



بارزسازی دگرسانی‌های در ارتباط با کانه‌زایی چند فلزی پورفیری در منطقه قره گل (استان اردبیل) با استفاده از تحلیل مولفه‌های اصلی و نقشه بردار زاویه طیفی

سیده نرگس ساداتی، شادی ضیاء*، غلامرضا احمدزاده

گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۵، نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۱۲/۲۶)

چکیده: منطقه قره گل در پهنه فلززایی اهر- ارسباران در استان اردبیل، شهرستان مشکین‌شهر و در بخش مرادلو واقع است. قدیمی‌ترین واحدهای سنگی در این منطقه مربوط به سنوزوئیک (ائوسن) و شامل برش آتشفشانی است. در این منطقه، توده‌های ریزکوارتزدیوریتی در سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری نفوذ نموده‌اند و دگرسانی و کانه‌زایی در مقیاس پایین ایجاد شده است. نتایج برآمده از پردازش تصاویر استر برای بارزسازی دگرسانی‌ها براساس نوارهای جذبی و انتخاب بهترین ترکیب رنگی نسبتی (۵/۶+۹، ۸/۹، ۴/۵ به ترتیب برای دگرسانی‌های آرژیلیک، فلیک و پروپلیتیک)، همچنین استفاده از روش‌هایی چون تحلیل مولفه‌های اصلی و نقشه بردار زاویه طیفی گویای همراهی این دگرسانی‌ها در بخش مرکزی کانسار بوده که بررسی های سنگ نگاری نیز آن را تایید کرده است. بررسی های صحرایی نشان داده است که نتایج برآمده از نقشه بردار زاویه طیفی (SAM) نسبت به تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) در بارزسازی دگرسانی ها عملکرد بهتری داشته است.

واژه های کلیدی: چند فلزی؛ دگرسانی؛ استر؛ قره گل.

مقدمه

میان، می توان به انباشته‌های مس، طلا، سرب، روی و منگنز اشاره کرد. شمال غرب کمربند مس ایران به نام کمربند مس ارسباران شناخته می‌شود در ادامه، کمربند ماگمایی ارومیه دختر قرار دارد و پیشتر بربریان از این کمربند با نام کمربند قره داغ یاد کرده‌اند، کانه‌زایی فراگرمایی و فلزهای پایه لهریز- انزان، نقدوز، سرخانلو، نیر، زرج آباد و هشتجین- مجرد از آن جمله هستند [۲۰۱]. گستره معدنی قره گل بخشی از منطقه ارسباران محسوب می شود که به دلیل قرارگیری در جایگاه ویژه زمین‌شناسی و فلززایی در این پژوهش از نظر سنگ نگاری، دگرسانی و کانه زایی با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره ای استر بررسی شده است. نقشه‌برداری از پهنه‌های دگرسان شده با سنجنده‌هایی با توانایی ثبت بازتاب و جذب طیفی کانی‌های شاخص دگرسانی در گستره‌های مختلف طیف الکترومغناطیسی انجام شود. همچنین می‌توان از داده های

از نظر زمین ساختی، اغلب کانه زایی مس و عناصر چند فلزی در کمربندهای کوهزایی وابسته به پهنه‌های فرورانش فانروزوئیک (به ویژه مزوزوئیک- سنوزوئیک) و در ارتباط با کمان‌های آتشفشانی- آذرین نفوذی-پلوتونی آهکی -قلیایی یافت می‌شوند که در کشور ایران اغلب با نام کمربند ارومیه - دختر در راستای شمال غرب تا جنوب شرق گسترش دارند و براساس نظر بسیاری از زمین شناسان، در ارتباط با فرورانش صفحه نتوتیس به زیر صفحه ایران هستند. از نظر زمین‌شناسی ساختاری، بخش عمده استان اردبیل وابسته به پهنه ساختاری البرز- آذربایجان است و در آن سنگ‌های آتشفشانی و نیز آذرآواری‌های اوایل ترشیاری سهم به سزایی دارند. پهنه ساختاری البرز- آذربایجان به دلیل فعالیت های آتشفشانی همراه با کانی‌سازی از نوع چند فلزی است که از آن

سنجش از دور برای تامین اطلاعات پایه زمین‌شناسی چون نقشه-برداری از واحدهای سنگ‌شناسی، چینه‌شناسی، خطواره-های بزرگ و روندهای ساختاری در مناطقی که امکان کانه-سازی وجود دارد استفاده کرد [۳]. براساس این داده‌ها، می‌توان انواع خطواره‌ها و برخوردگاه گسل‌های اصلی با گسل‌های دیگر را شناسایی کرد و مناطق مستعد برای نفوذ ماگما، دگرسانی و کانه‌زایی را معرفی نمود. تحلیل مولفه‌های اصلی و نقشه‌بردار زاویه طیفی امروزه برای بررسی داده‌ها استفاده می‌شود. به تازگی، پژوهش‌های موفق بسیار برای شناسایی دگرسانی‌ها با استفاده از این روش‌ها انجام شده است [۴-۸]. از این رو، در این پژوهش نقشه‌برداری از پهنه‌های دگرسانی آرژلیک، فیلیک و پروپلیتیک در منطقه مورد بررسی به روش مشابهی انجام گردید. در این جا، با تحلیل مولفه‌های اصلی و نقشه‌بردار زاویه طیفی روی تصاویر استر، روشی کمی برای کاهش ابعاد مجموعه داده‌ها و همچنین کاهش همبستگی در داده‌های چند طیفی و در نتیجه ارائه بهترین نتایج برای استخراج دگرسانی‌ها ارائه داده می‌شود.

روش بررسی

هدف اصلی از این پژوهش بررسی ویژگی‌های صحرایی، بررسی‌های سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی در مقاطع نازک و صیقلی، شناسایی پهنه‌های دگرسانی و کشف ناهنجاری‌های احتمالی عناصر در منطقه بود که این منظور از شواهد میکروسکوپی و نقشه‌های مکان‌نگاری، نقشه‌های زمین‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای (AST_L1T_00307142000080441_2015041009084_9_98038_V) استفاده شد. برای بررسی‌های دقیق سنگ-نگاری، ۱۴ مقطع نازک از نمونه‌های سطحی و ۲۸ مقطع نازک از مغزه‌های حفاری تهیه شد. برای تعیین بافت، ساخت، توالی همبرزایی و سایر ویژگی‌های نوری کانه‌های فلزی، تعداد ۳۰ مقطع نازک صیقلی و ۳ مقطع صیقلی تهیه و با میکروسکوپ قطبشی عبوری-بازتابی بررسی شدند.

بحث و بررسی

زمین‌شناسی منطقه

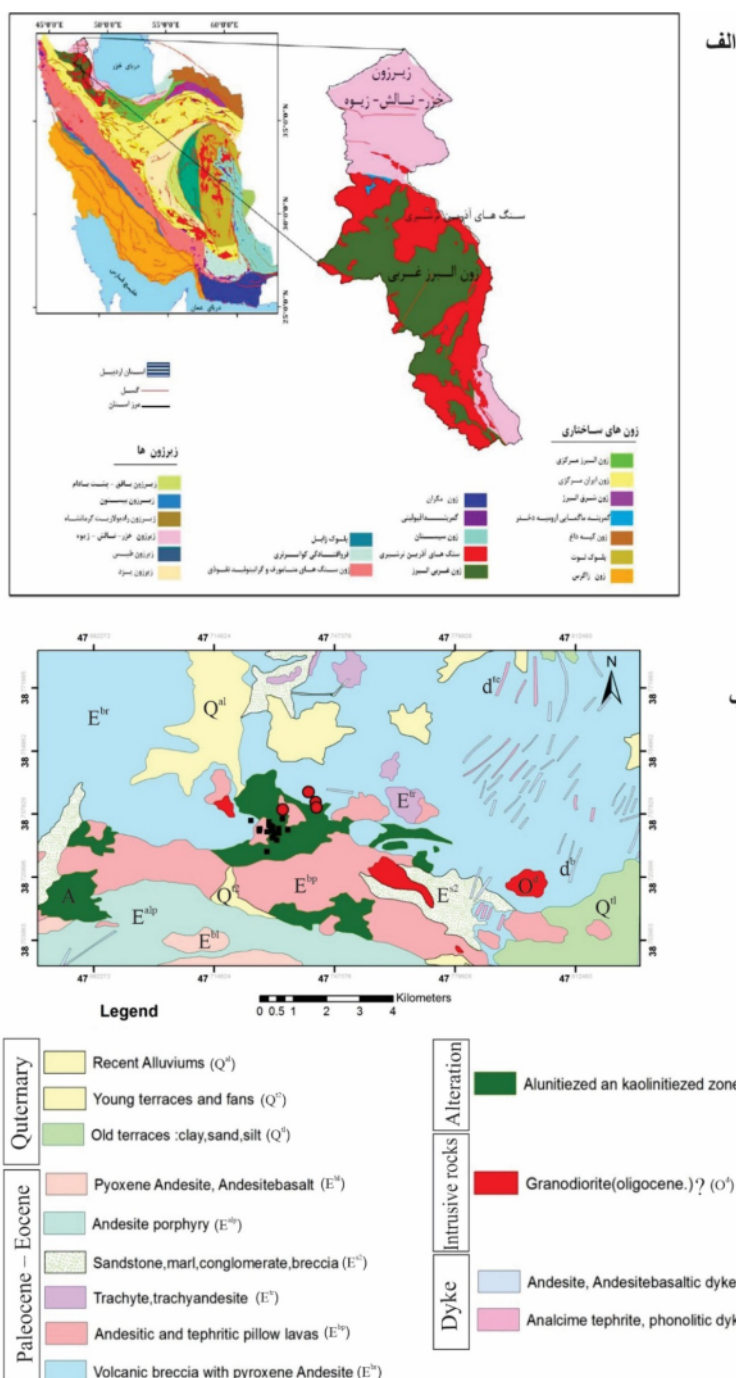
کمریند ماگمایی البرز در بخش شمالی ایران قرار داشته و روند شرقی غربی دارد [۹، ۱۰] و به بخش‌های غربی، مرکزی و شرقی تقسیم شده است و بخشی از گسل شمالی-جنوبی رشت تا کستان را نیز دربرمی‌گیرد. براساس تقسیم‌بندی ساختاری مرجع [۱۱]، گستره استان اردبیل با پهنه البرز غربی

شامل آندزیت تا گدازه‌ی داسیتی و گستردگی آهکی-قلیایی به شکل گرانیتوئیدی، پوشش داده شده است که به عنوان کمریند ماگمایی البرز - آذربایجان شناخته می‌شود. منطقه‌ی اکتشافی قره‌گل در چارگوش زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ اهر و برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ لاهرود بین طول‌های جغرافیایی ۴۷°۳۹' تا ۴۷°۴۹' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۴۱° ۳۸' تا ۴۶° ۳۸' شمالی واقع است [۱۱]. راه‌های دسترسی به این منطقه جاده‌های مشکین‌شهر - اردبیل و مشکین‌شهر - اهر هستند. موقعیت منطقه مورد بررسی در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ لاهرود برگرفته از تصویر ماهواره‌ای در شکل ۱ الف نشان داده شده است. بر اساس بررسی‌های صحرایی و نقشه زمین‌شناسی (شکل ۱ ب)، قدیمی‌ترین واحدهای سنگی در این منطقه مربوط به سنوزوئیک (ائوسن) و شامل سنگ‌های برش آتشفشانی با قطعه‌های آندزیت و تراکی آندزیت - شیشه آواری هستند. جوان‌ترین واحد سنگی را روراندگی‌های جوان و مخروط افکنه‌های عهد حاضر تشکیل می‌دهند. بیشتر گستره منطقه را رخنمون سنگی مربوط به ائوسن پوشش می‌دهد. روند کلی سنگ‌ها در بخش شمالی و شمال شرقی منطقه شمال غربی- جنوب شرقی و در سایر بخش‌های برگه زمین‌شناسی لاهرود، شمال شرقی- جنوب غربی است. عملکرد عوامل زمین-ساختی در این منطقه مشهود است. روند گسل اصلی در شمال منطقه همراستا با لایه‌های سنگی، شمال غربی- جنوب شرقی است و در سایر بخش‌های منطقه نیز با روند سنگی در آن نواحی شمال شرقی- جنوب غربی هم خوانی دارد. بیشتر بیرون زدگی‌های سنگ‌های منطقه‌ی مورد بررسی مربوط به سنگ-های دوران سوم زمین‌شناسی (پالئوژن) هستند. بیشتر این سنگ‌ها آذرین و بخش کوچکی دارای نهشته‌های آذر آواری هستند.

در منطقه مورد بررسی، واحدهای آتشفشانی و آذرآواری رنگ خاکستری تا خاکستری مایل به سبز دارند و توده‌های نفوذی دارای رنگ خاکستری تیره هستند. از نظر ریخت-شناسی، واحدهای نفوذی به صورت گنبدی‌های توده‌ای مانند و با ریختار به نسبت ملایمی نسبت به ریختار خشن و صخره‌ای واحدهای آتشفشانی و آذرآواری مشخص می‌شوند. بررسی‌های صحرایی نشان داد که برش‌های آتشفشانی با ترکیب پیروکسن آندزیت قدیمی‌ترین واحد موجود در منطقه قره گل هستند (شکل ۲ الف). این واحد بارها توسط دایک‌های سیلیسی با آغستگی اکسید آهن قطع شده است (شکل ۲ ب). دگرسانی

جوان‌تر بریده شده است. بافت این واحد ریزدانه‌ای پورفیری است. رخنمون در این واحد به‌صورت مخروطی شکل و دارای هوازدگی کمی است. حرکت‌های زمین‌ساختی مربوط به آلپین با تزریق توده‌های نفوذی و دگرسانی گرمابی در این منطقه عملکرد شدیدتری داشته و با نفوذ به درون واحدهای آتشفشانی باعث ایجاد شکستگی‌ها و دگرسانی‌های فراوانی شده است (شکل ۲).

آرژیلیکی شدن نیز در این واحد آتشفشانی گسترش خوبی داشته است (شکل ۲). توده نفوذی نیمه عمیق گرانودیوریتی و کوارتز دیوریتی با سن احتمالی الیگوسن در واحد برش‌های آتشفشانی با ترکیب پیروکسن آندزیت نفوذ کرده است که می‌تواند عامل این دگرسانی‌ها باشد. مهم‌ترین توده نفوذی در منطقه قره‌گل شامل یک توده ریزکوارتز دیوریت تا گابرو دیوریت شبه آتشفشانی بزرگ است. به‌ندرت این توده با دایک‌های





شکل ۲ الف- برش های آتشفشانی منطقه با ترکیب پیروکسن آندزیت که با مرز تدریجی بر واحدهای زیرین قرار دارند، دید به سمت شرق. ب- دایک سیلیسی با آغستگی اکسید آهن در منطقه مورد بررسی، دید به سمت شمال. پ- دگرسانی آرژلیکی در واحدهای آتشفشانی، دید به سمت شمال. ت- نمایی از نفوذ توده گرانودیوریتی به درون واحد گدازه آندزیتی- تفریتی، دید به سمت جنوب غرب.

دورسنجی اکتشافی

از آنجا که تصاویر استر برداشت شده در این پژوهش دارای سطح 1T بودند، نیازی به تصحیح‌های پرتوسنجی نبود و در مرحله پیش پردازش، تنها تصحیح‌های جوی لازم به روش میانگین نسبی بازتاب ها (IARR) بر تصاویر اعمال شد. سپس با توجه به نزدیکی گستره بازتابشی پوشش گیاهی و گستره بازتابشی کانی‌های رسی و آهن‌دار و امکان تداخل طیف‌های آنها، برای شناسایی هر چه بهتر مناطق دگرسانی در ارتباط با کانی‌سازی، پوشش گیاهی منطقه با روش شاخص بهنجار شده متفاوت پوشش گیاهی (NDVI) شناسایی و پیش از پردازش تصاویر حذف گردید. پس از آن، تصاویر به دست آمده به روش ایجاد ترکیب رنگی، تحلیل مولفه‌های اصلی و نقشه‌بردار زاویه طیفی به منظور بارزسازی دگرسانی‌ها و خطواره‌ها پردازش شدند که شرح آن در ادامه آمده است:

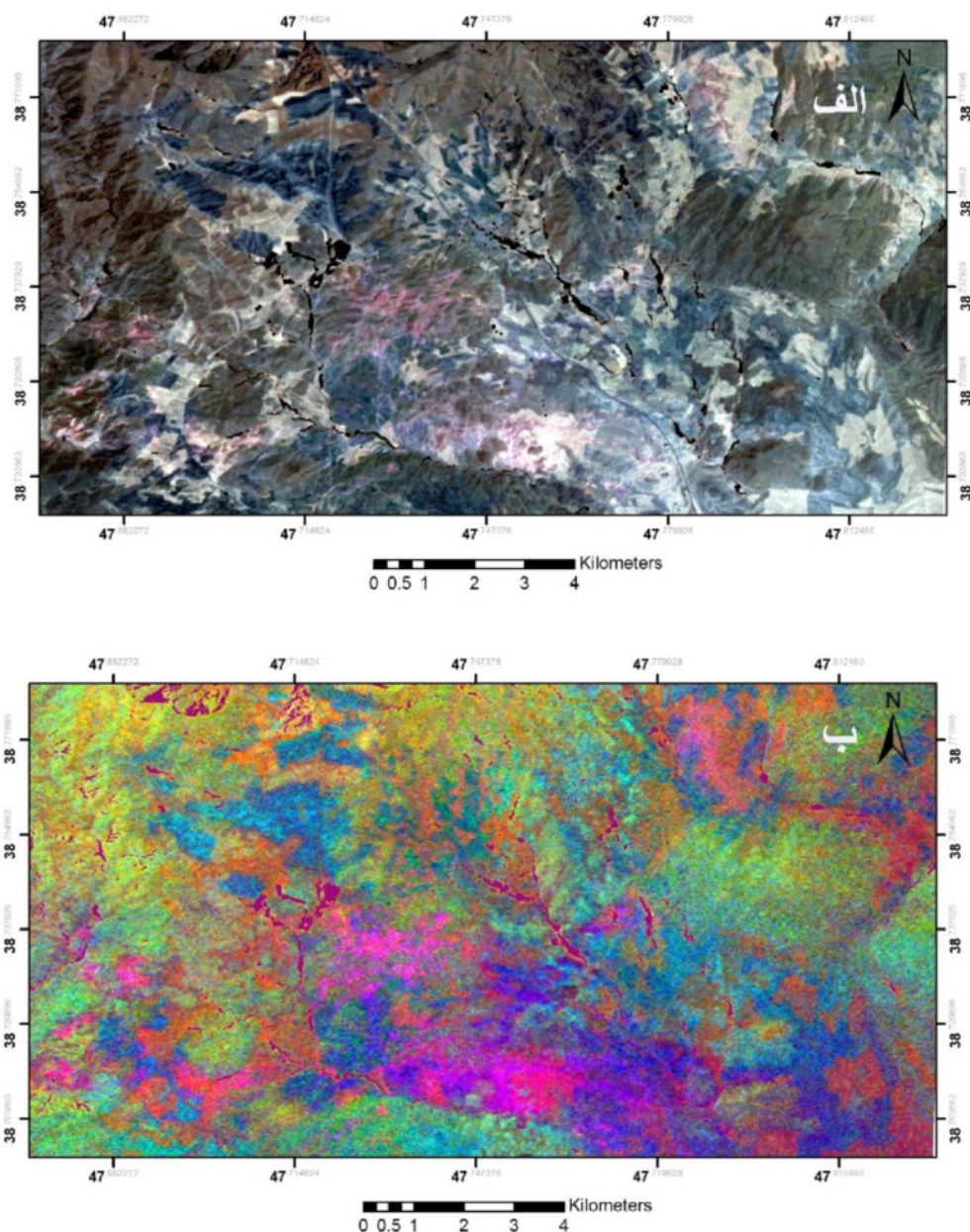
ترکیب رنگی

برای تفسیر چشمی پهنه‌های دگرسانی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای استر، از ترکیب‌های رنگی کاذب RGB استفاده می‌شود. منحنی‌های استاندارد کتابخانه طیفی سازمان طمین

شناسی ایالات متحده (USGS) نشان می‌دهد که کانی‌های مونت موریلونیت، کائولینیت، مسکویت و ایلیت (شاخص پهنه-های دگرسانی فلیک و آرژلیک) در نوار ۴ گستره فروسرخ موج کوتاه (SWIR) دارای بیشترین بازتاب و در نوار ۶، به دلیل وجود پیوند $Al-OH$ دارای بازتاب پایین و کانی‌های کلریت و اپیدوت (شاخص پهنه پروپلیتیک) در نوارهای ۵ و ۶ بازتاب بالا و در نوار ۸، به دلیل پیوند $Mg-OH$ بازتاب پایین را نشان می‌دهند. بنابراین در ترکیب رنگی ۴۶۸ گستره SWIR، دگرسانی‌های آرژلیک و فلیک به رنگ قرمز تا صورتی (به علت قرار گیری نوار ۴ که نوار بازتاب کانی‌های شاخص پهنه دگرسانی فلیک و آرژلیک است در کانال قرمز) و دگرسانی پروپلیتیک به رنگ سبز (به علت قرارگیری نوار ۶ که نوار بازتاب کانی‌های شاخص پهنه دگرسانی پروپلیتیک است در کانال سبز) نمایان می‌شود. به بیان دیگر می‌توان گفت که در گستره‌های قرمز تا صورتی رنگ، احتمال دگرسانی آرژلیک و در گستره‌های سبز رنگ، احتمال دگرسانی پروپلیتیک وجود دارد. همچنین ترکیب نسبتی رنگی $۵/۷/۶$ ، $۹/۸/۴$ به ترتیب در RGB برای نمایش دگرسانی‌های منطقه

های بنفش رنگ نشان دهنده همزمانی دگرسانی‌های فیلک و آرژلیک (که به دلیل هم پوشی این دو دگرسانی، در بخش‌های نزدیک به منطقه قره گل رنگ بنفش آشکارا نمایان است)، رنگ زرد نشانگر همزمان دگرسانی‌های (پروپلیتیک و فیلک) و رنگ آبی کم رنگ نشان‌دهنده دگرسانی‌های همزمان پروپلیتیک و آرژلیک هستند (شکل ۳ ب).

به کار گرفته شد. از آنجا که نسبت نواری برای دگرسانی آرژلیک در کانال قرمز، نتیجه نسبت نواری برای دگرسانی پروپلیتیک در کانال سبز و نتیجه نسبت نواری برای دگرسانی فیلک در کانال آبی قرار داده شده‌اند، گستره‌های قرمز، سبز و آبی رنگ به ترتیب نشان دهنده دگرسانی‌های فیلک، پروپلیتیک و آرژلیک هستند. براساس شکل ۳ الف، گستره



تحلیل مولفه‌های اصلی

تحلیل مولفه‌های اصلی توسط پیرسون در سال ۱۹۰۱ به عنوان یک روش چند متغیره برای تحلیل داده‌ها به کار رفت که روشی کمی در زمینه‌ی کاهش ابعاد مجموعه داده‌ها و همچنین کاهش همبستگی در داده‌های چند طیفی و ابر طیفی است. تحلیل مولفه‌های اصلی به دو صورت تحلیل مولفه‌های اصلی استاندارد و انتخابی انجام می‌شود. در تحلیل مولفه‌های اصلی استاندارد، همه نوارهای تصویر ماهواره‌ای نقش دارند، اما در تحلیل مولفه‌های اصلی انتخابی، نخست بر اساس ویژگی‌های طیفی کانی‌ها، نوارهای مناسب انتخاب شده و تحلیل مولفه‌های اصلی فقط برای آنها اعمال می‌شود [۱۲].

برای انجام این پردازش از ۶ نوار گستره SWIR سنجنده استر (نوارهای ۴ تا ۹) استفاده شد و از پوشه آماری به دست آمده از این عملیات، ماتریس ویژه بردارها برای تحلیل به کار گرفته شد. هر سطر از این ماتریس‌ها مولفه‌های اصلی (PC) و هر ستون نوارها را نشان می‌دهد. در PC اول، ضرایب همیشه یک علامت را نشان می‌دهند، یعنی همه مثبت یا همه منفی هستند؛ این مولفه دربردارنده اطلاعات مکانی است و همه اطلاعات تصویر در این مولفه وجود دارد. سایر مولفه‌ها هر یک پدیده ویژه‌ای چون انواع دگرسانی آرژیلیک، پروپلیتیک و فیلیک را نشان می‌دهند. در دگرسانی آرژیلیک، نوارهای ۴ و ۵ به ترتیب مربوط به بازتاب و جذب هستند، از این رو، در جدول ۱ مولفه‌ای که بیشترین اختلاف را بین این نوارها نشان دهد

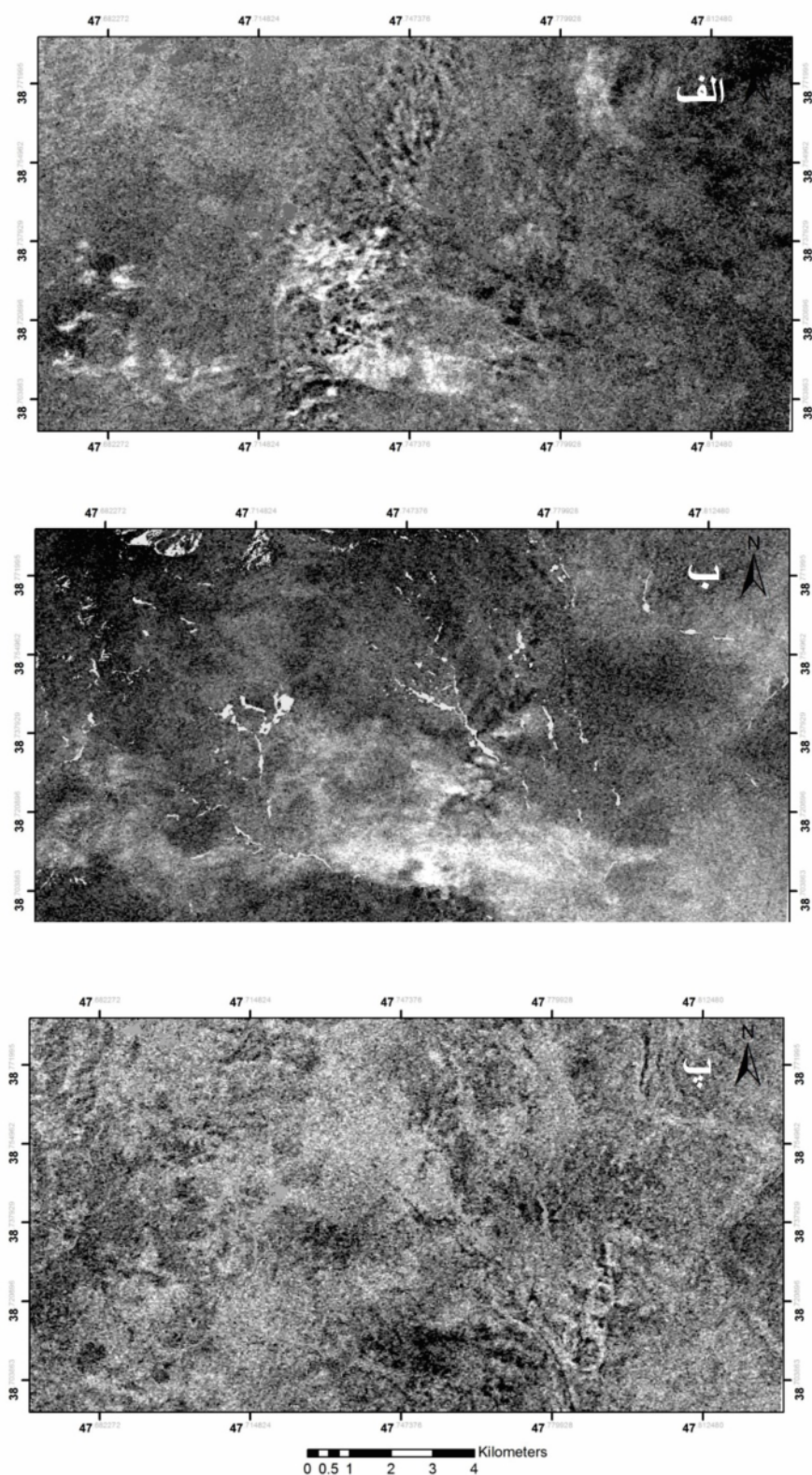
برای بارزسازی دگرسانی آرژیلیک بهتر عمل می‌کند. بر این اساس، مولفه چهارم این ویژگی را بهتر نشان می‌دهد. بنابراین از این مولفه برای بارزسازی دگرسانی آرژیلیک در منطقه مورد بررسی استفاده شد. با توجه به مثبت بودن علامت نوارهای بازتاب در جدول ۱ (مستطیل قرمز رنگ)، مناطق دربردارنده پهنه‌های دگرسانی آرژیلیک با پیکسل‌های روشن در شکل ۴ الف نشان داده شده‌اند.

در دگرسانی پروپلیتیک نوارهای موثر بازتاب و جذب به ترتیب نوارهای ۹ و ۸ هستند. با توجه به جدول ۱، مولفه سوم برای نمایش این دگرسانی بهترین بوده که با مستطیل آبی مشخص شده است و از آنجا که مولفه بازتاب در اینجا دارای ضریب منفی است، پیکسل‌های تیره در تصویر نشان دهنده دگرسانی پروپلیتیک هستند (شکل ۴ ب). البته باید توجه داشت که این پیکسل‌ها تنها مناطق احتمالی حضور دگرسانی را نشان می‌دهند و درستی آن باید با بازدیدهای میدانی سنجیده شود.

در دگرسانی فیلیک نوارهای ۵ و ۷ نوار بازتاب و نوار ۶ نوار جذب شناسایی شدند. بنابراین با توجه به جدول ۱، بهترین مولفه برای شناسایی این دگرسانی مولفه پنجم بوده که با مستطیل سبز مشخص شده است. از آنجا که در اینجا نوارهای بازتاب دارای علامت منفی هستند، پیکسل‌های تیره مناطق احتمالی حضور دگرسانی فیلیک را نشان می‌دهد (شکل ۴ پ).

جدول ۱ ویژگی‌های آماری نوارهای به کار رفته در تحلیل مولفه‌های اصلی استاندارد برای بارزسازی انواع دگرسانی در تصاویر استر در گستره SWIR.

ویژه بردار	نوار ۱	نوار ۲	نوار ۳	نوار ۴	نوار ۵	نوار ۶
نوار ۱	۰.۴۲۳۷۳۱	۰.۴۰۶۰۳۳	۰.۴۱۰۵۱۳	۰.۴۱۳۵۱۵	۰.۱۱۱۰۵۱	۰.۳۸۰۳۰۷
نوار ۲	۰.۸۴۴۰۵۲	-۰.۰۷۹۷۷۳	۰.۰۷۲۶۸۴	-۰.۱۹۷۱۳۵	-۰.۳۶۹۲۱۵	-۰.۳۱۷۳۹۴
نوار ۳	-۰.۰۳۷۶۲۸	۰.۰۵۵۹۳۸	-۰.۰۵۷۶۷۰	۰.۴۲۷۳۱۹	۰.۳۶۸۱۳۳	-۰.۸۲۰۹۷۸
نوار ۴	۰.۳۰۹۹۱۸	-۰.۵۴۳۲۱۹	-۰.۴۹۸۴۶۸	۰.۱۸۴۰۴۸	۰.۳۸۶۳۸۲	۰.۲۵۹۸۷۷
نوار ۵	-۰.۰۰۴۳۴۲	-۰.۳۷۴۷۰۲	۰.۴۷۷۷۲۹	-۰.۵۶۱۰۸۶	۰.۵۵۳۱۲۴	-۰.۱۰۲۹۱۰
نوار ۶	۰.۱۰۲۶۴۶	۰.۶۲۴۶۲۵	-۰.۴۸۶۲۹۳	۰.۵۰۸۷۷۳	۰.۳۱۸۵۶۱	-۰.۰۴۹۹۵۴



شکل ۴ الف- مولفه‌های اصلی استاندارد سنجنده استر، الف تصویر مولفه چهارم دگرسانی آرژلیک با پیکسل‌های روشن نمایان شده است. ب- تصویر مولفه سوم دگرسانی پروپلیتیک با پیکسل‌های تیره نمایان شده است. پ- تصویر مولفه پنجم دگرسانی فلیک با پیکسل‌های تیره نمایان شده‌اند.

تحلیل مولفه‌های انتخابی

کروستا و مور (۱۹۸۹) برای نخستین بار روش مولفه اصلی جهت یافته موضوعی یا (FPCS) را پیشنهاد دادند. امروزه این روش به نام روش کروستا شناخته می‌شود. استفاده از روش تحلیل مولفه‌های اصلی با روش کروستا در این پژوهش نشان داد که این روش برای استخراج نواحی دگرسان شده و واحدهای سنگی مفید است و همخوانی بسیار خوبی با تصاویر نسبتی و ترکیب رنگی در جداسازی دگرسانی‌ها دارد. به این ترتیب، فقط نوارهای دارای جذب و بازتاب برای پدیده مورد بررسی انتخاب می‌شوند، از این رو، برای بارزسازی دگرسانی پروپلیتیک نوارهای ۷، ۸، ۹ در گستره SWIR سنجنده استر انتخاب شدند. در منطقه مورد بررسی می‌توان فقط نوار ۹ را به عنوان بازتاب در نظر گرفت و به این ترتیب، مولفه دوم که با مستطیل آبی مشخص است، برای نمایش دگرسانی پروپلیتیک مناسب تر است (جدول ۲). از آنجا که در این مولفه ضریب PC مثبت است دگرسانی‌های پروپلیتیک با پیکسل‌های روشن نشان داده می‌شوند.

برای بارزسازی دگرسانی فیلیک، نوارهای ۵، ۶ و ۷ تحلیل

شدند. این دگرسانی در گستره SWIR، در نوارهای ۵ و ۷ بازتاب و در نوار ۶ جذب نشان می‌دهد. چنان که در جدول ۳ دیده می‌شود، مولفه‌های دوم و سوم برای نمایش دگرسانی فیلیک شرایط مشابهی دارند، ولی از آنجا که PC آخر اغلب دارای نوفه بیشتری است، از مولفه دوم برای نمایش دگرسانی فیلیک استفاده می‌شود و چون نوار بازتاب در این مولفه دارای ضریب مثبت است مناطق دگرسانی فیلیک با پیکسل‌های روشن در تصویر نمایش داده می‌شوند. در صورت استفاده از مولفه سوم، با توجه به علامت منفی نوار بازتاب، مناطق تیره رنگ نشان دهنده دگرسانی بودند.

برای بارزسازی دگرسانی آرژیلیک نوارهای ۴ و ۵ که به ترتیب نوارهای بازتاب و جذب هستند مناسب تشخیص داده شدند. همچنین، نوار ۷ به دلیل بازتاب ثانویه‌ای که در این نوع دگرسانی نشان می‌دهد کاربردی است. بنابراین براساس جدول ۴، مولفه دوم (مستطیل قرمز رنگ) دارای بیشترین اختلاف بین نوارها بوده و برای نمایش دگرسانی آرژیلیک مناسب تر است و از آنجا که ضریب نوار بازتاب مثبت است، پیکسل‌های روشن در این تصویر نمایانگر دگرسانی آرژیلیک هستند.

جدول ۲ ویژگی‌های آماری نوارهای ۷، ۸ و ۹ در تحلیل مولفه‌های اصلی انتخابی (روش کروستا) برای بارزسازی دگرسانی پروپلیتیک در تصاویر استر در گستره SWIR.

ویژه بردار	نوار ۲	نوار ۳	نوار ۴
نوار ۲	-۰.۵۷۱۸۳۴	-۰.۵۷۷۶۲۱	-۰.۵۸۲۵۴۶
نوار ۳	-۰.۱۲۸۶۲۷	-۰.۶۳۸۱۹۱	-۰.۷۵۹۰۵۷
نوار ۴	-۰.۸۱۰۲۲۳	۰.۵۰۸۹۸۵	۰.۲۹۰۶۴۱

جدول ۳ ویژگی‌های آماری نوارهای ۵، ۶ و ۷ در تحلیل مولفه‌های اصلی انتخابی (روش کروستا) برای بارزسازی دگرسانی فیلیک در تصاویر استر در گستره SWIR.

ویژه بردار	نوار ۲	نوار ۳	نوار ۴
نوار ۲	-۰.۵۷۱۸۳۴	-۰.۵۷۷۶۲۱	-۰.۵۸۲۵۴۶
نوار ۳	-۰.۱۲۸۶۲۷	-۰.۶۳۸۱۹۱	-۰.۷۵۹۰۵۷
نوار ۴	-۰.۸۱۰۲۲۳	۰.۵۰۸۹۸۵	۰.۲۹۰۶۴۱

جدول ۴ ویژگی‌های آماری نوارهای ۴ و ۵ و ۷ در تحلیل مولفه‌های اصلی انتخابی برای بارزسازی دگرسانی آرژیلیک در تصاویر استر در گستره SWIR.

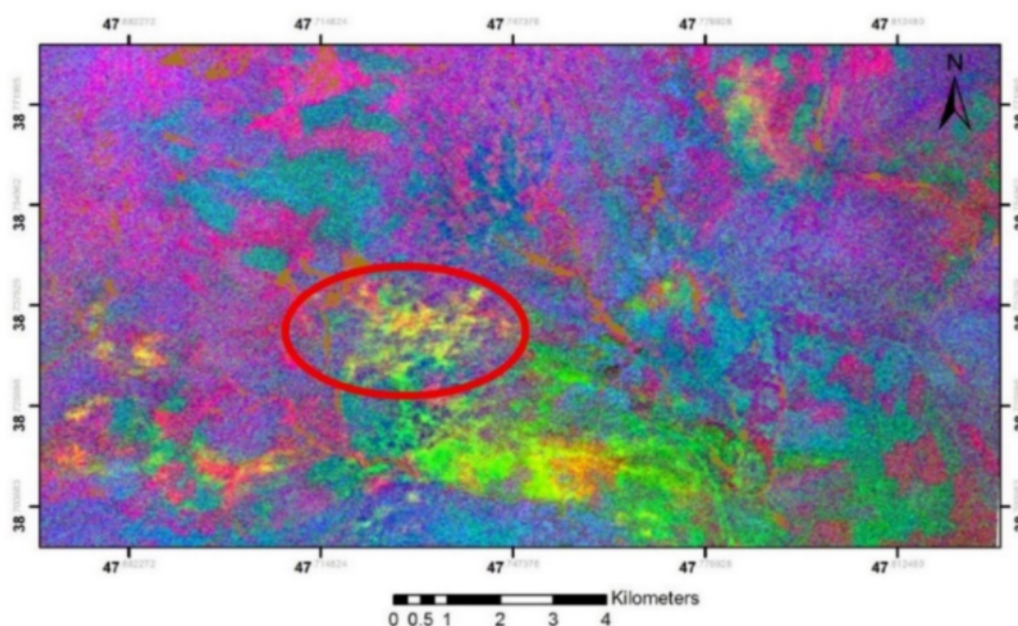
ویژه بردار	نوار ۲	نوار ۳	نوار ۴
نوار ۲	۰.۵۹۳۴۴۹	۰.۵۶۳۹۶۶	۰.۵۷۴۲۴۸
نوار ۳	۰.۸۰۰۰۹۰	-۰.۳۳۵۷۰۶	-۰.۴۹۷۱۴۹
نوار ۴	۰.۰۸۷۵۹۷	-۰.۷۵۴۴۸۳	۰.۶۵۰۴۴۸

دگرسان را در تصویر نمایش می‌دهد. در این روش، با تبدیل طیف‌ها به بردار فضایی به ابعاد تعداد نوارها زاویه بین دو بردار محاسبه می‌شود و تنها عامل مهم در محاسبه راستای بردارهاست. هرچه زاویه کوچکتر باشد (بین صفر و یک) شناسایی دقیق‌تر و مطمئن‌تر می‌شود. خروجی این روش یک تصویر رده‌بندی شده و یک تصویر قاعده‌ای هستند. در تصویرهای قاعده‌ای، تیره‌ترین پیکسل‌ها نشان دهنده‌ی کوچکترین زاویه طیفی هستند که بیشترین شباهت را با طیف مرجع دارند [۱۳]. مزیت اصلی این روش سریع و آسان بودن آن برای نقشه‌برداری شباهت، طیف تصویر با طیف مرجع است که می‌تواند آثار سایه را از بین ببرد [۱۴]. شکل ۶ نتیجه استفاده از نقشه بردار زاویه طیفی در منطقه قره گل برای استخراج دگرسانی‌ها را نشان می‌دهد؛ مقایسه آن با سایر روش‌هایی که تا اینجا استفاده شد نشان می‌دهد که این روش برای نمایش انواع پهنه‌های دگرسانی دقیق‌ترین و بهترین است. در این شکل، دگرسانی آرژیلیکی با رنگ سبز، فیلیک با پیکسل‌های قرمز و دگرسانی پروپلیتیک با پیکسل‌های مشکی نمایش داده شده است چنان که دیده می‌شود، در منطقه قره گل بیشترین همپوشی از این پیکسل‌ها قابل مشاهده است که می‌تواند نشانگر همراهی آن با دگرسانی‌های اصلی منطقه و در نتیجه کانه‌زایی باشد.

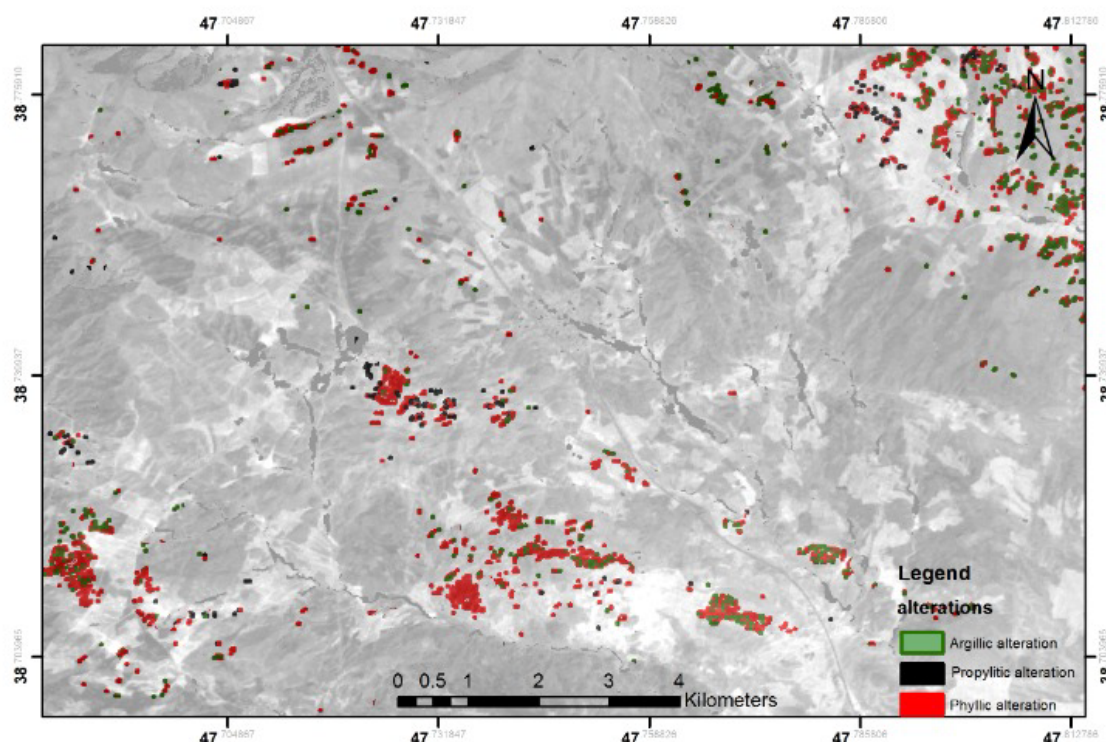
برای تفسیر بهتر نتایج تحلیل مولفه‌های انتخابی، در ادامه از روش ترکیب کاذب رنگی استفاده شد و با استفاده از سه مولفه‌ای که برای بارزسازی دگرسانی‌ها بهترین نتیجه را داده‌اند، ترکیب رنگی کاذب تولید گردید. در این ترکیب رنگی، مولفه مربوط به استخراج دگرسانی آرژیلیک (PC2 تصویر نوارهای ۴۵۷) در جعبه رنگی قرمز، مولفه مربوط به دگرسانی فیلیک (PC2 تصویر نوارهای ۵، ۶ و ۷) در جعبه رنگی سبز و مولفه مربوط به استخراج دگرسانی پروپلیتیک (PC2 تصویر نوارهای ۷، ۸ و ۹) در جعبه رنگی آبی قرار گرفتند. در نتیجه، گستره‌های قرمز، سبز و آبی رنگ به ترتیب نشان دهنده دگرسانی‌های آرژیلیک، و پروپلیتیک هستند. با توجه به ترکیب رنگ‌های اصلی می‌توان گفت که رنگ زرد نشان دهنده حضور همزمان دگرسانی‌های آرژیلیک و فیلیک است که بسیار از ناهنجاری‌های منطقه نیز با این بخش‌ها همپوشی دارند (شکل ۵).

نقشه بردار زاویه طیفی

روش نقشه‌برداری زاویه طیفی از روش‌های رده‌بندی نظارت شده محسوب می‌شود که با استفاده از بانک اطلاعات طیفی نرم افزار میزان تشابه طیف پیکسل مرجع و طیف بازتاب یافته از کانی‌های دگرسان شده را سنجیده و با محاسبه‌ی کمترین اختلاف زاویه طیفی پیکسل‌ها، موقعیت کانی‌های پهنه‌های



شکل ۵ ترکیب رنگی کاذب از PC2(4,5), PC2(5,6,7), PC2(7,8,9) به ترتیب در RGB، مناطق زرد رنگ نشان دهنده حضور همزمان دگرسانی‌های آرژیلیک و فیلیک است.



شکل ۶ استخراج انواع دگرسانی‌های منطقه با استفاده از نقشه‌بردار زاویه طیفی.

آشکارسازی خطواره‌ها

برای آشکارسازی خطواره‌ها، تصویر PC2 به دست آمده از تحلیل مولفه‌های اصلی اعمال شده بر نوارهای سنجده استر با الگوریتم استخراج خودکار خطواره‌ها در محیط نرم‌افزار PCI Geomatica 2018 پردازش شد. این روش خطواره‌ها را از طریق سه مرحله آشکارسازی لبه، آستانه‌گذاری و استخراج منحنی بارزسازی می‌کند، سپس خطواره‌های استخراج شده در محیط نرم‌افزار ArcMap 10.6.1 پردازش شدند که شامل تقسیم خطوط مرکب به خط‌های ساده، ویرایش خطواره‌های مربوط و خروجی گرفتن از خطواره به صورت یک پوشه شکل است. پس از بارزسازی خطواره‌ها و کنترل آن با نقشه زمین-شناسی و بازدیدهای میدانی، نقشه خطواره‌های منطقه مورد بررسی رسم گردید (شکل ۷) که پیرامون ارتباط آن با گسترش پهنه‌های دگرسانی در ادامه بحث می‌شود.

گسل‌های موجود در این بخش از منطقه را می‌توان به سه گروه اصلی تقسیم کرد: (۱) گسل‌های با روند شمال شرق - جنوب غرب که بیشترین پراکندگی را دارند و روند عمومی آن N20E تا N40E است، (۲) گسل‌های راستا لغز با روند شمال غرب - جنوب شرق کم اغلب زاویه سمت ۳۰۰-۳۱۵ و

جابجایی کمتر از ۱۰۰ متر دارند و از نوع راست بر هستند. (۳) گسل‌های معکوس و رانده بخش غربی منطقه با زاویه سمت ۶۰-۷۰ درجه که برخی از آن‌ها روند شرقی - غربی دارند. میزان جابجایی انجام شده در طول این گسل‌ها ناچیز بوده و در طول آن‌ها کانه‌زایی انجام نشده است.

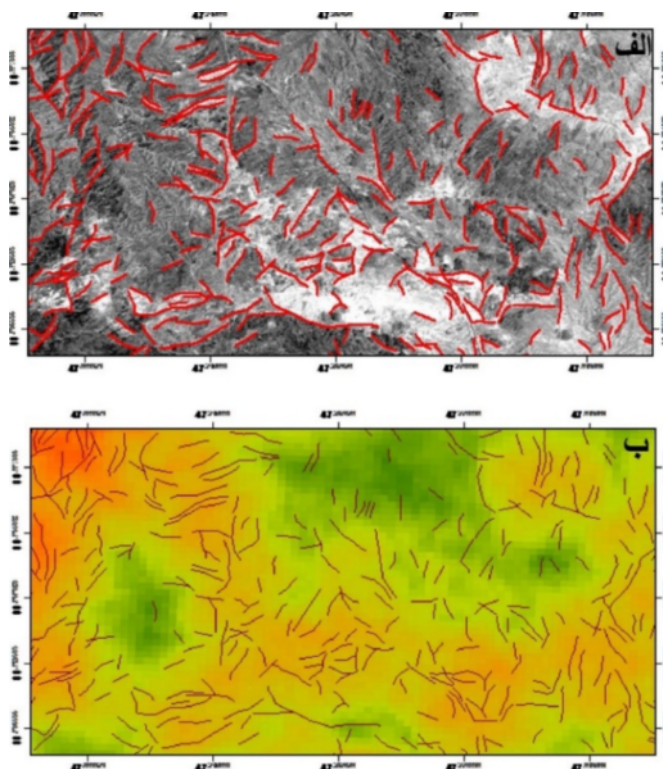
بررسی‌های سنگ نگاری و دگرسانی

در منطقه مورد بررسی، برونزد سنگ‌های آتشفشانی بیش از سنگ‌های آذرین درونی است و همچنین سنگ‌های آذرآواری نیز گسترش به نسبت خوبی دارند. بررسی‌های سنگ‌نگاری نشان می‌دهد که سنگ‌های این واحد را می‌توان به دو بخش سنگ‌های آذرین خروجی و آذرآواری و سنگ‌های آذرین نفوذی و شبه آتشفشانی تفکیک کرد. بر اساس بررسی‌های سنگ‌شناسی، ترکیب اصلی سنگ‌های آذرین خروجی شامل آندزیت و توف‌های آندزیتی پیروکسن و هورنبلندار با بافت پورفیریتیک و خمیره ریزدانه و یا ریزسنگی تا شیشه‌ای است که در بخش شمالی روستای قره گل قرار دارد (شکل‌های ۸ الف و ب). کانی‌های اصلی سنگ شامل درشت بلورهای پلاژیوکلاز (۳۵ تا ۵۰ درصد)، کلینوپیروکسن (۵ تا ۲۰ درصد، بیشتر از نوع کلینوپیروکسن اوژیتی) و آمفیبول (۱ تا ۱۰

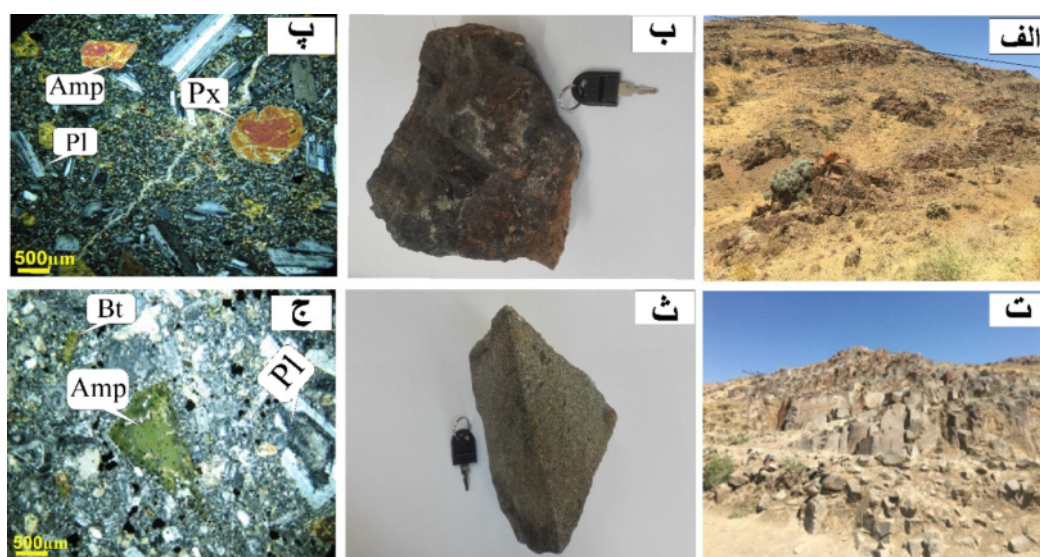
شامل بافت‌های پورفیری ریزدانه‌ای تا خرده دانه‌ای و گلمرو پورفیری است. کانی‌های اصلی تشکیل دهنده این واحد در سنگ‌ها شامل پلاژیوکلاز، پیروکسن و هورنبلند و همچنین بیوتیت است (شکل ۸ ج).

دگرسانی در منطقه گردنه‌ی صلوات در ادامه‌ی دگرسانی‌های محور اهر- مشکین شهر قرار دارد که به طور گسترده در منطقه دیده می‌شود. دگرسانی‌های محور اهر مشکین شهر بیشتر شامل دگرسانی‌های آرژلیک، آرژلیک پیشرفته و سیلیسی هستند. در این محور، اغلب توده‌های نفوذی باعث ایجاد دگرسانی‌هایی در سنگ‌های آتشفشانی پالئوسن و ائوسن شده‌اند. در منطقه قره گل، توده‌های ریزکوارتز دیوریتی در سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری نفوذ کرده و دگرسانی و کانه زایی در مقیاس ضعیف ایجاد شده‌اند. بر اساس بررسی‌های صحرایی و دورسنجی، دگرسانی‌های فیلیک، آرژلیک و پروپلیتیک در بخش مرکزی منطقه شناسایی شدند؛ بررسی‌های سنگ‌نگاری با برداشت نمونه‌های سطحی نیز وجود این دگرسانی‌ها را در سنگ‌های منطقه تایید کرده است. نتایج بررسی مغزه‌های حفاری در منطقه بیانگر دگرسانی پتاسیمی است که در ادامه توضیح داده می‌شود.

درصد هستند. درشت بلورها و خمیره گاهی به مجموعه‌ای از کانی‌های ثانویه سرسیت کلریت، اپیدوت، کربنات، و به مقدار کمتر کانی‌های رسی و کوارتز تجزیه شده‌اند که در ادامه توضیح داده می‌شود. سنگ‌های آذرآواری منطقه اغلب از نوع توف شیشه‌ای بلوری نوع آندزیتی با خمیره ریزدانه و یا ریزسنگی تا شیشه‌ای است. درشت‌بلورهای نیمه خودشکل پلاژیوکلاز و بیوتیت در زمینه‌ای شیشه‌ای قرار دارند و به طور کامل دگرسان شده‌اند که بیشترین حجم نمونه را تشکیل می‌دهند (شکل ۸ پ). مهم‌ترین توده شبه آتشفشانی در منطقه قره گل یک توده ریزکوارتز دیوریت تا گابرو دیوریت بزرگ (شکل- ۸ ت و ث) با ساخت منشوری است که به ندرت توسط دایک‌های جوان‌تر بریده شده است. این توده خاکستری مایل به سبز در دو بخش شرقی و غربی روستای قره گل برونزد گسترده‌تری دارد. در مرز بین این دو بخش نیز، برونزدهای کوچکی از توده دیده می‌شود. از این رو به نظر می‌رسد که توده در زیر واحدهای آذرآواری و آتشفشانی ائوسن حضور دارد. براساس بازدیدهای صحرایی، بافت آن پورفیری تا ریزدانه‌ای بوده و دارای درشت بلورهای آمفیبول به اندازه چند میلی متر است که اغلب کمی جهت یافتگی نشان می‌دهند. سنگ بیشتر



شکل ۷ الف- نقشه خطواره‌های استخراج شده از تحلیل مولفه‌های اصلی سنجنده استر ب- نقشه تراکم خطواره‌ها.

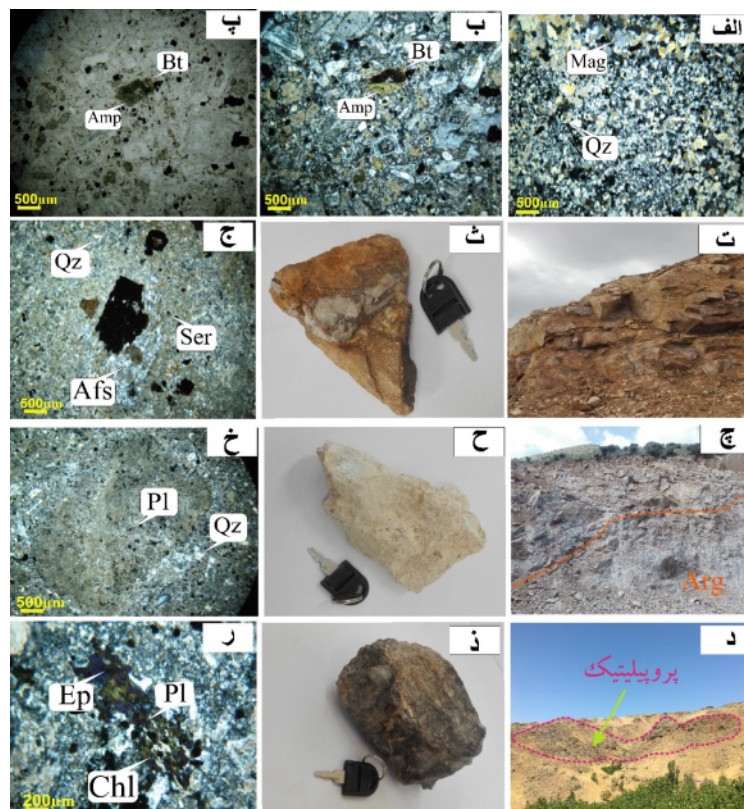


شکل ۸ الف- تصویر صحرایی از واحد آندزیتی در نزدیکی روستای قره گل، ب- نمونه دستی آندزیت دیده شده در منطقه مورد بررسی (پ- آندزیت با بافت پورفیری، درشت بلور های پلاژیوکلاز، پیروکسن آمفیبول در زمینه ای از ریزسنگ های پلاژیوکلاز به همراه دگرسانی کربناتی و اپیدوتی و آغستگی اکسیدهای آهن (در نور قطبیده متقاطع، XPL، و قطبیده صفحه ای، ppl) ت- تصویر صحرایی از ریزکوارتز دیوریت ها در منطقه مورد بررسی. ث- نمونه دستی ریزکوارتز دیوریت دیده شده در منطقه مورد بررسی. ج تصویر میکروسکوپی با نور عبوری از درشت بلور های پلاژیوکلاز منطقه بندی دار که در مرکز رسی شده و درشت بلور های آمفیبول سبز در لبه به بیوتیت تبدیل شده اند (در نور ppl و xpl)

دگرسانی آرژیلیک اغلب به صورت بخش هایی به رنگ کرم تا زرد در منطقه ی مورد بررسی دیده می شود (شکل های ۹ چ و ح). دگرسانی آرژیلیک با حضور کانی های رسی چون کائولینیت، سریسیت، ایلیت، مونتموریونیت، کلریت، کلسیت و اسکمیت مشخص می شود. بین دگرسانی آرژیلیک پیشرفته با انواع متوسط و ضعیف آن مرز بسیار مشخص و آشکاری وجود ندارد، اما در بررسی های سنگ نگاری جدایش به این صورت است که زمانی که همه ساختار پلاژیوکلازها یا فلدسپارهای پتاسیم به کانی رسی تبدیل شده و شکل اولیه و ماکل نامشخص باشد، آن دگرسانی را به عنوان دگرسانی پیشرفته در نظر می گیرند. این در حالی است که اگر بخشی از پلاژیوکلازها و فلدسپارهای پتاسیم به کانی رسی تبدیل شده اما همچنان شکل اولیه و آثار ماکل در کانی ها مشخص باشد آن دگرسانی را به عنوان دگرسانی آرژیلیکی متوسط می شناسند (شکل ۹ خ). دگرسانی پروپیلیتیک در منطقه ی مورد بررسی با رخنمون ضعیف دیده می شود. در این دگرسانی کانی های Mg , Ca به صورت جانیشینی در پلاژیوکلازها (اپیدوت، کلریت و کلسیت) و هورنبلند- بیوتیت (کلریت، اپیدوت و مونتموریونیت) تشکیل می شوند. بررسی میکروسکوپی مقاطع نشان می دهد که در برخی نمونه ها، پلاژیوکلاز به طور کامل به اپیدوت، کلریت تبدیل شده و فقط قالبی از آن باقی مانده است.

دگرسانی پتاسیمی به دلیل رخنمون نداشتن در سطح در تصاویر ماهواره ای شناسایی نشد، ولی بررسی مغزه های حفاری نشانگر رخداد آن است که اغلب در مرکز کانسار مس پورفیری تشکیل می شود. در این دگرسانی ها، پتاسیم در سنگ جانشین شده و سدیم و کلسیم خارج می شود. کانی های شاخص این دگرسانی شامل ارتوز، بیوتیت و کوارتز و کانه ها مگنتیت، کالکوپیریت پیریت و بورنیت هستند [۱۵]. در برخی از مقاطع، رگچه های کوارتز در کنار کانه کدر مگنتیت دیده می شوند (شکل ۹ الف). کانی بیوتیت ثانویه در نتیجه دگرسانی کانی آمفیبول به وجود آمده است (شکل های ۹ ب و پ).

دگرسانی سریسیتی از رایج ترین انواع دگرسانی هاست. نام دیگر این پهنه فیلیک است. این پهنه در برخی از ذخایر به دگرسانی کوارتز، سرسیت و پیریت (QSP) نیز معروف است. کانی های مهم این پهنه عبارتند از سرسیت، کوارتز، پیریت، دیکیت، کمی کائولن و آندالوزیت. پهنه فیلیک در بخش بالایی سامانه پورفیری به صورت هم پوشی روی مجموعه پتاسیمی و گاهی آرژیلیک حد واسط تشکیل می شود و می تواند دارای کانسنگ مس- طلا باشد [۱۶]. دگرسانی سریسیتی در منطقه ی مورد بررسی در حد ضعیف تا متوسط دیده می شود (شکل های ۹ ت، ث) که در نتیجه آن کانی های فلدسپارقلیایی به سریسیت و کوارتز و زمینه سنگ به رس تبدیل شده اند.



شکل ۹ الف- رگچه کوارتز و کانی کدر (به احتمال بسیار مگنتیت، در نور xpl)، ب-ب- تصویر میکروسکوپی با نور عبوری از سنگ ریزکوارتز دیوریت که در آن آمفیبول‌ها در نتیجه دگرسانی پتاسیمی به بیوتیت ثانویه تبدیل شده‌اند (در نور xpl). ت- تصویر صحرایی از واحد دگرسانی سرسیت در منطقه مورد بررسی. ث- نمونه دستی از دگرسانی سرسیتی ج- تصویر میکروسکوپی با نور عبوری از دگرسانی سرسیتی در سنگ تراکیت که در آن فلدسپار قلیایی به سرسیت و کوارتز و زمینه سنگ به رس تبدیل شده‌اند (در نور xpl). چ- تصویر صحرایی از واحد دگرسانی آرژیلیک ح- نمونه دستی از دگرسانی آرژیلیک خ- تصویر میکروسکوپی با نور عبوری از کانی پلاژیوکلاز که تقریباً به‌طور کامل به کانی‌های رسی و کوارتز تبدیل شده و فقط قالبی از آن باقی‌مانده است (در نور xpl). د- تصویر صحرایی از واحد دگرسانی پروپیلیتیک ذ- نمونه دستی از دگرسانی پروپیلیتیک ر- تبدیل‌شدگی پلاژیوکلاز به اپیدوت و کلریت در همراهی دگرسانی کربناتی و سیلیسی و کانی‌های کدر سنگ (در نور xpl).

برداشت

براساس نتایج این پژوهش، دگرسانی در منطقه گردنه‌ی صلوات در ادامه‌ی دگرسانی‌های محور اهر- مشکین‌شهر قرار دارد که به‌طور گسترده در منطقه دیده می‌شود. دگرسانی‌های دیده شده در منطقه‌ی مورد بررسی شامل دگرسانی‌های پتاسیمی، پروپیلیتیک، سرسیتی، آرژیلیک، سیلیسی، کربناتی و اکسید آهن هستند. در بررسی‌های دورسنجی براساس نوارهای VNIR و SWIR سنجنده استر، از نسبت نواری ۴/۵ سنجنده استر برای آشکارسازی دگرسانی آرژیلیک و از نسبت نواری ۹/۸ برای بارز سازی دگرسانی پروپیلیتیک استفاده شد که نتایج رضایت بخشی به دست آمد. همچنین بارزسازی دگرسانی فیلیک با استفاده از نسبت نواری ۵+۷/۶ نیز برای استخراج این نوع دگرسانی مفید بود. نتایج بررسی‌های سنگ‌نگاری بیانگر فراوانی کانی‌های کوارتز، سرسیت و پیریت در پهنه فیلیک،

کانی‌های رسی در نتیجه تبدیل‌شدگی پلاژیوکلاز در پهنه کائولینیت و اپیدوت و کلریت در پهنه پروپیلیتیک بود که به صورت جانیشینی در کانی‌های پلاژیوکلاز تشکیل شده‌اند. رخداد دگرسانی در منطقه به احتمال بسیار نتیجه‌ی نفوذ توده‌های ریزدیوریتی در سنگ‌های آذرین خروجی و آذرآواری است و همراهی نزدیکی با خطواره‌ها نشان می‌دهد. به این دلیل خطواره‌ها نیز با استفاده از تصویر PC2 تحلیل مولفه‌های اصلی و بازدیدهای صحرایی استخراج شدند که همراهی نزدیکی با پهنه‌های دگرسانی ناشی از ترکیب رنگی نسبتی داشتند. برای اطمینان بیشتر از دگرسانی‌های استخراج شده به روش نام برده، از روش تحلیل مولفه‌های اصلی و نقشه‌بردار زاویه طیفی نیز برای نمایش توزیع فضایی پهنه‌های دگرسانی استفاده شد. بر این اساس با در نظر گرفتن همپوشی مناطق با تراکم خطی

(Fe²⁺) iron oxides distribution using band ratio techniques with ASTER data and geochemistry of Kanjamalai and Godumalai, Tamil Nadu", south India. *remote Sensing Applications* 18 (2020) 100-306.

[7] Khaleghi M., Ranjbar H., Abedini A., Kalagari A.A., "Synergetic use of the sentinel-2, aster, and lantsat-8 data for hydrothermal alteration and iron oxide minerals mapping in a mine scale", *Acta Geodyn. Geomater* 17 (2020) 311-328.

[8] El-Desoky H.M., Soliman N., Heikal M.A., Abdel-Rahman A.M., "Mapping hydrothermal alteration zones using ASTER images in the Arabian-Nubian Shield: A case study of the northwestern Allaqi District", *South Eastern Desert, Egypt. Asian Earth Sciences* 5 (2020).

[9] Azizi H., Jahangiri A., "Cretaceous subduction-related volcanism in the northern Sanandaj-Sirjan Zone", *Iran. J. Geode*, 45(4-5) (2008) 178-190.

[10] Azizi H., Moinevaziri H., "Review of the tectonic setting of Cretaceous to Quaternary volcanism in northwestern Iran", *J. Geodyn*, 47(4) (2009) 167-179.

[11] Sahandi M. R., "Map of structural zones of Iran", Geological Survey and Mineral Exploration Organization (2006).

[12] van der Werff H., van der Meer F. D., "Sentinel-2A MSI and Landsat 8 OLI provide data continuity for geological remote sensing", *Remote Sensing* 8(11) (2016) 883.

[13] Galva L. S., Almeida-Filho R., Vitorello I., "Spectral discrimination of hydrothermally altered Materials", *Using ASTER short-wave infrared bands. Applied Earth Observation and Geoinformation, Elsevier* 7(2) (2005) 107-114.

[14] Bennett S. A., Atkinson W., Kruse W., "Use of Thematic Mapper imagery to identify mineralization in the Santa Teresa district, Sonora, Mexico", *International Geology Review*, 35(11): (1993)1009-1029.

[15] Lowell J.D., Guilbert J.M., "Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits: economic geology and the bulletin of the society", *economic geologists* 65 (4) (1970) 373-408.

[16] Sillitoe R.H., "Gold- rich porphyry deposits: Descriptive and genetic models and their role in exploration and discovery SEG", *Reviews* 13 (2000)315-345.

بالا به همراه دگرسانی‌ها، بیشترین مناطق ممکن برای کانی سازی چند فلزی در بخش مرکزی تصویر بارزسازی و شناسایی شد. نتایج برآمده از پردازش تصاویر در منطقه موردبررسی نشان داد که نقشه‌بردار زاویه طیفی در مقایسه با سایر روش‌های به کار رفته در این پژوهش، برای استخراج دگرسانی‌ها نتایج بهتری را ارائه می‌دهد و همخوانی خوبی با نتایج سنگ‌نگاری نشان داده و می‌تواند به عنوان روشی مطمئن به کار رود. بنابراین نتایج این پژوهش شاهی بر سودمندی به کارگیری روش نسبت نواری، تحلیل مولفه‌های اصلی و نقشه بردار زاویه طیفی برای نقشه برداری دگرسانی‌های همراه با کانه‌زایی چند فلزی است که موجب انجام کارهای صحرایی و تجزیه‌های زمین‌شیمیایی کمتر و در نتیجه مقرون به صرفه شدن پی‌جویی می‌گردد.

قدردانی

نگارندگان از همکاری دانشگاه محقق اردبیلی و سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران (ایمیدرو) سپاسگزارند.

مراجع

[1] Rowan L. C., Schmidt R., Mars J. C., "Distribution of Hydrothermally Altered rocks in the Reko Diq", *Pakistan Mineralized Area Based on Spectral Analysis of ASTER Data. Remote Sensing of Environment*, 104(1) (2006) 74-87.

[2] Tangestani M. H., Moore F., "porphyry copper alteration mapping in Meiduk area", *Kerman, Iran. International journal of remote Sensing* 23(22) (2002) 4815-4825.

[3] Srivastav S.K., A.Bhattacharya M.V., Kamaraju V., Sreenivasa G., Reddy List F.K., Burger H., "Remote sensing and GIS for locating favourable zones of lead-zinc-copper mineralization in RajpuraDariba area", *Rajasthan, India. International Journal of Remote Sensing*, 21(17) (2000) 3253-3267.

[4] Sengupta A., Adhikari M.D., Maiti S., Maiti S.K., Mahanta P., Bhaumick S., "Identification and mapping of high-potential iron ore alteration zone across Joda", *Odisha using ASTER and EO-1 hyperion data. Spatial science* 64 (2018) 491-514.

[5] Mazhari N., Malekzadeh Shafaroudi A., Ghaderi M., "Detecting and mapping different types of iron mineralization in Sangan mining region, NE Iran, using satellite image and airborne geophysical data. *Geosciences* 21 (2017) 137-148.

[6] Gopinathan P., Parthiban S., Magendran T., Ayad M., Fadhil Al-Quraishi D., Ashok K., Pradeep K., "Mapping of ferric (Fe³⁺) and ferrous