

آشکارسازی آنومالی‌های عناصر فلزی ناحیه بالوقیه به روش دورسنجی و مقایسه نتایج با داده‌های ژئوشیمی

توحید نوری^۱، بابک بیگلری^۲، احمد آریافر^۳

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند

۳- دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند

(دریافت ۱۳۹۹/۲/۲۵، پذیرش ۱۳۹۹/۰۷/۲۰)

چکیده

کانسارهای فلزی جایگاه ویژه‌ای در میان منابع معدنی دارند و برای شناسایی آنها مطالعات فراوانی انجام شده که اغلب با تلفیق نتایج حاصل از روش‌های مختلف اقدام به شناسایی هر چه بهتر این کانسارها شده است. در این بین می‌توان به مطالعات دورسنجی و ژئوشیمیایی اشاره کرد که نقش عمده‌ای در به نقشه درآوردن آلتراسیون‌های سطحی مرتبط با کانسارهای فلزی داشته‌اند. محدوده شمال غرب ایران با داشتن معادن فلزی فعال و تعداد زیادی از ذخایر بالقوه جزو مناطق مستعد از نظر ذخیره‌های فلزی است. یکی از مناطق مورد توجه برای مطالعات اکتشافی در شمال غرب ایران، منطقه بالوقیه است که منطقه مورد مطالعه در این تحقیق است. در این مطالعه ابتدا اجزای خالص یا اعضای انتهایی با استفاده از روش شاخص خلوص پیکسل استخراج شده و با طیف‌های استاندارد USGS مقایسه شدند. بعد از تخمین فراوانی اعضای انتهایی با استفاده از روش فیلترینگ تطبیق یافته، نقشه کلاس‌بندی یا پراکندگی کانی‌ها با اجرای تکنیکی جدید به نام ترشولد شناور بر روی نقشه‌های فراوانی اعضای انتهایی تعیین گردید. با این روش که از اطلاعات کانی‌شناسی منطقه نیز در کلاس‌بندی استفاده می‌کند، فقط مناطق با اهمیت بالا کلاس‌بندی می‌شوند. نتایج بررسی داده‌های استر آلتراسیون‌های آرژلیک و آرژلیک پیشرفته را در بخش میانی متمایل به غرب منطقه نمایان ساخته است. در ادامه با انجام آنالیز مولفه اصلی مقاوم بر روی داده‌های ژئوشیمیایی منطقه ارتباط عناصر طلا با آرسنیک و آنتیموان در محل آلتراسیون‌های منطقه مشخص گردید. در نهایت با ترکیب نتایج دو رویکرد دورسنجی و تحلیل ژئوشیمیایی به روش آنالیز مولفه اصلی مقاوم می‌توان گفت که کانی‌سازی اپی‌ترمال طلا از محتمل‌ترین موارد در منطقه است و می‌توان نتیجه گرفت که نوع سولفید بالای کانی‌سازی اپی‌ترمال در منطقه اتفاق افتاده است. در پایان محدوده اطراف دو گسل متقاطع در غرب منطقه برای مطالعات تفصیلی پیشنهاد گردید.

کلمات کلیدی

دورسنجی، ژئوشیمی، ترشولد شناور، آنالیز مولفه اصلی مقاوم، آلتراسیون هیدروترمال.

۱- مقدمه

اهمیت اکتشاف منابع طبیعی در کشورهای در حال توسعه بر کسی پوشیده نیست. ایران با قرار گرفتن در کمربند متالوژنی آلپ هیمالیا شرایط مناسبی برای تشکیل مواد معدنی دارد که اهمیت مطالعات معدنی در این منطقه را افزایش می‌دهد. در ایران با توجه به اکتشاف کانسارهایی در سطح جهانی مانند مس، سرب و روی و آهن پتانسیل خوبی در زمینه کانسارهای فلزی وجود دارد. از نظر معادن طلا نیز، ایران دارای ۱۲ معدن فعال است که تعداد ۴ معدن آن در منطقه شمال غرب ایران قرار دارد. منطقه شمال غرب ایران از نظر تکتونیکی در محل برخورد دو صفحه عربستان و قفقاز قرار دارد. مطالعات متعددی در این منطقه در زمینه اکتشاف طلا توسط وزارت صنعت، معدن و تجارت ایران انجام گرفته و بالوقیه یکی از این مناطق مورد توجه بوده است، بنابراین با در دست داشتن اطلاعات بررسی‌های پیشین نیاز به مطالعه‌ای جامع‌تر در این منطقه احساس می‌شود. مطالعات دورسنجی^۱ و ژئوشیمی زیادی در منطقه توسط محققان مختلف تاکنون انجام شده است [۳-۱]. همچنین مطالعات زمین گرمایی در شرق منطقه بالوقیه در سایت زمین گرمایی مشگین‌شهر انجام شده است [۶-۴].

کاربرد تکنیک دورسنجی در اکتشاف منابع معدنی به دلیل هزینه پایین و سرعت بالا، بسیار گسترش پیدا کرده و استفاده از روش‌های کارآمد در این زمینه در رسیدن به هدف اکتشافی بسیار مفید است. مطالعات کانی‌شناسی سطحی و رخنمون‌های سیستم‌های آلتراسیونی مختلف با استفاده از این تکنیک به راحتی امکان‌پذیر است. سنگ‌ها در نتیجه مجاورت با سیالات هیدروترمال از نظر شیمیایی و کانی‌شناسی دگرگون شده و کانی‌های جدید تشکیل می‌دهند که بسته به نوع کانی‌های تشکیل شده سیستم‌های آلتراسیونی متنوعی را می‌توان انتظار داشت. شناسایی آلتراسیون‌ها همواره در مطالعات مربوط به اکتشاف ذخایر معدنی اهمیت زیادی دارد. در صورتی که یک سیستم آلتراسیونی در سطح زمین رخنمون پیدا کند می‌توان با استفاده از تکنولوژی دورسنجی، هاله‌های آلتراسیونی را به نقشه درآورد. به دلیل ساختارهای طیفی منحصر به فردی که بیشتر کانی‌های شاخص سیستم‌های آلتراسیونی مانند کانی‌های رسی، کانی‌های آهن‌دار، گروه آلونیت‌ها و نظایر آن از خود نشان می‌دهند، شناسایی آنها و تمایز بین آنها به وسیله تکنیک دورسنجی میسر می‌شود [۷]. هر نوع ذخیره معدنی تشکیل یافته در زیر سطح زمین به وسیله مجموعه^۲

خاصی از کانی‌های آلتراسیونی احاطه می‌شود که شناسایی آنها ممکن است اکتشاف ذخیره را تسهیل کند. برای اکتشاف ذخایر طلا نیز می‌توان شناسایی هاله‌های آلتراسیونی مرتبط با این نوع ذخیره فلزی را مورد هدف قرار داد که در این خصوص تکنولوژی دورسنجی نقش غیرقابل انکاری داشته است. محققان زیادی از داده‌های چند طیفی برای مطالعه آلتراسیون‌ها و به ویژه آلتراسیون‌های هیدروترمال در سنوات گذشته استفاده کرده‌اند [۸-۱۲]. از میان داده‌های چند طیفی، استر به دلیل دارا بودن تعداد زیادی باند در محدوده SWIR توانایی بالایی برای اهداف کانی‌شناسی دارد. یکی از پرکاربردترین روش‌های استخراج اعضای انتهایی^۳ (که همان اجزای خالص یا طیف‌های خالص مواد و کانی‌های تشکیل‌دهنده منطقه‌اند [۱۳]) از داده‌های مالتی‌اسپکترال، روش شاخص خلوص پیکسل^۴ است و روش‌های دیگر استخراج اجزای خالص بیشتر بر روی داده‌های هایپراسپکترال استفاده شده‌اند [۱۴]. برای استخراج اطلاعات مربوط به الگوی پراکندگی سطحی کانی‌ها، به نقشه درآوردن اجزای خالص انجام می‌شود و همان‌طور که در بسیاری از مطالعات دیده می‌شود [۱۵-۱۸] کلاس‌بندی تصویر بر اساس اجزای خالص ابزاری مناسب برای تعیین ارتباط بین اجزای خالص با یکدیگر و الگوی پراکندگی آنها است. روش‌های مختلفی برای کلاس‌بندی تصاویر ماهواره‌ای استفاده می‌شوند که شبکه‌های عصبی مصنوعی^۵، ماشین بردار پشتیبان^۶، شبکه‌های موازی^۷، برازش‌سازی زاویه طیفی^۸، درست‌نمایی ماکزیمم^۹، کمترین فاصله^{۱۰}، فاصله ماهالانوبیس^{۱۱} و k-میانگین^{۱۲}، از جمله این روش‌ها هستند. در این مطالعه برای کلاس‌بندی تصویر یک رویکرد مبتنی بر اطلاعات کانی‌شناسی سطحی به نام روش ترشولد شناور^{۱۳} ارایه و استفاده شد. در مطالعات مربوط به اکتشاف مواد معدنی هدف اصلی، کاهش سطح محدوده مورد مطالعه است به طوری که تنها مناطق با پتانسیل اکتشافی بالاتر برای مراحل بعدی مطالعات تعیین شوند [۱۹]. در روش ترشولد شناور با اعمال ترشولدهای مختلف برای مقادیر فراوانی کانی‌ها و با دخالت دادن اطلاعات کانی‌شناسی منطقه مورد مطالعه، سطح محدوده کلاس‌بندی شده به تدریج کاهش می‌یابد به طوری که تنها مناطق پراهمیت کلاس‌بندی شوند. این روش در بخش‌های بعدی شرح داده شده است.

نتایج حاصل از دورسنجی باید از نظر ژئوشیمیایی با منطقه تحت بررسی مطابقت داشته باشند. به همین دلیل

است. این بررسی از این نظر اهمیت دارد که تاکنون در این منطقه مطالعه ترکیبی با استفاده از تکنیک‌های دورسنجی و ژئوشیمیایی انجام نگرفته است، بنابراین این مطالعه ابعاد جدیدی از نوع کانی‌سازی در منطقه را آشکار می‌سازد. همچنین با توجه به سابقه معدنکاری در این ناحیه و قرار گرفتن محدوده مورد مطالعه در مجاورت با کالدرای آتشفشان سبلان اهمیت و ضرورت این بررسی بیشتر می‌شود.

۲- منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

بالوقیه در شمال غرب ایران در غرب آتشفشان سبلان و جنوب جاده مشگین‌شهر- اهر واقع شده است. موقعیت منطقه بالوقیه که در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفته است در شکل ۱ قابل مشاهده است.

سبلان یک استراتو ولکانو پلیو- کواترنری است که جزیی از ناحیه آتشفشانی اولیگوسن تا کواترنری بین ایران و ترکیه است [۱]. آتشفشان سبلان در زمان فعالیت‌های گسترشی در دوره ایوسن بالایی و اولیگوسن پیشین تشکیل شده است [۳۹]. ارتفاع قله این آتشفشان از سطح دریا ۴۸۰۰ متر و گدازه‌های آن مساحتی در حدود ۱۲۰۰ کیلومتر مربع را اشغال کرده است. آتشفشان سبلان از نظر شکل و حجم، مشابه با آتشفشان‌های حاشیه قاره‌ها است. مخروط آن به علت عملکرد گسل‌های حلقوی به شدت فروریخته و کالدرای تشکیل داده است. قطر این کالدرای در حدود ۱۲ کیلومتر برآورد شده است و در دهانه غربی این کالدرای نیروگاه زمین گرمایی مشگین‌شهر قرار دارد. منطقه بالوقیه که در نزدیکی

مطالعات دورسنجی در صورتی که با مطالعات صحرایی همراه باشند، ممکن است نقش موثرتری در اکتشاف ذخایر معدنی داشته باشند و اعتبار نتایج حاصل از آنها بالاتر است [۲۰]. یکی از روش‌های ژئوشیمیایی برای شناسایی آنومالی‌های ژئوشیمیایی و تعیین ارتباط میان عناصر ردیاب کانی‌سازی روش آنالیز مولفه اصلی^۴ است [۲۱]. اساس این روش بر ماتریس واریانس و کوواریانس استوار است [۲۲]. در نوع مقاوم این آنالیز با رویکرد ترکیبی بر داده‌ها برخورد و از ابزارهای مقاوم در برابر مقادیر خارج از ردیف استفاده می‌شود. داده‌های ترکیبی شامل داده‌های با اطلاعات نسبی است. این گونه داده‌ها، قسمتی از کل هستند. در بیشتر حالت‌ها، این داده‌ها را داده‌های بسته می‌نامند زیرا حاصل جمع ثابت دارند. یک مثال کلاسیک برای آرایه بسته یا یک سیستم عددی بسته، مجموعه‌ای از داده‌ها است که متغیرهای آن مستقل از یکدیگر نیستند و به صورت درصد یا قسمت در میلیون بیان می‌شوند [۲۳]. آنالیزهای ژئوشیمیایی، از جمله مثال‌های بارز داده‌های ترکیبی‌اند. تجزیه و تحلیل آماری داده‌های ترکیبی در سالیان اخیر توسط دانشمندان بسیاری بررسی شده است [۲۴-۳۸]. در این مطالعه قصد داریم نتایج حاصل از ترکیب دو رویکرد دورسنجی (کلاس‌بندی به روش ترشولد شناور) و ژئوشیمی (استفاده از آنالیز مولفه اصلی مقاوم^۵ بر روی نتایج حاصل از آنالیز ژئوشیمیایی (ICP) را ارزیابی کرده و نتایج حاصل از دو روش را با هم ارتباط دهیم. هدف از این تحقیق در حقیقت بررسی سیستماتیک منطقه از نظر احتمال کانی‌سازی و شناسایی مناطق مستعد این کانی‌سازی



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه در نقشه ایران

اشاره کرد. در این میان کنسارهای مزرعه شادی و سفیخانلو از نوع اپی ترمال اند. محدوده بالوقیه مساحتی در حدود ۴۰ کیلومتر مربع را پوشش می‌دهد و در فاصله ۲۰ کیلومتری از لبه کالدرای آتشفشان سبلان و سایت زمین گرمایی این منطقه قرار دارد.

واحدهای سنگی موجود در محدوده اکتشافی متعلق به دوران سوم زمین‌شناسی (سنوزوئیک) و مربوط به دوره‌های ائوسن و جوان‌تر است که شامل واحد آندزیت پورفیری آنالیسم‌دار، متاولکانیک، واحد آندزیت تا تراکی آندزیت مگاپورفیر، واحد آندزیت‌بازالت، آندزیت پیروکسن‌دار، واحد کنگلومرا و مارن (که عمدتاً دشت‌های شمالی محدوده را پوشش داده است) است. همچنین در چند نقطه آثار فعالیت‌های آذرین نفوذی به صورت توده‌های نفوذی بزرگ در حد باتولیت و همچنین انواع مختلف دایک‌ها رخنمون یافته است که مشخصات آنها شامل واحد کوارتز دیوریت-کوارتز مونزونیت تا گرانودیوریت، دایک‌های دیابازی، دایک‌های پگماتیتی، دایک‌های داسیت پورفیری است. نقشه زمین‌شناسی منطقه در شکل ۳ قابل مشاهده است.

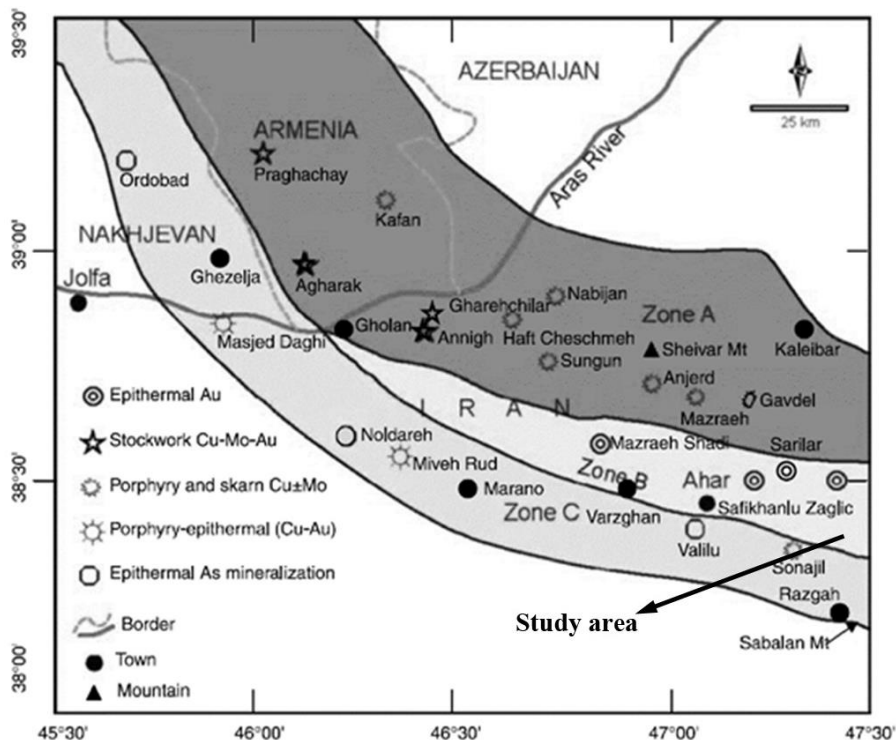
داده‌های دورسنجی مورد استفاده در این مطالعه داده‌های

آتشفشان سبلان واقع شده است، در کمربند آتشفشانی اهر-ارسباران قرار دارد که بخشی از کمربند ماگمایی البرز-آذربایجان است. کمربند آتشفشانی اهر-ارسباران با گسترش WNW-ESE و عرض ۵۰ تا ۱۰۰ کیلومتر از شمال غربی ایران و آذربایجان تا ارمنستان و کمربند پونتید شرقی^{۱۶} در شمال شرق ترکیه امتداد داشته است [۴۰]. منطقه اهر-ارسباران بر اساس توزیع کنسارها به سه بخش تقسیم می‌شود (شکل ۲):

منطقه A از شمال شهر اهر تا جنوب شرقی ارمنستان که نوع کانی‌سازی $Cu \pm Mo \pm Au$ پورفیری و اسکارن و استوک ورک Cu-Mo-Au دارد.

منطقه B از شرق مشگین شهر تا رود ارس در غرب که بر خلاف منطقه A چند رخنمون از کنسارهای نوع طلای اپی ترمال دارد.

منطقه C از آتشفشان سبلان در جنوب شرقی تا منطقه جلفا در شمال غربی که شامل چند محدوده مس و طلا است [۴۰]. از کنسارهای موجود در مجاورت منطقه مورد مطالعه که در امتداد زون اهر-ارسباران قرار دارند می‌توان به کنسارهای طلای مزرعه شادی، سفیخانلو، ساری لار و زگلیک



شکل ۲: توزیع انواع کنسارهای کمربند آتشفشانی اهر-ارسباران [۴۰]

۳- روش مطالعه

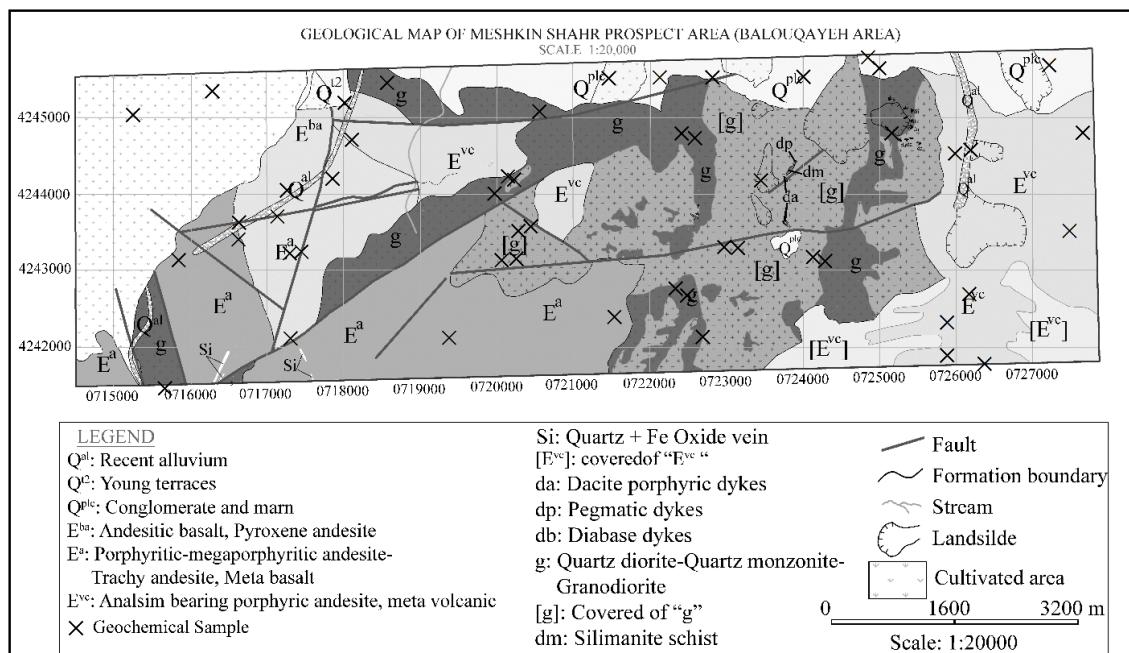
۳-۱- دورسنجی

شدت انتشار و بازتابش طیفی سنگ‌ها و کانی‌ها در طیف‌های مختلف در نتیجه تفاوت فیزیکی و شیمیایی آنها است. به عنوان مثال کانی رس در طول موج بالای ۱.۶ میکرومتر یک کاهش در بازتاب را نشان می‌دهد، بنابراین با تصویربرداری در محدوده طیفی بالای ۱.۶ و محدوده بین ۲.۱ تا ۲.۴ میکرومتر مناطق رسی مرتبط با آلتراسیون‌های هیدروترمال قابل شناسایی‌اند [۴۲]. داده‌های ASTER که دارای ۱۴ باند در محدوده‌های طیفی مختلف است، ۹ باند در محدوده‌های طیفی VNIR و SWIR دارد که در نتیجه، برای مطالعات کانی‌شناسی سطحی قابل استفاده است. سنجنده ASTER به دلیل دارا بودن ۵ باند در محدوده طول موجی TIR قابلیت تشخیص کانی‌های کربنات را نیز دارد [۴۳].

در مرحله اول از فرآیند اکتشاف کانی‌سازی‌ها و ذخایر قابل توجه فلزی در هر منطقه، بررسی آلتراسیون‌های منطقه با استفاده از تکنیک دورسنجی بسیار کمک کننده است [۷]. بنابراین با استفاده از بررسی‌های دورسنجی برای به نقشه درآوردن آلتراسیون‌ها اقدام شد. پس از تهیه داده‌های ASTER برای منطقه و انجام پیش پردازش‌های مورد نیاز بر روی داده‌ها

ASTER بدون ابر است که برای انجام مطالعه پیش رو و تشخیص زون‌های پتانسیل‌دار منطقه استفاده شد. یک سین ۱۷ از نوع L1B با فرمت HDF که تصحیحات رادیومتریک و هندسی بر روی آنها انجام شده [۴۱] و در ساعت ۱۰:۱۷:۲۹ به وقت گرینویچ در تاریخ ۲۰۰۲/۰۸/۱۴ اخذ شده و زمین مرجع نیز بود، تهیه شد. این داده‌ها دارای ۱۴ باند (۳ باند در محدوده طیفی VNIR، ۶ باند در محدوده SWIR و ۵ باند در محدوده TIR) است که در این تحقیق ۹ باند مربوط به محدوده‌های طیفی VNIR و SWIR با هم ادغام^{۱۸} و رزولوشن مکانی آنها ۱۵ متر در نظر گرفته شده است.

نمونه‌برداری ژئوشیمیایی در این منطقه شامل ۵۱ نمونه ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای است که در شکل ۳ به همراه نقشه زمین‌شناسی منطقه قابل مشاهده است. همچنین تعداد ۱۳ نمونه XRD از منطقه تهیه شده است. روش آنالیز نمونه‌های ژئوشیمیایی بر اساس انحلال در ۴ اسید و به وسیله دستگاه ICP-MS بوده و طلا نیز به روش Fire Assay آنالیز شده است. نمونه‌ها در آزمایشگاه Amdel استرالیا آنالیز شده‌اند. آنالیزهای XRD منطقه حاکی از وجود کانی‌هایی از جمله کائولینیت، آلونیت، ایلیت و اسمکتیت در منطقه است. همچنین این بررسی‌ها بر وجود آلتراسیون‌های آرژلیک و آرژلیک پیشرفته در منطقه اشاره دارد.

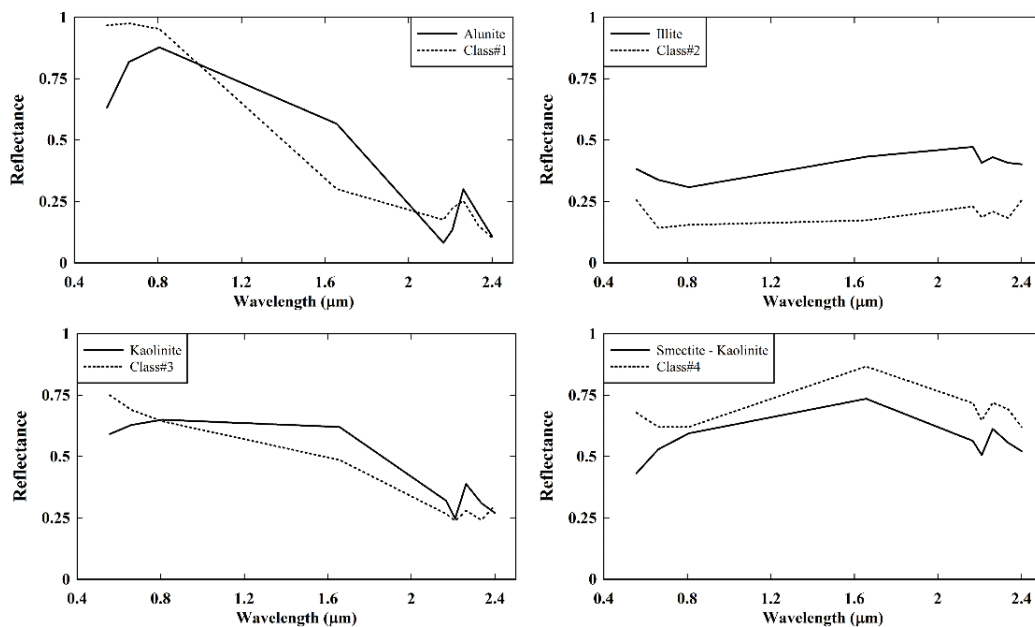


شکل ۳: نقشه زمین‌شناسی منطقه بالوقیه

۳-۱-۱- روش ترشولد شناور

اعضای انتهایی شناسایی شده با درصدهای فراوانی مختلف در داخل هر یک از پیکسل‌های تصویر حضور دارند. برای مشخص کردن فراوانی اعضای انتهایی در داخل پیکسل‌ها از روش‌هایی موسوم به روش‌های جداسازی طیفی استفاده می‌شود [۴۸]. روش فیلترینگ تطبیق‌یافته^{۲۱} (MF) یک روش بهینه شده برای جداسازی طیفی است که در هر مرحله از پردازش فراوانی یک عضو انتهایی را تعیین می‌کند و نیاز نیست که همه اعضای انتهایی تصویر شناخته شوند، بنابراین اگر در تعیین تعداد اعضای انتهایی خطایی وجود داشته باشد، به عنوان مثال اگر تعداد آنها کمتر از تعداد واقعی تخمین زده شده باشد در تعیین فراوانی آنها خطایی وجود نخواهد داشت. این روش اثر اعضای انتهایی شناخته شده را ماکزیمم می‌کند و در مقابل اثر زمینه ناشناخته را کاهش می‌دهد [۴۹]. نتایج این روش به صورت یک تصویر n باندهای که هر باند از این تصویر متناظر با یک عضو انتهایی بوده و n برابر با تعداد کل اعضای انتهایی است، نشان داده می‌شود. مقدار عددی هر پیکسل در هر باند نشان‌دهنده فراوانی عضو انتهایی مربوط به آن باند در آن پیکسل است. پس از تعیین فراوانی اعضای انتهایی در پیکسل‌های تشکیل‌دهنده تصویر، برای تحلیل بهتر نتایج و مشخص کردن الگوی پراکندگی کانی‌های آلتراسیونی در منطقه به کلاس‌بندی تصویر اقدام گردید. در یک روش

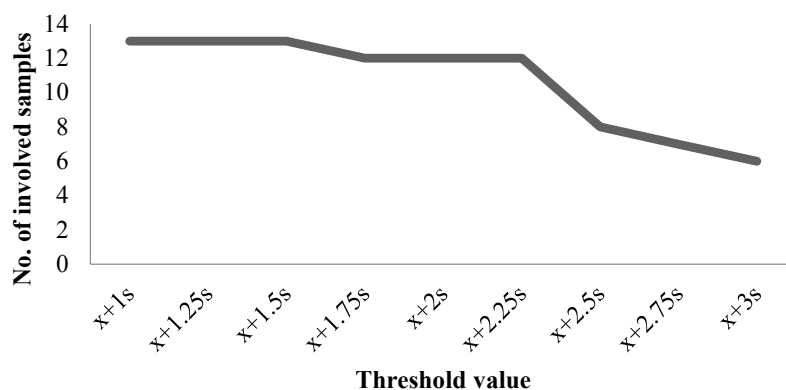
(شامل تصحیحات اتمسفری و توپوگرافی)، با استفاده از روش MNF ابعاد داده‌ها کاهش یافت. این مرحله برای اجرای روش شاخص خلوص پیکسل‌ها (PPI) ضروری است [۴۴] زیرا نویز را از داده‌ها مجزا کرده و به اصطلاح سفیدسازی نوفه^{۱۹} انجام می‌دهد. پس از انجام الگوریتم شاخص پیکسل خالص بر روی داده‌ها که به استخراج خالص‌ترین پیکسل‌ها منجر گردید، این پیکسل‌ها در یک فضای n بعدی مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت تعداد چهار طیف برای بررسی‌های بیشتر به عنوان اعضای انتهایی نهایی (EMs) تعیین شد. این اجزا با استفاده از روش‌های SFF و SAM با طیف‌های استاندارد کانی‌ها در کتابخانه طیفی USGS مطابقت داده شد. پروفیل‌های طیفی اعضای انتهایی همراه با کانی‌های انطباق یافته با آنها که شامل آلونیت، کائولینیت، اسمکتیت و ایلینیت است، شکل ۴ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که برای شناسایی کانی‌ها از طریق آنالیز طیفی، داده‌های ابر طیفی^{۲۰} که تعداد باندهایشان بسیار بیشتر از داده‌های چند طیفی است، کاربرد بیشتری دارند ولی با در نظر گرفتن تعداد باندهای زیادی که داده‌های ASTER در محدوده SWIR نسبت به انواع دیگر داده‌های چند طیفی دارد، کاربرد آنالیز طیفی بر روی داده‌های ASTER ممکن است در شناسایی کانی‌ها موثر باشد. مطالعاتی که در این خصوص انجام شده [۴۵-۴۷] تاییدکننده این موضوع است.



شکل ۴: مقایسه طیف‌های به دست آمده از بررسی تصاویر ASTER با کتابخانه طیفی USGS

باشد. دلیل استفاده از این روش در این مطالعه این است که با در نظر گرفتن اینکه نمونه‌ها از مناطقی برداشت شده‌اند که در بررسی‌های فیلدی مهم تشخیص داده شده‌اند و همچنین در نتایج آنالیز XRD این نمونه‌ها کانی‌های آلتراسیونی مشاهده می‌شوند، پس مناطق کلاس‌بندی شده ممکن است از نظر اکتشافی مهم باشند. در صورتی که اگر از ترشولدهای کوچکتر استفاده شود نمی‌توان چنین استدلالی کرد. در حالت کلی هدف، کاهش محدوده هدف برای مطالعات بعدی است که هرچه کوچکتر باشد ارزش اکتشافی بالاتری دارد. نمودار شکل ۴ تعداد نمونه‌های قرار گرفته در داخل محدوده‌های کلاس‌ها را به ازای ترشولدهای مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار قابل مشاهده است، کلاس‌بندی از ترشولد $\bar{X} + S$ شروع شده است که در این حالت همه ۱۳ نمونه XRD در محدوده‌های کلاس‌ها قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است که با اعمال ترشولد $\bar{X} + S$ تقریباً تمام محدوده تصویر کلاس‌بندی می‌شود. با افزایش تدریجی ترشولد با گام $0.25S$ تعداد نمونه‌های داخل محدوده‌های کلاس‌ها به تعداد ۱۲ نمونه در مقدار ترشولد $\bar{X} + 2.25S$ کاهش یافته است که تفاوت چندانی با تعداد قبلی ندارد. اما در مقابل سطح محدوده کلاس‌بندی شده به میزان قابل توجهی کاهش پیدا کرد که در نتیجه اعتبار آن افزایش پیدا کرده و شانس یافتن یک ذخیره اقتصادی افزایش می‌یابد. در حقیقت وظیفه اصلی هر روش یا مدل شناسایی مواد معدنی کاهش محدوده هدف برای مراحل اکتشاف بعدی است [۱۹]. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، با اعمال ترشولدهای بالاتر از $\bar{X} + 2.25S$ ، تعداد نمونه‌های واقع شده در داخل محدوده‌های کلاس‌بندی شده با شیب زیادی شروع به کاهش می‌کند. در نتیجه مقدار $\bar{X} + 2.25S$ به عنوان ترشولد بهینه

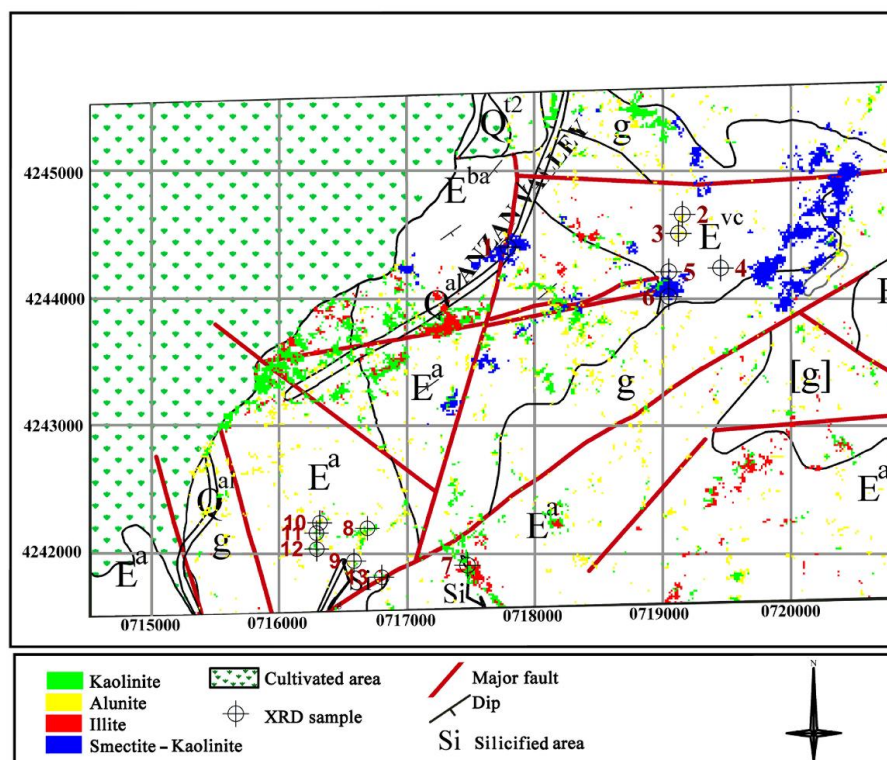
ساده نقشه کلاس‌بندی شده بر اساس اختصاص پیکسل‌های تصویر به اعضای انتهایی با بیشترین فراوانی ایجاد می‌شود. در حالت عادی با این روند تمامی پیکسل‌های تصویر، کلاس‌بندی می‌شوند که در اینصورت بیشتر مناطق کلاس‌بندی شده از نظر اکتشافی فاقد ارزش‌اند. مناطقی از نظر اکتشافی حایز اهمیت است که فراوانی بالایی از کانی‌ها را داشته باشد، بنابراین نیاز به یک روشی است که فقط بخش‌هایی از تصویر با فراوانی بالای کانی‌ها را کلاس‌بندی کرده و مناطق کم اهمیت به صورت کلاس‌بندی نشده باقی بماند. در این مطالعه روشی با نام "ترشولد شناور" برای این منظور استفاده شد. ساز و کار این روش به اینصورت است که ابتدا میانگین و انحراف معیار مقادیر فراوانی به دست آمده از روش MF برای هر عضو انتهایی محاسبه می‌شود، سپس ترشولدهای مختلفی از $\bar{X} + S$ تا $\bar{X} + 3S$ و با گام $0.25S$ برای هر عضو انتهایی برای کلاس‌بندی تصویر استفاده می‌شود. با اعمال هر مقدار به عنوان ترشولد، یک پیکسل در صورتی که یک کلاس اختصاص می‌یابد که ماکزیمم فراوانی از بین فراوانی‌های محاسبه شده برای اعضای انتهایی در داخل آن پیکسل، از ترشولد تعیین شده بزرگتر باشد؛ در غیر اینصورت کلاس‌بندی نشده باقی می‌ماند. هرچه ترشولد اعمال شده بزرگتر باشد پیکسل‌های کمتری کلاس‌بندی می‌شوند. در این مطالعه داده‌های XRD منطقه به عنوان نقاط کنترلی برای فرآیند کلاس‌بندی در نظر گرفته شدند. به طوری که بیشترین مقادیر ترشولدی که با اعمال آن همه نمونه‌ها و یا بیشتر آنها داخل محدوده‌های کلاس‌بندی شده مناسب قرار می‌گیرند به عنوان ترشولدهای بهینه انتخاب شدند. منظور از کلاس مناسب برای هر نمونه، کلاسی است که کانی مربوط به آن کلاس جزو نتایج XRD نمونه مورد نظر



شکل ۵: تعداد نمونه‌های واقع شده در داخل محدوده‌های کلاس‌بندی شده به ازای مقادیر ترشولد مختلف

شده، مورد آزمایش قرار گرفت. نقشه‌های کلاس‌بندی شده مربوط به این روش‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. برای انجام کلاس‌بندی به روش شبکه عصبی مصنوعی از تابع فعال‌سازی سیگموئید^{۲۲} استفاده شده و تعداد لایه‌های پنهان برابر با ۱ و حداقل آستانه فعال‌سازی خروجی^{۲۳} برابر با ۰/۹ انتخاب گردید که با این تنظیمات بر اساس سعی و خطا همه ۱۳ نمونه در داخل محدوده‌های کلاس‌بندی شده قرار گرفتند. با افزایش حداقل آستانه فعال‌سازی خروجی، سطح کمتری کلاس‌بندی می‌شود. روش SVM با استفاده از هسته تابع پایه شعاعی^{۲۴} و با تعیین آستانه احتمال کلاس‌بندی^{۲۵} و آستانه طبقه‌بندی مجدد هرم^{۲۶} هر کدام برابر با ۰/۹ اجرا گردید. در این روش با افزایش آستانه احتمال کلاس‌بندی، سطح محدوده کلاس‌بندی شده کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۷ نتیجه این روش تقریباً مشابه با شبکه عصبی است. در هر دو روش بیشتر نمونه‌ها در محدوده مربوط به آلونیت قرار گرفتند که با توجه به آنالیز XRD نمونه‌ها نتیجه درستی نیست. در روش شبکه‌های موازی کمترین مقدار برای ماکزیمم انحراف استاندارد از میانگین^{۲۷} برای قرارگیری نمونه‌ها در

انتخاب گردید. نقشه کلاس‌بندی شده حاصل از اعمال این مقدار ترشولد همراه با موقعیت نمونه‌های XRD در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج این روش با پنج مورد از روش‌های کلاس‌بندی شامل شبکه‌های عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان، شبکه‌های موازی، برازش‌سازی زاویه طیفی و درست‌نمایی ماکزیمم مقایسه گردید. لازم به ذکر است که اعمال ترشولد بر روی نتایج حاصل از MF به دلیل اینکه خروجی آن نقشه‌های فراوانی کانی‌ها است، توجیه‌پذیر است و شرط لازم برای کلاس‌بندی یک پیکسل این است که حداقل یکی از مقادیر فراوانی در داخل آن از ترشولد اعمال شده بزرگتر باشد. در حالی که در روش‌های دیگر کلاس‌بندی مورد بررسی هر پیکسل بر اساس ساز و کارهای مختلفی (به عنوان مثال روش برازش‌سازی زاویه طیفی شباهت طیفی بر اساس زاویه طیفی را ملاک قرار می‌دهد) بدون محاسبه و در نظر گرفتن مقدار فراوانی اعضای انتهایی در داخل آن به یک کلاس تعلق می‌گیرد. با این حال برای این پنج روش کلاس‌بندی تنظیمات مختلفی برای کاهش موثر سطح محدوده کلاس‌بندی با شرط قرارگیری حداکثر نمونه‌ها در داخل محدوده‌های کلاس‌بندی

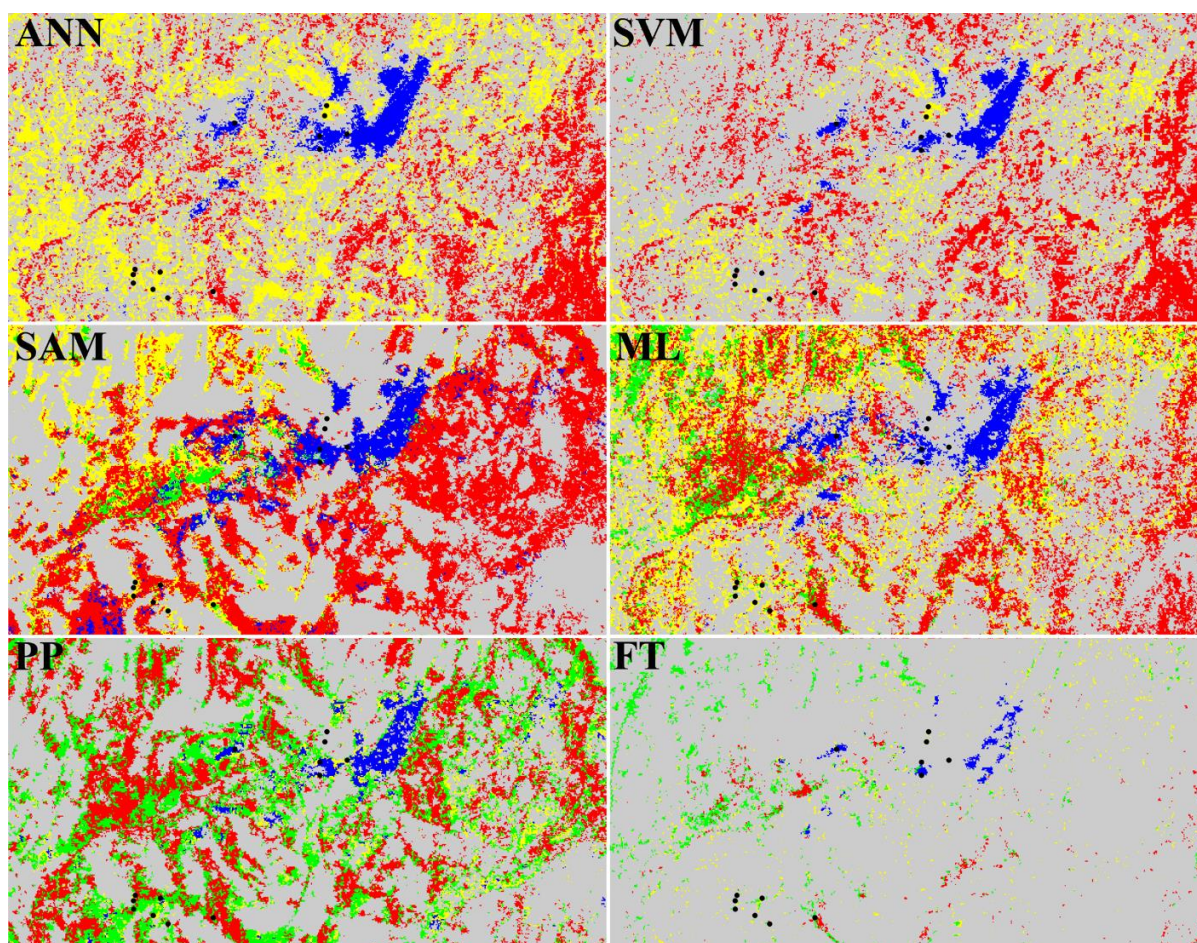


شکل ۶: نقشه کلاس‌بندی شده با استفاده از روش ترشولد شناور با استفاده از اعضای انتهایی به دست آمده از روش PPI همراه با موقعیت و شماره نمونه‌های XRD، گسل‌های منطقه، واحدهای سنگی منطقه و مناطق دارای آلتراسیون سیلیسی

شده افزایش می‌یابد. با توجه به نقشه مربوط به این روش نمونه‌های جنوبی عمدتاً در محدوده آلونیت (که سطح زیادی را پوشش داده است) قرار گرفتند. از میان روش‌های مورد بررسی، نقشه کلاس‌بندی مربوط به روش شبکه‌های موازی قابل مقایسه با روش ترشولد شناور است. به طوری که غیر از دو نمونه (که خارج از محدوده‌های کلاس‌بندی قرار گرفته‌اند) اکثر نمونه‌ها در کلاس‌هایی قرار گرفته‌اند که کانی متناظر با هر کلاس با نتایج XRD نمونه‌های قرار گرفته در داخل آن سازگار است.

تفاوت اصلی نتایج این روش نسبت به روش ترشولد شناور مساحت زیاد محدوده کلاس‌بندی شده آن است. در روش ترشولد شناور مساحت محدوده کلاس‌بندی شده در مقایسه با روش‌های دیگر کمتر است در حالی که محدوده‌های

داخل محدوده‌های کلاس‌بندی شده، مقدار ۱٫۳ تعیین شد به طوری که ۱۱ نمونه در داخل محدوده‌های کلاس‌بندی شده قرار گرفتند. با افزایش این مقدار، سطح محدوده کلاس‌بندی شده افزایش می‌یابد. در روش برازش‌سازی زاویه طیفی نیز با تعیین مقدار زاویه ماکزیمم برابر با ۰٫۰۸ رادیان، تعداد زیادی از نمونه‌ها (۱۱ نمونه) در محدوده قرار گرفتند. با افزایش این مقدار سطح کلاس‌بندی شده افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۷ نمونه‌های مربوط به جنوب منطقه که طبق نتایج XRD بیشتر حاوی کائولینیت‌اند، در محدوده آلونیت قرار می‌گیرند در حالی که نمونه‌های آلونیت‌دار در محدوده آلونیت قرار نمی‌گیرند. در روش درست‌نمایی ماکزیمم در مقدار آستانه احتمال ۰٫۹۹۹ تعداد ۱۱ نمونه در محدوده کلاس‌بندی شده قرار گرفتند که با کاهش این مقدار سطح محدوده کلاس‌بندی



شکل ۷: نقشه‌های کلاس‌بندی شده مربوط به روش‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، ماشین بردار پشتیبان (SVM)، برازش‌سازی زاویه طیفی (SAM)، درست‌نمایی ماکزیمم (ML)، شبکه‌های موازی (PP) و ترشولد شناور (FT) همراه با موقعیت نقاط نمونه‌برداری XRD: (رنگ‌های قرمز، سبز، آبی و زرد به ترتیب نشانگر کانی‌های ایلیت، کائولینیت، زاروسیت-کائولینیت و آلونیت است).

استفاده می‌شود [۲۲]. برای اریب‌سازی همبستگی بین متغیرها، داده‌های ژئوشیمیایی باید قبل از بررسی‌های چند متغیره باز شوند [۵۲]. در حال حاضر روش‌های مطلوبی برای تبدیل داده‌های ترکیبی از فضای نمونه ساده شده به فضای اقلیدسی وجود دارد که تبدیلات لگاریتم ریشه‌ای نامیده می‌شوند.

تبدیل نسبت لگاریتمی افزوده (alr) ارایه شده توسط [۲۷]:

$$alr(x) = y_i = \ln \frac{x_i}{x_D} \quad (1)$$

$$(i = 1, 2, \dots, D - 1)$$

تبدیل نسبت لگاریتمی مرکزی (clr) ارایه شده توسط [۲۷] که منتج به یک مشاهده چند متغیره می‌گردد و به صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود:

$$clr(x) = y_i = \ln \frac{x_1}{\sqrt{\prod_{i=1}^D x_i}} \quad (2)$$

$$(i = 1, 2, \dots, D - 1)$$

تبدیل لگاریتم ریشه‌ای مرکز ایزومتربیک (ilr) ارایه شده توسط [۲۴] منتج به یک مشاهده چند متغیره در فضای D-1 بعدی می‌گردد که تفسیر داده‌ها را غیرممکن می‌کند و طبق رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$ilr(x) = y_i = \sqrt{\frac{D-i}{D-i+1}} \ln \frac{x_i}{\sqrt{\prod_{j=i+1}^D x_j}} \quad (3)$$

$$(i = 1, 2, \dots, D - 1)$$

۳-۲-۱- برآورد نوع کانی‌سازی

در مطالعه حاضر انجام آنالیز مولفه اصلی مقاوم با استفاده از نرم‌افزار R و پکیج robCompositions انجام شده است. با استفاده از این پکیج داده‌ها قبل از انجام آنالیز RPCA تحت تبدیل ilr قرار می‌گیرند و پس از انجام آنالیز برای تفسیرپذیر شدن نتایج یک تبدیل clr بر روی بارها و امتیازات حاصل، انجام می‌شوند. پس از بررسی داده‌های ژئوشیمیایی با آنالیز مولفه اصلی مقاوم، مولفه‌های اصلی تعیین گردید. در آنالیز مولفه اصلی، مولفه اول دارای بزرگترین واریانس است و در مولفه‌های بعدی به ترتیب با کاهش واریانس مواجه می‌شویم. نمودار نشان داده شده در شکل ۸ مقادیر ویژه هر مولفه و میزان تغییراتی را که هر یک از مولفه‌ها از داده مورد بررسی به

کلاس‌بندی شده ۱۲ نمونه را در برمی‌گیرند که از بین آنها ۱۱ نمونه با نتایج XRD تایید می‌شود. با توجه به نتایج XRD، ۷ نمونه (نمونه‌های ۷ تا ۱۳ نشان داده شده در شکل ۶) اخذ شده از جنوب منطقه مورد مطالعه حاوی کائولینیت‌اند که در محدوده کلاس کائولینیت قرار گرفته‌اند (رنگ سبز در شکل‌های ۶ و ۷). نمونه‌های ۱، ۵ و ۶ حاوی مونت‌موریلونیت‌اند که از گروه کانی‌های اسمکتیت است [۵۰]. این نمونه‌ها در کلاس اسمکتیت- کائولینیت (رنگ آبی در شکل‌های ۶ و ۷) قرار گرفته‌اند و نمونه‌های ۲، ۳ و ۴ حاوی آلونیت‌اند که غیر از نمونه ۴، دو نمونه دیگر در داخل کلاس آلونیت (رنگ زرد در شکل‌های ۶ و ۷) قرار گرفته‌اند.

با توجه به نتایج به دست آمده از پردازش داده‌های ASTER می‌توان مشاهده کرد که کانی‌های آلونیت، کائولینیت، اسمکتیت و ایلیت در بخش میانی منطقه در طول گسل‌های منطقه پراکندگی بیشتری دارند. در بررسی آلتراسیون‌های شاخص کانسارهای اپی‌ترمال وجود این چهار کانی مشاهده می‌شود.

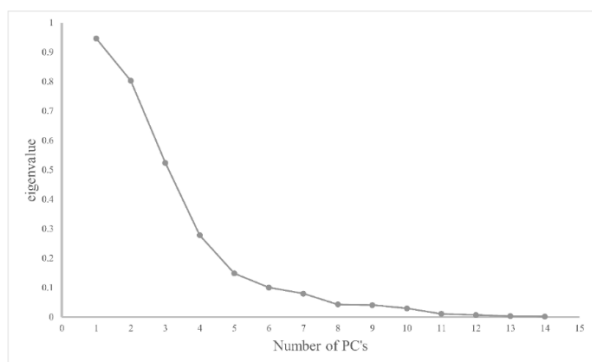
با توجه به این تفاسیر حضور کانی‌سازی اپی‌ترمال سولفید بالا در منطقه توجیه‌پذیر است، اما برای بررسی بیشتر نیاز به آنالیز داده‌های ژئوشیمیایی است تا با استفاده از نتایج آن، عناصر موجود در کانی‌سازی منطقه تعیین گردد. ارتباط این عناصر با آلتراسیون‌های منطقه در تعیین نوع کانی‌سازی موثر است.

۳-۲- آنالیز مولفه اصلی مقاوم RPCA

آنالیز مولفه اصلی ایزاری قدرتمند برای تصویر کردن داده‌های با ابعاد بالا در فضایی با ابعاد کمتر است که اساس این روش بر ماتریس واریانس و کوواریانس استوار است [۲۲]. با توجه به ماهیت ترکیبی داده‌های ژئوشیمیایی و تاثیر مقادیر خارج از ردیف بر PCA کلاسیک، این مرحله با استفاده از آنالیز مولفه اصلی مقاوم (RPCA) انجام گردید که در مواجهه با داده‌های ترکیبی مشکلات روش‌های کلاسیک را ندارد.

در تحلیل مولفه اصلی هر دو ماتریس واریانس و کوواریانس تحت تاثیر مقادیر خارج از ردیف قرار می‌گیرند و مولفه اول معمولاً به سمت مقادیر خارج از ردیف تمایل نشان می‌دهد و بنابراین ممکن است در نمایش تغییرات مرتبط ناتوان باشد [۵۱]. تحلیل مولفه اصلی با استفاده از آنالیز آماری مقاوم ممکن است در حل این مساله مفید باشد. در این روش برای فائق آمدن بر مشکل تاثیر داده‌های خارج از ردیف از ماتریس کوواریانس مینیمم به جای ماتریس کوواریانس کلاسیک

گروه‌بندی عنصری آن نمونه را مشخص می‌کند که در آن امتیازات بالا نشان‌دهنده عناصر گروه با امتیازات بالا و امتیازات پایین نشان‌دهنده عناصر گروه با امتیازات پایین‌اند [۵۳]. به این ترتیب مولفه‌های اول و دوم با توجه به مقادیر ویژه مناسب مورد استفاده قرار گرفت. مولفه سوم با وجود میزان بار ۰٫۷ برای طلا دارای مقدار ویژه پایینی بوده ($PC3=0.52$) و بنابراین در تفسیر مورد استفاده قرار نگرفت. از موارد قابل توجه در خصوص مولفه اول و دوم در جدول ۱ می‌توان به ارتباط میان طلا، آرسنیک، نقره و کادمیم در مولفه اول اشاره



شکل ۸: مقادیر ویژه برای هر مولفه RPCA

دست آورده‌اند نمایش می‌دهد. در این نمودار مشاهده می‌شود که بیشترین میزان تغییرات را می‌توان با استفاده از مولفه اول و دوم توضیح داد، بنابراین این دو مولفه اهمیت بالایی دارند و در ادامه مورد بررسی قرار خواهند گرفت. در جدول ۱ این مولفه‌ها آورده شده است که در میان آنها PC1 و PC2 مولفه‌های شماره اول و دوم هستند.

از آنالیز مولفه اصلی بردارهای ویژه‌ای به دست می‌آید. مقادیر ویژه هر مولفه نشان‌دهنده محتوای اطلاعات آن مولفه است. به طوری که یک مولفه با مقدار ویژه بالا تغییرات در منطقه را بهتر نمایان می‌سازد. در این بررسی مقادیر ویژه مولفه اول و دوم در سطح قابل قبولی است ($PC1=0.94$ و $PC2=0.80$) و می‌توان از آنها برای تبیین تغییرات در منطقه استفاده کرد در حالی که مولفه‌های بعدی با مقادیر ویژه پایین‌تر، توان کمتری دارند و استفاده از آنها می‌تواند به اشتباه در تفسیر منجر شود و به عنوان ضرایب مولفه اصلی یا بارها^{۲۸} نیز شناخته می‌شوند که مفهوم نسبی مولفه‌ها را به نمایش می‌گذارند. همچنین از آنها برای تولید امتیازات برای هر مولفه استفاده می‌شود، بنابراین گروه عناصر با بارهای بالا تولید امتیازات بالا می‌کنند و گروه عناصر با بارهای پایین تولید امتیازات پایین می‌کنند، بنابراین میزان امتیاز یک نمونه

جدول ۱: بارهای مولفه‌های آنالیز RPCA

RPCA LOADINGS						
	Comp.1	Comp.2	Comp.3	Comp.4	Comp.5	Comp.6
Au	-0.41527	-0.34108	0.714606	0.141652	-0.05773	0.222677
Mn	0.111254	0.175319	0.098769	0.200008	-0.04571	-0.09192
Pb	-0.02957	-0.09002	0.038981	-0.20353	0.00734	-0.28478
Hg	0.523285	0.092791	0.240246	0.078096	0.452559	0.100797
Ag	-0.34065	0.449608	-0.10931	-0.59444	0.225412	0.274457
As	-0.35858	-0.20822	-0.54012	0.482749	0.404073	0.160407
Bi	0.049391	-0.06242	-0.0127	0.086386	0.10065	-0.63917
Co	0.102118	0.249645	-0.00204	0.26659	-0.10614	0.169393
Cu	-0.01293	0.241607	0.005712	0.191297	-0.21898	0.261969
Mo	0.238381	-0.36631	-0.32173	-0.11118	-0.5711	0.249663
Sb	-0.05997	-0.40262	-0.05997	-0.29392	0.216604	-0.10463
Zn	0.103972	0.168609	0.065282	0.060113	-0.06199	0.017885
Sn	0.3174	0.026456	-0.04921	-0.07332	0.045029	0.022328
W	0.091328	-0.22982	-0.02141	-0.28343	-0.03488	0.049833
Cd	-0.32016	0.296456	-0.0471	0.052926	-0.35512	-0.40891
Eigenvalues	0.946587	0.803311	0.524316	0.278355	0.148614	0.100366

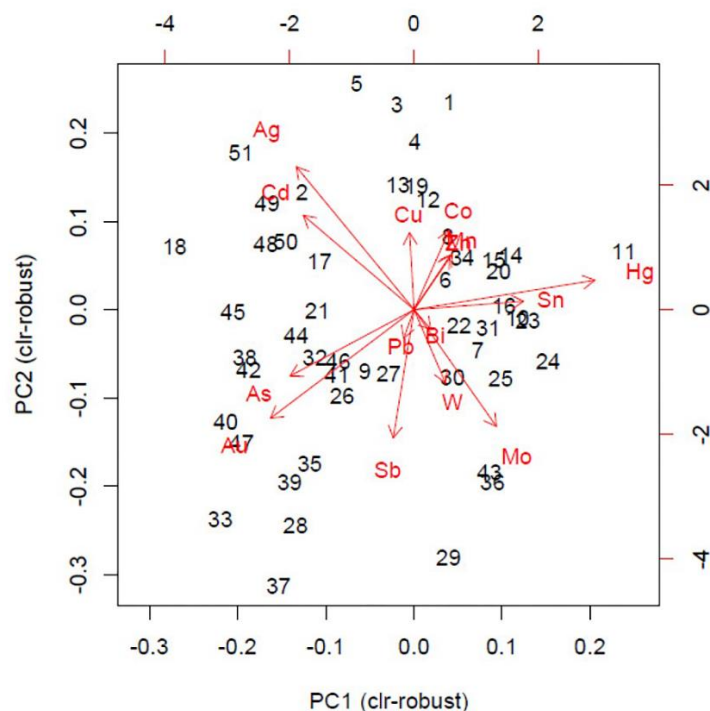
می‌کند [۵۴]. این نوع کانسارها در نقاط با عیار بالا مقادیری از طلا، نقره، مس، آرسنیک، آنتیموان، بیسموت و تلوریم نشان می‌دهند [۵۵]. از طرفی بررسی داده‌های ASTER حضور آلتراسیون‌های نوع آرژلیک و آرژلیک پیشرفته را در منطقه نشان داده است، بنابراین با توجه به ارتباط کانی‌سازی ایپی ترمال با این نوع از آلتراسیون‌ها می‌توان به حضور احتمالی نوع سولفید بالای این نوع کانی‌سازی در منطقه اشاره کرد. ارتباط یاد شده در ادامه بررسی خواهد شد.

اما مساله مهم دیگر در نمودار biplot این است که هر نمونه بیشتر تحت تاثیر چه عناصری قرار گرفته است.

با رسم امتیازات به دست آمده از مولفه اول و دوم آنالیز RPCA برای هر نمونه، مشاهده می‌شود که منطقه مورد مطالعه به دو بخش تقسیم می‌شود. نتایج آنالیز RPCA نشان می‌دهد که نمونه‌های با امتیازات منفی با بارهای عناصر مورد استفاده در تعیین نوع کانی‌سازی در ارتباط هستند (بارهای موجود در جدول ۱)، در شکل ۱۰ برای PC1 مشاهده می‌شود که این نمونه‌های با بار منفی در غرب منطقه حضور بیشتری دارند. این منطقه منطبق بر محدوده آلتراسیونی شناسایی شده در قسمت میانی منطقه در شکل ۶ است. همچنین نتایج بررسی دورسنجی در این منطقه نشان‌دهنده حضور آلتراسیون

کرد. با بررسی مولفه دوم می‌توان مشاهده کرد که ارتباط طلا و آرسنیک دوباره برجسته و این امر با حضور عنصر آنتیموان، مولیبدن و تنگستن نیز همراه شده است. این بارها می‌توانند نشان‌دهنده تفاوت خوشه‌های نمونه‌ها در نمودار biplot باشند. در شکل ۹ می‌توان نمودار biplot مولفه اول و دوم را مشاهده کرد. با وجود اینکه جدول ۱ تمام ارتباط بین عناصر را مشخص کرده است، بررسی نمودار biplot نیز ممکن است در مشخص شدن این ارتباط کمک کند. در این نمودار بارهای مولفه اول و دوم در ارتباط با امتیازات نمونه‌های مورد استفاده در آنالیز مشاهده می‌شوند. همچنین با توجه به زاویه تقریباً ۹۰ درجه‌ای میان طلا و نقره می‌توان گفت که نباید انتظار همبستگی این عناصر را در منطقه داشت و زاویه ۱۸۰ درجه‌ای میان طلا و جیوه نیز نشان‌دهنده همبستگی منفی این دو عنصر هستند. نتایج عناصر مولفه اول و دوم به دست آمده در این بخش همراهی عنصر طلا با آرسنیک و آنتیموان را در منطقه آشکار می‌کنند و با توجه به این که در بخش قبل نتایج حاصل از دورسنجی به حضور احتمالی کانی‌سازی ایپی ترمال در منطقه اشاره داشته است، به این ترتیب این می‌تواند نشانی بر حضور احتمالی کانی‌سازی ایپی ترمال طلا در منطقه باشد.

کانی‌شناسی در چنین مناطقی با افزایش عمق تغییر



شکل ۹: نمودار biplot مولفه اول و دوم

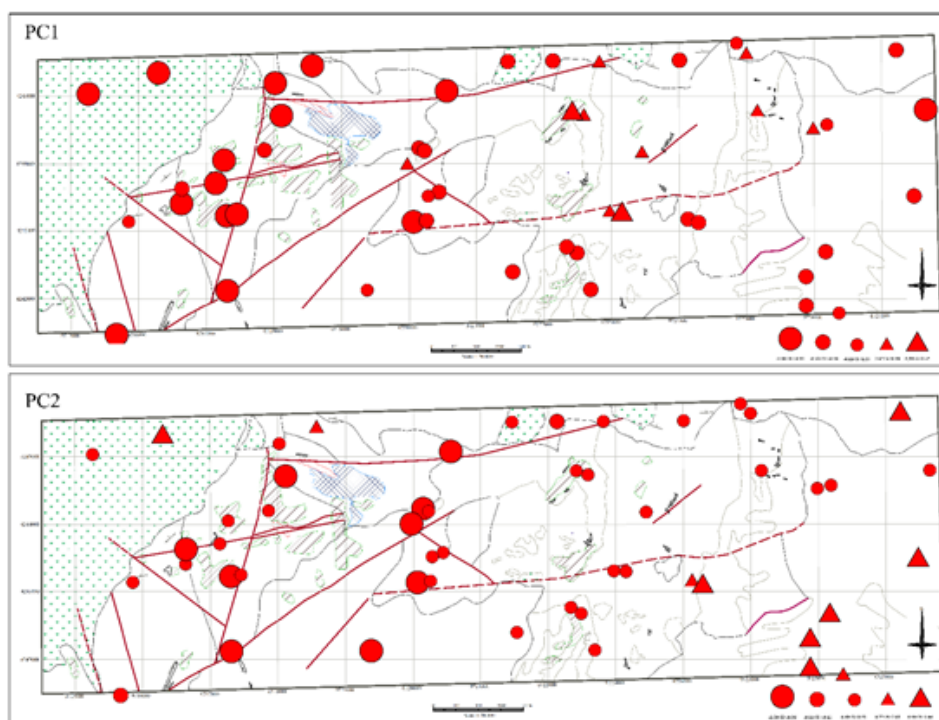
مقابل در برخی موارد، با وجود هاله آلتراسیونی، ذخیره معدنی وجود ندارد. اما نتایج این مطالعه ممکن است برای مطالعات بعدی در منطقه بسیار مفید باشد؛ چرا که احتمال وجود ذخیره در مناطق آلتراسیونی بالاتر است و در حقیقت این مطالعه مناطق پتانسیل‌دار را برای مطالعات تفصیلی مشخص می‌کند. همچنین انطباق آلتراسیون‌های شناسایی شده با داده‌های ژئوشیمیایی احتمال وجود ذخیره را افزایش می‌دهد.

مطالعات دورسنجی در منطقه برای تعیین اعضای انتهایی و استفاده از آنها برای بررسی کانی‌شناسی منطقه انجام شد. بعد از محاسبه فراوانی اعضای انتهایی با استفاده از روش MF در این مطالعه از یک رویکرد جدید به نام روش ترشولد شناور برای کلاس‌بندی و تعیین نقشه پراکندگی کانی‌های مربوط به اعضای انتهایی استفاده گردید. این روش که بر اساس اطلاعات کانی‌شناسی منطقه با استفاده از نمونه‌های XRD به عنوان نقاط کنترلی عمل می‌کند، توانست به طور موثری تصویر منطقه مورد مطالعه را کلاس‌بندی کند. به طوری که سطح محدوده کلاس‌بندی شده نسبت به روش‌های دیگر استفاده شده جهت کلاس‌بندی بسیار کوچکتر است و این امر با توجه به اینکه هدف اصلی در مطالعات اکتشافی کاهش سطح

آرژلیک و آرژلیک پیشرفته است، بنابراین این منطقه احتمال بیشتری برای کانی‌سازی اپی‌ترمال سولفید بالا دارد و به این ترتیب نتایج بررسی ژئوشیمیایی اعتبار نتایج دورسنجی را تایید می‌کند.

۴- نتایج و بحث

مطالعه حاضر تلفیقی از مطالعات دورسنجی و ژئوشیمیایی برای تعیین مناطق مستعد و دارای احتمال کانی‌سازی در منطقه بالوقیه است. در این مطالعه با استفاده از داده‌های ASTER به شناسایی آلتراسیون‌های منطقه پرداخته شد و ارتباط این آلتراسیون‌ها با نوع کانی‌سازی محتمل در منطقه مشخص گردید. لازم به ذکر است که برخی از ذخایر معدنی از نوع پنهان بوده و هیچگونه هاله آلتراسیونی در اطرافشان وجود ندارد [۵۸-۵۶] که اکتشاف اینگونه کنسارها با تکنیک دورسنجی با مشکلاتی همراه است. در این مطالعه با وجود شناسایی آلتراسیون‌های مرتبط با ذخیره احتمالی و انطباق آنها با نتایج حاصل از بررسی داده‌های ژئوشیمیایی، هنوز قطعیت وجود ذخیره تایید نمی‌شود. چرا که در اطراف بعضی از ذخایر معدنی دنیا هیچگونه هاله آلتراسیونی تشکیل نمی‌شود و در



شکل ۱۰: پلات امتیازات مولفه اول و دوم

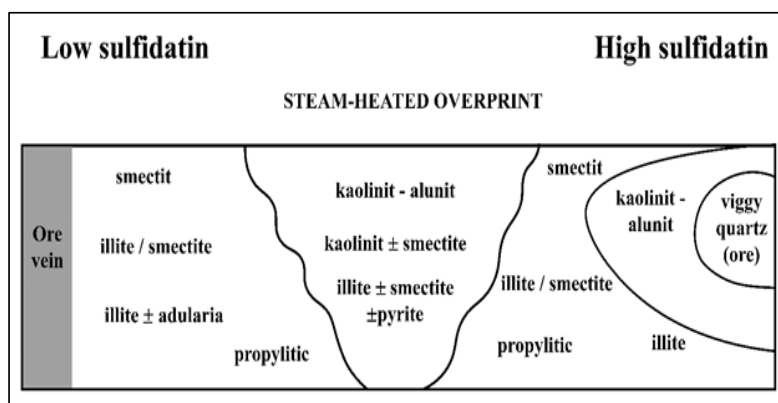
تفکیک کرد. در نتیجه محدوده کلاس‌بندی شده به عنوان آلونیت (قسمت زرد رنگ در شکل ۶) می‌تواند نشانگر هر دو نوع باشد. کانی‌سازی اپی‌ترمال در عمق کم اتفاق می‌افتد. عمق تشکیل این کانی‌سازی از سطح زمین تا حدود ۱ الی ۲ کیلومتری است و برآورد دمای تشکیل کانی‌های اپی‌ترمال نشان می‌دهد که دمای تشکیل این کانی‌ها بین ۱۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد است [۵۹]. سیستم اپی‌ترمال می‌تواند به دو نوع اصلی تقسیم شود. هر کدام از این دو نوع شامل کانی‌شناسی و آلتراسیون‌های متفاوتی‌اند:

- نوع سولفید بالا که از مایعات هیدروترمالی با خواص شیمیایی سولفیدی اکسیده تولید شده است [۶۸، ۶۹].
- نوع سولفید پایین که از مایعات با pH نزدیک به خنثی و کاهش یافته، که با میزان زیادی از آب‌های جوی مخلوط شده‌اند، تولید شده است [۷۰].

آلتراسیون‌های اسید سولفاتنی محصول لیچینگ سنگ زمینه به وسیله محلول‌های حاوی H_2SO_4 است [۷۱، ۷۲] در نوع سولفید بالا، بخارات SO_2 و HCL به وسیله مایعات نزدیک به سطح جذب شده و SO_2 به H_2S و H_2SO_4 تبدیل می‌شود. این مایعات اسیدی در عمق کم با سنگ‌های میزبان واکنش می‌دهند که این واکنش به ایجاد آلتراسیون آرژلیک شدید (کائولینیت، دیکیت، پروپیلیت، دیاسپور و آلونیت) منجر می‌شود، سپس ایللیت و اسمکتیت تشکیل شده و در نهایت به تشکیل آلتراسیون پروپیلیتیک می‌انجامد [۷۳]. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود ایللیت در آلتراسیون‌های کانسارهای اپی‌ترمال سولفید پایین حضور دارد در حالی که کانی‌های کائولینیت و آلونیت از مشخصات آلتراسیون‌های کانسارهای اپی‌ترمال سولفید بالا هستند و در محیط‌های با سولفید زیاد پایدار می‌شوند. حضور این دو کانی در یک کانسار اپی‌ترمال سولفید بالا زمانی اتفاق می‌افتد که مایعات اسیدی در جریان پیشروی با فاصله از مجرای خروج، با سنگ‌های میزبان واکنش دهند و به PH خنثی برسند که این اتفاق موجب پایداری ایللیت و اسمکتیت می‌شود [۵۹]. این روند در منطقه مورد مطالعه قابل مشاهده است. نتایج بررسی دورسنجی نشان‌دهنده این موضوع است که در این منطقه کانی‌ها به ترتیب از غرب به شرق جایگزین شده‌اند. در دو طرف دره انزان که در شکل ۶ در شمال غربی محدوده مورد مطالعه مشخص است کانی‌های کائولینیت و آلونیت در غرب این دره و ایللیت و اسمکتیت در مرکز و شرق دره انزان مشخص شده‌اند. این امر می‌تواند نشانگر کاهش میزان سولفید

محدوده هدف برای مراحل بعدی است، ممکن است مفید باشد. در روش‌های دیگر پراکندگی محدوده‌های کلاس‌بندی شده به نحوی است که نمی‌توان یک محدوده اولویت‌دار را انتخاب کرد ولی در روش ترشولد شناور با توجه به نتایج ارایه شده در شکل ۶، یک محدوده در قسمت میانی منطقه که در آن کانی‌های آلتراسیونی در اطراف گسل‌ها (بیشتر در طول گسل با امتداد تقریبی شرقی- غربی) پراکندگی دارند پتانسیل‌دار ارزیابی می‌شود. برای تهیه شواهد بیشتر در خصوص نوع کانی‌سازی در منطقه، بررسی ژئوشیمیایی انجام شد و عناصر ردیاب کانی‌سازی احتمالی مشخص گردید. در مطالعه حاضر انجام بررسی‌های دورسنجی و تلفیق نتایج آن با نتایج به دست آمده از آنالیز ژئوشیمیایی در جهت تعیین نوع کانی‌سازی احتمالی بوده و وجود داده‌های XRD از منطقه نیز در تایید صحت اعضای انتهایی مشخص شده در بررسی دورسنجی مفید واقع گردیده است. بررسی‌های دورسنجی به تعیین مناطق پراکندگی کانی‌های آلونیت و کائولینیت و ایللیت و اسمکتیت منجر شد. حضور این کانی‌ها با توجه به داده‌های XRD تایید می‌شود. این کانی‌ها نشان‌دهنده حضور آلتراسیون‌های آرژلیک و آرژلیک پیشرفته در منطقه است. پراکندگی کائولینیت و آلونیت در شکل ۶ نشان داده شده است. در داده‌های XRD منطقه، ناتروآلونیت به همراه کائولینیت دیده می‌شود. این کانی که در ارتباط با مجموعه آلتراسیون آرژلیک پیشرفته است، به واسطه مایعات اسیدی دما بالا در نهشته‌های سولفید بالا به وجود می‌آید [۵۹] حضور کانی ناتروآلونیت در منطقه به دلیل جانشینی Na^+ بجای K^+ در کانی آلونیت بوده و این مهم‌ترین جانشینی آلونیت است [۶۰]. شرایط جانشینی Na-K در مطالعات متعددی که بر روی کانسارهای اپی‌ترمال سولفید بالا انجام شده بررسی شده است [۶۵-۶۱]. بررسی‌ها نشان می‌دهند که جایگزینی Na در دمای بالا و در محیط‌های سولفید بالا اتفاق می‌افتد [۶۰]. ناتروآلونیت نشان‌دهنده آلتراسیون آرژلیک پیشرفته در کانسارهای اپی‌ترمال سولفید بالا است.

در چنین کانسارهایی کانی ناتروآلونیت به دلیل آلتراسیون‌های هیدروترمال ماگمایی هایپوژن و حرارت دیده با بخار^{۲۹} یا روندهای سوپرژن به وجود می‌آید [۶۶]. نتایج بررسی داده‌های ASTER نیز مشخص می‌کند که در این منطقه کانی‌سازی اپی‌ترمال سولفید بالا اتفاق افتاده است. لازم به توضیح است که طیف انعکاسی آلونیت و ناتروآلونیت شبیه به هم است [۶۷] که با آنالیز طیفی نمی‌توان آنها را از هم



شکل ۱۱: پراکندگی کانی‌ها در محیط‌های اپی‌ترمال سولفید بالا و سولفید پایین [۵۹]

دورسنجی حضور کانی‌های مربوط به آلتراسیون کانی‌سازی اپی‌ترمال سولفید بالا را معین کرده بود. عناصر همراه تعدادی از کانسارهای هیدروترمال در جدول ۲ قابل مشاهده است. مقایسه نتایج به دست آمده در این مطالعه برای منطقه بالوقیه با شواهد موجود برای چند منطقه تیپ حاوی ذخیره طلا نشان می‌دهد که منطقه مورد بررسی از برخی جنبه‌ها با این مناطق شباهت‌هایی دارد. از کانسارهای قابل ذکر در سطح جهانی می‌توان به کانسار طلای سامیت ویل در کلرادو اشاره کرد. این کانسار از نوع اپی‌ترمال اسید سولفاتی است. ۶ رویداد متفاوت در ظهور و گسترش کانسار سامیت ویل نقش داشته‌اند:

۱. یک مرحله آلتراسیون اسید سولفاتی اولیه
۲. کانی‌سازی طلا و مس سولفیدی ثانویه
۳. برشی شدن هیدروترمالی گسترده
۴. تشکیل رگه‌های باریتی دارای فلزات پایه سولفیدی در حجم کم
۵. برشی شدن ماتریس‌های کائولینیت در حجم کم
۶. اکسیداسیون سوپرژن

در این کانسار محدوده وسیعی به وسیله آلتراسیون آرژلیک پوشیده شده است که یک زون سیلیسی باریک را احاطه کرده است. این زون از سیلیس حفره‌ای و کوآرتز آلونیت و کوآرتز کائولینیت تشکیل شده است [۷۴]. در منطقه بالوقیه نیز آلتراسیون‌های ناشی از فعالیت‌های هیدروترمالی قابل مشاهده‌اند. از آن جمله آلتراسیون‌های آرژلیک و آرژلیک پیشرفته است که با حضور کانی کائولینیت و آلونیت قابل شناسایی‌اند. آلتراسیون آرژلیک به ویژه در جنوب غربی منطقه و در بین دو زون سیلیسی قابل مشاهده است. این دو زون

سیالات هیدروترمال در مسیر خود به سمت شرق منطقه باشد که دلیلی بر تشکیل کانی‌های سولفید پایین مانند ایلیت و اسمکتیت پس از تشکیل کانی‌های سولفید بالا مانند آلونیت و کائولینیت است. این مورد همچنین می‌تواند نشان‌دهنده محل خروج مایعات در غرب این منطقه باشد. در این حالت است که کانی‌های ایلیت و اسمکتیت در اطراف کانسارهای سولفید بالا پایدار می‌شوند. در شکل ۶ این مورد قابل مشاهده است. در این شکل مشاهده می‌شود که گسترش کانی‌های مشخصه آلتراسیون‌های کانسار اپی‌ترمال سولفید بالا در طول گسل‌های منطقه و با امتداد شرقی- غربی بوده است، در امتداد این گسل کانی آلونیت و کائولینیت در غرب با تاثیر مایعات اسیدی تولید شده و در ادامه ایلیت و اسمکتیت در سمت شرق با تاثیر مایعات با قدرت اسیدی کمتر به وجود آمده‌اند.

همچنین بررسی‌های ژئوشیمیایی بر روی داده‌های ژئوشیمیایی منطقه نشان‌دهنده ارتباط عناصر مربوط به کانی‌سازی اپی‌ترمال سولفید بالا در محیط است. در بررسی‌های زمین‌شناسی کانسارها را می‌توان بر اساس ترکیب عناصر همراه کانسار، شکل کانسار، سنگ میزبان و طرز تشکیل کانسار دسته‌بندی کرد. برخی از عناصر همراه ممکن است هدف اصلی اکتشاف نباشند اما می‌توان از آنها به عنوان ردیاب این کانسارها استفاده کرد [۷۳]. با انجام آنالیز مولفه اصلی مقاوم بر روی داده‌های منطقه، مولفه‌های به دست آمده مورد بررسی قرار گرفتند. با بررسی مولفه‌های اول و دوم که دارای بیشترین مقادیر ویژه در میان مولفه‌های دیگر هستند، مشخص گردید که عناصر طلا، آرسنیک و آنتیموان ارتباط کانی‌سازی با یکدیگر دارند. همچنین مشخص شد که نمونه‌های مرتبط با این عناصر در همان محلی قرار دارند که بررسی‌های

جدول ۲: عناصر همراه تعدادی از کانسارهای هیدروترمال [۷۳]

Hydrothermal epigenetic	Fractionated granitoid-associated deposits Tin-tungsten deposits: Mt Bischoff, Renison, Ardlethan. Tungsten-molybdenum deposits: Wolfram Camp. Pegmatite and complex veins: Greenbushes, Wodgina.	Sn-W±As-Cu-Zn (O-S-F-B) W-Mo±Cu-Pb-Zn-Bi-As Sn-Ta-Nb-Li, Be-Li-Cs- Rb±U-Th REE (Si)
	Porphyry-associated deposits Copper-gold stockworks and veins: Cadia-Ridgeway, Northparkes, Copper Hill. Copper-molybdenum deposits: Dogwood. Breccia pipe deposits: Kidston, Mt Leyshon. Epithermal gold-silver deposits: High sulphidation type: Peak Hill, Gidginbung. Low sulphidation type: Pajingo.	Cu-Au±Ag-Bi-Mo-Te-Re(S-K) Mo-Cu (S) Au±Cu-Ag±Mo-Pb-Zn (S) Ag-Au-As-Sb-Te (S-Si) Ag-Au-As-Sb-Mn-Ba±Hg-Te-Se (S-Si-CO ₂)
	Iron oxide copper gold deposits Olympic Dam, Ernest Henry. Tennant Creek.	Cu-U-Au-Ag-REE (S-F) Cu-Au-Bi
	Syn-deformational hydrothermal and replacement deposits Metamorphic copper deposits: Mount Isa, Nifty. Metasediment-hosted polymetallic deposits: Elura, CSA, Peak, New Cobar, Hera, Tritton. Replacement deposits possibly magmatically related: Osborne.	Cu-Co-As±Pb-Zn (S-Si) Pb-Zn-Ag±Cu-Sb (S) Cu-Au±Bi-As-Pb-Zn (S) Cu-Au-Ag-Bi-Co-Hg-Mo-Se-Sn-Te-W (S-F)±Zn-Pb
	Orogenic gold deposits Archaean greenstone-hosted deposits: Eastern Goldfields, WA (e.g., Golden Mile, Mt Charlotte, Bronzewing, Junction, Kanowna Belle, Bounty); Sediment-hosted reef deposits: Telfer. Slate-hosted quartz-vein deposits: Central Victoria, Hill End. Granitoid-associated deposits: Charters Towers, Timbarra.	Au-Ag-As-W-Sb-Te±Cu-Pb-Mo (CO ₂ -S±K-B) Au-Cu-Pb-Zn-Bi-Mo-W-Co-Ni (S-CO ₂) Au-As-Sb±Ag (CO ₂ -S) Au-Ag-Zn-Pb-Cu-Bi (CO ₂ -S)
	Carbonate-hosted stratabound lead-zinc deposits Mississippi Valley-type: Lennard Shelf.	Pb-Zn-Fe±Ag-Cu (S-hydrocarbons)
	Unconformity-related uranium deposits Alligator River, Coronation Hill.	U-Au-Cu-Co-Ni-Ag±Zn-Sn-Pb-Bi, Pt-Pd (Mg)

منجر شده است. در کانسار سامیت ویل نیز این مورد مشاهده می‌شود و در آن یک زون آرژلیک با کانی کائولینیت در اطراف زون سیلیسی مشخص شده است که در ادامه به سمت بیرون به یک زون حاوی ایلیت ختم می‌شود.

یکی دیگر از کانسارهای قابل ذکر کانسار گلدفیلد نوادا است. منطقه معدنی گلدفیلد در جنوب غربی نوادا در بستری از سنگ‌های آتشفشانی کالک آلکالن قرار دارد و بزرگترین کانسار

سیلیسی به فاصله ۲۰ متر از یکدیگر قرار گرفته‌اند و در شکل ۶ قابل مشاهده‌اند و کوارتز حفره‌دار در این محل به طور فراوان حضور دارد که در شکل ۱۲ نمونه‌ای از این نوع کوارتز مشاهده می‌شود. همچنین حضور کانی‌های آلونیت و کائولینیت نشانه مرحله آلتراسیونی اولیه در محیط اسیدی‌اند و این روند با تاثیر مایعات جوی بر مایعات اسیدی هیدروترمالی و خنثی شدن pH مایعات اسیدی همراه است که به ایجاد ایلیت و اسمکتیت

شیلی است. آلتراسیون‌های این کانسار با منطقه مورد مطالعه در این مقاله شباهت زیادی دارند به گونه‌ای که در منطقه لاکویا نیز آلتراسیون آرژلیک متوسط با مشخصه کانی‌های ایلیت و اسمکتیت در اطراف آلتراسیون آرژلیک پیشرفته که با عناصر شاخص آلونیت و کائولینیت مشخص شده است قرار می‌گیرند و روند کانی‌سازی در منطقه به وسیله گسل‌های موجود کنترل می‌شود. در منطقه لاکویا ضریب بالایی از طلا در منطقه آلتراسیونی آرژلیک پیشرفته وجود دارد [۷۹،۷۸].

در حالت کلی در این مطالعه مناطق پتانسیل‌دار شناسایی شده با تکنیک دورسنجی به صورت کیفی با نتایج حاصل از روش‌های ژئوشیمیایی تطبیق داده شدند. در مطالعات اکتشافی معمولاً از نتایج روش‌های مختلف اکتشافی مانند دورسنجی، زمین‌شناسی، ژئوفیزیک و ژئوشیمی برای مدلسازی پتانسیل معدنی استفاده می‌شود که کاهش ریسک اکتشاف را در پی دارد. برای مطالعات آتی در این منطقه پیشنهاد می‌شود که نتایج به دست آمده در این مطالعه شامل لایه‌های آلتراسیونی و کلاس‌بندی شده استخراج شده به وسیله دورسنجی و لایه‌های حاصل از روش آنالیز مولفه اصلی مقاوم، با لایه‌های اطلاعاتی دیگر موجود برای منطقه شامل نقشه‌های زمین‌شناسی، گسل‌های منطقه که معمولاً از کنترل‌کننده‌های اصلی کانی‌سازی در مناطق مختلف به دلیل هدایت محلول‌های هیدروترمال هستند و همچنین نتایج حاصل از مطالعات ژئوفیزیکی، با استفاده از یک روش مناسب در سیستم اطلاعات جغرافیایی تلفیق شوند. در این راستا روش‌های نوین و کارآمد مانند روش‌هایی که از توابع لجستیکی برای وزن‌دار کردن لایه‌ها استفاده می‌کنند [۸۰-۸۲]، می‌توانند کاربرد موثری داشته باشند. برای تلفیق لایه‌های وزن‌دار شده می‌توان از توابع مناسب مانند روش تلفیق گاما استفاده کرد. به این ترتیب می‌توان یک لایه نهایی ایجاد کرد که پتانسیل اکتشافی نقاط مختلف را نشان دهد. در بین لایه‌های اشاره شده که برای پتانسیل‌یابی و تعیین مناطق مستعد کانی‌زایی در منطقه مورد مطالعه اهمیت زیادی دارند، اگرچه اهمیت لایه‌های ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی ممکن است بالاتر از لایه‌های دیگر باشد، ولی باید توجه داشت که لایه مربوط به دورسنجی از این جهت اولویت دارد که مطالعات دورسنجی باید قبل از مطالعات دیگر برای شناسایی مناطق هدف برای پیاده‌سازی عملیات ژئوفیزیکی، ژئوشیمیایی و در نهایت حفاری انجام گیرد. به عبارت دیگر مطالعات دورسنجی نقش برجسته‌ای در مراحل اولیه مطالعات اکتشافی دارند.



شکل ۱۲: کوارتز حفره دار در محل زون سیلیسی

طلای سولفید بالای شناخته شده در آمریکای شمالی است [۷۵]. محیط‌های نفوذپذیر که در اثر گسل‌ها و شکستگی‌ها و لایه‌های نفوذپذیر به وجود می‌آیند، کنترل‌کننده‌های مهمی در شکل‌گیری کانسار در گلدفیلد هستند که کانال‌هایی برای مایعات هیدروترمال به وجود می‌آورند [۷۶،۵۵]. نتایج بررسی دورسنجی در منطقه بالوقیه نیز روند کانی‌سازی در طول گسل در منطقه را آشکار ساخته است که این امر می‌تواند نشان از هدایت مایعات هیدروترمالی به وسیله گسل‌ها در منطقه بالوقیه باشد.

آلتراسیون‌های هیدروترمال در گلدفیلد شامل سیلیس حفره‌ای است که با زون‌های آرژلیک پیشرفته، فلیک-آرژلیک، آرژلیک و پروپیلیتیک احاطه شده است. شکل قرارگیری این آلتراسیون‌ها از ویژگی‌های کانی‌سازی اپی‌ترمال سولفیدی است که با توجه به نتایج بررسی دورسنجی در منطقه بالوقیه نیز تا حدودی این الگو مشاهده می‌شود. کانی‌های آلونیت و کائولینیت از کانی‌های حاضر در منطقه بالوقیه، با توجه به نتایج حاصل از بررسی‌های دورسنجی و ژئوشیمیایی هستند. این کانی‌ها که از مشخصه آلتراسیون آرژلیک و آرژلیک پیشرفته‌اند، در کانسار گلدفیلد در اطراف محل کانی‌سازی به وجود آمده‌اند. محل کانی‌سازی طلا در گلدفیلد در آلتراسیون سیلیس حفره‌ای است [۷۷].

از نظر ارتباط زمین‌شناسی با کانسارهای تیپیک در جهان باید این موضوع را در نظر داشت که منطقه بالوقیه در کمربند آتشفشانی اهر-ارسباران قرار دارد که بخشی از کمربند ماگمایی البرز-آذربایجان است و از نمونه‌های این نوع مناطق می‌توان به کمربند آتشفشانی شمال شیلی اشاره کرد. از کانسارهای این منطقه کانسار لاکویا در شیلی است که بخشی از سیستم فلزات قیمتی اپی‌ترمالی در کمربند آتشفشانی ترشیری شمال

Asian Conference on Remote Sensing, November 26-30, Pattaya Thailand.

۵- نتیجه گیری

در نهایت با توجه نتایج به دست آمده، احتمال حضور کانی‌سازی اپی‌ترمال سولفید بالا در منطقه بالا است که این کانی‌سازی به طور عمده به وسیله گسل‌های شرقی غربی منطقه کنترل شده است. در اکثر کانسارهای شاخص اپی‌ترمال که قبلاً ذکر شد، گسل‌ها یکی از منابع کنترل‌کننده مایعات هیدروترمال‌اند. یکی دیگر از نکات مهم در این کانسارها شکل‌گیری طلا در محیط سیلیس و کوارتزهای حفره‌ای است. سیلیس حفره‌ای در این کانسارها در میان آلتراسیون آرژلیک پیشرفته به وجود می‌آید و در مرحله بعد ته‌نشینی طلا در این سیلیس اتفاق می‌افتد. اینکه کانی‌سازی در منطقه بالوقیه به تشکیل شرایط مناسبی برای انباشت عنصر طلا در مرکز سیستم منجر شده است یا خیر نیازمند بررسی‌های بیشتر از جمله تعیین دقیق محل خروج مایعات و موقعیت توده‌های نفوذی و تعیین سن واحدهای موجود در منطقه است. با توجه به وجود کوارتز حفره‌دار در منطقه که یکی از مهم‌ترین نشانه‌های کانسارهای طلای اپی‌ترمال سولفید بالا بوده و معمولاً در مرکز این نوع سیستم‌های کانی‌زایی تشکیل می‌شود، می‌توان برای مطالعات بعدی امیدوار بود. در هر صورت شواهد نشان‌دهنده حضور سیستم اپی‌ترمال سولفید بالا با عناصر و آلتراسیون‌های مرتبط در محل مورد مطالعه است و این سیستم مشابهت‌های زیادی با انواع کانسارهای طلای شاخص در نقاط دیگر جهان دارد. در نهایت منطقه آلتراسیونی میانی نشان داده شده در شکل ۶ برای مطالعات بعدی پیشنهاد می‌شود.

۶- مراجع

- [5] Fotouhi, M. (1994). "Evaluation of Geothermal Potential of Sabalan Region, Iran". I.R.Iran. Ministry of Energy, Report No. 3
- [6] Bogie, I., Cartwright, A. J., Khosrawi, K., Talebi, B., and Sahabi, F. (2000). "The Meshkin Shahr geothermal prospect, Iran". Proceedings, World Geothermal Congress, 997-1002.
- [7] Mia, M. B., and Fujimitsu, Y. (2012). "Mapping hydrothermal altered mineral deposits using Landsat7 ETM+ image in and around Kuju volcano, Kyushu, Japan". Journal of Earth System Science, 121(4): 1049-1057.
- [8] Bedini, E., Van Der Meer, F., and Van, F. (2009). "Ruitenbeek Use of HyMap imaging spectrometer data to map mineralogy in the Rodalquilar caldera, southeast Spain". International Journal of Remote Sensing, 30(2): 327-348.
- [9] Gabr, S., Ghulam, A., and Kusky, T. (2010). "Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data". Ore Geology Reviews, 38: 59-69.
- [10] Hunt, G. R., and Ashley, P. (1979). "Spectra of altered rocks in the visible and near infrared". Economic Geology, 74: 1613-1629
- [11] Pour, B. A., Hashim, M., and Marghany, M. (2011). "Using spectral mapping techniques on short wave infrared bands of ASTER remote sensing data for alteration mineral mapping in SE Iran". International Journal of the Physical Sciences, 6(4): 917-929.
- [12] Rowan, L. C., Schmidt, R. G., and Mars, J. C. (2006). "Distribution of hydrothermally altered rocks in the Reko Diq, Pakistan mineralized area based on spectral analysis of ASTER data". Remote Sensing Environment, 104: 74-87.
- [13] Martín, G., and Plaza, A. (2012). "Spatial-Spectral Preprocessing Prior to Endmember Identification and Unmixing of Remotely Sensed Hyperspectral Data". IEEE Journal of Selected Topics In Applied Earth Observations And Remote Sensing, 5(2): 380-395.
- [14] Plaza, J., and Hendrix, E. M. T. (2011). "On endmember identification in hyperspectral images without pure pixels: a comparison of algorithms". Journal of Mathematical Imaging and Vision, 42: 163-175.
- [15] Bedini, E. (2020). "The use of hyperspectral remote sensing for mineral exploration: a review". Journal of Hyperspectral Remote Sensing, 7(4): 189-211. DOI: 10.29150/jhrs.v7.4.p189-211.
- [1] Dostal, J., and Zebri, M. (1978). "Geochemistry of Savalan volcano (northwestern Iran)". Chemical Geology, 22: 31-42.
- [2] Ghalamghash, J., Mousavi, S. Z., Hassanzadeh, J., and Schmitt, A. K. (2016). "Geology, zircon geochronology, and petrogenesis of Sabalan volcano (northwestern Iran)". Journal of Volcanology and Geothermal Research, 327: 192-207.
- [3] Nouri, T., and Oskouei, M. M. (2016). "Processing of Hyperion data set for detection of indicative minerals using a hybrid method in Dost-Bayli, Iran". International Journal of Remote Sensing, 37(20): 4923-4947.
- [4] Nouri, T., and Oskouei, M. M. (2012). "Detection of the geothermal alterations and thermal anomalies by processing of remote sensing data, Sabalan, Iran". 33rd

- and Pawlowsky-Glahn, V. (2000). "Logratio analysis and compositional distance". *Mathematical Geology*, 32(3): 271-275.
- [30] Buccianti, A., and Pawlowsky-Glahn, V. (2005). "New perspectives on water chemistry and compositional data analysis". *Mathematical Geology*, 37(7): 703-727.
- [31] Chayes, F. (1960). "On correlation between variables of constant sum". *Journal of Geophysical Research*, 65(12): 4185-4193.
- [32] Egozcue, J. J., and Pawlowsky-Glahn, V. (2005). "Groups of parts and their balances in compositional data analysis". *Mathematical Geology*, 37(7): 795-828.
- [33] Egozcue, J. J., and Pawlowsky-Glahn, V. (2016). "What are compositional data and how should they be analyzed?". *Boletín de Estadística e Investigación Operativa*, 32: 5-29.
- [34] Egozcue, J. J., Pawlowsky-Glahn, V., Mateu-Figueras, G., and Barceló-Vidal, C. (2003). "Isometric logratio transformations for compositional data analysis". *Mathematical Geology*, 35(3): 279-300.
- [35] Filzmoser, P., Hron, K., and Reimann, C. (2009). "Univariate statistical analysis of environmental (compositional) data: problems and possibilities". *Science of the Total Environment*, 407(23): 6100-6108.
- [36] Filzmoser, P., Hron, K., and Templ, M. (2018). "Applied Compositional Data Analysis with Worked Examples in R". Springer, New York.
- [37] Miesch, A. (1969). "The constant sum problem in geochemistry Computer applications in the earth sciences". Springer, 161-176.
- [38] Thió-Henestrosa, S., and Martín-Fernández, J. (2005). "Dealing with compositional data: the freeware CoDaPack". *Mathematical Geology*, 37(7): 773-793.
- [39] Alberti, A., Chiaramonti, P., Batistini, G., Nicoletti, M., Petrucciani, C., and Sinigoi, S. (1976). "Geochronology of eastern Azerbaijan volcanic plateau (North-West Iran)". *Social Italian Mineralogy and Petrology*, 32: 579-589.
- [40] Jamali, H., Dilek, Y., Daliran, F., Yaghubpur, A., and Mehrabi, B. (2010). "Metallogeny and tectonic evolution of the Cenozoic Ahar-Arasbaran volcanic belt, northern Iran". *International Geology Review*, 52(4-6): 608-630.
- [41] Rouskov, K., Popov, K., Stoykov, S., and Yamaguchi, Y. (2005). "Some applications of the remote sensing in geology by using of ASTER images". Scientific Conference, SES, 10-13 June, Varna, Bulgaria.
- [42] Goetz, A. F. H., Rock, B. N., and Rowan, L. C. (1983). [16] Gao, L., Yao, D., Li, Q., Zhuang, L., and Bioucas-Dias, J. (2017). "A New Low-Rank Representation Based Hyperspectral Image Denoising Method for Mineral Mapping". *Remote Sensing*, 9: 1145.
- [17] Hirai, A., and Tonooka, H. (2019). "Mineral discrimination by combination of multispectral image and surrounding hyperspectral image". *Journal of Applied Remote Sensing*, 13(2): 024517.
- [18] Kruse, F., Baugh, W., and Perry, S. (2015). "Validation of DigitalGlobe WorldView-3 Earth imaging satellite shortwave infrared bands for mineral mapping". *Journal of Applied Remote Sensing*, 9(1): 096044.
- [19] O'Donnell, R., and Partington, G. (2011). "Resource assessment using GIS modelling of orogenic gold mineralisation potential in New Zealand". NZ AusIMM Conference Proceedings.
- [20] El-Magd, I. A., Mohy, H., and Basta, F. (2015). "Application of remote sensing for gold exploration in the Fawakhir area, Central Eastern Desert of Egypt". *Arabian Journal of Geosciences*, 8(6): 3523-3536.
- [21] Jimenez-Espinosa, R., Sousa, A. J., and Chica-Olmo, M. (1993). "Identification of geochemical anomalies using principal component analysis and factorial kriging analysis". *Journal of Geochemical Exploration*, 46(3): 245-256.
- [22] Zuo R., Xia Q., and Wang, H. (2013). "Compositional data analysis in the study of integrated geochemical anomalies associated with mineralization". *Journal of Geochemical Exploration*, 28: 202-211.
- [23] Filzmoser, P., and Hron, K. (2009). "Correlation analysis for compositional data". *Mathematical Geosciences*, 41: 905-919.
- [24] Aitchison, J. (1981). "A new approach to null correlations of proportions". *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 13(2): 175-189.
- [25] Aitchison, J. (1983). "Principal component analysis of compositional data". *Biometrika*, 70(1): 57-65.
- [26] Aitchison, J. (1984). "The statistical analysis of geochemical compositions". *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 16(6): 531-564.
- [27] Aitchison, J. (1986). "The statistical analysis of compositional data". Chapman & Hall, London, pp. 416.
- [28] Aitchison, J. (1999). "Logratios and natural laws in compositional data analysis". *Mathematical Geology*, 31(5): 563-580.
- [29] Aitchison, J., Barceló-Vidal, C., Martín-Fernández, J.,

- [54] Rockwell, B. W. (2000). "The Goldfield Mining District, Nevada—An acid-sulfate bonanza gold deposit, in Floyd F. Sabins, ed., *Guidebook for Field Trip to the Basin and Range*". Fourteenth International Conference for Applied Geologic Remote Sensing, Las Vegas, Nevada, USA, November 6-8, pp. 22.
- [55] Ashley, R. P. (1990). "The Goldfield gold district, Esmeralda and Nye Counties, Nevada, in *Epithermal Gold Deposits— Part 1*". U.S. Geological Survey Bulletin, 1857: H1-H7.
- [56] Ziaii, M., Pouyan, A. A., and Ziaei, M. (2009). "Neuro-fuzzy modeling in mining geochemistry: Identification of geochemical anomalies". *Journal of Geochemical Exploration*, 100(1): 25-36.
- [57] Ziaii, M., DoulatiArdejani, F., Ziaei M., and Soleymani A. A. (2012). "Neuro-fuzzy modeling based genetic algorithms for identification of geochemical anomalies in mining geochemistry". *Applied Geochemistry*, 27(3): 663-676.
- [58] Ziaii, M., Safari, S., Timkin, T., Voroshilov, V., and Yakich, T. (2019). "Identification of geochemical anomalies of the porphyry-Cu deposits using concentration gradient modelling: A case study, Jebal-Barez area, Iran". *Journal of Geochemical Exploration*, 199: 16-30.
- [59] White, N. C., and Hedenquist, J. W. (1995). "Epithermal gold deposits: styles, characteristics, and exploration". *Economic Geology, Newsletter*, 23: 9-13.
- [60] Georgieva, S., and Velinova, N. (2012). "Alunite from the advanced argillic alterations in the Chelopech high-sulphidation epithermal Cu-Au deposit, Bulgaria: chemistry, morphology and genetic significance". *Geochemistry, Mineralogy and Petrology*, 49: 17-31
- [61] Aoki, M. (1991). "Mineralogical features and genesis of alunite solid solution in high temperature magmatic-hydrothermal systems". *Geological Survey of Japan*, 277: 31-32.
- [62] Aoki, M., Comsti E. C., Lazo F. B., and Matsuhisa Y. (1993). "Advanced argillic alteration and geochemistry of alunite in an evolving hydrothermal system at Baguio, northern Luzon, Phillipines". *Resource Geology*, 43: 155-164.
- [63] Arribas, A., Cunningham, C. G., Rytuba, J. J., Rye, R. O., Kelly, W. C., McKee, E. H., Podwysocky, M. H., and Tosdal, R. M. (1995). "Geology, geochronology, fluid inclusions, and stable isotope geochemistry of the Rodalquilar Au alunite deposit, Spain". *Economic Geology*, 90: 795-822.
- [64] Deyell, C., and Dipple, G. M. (2005). "Equilibrium mineral-fluid calculations and their application to the "Remote sensing for exploration; an overview". *Economic Geology*, 78: 573-590.
- [43] Crosta, A. P., Filho, C. R. D. S., Azevedo, F., and Brodie, C. (2003). "Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis". *International Journal of Remote Sensing*, 24 : 4233-4240.
- [44] Plaza, A., Martínez, P., Gualtieri, J. A., and Pérez, M. R. (2002). "Automated identification of endmembers from hyperspectral data using mathematical morphology". *Image and signal processing for remote sensing VII, Proceedings of SPIE*, 4541: 278-287.
- [45] Amer, R., Mezayen, A. E., and Hasanein, M. (2016). "ASTER spectral analysis for alteration minerals associated with gold mineralization". *Ore Geology Reviews*, 75: 239-251
- [46] Mars, J. C., and Row, L. C. (2011). "ASTER spectral analysis and lithologic mapping of the Khanneshin carbonatite volcano, Afghanistan". *Geosphere*, 7(1): 276-289.
- [47] Sabbaghi, H., and Moradzadeh, A. (2018). "ASTER Spectral Analysis for Host Rock Associated with Porphyry Copper-molybdenum Mineralization". *Journal of Geological Society of India*, 91: 627-638.
- [48] Keshava, N. (2003). "A survey of spectral unmixing algorithms". *Lincoln Laboratory Journal*, 14(1): 55-78.
- [49] Mezned, N., Abdeljaoued, S., and Boussema, M. R. (2007). "ASTER Multispectral Imagery for Spectral Unmixing based Mine Tailings Cartography in the North of Tunisia". Paper Presented at the Annual Meeting for the Remote Sensing & Photogrammetry Society, Newcastle Upon Tyne, UK, September 11-14.
- [50] Ito, A., and Wagai, R. (2017). "Global distribution of clay-size minerals on land surface for biogeochemical and climatological studies". *Scientific Data*, 4: 170103,
- [51] Rocha, W. F. C., Nogueira, R., Silva, G. E. B., Queiroz, S. M., and Sarmanho, G. F. (2012). "A comparison of three procedures for robust PCA of experimental results of the homogeneity test of a new sodium diclofenac candidate certified reference material". *Microchemical Journal*, 109: 112-116.
- [52] Filzmoser, P., Hron, K., and Reimann, C. (2009b). "Principal component analysis for compositional data with outliers". *Environmetrics*, 20: 621-632.
- [53] Dempster, M., Dunlop, P., Scheib, A., and Cooper, M. (2013). "Principal component analysis of the geochemistry of soil developed on till in Northern Ireland". *Journal of Maps*, 9: 373-389.

- [76] Berger, B.R., Anderson, R.E., Phillips, J.D., and Tingley, J.V.; 2005; "Plate-boundary transverse deformation zones and their structural roles in localizing mineralization in the Virginia City, Goldfield, and Silver Star mining districts, Nevada, in Rhoden, H.N., Steininger, R.C., and Vikre, P.G., eds", Geological Society of Nevada Symposium 2005, Window to the World, Reno, Nevada, May 2005, p. 269-281.
- [77] Vikre, P. G., Fleck, R. J., and Rye, R. O. (2005). "Ages and geochemistry of magmatic hydrothermal alunites in the Goldfield district, Esmeralda County, Nevada". U.S. Geological Survey Open-File Report OF2005-1258, 1 sheet.
- [78] Oviedo, L., Fuster, N., Tschischow, N., Ribba, L., Zuccone, A., Grez, E., and Aguilar, A. (1991). "General geology of La Coipa precious metal deposit, Atacama, Chile". Economic Geology, 86: 1287-1300.
- [79] Bissig, T., Clark, A.H., Rainbow, A., and Montgomery, A. (2015). "Physio-graphic and tectonic settings of high-sulfidation epithermal gold-silver deposits of the Andes and their controls on mineralizing processes". Ore Geology Reviews, 65: 327-364.
- [80] Yousefi, M., Kamkar-Rouhani, A. and Carranza, E. J. M. (2014). "Application of staged factor analysis and logistic function to create a fuzzy stream sediment geochemical evidence layer for mineral prospectivity mapping". Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 14: 45-58.
- [81] Yousefi, M., and Carranza, E. J. M. (2015). "Fuzzification of continuous-value spatial evidence for mineral prospectivity mapping". Computers & Geosciences, 74: 97-109.
- [82] Yousefi, M., and Nykänen, V. (2016). "Data-driven logistic-based weighting of geochemical and geological evidence layers in mineral prospectivity mapping". Journal of Geochemical Exploration, 164: 94-106.
- [65] Stoffregen, R. E., and Alpers, C. N. (1992). "Observations on the unit-cell dimensions, H₂O contents, and δD values of natural and synthetic alunite". American Mineralogist, 77: 1092-1098
- [66] Rye, R. O., Bethke, P. M., and Wasserman, M. D. (1992). "The stable isotope geochemistry of acidsulfate alteration". Economic Geology, 87: 225-262.
- [67] Bishop, J. L., and Murad, E. (2005). "The visible and infrared spectral properties of jarosite and alunite". American Mineralogist, 90(7): 1100-1107.
- [68] Hedenquist, J. W., Matsuhisa, Y., Izawa, E., White, N. C., Giggenbach, W. F., and Aoki, M. (1994). "Geology, geochemistry, and origin of high sulfidation Cu-Au mineralization in the Nansatsu district, Japan". Economic Geology, 89: 1-30.
- [69] Ransome, F. L. (1907). "The association of alunite with gold in the Goldfield district, Nevada". Economic Geology, 2: 667-692.
- [70] Barton, P. B. Jr., and Skinner, B. J. (1979). "Sulfide mineral stabilities, in Barnes, H. L., ed., Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits". Wiley Interscience, New York, 278-403.
- [71] Hemley, J. J., Hostetler, P. B., Gude, A. J., and Mountjoy, W. T. (1969). "Some stability relations of alunite". Economic Geology, 64: 599-612.
- [72] Knight, L. E. (1977). "A Thermochemical Study of Alunite, Enargite, Luzonite, and Tennantite Deposits". Economic Geology, 72: 1321-1336.
- [73] McQueen, K. G. (2005). "Ore deposit types and their primary expressions". In Regolith Expression of Australian Ore Systems, A Compilation of Exploration Case Histories With Conceptual Dispersion, Process and Exploration Models, Butt, C. R. M., Robertson, I. D. M., Scott, K. M., Cornelius, M., Eds., Cooperative Research Centre for Landscape Environments and Mineral Exploration, Millaa Millaa, Australia, 1-14.
- [74] Gray J., and Coolbaugh, M. (1994). "Geology and geochemistry of Summitville, Colorado: An epithermal acid-sulfate deposit in a volcanic dome". Economic Geology, 89: 1906-1923.
- [75] Blakely, R. J., John, D. A., Box, S., Berger, B. R., Fleck, R. J., Ashley, R. P., Newport, G. R., and Heinemeyer, G. R. (2007). "Crustal controls on magmatic-hydrothermal systems: A geophysical comparison of White River, Washington, with Goldfield, Nevada". Geosphere, 3: 91-107.

¹ Remote sensing² Assemblage³ Endmember⁴ Pixel purity index⁵ Artificial neural network⁶ Support vector machine⁷ Parallelepiped⁸ Spectral angle mapper⁹ Maximum likelihood

- ¹⁰ Minimum distance
- ¹¹ Mahalanobis distance
- ¹² K-means
- ¹³ Floating threshold
- ¹⁴ Principal component analysis
- ¹⁵ RPCA
- ¹⁶ Eastern Pontide arc
- ¹⁷ Scene
- ¹⁸ Layer stacking
- ¹⁹ Noise whitening
- ²⁰ Hyperspectral data
- ²¹ matched filtering
- ²² Sigmoid
- ²³ minimum output activation threshold
- ²⁴ Radial basis function
- ²⁵ Classification probability threshold
- ²⁶ Pyramid reclassification threshold
- ²⁷ Maximum STDV from mean
- ²⁸ Loadings
- ²⁹ steam-heated



Imam Khomeini International University
Vol. 6, No. 4, Winter 2021, pp. 1-4



نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

DOI: 10.30479/JMRE.2021.13287.1411

Research Paper

Identification of the Metallic-Element Anomalies in Baluqaya Region Using Remote Sensing and Comparison of the Results with Geochemical Data

Nouri T.^{1*}, Beiglari B.², Aryafar A.³

1- Assistant Professor, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili (UMA), Ardabil, Iran
t.nouri@uma.ac.ir

2- M.Sc Student, Dept. of Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
babaak.be.ard@gmail.com

3- Associate Professor, Dept. of Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
aaryafar@birjand.ac.ir

(Received: 14 May 2020, Accepted: 11 Oct 2020)

Abstract: Northwestern part of Iran is one of the important metal bearing zones and the Baluqaya region which is one of the interesting parts of this area, was selected as the study area. In this research the endmembers were extracted from ASTER dataset and then were compared with spectral library to find matching reference minerals for them. Subsequently, the abundances of endmembers were extracted using the matched filtering technique. Then, the classification and distribution maps of minerals were extracted by implementing the floating threshold as a novel technique on endmembers abundance maps. The mineralogical data of the study area are also involved in the floating threshold method. This method classifies areas with high abundance values of endmembers that probably have high potential for mineralization. The results delineated argillic and advanced argillic alterations at the midwest of the study area. By performing of robust principal component analysis (RPCA) on ICP-MS geochemical data, correlation of gold concentrations with that of antimony and arsenic was detected in the remote sensing derived alteration area. Finally, it is concluded that a possible high sulfidation epithermal mineralization system has developed in the study area.

Keywords: Remote sensing, Geochemistry, Floating threshold, RPCA, Hydrothermal alterations.

INTRODUCTION

Of the 12 active gold mines in Iran, 4 are located in the north-western part. A number of exploratory works have been carried out in this region by the ministry of industry, mine and trade during the past decades and the Baluqaya region has been one of the target areas. Some geochemical and remote sensing studies have been done in this region [1-4]. Indicative minerals of the alteration systems have unique spectral features which makes them identifiable by remote sensing techniques [5]. Numerous researchers have implemented multispectral remote sensing data for identification of alterations (especially hydrothermal alteration) in recent years [6-8] and different methods are used for classification of the remote sensing data (e. g. artificial neural network, support vector machine, Spectral angle mapper, etc.). In this research



a classification procedure namely “floating threshold” was used which employs the surficial mineralogical information beside the extracted abundance maps for classification of the data set. The results obtained from remote sensing data analysis must be geochemically consistent with the study area [9]. One of the efficient techniques for detection of the geochemical anomalies and determining the relationship between trace elements is principal component analysis [10], the robust version of which is resistant to the outlier data.

This research aims to evaluate the potential of the Baluqaya region for possible mineralization using ASTER data as well as geochemical ground truth data.

METHODS

Floating threshold

The floating threshold method was developed in this research for efficiently classifying the ASTER data set. The pixel purity index method was implemented for extraction of the endmembers and the abundances of the endmembers were calculated using matched filtering method. The extracted endmembers were compared with reference spectra and alunite, kaolinite, smectite and illite were selected as matching minerals with endmembers. The extracted endmembers are present inside the pixels of the data set with varying frequency values. In a simple approach, the data set is classified in a way that each pixel is assigned to an endmember having maximum frequency inside it. This method classifies all of the data set pixels. Application of a method which classifies only the important pixels can be helpful in exploratory studies and in this regard, the floating threshold method was implemented. In this method, first the mean and standard deviation of the estimated abundance values for each endmember are calculated. In the next phase, different threshold values from $\bar{X} + S$ to $\bar{X} + 3S$ with the step size of 0.25 are considered for classification of the data set. For a given threshold value, a pixel is classified only if the maximum abundance value of an endmember inside it, is higher than the specified threshold value and otherwise, it remains unclassified. The larger the threshold value, the lower the number of classified pixels. In this research the XRD data of the study area were used as control points for classification procedure so that the maximum threshold values which lead the adequate percentage of XRD samples to be fallen inside the classified areas, were selected as optimal thresholds.

Robust principal component analysis

Principal component analysis is an efficient tool to project the high- dimensional data to the lower dimensional space. This method finds the principal components of the data set based on the variance and covariance matrices [11]. Due to the compositional nature of geochemical data and the effect of outlier data on classical PCA, application of the robust principal component analysis (RPCA) is more advantageous. The RPCA method uses minimum covariance determinant (MCD) instead of classical covariance matrix [11]. Different logratio transformation methods have been developed for transformation of the compositional data from the simplex into the multidimensional real space including additive-logratio (alr) described by equation 1, centered-logratio (clr) described by equation 2, and isometric logratio (ilr) described by equation 3 [12].

$$\text{alr}(x) = y_i = \ln \frac{x_i}{x_D}, \quad (i = 1, 2, \dots, D - 1) \quad (1)$$

$$\text{clr}(x) = y_i = \ln \frac{x_i}{\sqrt{\prod_{i=1}^D x_i}}, \quad (i = 1, 2, \dots, D - 1) \quad (2)$$

$$\text{ilr}(x) = y_i = \sqrt{\frac{D-i}{D-i+1}} \ln \frac{x_i}{\sqrt{\prod_{j=i+1}^D x_j}}, \quad (i = 1, 2, \dots, D - 1) \quad (3)$$

FINDINGS AND ARGUMENT

By implementation of the floating threshold method on abundance maps of the endmembers, the classified map of the study area was extracted (Figure 1).

In this research, the RPCA analysis was performed by using of R software. The compositional geochemical

data were first transformed by *ilr*, and then the *clr* transformation was implemented on obtained loadings. since the extracted eigenvalues of two first PCs, are at acceptable level ($PC1= 0.94$ & $PC2= 0.80$), they can be used for representing the variations in the study area. As can be seen in table 1, $PC1$ indicates the correlation between Au, As, Ag, and Cd as well as $PC2$ indicates the correlation of Au, As, Mo, Sb, and W. In the Figure 2, the scores obtained for each sample by $PC1$ and $PC2$, are plotted. As can be seen in this figure, samples with the more negative loadings are located in the western part of the study area which corresponds to the identified alteration area in the middle part of the Figure 1.

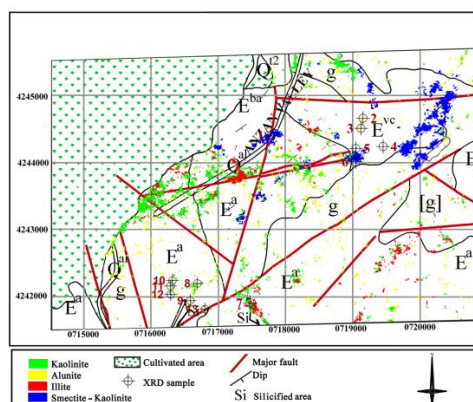


Figure 1. Classification map of the study area using floating threshold method along with the XRD sample locations, Faults, lithological units, and silicified areas

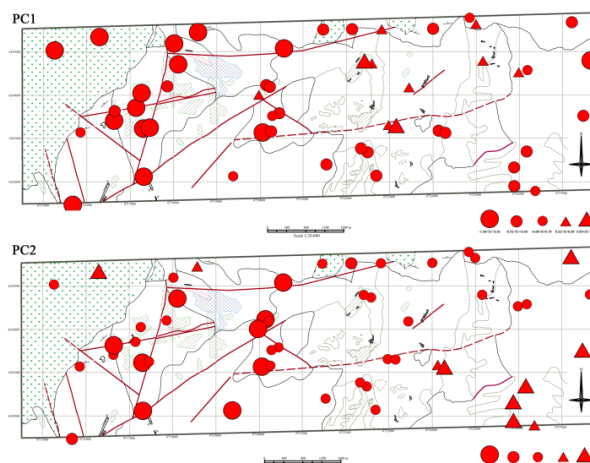


Figure 2. Plotted scores of samples for $PC1$ and $PC2$

Table 1. Loadings of the RPCA components

RPCA LOADINGS						
	Comp.1	Comp.2	Comp.3	Comp.4	Comp.5	Comp.6
Au	-0.41527	-0.34108	0.714606	0.141652	-0.05773	0.222677
Mn	0.111254	0.175319	0.098769	0.200008	-0.04571	-0.09192
Pb	-0.02957	-0.09002	0.038981	-0.20353	0.00734	-0.28478
Hg	0.523285	0.092791	0.240246	0.078096	0.452559	0.100797
Ag	-0.34065	0.449608	-0.10931	-0.59444	0.225412	0.274457
As	-0.35858	-0.20822	-0.54012	0.482749	0.404073	0.160407
Bi	0.049391	-0.06242	-0.0127	0.086386	0.10065	-0.63917
Co	0.102118	0.249645	-0.00204	0.26659	-0.10614	0.169393
Cu	-0.01293	0.241607	0.005712	0.191297	-0.21898	0.261969
Mo	0.238381	-0.36631	-0.32173	-0.11118	-0.5711	0.249663
Sb	-0.05997	-0.40262	-0.05997	-0.29392	0.216604	-0.10463
Zn	0.103972	0.168609	0.065282	0.060113	-0.06199	0.017885
Sn	0.3174	0.026456	-0.04921	-0.07332	0.045029	0.022328
W	0.091328	-0.22982	-0.02141	-0.28343	-0.03488	0.049833
Cd	-0.32016	0.296456	-0.0471	0.052926	-0.35512	-0.40891
Eigenvalues	0.946587	0.803311	0.524316	0.278355	0.148614	0.100366

CONCLUSIONS

The results of RPCA indicate the association of the Au with As and Sb in the study area and the Argillic and advanced argillic alterations were identified by ASTER data processing. Therefore, the epithermal gold mineralization is probable in this area. The hollow quartz is also seen in the study area which can be another evidence for possible high-sulfide epithermal mineralization. The high sulfide epithermal mineralization may have been developed in the study area as a result of hydrothermal fluid emerging from faults with east-west direction.

REFERENCES

- [1] Dostal, J., and Zebri, M. (1978). "Geochemistry of Savalan volcano (northwestern Iran)". *Chemical Geology*, 22: 31-42.
- [2] Ghalamghash, J., Mousavi, S. Z., Hassanzadeh, J., and Schmitt, A. K. (2016). "Geology, zircon geochronology, and petrogenesis of Sabalan volcano (northwestern Iran)". *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 327: 192-207.
- [3] Nouri, T., and Oskouei, M. M. (2016). "Processing of Hyperion data set for detection of indicative minerals using a hybrid method in Dost-Bayli. Iran". *International Journal of Remote Sensing*, 37(20): 4923-4947.
- [4] Nouri, T., and Oskouei, M. M. (2012). "Detection of the geothermal alterations and thermal anomalies by processing of remote sensing data, Sabalan, Iran". 33rd Asian Conference on Remote Sensing, November 26-30, Pattaya Thailand.
- [5] Mia, M. B., and Fujimitsu, Y. (2012). "Mapping hydrothermal altered mineral deposits using Landsat7 ETM+ image in and around Kuju volcano, Kyushu, Japan". *Journal of Earth System Science*, 121(4): 1049-1057.
- [6] Bedini, E., Van Der Meer, F., and Van, F. (2009). "Ruitenbeek Use of HyMap imaging spectrometer data to map mineralogy in the Rodalquilar caldera, southeast Spain". *International Journal of Remote Sensing*, 30(2): 327-348.
- [7] Gabr, S., Ghulam, A., and Kusky, T. (2010). "Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data". *Ore Geology Reviews*, 38: 59-69.
- [8] Pour, B. A., Hashim, M., and Marghany, M. (2011). "Using spectral mapping techniques on short wave infrared bands of ASTER remote sensing data for alteration mineral mapping in SE Iran". *International Journal of the Physical Sciences*, 6(4): 917-929.
- [9] El-Magd, I. A., Mohy, H., and Basta, F. (2015). "Application of remote sensing for gold exploration in the Fawakhir area, Central Eastern Desert of Egypt". *Arabian Journal of Geosciences*, 8(6): 3523-3536.
- [10] Jimenez-Espinosa, R., Sousa, A. J., and Chica-Olmo, M. (1993). "Identification of geochemical anomalies using principal component analysis and factorial kriging analysis". *Journal of Geochemical Exploration*, 46(3): 245-256.
- [11] Zuo R., Xia Q., and Wang, H. (2013). "Compositional data analysis in the study of integrated geochemical anomalies associated with mineralization". *Journal of Geochemical Exploration*, 28: 202-211.
- [12] Egozcue, J. J., Pawlowsky-Glahn, V., Mateu-Figueras, G., and Barceló-Vidal, C. (2003). "Isometric logratio transformations for compositional data analysis". *Mathematical Geology*, 35(3): 279-300.