

مقایسه عملکرد روش‌های SAM- RBD-DPCA و LA در تشخیص و تفکیک هاله‌های دگرسانی ذخایر مس پورفیری (مطالعه موردی، منطقه میدوک- استان کرمان)

مریم فرمهینی فراهانی^{۱*}

۱- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، کرج، ایران

(دریافت: مرداد ۱۳۹۴، پذیرش: آذر ۱۳۹۶)

چکیده

در این تحقیق به منظور اکتشافات مقدماتی ذخایر مس و مولیبدن پورفیری از روش‌های مبتنی بر داده‌های تصاویر رقومی ماهواره‌ای استفاده شد و در این راستا به فاکتورهای مهمی همچون نوع و نحوه زون‌بندی هاله‌های دگرسانی، حضور گوسان و مناطق برخوردار از درجه خطوارگی بالا و حاوی گسل‌های حلقوی توجه گردید بر این اساس به منظور مقایسه میزان بازدهی و کارایی روش‌های متنوع دورسنجی در تفکیک و تمایز عوارض سطحی و دگرسانی‌ها، در مرحله پی‌جویی، از روش‌های تحلیل مؤلفه‌های اصلی هدایت‌شده، باند جذبی نسبی، روش نقشه‌بردار زاویه طیفی و روش الگوریتم منطقی استفاده شد. از طرفی با توجه به اهمیت گسل‌ها و ساختارهای خطی در ایجاد کانی‌سازی و دگرسان نمودن واحدهای سنگی، با کمک فیلترینگ در راستاهای مختلف، اقدام به استخراج خطواره‌ها گردید بر این اساس مشخص شد بهترین نتیجه زمانی حاصل می‌گردد که عمل فیلترگذاری عمود بر نیروها و تنش‌های اصلی منطقه اعمال شود. همچنین به منظور صحت سنجی روش‌ها اقدام به برداشت ۹۲ نمونه از سطح منطقه گردید؛ و بر این اساس مشخص شد روش نقشه‌بردار زاویه طیفی برای معرفی دگرسانی فیلیک و آرژبلیک و متد تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای تشخیص زون پروپیلیتیک و نواحی گوسان از بالاترین کارایی برخوردار است. روش باند جذبی نسبی در تفکیک آلتراسیون آرژبلیک و فیلیک و متد نقشه‌بردار زاویه طیفی برای پروپیلیتیک و گوسان در درجه دوم اهمیت قرار دارد. لازم به ذکر است که تمام موارد مذکور بر روی محدوده معدنی میدوک اعمال گردید.

کلید واژه‌ها

هاله‌های دگرسانی، گوسان، ذخایر مس و مولیبدن پورفیری، روش‌های دورسنجی، معدن میدوک

* عهده دار مکاتبات: mffarahani@yahoo.com

۱- مقدمه

کانسار مس میدوک در فاصله ۴۲ کیلومتری شمال شرق شهرستان شهربابک در استان کرمان قرار گرفته است راه ارتباطی کانسار با شهربابک شامل ۲۷ کیلومتر جاده شوسه درجه ۱ بوده و در کیلومتر ۸۵ جاده انار- شهربابک به آن می‌پیوندد. این معدن در ناحیه کوهستانی قرار گرفته و بلندترین نقطه آن ۲۸۴۲ متر از سطح دریا ارتفاع دارد. طول و عرض جغرافیائی آن حدود $55^{\circ}10'$ و $30^{\circ}25'$ است. در مطالعات ماهواره‌ای و استخراج دگرسانی‌ها از تصاویر سنجنده ASTER با شماره اندکس زیر استفاده شد.

AST_LIB_003_03132002070949_03302002083323

۲-۲- زمین‌شناسی منطقه

کانسار میدوک در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شهربابک، نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ انار و در زون ساختاری ارومیه - دختر واقع شده است. سنگ میزبان کانسار یک پلوتون نیمه عمیق پورفیری با سن میوسن است که از حاشیه توسط ولکانیک‌های ائوسن و سنگ‌های آذرآواری احاطه شده است. این توده نفوذی به شکل دایره مانند و با قطری برابر با ۳۰۰ متر با کشیدگی کمی در راستای شمال جنوب بوده و تأثیر دگرسانی در قسمت‌های مختلف آن به خصوص نواحی مرکزی‌تر، کاملاً مشهود است به طوری که فنوکریست‌های آن عمدتاً سربسیتی و رسی شده‌اند و شدت تأثیر دگرسانی بر سنگ‌ها گاهی در حدی است که ویژگی‌های لیتولوژیک اولیه آنها قابل تشخیص نیستند. علاوه بر واحدهای لیتولوژیک مذکور یک سری دایک‌های پورفیری در منطقه حضور دارند که جوان‌تر از واحدهای قبلی بوده به طوری که آنها را قطع نموده‌اند و از طرفی، کمتر تحت تأثیر دگرسانی واقع شده‌اند و از لحاظ حضور رگچه‌های مینرالیزه فقیر محسوب می‌شوند [۷].

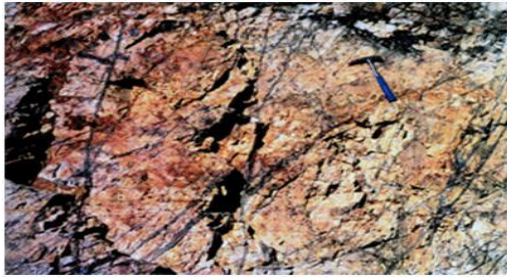
از دیدگاه سنگ‌شناسی واحدهای ولکانیکی منطقه بیشتر دارای ترکیب آندزیت، تراکی آندزیت و آندزیت پورفیری، سنگ‌های آذرآواری از نوع توف‌های خاکستری و توده نفوذی نیمه عمیق و دایک‌ها از جنس دیوریت و میکرو دیوریت هستند. بر اساس مطالعه نمونه‌های حاصل از گمانه‌های اکتشافی، نوع و شدت دگرسانی‌ها، محدوده‌های متأثر از هاله‌های دگرسانی، میزان کانه‌زایی و نوع کانه‌ها در راستای عمقی بررسی و مشخص شده کانه‌سازی اولیه مس در سنگ‌های نفوذی دگرسان شده و همچنین سنگ‌های

علیرغم اینکه پتانسیل یابی معدنی یک تصمیم‌گیری چند معیاری است و مستلزم در نظر گرفتن هم‌زمان چندین نوع نشانگر مکانی است [۱] اما در روند پی‌جویی ذخایر مس پورفیری توجه به حضور و نحوه زون بندی هاله‌های دگرسانی به عنوان یک کلید اکتشافی مهم از درجه اهمیت خاصی برخوردار است [۲] زیرا ژنز این کانسارها ارتباط نزدیک و تنگاتنگی با نفوذ ماگمای حد واسط نیمه عمیق و متعاقب آن تزریق و تأثیر سیالات هیدروترمال در منطقه دارد [۳]. این سیالات بازماندی که به عنوان یک پدیده تأخیری در روند ماگماتیسیم محسوب می‌شوند با اعمال تغییرات شیمیایی بر واحدهای لیتولوژیک منطقه باعث ایجاد هاله‌های دگرسانی می‌گردند که این مسئله، همراه با کانه‌زایی صورت می‌گیرد [۴].

وسعت زیاد و نمود سطحی این هاله‌ها از طرفی، باعث افزایش احتمال شناسایی نواحی مستعد معدنی شده [۵] و از طرف دیگر امکان به کارگیری روش‌های دورسنجی را محیا می‌سازد. حال اگر از دقیق‌ترین و مناسب‌ترین روش‌های دورسنجی جهت شناسایی این زون‌ها استفاده شود میزان خطا در امر اکتشافات مقدماتی کاهش می‌یابد. البته نکته قابل ذکر آنکه، برای نیل به نتایج بهتر، باید به دیگر فاکتورهای اکتشافی، از جمله حضور سنگ میزبان مناسب و مرتبط با این تیپ کانساری، زون ساختاری منطقه، نواحی مناسب تکتونیکی و برخوردار بودن منطقه از درجه خطواری بالا توجه شود [۶]. بر این اساس ابتدا باید با کمک نقشه‌های زمین‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای واحدهای لیتولوژی حد واسط با درصد خطواری بالا را از دیگر نواحی تفکیک نموده و در مرحله بعد به بررسی شواهد سطحی مهم از جمله حضور هاله‌های دگرسانی، نحوه قرارگیری زون‌ها نسبت به یکدیگر و حضور گوسان در منطقه توجه شود. در این پژوهش برای تأیید کارایی روش‌های مطرح‌شده، از منطقه میدوک استان کرمان به عنوان منطقه مدل استفاده شده است.

۲- معرفی مورد مطالعاتی

۲-۱- موقعیت جغرافیایی معدن میدوک



شکل ۲: سنگ به شدت برشی و دگرسان با رگچه‌های سیلیسی

۲-۴- تنوع هاله‌های دگرسانی در میدوک

بر اساس بررسی‌های انجام شده حضور زون‌های دگرسانی پتاسیک، پروپیلیتیک، آرژیلیک و فیلیک (بر اساس مدل لول گیلبرت) در کانسار میدوک تأیید می‌شود [۲]. حضور زون‌های دگرسانی پتاسیک و فیلیک در سطح این محدوده معدنی متأثر از تأثیر فرسایش و بهره‌برداری از معدن است [۸]. در اینجا ابتدا توضیحی مجزا و اجمالی در مورد هر یک از دگرسانی‌های موجود ارائه شده و سپس روش‌هایی که برای تشخیص و تفکیک آنها به کار گرفته شده مطرح گردیده است.

در زون پتاسیک تحت تأثیر آب‌های ماگمایی غنی از یون‌های K^+ و Na^+ پدیده بیوتیتی شدن بیشترین تأثیر را بر روی هورنبلندها و در سطح تماس دیوریت‌ها و ولکانیک‌های منطقه و فلدسپاتی شدن بر پلاژیوکلازها داشته و از نقطه نظر زمانی نظم‌ی از دگرسانی $K \rightarrow Na-K \rightarrow Na$ نشان می‌دهند حضور انیدریت در بعضی از قسمت‌ها معرف میزان بالای فوگاسیته اکسیژن در سیال گرمابی است.

در زون فیلیک تحت تأثیر آب‌های ماگمایی و سطحی کانی‌های سریسیت، پیریت، کوارتز و مقداری ناچیز کلریت و کائولینیت تشکیل شده همچنین حضور رگچه‌های حاوی کوارتز و کانی‌های اپیک و سریسیتی شدن فلدسپات‌ها، به مقدار قابل توجهی مشهود است. زون آرژیلیک در برخی از نواحی معدنی، رخنمون سطحی دارد که از شاخص‌ترین کانی‌های این زون می‌توان به کائولینیت و دیگر کانی‌های رسی اشاره نمود.

در دگرسانی پروپیلیتیک محلول‌های ماگمایی و سطحی غنی از منیزیم، آهن، کلسیم و بی‌کربنات با تأثیر بر سنگ‌های منطقه کانی‌هایی اپیدوت، کلریت، کانی‌های

ولکانیک دگرسان منطقه معدنی مشاهده می‌شود. البته شدت کانی‌سازی در سنگ‌های نفوذی به مراتب بیشتر از سنگ‌های خروجی است به طوری که می‌توان گفت کانی‌سازی مس در کانسار میدوک بستگی زایشی شدیدی با توده‌های نفوذی دیوریت پورفیری دارد (شکل ۱). سن کانه‌زایی در منطقه را بر اساس روش $K-Ar$ و $Rb-Sr$ میوسن میانی تا پسین تخمین زده‌اند.

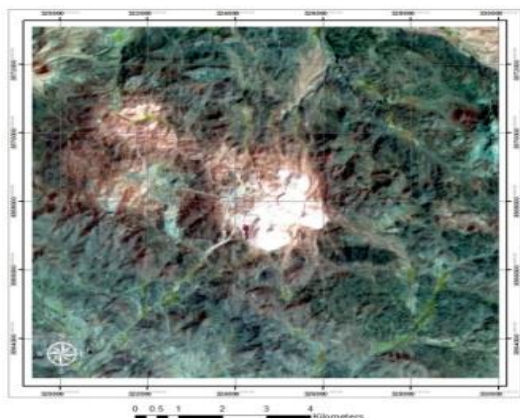


شکل ۱: از سنگ‌های دگرسان شده، تکتونیزه و مینرالیزه

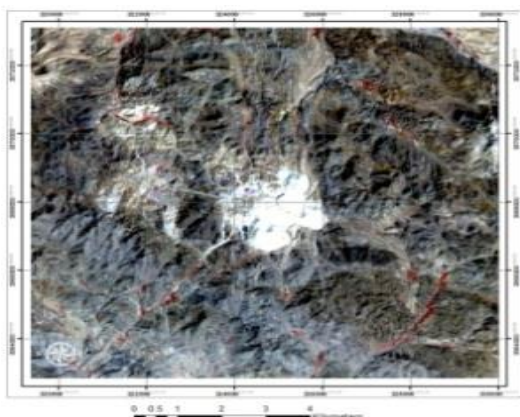
۲-۳- کانه‌زایی در منطقه

کانه‌زایی در میدوک بیشتر مرتبط با توده نفوذی پورفیری و مناطق حد فاصل دگرسانی‌های فیلیک و پتاسیک است کلاهم آهنی (Gossan) کانسار که حاصل انباشتنی کانی‌های اکسیده آهن‌دار شامل لیمونیت، گوتیت و گاه هماتیت بوده به خوبی در منطقه مشهود است. از طرفی گسترش فراوان رگچه‌های سیلیسی مینرالیزه از دیگر نکات قابل توجه در منطقه محسوب می‌شود (شکل ۲). زون‌های کانی‌زایی در راستای قائم به ترتیب شامل زون‌های اکسیدی، سوپرژن، گذری و هیپوژن هستند. ضخامت زون اکسیدان در بخش‌های مرکزی معدن از ۸ تا ۴۰ متر است و کانی‌های مشاهده شده در این زون بیشتر حاصل هوازدگی و تأثیرات ثانویه اعمال شده بر کانه‌های اولیه از جمله پیریت است. بعد از زون اکسیدان زون سوپرژن قرار دارد که بر اساس مطالعات مغزه‌های اکتشافی میانگین ضخامت آن حدود ۱۴۵ متر برآورد شده است از مهم‌ترین و عمده‌ترین کانی‌های موجود در این زون می‌توان به کوولیت، کالکوسیت، پیریت و مولیبدنیت اشاره نمود. در منطقه گذری مهم‌ترین کانه‌های مشاهده شده، کالکوپیریت و کالکوسیت و در منطقه هیپوژن کالکوپیریت و پیریت هستند.

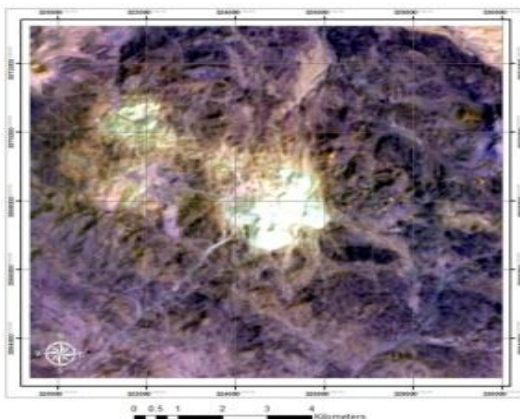
دگرسانی استفاده شد. در این راستا ابتدا تصحیحات هندسی و رادیومتریک بر روی تصاویر اعمال گردید تا با افزایش مغایرت بین روشن‌ترین و تیره‌ترین پدیده‌ها قدرت تشخیص و تمایز عوارض سطحی در محدوده افزایش یابد [۱] سپس برای به دست آوردن یک نمای کلی از منطقه از تصاویر رنگی مرکب True Color و روش ترکیب رنگی مجازی با $RGB = 432,543,831$ استفاده شد (شکل‌های ۴ تا ۷).



شکل ۴: محدوده‌های دگرسانی میدوک بر اساس RGB432

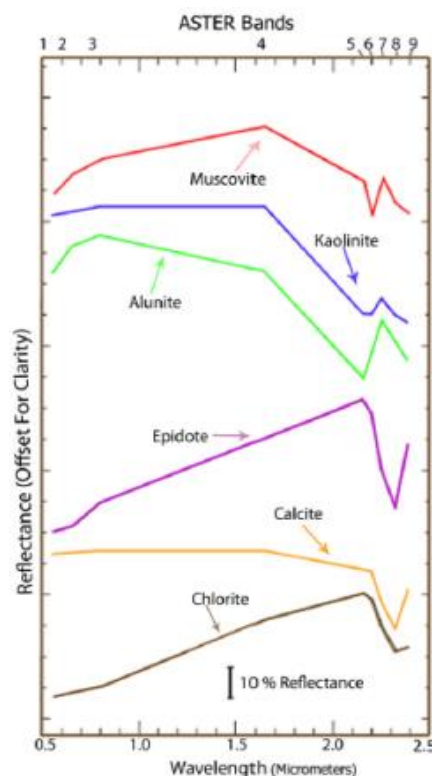


شکل ۵: تصویر True Color محدوده تحت بررسی



شکل ۶: تصویر استر منطقه میدوک بر اساس RGB543

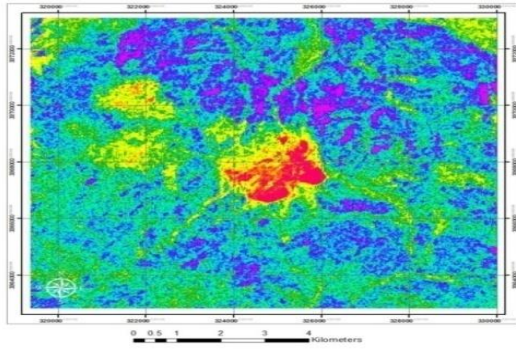
کربناته، زئولیت و آلبیت ایجاد می‌کنند [۲] که به طرف مرکز سیستم، مقدار اپیدوت و کلریت زیاد می‌شود. با توجه به حضور و نقش کانی‌های شاخص در تفکیک و تشخیص هاله‌های دگرسانی در شکل ۳ رفتار انعکاسی و جذبی بعضی از این کانی‌ها در برابر طول موج‌های نوری، در باندهای استر ارائه شده است [۹].



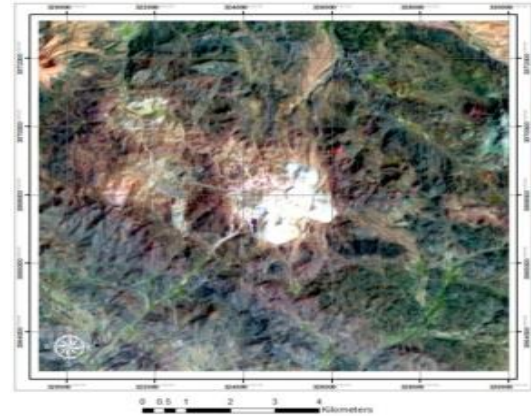
شکل ۳: رفتار طیفی برخی از کانی‌های شاخص دگرسانی‌ها

۳- بررسی‌های دورسنجی در منطقه

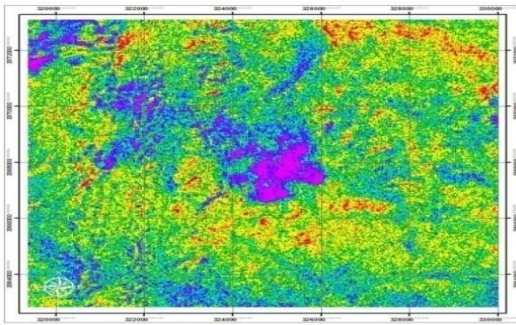
امروزه یکی از روش‌های کارآمد در پروژه‌های معدنی، دورسنجی و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای است چرا که با کمک این روش می‌توان بدون تماس فیزیکی و نمونه‌برداری مستقیم اطلاعات مهمی را از پدیده‌های مختلف زمین که در ارتباط مستقیم با منابع معدنی است به دست آورد [۴] در محدوده‌های پورفیری میزان انرژی منعکس شده، جذب شده و یا عبور یافته سنگ‌ها تحت تأثیر دگرسانی‌ها تغییر می‌کند [۲]. بر این اساس جهت استفاده بهینه از این روش بایستی اطلاعات کافی از رفتار طیفی کانی‌های شاخص زون‌های دگرسانی مرتبط با این ذخایر داشته باشیم. در این تحقیق از داده‌های سنجنده^۱ استر به دلیل قدرت تفکیک مکانی^۲ و طیفی^۳ بالاتر جهت تشخیص و تمایز هاله‌های



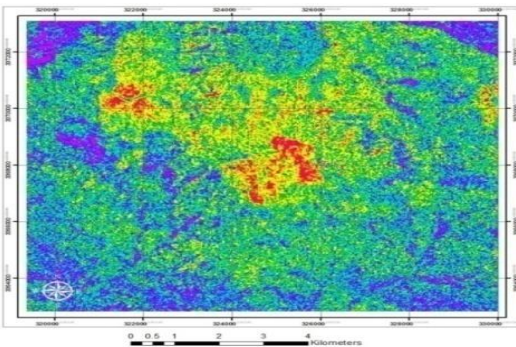
شکل ۸: نواحی متأثر از دگرسانی آرژلیک



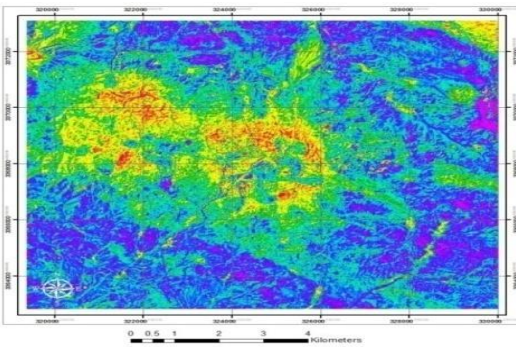
شکل ۷: تصویر استر محدوده مطالعاتی با RGB831



شکل ۹: تصویر محدوده‌های فیلیک منطقه



شکل ۱۰: تصویر نواحی دگرسانی پروپیلیتیک با روش RBD



شکل ۱۱: محدوده‌های گوسان با استفاده از روش RBD

برای تشخیص بهتر مناطق واجد آلتراسیون، بر روی تصاویر حاصل از روش RBD، حدود آستانه‌ای تعریف شد که نتایج به دست آمده در شکل‌های ۱۲ تا ۱۵ قابل مشاهده

۳-۱- روش تصویربرداری باند جذب نسبی (RBD)

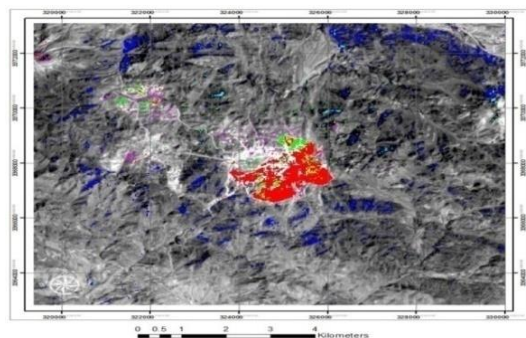
در این روش که توسط کراولی و همکاران (۱۹۸۹) ارائه شده است برای بارز سازی مواد و پدیده‌های مختلف از یک نسبت بهره برده می‌شود. صورت این کسر مجموع دو باند بازتابی مجاور و مخرج کسر باند جذبی شاخص بین این دو است (رابطه ۱). این نسبت‌ها بر اساس رفتار طیفی هر کانی یا بنیان شاخص ارائه می‌شوند. در جدول ۱ به ترکیب‌های باندی مهم برای تفکیک آن آلتراسیون‌ها اشاره شده است.

$$RBD = (BandA + BandC) / Ban \text{ dB} \quad (1)$$

جدول ۱: ترکیب باندی مناسب برای تفکیک آلتراسیون‌ها با روش

RBD			
ترکیب باندی	کانی‌های شاخص	نوع عارضه	ردیف
(۴+۷)/۵	کائولینیت، مونت موریلونیت، موریلونیت	دگرسانی آرژلیک	۱
(۵+۷)/۶	سرسیت، کوارتز	دگرسانی فیلیک	۲
(۶+۹)/۸	کلریت، اپیدوت، کلسیت	دگرسانی پروپیلیتیک	۳
۲/۱	اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن	گوسان	۴

استفاده از روش تصویربرداری باند جذب نسبی علیرغم سادگی از صحت قابل قبولی برخوردار است. تصاویر حاصله برای تفکیک آلتراسیون‌های آرژلیک، فیلیک، پروپیلیتیک و اکسید آهن با استفاده از روش RBD در شکل‌های ۸ تا ۱۱ ارائه شده است (لازم به ذکر است در تصاویر زیر نواحی قرمز رنگ معرف دگرسانی‌ها و یا پدیده گوسان هستند).

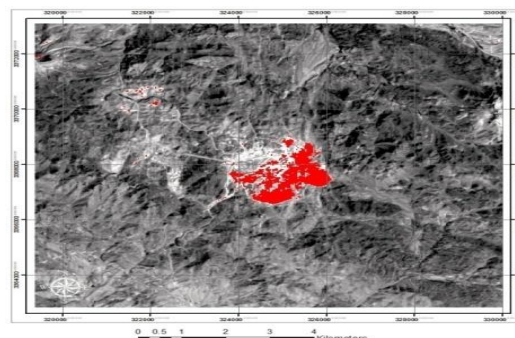


شکل ۱۶: آلتراسیون‌های تفکیک شده در منطقه میدوک به صورت یکپارچه، مناطق قرمز واجد آلتراسیون آرژیلیک، مناطق سبز آلتراسیون فیلیک، مناطق زرد واجد آلتراسیون آرژیلیک و فیلیک، مناطق آبی مبین آلتراسیون پروپیلیتیک و مناطق بنفش رنگ محدوده‌های گوسان را نشان می‌دهد.

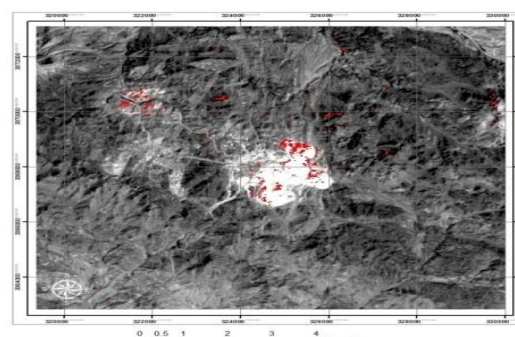
۲-۳- روش تحلیل مؤلفه اصلی هدایت‌شده (DPCA)

به منظور استفاده از چندین باند اطلاعاتی و کاهش حجم اطلاعات از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی می‌توان بهره گرفت [۱۰]. از آنجا که بیشتر داده‌های سنجنده‌های چند طیفی به خاطر تشابه بازتاب پدیده‌ها و هم‌پوشانی حساسیت طیفی باندها دارای هم‌بستگی بالایی با هم هستند با متراکم کردن اطلاعات در تصاویر می‌توان به تفسیر درست‌تری از داده‌های ماهواره‌ای دست یافت [۱۰] و در این راستا با بررسی ماتریس همبستگی و با تشخیص بیشترین و کمترین میزان همبستگی بین باندها به آشکارسازی هر چه بهتر عارضه‌های سطحی مرتبط با هدف اکتشافی کمک نمود. این روش یکی از روش‌های مؤثر و پرکاربرد در تفکیک پدیده‌ها از جمله آلتراسیون‌ها است [۱۱]. در این تحقیق ابتدا با بررسی رفتار طیفی مجموعه کانی‌های شاخص آلتراسیون، باندهای جذبی و انعکاسی اصلی مجموعه کانی‌های مربوطه شناسایی شده سپس با استفاده از شاخص OIF، باندهای دیگر (تا ۴ باند) انتخاب می‌شوند. سپس ماتریس هم‌وردایی بردار ویژه^۴ هر مجموعه داده ساخته و مؤلفه‌ای که در آن آلتراسیون مورد نظر ما بارز شده است مشخص می‌گردد. در جدول ۲ به باندهای جذبی و انعکاسی اصلی مجموعه کانی‌های آلتراسیون‌های آرژیلیک، فیلیک، پروپیلیتیک و گوسان و باندهای مورد استفاده در این مورد اشاره شده است.

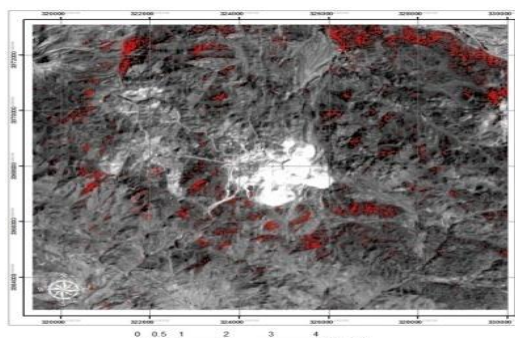
است و در مرحله بعد آلتراسیون‌های منطقه میدوک به صورت یکپارچه در شکل ۱۶ ارائه شده است.



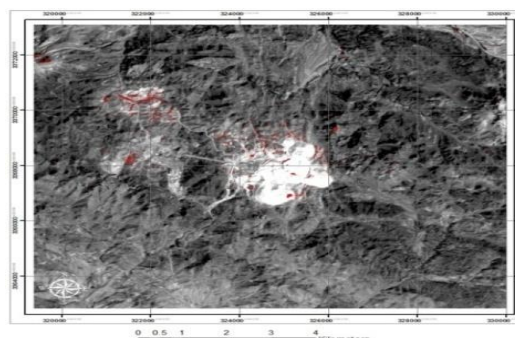
شکل ۱۲: محدوده‌های آرژیلیک با روش RBD و اعمال حدود آستانه شکل



شکل ۱۳: محدوده‌های متأثر از دگرسانی فیلیک بر اساس روش RBD و اعمال حدود آستانه



شکل ۱۴: محدوده پروپیلیتیک با روش RBD و اعمال حدود آستانه

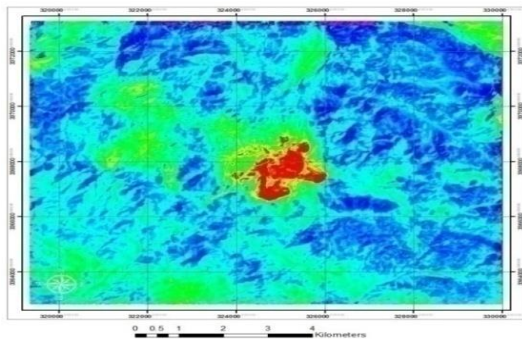


شکل ۱۵: گوسان بر اساس روش RBD و اعمال حدود آستانه

وردایی بردار ویژه از آن تولید شد. با توجه به مختلف‌العلامه بودن باندهای انعکاسی (۷) با باند جذبی (۶) مشخص شد مؤلفه PC4 نشان دهنده مناطق دارای دگرسانی فیلیک است زیرا باندهای مذکور در این PC دارای حداقل همبستگی و حداکثر اطلاعات در ارتباط با زون فیلیک هستند (جدول ۴ و شکل ۱۹).

جدول ۴: ماتریس هم‌وردایی بردار ویژه

Cov.Eigen.	PC3	PC1	PC2	PC4
Band5	-0.749	0.334	-0.453	0.349
Band6	0.536	0.501	-0.656	-0.18
Band7	0.22	0.633	0.516	-0.749
Band8	-0.322	0.487	0.314	0.534



شکل ۱۹: PC3 باندهای ۷ و ۸ معرف نواحی فیلیک

۳-۲-۳- آلتراسیون پروپیلیتیک

در مورد دگرسانی پروپیلیتیک نیز بایستی توجه لازم به کانی‌های شاخص زون صورت گیرد این دگرسانی با توجه به سطح پوشش قابل توجه در سطح و شعاع تأثیر بالا از اهمیت زیادی برخوردار است با توجه به مطالعات انجام شده مشخص شد باندهای شاخص این آلتراسیون باندهای ۶، ۷، ۸، ۹، سنجنده استر هستند برای تفکیک مناسب دگرسانی مجموعه داده ای با این چهار باند تولید و ماتریس هم‌وردایی بردار ویژه از آن تولید گردید. با توجه به مختلف‌العلامه بودن باندهای انعکاسی (۹) با باند جذبی (۷)، PC2+ نشان دهنده مناطق دگرسانی پروپیلیتیک هستند (جدول ۵ و شکل ۲۰).

جدول ۵: ماتریس هم‌وردایی بردار ویژه

Cov.Eigen.	PC1	PC2	PC3	PC4
Band6	0.348	-0.392	-0.475	-0.707
Band7	0.455	-0.432	-0.347	0.697
Band8	0.516	-0.291	0.797	-0.12
Band9	0.637	0.759	-0.138	-0.014

جدول ۲: باندهای جذبی و انعکاسی اصلی به همراه کل باندهای مورد استفاده جهت تفکیک آلتراسیون‌ها

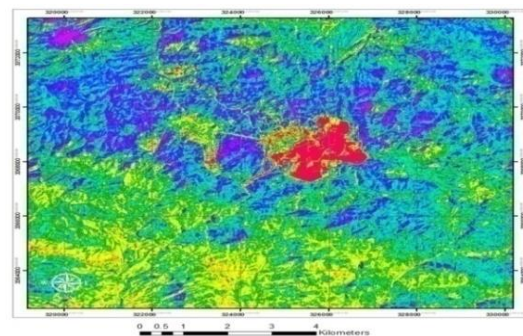
باندهای مورد استفاده	باند انعکاسی اصلی	باند جذبی اصلی	نوع آلتراسیون
۷، ۵، ۴	۷، ۴	۵	آلتراسیون آرژیلیک
۷، ۵، ۶	۷، ۵	۶	آلتراسیون فیلیک
۹، ۸، ۷، ۶	۹، ۶	۸، ۷	آلتراسیون پروپیلیتیک
۲، ۱	۲	۱	محدوده اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن

۳-۲-۱- آلتراسیون آرژیلیک

برای تهیه تصویر نواحی دگرسانی آرژیلیک، با توجه به باندهای مرتبط با کانی‌های شاخص یعنی باندهای ۵، ۷، سنجنده ASTER مجموعه داده‌ای (dataset) با این چهار باند تولید و ماتریس هم‌وردایی بردار ویژه ارائه گردید. با توجه به مختلف‌العلامه بودن باندهای انعکاسی (۷) با باند جذبی (باند ۵) و البته منفی بودن باندهای با حداکثر انعکاس، مشخص شد مؤلفه PC4 نشان دهنده مناطق دگرسانی آرژیلیک است (جدول ۳ و شکل ۱۸).

جدول ۳: ماتریس کوواریانس (هم‌وردایی) بردار ویژه

Cov.Eigen.	PC1	PC2	PC3	PC4
Band1	0.387	-0.382	0.828	-0.14
Band3	0.577	-0.604	-0.549	-0.006
Band5	0.468	0.536	-0.089	-0.697
Band7	0.546	0.45	0.071	0.703



شکل ۱۸: PC4 باندهای ۵ و ۷ نواحی قرمز معرف مناطق آرژیلیک

۳-۲-۲- آلتراسیون فیلیک

برای تهیه تصویر نواحی دگرسانی فیلیک باید از باندهای مرتبط با کانی شاخص این دگرسانی یعنی باندهای ۱، ۴، ۶، ۷ سنجنده ASTER استفاده گردد؛ بنابراین مجموعه داده‌ای (dataset) با این چهار باند تولید و ماتریس هم

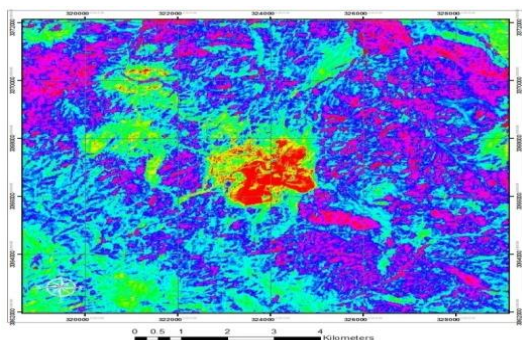
در آن باندهای ۱ تا ۴ بیشتر مؤثر باشند می‌تواند به بهترین شکل سنگ‌های ولکانیکی را تفکیک نماید و نکته قابل ذکر آنکه تشخیص و تفکیک این واحدها در مرحله اکتشاف مقدماتی از اهمیت خاصی برخوردار است [۱۲].

۳-۳- روش نقشه برداری زاویه طیفی

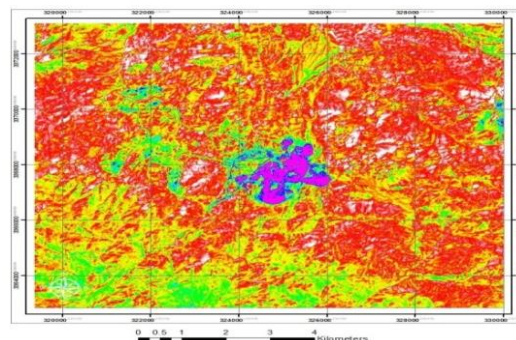
روش نقشه برداری زاویه طیفی روشی کارآمد برای مقایسه طیف تصویر منطقه تحت مطالعه با طیفی مشخص و یا استاندارد است که بر اساس ارزیابی زاویه طیفی در دو طیف، میزان تشابه بین آنها را بررسی می‌نماید، در واقع با تبدیل طیف‌ها به بردار فضایی به ابعاد تعداد باندها، زاویه بین دو بردار محاسبه می‌شود در این روش مقدار زاویه بین دو بردار اهمیت دارد نه طول بردار به عبارتی در این متد فاکتورهای دیگر در نظر گرفته نمی‌شود. مقدار زاویه که عددی بین صفر و یک است هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد موید شباهت بیشتر بین دو طیف است. در این روش از رابطه (۲) جهت اندازه‌گیری میزان تشابه بین دو طیف تصویر (t) و طیف مرجع (r) استفاده می‌گردد.

$$\alpha = \cos^{-1} \left[\frac{\sum_{i=1}^{nb} t_i r_i}{\left(\sum_{i=1}^{nb} t_i^2 \right)^{1/2} \left(\sum_{i=1}^{nb} r_i^2 \right)^{1/2}} \right] \quad (2)$$

در اینجا nb تعداد باندها، t_i طیف تصویر منطقه مطالعاتی و r_i طیف مرجع است [۱۵]. در این پژوهش نیز جهت مطالعه زون‌های دگرسانی از روش SAM استفاده شد که نتایج آن در زیر آورده شده است (نواحی که بیشتر تحت تأثیر پدیده دگرسانی و گوسان واقع شده به رنگ قرمز در شکل‌های ۲۲ تا ۲۵ دیده می‌شوند).



شکل ۲۲: محدوده‌های آرژیلیک بر اساس روش SAM



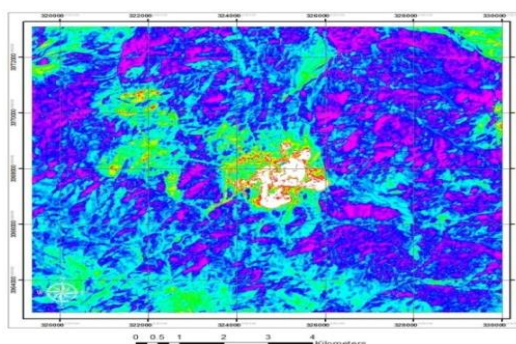
شکل ۲۰: (تصویر بر اساس PC4 باندهای ۱، ۳، ۴ و ۸) مناطق با طیف قرمز کم رنگ، مناطق واجد آلتراسیون پروپیلیتیک است

۳-۲-۴- مناطق با پوشش ترکیبات ثانویه آهن‌دار (گوسان)

با توجه به مطالعات انجام شده باندهای ۳، ۴، ۲ و ۱ سنجنده استر برای تفکیک محدوده‌های حاوی اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن مناسب تشخیص داده شد بر همین اساس مجموعه داده‌ای (dataset) با این چهار باند تولید و ماتریس هم‌وردایی بردار ویژه آن تولید گردید. با توجه به مختلف‌العلامه بودن باندهای انعکاسی (۲) با باند جذبی (باند ۱)، PC2+ نشان‌دهنده مناطق با پوشش آهنی است. (جدول ۶ و شکل ۲۱)

جدول ۶: ماتریس هم‌وردایی بردار ویژه

Cov.Eigen.	PC1	PC2	PC3	PC4
Band1	0.358	-0.922	-0.028	0.146
Band4	0.698	0.232	0.667	-0.120
Band3	0.482	0.306	-0.492	0.658
Band2	0.391	0.054	-0.559	-0.729

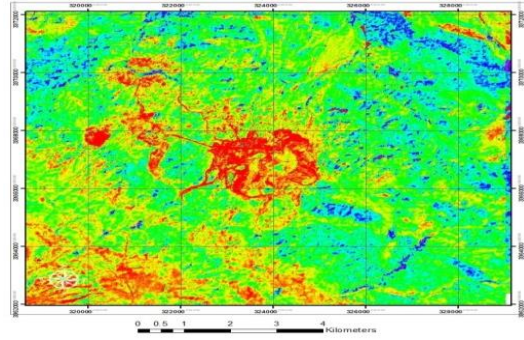


شکل ۲۱: (تصویر بر اساس PC3 باندهای ۱، ۲، ۳، ۴) در این تصویر مناطق با طیف قرمز پر رنگ، مناطق واجد اکسید آهن است

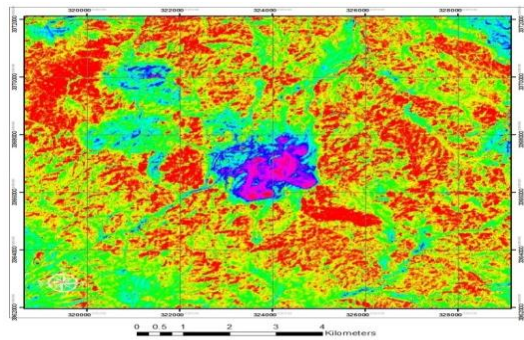
در تصویر بالا علاوه بر محدوده‌های گوسان، سنگ‌های ولکانیکی منطقه که در اصل واحدهای سنگی احاطه کننده سنگ میزبان کانسار محسوب می‌شوند نیز بارز گردیده زیرا بر اساس بررسی‌های انجام گرفته مشخص شده مولفه‌ای که

جدول ۷: الگوریتم‌های مورد استفاده جهت تفکیک آلتراسیون‌ها

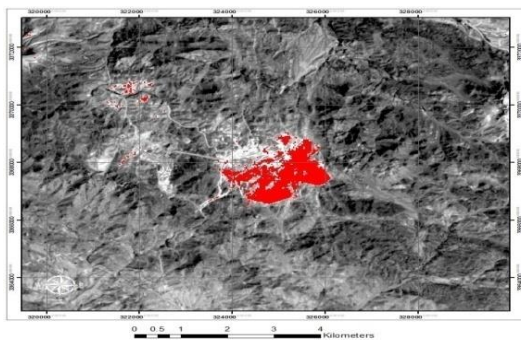
نوع آلتراسیون	الگوریتم
آرژیلیک	$((float(b3)/b2) \leq 1.55)$ and $(b4 \geq 2600)$ and $((float(b4)/b6) \geq 1.492)$ and $((float(b5)/b6) \leq 1.105)$ and $((float(b7)/b6) \geq 1.03)$
فیلیک	$((float(b3)/b2) \leq 1.55)$ and $(b4 \geq 2600)$ and $((float(b4)/b6) \geq 1.492)$ and $((float(b5)/b6) \geq 1.105)$ and $((float(b7)/b6) \geq 1.03)$
پروپیلیتیک	$((float(b3)/b2) \leq 1.55)$ and $b4 \geq 2600$ and $(float(b6) / b8 \geq 1.162)$ and $(float(b5) / (float(b4)+b6) \geq 0.456)$ and $(b5 \geq b6)$ and $(b6 \geq b7)$ and $(b7 \geq b8)$ and $(b9 \geq b8)$ and $((float(b13) / b14) \leq 0.999)$



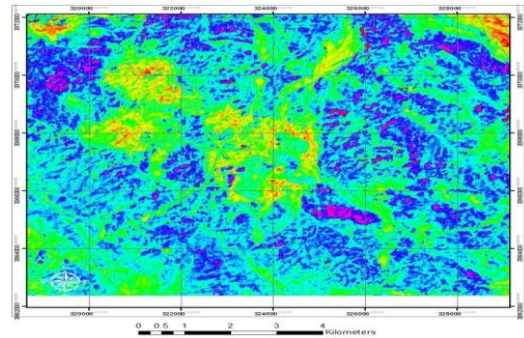
شکل ۲۳: تصویر نواحی متأثر از دگرسانی فیلیک



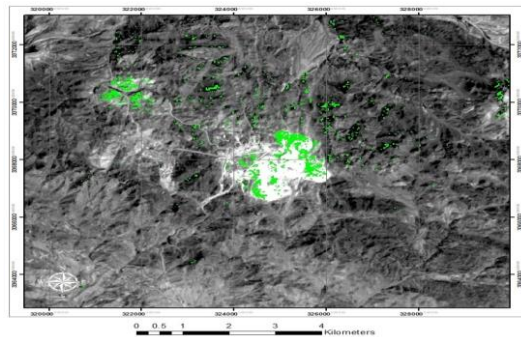
شکل ۲۴: نواحی پروپیلیتیک بر اساس روش SAM



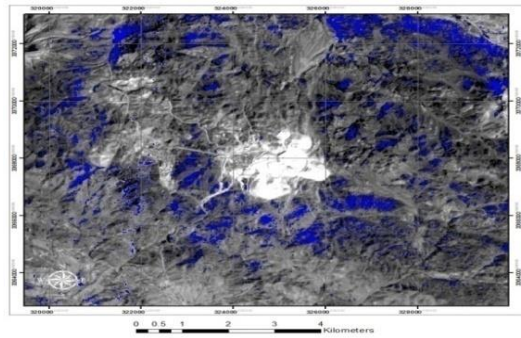
شکل ۲۶: تصویر نواحی دگرسانی آرژیلیک (نواحی قرمز رنگ)



شکل ۲۵: در این تصویر نواحی گوسان مشهود است



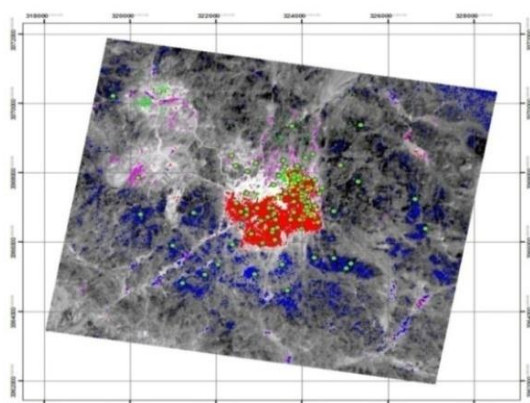
شکل ۲۷: مناطق دگرسانی فیلیک به رنگ سبز دیده می‌شود



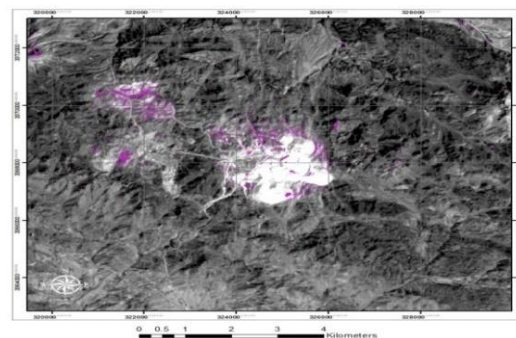
شکل ۲۸: دگرسانی پروپیلیتیک به رنگ آبی بارز شده است

۳-۴- روش الگوریتم منطقی^۵

برای استفاده از این روش با استفاده از Interactive Data Language (IDL) الگوریتم‌هایی برای بارز کردن آلتراسیون‌ها به کار می‌رود که در جدول ۷ به آنها اشاره شده است. الگوریتم‌های ذکر شده بر روی داده‌های ماهواره‌ای استر اعمال شد. نتایج حاصله در شکل‌های ۲۶ تا ۲۹ آمده است.



شکل ۳۰: نقاط نمونه‌برداری جهت صحت‌سنجی نمونه‌ها



شکل ۲۹: نواحی گوسان به روش LA بارنگ بنفش

۴- صحت‌سنجی

جدول ۸: ارزیابی صحت روش‌های دورسنجی در تفکیک آلتراسیون‌های میدوک

گوسان	پروپیلیتیک	فیلیک	آرژیلیک	
۱۶/۲۳	۱۷/۲۳	۱۹/۲۳	۱۹/۲۳	RBD
۱۹/۲۳	۲۰/۲۳	۱۵/۲۳	۱۷/۲۳	PCA
۱۷/۲۳	۱۸/۲۳	۲۱/۲۳	۲۰/۲۳	SAM
۱۴/۲۳	۱۶/۲۳	۱۷/۲۳	۱۶/۲۳	LA

بر اساس جدول ۹، به طور مثال برای تفکیک آلتراسیون آرژیلیک دقیق‌ترین روش‌ها به ترتیب RBD, PCA, SAM و LA است. بر همین اساس برای تفکیک دگرسانی‌های آرژیلیک و فیلیک روش SAM و برای تفکیک دگرسانی پروپیلیتیک و گوسان روش PCA از صحت بالاتری برخوردار بوده و توصیه می‌شوند.

جدول ۹: جدول مرتب‌سازی روش‌ها بر اساس صحت کار

صحت	آرژیلیک	فیلیک	پروپیلیتیک	گوسان
۱	SAM	SAM	PCA	PCA
۲	RBD	RBD	SAM	SAM
۳	PCA	LA	RBD	RBD
۴	LA	PCA	LA	LA

برای ارزیابی صحت روش‌ها ۹۲ نقطه جهت کنترل در یک شبکه طراحی شد. شبکه طراحی شده در شکل ۳۰ آمده است. پس از بررسی نقاط کنترل، صحت نتایج در هر روش مورد ارزیابی قرار گرفت. به طور مثال از ۲۳ نقطه کنترلی برای آلتراسیون آرژیلیک توسط روش RBD، ۱۹ نقطه نتایج مورد انتظار را در پی داشت؛ بنابراین صحت روش ۱۹/۲۳ یا حدود ۸۳ درصد است. این ارزیابی برای آلتراسیون‌های آرژیلیک، فیلیک، پروپیلیتیک و گوسان و بر اساس روش‌های RBD, PCA, SAM و LA انجام شد.

نتایج به دست آمده در جدول ۸ آمده است. لازم به ذکر است تعدادی از تصاویر واحدهای سنگی آلتزه که بر اساس شبکه نمونه‌برداری جهت میزان صحت‌سنجی از منطقه برداشت شده در زیر ارائه شده است (شکل‌های ۳۱ و ۳۲). در بعضی از نمونه‌ها که تأثیرات دگرسانی در آنها کاملاً بارز بود. بررسی‌ها در حد نمونه‌های دستی و بر اساس شواهد ماکروسکوپی و در برخی موارد که نیاز به مطالعات دقیق‌تر بود اقدام به تهیه مقطع نازک از نمونه‌ها شد.



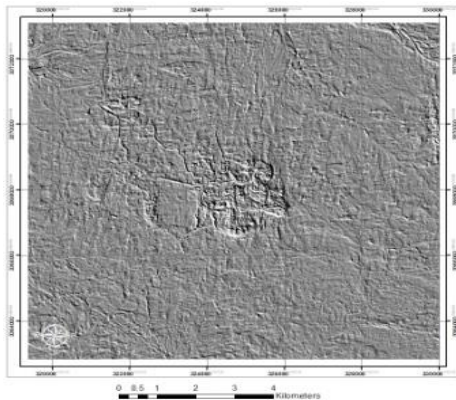
شکل ۳۱: عکس‌هایی از واحدهای آلتزه و تکتونیزه از نقاط نمونه‌برداری، به ترتیب معرف آلتراسیون‌های پتاسیک، فیلیک و پروپیلیتیک



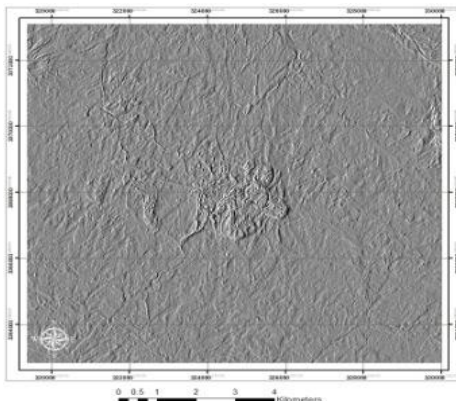
شکل ۳۲: عکس‌هایی از نقاط نمونه برداری، به ترتیب معرف نواحی گوسان و آرژبلیک منطقه (عکس‌های سمت چپ)

۵- استخراج گسل‌ها و خطواره‌ها

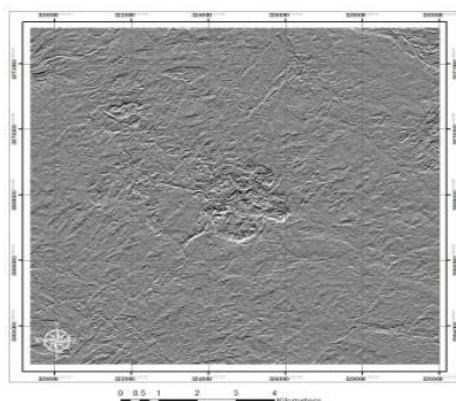
یکی از فاکتورهای اکتشافی در مرحله پی‌جویی نواحی مستعد مس پورفیری، مناطق برخوردار از درجه خطواره‌گی بالا [۱۳] و حاوی گسل‌های حلقوی است و بر این اساس می‌توان نواحی و واحدهای گرانیتوئیدی متأثر از سیالات هیدروترمال و مرتبط با گسل‌ها [۱۴] را از دیگر نواحی تفکیک نمود در این تحقیق به منظور تشخیص هر چه دقیق‌تر این محدوده‌ها از روش فیلترگذاری در راستاهای مختلف استفاده شد (شکل‌های ۳۳ تا ۳۶) تا بدین وسیله نواحی مستعد را با دقت بیشتر متمایز شود بر این اساس مشخص شد فیلترگذاری در راستای شمال شرق- جنوب غرب، بهتر از روش‌های دیگر گسل‌ها و خطواره‌ها را بارز می‌نماید (شکل ۳۳). نکته مهم قابل ذکر آنکه جهت بارز کردن هرچه بهتر گسل‌ها باید از اعمال فیلتر در راستای عمود بر نیروهای اصلی تکتونیکی منطقه بهره گرفت و از آنجا که محدوده تحت بررسی در زون ارومیه دختر واقع شده و پدیده کانه‌زایی مرتبط و متعاقب پلوتونیسیم و حرکات تکتونیکی مرتبط صورت گرفته راستای ذکر شده در بالا بهترین نتیجه را در بر خواهد داشت.



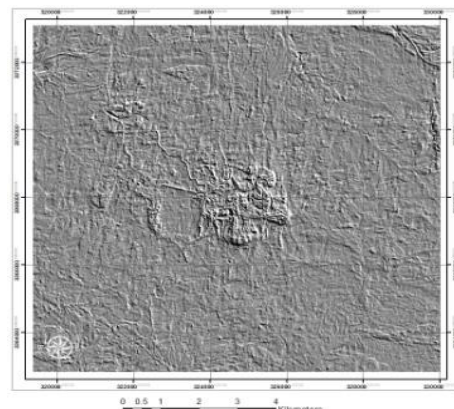
شکل ۳۴: خطواره‌ها با اعمال فیلترینگ در جهت NW-SE



شکل ۳۵: تصویر گسل‌ها و خطواره‌ها با اعمال فیلترینگ در راستای E-W



شکل ۳۶: خطواره‌های منطقه با اعمال فیلترینگ در جهت N-S



شکل ۳۳: تصویر خطواره‌ها، اعمال فیلترینگ جهت NE-SW

۶- نتیجه‌گیری

سپاسگزاری

در اینجا لازم است از مساعدت خالصانه مدیریت محترم شرکت ژئوماتیک رهپویان که از راهنمایی‌های ایشان در انجام این تحقیق استفاده نمودم کمال تشکر را ابراز نمایم.

مراجع

- [1] Lorestani, Gh., Shahriar, A., 2011, Application of ENVI in Remote Sensing Analysis and interpretation of satellite images 236 p.
- [2] Karimpour M., Malekzadeh, A., Heidarian, M., 2011, Ore deposit exploration Geology, geochemistry, satellite and geophysics models, 632p
- [3] Farmahini Farahani, M., Khakzad, A., Asadi, H., Emami, M., 2014, The investigation of alteration zones and magma mixing in exploration Kahang area, Scientific quarterly journal, Geosciences, vol 24, N93,
- [4] Karimpour, M., Saadat, S., 2002, Applied Economic Geology, 535p
- [5] Hassani Pak, A., Shrafodin, M., 2002, Exploration data analysis, 982p.
- [6] Farmahini Farahani, M., Khakzad, A., Asadi, H., Emami, M., 2012, The results of the remote sensing studies and reasons of composite halos in exploration Kahang area, Scientific quarterly journal, Geosciences, N81.
- [7] Parvin pur, F., 2008, Economic geology studies of porphyry copper deposits in abdar-dahj subzone, Mc thesis, Azad University-Tehran Branch.
- [8] Kazemi Mehrnia, A., Rasa, I., Alirezaei, S., Asadi Harooni, H., Karami, J., 2011, Atration Mapping at saridoon porphyry copper prospect using short Wave Infrared Spectrometry (PIMA), ASTER Satellite Image and XRD, Scientific quarterly journal, Geosciences, vol 20, N79
- [9] Beiranvand Pour, A., Hashim, M., 2012, The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits Ore Geology Reviews Science Direct, Elsevier, 44:1-9.
- [10] Crosta, A., and Moore McM., 1989, Enhancement of Land sat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minais Gerais State, Brazil: A Prospecting case history in Greenstone belt terrain, remote sensing for exploration geology, p.1173-1187
- [11] Abbaszadeh, M., Hezarkhani, A., 2011, Hydrothermal Alteration Mapping Using ASTER Images in the Rabor Area, Kerman, Scientific quarterly journal, Geosciences vol20, N78,

با توجه به ارتباط ژنزی سیالات هیدروترمال و به تبع آن هاله‌های دگرسانی، با ذخایر مس پورفیری، در مرحله پی‌جویی، تشخیص و تفکیک زون‌های دگرسانی در نواحی تحت بررسی از درجه اهمیت بالایی برخوردار است از طرفی با توجه به کاربرد وسیع داده‌های تصاویر ماهواره‌ای در امر اکتشاف، مسئله انتخاب بهترین روش‌ها، با برخوردار بودن از بالاترین درجه دقت و صحت مطرح می‌شود. بر همین اساس در این تحقیق ابتدا بر اساس روش‌های مختلف تحلیل مؤلفه‌های اصلی هدایت‌شده (DPCA)، باند جذب نسبی (RBD)، نقشه‌بردار زاویه طیفی (SAM) و روش الگوریتم منطقی (LA) اقدام به شناسایی و تفکیک هاله‌های مختلف دگرسانی شد و سپس جهت بررسی میزان دقت و صحت روش‌ها در تشخیص زون‌های مختلف، اقدام به طراحی شبکه نمونه‌برداری شد تا بر اساس آن میزان دقت روش‌ها محاسبه شود. بر این اساس طبق نقاط از قبل تعیین شده نمونه‌برداری‌ها انجام شد و میزان صحت و سقم روش‌ها مورد بررسی قرار گرفت (برای هر نوع دگرسانی ۲۳ برداشت صورت گرفت) پس از مقایسه نتایج حاصل از نمونه‌برداری‌های صحرائی و تصاویر دورسنجی موارد حاصله به صورت یک کسر ارائه گردید لازم به ذکر است در این مرحله جهت افزایش دقت در بررسی‌ها از مطالعات پتروگرافی مقاطع نازک نیز استفاده شد بدین ترتیب مشخص شد روش نقشه‌بردار زاویه طیفی برای معرفی دگرسانی نوع فیلیک و آرژیلیک پیشرفته مناسب‌ترین روش محسوب می‌شود و روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی هدایت‌شده برای تشخیص زون پروپیلیتیکی و نواحی گوسان از بالاترین کارایی برخوردار است و در درجه دوم اهمیت، روش باند جذب نسبی برای تشخیص و تمایز آلتراسیون آرژیلیک و فیلیک و نقشه‌بردار زاویه طیفی برای شناسایی زون پروپیلیتیکی و گوسان کارایی دارد. مسئله دیگری که در این تحقیق به آن توجه شد ارتباط مستقیم بین مناطق برخوردار از درجه خطواری بالا با نواحی مستعد معدنی است که بر اساس روش فیلتینگ در راستاهای مختلف مشخص شد بهترین راستا جهت شمال شرق- جنوب غرب است که از طرفی عمود بر نیروهای تکتونیکی اصلی در محدوده معدنی محسوب می‌شود.

[14] Zarasvandi, A., Liaghat, S. and Zentilli, M., 2005, Geology of the Darreh-Zerreshk and Ali-Abad porphyry copper deposit, central Iran, *International Geology Reviews*, 47, 6, 620-646.

[15] Geological Map of the Shahr Babak area (1:100,000) Geological Survey of Iran publication

[12] Azizi, H., Tarverdi, M.A., Akbarpour, A., 2010, Extraction of hydrothermal alterations from ASTER SWIR data from east Zanzan, northern Iran *Advances in Space Research* 46, 99-109.

[13] Mehrabi, A., Derakhshani R., Rahnama-Rad, J., 2009, Spatial Association of Mineralization and Fractures in Meiduk, Porphyry Copper Mine, quarterly journal *Applied geology*, p148-155

3 Spectral Resolution
4 Cov. Eigenvectors
5 Logical Algorithm

¹ Sensor
2 Resolution Spatial