



فصلنامه زمین‌ساخت
پاییز ۱۳۹۷، سال دوم، شماره ۷

بررسی ارتباط کانی‌سازی و پهنه‌های دگرسانی با ساختارهای زمین‌ساختی با کمک مطالعات دورسنجی در منطقه جنوب اردستان (شمال شرق اصفهان)

سمیرا محمدی^۱، علیرضا ندیمی^{۲*}، زهرا اعلمی‌نیا^۳

۱. کارشناس ارشد تکتونیک، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان.

۲. *دانشیار تکتونیک، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان.

۳. استادیار زمین‌شناسی اقتصادی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۰۸



تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۰۹

چکیده

منطقه مورد مطالعه در بخش میانی کمربند ماگمایی ارومیه-دختر و جنوب شرق اردستان واقع شده است. واحدهای آتشفشانی ائوسن با ترکیب آندزیت و آندزیت-بازالتی گسترده‌ترین واحدهای سنگی منطقه بوده که میزبان کانی‌سازی مس-نقره و طلا می‌باشند. به کارگیری تکنیک‌های دورسنجی به‌ویژه روش‌های ترکیب رنگی کاذب، تصویربرداری باند جذب نسبی و فیلترگذاری باعث گردید تا اطلاعات باارزشی از نحوه گسترش پهنه‌های دگرسانی، ساختارهای شکننده و نیز شناسایی گسل ظفرقند و نقش چشمگیر آن در کنترل دگرسانی به دست آید. الگوی گسل‌ها بر روی تصویر ماهواره‌ای نشان‌دهنده سه راستای کلی، تغییر در راستا، تراکم گسل‌ها در شمال منطقه و حضور ساختار گلواره مثبت می‌باشد. دو الگوی متفاوت دگرسانی شامل پروپیلیتیک و اکسیدهای ثانویه آهن با گسترش زیاد در اطراف رگه‌های مس‌دار و دگرسانی آرژلیک-سریستیک به‌صورت محدود به موازات رگه‌های سیلیسی طلادار مشاهده می‌شوند. مطابقت الگوی گسل‌ها، مناطق کانی‌سازی و دگرسانی با یکدیگر نشانگر کاهش عیار کانی‌سازی‌ها و افزایش وسعت دگرسانی‌ها همراه با کاهش تراکم گسل‌ها از شمال به سمت جنوب منطقه می‌باشد. گسل ظفرقند و ساختار گلواره مثبت نقش مؤثری در نحوه گسترش و ایجاد این الگو در منطقه داشته است. به‌نحوی که دگرسانی معطوف به بخش‌های شمالی این گسل بوده و در بخش جنوبی آن هیچ‌گونه آثاری مشاهده نمی‌شود. این گسل همراه با گسل کچومثال ساختار گلواره مثبت را در منطقه ایجاد نموده است. این ساختار سبب ایجاد کشش، شکل‌گیری مکان مناسب برای جای‌گیری کانی‌سازی در منطقه و همچنین درهم آمیختگی پهنه‌های دگرسانی در جنوب منطقه شده است.

کلید واژه‌ها: سنجش از دور، پهنه‌های دگرسانی، ساختار شکننده، گسل ظفرقند، اردستان، کمان ماگمایی ارومیه-دختر

۱- مقدمه

منطقه مورد مطالعه اشاره نمود. مطالعات و پیشینه تحقیقاتی منطقه مورد مطالعه محدود به مطالعات سنگ‌شناسی (بیطاری خالدی و همکاران ۱۳۹۱، Yeganehfar et al., 2013) و اقتصادی (صالحی، ۱۳۹۵) می‌باشد؛ اما تاکنون مطالعات دورسنجی به‌منظور 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 ساختاری صورت گرفته در منطقه می‌توان به مطالعه محمدی (۱۳۹۵) جهت شناسایی ساختارهای زمین‌ساختی و نقش آنها در کانی‌سازی منطقه جنوب شرق اردستان و مطالعه بیگی و همکاران (۲۰۱۶) در اطراف منطقه مورد مطالعه جهت بررسی گسل‌های بخش مرکزی کمان ماگمایی ارومیه- دختر به‌ویژه گسل زفره (Beygi, et al., 2016) اشاره نمود؛ بنابراین پژوهش حاضر با کمک روش‌های دورسنجی، سعی در شناسایی ساختارها، پهنه‌های دگرسانی و ارتباط آنها با یکدیگر داشته و در نهایت جهت اعتبارسنجی نتایج به‌دست آمده، پیمایش‌های صحرایی در منطقه صورت گرفته است.

۲- مواد و روش مطالعه

در این پژوهش جهت شناسایی و بارزسازی گسل‌ها، شکستگی‌ها و پهنه‌های دگرسانی منطقه از تصویرسنجنده ETM^+ ماهواره لندست هفت با شماره گذر ۱۶۳، ردیف ۳۷، تصویر ASTER ماهواره ترا با شماره ASt_ 0107300728100108070493 LIB استفاده شده است. این تصاویر به کمک نرم‌افزارهای ENVI 4.8 و ER Mapper 7.0 پردازش شده‌اند. در ادامه جهت بررسی و کنترل پردازش‌ها، مطالعات صحرایی در چندین ایستگاه، در منطقه صورت پذیرفت. جهت انجام مطالعات آزمایشگاهی از مجموع ۵۰ نمونه از سنگ‌های رخنمون یافته در سطح منطقه شامل مناطق دگرسانی و کانی‌سازی جمع‌آوری شده، ۲۵ عدد مقطع نازک و ۱۵ عدد بلوک صیقلی تهیه شد. جهت انجام مطالعات ژئوشیمی و بررسی کانی‌سازی از رگه‌های سیلیسی و پهنه دگرسانی اطراف آن به تعداد ۶ نمونه به روش خرد سنگی و به صورت عمود بر امتداد رگه‌ها انتخاب گردید. ۳۰ گرم از هر نمونه پس از خردایش و نمایش در هاون آگات جهت تجزیه طلا و عناصر فرعی همراه با استفاده از روش ICP-MS به آزمایشگاه ACME کانادا ارسال گردید. حد تشخیص طلا در این روش ۰/۵ ppb می‌باشد. در این پژوهش جهت انجام مطالعات ساختاری نیز مشخصات آثار حرکتی گسل‌ها، مشخصات درزه‌ها، دایک‌ها و رگه‌ها

با توجه به گسترش استفاده از مطالعات دورسنجی در علوم مختلف و به‌ویژه علم زمین‌شناسی، وجود انواع تصاویر ماهواره‌ای با خصوصیات طیفی- مکانی متنوع، لزوم استفاده از این مطالعات بیش از پیش آشکار می‌شود. از نتایج حاصل از این مطالعات در زمینه‌های گوناگون، به‌ویژه شناسایی ساختارهای زمین‌ساختی و پهنه‌های دگرسانی گرمایی استفاده می‌شود که می‌تواند کلیدی جهت پی‌جویی و اکتشافات مواد معدنی باشد. امروزه مطالعات زیادی بر روی طیف بازتابی سنگ‌ها و کانی‌ها در پهنه‌های دگرسانی صورت گرفته است؛ به‌طوری که سنگ‌های مافیک مانند بازالت‌ها طیف بازتابی کم، همراه با ویژگی‌های جذبی نامشخصی دارند در حالی که طیف سنگ‌های اسیدی ویژگی‌های جذبی متفاوتی بر اساس نوع محصولات دگرسانی نشان می‌دهند (Hunt and Salisbury, 1970; Hapke, 1981; Sabins, 1999; Clark, 1999; Small et al., 2009; Madani and Herabi, 2012). از این رو شناسایی پهنه‌های دگرسانی با کمک مطالعات دورسنجی به علت داشتن ویژگی‌های طیفی مناسب جهت بررسی پتانسیل اقتصادی منطقه، همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است.

در این میان ساختارهای شکننده همانند گسل‌ها و شکستگی‌ها نقش مهمی در جای‌گیری توده‌های ماگمایی و دایک‌ها، گسترش و پراکندگی پهنه‌های دگرسانی و کانی‌سازی دارند. پهنه‌های گسلی به اشکال مختلف همانند راهرو، گذرگاه، سد و مانع در برابر سیالات کانی‌ساز عمل نموده و می‌توانند نقش مهمی در هدایت و شکل‌گیری کانی‌سازی داشته باشند (Berger and Drew, 1997, Tosdal and Richards, 2001, Drew 2005). بر همین اساس شناسایی و بررسی ساختارهای زمین‌ساختی یکی از گام‌های اولیه در مطالعات پی‌جویی و اقتصادی یک منطقه می‌باشد.

منطقه مورد مطالعه در شمال شرق استان اصفهان، جنوب شرق شهر اردستان واقع شده است. منطقه معدنی اردستان، بر روی کمان ماگمایی ارومیه- دختر قرار داشته و میزبان کانسارها و نشانه‌های معدنی فراوانی می‌باشد، لذا بررسی‌های اکتشافی بسیاری به‌ویژه در نواحی پیرامون این منطقه صورت گرفته است. از جمله مهمترین نشانه‌های شناسایی شده در نواحی همجوار، می‌توان به کانسار مس رگه‌ای کچومتقال (غلامی و شمسی‌پور، ۱۳۸۹) در شمال، کانسار مس پورفیری ظفرقند (Aminoroaya et al., 2016) در جنوب و کانسار مس- نقره اردستان در غرب

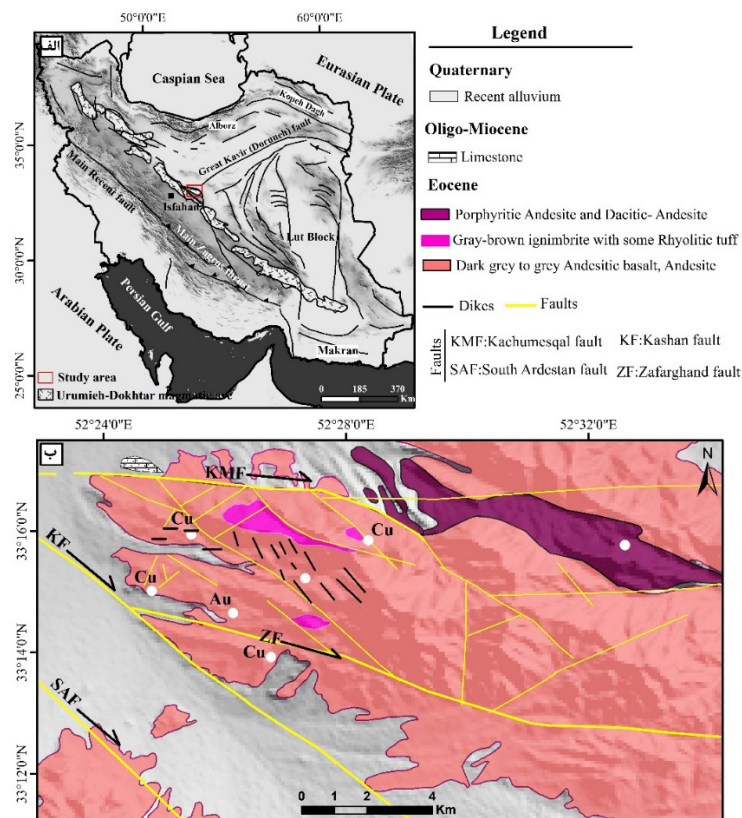


راستای گسل کاشان و ظفرقند شده‌اند که این تغییرات سیمای ریخت‌زمین ساختی منطقه را به شدت تحت تأثیر قرار داده‌اند (محمدی و همکاران، ۱۳۹۴ ب). گسترده‌ترین واحدهای سنگی مشاهده شده در منطقه، سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری ائوسن بالایی با حضور گسترده آندزیت‌ها و آندزیت-بازالت‌ها هستند که میزان اصلی کانی‌سازی و دگرسانی می‌باشند. سنگ‌های آذرآواری نیز شامل توف و ایگنمبریت‌های اسیدی می‌باشند. همچنین دایک‌های مافیک فراوانی با دو راستای غالب شمال غربی- جنوب شرقی و شرقی- غربی به همراه آبرفت‌های کوآرتزری در منطقه رخنمون دارند. کانی‌سازی مس، طلا و نقره به صورت رگه- رگچه‌ای با میزبانی سنگ‌های آندزیت و آندزیت-بازالتی ائوسن بالایی و نیز پهنه‌های دگرسانی با گسترش و وسعت متغیر در منطقه مشاهده می‌شوند (شکل ۱). (ب). علائم اختصاری شامل گسل کچومتقال (KMF)، گسل کاشان (KF)، گسل جنوب اردستان (SAF) و گسل ظفرقند (ZF) می‌باشند.

در چندین ایستگاه در منطقه برداشت و به کمک نرم‌افزار Fault Kin.7.0، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند.

۳- زمین‌شناسی

منطقه مورد مطالعه از لحاظ ساختاری در بخش مرکزی کمان ماگمایی ارومیه- دختر قرار گرفته است (شکل ۱ الف). این منطقه در کنار گسل‌های بزرگ، فعال و پی‌سنگی کاشان، کچومتقال و ظفرقند و سایر شکستگی‌های مرتبط با آنها واقع شده است. پردازش و تحلیل داده‌های مغناطیسی سنجی هوایی همانند نقشه‌های شدت کل میدان مغناطیسی برگردان به قطب و نقشه گرادیان افقی نیز بیانگر تأثیر گسل‌های این منطقه بر پی‌سنگ مغناطیسی بوده و بی‌هنجاری‌های مشاهده شده در نقشه شدت کل میدان مغناطیسی با راستای گسل‌ها و واحدهای سنگ‌شناسی موجود در منطقه دارای همخوانی می‌باشد (محمدی و همکاران، ۱۳۹۴ الف). این گسل‌ها و شکستگی‌ها سبب ایجاد جابه‌جایی مسیر آبراهه‌ها، انحراف و تغییر نحوه گسترش مخروط افکنه‌ها در سطح منطقه به‌ویژه در



شکل ۱ الف) پهنه‌های رسوبی- ساختاری، گسل‌های بزرگ و موقعیت منطقه مورد مطالعه بر روی کمان ماگمایی ارومیه- دختر، (ب) نقشه زمین‌شناسی منطقه (بر گرفته از Radfar, 1999) و موقعیت مناطق کانی‌سازی مشاهده شده طی پیمایش صحرایی، علائم اختصاری شامل گسل کچومتقال (KMF)، گسل کاشان (KF)، گسل جنوب اردستان (SAF) و گسل ظفرقند (ZF) می‌باشند.



۴- بحث و بررسی

۴-۱- بارسازی ساختارهای زمین ساختی

پیش از شروع پردازش تصاویر ماهواره‌ای استر، اثرات تابش خورشید و توپوگرافی حذف شده است. سپس به کمک روش‌های مختلف پردازش، ابتدا گسل‌ها و شکستگی‌ها و در ادامه پهنه‌های دگرسانی شناسایی و بارسازی می‌شوند. در این مطالعه جهت بارسازی انواع ساختارهای زمین ساختی بر روی تصویر ماهواره‌ای سنجنده ETM⁺ از فیلترهای مختلف بهره گرفته شده است. فیلترهای گذر بالا و لبه، مقادیر پیکسل‌هایی که دارای تغییرات ناگهانی در مقادیر درجات خاکستری هستند را تقویت نموده و جزئیات بیشتری از ساختارهای خطی همانند رودخانه‌ها، آبراهه‌ها، گسل‌ها و شکستگی‌ها را قابل مشاهده می‌نمایند؛ بنابراین در خروجی این فیلترها، ساختارهای خطی بهتر نشان داده می‌شوند.

در این پژوهش از فیلتر گذر بالا از نوع شارپن ۲ بر روی ترکیب رنگی کاذب (RGB: 7, 4, 1) (شکل ۲. الف) و فیلتر لبه بر روی باندها ۸ (شکل ۲. ب) بر روی تصویر ماهواره‌ای ETM⁺ جهت شناسایی شکستگی‌ها و خطواره‌های گسلی استفاده گردیده است. مطالعات ساختاری در منطقه در دو مرحله صورت گرفته است. نخست با کمک پردازش تصاویر ماهواره‌ای گسل‌های اصلی و سپس کل خطواره‌های گسلی و شکستگی‌های فرعی بارسازی و مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. در ادامه با توجه به اهمیت نقش کنترل‌کنندگی شکستگی‌ها در جایگیری کانی‌سازی و گسترش دگرسانی، دو محدوده مهم کانی‌سازی مس و طلا از لحاظ ساختاری مورد توجه ویژه قرار گرفته و گسل‌ها و شکستگی‌های آنها به صورت دقیق‌تر بارسازی و مورد بررسی قرار گرفتند. الگوی به دست آمده از گسل‌های اصلی منطقه بر روی تصویر ماهواره‌ای پردازش شده (شکل ۲. ج)، نشان‌دهنده سه راستای کلی شمال غربی- جنوب شرقی، شرقی- غربی و شمال شرقی- جنوب غربی می‌باشد. گسل‌های اصلی منطقه شامل گسل کچومتقال، کاشان و ظفرقند می‌باشند که نقش اساسی در تکامل ساختاری منطقه ایفا می‌کنند. الگوی گسل‌های اصلی منطقه منعکس‌کننده ساختارهای زمین ساختی دام‌اسبی، لنزشدگی، ساختار گلواره مثبت و تغییرات راستا در طول گسل‌ها می‌باشد (محمدی، ۱۳۹۵). الگوی کلی حاصل از بررسی و بارسازی دقیق‌تر

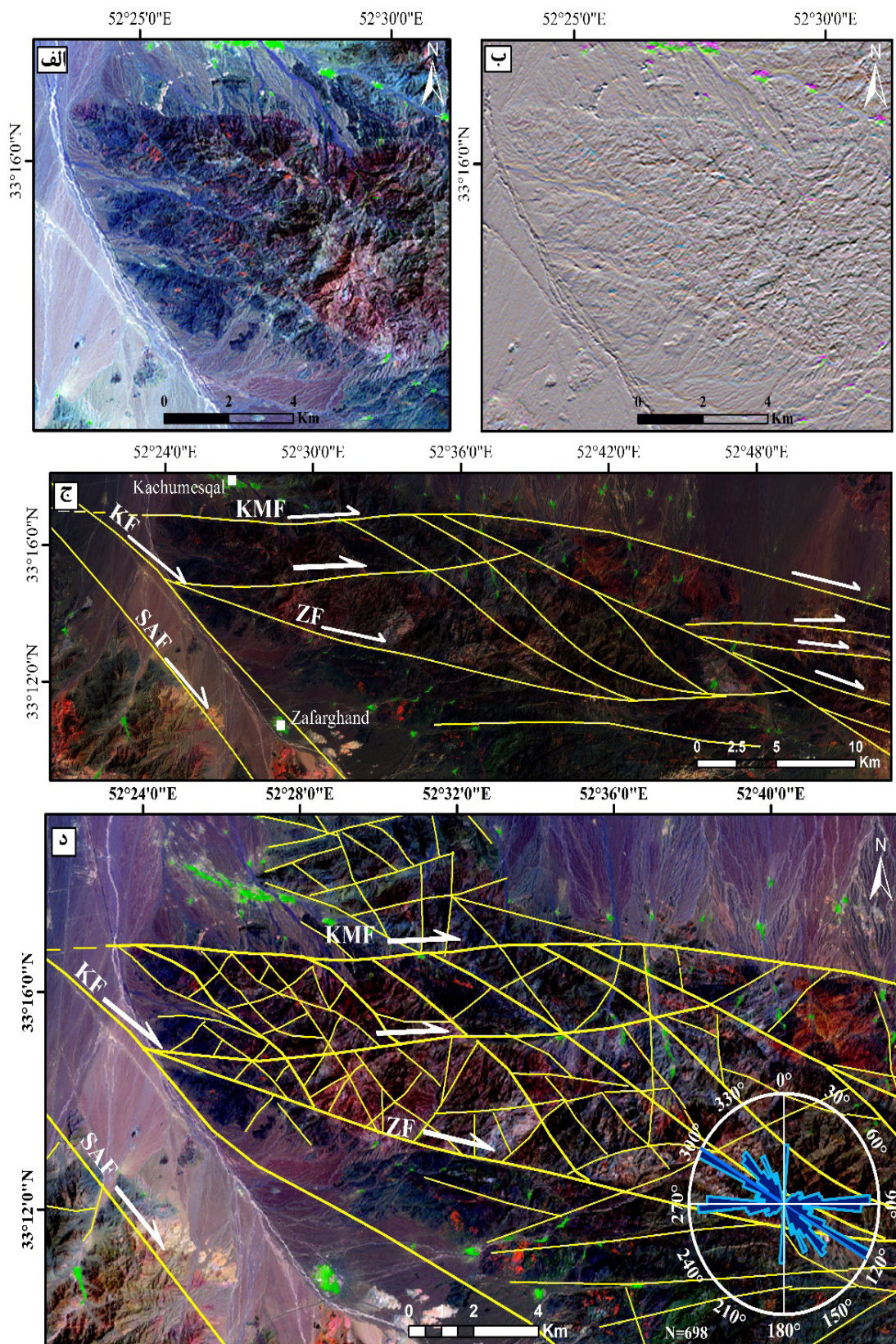
گسل‌های فرعی (شکل ۲. د)، نشان‌دهنده تراکم و تقاطع زیاد گسل‌ها (حدفاصل گسل کچومتقال و گسل کاشان) در شمال منطقه بوده که به سمت مرکز و جنوب منطقه از میزان آن کاسته می‌شود. با توجه به نمودار گل‌سرخ‌تریسیم شده از راستای گسل‌ها (شکل ۲. د)، دو پراکندگی عمده مشاهده می‌شود که به ترتیب فراوانی، در جهت‌های شمال غرب- جنوب شرق و شرقی- غربی گسترش یافته‌اند. بررسی دقیق‌تر این نمودار گل‌سرخ‌تریسیم (شکل ۲. د)، آثاری از پراکندگی دیگری را در جهت شمال شرق- جنوب غرب نشان می‌دهد که فراوانی کمتری را نسبت به دو جهت اصلی دارد با فراوانی ضعیفی دیده می‌شود.

۴-۱-۱- راستای شمال غربی- جنوب شرقی

راستای غالب این دسته از گسل‌ها با توجه به نمودار گل‌سرخ‌تریسیم شده (شکل ۲. د)، عموماً ۱۲۰ تا ۱۳۰ درجه بوده و گسل‌های اصلی و طویل منطقه را تشکیل می‌دهند. فراوانی راستای ۱۵۰ تا ۱۶۰ درجه نیز بر روی نمودار گل‌سرخ‌تریسیم مشاهده می‌شود که مربوط به تغییر راستای گسل کاشان و شاخه‌های موازی آن به سمت جنوب منطقه می‌باشد. گسل کاشان با طول حدود ۱۲۶ کیلومتر و سازوکار امتدادلغز راستگرد، یکی از گسل‌های مهم در غرب منطقه می‌باشد که شاخه‌های فرعی بسیاری از این گسل، در اثر تغییر راستا همانند گسل‌های جنوب اردستان و ظفرقند منشعب شده‌اند.

۴-۱-۲- راستای شرقی- غربی

راستای غالب این دسته از گسل‌ها با توجه به نمودار گل‌سرخ‌تریسیم شده (شکل ۲. د)، عموماً ۹۰ تا ۱۱۰ درجه بوده و جزء گسل‌های اصلی منطقه به شمار می‌آیند. فراوانی این گسل‌ها در شمال و جنوب منطقه به موازات دو گسل مهم کچومتقال و ظفرقند می‌باشد. به نظر می‌رسد این دسته از گسل‌ها نقش مهمی در تعیین سرشت ساختاری، جایگیری کانی‌سازی و کنترل دگرسانی منطقه ایفا نموده‌اند. گسل کچومتقال با راستای عمومی ۱۱۰ درجه از شمال منطقه مورد مطالعه می‌گذرد. این گسل دارای سازوکار امتدادلغز راستگرد با مؤلفه شیب‌لغز معکوس و سمت شیب رو به جنوب می‌باشد که در انتهای خود به شاخه‌های فرعی منشعب شده و ساختار دام‌اسبی را به وجود می‌آورد (شکل ۲. ج).



شکل ۲. الف) نتیجه اعمال فیلتر گذریابا (ETM⁺, RGB: 7, 4, 1)، ب) نتیجه اعمال فیلتر لبه (ETM⁺, Gray Scale: band 8)، ج) الگوی گسل‌های اصلی شناسایی شده منطقه جنوب شرق اردستان، د) گسل‌های اصلی و فرعی شناسایی شده (ETM⁺, RGB: 7, 4, 1) و نمودار گل‌سرخ‌ی راستای گسل‌ها منطقه مورد مطالعه که دو فراوانی غالب را نشان می‌دهد. علائم اختصاری همانند شکل ۱ می‌باشد.



استر می باشد (Tommaso and Rubinstein, 2007, Alimoham- (madi et al., 2015).

نتیجه حاصل از این ترکیب نشان دهنده گسترش و وسعت فراوان پهنه دگرسانی پروپیلیتییک (با رنگ سبز) در شمال شرق، مرکز و به سمت جنوب منطقه می باشد. کانی های رسی با نمود بارزی بر روی واحدهای آذرآواری و ایگنمبریت های اسیدی در شمال و جنوب منطقه (با رنگ صورتی) مشخص شده اند (شکل ۳. الف).

جهت بارزسازی اکسیدهای ثانویه آهن در منطقه از ترکیب های رنگی (RGB: 4, 6, 1) و (RGB: 1, 2, 3) بر روی تصویر استر، استفاده شده است. این مناطق به ترتیب به رنگ زرد متمایل به سبز و سفید تا کرم رنگ قابل مشاهده هستند (شکل ۳. ب و ۳. ج).

۴-۲-۲- نسبت گیری بانندی

نسبت گیری بانندی یکی از روش های پردازش تصاویر چند طیفی است که با شناخت خصوصیات طیف جذبی-انعکاسی کانی ها، باندهای مناسب که دارای بیشترین انعکاس و جذب می باشند، انتخاب شده و بانندی که میزان تابش از هدف مورد نظر در آن بیشتر است در صورت کسر و بانندی که میزان جذب از آن هدف در آن بیشتر است، در مخرج کسر قرار می گیرد. از جمله مهم ترین مزیت های این روش می توان به کاهش خطاهای اتمسفری و تفکیک دقیق مرز بین واحدهای سنگ شناسی و پهنه های دگرسانی اشاره نمود (Rouskov et al., 2005). جهت شناسایی مناطق دارای اکسیدهای ثانویه آهن در تصویر استر می توان از نسبت گیری بانندی (۱/۲) به سبب جذب در ناحیه باند ۱ و تابش در ناحیه باند ۲، بهره گرفت (Prost, 2001). در تصویر حاصل از این نسبت گیری، این مناطق با پیکسل های روشن نمایان شده اند (شکل ۴. الف). از نسبت گیری (۱/۳) تصویر ماهواره ای ETM⁺ نیز می توان جهت شناسایی پهنه های دارای اکسیدهای ثانویه آهن استفاده نمود. در تصویر حاصل از این نسبت گیری، این پهنه با پیکسل های روشن مشخص شده اند (شکل ۴. ب).

نتایج حاصل از این دو نسبت گیری (شکل ۴. ب و ۴. ج) با یکدیگر تطابق نسبتاً خوبی را نشان داده و از لحاظ موقعیت مکانی و میزان گسترش مناطق بارزسازی شده همخوانی مناسبی دارند.

گسل ظفرقند با راستای کلی شرقی- غربی در جنوب منطقه مورد مطالعه، شمال روستای ظفرقند واقع بوده و شاخه ای از گسل کاشان می باشد که در اثر تغییر راستا از این گسل جدا شده است. این گسل برای اولین بار در این منطقه با کمک پردازش های مختلف شناسایی شده است. این گسل به طول ۱۸ کیلومتر ابتدا با راستای ۹۵ تا ۱۰۰ درجه از گسل کاشان جدا شده و سپس با راستای ۱۱۰ تا ۱۱۵ درجه به موازات گسل کاشان ادامه می یابد. گسل ظفرقند در ادامه مسیر خود مجدداً با راستای شرقی- غربی و سپس با راستای ۱۱۰ تا ۱۱۵ درجه امتداد یافته و در ادامه مسیر خود تا دشت نائین با شیب رو به شمال، سنگ های آتشفشانی ائوسن را قطع نموده است. این گسل و گسل های فرعی موازی آن همراه با گسل کچومثقال منجر به شکل گیری ساختار گلواره مثبت و بالا آمدگی واحدهای سنگی در منطقه شده اند (محمدی، ۱۳۹۵).

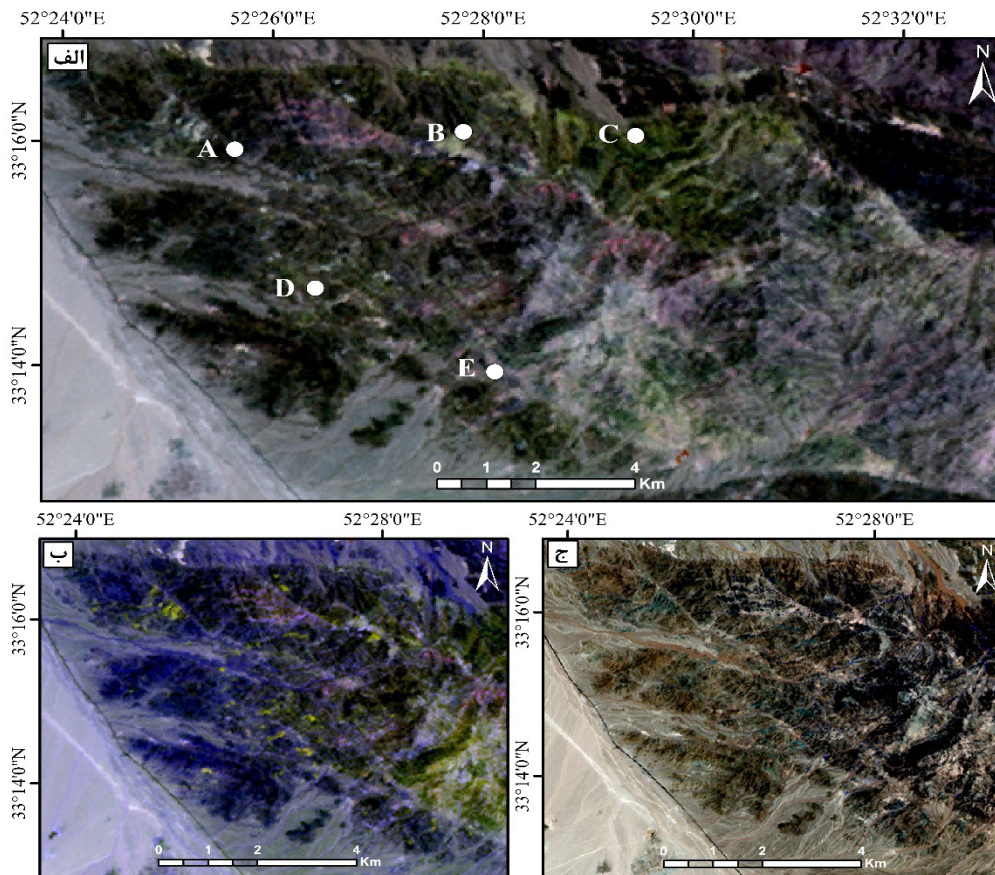
۴-۱-۳- راستای شمال شرقی- جنوب غربی

با توجه به نمودار گل سرخی ترسیم شده، (شکل ۲. د)، این راستا از فراوانی کمتری برخوردار بوده و گسل های فرعی منطقه را تشکیل می دهند. فراوانی این دسته از گسل ها در شمال منطقه حدفاصل دو گسل بزرگ کاشان و کچومثقال بیشتر بوده و با توجه به مشاهدات صحرائی این گسل ها و شکستگی های همراه آن نقش اندکی در جایگیری کانی سازی در منطقه ایفا نموده اند. نقش این دسته از گسل ها و شکستگی ها بیشتر در ایجاد پهنه های تخریب شده گسلی و مناطق به شدت خرد شده می باشد.

۴-۲-۴- بارزسازی پهنه های دگرسانی

۴-۲-۱- ترکیب رنگی کاذب

به منظور شناسایی و بارزسازی پهنه های دگرسانی گرمابی از ترکیب های رنگی کاذب، نسبت گیری بانندی، نسبت گیری بانندی ترکیبی، تصویربرداری باند جذب نسبی و نقشه برداری زاویه طیفی استفاده شده است. جهت تفکیک پهنه های دگرسانی، از ترکیب رنگی کاذب (RGB: 4, 6, 8) بر روی تصویر ماهواره ای استر استفاده شده است (شکل ۳. الف). در این ترکیب، کانی های دارای بنیان OH (دگرسانی های سریسییتییک و آرژیلیک) به رنگ صورتی و دگرسانی پروپیلیتییک به رنگ سبز نمایان می شوند. علت این امر، انعکاس بیشتر کانی های دارای بنیان OH در محدوده باند ۴ (نسبت به باندهای ۶ و ۸) و انعکاس بالای کانی های کلریت و اپیدوت در محدوده باند ۶ سنجنده



شکل ۳. الف) ترکیب رنگی کاذب (RGB: 4, 6, 8)، تصویر ماهواره‌ای استر منطقه جنوب شرق اردستان، مناطق سبز رنگ نشان‌دهنده دگرسانی پروپیلیتیک و نقاط A تا E جهت کنترل صحرایی انتخاب شده‌اند، ب) ترکیب رنگی کاذب (RGB: 4, 6, 1) تصویر استر، مناطق زرد تا سبز رنگ نشان‌دهنده اکسیدهای ثانویه آهن، ج) ترکیب رنگی کاذب (RGB: 1, 2, 3) تصویر استر، مناطق سفید تا کرم رنگ نشان‌دهنده اکسیدهای ثانویه آهن می‌باشند.

روی توده ایگنمریتی و جنوب منطقه و ۳) مناطق بارنگ آبی روشن نشان‌دهنده سنگ‌های دگرسان نشده می‌باشند. در این ترکیب رنگی پهنه‌های دگرسانی پروپیلیتیک و کانی‌های رسی به صورت درهم آمیخته و با وسعت زیاد در جنوب منطقه مشاهده می‌شوند (شکل ۴. ج). در زمینه شناسایی بیشتر پهنه‌های دگرسانی از روش نسبت‌گیری باندی ترکیبی نیز استفاده شده است. به همین منظور جهت بارزسازی پهنه دگرسانی پروپیلیتیک از نسبت‌گیری باندی ترکیبی $(6+9/7+8)$ تصویر استر استفاده شده است (شکل ۵. الف).

همچنین با توجه به اینکه کانی کائولینیت در باندهای ۴ و ۷ تصویر ماهواره‌ای استر دارای بیشترین انعکاس و در باند ۵ دارای بیشترین جذب می‌باشد، از نسبت‌گیری باندی ترکیبی $(4+7/5)$ برای بارزسازی کانی‌های رسی استفاده شده است (شکل ۵. ب). این مناطق که با پیکسل روشن مشخص شده‌اند، الگو و گسترش مشابهی با سایر پردازش‌ها در منطقه نشان می‌دهند.

در ادامه جهت شناسایی پهنه‌های دگرسانی می‌توان از نسبت دادن هر نسبت‌گیری باندی به یکی از سه رنگ اصلی (به ترتیب قرمز، سبز و آبی) و ایجاد یک ترکیب رنگی کاذب استفاده نمود. از جمله این ترکیب‌های رنگی می‌توان به ترکیب رنگی (RGB: $4/6, 5/8, 3/4$) اشاره نمود که در این ترکیب رنگی به ترتیب از نسبت باندی $(4/6)$ تصویر استر برای بارزسازی کانی‌های رسی و مسکوویت به علت انعکاس بالای این کانی‌ها در باند ۴ و جذب بالا در باند ۶، نسبت باندی $(5/8)$ برای دگرسانی پروپیلیتیک به علت انعکاس بالای کانی‌های این پهنه در باند ۵ و جذب بالا در باند ۸ و نسبت باندی $(3/4)$ برای سنگ‌های دگرسان نشده استفاده می‌شود. نتیجه پردازش ترکیب رنگی (RGB: $4/6, 5/8, 3/4$) نشان‌دهنده سه منطقه عمده و اصلی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد (شکل ۴. ج). ۱) مناطق سبز رنگ نشان‌دهنده دگرسانی پروپیلیتیک با گسترش در شمال شرق، مرکز و به سمت جنوب منطقه، ۲) مناطق صورتی رنگ نشان‌دهنده کانی‌های رسی با گسترش بر

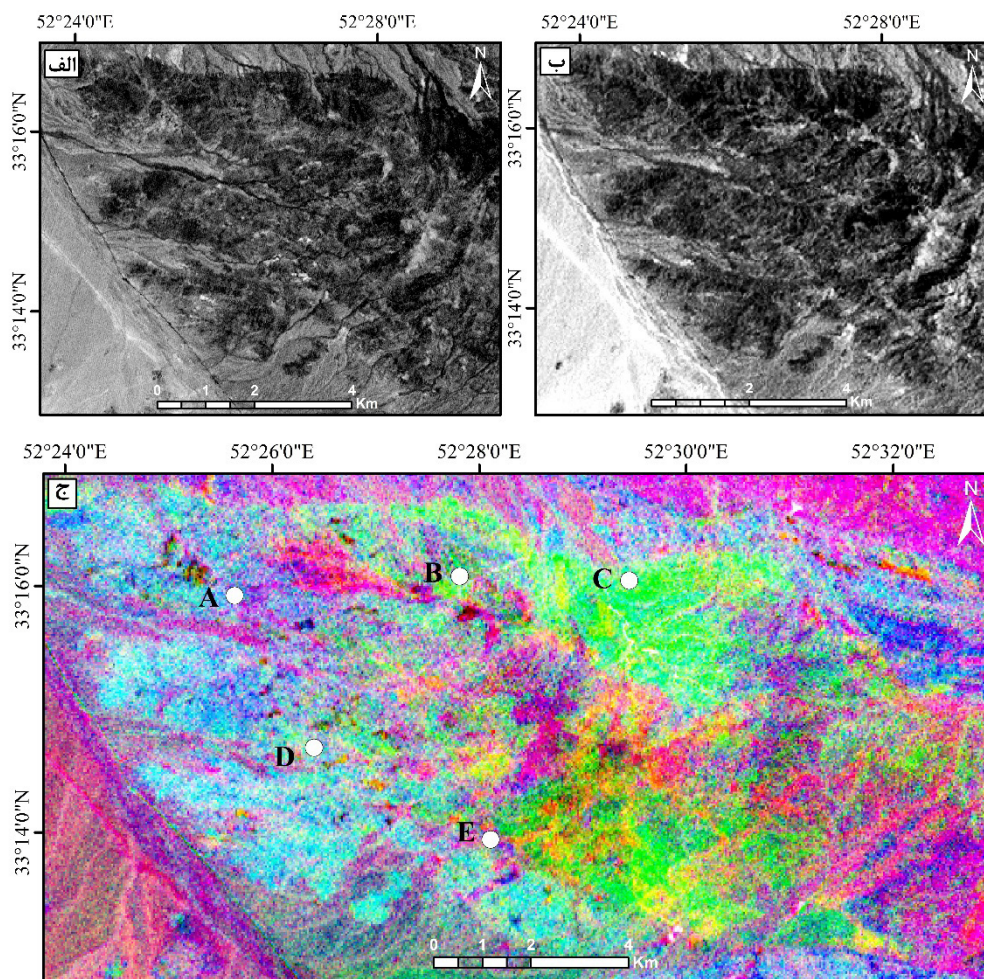
$$\begin{aligned} \text{RBD5} &= [(B4 + B6) / (B5) * 2] \\ \text{RBD6} &= [(B4 + B7) / (B6) * 2] \\ \text{RBD4} &= [(B3 + B5) / (B4) * 2] \end{aligned}$$

در این مطالعه از ترکیب رنگی (RGB: RBD5, RBD6, RBD4) بر روی تصویر ماهواره‌ای استر استفاده شده است که سنگ‌های آتشفشانی دگرسان نشده تا کمی دگرسان شده به رنگ آبی روشن، کانی‌های رسی و مسکوویت با رنگ زرد تا کرم، دگرسانی پروپلیتیک به رنگ آبی تیره تا بنفش و کربنات‌های مرتبط با دگرسانی پروپلیتیک به رنگ سبز تیره مشخص شده‌اند (شکل ۵. ج). نتایج حاصل از این پردازش تطابق بسیار خوبی با پردازش حاصل از ترکیب رنگی (RGB: 4/6, 5/8, 3/4) بر روی تصویر ماهواره‌ای استر (شکل ۴. ج) منطقه نشان می‌دهد.

۴-۲-۳- تصویربرداری باند جذب نسبی

تصویربرداری باند جذب نسبی یکی از مناسب‌ترین روش‌ها جهت بارزسازی و نمایش کانی‌های دارای بنیان Al-O-H، Fe-Mg-O-H با کمک تصاویر ماهواره‌ای استر در پهنه‌های دگرسانی می‌باشد. در این روش مخرج کسر باندی است که نزدیک‌ترین موقعیت به حداقل جذب را دارا بوده و صورت کسر مجموع باندهای بازتابی مجاور آن می‌باشد (Rowan and Mars, 2003; Alimohammadi et al., 2015).

با توجه به مطالعات صورت گرفته بر روی طیف بازتابی سنگ‌های آتشفشانی، عموماً باند ۴ تصاویر استر، قابلیت شناسایی سنگ‌های آتشفشانی دگرسان نشده و سنگ‌های رسوبی را دارا می‌باشد لذا جهت بارزسازی این سنگ‌ها از RBD4، جهت بارزسازی کانی‌های رسی از RBD5 و RBD6 استفاده شده است.



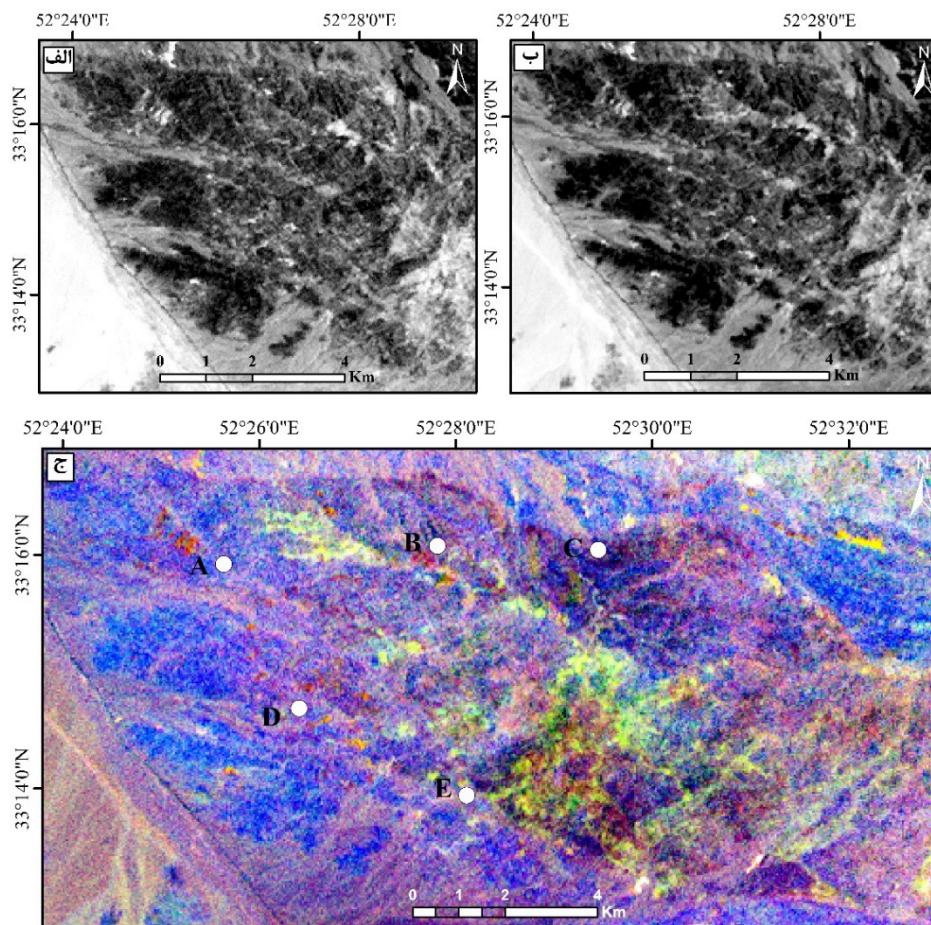
شکل ۴. الف) نسبت گیری باندی (Gray Scale: 2/1)، تصویر استر، مناطق با پیکسل روشن اکسیدهای ثانویه آهن، ب) نسبت گیری باندی (Gray Scale: 3/1) تصویر ETM+، مناطق با پیکسل روشن اکسیدهای ثانویه آهن، ج) نسبت گیری باندی (RGB: 4/6, 5/8, 3/4) تصویر استر، رنگ سبز دگرسانی پروپلیتیک و نقاط A تا E جهت کنترل صحرایی انتخاب شده‌اند.



۴-۲-۴- نقشه برداری زاویه طیفی

نقشه برداری زاویه طیفی (SAM) یکی از روش‌های طبقه‌بندی تصاویر با محاسبه تشابه بین طیف تصویر و یک طیف مرجع است (Kruse et al., 1993, Van Der Meer et al., 1997). الگوریتم این روش در نتیجه استفاده از محاسبه زاویه طیفی بین طیف‌های تصویر و مرجع و ایجاد خروجی‌هایی که زاویه‌های آن بین صفر و یک است، می‌باشد. هر قدر این زاویه کوچک‌تر باشد، شناسایی دقیق‌تر و طیف هدف به طیف مرجع نزدیک‌تر می‌باشد. در صورتی که مقدار زاویه یک باشد، کل تصویر به‌عنوان پدیده مورد نظر شناسایی می‌شود. در این پژوهش از نمودارهای طیفی کانی‌های کلریت، اپیدوت، هماتیت، گوتیت، ایلیت، مونت مورینیت، کائولینیت و پیروفیلیت متعلق به کتابخانه طیفی سازمان زمین‌شناسی آمریکا به‌عنوان طیف مرجع، جهت نقشه برداری کانی‌های شاخص دگرسانی پروپیلیتیک، پهنه‌های دارای اکسیدهای ثانویه آهن و کانی‌های رسی استفاده شده است.

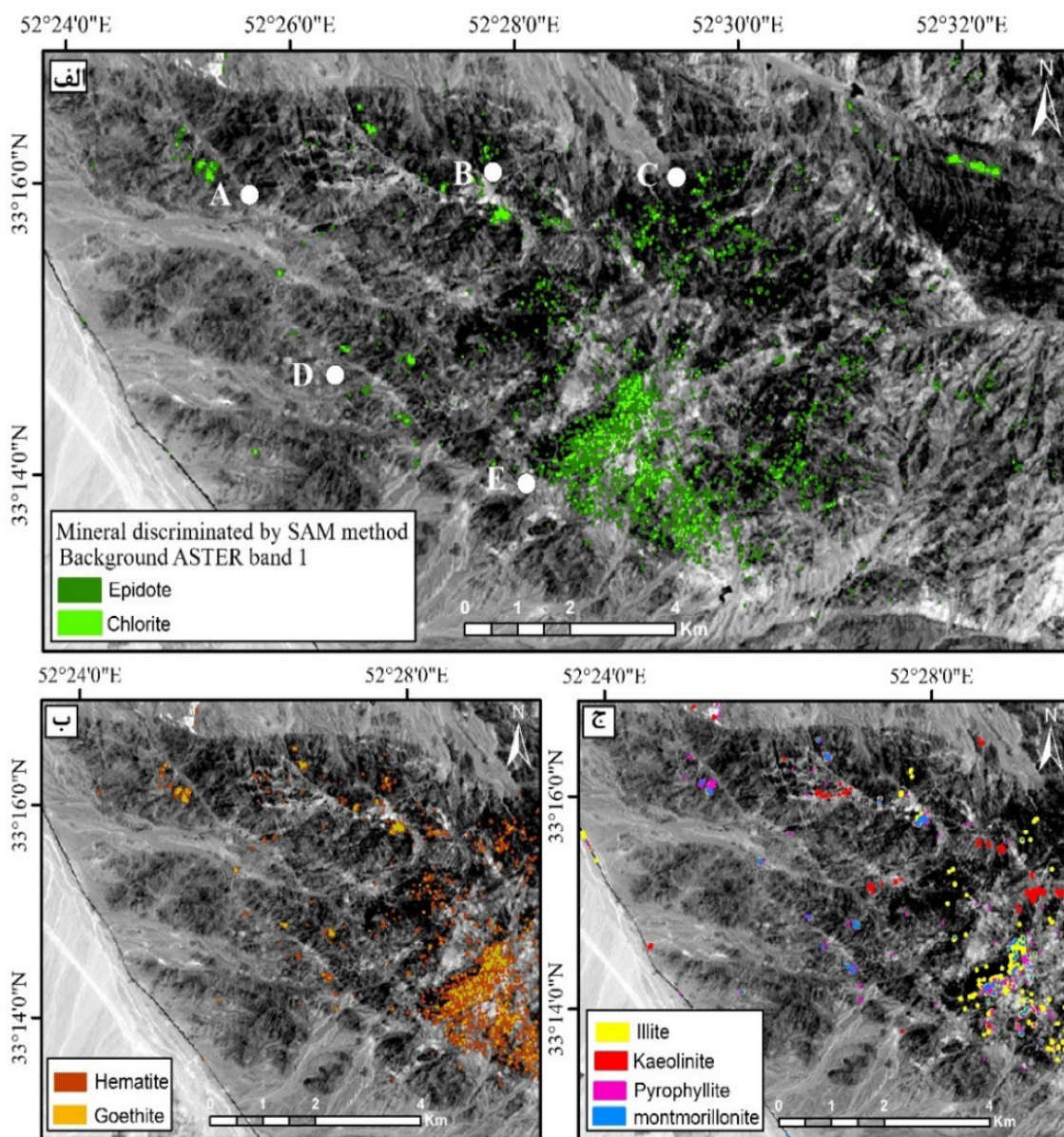
نتایج پردازش داده‌ها به روش SAM نشانگر وسعت و گستردگی کانی‌های اپیدوت و کلریت مربوط به پهنه دگرسانی پروپیلیتیک می‌باشد که با رنگ سبز در تصویر مشخص شده‌اند (شکل ۶. الف). این گستردگی در شمال منطقه به‌صورت رخنمون‌های محدود و در شرق منطقه، مرکز و به‌ویژه به سمت جنوب منطقه (محدوده شمالی گسل ظفرقند) به‌طور حداکثر گسترش کاملاً آشکار است (شکل ۶. الف). پهنه‌های دارای اکسیدهای ثانویه آهن نمود چشمگیری در جنوب منطقه نشان می‌دهند (شکل ۶. ب). همچنین بخش‌هایی از این پهنه در مجاورت و همراهی دگرسانی پروپیلیتیک (اپیدوت و کلریت) در شمال شرق منطقه مشاهده می‌شود. کانی‌های رسی شامل ایلیت، مونت مورینیت، کائولینیت و پیروفیلیت نیز در مرکز و جنوب منطقه، تمرکز بیشتری را نشان می‌دهند. در شمال منطقه نیز بر روی ایگنبریت‌ها آثار این کانی‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۶. ج).



شکل ۵. الف) نسبت گیری باندی ترکیبی (Gray Scale: 6+9/7+8)، تصویر استر منطقه، مناطق با پیکسل روشن دگرسانی پروپیلیتیک، ب) نسبت گیری باندی ترکیبی (Gray Scale: 4+7/5) تصویر استر، مناطق با پیکسل روشن کانی‌های رسی، ج) ترکیب رنگی (RGB: RBD5, RBD6, RBD4) تصویر استر، سنگ‌های دگرسان نشده به رنگ آبی، دگرسانی پروپیلیتیک به رنگ آبی تیره تا بنفش و کانی‌های رسی به رنگ زرد تا کرم و نقاط A تا E جهت کنترل صحرایی انتخاب شده‌اند.

پنجبره مطالعاتی و به صورت رخنمون وسیع در بخش جنوب شرق و مرکز منطقه و پهنه‌های دارای اکسیدهای ثانویه آهن (هماتیت و گوتیت) نیز با الگوی گسترشی مشابهی به صورت گسترده و در هم آمیخته مشخص می‌شوند. پهنه‌های دارای کانی‌های رسی (ایلیت، مونت مورینیت، کائولینیت و پیروفیلیت) نیز با وسعت زیاد در جنوب و گاه به صورت رخنمون‌هایی با روند خطی در شمال منطقه مشاهده می‌شوند.

پردازش تصاویر ماهواره‌ای به روش‌های مختلف الگوی خاصی از دگرسانی را در منطقه به‌ویژه در مرکز و جنوب آن نشان می‌دهد. این الگو نشانگر افزایش شدت و وسعت دگرسانی‌ها از شمال به سمت جنوب منطقه و درهم آمیختگی این پهنه‌ها با یکدیگر در بخش جنوبی منطقه می‌باشد. دگرسانی پروپیلیتیک (اپیدوت و کلریت) عمدتاً به صورت رخنمون‌های پراکنده در وسعت‌های کم در بخش شمالی



شکل ۶. الف) نتیجه روش SAM جهت بارزسازی کانی‌های اپیدوت و کلریت مرتبط با دگرسانی پروپیلیتیک با گسترش در شمال، مرکز و جنوب منطقه ب) نتیجه روش SAM جهت بارزسازی اکسیدهای ثانویه آهن، ج) نتیجه روش SAM جهت بارزسازی کانی‌های رسی ایلیت، مونت مورینیت، کائولینیت و پیروفیلیت با گسترش به سمت جنوب منطقه و رخنمون محدود در شمال منطقه.



۳-۴- پیمایش صحرائی

جهت تعیین صحت بارزسازی‌های صورت گرفته بر روی تصاویر ماهواره‌ای و بررسی الگوی دگرسانی، پیمایش‌های صحرائی در ۵ ایستگاه مختلف از منطقه، با تمرکز بر نحوه گسترش و شدت پهنه‌های دگرسانی، قرارگیری در امتداد و یا تقاطع برخی از گسل‌ها صورت گرفت.

ایستگاه‌های A، B و C در شمال و شمال شرق منطقه به‌منظور بررسی گسترش دگرسانی پروپلیتیک، ایستگاه‌های D و E جهت بررسی ساختار گسل‌ها و شناسایی علت گسترش و درهم آمیختگی وسیع پهنه‌های دگرسانی انتخاب شدند. در ادامه به بررسی وضعیت ساختاری و دگرسانی در هر ایستگاه پرداخته می‌شود.

۳-۴-۱- شواهد ساختاری

با توجه به الگوی به دست آمده از گسل‌ها و دگرسانی‌ها در نقاط پیمایشی مشخص شده (A تا E) و سایر مناطق از گسل‌ها، شکستگی‌ها و دایک‌های منطقه برداشت‌های ساختاری در مقیاس مختلف صورت پذیرفت.

۳-۴-۱-۱- شکستگی‌های مرتبط با کانی‌سازی

طی پیمایش‌های صحرائی در منطقه چندین محدوده متفاوت کانی‌سازی از لحاظ نوع و عیار شامل کانی‌سازی مس و کانی‌سازی رگه‌های سیلیسی طلادار شناسایی شدند. مطابقت الگوی گسل‌ها و موقعیت این مناطق نتایج قابل توجهی به دست آورده است. این نتایج (شکل ۷. الف) نشان‌دهنده تمرکز مناطق کانی‌سازی در راستای گسل‌ها و محدوده‌هایی با حداکثر تراکم شکستگی می‌باشد. به‌منظور بررسی دقیق‌تر نقش گسل‌ها و شکستگی‌ها در کنترل کانی‌سازی، مناطق هدف (مناطق دارای کانی‌سازی مس و رگه‌های سیلیسی طلادار) به‌صورت جزئی‌تر از لحاظ ساختاری مورد بررسی قرار گرفتند. در این مناطق علاوه بر بررسی تصاویر ماهواره‌ای و ترسیم شکستگی‌ها در مقیاس کوچک‌تر، برداشت‌های ساختاری از رگه‌ها و شکستگی‌های مرتبط با کانی‌سازی صورت گرفته و نمودار گل‌سرخ‌های آنها جهت بررسی و مقایسه آماری ترسیم شده است (شکل ۷. ب و ج).

نتیجه بررسی جزئی‌تر تصویر ماهواره‌ای جهت شناسایی گسل‌ها و شکستگی‌ها در محدوده کانی‌سازی مس پر عیار و ترسیم نمودار گل‌سرخ‌های آنها (شکل ۷. ب) نشانگر راستای غالب تقریباً شرقی-غربی (فراوانی ۹۵ تا ۱۰۰ درجه) می‌باشد.

نتیجه این بررسی در محدوده کانی‌سازی رگه‌های سیلیسی طلادار (شکل ۷. ج) نیز نشانگر دو راستای غالب شرقی-غربی (۹۰ تا ۱۱۰

درجه) و شمال غربی-جنوب شرقی (۱۲۰ درجه) را نشان می‌دهد. جهت تعیین صحت و انجام مقایسه، طی پیمایش صحرائی از دو محدوده کانی‌سازی مس پر عیار و رگه‌های سیلیسی طلادار برداشت ساختاری از راستای شکستگی‌های مرتبط با کانی‌سازی انجام و نمودار گل‌سرخ‌های آنها ترسیم شد. نمودار گل‌سرخ‌های ترسیم شده بر اساس راستای رگه‌ها و شکستگی‌های مرتبط با کانی‌سازی مس پر عیار طی پیمایش صحرائی نشان‌دهنده راستای غالب ۱۱۰ می‌باشد (شکل ۷. د).

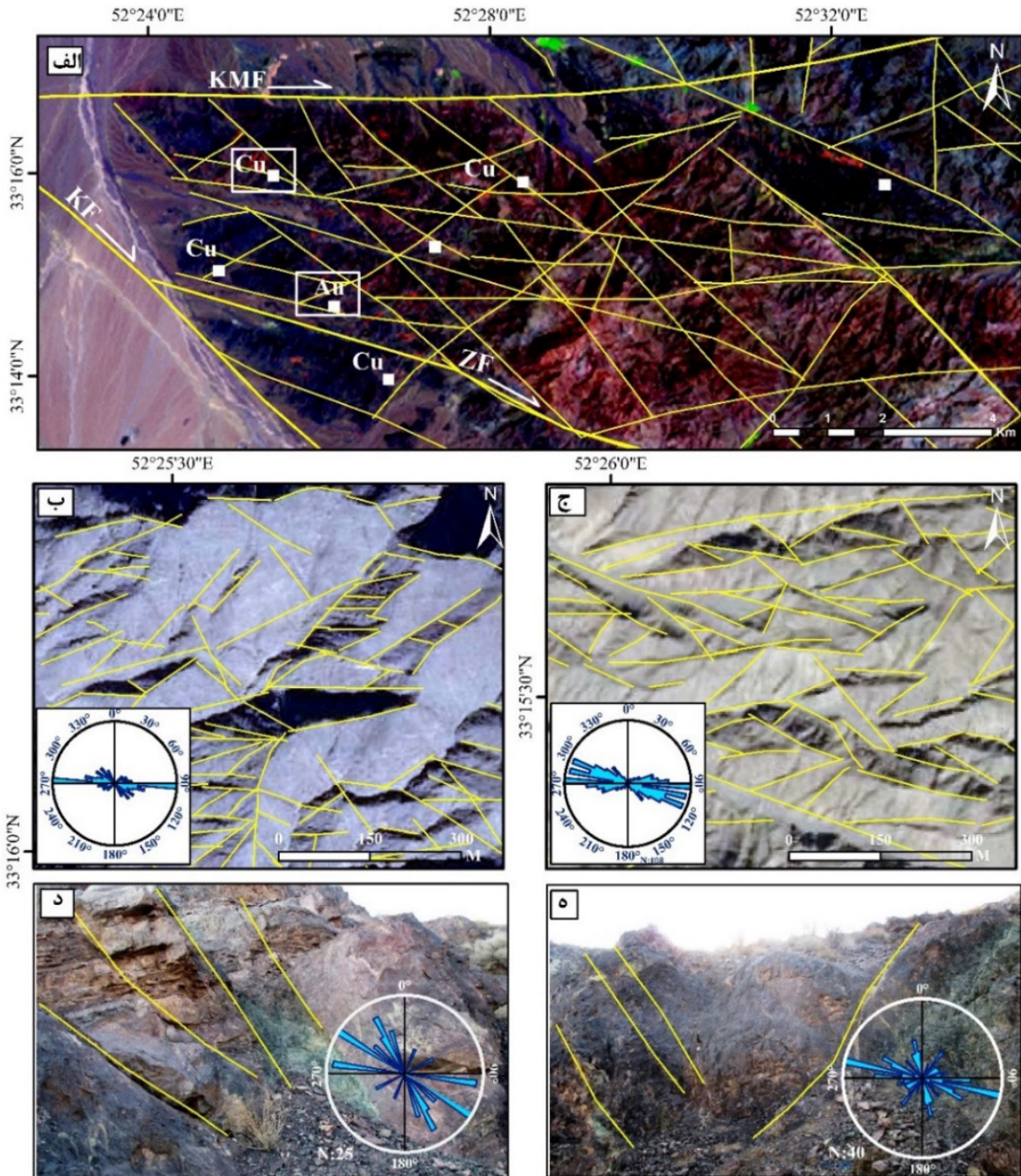
نمودار گل‌سرخ‌های ترسیم شده بر اساس راستای رگه‌ها و شکستگی‌های مرتبط با رگه‌های سیلیسی طلادار طی پیمایش صحرائی نیز نشان‌دهنده دو راستای غالب ۱۲۰ و ۹۵ درجه می‌باشد (شکل ۷. ه).

نتیجه مقایسه راستای شکستگی‌های شناسایی شده طی پردازش تصویر ماهواره‌ای (شکل ۷. ب و ج). با راستای شکستگی‌های مرتبط با کانی‌سازی، برداشت شده طی پیمایش صحرائی (شکل ۷. د و ه) نشانگر صحت و انطباق راستاها با یکدیگر می‌باشد.

با توجه به اینکه در حفاصل دو گسل کاشان و کچومثقال گسترش پهنه‌های تخریب شده گسلی در محل تقاطع گسل‌ها با یکدیگر مشاهده می‌شود، نحوه توزیع و تمرکز مناطق کانی‌سازی (رگه‌های دارای کانی‌سازی) در منطقه نیز محدود به مناطق با حداکثر شکستگی می‌باشد. در این مناطق عموماً درزه‌ها و شکستگی‌ها و تقاطع آنها توسط کانی‌های دما پایین جانشین شده‌اند. برداشت‌های ساختاری در مناطق دارای کانی‌سازی نشان‌دهنده راستای مشابه درزه‌ها و شکستگی‌ها با رگه‌های دارای کانی‌سازی اولیه و یا ثانویه می‌باشد.

۳-۴-۱-۲- ساختار گلواره مثبت

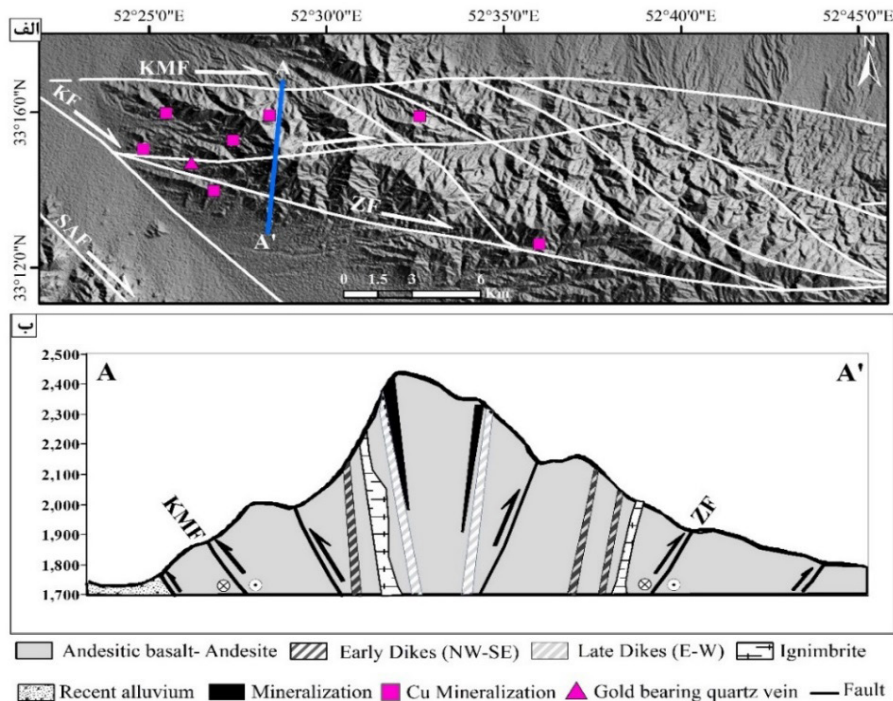
ساختار گلواره مثبت در اثر بالا آمدگی واحدهای سنگی ناشی از مؤلفه فشاری گسل‌های فرعی که شیب رو به یکدگر داشته باشند، در یک سیستم امتدادلغز شکل می‌گیرد. این ساختار با توجه به حضور دو گسل کچومثقال در شمال و ظفرقند در جنوب منطقه، با سازوکار امتدادلغز راستگرد و مؤلفه شیبی معکوس و همچنین وجود گسل‌های شیب‌لغز معکوس که به موازات دو گسل اصلی منطقه‌اند، در منطقه شکل گرفته است (شکل ۸. الف و ب). گسل کچومثقال با راستای ۹۵ تا ۱۰۰ درجه و شیب رو به جنوب و گسل ظفرقند با راستای ۱۱۰ درجه و شیب رو به شمال سبب بالا آمدگی و اوج‌گیری واحدهای آتشفشانی منطقه شده است. همچنین آثار مؤلفه فشاری (معکوس) گسل کچومثقال به‌وسیله چین‌خوردگی واحدهای آهکی الگو-میوسن در شمال منطقه مشخص می‌شود.



شکل ۷. الف) موقعیت مناطق کانی سازی مشاهده شده طی پیمایش صحرایی به همراه گسل های شناسایی شده بر روی تصویر ماهواره‌ای، ب) شکستگی های شناسایی شده بر روی تصویر ماهواره‌ای در منطقه کانی سازی مس پر عیار و نمودار گل سرخی آن ج) شکستگی های شناسایی شده بر روی تصویر ماهواره‌ای در منطقه کانی سازی رگه های سیلیسی طلا دار و نمودار گل سرخی آن، د) شکستگی های مرتبط با کانی سازی مس برداشت شده طی پیمایش صحرایی و نمودار گل سرخی آن که نشان دهنده راستای غالب ۱۱۰ می باشد، ه) شکستگی های مرتبط با کانی سازی رگه های سیلیسی طلا دار برداشت شده طی پیمایش صحرایی و نمودار گل سرخی آن که نشان دهنده دو راستای غالب ۱۲۰ و ۹۵ درجه می باشد. علائم اختصاری شامل گسل کچومتقال (KMF)، گسل کاشان (KF)، گسل جنوب اردستان (SAF) و گسل ظفر قند (ZF) می باشند.

ایجاد شکستگی های کششی، دایک ها و رگه هایی با راستای شرقی- غربی در منطقه شده است (شکل ۸ الف و ب).

بالا آمدگی واحدها سبب ایجاد کشش سطحی در بخش های فوقانی و به موازات راستای گسل ها می شود. این کشش سبب



شکل ۸. الف) الگوی گسل های اصلی، موقعیت برش ساختاری و مناطق دارای کانی سازی در سطح منطقه، ب) برش ساختار B- نشان دهنده گسل های مسبب بالا آمدگی واحدهای سنگی در ساختار گلوواره مثبت می باشد. این گسل ها دارای مؤلفه فشاری با شیب روبه یکدیگر سبب بالا آمدگی، ایجاد کشش و فضای مناسب جهت جای گیری کانی سازی رگه ای در منطقه شده اند. علائم اختصاری شامل گسل های کچومتقال (KMF)، (KF)، جنوب اردستان (SAF) و ظرفرقد (ZF) می باشند.

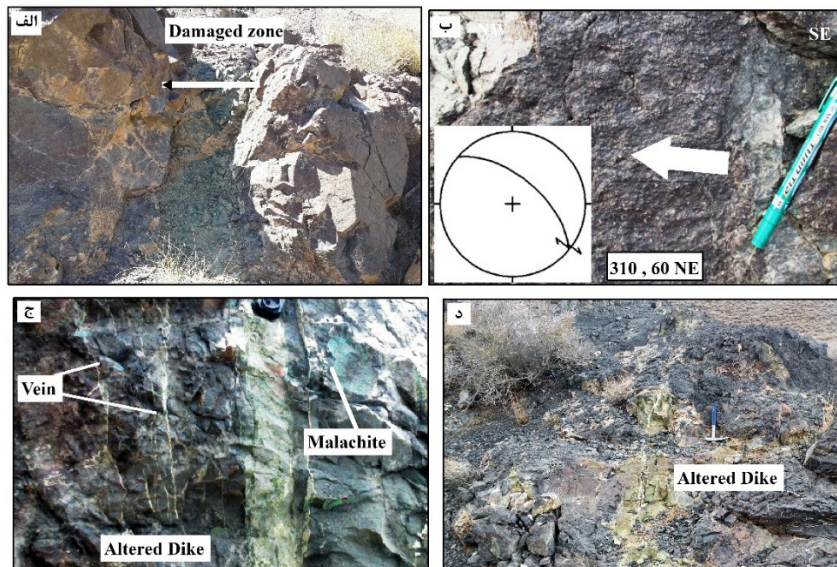
۹. ج). این گسل نقش عمده ای در تعیین الگو و نحوه گسترش پهنه های دگرسانی در جنوب منطقه را ایفا نموده است؛ به گونه ای که حداکثر گسترش پهنه های دگرسانی معطوف به شمال این گسل بوده و در بخش های جنوبی آن اثری از دگرسانی مشاهده نمی شود. در این ایستگاه آثار حرکتی این گسل با مشخصات 100,85 NE و با سازوکار امتدادلغز راستگرد و مؤلفه شیئی معکوس برداشت شده است (شکل ۹. ه).

نقطه کنترلی D در محل کانی سازی رگه های سیلیسی-سولفیدی قرار گرفته است. نقطه کنترلی A در محل کانی سازی رگه های مس-نقره قرار گرفته و برخی از گسل های مرتبط با این کانی سازی دارای سازوکار امتدادلغز راستگرد هستند. در این ایستگاه، در امتداد رگه های کانی سازی کالکوزیت آثار حرکتی این گسل ها به وفور مشاهده می شود. همچنین به علت وجود گسل ها و شکستگی های فراوان، پهنه های تخریب شده گسلی (شکل ۱۰. الف) همراه با آثار کانی سازی ثانویه رگه ای مس (رگه های مالاکیت) به فراوانی مشاهده می شوند. در این ایستگاه آثار حرکتی این گسل با مشخصات 310,60 NE و با سازوکار امتدادلغز راستگرد و مؤلفه شیئی معکوس برداشت شده است (شکل ۱۰. ب).

۳-۱-۳-۴- آثار حرکتی گسل ها

مطالعات و شواهد ساختاری از گسل های منطقه نشان دهنده حضور یک سیستم گسلی امتدادلغز بزرگ که باعث تغییر شکل های شکننده در مقیاس وسیع و کانی سازی در منطقه شده است، می باشد. در کنترل های صحرایی، حضور پهنه های گسلی بزرگ (کاشان- جنوب اردستان، کچومتقال، ظرفرقد و شاخه های فرعی آنها) و وجود آثار حرکتی این گسل ها با طول های متغیر از یک کیلومتر تا ۲۶ کیلومتر و سازوکار غالب امتدادلغز راستگرد با مؤلفه شیئی معکوس بر روی سنگ های آتشفشانی ائوسن مشاهده می شود (شکل ۹. الف، ب و ج). شواهد ساختاری و آثار حرکتی گسل ها (خش لغزها) در ایستگاه های کنترل صحرایی بررسی گردید. نقاط کنترلی B و C در نزدیکی گسل کچومتقال واقع شده اند که در این محدوده آثار کانی سازی اندک و گسترش پهنه دگرسانی پروپیلیتیک (به ویژه در ایستگاه C) مشاهده می شود. در این ایستگاه آثار حرکتی این گسل با مشخصات 095,52 SW و با سازوکار امتدادلغز راستگرد و مؤلفه شیئی معکوس برداشت شده است (شکل ۹. د).

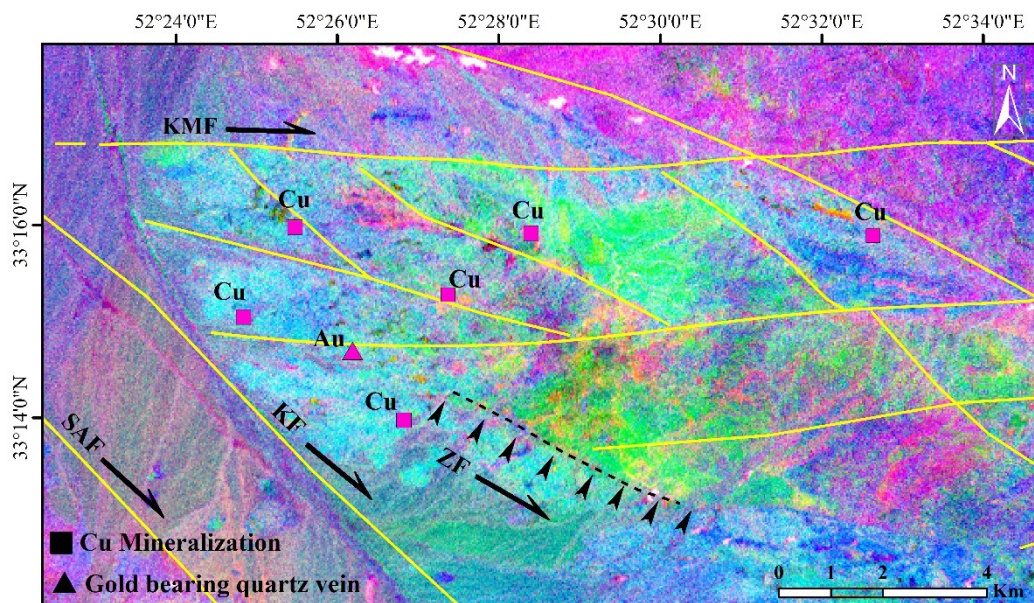
نقطه کنترلی E در مسیر گسل ظرفرقد قرار گرفته است (شکل



شکل ۱۰. الف و ب) پهنه تخریب شده گسلی در شمال منطقه ب) آثار حرکتی گسل کاشان با سازوکار امتدادلغز راستگرد و مؤلفه شیئی معکوس، فلش سفید جهت حرکت فرادیواره را نشان می‌دهد. ج و د) دایک‌های آندزیتی دگرسان شده با راستای ۱۵۰ درجه و رگه‌های کلسیتی، منطقه جنوب شرق اردستان.

که پهنه‌های دگرسانی با گسترش و در هم آمیختگی زیاد، تنها معطوف به بخش‌های شمالی این گسل می‌باشد و در بخش جنوبی این گسل هیچ‌گونه آثار دگرسانی مشاهده نمی‌شود (شکل ۱۱).

مطابقت الگوی گسل‌ها با الگوی دگرسانی و مناطق کانی‌سازی در منطقه نشانگر ارتباط این عوامل با یکدیگر می‌باشد. گسل ظفرقند نقش مؤثری در نحوه گسترش دگرسانی و ایجاد این الگو در منطقه داشته است به طوری



شکل ۱۱. مطابقت الگوی گسل‌ها با الگوی دگرسانی و مناطق کانی‌سازی در منطقه بر روی تصویر ماهواره‌ای پردازش شده به روش نسبت‌گیری بانندی (RGB: 4/6, 5/8, 3/4)، رنگ سبز دگرسانی پروپیلینیک، رنگ صورتی دگرسانی سرسیستیک-آرژلیک و فلش‌ها مسیر عبور گسل ظفرقند را نشان می‌دهند که به عنوان مرز و عامل کنترل دگرسانی در منطقه می‌باشد.



۴-۳-۲- پهنه‌های دگرسانی و کانی‌سازی

۴-۳-۲-۱- پهنه‌های دگرسانی

در نقطه کنترلی (D)، این دگرسانی سبب تجزیه و کدر نمودن سطح پلاژیو کلازها و فلدسپارهای آندزیت‌های منطقه (رسی شدن کانی‌های آلومینوسیلیکاته) شده (شکل ۱۲. د) و درشت بلورهای فلدسپار، پلاژیو کلاز و برخی از کانی‌های مافیک به سریسیت تبدیل شده‌اند (شکل ۱۲. ه).

۴-۳-۲-۲- کانی‌سازی

بر اساس مشاهدات صحرایی، کانی‌سازی مس-نقره (نقاط کنترلی A، B و E) و طلا (در نقطه کنترلی D) در منطقه مشاهده می‌شود. کانی‌سازی مس در شمال منطقه به صورت رگه‌های کالکوزیت و رگچه‌های مالاکیت و آزوریت مشاهده (شکل ۱۲. و) کانی‌ها شامل کالکوسیت، بورنیت، کولیت، دیژنیت، گوتیت و مالاکیت می‌باشند که با بافت‌های جانیشینی (کالکوسیت به جای کالکوپیریت و کولیت و دیژنیت به جای کالکوسیت)، هم‌رشدی و پرکننده فضای خالی مشخص می‌شود. (شکل ۱۲. ز). کانی‌سازی طلا مربوط به رگه‌های سیلیسی سولفیدی می‌باشد که با فاصله نسبت به کانی‌سازی مس-نقره در منطقه مشاهده می‌شود. این کانی‌سازی با مجموعه کانه‌های کالکوپیریت، پیریت، کولیت، دیژنیت، گوتیت و کوارتز و بافت‌های گرانوبلاستیک، شانهای، جانیشینی (کالکوپیریت به جای پیریت و کولیت و گوتیت به جای کالکوپیریت)، جعبه‌ای، کلورومی، پرکننده فضای خالی و رگه‌ای مشاهده می‌شود (شکل ۱۲. ح).

۴-۳-۳- مطالعات ژئوشیمیایی

مطالعات ژئوشیمیایی انجام شده بر روی ۶ نمونه برداشت شده از رگه‌های سیلیسی دارای کانی‌سازی (شکل ۱۱. ب) نشان می‌دهد که حداقل بی‌هنجاری عنصر طلا در پهنه دگرسانی سریسیتیک در حدود ۱/۵ گرم در تن و حداکثر میزان این عنصر در حدود ۲/۱ گرم در تن در رگه کوارتز می‌باشد. حداقل بی‌هنجاری عنصر نقره در حدود ۰/۱ گرم در تن و حداکثر میزان این عنصر ۱۰۰ گرم در تن (در رگه دارای کالکوزیت و کولیت) می‌باشد. این مقادیر برای عنصر مس نیز به ترتیب در حدود ۷۶/۷ و ۱۰۰۰۰ گرم در تن می‌باشد (جدول ۱).

مطالعات دورسنجی و مشاهدات صحرایی نشان می‌دهد که بارزترین دگرسانی مشاهده شده دگرسانی پروپیلیتیک (اپیدوتی شدن) است که با گسترش زیاد به صورت توده‌ای در جنوب شرق و با رخنمون‌های پراکنده در اطراف رگه‌های دارای کانی‌سازی مس (ایستگاه A نقاط کنترلی) و با همراهی پهنه‌های دارای اکسیدهای ثانویه آهن (شکل ۱۲. الف) در شمال منطقه رخنمون دارد. دگرسانی سریسیتیک-آرژیلیک نیز با گسترش کمتر مشاهده می‌شود که در ادامه به شرح هر یک پرداخته می‌شود.

الف) دگرسانی پروپیلیتیک

گسترش این پهنه دگرسانی عموماً بیشتر از بقیه پهنه‌ها در منطقه بوده و شعاع آن تا حدود ۳ کیلومتر می‌رسد (شکل ۱۲. الف). این دگرسانی در شمال شرق و به سمت مرکز و جنوب منطقه دارای حداکثر گسترش می‌باشد. مقاطع نازک تهیه شده از این دگرسانی در نقاط کنترلی (B، C و E) شدت زیاد دگرسانی را نشان می‌دهند. به گونه‌ای که تقریباً تمام کانی‌های اصلی توسط کلریت و اپیدوت جانشین شده‌اند. دگرسانی ابتدا از کانی‌های فرومنیزین شروع شده و سپس بر روی پلاژیو کلازها تأثیر گذاشته است؛ به گونه‌ای که قالب کانی‌های مافیک مانند پیروکسن و برخی از پلاژیو کلازها به طور کامل توسط اپیدوت و کلریت جایگزین شده‌اند. همچنین کلسیت به صورت رگه-رگچه‌ای و پرکننده فضای خالی (بافت بادامکی) در مقاطع مشاهده می‌شود (شکل ۱۲. ج).

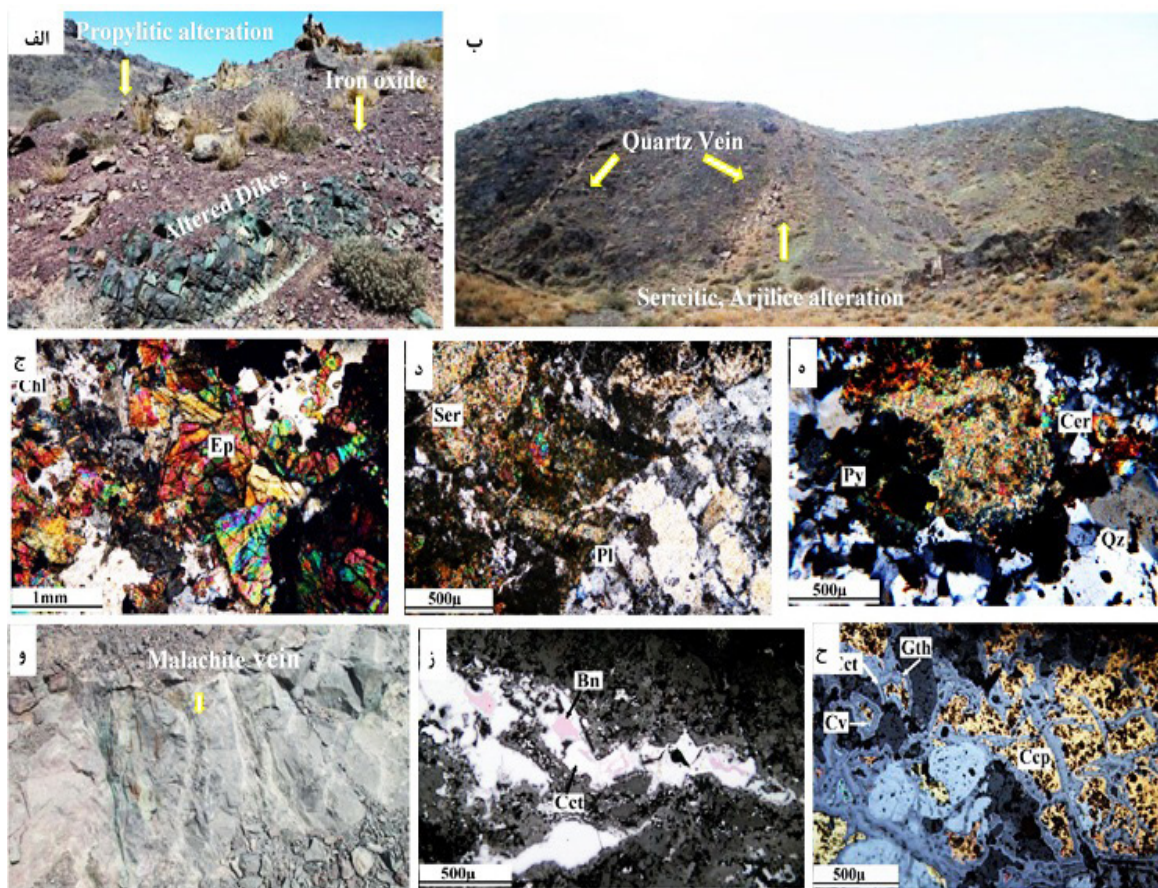
ب) دگرسانی سریسیتیک-آرژیلیک

این دگرسانی به صورت اولیه در منطقه مورد مطالعه تنها در اطراف رگه‌های سیلیسی تا شعاع ۲ متری با گسترش محدود با روند خطی مشاهده شده (شکل ۱۲. ب) و در بقیه مناطق کانی‌های رسی در نتیجه هوازدگی واحدهای سنگی و به ویژه ایگنمبریت‌های موجود در شمال منطقه مشاهده می‌شوند. بر اساس مشاهدات میکروسکوپی از دگرسانی اطراف رگه‌های سیلیسی



جدول ۱. نتایج عناصر انتخابی حاصل از تجزیه نمونه‌های دارای کانی‌سازی به روش ICP-MS (بر حسب ppm)، نمونه‌های V1 تا V4 از رگه‌های سیلیسی و نمونه‌های Q1 و Q5 از دگرسانی اطراف رگه می‌باشند.

N	Au	Cu	Ag	Pb	Zn	As	Cd	Bi	Te	S	Hg
V1	2.1159	6083.8	1.4	6.3	2	11.3	0.1	1.5	0.4	1400	0.01
V2	0.1208	2165.1	0.2	3.6	1	3.8	0.1	0.2	0.2	600	0.01
V3	0.8478	10000	38.1	151.7	23	45.3	0.2	3.8	2.1	6600	0.03
V4	1.5736	10000	100	909.1	52	100	0.9	18.1	6.7	12000	0.07
Q1	0.0013	76.7	0.1	4.2	24	18.3	0.1	0.1	0.2	500	0.01
Q5	0.0041	252.4	0.1	4.9	3	65	0.1	0.1	0.3	500	0.01



شکل ۱۲. الف) نمای از گسترش دگرسانی پروپیلیتیک و پهنه‌های دارای اکسیدهای ثانویه آهن در مناطق دارای کانی‌سازی مس، (ب) نمایی از رگه‌های سیلیسی و دگرسانی اطراف آنها، (ج) اپیدوتی شدن در سنگ میزبان کانی‌سازی مس، (د) تجزیه پلاژیوکلازها به کانی‌های رسی در پهنه دگرسانی آرژیلیک، در آندزیت‌های میزبان رگه‌های سیلیسی، (ه) سریسیتی شدن پلاژیوکلازها همراه با پیریت و کوآرتز، (و) رگه‌های مالاکیت در کانی‌سازی مس، (ز) بورنیت با بافت جانشینی و هم‌رشدی با کالکوسیت، در کانی‌سازی مس، (ح) بافت منطقه‌ای یا کلوفرمی کالکوپیریت، کوولیت و گوتیت در رگه‌های سیلیسی، منطقه جنوب شرق اردستان.



۵- نتیجه گیری

در این پژوهش جهت شناسایی و بارزسازی گسل‌ها و پهنه‌های دگرسانی از پردازش تصاویر ماهواره‌ای همراه با مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی استفاده شده است که نتایج به دست آمده عبارتند از:

- ۱- بر اساس مطالعات ساختاری (شکل ۲)، الگوی به دست آمده از گسل‌های منطقه مورد مطالعه نشانگر سه راستای کلی شمال غربی - جنوب شرقی (۱۲۰ تا ۱۳۰ درجه)، شرقی - غربی (۹۵ تا ۱۰۰ درجه) و شمال شرقی - جنوب غربی می‌باشد. این الگو منعکس کننده ساختارهای زمین‌ساختی همانند ساختار دم‌اسبی در انتهای گسل کچومثقال (شکل ۲، ب)، ساختار گلواره مثبت (شکل ۸)، تغییرات راستا در طول گسل‌ها، پهنه‌های تخریب شده گسلی و تراکم و تقاطع زیاد گسل‌ها (حداصل گسل کچومثقال و بخشی از گسل کاشان) در شمال منطقه بوده که به سمت مرکز و جنوب منطقه از میزان آن کاسته می‌شود. طی این مطالعات برای اولین بار گسل ظفرقند که از جنوب منطقه عبور و شاخه‌ای از گسل کاشان می‌باشد و نیز نقش آن در تکامل ساختاری منطقه، شناسایی شده است.

- ۲- ساختار گلواره مثبت در منطقه با بالا آمدگی واحدهای سنگی ناشی از مؤلفه فشاری دو گسل کچومثقال با شیب رو به جنوب در شمال و ظفرقند با شیب رو به شمال در جنوب منطقه بوجود آمده است (شکل ۸). در طی این بالا آمدگی کشش سطحی در بخش‌های فوقانی و به موازات راستای دو گسل کچومثقال و ظفرقند (راستای ۱۰۰ تا ۱۱۰ درجه) روی داده و مکان مناسب برای جای گیری مواد معدنی و یا کانی‌های ثانویه تشکیل شده است. گسترش شکستگی‌های کششی که مکان مناسبی برای جای گیری دایک‌ها و نفوذ سیالات گرمابی شده است، سبب گسترش محدود کانی‌سازی اولیه مس به صورت رگه‌ای شده است. بالا آمدگی ناشی از ساختار گلواره مثبت توجه کننده گسترش و درهم آمیختگی وسیع دگرسانی در جنوب منطقه می‌باشد.

- ۳- بر اساس مطالعات دورسنجی به‌ویژه روش‌های ترکیب رنگی کاذب (شکل ۴، ج)، تصویربرداری بانند جذب نسبی (شکل ۵، ج) و مطالعات صحرایی، پهنه دگرسانی پروپلیتیک و پهنه‌های دارای اکسیدهای ثانویه آهن همراه با یکدیگر، به صورت درهم آمیخته، توده‌ای و رخنمون‌های محدود در شمال منطقه و به صورت وسیع‌تر در شمال شرق، به سمت مرکز و جنوب منطقه بارزسازی شدند. پهنه‌های دگرسانی سریستیک و آرژیلیک با گسترش زیاد در مرکز و جنوب منطقه و به صورت رخنمون‌های محدود بر روی ایگنمبریت‌های شمال منطقه بارزسازی شدند. کانی‌های رسی که در پردازش‌ها گسترده‌گی وسیعی را به‌ویژه در جنوب منطقه نشان

می‌دهند، در اکثر موارد در نتیجه هوازگی ثانویه بوده و تنهارخنمون محدودی در اطراف رگه‌های سیلیسی به صورت اولیه و باروند خطی از این پهنه مشاهده می‌شود.

- ۴- طی پیمایش‌های صحرایی مناطق کانی‌سازی شناسایی شده، شامل کانی‌سازی رگه‌های سیلیسی طلادار و رگچه‌های مس (تمرکز محدود به شمال منطقه) می‌باشند. این دو کانی‌سازی دارای دو الگوی متفاوت دگرسانی می‌باشند. دگرسانی پروپلیتیک (اپیدوتی شدن) و پهنه‌های دارای اکسیدهای ثانویه آهن به صورت توده‌ای در اطراف رگه‌های مس دار و دگرسانی آرژیلیک - سریستیک به صورت محدود و باروند خطی در اطراف رگه‌های سیلیسی طلادار مشاهده شدند.

- ۵- مطابقت الگوی گسل‌ها (شکل ۲ الف) با الگوی دگرسانی در منطقه نشانگر ارتباط این دو عامل می‌باشد. گسل ظفرقند نقش مؤثری در نحوه گسترش دگرسانی و ایجاد این الگو در منطقه داشته است به طوری که پهنه‌های دگرسانی با گسترش و درهم آمیختگی زیاد، تنها معطوف به بخش‌های شمالی این گسل می‌باشد و در بخش جنوبی این گسل هیچ‌گونه آثار دگرسانی مشاهده نمی‌شود (شکل ۱۱).

مطابقت پراکنندگی‌های نواحی دگرسانی، الگوی گسل‌ها و موقعیت مناطق کانی‌سازی نتایج قابل توجهی به دست آورده است؛ به گونه‌ای که الگوی دگرسانی همراه با کانی‌سازی در منطقه متفاوت بوده و گسل‌ها و شکستگی‌ها عامل مهمی در ایجاد این تفاوت می‌باشند. دگرسانی در بخش‌های شمالی منطقه گسترش محدودی داشته ولی کانی‌سازی گسترش نسبتاً وسیعی را دارا می‌باشد (شکل ۱۱).

- ۶- جهت تعیین ارتباط بین ساختارهای زمین‌ساختی و کانی‌سازی در منطقه الگوی گسل‌ها و موقعیت مناطق کانی‌سازی با یکدیگر مطابقت داده شدند (شکل ۱۱). با توجه به تراکم زیاد گسل‌ها در شمال منطقه، عیار کانی‌سازی‌های مشاهده شده نیز بیشتر و با کاهش فراوانی گسل‌ها به سمت مرکز منطقه از میزان آن کاسته می‌شود. مطابقت الگوی شکستگی‌های پردازش شده با شکستگی‌های مرتبط با کانی‌سازی برداشت شده در دو محدوده کانی‌سازی و مقایسه آماری آنها با کمک نمودارهای گل سرخی نیز نشانگر نقش کنترل‌کنندگی شکستگی‌ها می‌باشد. راستای رگه‌ها و شکستگی‌های مرتبط با کانی‌سازی در هر دو محدوده کانی‌سازی راستای مشابه با راستای شکستگی‌های پردازش شده نشان می‌دهد.

۶- تشکر و قدردانی

این مقاله بخشی از پایان‌نامه کارشناسی ارشد نگارنده اول بوده، لذا از دانشگاه اصفهان جهت حمایت‌های به عمل آمده، سپاسگزاری می‌شود.



۷- منابع فارسی

محمدی، س.، ۱۳۹۵. تحلیل ساختاری منطقه جنوب اردستان و تعیین ارتباط بین کانی‌سازی و عناصر ساختاری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، ۱۳۰ صفحه.

محمدی، س.، ندیمی، ع.، اعلمی نیا، ز.، ۱۳۹۴. الف، شناسایی گسل‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های مغناطیس‌سنجی هوایی، منطقه جنوب اردستان، شمال شرق اصفهان، کارگاه‌های آموزشی، سی و چهارمین گردهمایی و دومین کنگره بین‌المللی تخصصی علوم زمین، تهران، ایران.

محمدی، س.، ندیمی، ع.، اعلمی نیا، ز.، ۱۳۹۴. ب، بررسی شاخص‌های فعالیت تکنونیک‌های منطقه جنوب اردستان در طی کوآترنری، دومین همایش ملی انجمن کوآترنری، دانشگاه اصفهان، ایران.

بیطاری خالدی، ل.، قربانی، م.، و شیخ ذکریائی، س.، ۱۳۹۱. پترولوژی و محیط تکنونیک‌های آتشفشانی شرق اردستان، سی و یکمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران.

صالحی، م.، ۱۳۹۵. زمین‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی مس در منطقه جنوب شرق اردستان، اصفهان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، ۱۲۰ صفحه.

غلامی فشارکی، ز.، و شمسی پوردهکردی، ر.، ۱۳۸۹. مینرالوگرافی و منشاء کانسار مس کچومثال (شمال شرق اردستان)، نخستین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران.

References

- Alimohammadi, M., Alirezaei, S. and Kontak, D.J., 2015. Application of ASTER data for exploration of porphyry copper deposits: A case study of Daraloo– Sarmeshk area, southern part of the Kerman copper belt, Iran. *Ore Geology Reviews*, 70 (1): 290-304.
- Aminoroaya, Yamini, M., Tutti, F., Haschke, M. Ahmadian, J. and Murata, M., 2016. Synorogenic copper mineralization during the Alpine-Himalayan orogeny in the Zafarghand copper exploration district, Central Iran: petrography, geochemistry and alteration. *Geological Journal*, 52 (2):263-281.
- Berger, B. R. and Drew, L. J., (1997). Role of strike-slip duplexes in localization of volcanoes, related intrusions, and epizonal ore deposits [abs.]. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 29, (6), 359–360.
- Beygi, S., Nadimi, A. and Safaei, H., 2016. Tectonics history of seismogenic fault structures in Central Iran. *Journal of Geosciences*, 61 (2): 127–144.
- Clark, R.N., 1999. Spectroscopy of rocks and minerals and principles of spectroscopy. In, Rencz, A.N. (Ed.), *Manual of Remote Sensing*, John Wiley & Sons, New York, 3–58.
- Drew, L. J., (2005) A Tectonic Model for the Spatial Occurrence of Porphyry Copper and Polymetallic Vein Deposits-Applications to Central Europe. *Scientific Investigations Report 2005–5272*, U.S. Department of the Interior, U.S.
- Hapke, B., 1981. Bidirectional reflectance spectroscopy, 1. Theory. *J. Geophys. Res.*, 86 3039– 3054.
- Hunt, G.R., 1977. Spectral signatures of particulate minerals, in the visible and near infrared, *Geophysics*, 42: 501–513.
- Kruse, F. A., Boardman, J. W., Lefkoff, A. B., Heidebrecht, K. B., Shapiro, A. T., Barloon, P. J. and Goetz, A. F. H., 1993. the Spectral Image Processing System (SIPS). *Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data. Remote Sensing of Environment*, 44: 145-163.
- Madani, A. and Harbi, H., 2012. Spectroscopy of the mineralized Tonalite- Diorite intrusions, Bulghah gold mine area. Saudi Arabia: Effects of opaque's and alteration products on Fieldspec data. *Ore Geology Reviews*, 44: 148–157.
- Radfar, C., 1999. Geological map of Ardestan, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Rouskov, K., Popve, Kstoykov, S. and Yamaguchi, Y., 2005. Some application of the remote sensing in geology by using ASTER image. *Scientific Conference, Space, Ecology and Safety*. Varna, Bulgaria.
- Rowan, L.C. and Mars, J. C., 2003. Lithological mapping in the mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. *Remote Sensing of Environment*, 84: 350-366.
- Sabins, F., 1999. Remote sensing for mineral exploration, *Remote. Ore Geology Reviews* 14: 157-183.
- Small, C., Steckler, M., Seeber, L., Akhter, S., Goodbred, S., Mia, B. and Imam, B., 2009. Spectroscopy of sediments in the Ganges– Brahmaputra delta: spectral effects of moisture, grain size and lithology, *Remote. Sens. Environ.*, 113: 342–361.
- Tommaso, D.I. and Rubinstein, N., 2007. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infernillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geology Reviews*, 32: 275-290.
- Tosdal, R. M. and Richards, J. P., (2001). Magmatic and structural controls on the development of porphyry Cu±Mo±Au deposits, in Richards, J.P., and Tosdal, R.M., eds., *Structural controls on ore genesis: Reviews in Economic Geology* 14, 157–181.
- Van Der Meer, F., Vazquez-Torres, M., and Van Dijk, P. M., 1997. Spectral characterization of Ophiolite Lithologies in the Troodos Ophiolite complex of Cyprus and its potential in prospecting for massive sulphide deposits. *Journal of Remote Sensing*, 18: 1245-1257.
- Yeganehfar, H., Ghorbani, M.R., Shinjo, R. and Ghaderi, M., 2013. Magmatic and geodynamic evolution of Urumieh– Dokhtar basic volcanism, Central Iran major, trace element, isotopic, and geochronologic implications. *International Geology Review*, 55: 767–786.

Analysis of the relationship between mineralization and alteration zones with tectonic structures using remote sensing studies in south Ardestan area (northeastern Isfahan)

Samira Mohammadi¹, Alireza Nadimi^{*2}, Zahra Alaminia³

1. M.Sc. Tectonic, Department of Geology, University of Isfahan.

2.* Associate Professor, Tectonic, Department of Geology, University of Isfahan.

3. Assistant Professor, Economic Geology, Department of Geology, University of Isfahan.



Abstract:

The study area is located in central part of the Urumieh- Dokhtar magmatic arc and the southeast Ardestan area. Eocene volcanic rocks units with a combination of andesite and basaltic andesite constitute the most extensive rock units in the study area. These units are host to Ag-Cu and Au mineralization and alteration zones. Utilization of remote sensing methods especially composite pseudo color and Filters helped us to obtain valuable information on alteration zones, existing brittle structures and the role of Zafarghand fault in controlling alteration zone. The distribution pattern of the faults on processed satellite images, shows three generally orientations, changing in fault orientations, the density of faults in the north of the area and positive flower structure. Two different patterns of alteration zones are observed including propylitic alteration and zones of secondary iron oxides with large distributions around copper veins and argillic - sericitic alteration zones with limited and linear distributions around quartz veins. Comparison of the pattern of faults, mineralization and alteration zones indicate a decrease in the degree of mineralization and increase the extent of alterations along with reducing the density of faults from north to south of the region. The Zafarghand fault has an effective role in the creation and development of alteration in the study area. In this way, alteration is only seen toward the northern parts of this fault and in the southern part of this fault, no alteration effects are observed. This fault along with Kachomesqal fault has created a flower structure in the area. This structure has created a tension and suitable location for mineralization and confluence of alteration zone in the south of the area.

Keywords: Remote Sensing, Alteration, Zafarghand fault, Brittle structure, Ardestan, Urumieh- Dokhtar Magmatic Arc.

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