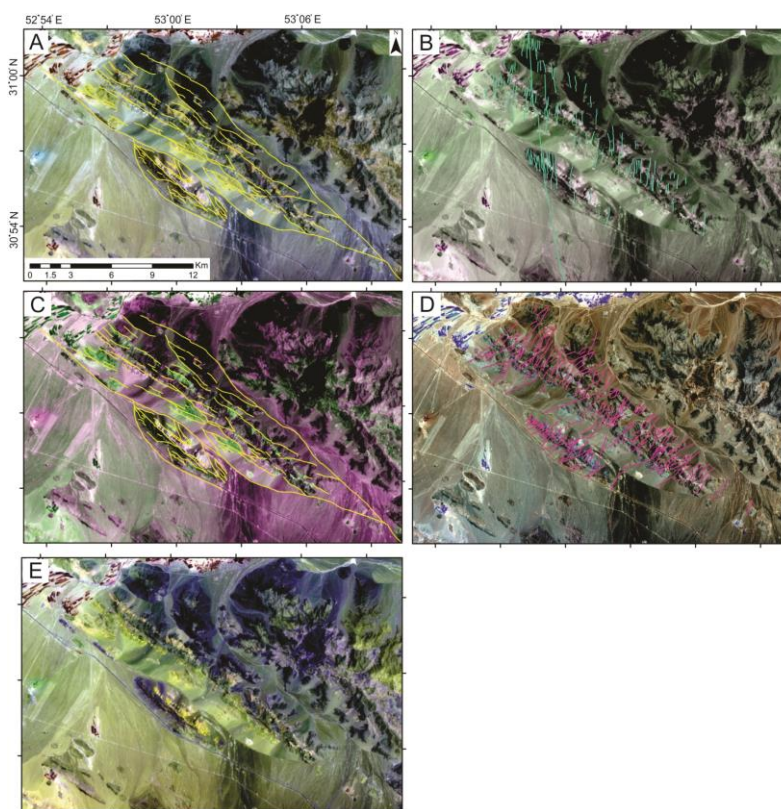
کانی‌های دارای بنیان OH (دگرسانی سربستیک و آرژلیک) به رنگ صورتی و دگرسانی پروپلیتیک به رنگ سبز بارزسازی می‌شوند. علت این امر انعکاس بیشتر کانی‌های دارای بنیان OH در محدوده بانده ۴ (نسبت به باندهای ۶ و ۸) و انعکاس بالای کانی‌های کلریت و اپیدوت در محدوده بانده ۶ سنجنده Aster است (Di Tommaso and Rubinstein, 2007). دیگر ترکیب رنگی کاذب استفاده شده (RGB:4,6,4) و (RGB:8,4,8) بر روی تصویر ماهواره‌ای Aster (شکل‌های ۷ب و ج) است که منحنی‌های استاندارد نشان دهنده این است که، کانی‌های هالوزیت، کائولینیت، مسکوویت، پیروفیلیت و دیکیت (شاخص پهنه‌های دگرسانی آرژلیک و فلیک) در بانده ۴ قلمرو SWIR دارای حداکثر انعکاس و در بانده ۶ به دلیل جذب، دارای انعکاس پایین است. به علاوه کانی‌های اپیدوت و کلسیت (شاخص پهنه‌های پروپلیتیک) در بانده ۴ و ۵ دارای حداکثر انعکاس و در بانده ۸ دارای حداقل انعکاس

GIS با استفاده از ابزار XTools محاسبه گردید. سپس با استفاده از ابزار Geostatistical Analyst در برنامه Arc Map، و از روش کریجینگ ساده، با مدل ارزش گوسی نقشه هم‌شدت شکستگی منطقه ترسیم گردید. از نظر آماری در حدود ۷۰ الی ۸۰ درصد شکستگی‌های منطقه در کلاس شکستگی‌های تراکم نسبتاً زیاد تا زیاد طبقه بندی می‌شوند.

در کنار بررسی شواهد ساختاری منطقه به منظور بررسی تأثیر متقابل تکتونیک و کانی‌زائی در ناحیه، به مطالعه و تحلیل پهنه‌های دگرسانی با تصاویر ماهواره‌ای و صحت‌سنجی آن‌ها در مطالعات صحرایی پرداخته شد که در ادامه به آن اشاره می‌شود.

۳-۴- بارزسازی پهنه‌های دگرسانی

ترکیب رنگی کاذب: به جهت بارزسازی و شناسایی پهنه‌های دگرسانی هیدروترمال، از ترکیب‌های رنگی کاذب، نسبت‌گیری باندی استفاده شد. جهت تفکیک پهنه‌های دگرسانی، از ترکیب رنگی کاذب (RGB: 4,6,8) استفاده گردید (شکل ۷الف) که در این روش



شکل ۷: الف: ترکیب رنگی کاذب (کتابی و همکاران، ۱۳۹۲) (RGB: 4,6,8) بر روی تصویر ماهواره‌ای Aster، ب: ترکیب رنگی کاذب (RGB: 4,6,4) بر روی تصویر ماهواره‌ای Aster، ج: ترکیب رنگی کاذب (RGB: 8,4,8) بر روی تصویر ماهواره‌ای Aster، د: ترکیب رنگی کاذب (RGB: 4,6,1) بر روی تصویر ماهواره‌ای Aster، ه: ترکیب رنگی کاذب (RGB: 1,2,3) بر روی تصویر ماهواره‌ای Aster.



هستند.

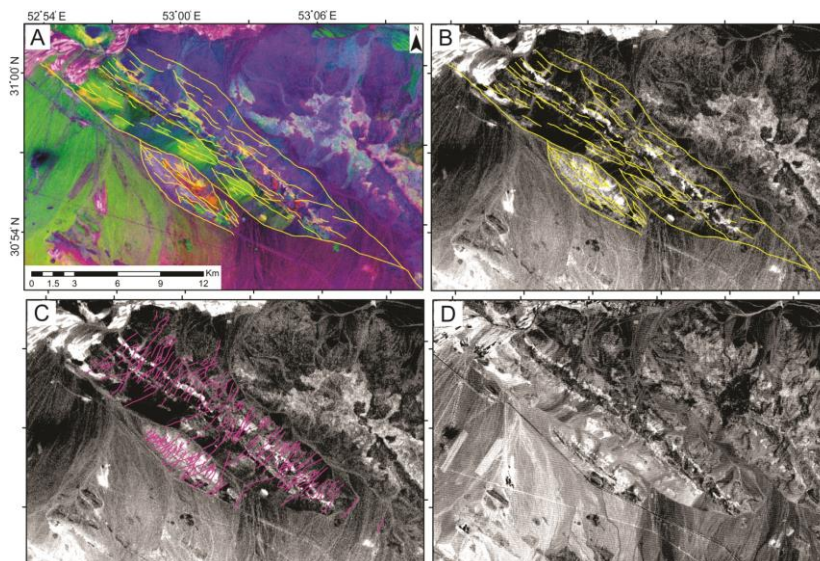
اطلاعات حاصل از استفاده از این ترکیب رنگی‌های کاذب نشان از گسترش پهنه دگرسانی آرژیلیکی در بخش مرکزی تا به سمت جنوب منطقه و در حوالی گسل‌های آباد و سورمق و در کنتاکت با شاخه‌های فرعی گسل گشار دارد (شکل ۷). دگرسانی پروپلیتیکی در بخش شمالی و به سمت شمال غرب منطقه بیشتر به صورت حضور خاک صنعتی رخنمون پیدا کرده است. دگرسانی پروپلیتیک بیشتر در مناطقی که گسل‌های شمال غربی - جنوب شرقی عمل کرده‌اند بیشتر نمود پیدا کرده است. جهت بارزسازی اکسیدهای ثانویه آهن در منطقه از ترکیب رنگی (RGB: 4,6,1) و (RGB: 1,2,3) بر روی تصاویر Aster استفاده شد (شکل‌های ۷د، ه). این مناطق به ترتیب با رنگ زرد تا سبز و سفید تا کرم، مناطق حاوی اکسید ثانویه آهن را نشان می‌دهند. اکسید ثانویه آهن در مناطق نزدیک به پهنه آرژیلیکی بیشتر مشاهده می‌شود و احتمالاً تحت تأثیر عملکرد گسل‌های شمال شرقی - جنوب غربی با گسل‌های به موازات گسل‌های سورمق و آباد است. نسبت‌گیری بانندی: نسبت‌گیری بانندی یکی از روش‌های پردازش تصاویر چند طیفی است که با شناخت درست از خصوصیات طیفی جذبی و انعکاسی کانی‌ها، باندهای مناسب دارای بیشترین و کمترین انعکاس را می‌توان به طور صحیح انتخاب نمود و به صورت کسری این میزان انعکاس و جذب را مورد محاسبه قرار داد. از جمله مهمترین مزیت‌های این روش می‌توان به کاهش خطاهای اتمسفریک و تفکیک دقیق مرز بین واحدهای سنگ‌شناسی و پهنه‌های دگرسانی اشاره نمود (Rouskov et al., 2005). جهت شناسایی مناطق دارای اکسیدهای ثانویه آهن در تصویر ماهواره‌ای Aster می‌توان از نسبت‌گیری (۱/۲) به جهت جذب در ناحیه باندهای ۱ و تابش در ناحیه باندهای ۲ بهره گرفت. در تصویر حاصل از این نسبت‌گیری، این مناطق با پیکسل‌های روشن نمایان می‌شوند. از جمله دیگر نسبت‌گیری‌ها می‌توان به نسبت بانندی (۶/۴) برای مشخص کردن کانی‌های شاخص دگرسانی آرژیلیک و فلیک به دلیل انعکاس بالا در باندهای ۴ و انعکاس پایین در باندهای ۶ اشاره نمود. جهت شناسایی پهنه‌های دگرسانی می‌توان از نسبت

دادن هر نسبت‌گیری بانندی به هر یک از کانال‌های تصویر رنگی RGB به ایجاد یک ترکیب بانندی کاذب پرداخت. بدین ترتیب از جمله ترکیب‌های رنگی می‌توان به (RGB: 4/6,5/8,3/4) اشاره نمود. در این ترکیب رنگی به ترتیب از نسبت بانندی (۶/۴) تصویر Aster برای بارزسازی کانی‌های رسی و مسکوویت (به رنگ صورتی) به علت انعکاس بالای این کانی‌ها در باندهای ۴ و جذب بالا در باندهای ۶، نسبت بانندی (۸/۵) برای دگرسانی پروپلیتیک (به رنگ سبز) به علت انعکاس بالای کانی‌های این پهنه در باندهای ۵ و جذب بالا در باندهای ۸ و نسبت بانندی (۴/۳) برای سنگ‌های دگرسان نشده (به رنگ آبی) استفاده می‌شود.

نتیجه پردازش ترکیب رنگی (RGB: 4/6,5/8,3/4) نشان داد که با حرکت به سمت شمال شرق منطقه از میزان دگرسانی کاسته می‌شود و این دگرسانی بیشتر در ارتباط با گسل‌هایی با روند شمال غربی - جنوب شرقی است (شکل ۸الف). همچنین کانی‌های رسی در دشت‌ها و دامنه ارتفاعات گسترش بیشتری دارند. با بررسی نسبت‌گیری بانندی ۶/۴ مشخص شد که در قسمت شمالی منطقه به موازات گسل بزرگ و هم راستا با گسل آباد و سورمق یک پهنه آرژیلیکی (به صورت پیکسل‌های روشن) وجود دارد. به طور کاملاً واضح در اثر کنتاکت گسل‌های شمال غربی - جنوب شرقی با گسل‌های شمال شرقی - جنوب غرب این پهنه ایجاد شده است و احتمالاً در زیر لایه‌های آهکی قرار دارد (شکل ۸ب، ج). همچنین بررسی نسبت بانندی ۱/۲ نشان می‌دهد اکسید ثانویه آهن نیز در دشت‌ها و دامنه ارتفاعات گسترش بیشتری دارند (شکل ۸د).

۴-۴- بررسی مناطق مستعد حضور کانسار منگنز با استفاده از بارزسازی طیف رنگی نارنجی و آبی و روش مؤلفه‌های اصلی

آنالیز مؤلفه‌های اصلی به منظور دستیابی به مناطق دارای پتانسیل حضور منگنز - اطلاعات باندهای مختلف تصاویر چند طیفی سنجش از دور عموماً دارای همبستگی هستند. معمولاً همبستگی منفی بین باندهای مادون قرمز و باندهای مرئی و همبستگی مثبت بین باندهای مرئی بر روی پوشش‌های خاکی و سنگی وجود دارد (Lillesand et al., 2015). هدف از آنالیز مؤلفه‌های اصلی تعیین تعداد ابعاد موجود در



شکل ۸: الف: نسبت بانندی (RGB: 4/6,5/8,3/4) بر روی تصویر ماهواره‌ای AStER (کتابی و همکاران، ۱۳۹۲) به همراه گسل‌های برداشت شده با روند شمال غربی- جنوب شرقی، ب و ج: نسبت بانندی ۴/۶ اعمال شده بر روی تصویر ماهواره‌ای AStER همراه با روندهای گسلی شمال غربی- جنوب شرقی و روندهای گسلی شمال شرقی- جنوب غربی)، د: نسبت بانندی ۲/۱ انجام شده بر روی تصویر ماهواره‌ای AStER که نواحی با پیکسل روشن نشان از حضور اکسید ثانویه آهن است.

۱ام است. بنابراین برای هر مؤلفه اصلی یا بردار ویژه یک تصویر که معرف تغییرپذیری در جهت آن بردار است بدست می‌آید (Campbell and Wynne, 2011, Force et al, 1999, Krishnamoorthy, 1995, Lillesand et al., 2015). شکل ۹، نشان‌دهنده تصویر (RGB: PC2, PC3, PC4) به دست آمده از تصویر ماهواره‌ای منطقه است که با همبستگی اطلاعات و داده‌ها به روش توضیح داده شده به دست آمده است و توانایی تفکیک پهنه‌های کانی‌سازی را به رنگ نارنجی دارد. به این نکته باید توجه داشت که در تصویر حاصل، طیف وسیع و متعددی از رنگ نارنجی حضور دارد که با آزمون و خطا و مقایسه با سایر تصاویر حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ (مقایسه با شکل ۹ الف و ب) این نواحی نارنجی رنگ به بهترین شکل جدا و تشخیص داده شده‌اند.

علاوه بر آن، روش دیگری نیز به منظور مشخص کردن مناطق دارای پتانسیل کانی‌زایی وجود دارد که مبتنی بر آنالیز مؤلفه‌ها به روش کسر حداقل نویز می‌باشد. در این روش بارزسازی به رنگ آبی تیره انجام می‌شود. با توجه به حضور طیف‌های دیگری از رنگ آبی باید در مشخص کردن پهنه‌ها دقت به خرج داد و با مقایسه این تصویر با تصاویر پردازش شده دیگر و تشخیص

یک مجموعه اطلاعاتی است. تعیین ضرایب موقعیت محورهایی که دلالت بر وجود حداکثر تغییر پذیری را دارند از اهداف دیگر آنالیز مؤلفه‌های اصلی است، این محورها همبستگی ندارند.

در روش مؤلفه‌های اصلی به طور کلی ماتریس وارپانس-کووارپانس همبستگی باندها محاسبه می‌شود. چنانچه P باند موجود باشد، هر کدام از ماتریس‌های متقارن P ردیف و ستون خواهند داشت. مجموعه‌ای از کمیت‌ها که مقدار ویژه نامیده می‌شود با استفاده از روش جبر خطی محاسبه می‌گردد. بردار ویژه از ریشه دوم مقدار ویژه مربوطه تعیین می‌گردد و می‌تواند به عنوان همبستگی بین مؤلفه‌های اصلی مجرد و هر باند تصاویر چند طیفی بیان گردد. این همبستگی‌ها در تفسیر مؤلفه‌های اصلی استفاده می‌شوند. ارزش‌های عددی تصویر مؤلفه اصلی با استفاده از مقادیر ارزش‌های عددی در تصاویر اولیه و مؤلفه‌های بردارهای ویژه به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$P_k = \sum_{i=1}^n a_{ik} DN(i) \quad (1)$$

که Pk ارزش عددی پیکسل برای k امین مؤلفه اصلی، DN(i) ارزش عددی باند i ام برای پیکسل، aik عنصر بردار بار به دست آمده از بردار ویژه مؤلفه k ام در باند



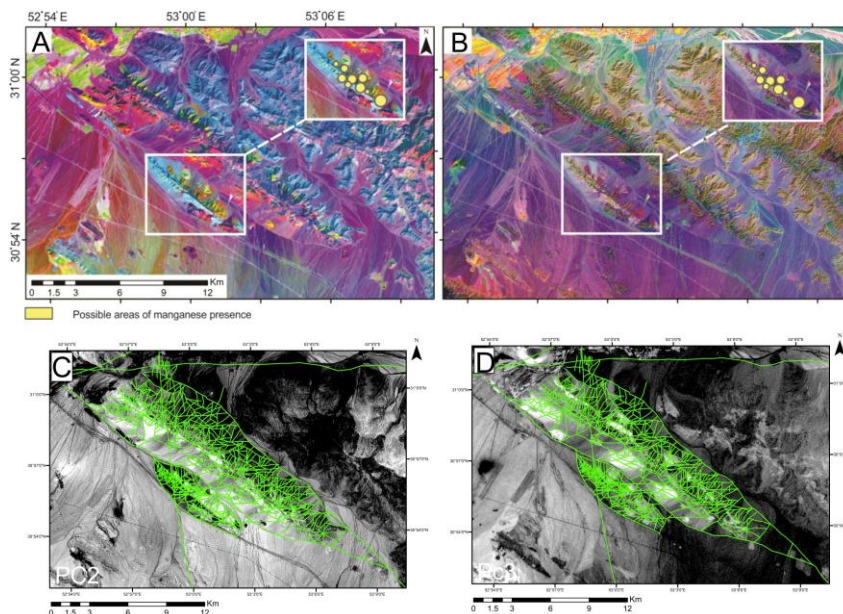
و مقدار مثبت در باند ۸ در عدد منفی ۱ ضرب شد. تصویر این PC در شکل ۹ د، نشان داده شده است که دگرسانی پروپلیتیک با پیکسل‌های روشن در تصویر مشهود می‌باشد.

نتایج به دست آمده از آنالیز مؤلفه اصلی، نشان از حضور دگرسانی آرژیلیکی در محل کتاکت گسل‌های شمالی-جنوبی با گسل‌های شمال غربی-جنوب شرقی است. همچنین دگرسانی پروپلیتیک در محل گسترش گسل‌های شمال غربی-جنوبی شرقی، بیشتر رخنمون دارد و در کتاکت این گسل‌ها با گسل‌های شمال شرقی-جنوب غربی، بیشتر می‌شود. در بخش مرکزی رو به سمت شمال منطقه دگرسانی پروپلیتیک بیشتر رخنمون پیدا می‌کند. تحلیل مؤلفه اصلی به منظور آخرین فیلتر کنترلی جهت بررسی صحت اطلاعات به دست آمده انجام شد و تطابق خوبی را با اطلاعات قبلی نشان می‌دهد. آنالیز مؤلفه‌های اصلی به منظور دستیابی به مناطق دارای پتانسیل حضور منگنز-اطلاعات باندهای مختلف تصاویر چند طیفی سنجش از دور عموماً دارای همبستگی هستند. معمولاً همبستگی منفی بین باندهای مادون قرمز و باندهای مرئی و همبستگی مثبت بین باندهای مرئی بر روی پوشش‌های خاکی و سنگی وجود دارد (Lillesand and Kiefer, 2015). وجود همبستگی بین تصاویر باندهای چند طیفی نشان از وجود اطلاعات مشترک و تکرار اطلاعات است. نتایج حاصل از بررسی مناطق مستعد حضور منگنز، نشان می‌دهد که بین کتاکت گسل‌های شمال غربی-جنوب شرقی با گسل شمالی-جنوبی گشار و شاخه‌های فرعی این گسل‌ها، منگنز فراوان وجود دارد که احتمالاً دارای غنای نسبتاً بالایی نیز هست (مقایسه شکل‌های ۵ و ۹، الف و ب) نواحی امید بخشی که از مطالعات سنجش از دور به دست آمده است، در بررسی‌های صحرائی صحت‌سنجی گردید که GPS نواحی برداشت شده دارای غنای منگنز با نواحی امید بخش به دست آمده از مطالعات سنجش از دور با هم تطابق خوبی دارند و نشان داد که تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ به خوبی می‌تواند برای بارزسازی نواحی دارای کانسار منگنز بکار گرفته شوند.

همپوشانی‌ها نواحی مورد نظر، جداسازی شوند (شکل ۹الف و ب). با توجه به اینکه در منطقه مورد مطالعه پوشش گیاهی و احتمال خطا وجود ندارد، از هیچگونه فیلتری برای جداسازی گیاهان نظیر فیلتر NDVI استفاده نشد.

روش تحلیل مؤلفه اصلی-تکنیک استفاده از روش تحلیلی مؤلفه اصلی برای اولین بار توسط کراستا و همکاران در سال ۱۹۸۹ پیشنهاد گردید (Crosta et al., 1989). با استفاده از این تکنیک می‌توان، یک هدف خاص را در یکی از تصاویر به دست آمده از پردازش مؤلفه‌های اصلی با پیکسل‌های روشن نمایان ساخت و نسبت به سایر پدیده‌ها آن را به صورت متمایز نشان داد. این روش بر اساس تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی صورت گرفته است (Ranjbar and Honar-mand, 2004). با توجه به ماتریس عملیات حاصل از PCA بر روی داده‌ها و آنالیز باندهای مختلف موجود، کانی‌های شاخص نواحی دگرسانی آرژیلیک و فلیک از جمله کانی‌های هالوزیت، کائولینیت، مسکوویت، پیروفیلیت و دیکیت در باند ۴ دارای انعکاس بالا و در باند ۶ دارای انعکاس پایین هستند. مطابق با این نتیجه بیشترین اختلاف بین مقادیر بردارهای ویژه باندهای ۴ و ۶ در مؤلفه دوم (PC2) مشاهده می‌گردد. واضح است که در باند ۴ انعکاس (علامت مثبت) و در باند ۶ جذب (علامت منفی) دارد. در اینجا به منظور نمایش دگرسانی نواحی با پیکسل‌های روشن نیازی به تغییر دادن علامت‌ها نیست. تصویر این PC در شکل ۹ ج، نشان داده شده است که دگرسانی نواحی آرژیلیک و فلیک با پیکسل‌های روشن مشهود می‌باشد.

برای کانی‌های شاخص ناحیه پروپلیتیک (کانی‌های کلریت، اپیدوت و کلسیت) با توجه به منحنی استاندارد انعکاسی آن‌ها در باند ۴ و ۵ دارای سیمای انعکاسی و در محدوده طیفی باند ۸ دارای سیمای جذبی هستند. ماتریس بردارهای ویژه این ترکیب باندهای ۴، ۵ و ۸ اختلاف بین مقادیر بردارهای ویژه باندهای ۴، ۵ و ۸ در مؤلفه سوم (PC3) مشاهده می‌گردد. باندهای ۴ و ۵ انعکاس علامت منفی و باند ۸ جذب علامت مثبت دارند. در اینجا به منظور نمایش دگرسانی با پیکسل روشن، نیاز به تغییر علامت‌ها هست. به همین منظور مؤلفه PCA3 به دلیل مقادیر ویژه منفی در باند ۴ و ۵



شکل ۹: الف: تصویر به دست آمده از پردازش مؤلفه‌های اصلی (Ahmadi and Pekkan, 2021) تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ به منظور بررسی نواحی مستعد حضور منگنز (نواحی دارای منگنز با رنگ نارنجی بازسازی می‌شوند)، ب: تصویر به دست آمده از پردازش تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ به منظور بررسی نواحی مستعد حضور منگنز (نواحی دارای منگنز با رنگ آبی تا آبی پورنگ بازسازی می‌شوند). ج: اعمال فیلتر مؤلفه اصلی PC2 بر روی تصویر ماهواره‌ای ASTER به همراه روندهای گسلی شمال غربی - جنوب شرقی و روندهای گسلی شمال شرقی - جنوب غربی به منظور نمایش دگرسانی آرژیلیک و فیلیکی با پیکسل‌های روشن. د: اعمال فیلتر مؤلفه اصلی PC3 بر روی تصویر ماهواره‌ای ASTER به همراه روندهای گسلی شمال غربی - جنوب شرقی و روندهای گسلی شمال شرقی - جنوب غربی به منظور نمایش دگرسانی پروپلیتیکی با پیکسل‌های روشن.

مؤلفه‌های معکوس و راستگرد (آباد و سورمق) را نشان داد. این سیستم گسلی باعث تغییر شکل‌های شکنده در مقیاس وسیع و ایجاد فضای مناسب جهت کانه‌زایی در منطقه شده است. در مطالعات صحرایی بر روی پهنه‌های گسلی سورمق و آباد و شاخه‌های فرعی آنها، سازوکار غالب شیب‌لغز معکوس با مؤلفه امتدادلغز راستگرد بر روی واحدهای زمین‌شناسی مختلف منطقه مشاهده می‌شود (ارفع نیا، ۱۳۹۱). برخی برداشت‌های انجام شده از این پهنه‌ها، مؤلفه شیب‌لغز نرمال (شکل ۱۰ الف) را نشان می‌دهند که ممکن است به دلیل معکوس شدن تکنیک در این منطقه باشد. از دیگر سیستم‌های گسلی منطقه، سیستم گسلی شمالی - جنوبی در منطقه است که خود گسل اصلی گشار، طولی بالغ بر حدود ۵۰ کیلومتر داشته و پهنه خرد شده نسبتاً بزرگی را در اطراف خود ساخته است. سازوکار این سیستم گسلی به صورت امتدادلغز راستگرد گاهی همراه با مؤلفه شیب‌لغز نرمال می‌باشد و آثار شاخه‌های فرعی آن در منطقه بخوبی دیده

۵- مطالعات صحرایی

جهت تعیین صحت بازسازی‌های انجام شده بر روی تصاویر ماهواره‌ای و بررسی الگوی دگرسانی و ایجاد کانسار منگنز، بررسی‌های صحرایی در بخش‌هایی از منطقه که ماده معدنی منگنز حضور دارد، با تمرکز بر ساختارهای گسلی و نحوه گسترش و ارتباط آن با پهنه دگرسانی انجام شد. در ایستگاه‌ها شواهدی از عملکرد گسل‌های مرتبط با گسل سورمق، آباد و گشار وجود داشت (شکل اب و ج).

شواهد ساختاری: در مطالعات میدانی، وضعیت زمین‌شناسی، کانی‌سازی منگنز و زمین‌شناسی ساختاری منطقه برای دستیابی به الگوی گسل‌ها، دگرسانی‌ها و کانی‌زایی در نظر گرفته شد و بررسی‌های مختلف به‌ویژه بررسی‌های ساختاری در مقیاس‌های مختلف منطقه انجام شد.

سازوکار گسل‌ها: مطالعات ساختاری در این منطقه عملکرد یک سیستم گسل مورب‌لغز بزرگ با



می شود (شکل ۱۰ ب).

در محل‌هایی از پهنه‌های خردشده گسل‌های شمال غربی- جنوب شرقی و شمالی- جنوبی و شاخه‌های فرعی آن‌ها، کانی‌زائی منگنز دیده می‌شود. شکستگی‌های مرتبط با کانی‌زائی: طی پیمایش‌های صحرایی در نواحی مختلف منطقه مورد بررسی، کانسار منگنز با عیارهای متفاوت شناسایی شد. الگوی گسل‌ها و موقعیت این مناطق با هم مطابقت داده شد. براین اساس، تمرکز کانه‌زائی در راستای گسل‌ها و محدوده‌هایی با حداکثر تراکم شکستگی و کنتاکت گسل‌ها بیشتر می‌باشد (شکل ۱۰ ج). به منظور بررسی دقیق‌تر نقش گسل‌ها و شکستگی‌ها در کنترل کانی‌زائی، مناطق هدف (مناطق دارای رگه‌های کانسار منگنز) به صورت جزئی‌تر از لحاظ ساختاری مورد بررسی قرار گرفتند. در این نواحی، علاوه بر مقایسه آن‌ها با تصاویر ماهواره‌ای، برداشت‌های ساختاری از رگه‌ها و شکستگی‌های مرتبط انجام شد. نمودار استریونت برداشت‌های ساختاری منطقه به صورت ۴ راستای شرقی- غربی، شمالی- جنوبی، شمال غربی- جنوب شرقی و شمال شرقی- جنوب غربی تهیه شد (شکل ۱۰ د) و با نمودار گل سرخی تهیه شده از تصاویر ماهواره‌ای (شکل ۵) مقایسه شدند.

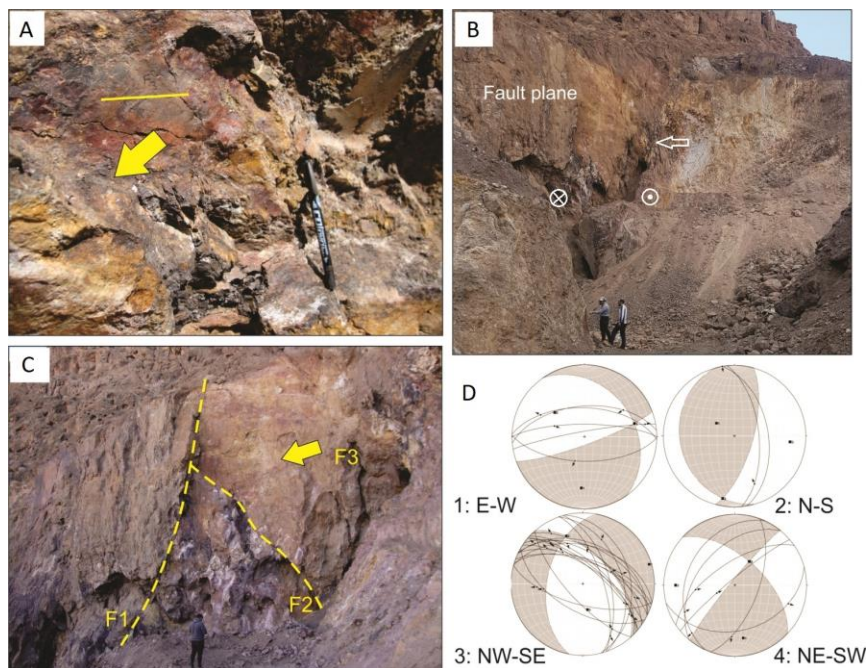
نتیجه بررسی ساختاری بر روی گسل‌ها در مطالعات صحرایی و سنجش از دور نشان می‌دهد که شکستگی‌ها و گسل‌هایی که در این ناحیه نقش بسزایی در کانه‌زائی و ایجاد اندیس منگنز داشته‌اند عموماً راستای غالب شمال غربی- جنوب شرقی (آزیموت ۳۱۰ تا ۳۲۰) را دارند که علاوه بر حضور منگنز در کنتاکت این گسل‌ها با گسل‌های شمالی- جنوبی، در کنتاکت با گسل‌های با راستای شمال شرقی- جنوب غربی حضور منگنز نیز احساس می‌شود (شکل ۱۱). بنابراین احتمال می‌رود، علاوه بر گسل‌های با راستای شمال غربی- جنوب شرقی (گسل‌های به موازات سورمق و آباده) و گسل‌های با راستای شمالی- جنوبی، گسل‌های شمال شرقی- جنوب غربی نیز در جایگیری کانسار منگنز نقش دارند. در طی مقایسه راستای شکستگی‌های شناسایی شده طی پردازش تصاویر ماهواره‌ای با راستای شکستگی‌های مرتبط با کانی‌زائی برداشت شده در پیمایش صحرایی، به نظر می‌رسد که راستای

با آزیموت ۳۱۰ تا ۳۲۰، بیشترین نقش را در کنترل کانی‌زائی منگنز ایفا می‌کند. بقیه روندهای گسلی در کنار این سیستم گسلی نقش تکمیلی را در تکامل کانسارسازی ناحیه ایفا کرده‌اند. همچنین پهنه‌های آرژیلیک و پروپیلیتی در امتداد پهنه‌های خرد شده گسل‌ها و در تماس آن‌ها با گسل‌های N-S و NE-SW قابل مشاهده هستند. سایر روندهای گسلی ممکن است نقش مکملی در تکامل ناحیه ایفا کنند. علاوه بر کانی اصلی، آثاری از رگه‌های باریت و کوارتز به صورت رگه‌های پر شده در ارتباط با شکستگی در این ناحیه دیده شده است (شکل ۱۲). عملکرد فازهای مختلف کانی سازی ممکن است به دلیل وقوع چندین فعالیت گسلی و نفوذ مواد معدنی در منطقه باشد.

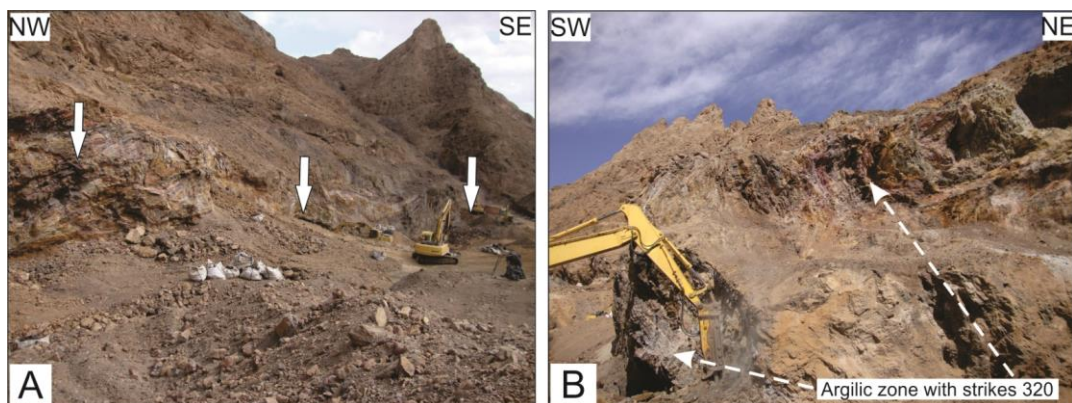
۶- بحث

منشاء احتمالی کانسار

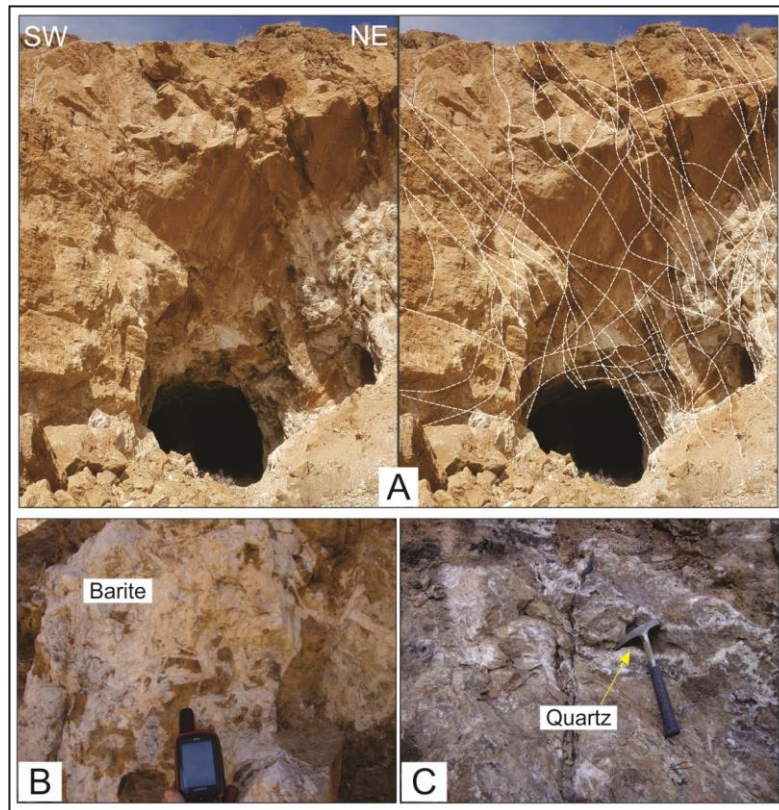
مطالعات زمین شناسی اقتصادی انجام شده بر روی کانسار منگنز این منطقه نشان داده است که این کانسار از یک سیال با درجه حرارت حدود ۴۰۰ درجه سانتیگراد، خنثی و غنی از منگنز و کلر و فقیر از سولفید می‌باشد که طی کاهش عمق و دما در واحدهای سنگی آهکی و دارای شیل و شیست‌های رسی شده طی فرآیند جان‌شینی، جایگزین شده است (موسوی، ۱۳۹۰). کانسنگ منگنز سورمق، سیلیس، کبالت، نیکل و مس زیاد و آهن جزئی دارد. مسیر بالا آمدن این سیال ممکن است منطبق بر پهنه‌های خردشده گسل‌های پی‌سنگی و عمیق موجود در این ناحیه باشد. بر اساس نتایج بدست آمده از این مطالعه و پژوهش قبلی مدلی برای بررسی ارتباط منشاء کانسار منگنز و گسل‌های منطقه در شکل ۱۳ ارائه شده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌گردد، راندگی اصلی زاگرس از مهمترین گسل‌های این منطقه به شمار می‌رود که با شیب رو به شمال شرق به همراه شاخه‌های فرعی آن که می‌توان گسل‌های آباده و سورمق را در نظر گرفت، مسیر انتقال سیال حاوی کانسار را از اعماق به



شکل ۱۰: الف: گسل در ارتباط با گسل اصلی منطقه با روند شمال غربی - جنوب شرقی که مؤلفه نرمال و نشانی از عملکرد تکتونیک معکوس را در منطقه نشان می‌دهد، ب: شاخه فرعی یکی از گسل‌های در ارتباط با عملکرد گسل اصلی منطقه با راستای شمالی - جنوبی که مؤلفه برشی راستگرد را نشان می‌دهد، ج: حضور ماده معدنی منگنز در بین کنتاکت‌های گسلی که شاخه‌های فرعی گسل سورمق و آباده می‌باشند، د: نمودار استریوگرام حل صفحات گسل‌های برداشت شده در مطالعات صحرائی که به ترتیب روندهای شرقی - غربی، شمالی - جنوبی، شمال غربی - جنوب شرقی و شمال شرقی - جنوب غربی را نشان می‌دهند.



شکل ۱۱. الف: چشم انداز پهنه گسلی سورمق و قرارگیری نهشته منگنز در حاشیه شکستگی‌های مربوطه. ب: ناحیه آرژیلیک در ناحیه شکستگی‌هایی که موازی با گسل سورمق است.



شکل ۱۲. الف و ب: وجود کانی های باریت و رابطه آن ها با شکستگی ها. ج: تبلور کوارتز در میان شکستگی ها.

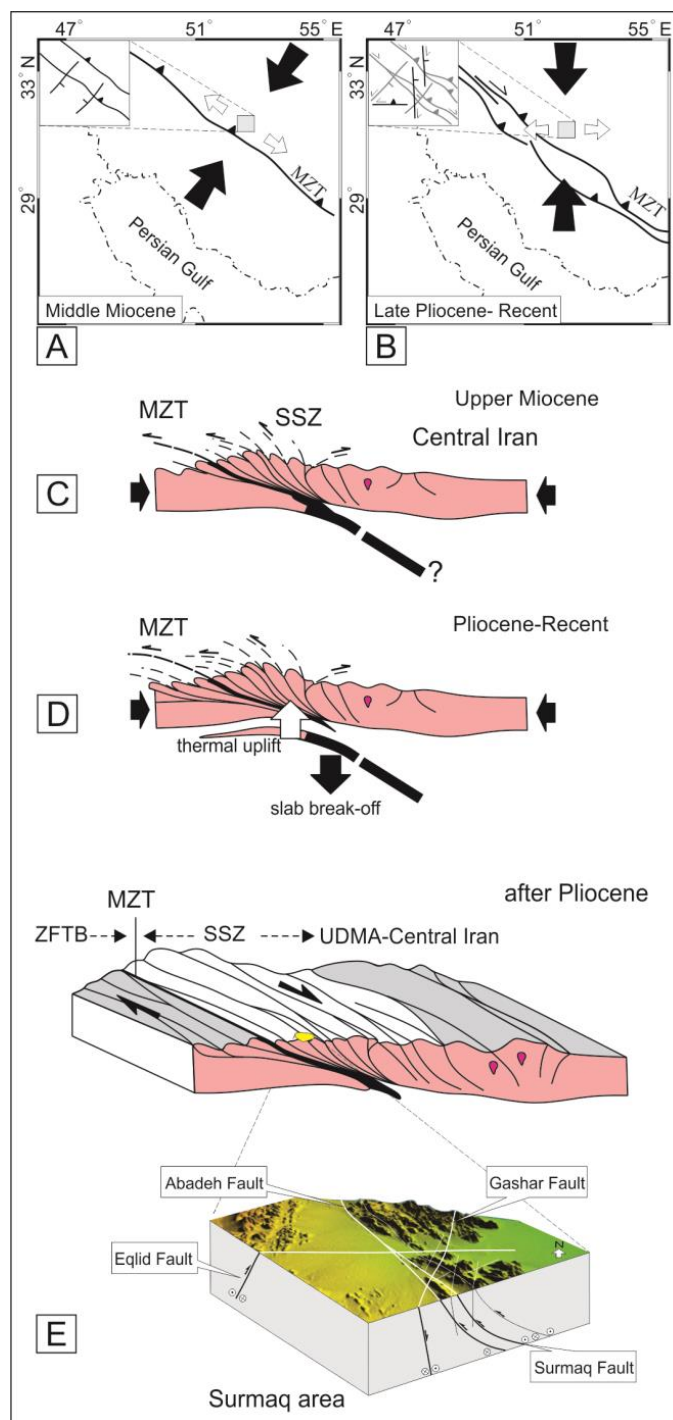
است (شکل ۱۳ الف و ج) (از جمله 1994, 2004, Alavi). مولینارو و همکاران (Molinaro et al., 2005a) معتقد بودند که کمر بند کوهزایی از میوسن میانی تحت دو مرحله اصلی تغییر شکل تکتونیکی قرار گرفته است (شکل ۱۳ ج و د). در مرحله اولیه میوسن میانی تا پلیوسن، تحت عنوان فاز پوسته نازک، لایه پوششی به صورت یک سری چین های بزرگ که بر روی یک لایه پایه ضخیم نمک است جدا می شود. کوتاه شدگی در این مرحله احتمالاً در پی سنگ بر پایه عملکرد راندگی اصلی زاگرس در پهنه سنندج- سیرجان رخ داده است. در مرحله دوم و با شروع در پلیوسن، تغییر شکل اصلی بر اثر عملکرد گسل های معکوس پی سنگی رخ داده است (شکل ۱۳ د) (Molinaro et al., 2005a). به گفته ایشان، تغییر شکل تکتونیکی در این منطقه از کوهزاد زاگرس در نتیجه بالا آمدگی ناشی از شکست اسلب

سمت سطح فراهم کرده است.

۱-۱-۶- زمین شناسی و زمین ساخت منطقه

۱-۶- کوهزاد زاگرس

با تشدید همگرایی بین صفحات عربی و اوراسیا، ساختارهای منطقه در برخورد بین صفحات دچار تغییر شکل بیشتری شدند. راندگی اصلی زاگرس، یکی از مهم ترین گسل های این ناحیه است که به عنوان زمین درز پهنه برخورد قاره ای بین اوراسیا و صفحه عربی در پی بسته شدن اقیانوس نئوتتیس و توسعه کوهزاد زاگرس در نظر گرفته می شود (Ricou 1971; Fal- con 1974; Berberian and King 1981). در طی این برخورد، گسترش چین ها و رانش های با راستای NW-SE در واحدهای ساختاری مختلف کمر بند کوهزایی اتفاق افتاد (شکل ۱۳ الف و ب). مؤلفه های برشی بر روی گسل ها، حرکتی با راستای شمالی- جنوبی را نشان می دهند که باعث گسترش چین های نامتقارن و برگشته رو به جنوب غربی و رانش های متعدد با شیب به سمت شمال شرق، به همراه مؤلفه های کششی بر روی گسل های شمالی- جنوبی و مؤلفه های فشاری بر روی گسل های شرقی- غربی در نقاط مختلف شده



شکل ۱۳. الف و ب: تکامل تکتونیکی و تاریخچه تنش دیرین در پهنه برخوردی زاگرس در تکتونیک محلی از زمان میوسن میانی بر اساس جهت تنش دیرینه بازسازی شده از تحلیل تکتونیک شکننده (Navabpour et al. 2007). مستطیل ناحیه سورمق را نشان می‌دهد. خطوط، مجموعه گسل‌های عمده‌ای را نشان می‌دهند که در جریان حرکات زمین‌ساختی منطقه‌ای شکل گرفته‌اند. ج و د: مدل متوالی شماتیک تکامل تکتونیکی پهنه برخوردی زاگرس و تشکیل برش‌های تکتونیکی اصلی و بالا آمدن یا بالا آمدگی پهنه برخورد در حین تغییر شکل‌های برخوردی را نشان می‌دهد (اقتباس از Molinaro et al. 2005a,b; Hemmati et al. 2018). دو مرحله اصلی تغییر شکل در کوهزایی زاگرس و ارتباط احتمالی آن‌ها با گسیختگی صفحه لیتوسفری پس از میوسن پسین. در طی این مراحل، گسل‌ها، رانش‌ها و چین‌های معکوس متعددی تشکیل شد. گسل‌ها واحدهای سنگی پی سنگی را به سطوح پوسته کم عمق منتقل کرده‌اند. ه: حرکات امتداد لغز پس از پلیوسن آغاز شد (اقتباس از Nadimi and Konon 2012a; Hemmati et al. 2018). در هنگام شروع حرکات، گسل‌های با روند شمال غربی - جنوب شرقی دوباره فعال شدند و ممکن است مکانیسم آن‌ها از معکوس به معکوس و امتداد لغز راست گرد تغییر کرده باشد و باعث برش خوردن ناحیه سورمق شده باشد. در این مرحله الگوهای جدیدی از گسل‌ها و پهنه‌های شکسته شده شکل گرفت. مدل شماتیک ناحیه سورمق ارتباط بین الگوهای مختلف گسل را نشان می‌دهد.



فرورونده رخ داده است (شکل ۱۳د).

۲-۱-۶- فعالیت مجدد گسل‌ها

کمر بند چین خورده- رانده زاگرس سرگذشت پیچیده‌ای دارد. در طول میوسن، همگرایی دچار تغییر جهت از شمال شرقی به سمت شمال شد (McQuarrie et al. 2004; Bachmanov et al. 2003; rie et al. 2004) و با چین خوردگی و راندگی در واحدهای ساختاری به خصوص واحدهای ساختاری نزدیک سوچور زون همراه بود (شکل ۱۳ الف و ب) (Molinari et al., 2005b). Navardpour et al. (2007) رژیم‌های مختلف تنش کششی، فشاری و امتداد لغز را در طول کمر بند زاگرس شناسایی کردند. بر اساس تحقیقات آن‌ها، جهت رژیم تنش فشاری از ۵۳ درجه (میوسن اولیه)، به ۰۲ درجه (پس از پلیوسن) تغییر کرده است (شکل ۱۳ الف و ب). در طول تغییر جهت کوتاه شدگی، علاوه بر تشکیل چندین مجموعه گسل جدید، بسیاری از گسل‌های قدیمی دوباره فعال شده‌اند. در این دوره حرکات امتداد لغز در راستای گسل‌های کمر بند کوهزایی زاگرس به ویژه در پهنه سندانج- سیرجان شکل گرفت (شکل ۱۳ ه) (Nadimi and Konon 2012a). این تغییر همگرایی علت اصلی تشکیل گسل‌های جدید به ویژه گسل‌های با روند شمالی- جنوبی است. تغییر مکانیسم گسل‌ها و همچنین تلاقی گسل‌های مختلف ممکن است شرایط مناسبی را برای بالا آمدگی برخی سیالات غنی از مواد معدنی ایجاد کرده باشد.

در منطقه سورمق، گسل‌های آباده و سورمق را می‌توان به عنوان معبر اصلی انتقال سیال حاوی کانسار در نظر گرفت که در محل پهنه‌های خرد شده گسلی و شاخه‌های مختلف آن‌ها و همچنین دیگر مجموعه‌های گسلی نظیر گسل گشار و فراغه به هم پیوسته‌اند و به نهشت کانسارهای ماگمایی کمک شایانی کرده‌اند.

۷- نتیجه‌گیری

۱- مطالعات ساختاری و سنجش از دور در منطقه سورمق در شمال شرق راندگی اصلی زاگرس، چهار پراکندگی اصلی گسل با راستاهای NW-SE، NE-SW، N-S و E-W را نشان داد که با توجه به راستای راندگی اصلی زاگرس می‌توان آن‌ها را به ترتیب گسل‌های طولی، عرضی، مایل N-S و E-W در نظر گرفت. سازوکار غالب این گسل‌ها بر اساس مطالعات صحرایی عبارت

است از سازوکار معکوس و راستگرد در گسل‌های طولی، نرمال و چپگرد در گسل‌های عرضی، راستگرد و نرمال در گسل‌های مایل N-S و معکوس و چپگرد در گسل‌های مایل E-W. تأثیر متقابل این گسل‌ها بر یکدیگر باعث گردیده تا ساختارهای مختلفی از جمله ساختار گل مانند مثبت و دم اسبی در راستای گسل‌های اصلی این منطقه به ویژه در طول گسل‌های طولی بوجود آید. چین خوردگی، بیرون زدگی‌های لنزی شکل و بالا آمدگی منطقه از عوارض سازوکارهای فشاری و امتداد لغز گسل‌های طولی است.

۲- طی مطالعات سنجش از دور، نقشه چگالی گسل‌ها و گره‌های ساختاری تهیه گردید و با مقایسه آن‌ها با داده‌های زمین‌شناسی اقتصادی، نقشه پتانسیل معدنی تهیه گردید. بر اساس آنالیز فرای گره‌های ساختاری، سمت همگرایی به طور میانگین با راستای NE-SW (آزیموت ۲۲۰-۰۴۰ درجه) بدست آمد. بررسی پراکندگی چگالی گسل‌ها نشان می‌دهد که در محل‌های تلاقی گسل‌های طولی با گسل‌هایی که مؤلفه‌های کششی دارند از جمله گسل‌های شمالی- جنوبی، جایگاه مناسبتر و آسانتری برای جایگیری و کانه‌زایی فراهم آمده است.

۳- بر اساس مطالعات سنجش از دور به ویژه روش‌های ترکیب رنگی کاذب، نسبت‌گیری بانندی و همچنین مطالعات صحرایی، پهنه دگرسانی آرژلیکی، پروپلیتیکی و پهنه دارای اکسید ثانویه آهن همراه با هم، در برخی نقاط به صورت در هم آمیخته مشاهده شد و به طور کلی دگرسانی آرژلیکی در مرکز منطقه و در حوالی آن دگرسانی پروپلیتیک گسترش دارند. در دشت‌ها و دامنه ارتفاعات اکسید ثانویه آهن حضور دارد که با پهنه‌های خرد شده گسلی هماهنگ است. در برخی نقاط رگه‌های سیلیسی به صورت اولیه و همچنین حضور کانسارهای دیگر نظیر باریت و خاک صنعتی در منطقه نیز مشهود است که خاک صنعتی در دگرسانی پروپلیتیکی به حداکثر خود می‌رسد.

۴- در شمال غرب منطقه معدنی، کانسار منگنز با غنای کم و حجم زیاد حضور دارد. در مرکز منطقه منگنز با غنای بالا و البته حجم کمتر در بین شکستگی‌های ناشی از عملکرد گسل‌ها دیده می‌شود. در بخش جنوب شرقی منطقه معدنی علاوه بر حضور منگنز،

- ۱- ارفع نیا، ر.، ۱۳۸۹. تکتونیک فعال در منطقه اقلید، فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی، سال ششم، شماره ۴، صفحات ۲۴۵-۲۵۶.
- ۲- ارفع نیا، ر.، ۱۳۹۱. جنبش شناختی ساختارهای گسلی در منطقه اقلید، حاشیه زاگرس بلند. مجله زمین‌ساخت، سال بیست و چهارم شماره ۹۴، صفحه ۱۰۳-۱۱۴.
- ۳- کتابی، پ.، محمدی، س.س.، زرین کوب، م.ح.، افتخاری مقدم، ط.، ۱۳۹۲. کاربرد داده‌های سنجنده Aster در اکتشاف زون‌های دگرسانی در ناحیه شیخ آباد (جنوب غرب بیرجند). پنجمین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران صفحه ۷۰۳-۷۰۸.
- ۴- موسوی، س.م.، حسین آبادی، م.، ۱۳۹۷. پهنه بندی خطر زمین لرزه و زمین لغزش به روش آنالیز شبکه (ANP) در رشته کوه باقران (جنوب بیرجند). مجله زمین‌ساخت، سال دوم شماره ۶، صفحه ۲۷-۳۷.
- ۵- موسوی، ط.، ۱۳۹۰. پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه پیام نور تهران، خصوصیات ژئوشیمیایی و کانی زائی کانسار منگنز سورمق، فارس- ۱۵۹ صفحه.
- 6- Abrams M J, Brown D, Lepley L, Sadowski R. 1983. Remote sensing for porphyry copper deposits in southern Arizona. *Economic Geology*, Vol. 78: pp. 591-604.
- 7- Ahmadi, H. Pekkan, E. 2021. Fault-based geological lineaments extraction using remote sensing and GIS—a review. *Geosciences*, 11(5), p.183.
- 8- Alavi M. 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics*, Vol. 229: pp. 211-238.
- 9- Alavi M. 2004. Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution. *American journal of Science*, Vol. 304: pp. 1-20.
- 10- Arfania R, Shahriari S. 2009. Role of southern Sanandaj-Sirjan Zone in the tectonic evolution of Zagros Orogenic Belt, Iran. *Island arc*, Vol. 18: pp. 555-576.
- 11- Bachmanov D, Trifonov V, Hessami K T, Kozhurin A, Ivanova T, Rogozhin E, Hademi M, Jamali F. 2004. Active faults in the Zagros and central Iran. *Tectonophysics*, Vol. 380: pp. 221-241.
- 12- Berberian M. 1977. Three phases of metamor-

اندیس باریت و رگه‌های سیلیسی اولیه به طور نسبتاً چشمگیر رخنمون دارند که نشان از عملکرد چندین سیستم گسلی در منطقه است. در اطراف این منطقه که جزو دگرسانی آرژیلیکی محسوب می‌شود، خاک صنعتی به وفور یافت می‌گردد.

۵- مطابقت الگوی گسل‌ها با الگوی دگرسانی در منطقه نشان از ارتباط این دو عامل دارد. گسل آباده و سورمق و بازشدگی فضای بین گسلی با عملکرد گسل شمالی- جنوبی (گشار) به عنوان گسل‌های اصلی در ایجاد الگوی دگرسانی و گسترش آن در منطقه معرفی می‌شود به طوری که در طول این گسل‌ها اندیس‌های معدنی و دگرسانی‌ها عمدتاً گسترش یافته‌اند. در بخش‌های شمال شرقی منطقه و با دور شدن از این گسل‌ها آثار دگرسانی کم‌رنگ شده و رفته رفته از بین می‌رود.

۶- جهت تعیین ارتباط بین ساختارهای زمین‌ساختی و کانی‌زائی در منطقه، الگوی گسل‌ها و موقعیت مناطق کانی‌زائی با یکدیگر تطبیق داده شدند. با توجه به تراکم حداکثری گسل‌ها در مرکز منطقه، اندیس‌های معدنی با تراکم و غنای بالا بیشتر در این نواحی متمرکز هستند و با کاهش فراوانی گسل‌ها از میزان اندیس‌های معدنی کاسته می‌شود. همچنین در پهنه‌های خرد شده گسل‌ها، غالباً بیشترین حضور ماده معدنی است.

۷- سیستم گسلی شمالی- جنوبی با معرفی گسل اصلی آن (گسل گشار)، دارای عملکرد برشی راستگرد است. این گسل پس از گسل آباده و سورمق تکامل یافته و در ناحیه مطالعاتی با توجه به وجود فازهای دیگر شکستگی‌های مختلف را به وجود آورده است که نشان از پهنه ساختاری و زون شکستگی نسبتاً بزرگ آن است. گسل گشار با عملکرد برشی راستگرد خود به بازشدگی شکستگی‌های مرتبط با گسل سورمق و آباده کمک کرده و راه بالا آمدگی و نفوذ سیال هیدروترمال را آسان کرده است. به گونه‌ای که اندیس معدنی و حضور آن در ناحیه، مدیون به وجود آمدن و عملکرد برشی راستگرد گسل گشار می‌تواند باشد.

سپاسگزاری

از همکاری شرکت کوشش کار اقلید در تکمیل مطالعات زمین‌شناسی در معدن منگنز سورمق کمال تشکر را داریم.

منابع

- deposit profiles 3.
- 23- Fry N. 1979. Random point distributions and strain measurement in rocks. *Tectonophysics*, Vol. 60: pp. 89-105.
- 24- Ghanbarian M A, Yassaghi A, Derakhshani R. 2021. Detecting a Sinistral Transpressional Deformation Belt in the Zagros. *Geosciences*, Vol. 11: pp. 226-240.
- 25- Hellman M J, Ramsey M S. 2004. Analysis of hot springs and associated deposits in Yellowstone National Park using Aster and AVIRIS remote sensing. *Journal of volcanology and geothermal research*, Vol. 135: pp. 195-219.
- 26- Hemmati O, Tabatabaei Manesh S, Nadimi A. 2018. Deformation Mechanisms of Darreh Sary Metapelites, Sanandaj-Sirjan Zone, Iran. *Geotectonics*, Vol. 52: pp. 286-291.
- 27- Krishnamoorthy R. 1995. Remote sensing of mangrove forests in Tamil Nadu Coast, India.
- 28- Lillesand T, Kiefer R W, Chipman J. 2015. Remote sensing and image interpretation. John Wiley & Sons.
- 29- Lillesand, T., Kiefer, R.W. and Chipman, J., 2015. Remote sensing and image interpretation. John Wiley & Sons.
- 30- McQuarrie N, Stock J, Verdel C, Wernicke B. 2003. Cenozoic evolution of Neotethys and implications for the causes of plate motions. *Geophysical research letters*, Vol. 30: pp. 2036-2040.
- 31- Molinaro M, Leturmy P, Guezou J C, Frizon de Lamotte D, Eshraghi S. 2005a. The structure and kinematics of the southeAstern Zagros fold-thrust belt, Iran: From thin-skinned to thick-skinned tectonics. *Tectonics*, Vol. 24: pp. TC3007-1-19.
- 32- Molinaro M, Zeyen H, Laurencin X. 2005b. Lithospheric structure beneath the south-eAstern Zagros Mountains, Iran: Recent slab break-off? *Terra Nova*, Vol. 17: pp. 1-6.
- 33- Moshtagh S, Jamali H, Nadimi A, Bagheri H, Baniadam F. 2016. Genesis and tectono-magmatic setting of Sadrabad iron Skarn (west of Yazd). *Iranian Journal of Petrology*, Vol. 7: pp. 55-72.
- 34- Nadimi, A., 2010. Active strike-slip faults in the central part of the Sanandaj-Sirjan Zone of Zagros phism in Haji-Abad quadrangle (southern extremity of the Sanandaj-Sirjan structural zone): a palaeotectonic discussion. *Contribution to the Seismotectonics of Iran*, pp. 239-263.
- 13- Berberian M, King G. 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian journal of earth sciences*, Vol. 18: pp. 210-265.
- 14- Berger B, Drew L. 1997. Role of strike-slip duplexes in localization of volcanoes, related intrusions, and epizonal ore deposits [abs.], *Geological Society of America Abstracts with Programs*, pp. 359-360.
- 15- Beygi S, Talovina I, Tadayon M, Nadimi A. 2018. Tectonics and mineralization in the Urumi-eh-Dokhtar magmatic arc of Iran, *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources: Proceedings of the International Forum-Contest of Young Researchers*, April 18-20, 2018, St. Petersburg, Russia. CRC Press, pp. 9.
- 16- Beygi S, Talovina I V, Tadayon M, Pour A B. 2021. Alteration and structural features mapping in Kacho-Mesqal zone, Central Iran using Aster remote sensing data for porphyry copper exploration. *International Journal of Image and Data Fusion*, Vol. 12: pp. 155-175.
- 17- Campbell J B, Wynne R H. 2011. *Introduction to remote sensing*. Guilford Press.
- 18- Crosta, A.P. and Moore, J.M., 1989. Geological mapping using Landsat thematic mapper imagery in Almeria Province, South-east Spain. *International Journal of Remote Sensing*, 10(3), pp.505-514.
- 19- Di Tommaso I, Rubinstein N. 2007. Hydrothermal alteration mapping using Aster data in the Infernillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geology Reviews*, Vol. 32: pp. 275-290.
- 20- Drew L J. 2006. A tectonic model for the spatial occurrence of porphyry copper and polymetallic vein deposits: Applications to central Europe. US Department of the Interior, US Geological Survey.
- 21- Falcon N L. 1974. *Southern Iran: Zagros Mountains*. Geological Society, London, Special Publications, Vol. 4: pp. 199-211.
- 22- Force E, Paradis S, Simandl G. 1999. Sedimentary manganese. *Selected British Colombia mineral*



- Emission and Reflection Radiometer (Aster) data for alteration zone enhancement in a semi-arid area, northern Shahr-e-Babak, SE Iran. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 29: pp. 2833-2850.
- 46- Tosdal R. 2001. Magmatic and structural controls on the development of porphyry Cu±Mo±Au deposits. *Rev. in Econ. Geol*, Vol. 14: pp. 157-181.
- 47- Trond H. Torsvik and L. Robin M. Cocks., 2004. Earth geography from 400 to 250 Ma: a palaeomagnetic, faunal and facies review. *Journal of the Geological Society* 2004; v. 161; p. 555-572.
- 48- Yetkin E, Toprak V, Suezen M. 2003. Alteration mapping by remote sensing: Application to Hasandağ-Melendiz Volcanic Complex. Orogen (Iran). *Ph. D. Thesis*.
- 35- Nadimi A, Konon A. 2012a. Gaw-Khuni Basin: An active stepover structure in the Sanandaj-Sirjan zone, Iran. *GSA Bulletin*, Vol. 124: pp. 484-498.
- 36- Nadimi A, Konon A. 2012b. Strike-slip faulting in the central part of the Sanandaj-Sirjan Zone, Zagros Orogen, Iran. *Journal of Structural Geology*, Vol. 40: pp. 2-16.
- 37- Navabpour P, Angelier J, Barrier E. 2007. Cenozoic post-collisional brittle tectonic history and stress reorientation in the High Zagros Belt (Iran, Fars Province). *Tectonophysics*, Vol. 432: pp. 101-131.
- 38- Pour A B, Hashim M. 2012. The application of Aster remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits. *Ore geology reviews*, Vol. 44: pp. 1-9.
- 39- Rajendran S, Nasir S. 2013. Mapping of manganese potential areas using Aster satellite data in parts of Sultanate of Oman. *Int. J. Geosci. Geomatics*, Vol. 1: pp. 92-101.
- 40- Ranjbar, H., Honarmand, M. and Moezifar, Z., 2004. Application of the Crosta technique for porphyry copper alteration mapping, using ETM+ data in the southern part of the Iranian volcanic sedimentary belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(2), pp.237-243.
- 41- Ricou L. 1971. Le croissant ophiolitique peri-Arabe une ceinture de nappes mise en place au Cretace superieur: *Review Geographie Physique Geologie Dynamique*, v. 13.
- 42- Rouskov K, Popov K, Stoykov S, Yamaguchi Y. 2005. Some applications of the remote sensing in geology by using of Aster images, *Scientific Conf. "SPACE, ECOLOGY, SAFETY"* with Int. Participation, pp. 167-173.
- 43- Sabins F F. 1999. Remote sensing for mineral exploration. *Ore geology reviews*, 14: 157-183.
- 44- Sarkarinejad K, Ghanbarian M A. 2014. The Zagros hinterland fold-and-thrust belt in-sequence thrusting, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 85: pp. 66-79.
- 45- Tangestani M H, Mazhari N, Agar B, Moore F. 2008. Evaluating Advanced Spaceborne Thermal

