

کاربرد ماشین بردار پشتیبان در تفکیک زون‌های دگرسانی هیدروترمال با استفاده از سنجنده آستر

سعید مجدی فر*، نسترن استاد مهدی عراق؛

دانشگاه صنعتی اراک

پذیرش ۹۷/۰۵/۱۳

تاریخ: دریافت ۹۶/۰۷/۰۹

چکیده

در این پژوهش با استفاده از سنجنده آستر تلاش شده است کاربرد الگوریتم ماشین بردار پشتیبان در تفکیک دگرسانی‌های هیدروترمال ذخایر مس پورفیری بررسی شود. برای آموزش این الگوریتم در مجموع ۲۲۰۴ پیکسل از مناطق کانی‌سازی شده انتخاب شد. باندهای ۴، ۶، ۷ و ۸ سنجنده آستر برای شناسایی دگرسانی‌های فیلیک و آرژیلیک و ۹ باند محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک برای شناسایی دگرسانی پروپیلیتیک به‌عنوان ورودی این الگوریتم انتخاب شدند. به‌منظور ارزیابی خطای طبقه‌بندی، ماتریس درهم آمیختگی بررسی شد. نتایج ماتریس در هم آمیختگی بیان‌گر آن است که خطای طبقه‌بندی برای زون فیلیک و آرژیلیک نسبتاً بالاست و امکان تفکیک این دو زون به سادگی امکان‌پذیر نیست در حالی که دگرسانی پروپیلیتیک به‌خوبی طبقه‌بندی شده است. هم‌چنین این تحقیق تابع خطای جدیدی به‌نام خطای کور را تعریف کرد که با استفاده از ماتریس درهم آمیختگی نسبت پیکسل‌های دگرسان طبقه‌بندی نشده را محاسبه می‌کند. بر اساس مقدار این خطا، ماشین بردار پشتیبان ۷۳/۶ درصد از پیکسل‌های دگرسان را طبقه‌بندی نمی‌کند. هم‌چنین صحت کل طبقه‌بندی الگوریتم ماشین بردار پشتیبان برابر ۶۶/۰۶ درصد و ضریب کاپا برابر ۰/۶۵۲۲ است.

واژه‌های کلیدی: دگرسانی آرژیلیک، دگرسانی فیلیک، دگرسانی پروپیلیتیک، مس پورفیری، ماشین بردار پشتیبان.

مقدمه

در سال‌های اخیر با رشد سریع فناوری سنجش از دور، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، یکی از روش‌های رایج در اکتشافات معدنی است. علم سنجش از دور با بهره‌گیری از رفتار طیفی منحصر به فرد کانی‌ها، به شناسایی و اکتشاف مناطق دارای پتانسیل معدنی می‌پردازد. در این روش منحنی‌های شاخص بازتابندگی و جذب طیف، به دلیل ارائه اطلاعاتی از رفتار طیفی اجسام در طول موج‌های مختلف، اهمیت زیادی دارد. در واقع هر نوع سنگ یک واکنش طیفی مخصوص به خود را دارد که شناسایی و تفکیک آن از سنگ‌های دیگر به وسیله همین واکنش طیفی ممکن می‌شود. در این تحقیق داده‌های حاصل از سنجنده آستر در کمان ماگمایی سنوزوئیک کرمان به کار گرفته شده است. آستر یک سنجنده چند طیفی با توان تفکیک بالاست که به وسیله ماهواره ترا حمل می‌شود. این سنجنده ۱۴ باندها دارد که امکان شناسایی بعضی از کانی‌ها را در محدوده خاص و مناسب امواج الکترومغناطیس فراهم می‌کند. آستر داده‌ها را در سه بازه طیفی برداشت می‌کند که شامل بازه‌های مرئی و مادون قرمز نزدیک (VNIR)، مادون قرمز کوتاه موج (SWIR)، و مادون قرمز حرارتی (TIR)، است. توان تفکیک مکانی باندهای مادون قرمز نزدیک، ۱۵ متر و توان تفکیک مکانی باندهای مادون قرمز کوتاه موج ۳۰ متر است در حالی که توان تفکیک مکانی تصاویر مادون قرمز حرارتی ۹۰ متر است [۱]، [۲]. آنالیز نسبت‌های باندی، آنالیز مؤلفه‌های اصلی، روش کراستا و تصاویر کامپوزیت مهم‌ترین روش‌های مرسوم پردازش تصاویر ماهواره‌ای برای شناسایی زون‌های دگرسانی هیدروترمال منطقه هستند که در تحقیقات گذشته به صورت متداول استفاده شده‌اند. پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که روش‌های کلاسیک مذکور در تمایز زون‌های دگرسانی از پوشش‌های گیاهی دچار خطا می‌شوند یا توانایی آن‌ها در تفکیک زون‌های دگرسان هیدروترمال ضعیف است. علت را می‌توان در هم‌پوشانی اثر انگشت‌های طیفی کانی‌های دگرسانی با یک‌دیگر و پوشش‌های گیاهی دانست. کانی‌های دگرسانی معمولاً دارای پیوند هیدروکسیل در ساختار خود هستند همانند رس‌ها که عمدتاً از کانی‌های دارای Mg-OH- و Al-OH- تشکیل شده‌اند. این پیوندهای شیمیایی در محدوده طول موجی ۲/۱-۲/۴

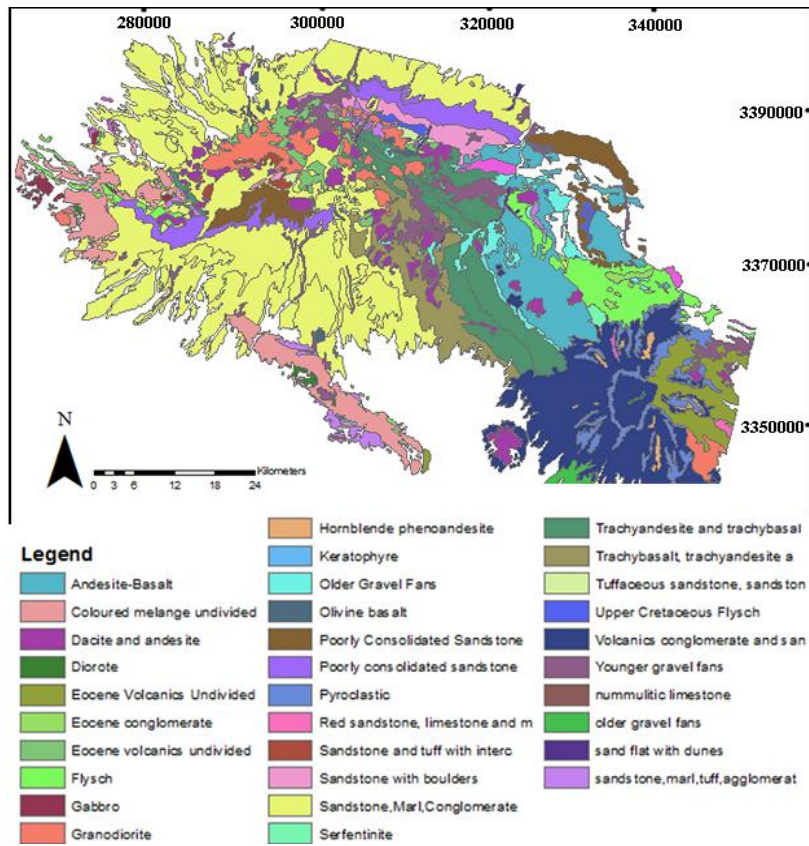
میکرومتر از تابش های الکترومغناطیس جذب قوی از خود نشان می دهند و در محدوده ۱/۷- ۱/۶ میکرومتر از خود بازتابش بالا نشان می دهد. بنابراین تفکیک میان کانی های دگرسانی به دلیل اشتراک در رفتار طیفی سخت است. همچنین حضور آب در بافت گیاهان باعث به وجود آمدن هم پوشانی طیفی با کانی های هیدروکسیل دار می شود که تفکیک آنها را نیز با مشکل رو به رو می کند. پژوهش های گذشته این امر را تأیید می کند که روش های پردازش تصویر کلاسیک همانند نسبت باندی، آنالیز مؤلفه های اصلی، کراستا و تصاویر کامپوزیت نمی توانند موفقیت چشم گیری در تفکیک زون های دگرسانی مختلف از یک دیگر داشته باشند. اما برای رفع این مشکل می توان از روش های جدیدی که در علوم مختلف استخراج شده است، استفاده کرد. روش ماشین بردار پشتیبان یک الگوریتم طبقه بندی کننده است که به دلیل دقت زیاد کاربرد وسیعی در پردازش تصاویر ماهواره ای داشته است. گودرزی مهر و همکاران (۱۳۹۱) کارایی روش ماشین بردار پشتیبان را برای طبقه بندی ۶ واحد سنگ شناسی موجود در منطقه، با روش های طبقه بندی شبکه های عصبی و حداکثر احتمال مقایسه کردند و سه تابع استفاده شده در این روش یعنی تابع پایه شعاعی، چند جمله ای و خطی را از نظر قدرت طبقه بندی بررسی کردند و دریافتند که هر سه تابع توانسته است بیشترین دقت را نسبت به دو روش دیگر ارائه کند. قاسمی و همکاران (۱۳۹۰) داده های مربوط به دو کانسار مس پورفیری علی آباد و دره زرشک را به وسیله روش طبقه بندی نظارتی ماشین بردار پشتیبان، آنالیز تمایز خطی و آنالیز تمایز غیرخطی ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که در کانسار علی آباد روش ماشین بردار پشتیبان با صحتی برابر ۸۰٪ در مقایسه با دو روش دیگر عملکرد بهتری را ارائه کرده است. در کانسار دره زرشک نیز روش ماشین بردار پشتیبان با صحت ۹۰٪ نسبت به دو روش دیگر موفق تر بوده است. هیوانگ و همکاران (۲۰۰۸) به منظور طبقه بندی جنگل از روش ماشین بردار پشتیبان استفاده کردند و دقت آن را مطابق با اثر شیب و جهت زمین، ارتفاع و آزیموت خورشید، موقعیت نسبی درختان ارزیابی کردند. آنها دریافتند که پس از تصحیحات توپوگرافیک دقت طبقه بندی به میزان ۳/۶ درصد در تمامی طبقات بهبود یافته است. او من و همکاران (۲۰۰۸) برای طبقه بندی واحدهای

سنگ‌شناسی از روش ماشین بردار پشتیبان و روش حداکثر احتمال استفاده کردند که نتایج آن نشان‌دهنده بیش‌تر بودن دقت روش ماشین بردار پشتیبان نسبت به روش حداکثر احتمال است. این تحقیق تلاش دارد الگوریتم ماشین بردار پشتیبان را به‌منظور شناسایی و جداسازی زون‌های دگرسانی پروپیلیتیک، آرژیلیک و فیلیک به‌کار بگیرد و توانایی آن را با روش‌های مرسوم آنالیز تصاویر ماهواره‌ای مقایسه کند. از آن‌جاکه ذخایر مس پورفیری شناخته شده در منطقه بررسی شده این تحقیق شامل کدر، گودکولواری، ایجو، سرنو و چاه فیروزه است انتظار می‌رود بهترین روش طبقه‌بندی بتواند دگرسانی را در محدوده‌های معدنی مذکور آشکارسازی کند

زمین‌شناسی منطقه و داده‌های استفاده شده

منطقه بررسی شده در بخش جنوبی کمربند آتشفشانی-رسوبی ایران مرکزی قرار گرفته است. ناحیه بررسی شده، خاستگاه کانسارهای پورفیری مهمی مانند کدر، گودکولواری، ایجو، سرنو و چاه فیروزه است و در جنوب غربی شهر کرمان واقع شده است. آمیزه رنگین کرتاسه قدیمی‌ترین و نهشته‌های کواترنر و مخروط‌های افکنه گراولی در زمره جوان‌ترین رخنمون‌های ناحیه مطالعاتی قرار دارند. رسوبات کرتاسه عمدتاً از سنگ‌های فلیشی تشکیل شده‌اند. سنگ‌های رسوبی کمپلکس آتشفشان رسوبی اغلب از نوع ماسه‌سنگ و اندکی سنگ آهک هستند. سنگ‌های آتشفشانی به‌وسیله سنگ‌های نفوذی الیگوسن میوسن با جنس گرانودیوریت، کوارتز دیوریت، مونزونیت، تونالیت و گرانیت تسخیر شده‌اند. سنگ‌های آتشفشانی به‌واسطه هم‌جواری بلا اصل این توده‌های نفوذی، در بسیاری موارد دچار دگرسانی و تغییر شده‌اند. اغلب سنگ‌های نفوذی و آتشفشانی به‌طور درجا دچار دگرسانی هیدروترمال و کانی‌سازی شده‌اند. دگرسانی‌های آرژیلیکی، سرسیتی و پروپیلیتیک در زمره شایع‌ترین دگرسانی هیدروترمال ناحیه قرار دارند. رسوبات الیگوسن میوسن در بخش جنوب شرق ناحیه رخنون یافته‌اند که به‌طور دگرشیب به‌وسیله سازندهای ائوسن پوشیده می‌شوند. ضخامت این سری‌ها بالغ بر ۲۰۰ متر است. رسوبات نئوژن به‌وسیله یک دگرشیبی، میان پایین‌ترین و بالاترین عضوها جدا شده‌اند. عضو پایینی عمدتاً از ماسه‌سنگ‌های متوسط تا ریز

دانه همراه با رگه های ژئوس و تداخلات هالیت شکل می گیرد. عضو بالایی شامل رسوباتی است که طبقه بندی سست و نادرستی نشان می دهند و استحکام کافی ندارند. این رسوبات در بخش های پایینی از نوع کنگلومرا و ماسه سنگ و در بخش های بالایی شامل قطعات سنگی و ریگ های گرد شده و قطعات ساییده شده داسیتی هستند [۳]، [۴]، [۵]، [۶]، [۷]، [۸]، [۹]، [۱۰]. تصویر زمین شناسی منطقه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. تصویر زمین شناسی منطقه بررسی شده

این تحقیق از سه تصویر سنجنده آستر در سطح IB استفاده کرده است. دو تصویر در ۱۸ آپریل ۲۰۰۰ و تصویر دیگر در ۱۵ ژوئن ۲۰۰۷ گرفته شده است. تصاویر ابتدا به وسیله کراستاک و سپس با IARR تصحیح رادیومتریکی شدند و به صورت موزاییک در کنار یکدیگر

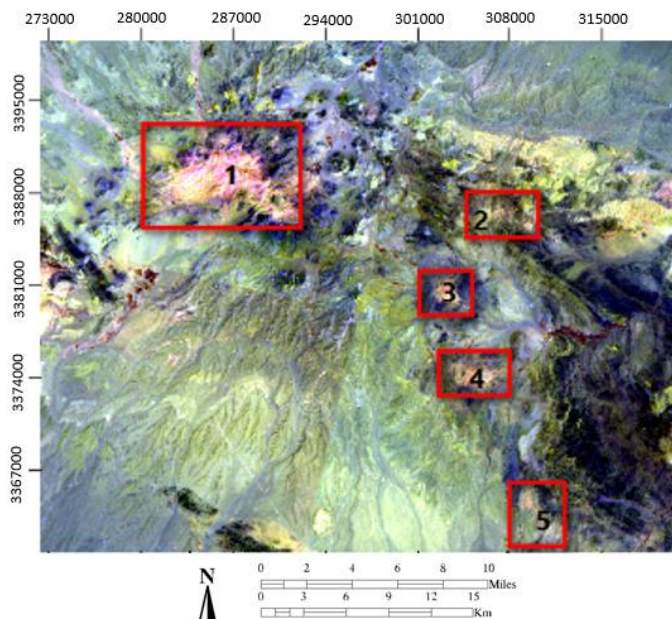
قرار گرفتند. شکل ۲ تصویر ماهواره ای منطقه را نشان می‌دهد که در آن مناطق شناخته شده معدنی در آن نمایش داده شده است. ۳ باند محدوده مرئی و ۶ باند محدوده مادون قرمز نزدیک به‌عنوان ورودی‌های این تحقیق استفاده شدند که اطلاعات آماری داده‌ها و جدول ضرایب هم‌بستگی آن‌ها در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده است

جدول ۱. اطلاعات آماری ۹ باند محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک سنجنده استر

انحراف استاندارد	میانگین	بیشینه	کمینه	آمار پایه
۰/۱۱۹۱۱۹	۰/۹۰۴۰۷۰	۲/۰۷۹۶۷۳	۰/۱۶۷۹۷۷	باند ۱
۰/۱۱۸۰۲۱	۰/۹۱۷۲۲۰	۱/۹۸۶۸۴۷	۰/۱۵۷۶۱۳	باند ۲
۰/۰۹۸۶۹۴	۰/۹۷۷۳۳۷	۱/۸۴۳۷۵۱	۰/۲۵۲۶۱۳	باند ۳
۰/۱۰۷۱۶۱	۰/۹۰۷۷۱۳	۱/۵۸۲۶۸۸	۰/۳۲۰۰۳۹	باند ۴
۰/۰۹۳۸۰۰	۰/۸۸۸۰۷۶	۱/۳۷۵۳۲۴	۰/۳۸۵۲۹۴	باند ۵
۰/۱۰۰۰۲۲	۰/۸۹۰۳۱۸	۱/۴۴۰۸۷۲	۰/۳۲۱۶۶۸	باند ۶
۰/۰۹۱۳۸۵	۰/۹۰۶۷۸۳	۱/۴۴۰۰۹۷	۰/۳۴۰۱۰۳	باند ۷
۰/۱۰۲۰۲۵	۰/۹۳۴۲۶۲	۱/۵۴۷۸۸۴	۰/۳۲۴۲۰۸	باند ۸
۰/۰۹۴۳۹۷	۰/۹۲۳۵۳۲	۱/۵۰۳۵۴۸	۰/۴۰۴۸۱۹	باند ۹

جدول ۲. جدول ضرایب هم‌بستگی ۹ باند محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک سنجنده استر

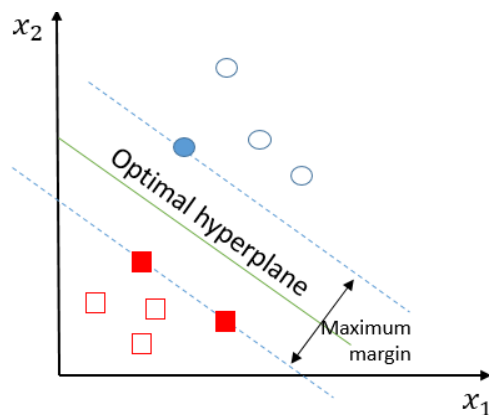
همبستگی	باند ۱	باند ۲	باند ۳	باند ۴	باند ۵	باند ۶	باند ۷	باند ۸	باند ۹
باند ۱	۱,۰۰۰۰۰۰	۰,۹۷۳۰۰۸	۰,۷۸۹۳۶۳	۰,۷۲۲۷۳۷	۰,۷۵۰۲۱۲	۰,۷۴۶۴۴۵	۰,۷۴۵۲۵۰	۰,۷۴۶۵۸۲	۰,۷۴۰۳۳۷
باند ۲	۰,۹۷۳۰۰۸	۱,۰۰۰۰۰۰	۰,۸۲۷۶۵۹	۰,۷۶۵۶۷۳	۰,۷۸۷۷۴۹	۰,۷۸۶۷۳۸	۰,۷۸۸۷۴۵	۰,۷۹۰۹۶۵	۰,۷۸۱۷۳۲
باند ۳	۰,۷۸۹۳۶۳	۰,۸۲۷۶۵۹	۱,۰۰۰۰۰۰	۰,۷۸۰۸۰۱	۰,۷۳۱۸۵۲	۰,۷۴۰۱۴۲	۰,۷۳۹۴۳۸	۰,۷۳۳۸۶۳	۰,۷۱۲۲۳۷
باند ۴	۰,۷۲۲۷۳۷	۰,۷۶۵۶۷۳	۰,۷۸۰۸۰۱	۱,۰۰۰۰۰۰	۰,۹۴۴۶۶۶	۰,۹۲۹۸۴۷	۰,۹۳۲۱۵۹	۰,۸۹۴۸۶۵	۰,۸۸۱۲۷۹
باند ۵	۰,۷۵۰۲۱۲	۰,۷۸۷۷۴۹	۰,۷۳۱۸۵۲	۰,۹۴۴۶۶۶	۱,۰۰۰۰۰۰	۰,۹۸۴۰۸۸	۰,۹۶۵۷۷۵	۰,۹۵۵۹۲۲	۰,۹۵۶۱۴۴
باند ۶	۰,۷۴۶۴۴۵	۰,۷۸۶۷۳۸	۰,۷۴۰۱۴۲	۰,۹۲۹۸۴۷	۰,۹۸۴۰۸۸	۱,۰۰۰۰۰۰	۰,۹۶۶۵۴۱	۰,۹۶۶۹۴۹	۰,۹۶۸۵۵۳
باند ۷	۰,۷۴۵۲۵۰	۰,۷۸۸۷۴۵	۰,۷۳۹۴۳۸	۰,۹۳۲۱۵۹	۰,۹۶۵۷۷۵	۰,۹۶۶۵۴۱	۱,۰۰۰۰۰۰	۰,۹۷۱۳۶۸	۰,۹۶۰۹۷۵
باند ۸	۰,۷۴۶۵۸۲	۰,۷۹۰۹۶۵	۰,۷۳۳۸۶۳	۰,۸۹۴۸۶۵	۰,۹۵۵۹۲۲	۰,۹۶۶۹۴۹	۰,۹۷۱۳۶۸	۱,۰۰۰۰۰۰	۰,۹۸۲۷۴۹
باند ۹	۰,۷۴۰۳۳۷	۰,۷۸۱۷۳۲	۰,۷۱۲۲۳۷	۰,۸۸۱۲۷۹	۰,۹۵۶۱۴۴	۰,۹۶۸۵۵۳	۰,۹۶۰۹۷۵	۰,۹۸۲۷۴۹	۱,۰۰۰۰۰۰



شکل ۲. تصویر کاذب رنگی (باند ۶ قرمز، باند ۴ سبز، باند ۱ آبی) منطقه بررسی شده، (۱ کدر، ۲ گودکولواری، ۳ ایجو، ۴ سرنو، ۵ چاه فیروزه)

الگوریتم ماشین بردار پشتیبان

ماشین بردار پشتیبان یکی از شناخته شده ترین روش ها در زمینه دسته بندی داده ها است. عموماً در مسائلی که دو دسته داده وجود دارد از ماشین بردار پشتیبان استفاده می شود. بر طبق این روش دو صفحه به اندازه ای از هم دور می شوند تا در مرز دو کلاس داده ها قرار گیرند. هدف اصلی این الگوریتم، یافتن مرزی بین این دو صفحه است که بیشترین جدایش را بین دو دسته از داده ها ایجاد کند (شکل ۳). در مواردی که داده ها به صورت خطی قابل جدایش نیستند، می توان با استفاده از توابعی نظیر RBF، خطی، چندجمله ای و سیگموئید آن ها را به فضایی با ابعاد بیش تر تعمیم داد، سپس به صورت خطی تفکیک کرد.



شکل ۳. ساختار کلاسه‌بندی ماشین بردار پشتیبان [۶]

مجموعه داده $\delta = \{X_1, \dots, X_n\}$ و $(X_i \in X = R^p)$ را در نظر بگیرید که از n داده تشکیل شده است. متناظر با هر یک از این داده‌ها یک برچسب (y_i) وجود دارد که مشخص می‌کند آن داده به چه کلاسی تعلق دارد $(y_1, \dots, y_n \in Y)$. ماشین‌های بردار پشتیبان دسته‌ای از روش‌های مبتنی بر کرنل هستند که در مرحله آموزش با استفاده از مجموعه داده آموزشی برچسب‌دار (δ) ، یک تابع $f: X \rightarrow Y$ یاد می‌گیرند و سپس در مرحله آزمایش سیستم از این تابع برای پیش‌بینی کردن برچسب داده جدیدی که وارد سیستم می‌شود استفاده می‌کنند. در این فصل ما فقط حالتی را در نظر می‌گیریم که هر الگو متعلق به یکی از دو کلاس ۱ و ۲ است که برچسب این دو کلاس را با $+1$ و -1 نشان می‌دهیم $(y \in \{-1, +1\})$. این مسئله ساده، مسئله طبقه‌بندی دوتایی نامیده می‌شود. در این حالت ماشین بردار پشتیبان تلاش می‌کند که دو کلاس داده را با استفاده از یک تابع خطی به فرم $f(x) = w^T x + b$ از هم تفکیک کند $(w \in R^p, b \in R)$. چنین تابعی به داده‌های $x \in X, f(x) > 0$ برچسب $+1$ می‌دهد و به داده‌های $x \in X, f(x) < 0$ برچسب -1 می‌دهد [۱۱]، بنابراین مسئله ماشین بردار پشتیبان یادگرفتن چنین تابعی (f) روی مجموعه مشاهدات δ است. یک مرز تصمیم‌گیری خطی را در حالت کلی می‌توان بدین صورت نوشت:

X یک نقطه روی مرز تصمیم‌گیری و w یک بردار n بعدی عمود بر مرز تصمیم‌گیری است.

$\|w\|$ فاصله مبدأ تا مرز تصمیم‌گیری و $w \cdot X$ بیان‌گر ضرب داخلی دو بردار w و X است. از آن‌جاکه با ضرب یک ثابت در دو طرف (۱) باز هم تساوی برقرار است، برای تعریف یکتای مقدار w و X این شرایط روی آن‌ها اعمال می‌شود:

$$1. \quad y_i(w \cdot X_i) = 1 \rightarrow \text{اگر } X_i \text{ یک بردار پشتیبان باشد}$$

$$2. \quad y_i(w \cdot X_i) > 1 \rightarrow \text{اگر } X_i \text{ یک بردار پشتیبان نباشد}$$

اولین مرحله برای محاسبه مرز تصمیم‌گیری بهینه، پیدا کردن نزدیک‌ترین نمونه‌های آموزشی دو کلاس است. در مرحله بعد فاصله آن نقاط از هم در راستای عمود بر مرزهایی که دو کلاس را به‌طور کامل جدا می‌کند، محاسبه می‌شود. مرز تصمیم‌گیری بهینه مرزی است که حداکثر حاشیه بهینه را داشته باشد. مرز تصمیم‌گیری بهینه با حل مسئله بهینه‌سازی رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$\max_{w, b} \min_{i=1, \dots, L} \left[y_i \frac{w \cdot x_i + b}{|w|} \right] \quad (3)$$

حل کردن مسئله بهینه‌سازی کار دشواری است. برای ساده کردن آن از روش ضرایب نامعین لاگرانژ استفاده می‌شود. طبقه‌بندی‌کننده نهایی از رابطه (۴) به‌دست می‌آید [۱۱]:

$$f(x, w, b) = \text{sgn}(w \cdot x + b) \quad (4)$$

الگوریتم بالا مرز خطی دو کلاس کاملاً جدا از هم را به‌دست می‌دهد، اما در حالتی که کلاس‌ها با هم پوشانی داشته باشند جدا کردن کلاس‌ها به‌وسیله مرز تصمیم‌گیری خطی همواره با خطا همراه است. برای حل این مشکل می‌توان ابتدا داده‌ها را از فضای اولیه R^n با استفاده از یک تبدیل غیرخطی ϕ ، به فضای R^m با ابعاد بیش‌تر منتقل کرد که در فضای جدید کلاس‌ها تداخل کم‌تری با یکدیگر داشته باشند. سپس در فضای جدید با استفاده از معادلات قبلی و جای‌گزینی X_i با یک تابع هسته $\phi(X_i)$ ، مرز تصمیم‌گیری بهینه محاسبه می‌شود. یک تابع هسته‌ای در واقع یک تابع در فضای اولیه است که برابر با ضرب داخلی دو بردار در فضای ویژگی است. در این تحقیق برای طبقه‌بندی مس پورفیری از تابع پایه شعاعی استفاده می‌شود

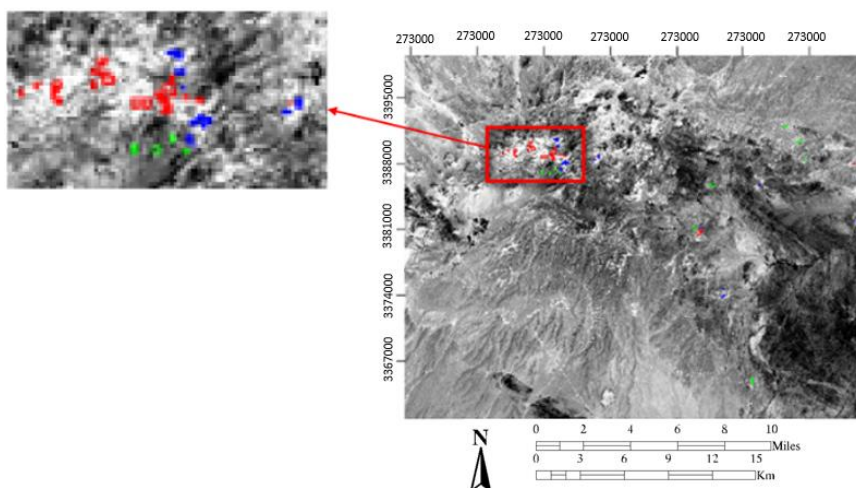
نقشه برداری زون‌های دگرسانی

تحقیق حاضر به منظور نقشه‌برداری دگرسانی‌های هیدروترمال، از روش ماشین بردار پشتیبان استفاده می‌کند. این روش از کاربردی‌ترین روش‌های مدل‌سازی داده‌های اکتشافی است که بر پایه اصول یادگیری استوار است. از خصوصیات اصلی این روش قدرت بالا در به‌کارگیری نمونه‌های آموزشی کم‌تر و دقت بیش‌تر است. در این الگوریتم کانسار به دو محدوده آموزشی و آزمایشی تقسیم می‌شود. ابتدا برای مشخص کردن داده‌های آموزشی باید مناطقی از تصویر را که دارای پیکسل‌های همگن هستند، انتخاب کرد، سپس با عبور یک مرز خطی و با به‌کارگیری تمامی باندها و یک الگوریتم، داده‌ها را کلاس‌بندی کرد. به این صورت که تعدادی از نقاط آموزشی که دارای حداقل فاصله تا مرز تصمیم‌گیری هستند، به‌عنوان بردار پشتیبان در نظر گرفته می‌شوند. روش ماشین بردار پشتیبان برای آشکارسازی زون‌های دگرسانی، نیازمند مناطق آموزشی برای یادگیری است. این مناطق به‌صورت پلیگونی‌هایی با رنگ‌های قرمز، سبز و آبی در شکل ۷ مشخص شده‌اند. در مجموع ۲۲۰۴ پیکسل برای معرفی مناطق آموزشی انتخاب شد که ۵۱۶ پیکسل مربوط به زون دگرسانی آرژلیک، ۱۲۷۸ پیکسل مربوط به زون دگرسان فلیک و ۵۰۰ پیکسل مربوط به زون دگرسانی پروپیلیتی است. پیکسل‌های مناطق آموزشی از تمامی مناطق معدنی کدر، گودکولواری، ایجو، سرنو و چاه فیروزه انتخاب شده است که شکل ۷ پیکسل‌های آموزشی مناطق معدنی مختلف را نشان می‌دهد.

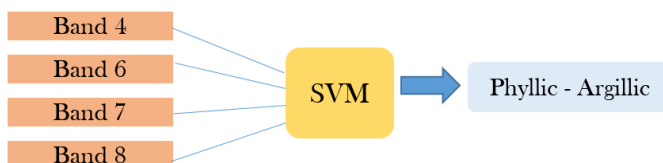
نقشه برداری زون دگرسانی فلیک و آرژلیک

براساس پژوهش‌های زمینی و آزمایشگاهی انجام شده به‌وسیله مجدی‌فر و همکاران (۲۰۱۳) و هنرمند و همکاران (۲۰۱۱)، ۱۲۷۸ پیکسل از مناطق کانی‌سازی شده زون فلیک و ۵۱۶ پیکسل از زون آرژلیک به‌عنوان مناطق آموزشی انتخاب شد. موقعیت این پیکسل‌ها با رنگ سبز و قرمز به‌ترتیب برای زون فلیک و آرژلیک در شکل ۷ نشان داده شده است. الگوریتم ماشین بردار پشتیبان با استفاده از تابع پایه شعاعی برای شناسایی زون دگرسانی فلیک و آرژلیک به‌کار گرفته شد. برای یادگیری بهتر ماشین بردار پشتیبان باندهای ۴، ۶، ۷،

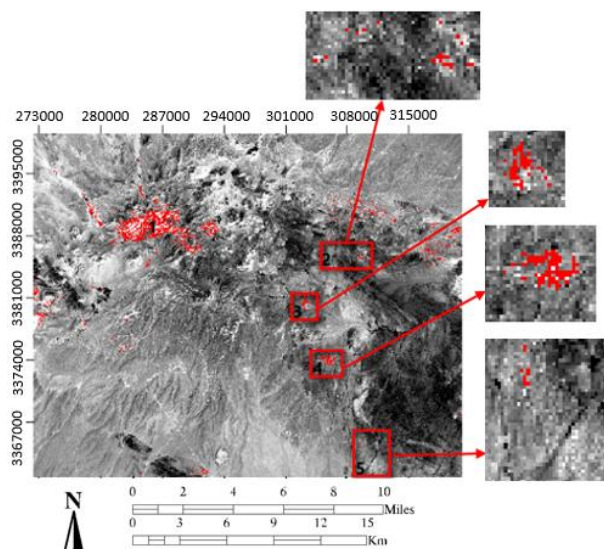
۸ به عنوان ورودی این الگوریتم انتخاب شدند که به عنوان باندهای مؤثر در اثرانگشت طیفی کانی های سریسیت و کائولینیت شناخته می شوند. شکل ۸ ساختار اصلی داده های ورودی را برای زون های فیلیک و آرژیلیک نشان می دهد



شکل ۷. مناطق آموزشی زون های دگرسانی مختلف (قرمز: آرژیلیک، سبز: فیلیک، آبی: پروپیلیتیک)

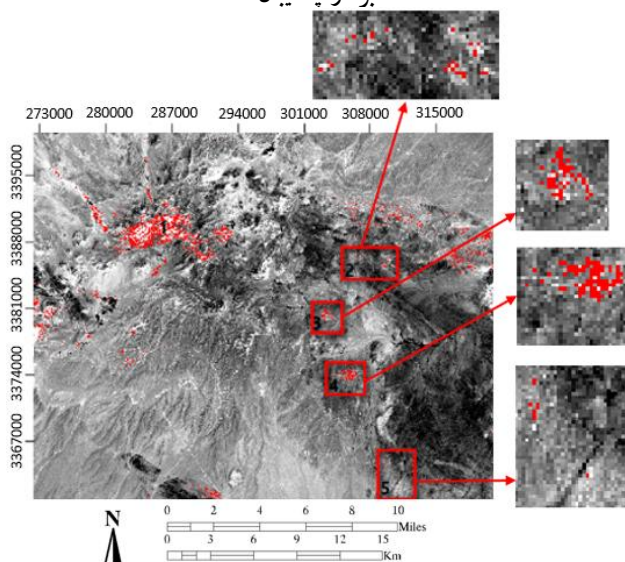


شکل ۸. ساختار داده های ورودی الگوریتم ماشین بردار پشتیبان برای طبقه بندی زون های دگرسانی فیلیک و آرژیلیک



شکل ۹. نقشه برداری زون دگرسانی فیلیک با استفاده از باندهای ۴، ۶، ۷، ۸ آستر به وسیله ماشین

بردار پشیمان



شکل ۱۰. نقشه برداری زون دگرسانی آرژیلیک با استفاده از باندهای ۴، ۶، ۷، ۸ آستر به وسیله

ماشین بردار پشیمان

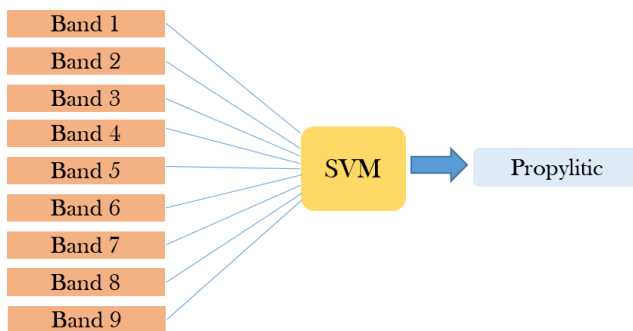
شکل ۹ و ۱۰ خروجی الگوریتم ماشین بردار پشتیبان را برای زون های فیلک و آرژیلیک نشان می دهد. براساس پژوهش های هنرمند و همکاران (۲۰۱۱)، دگرسانی فیلک در ذخایر ایجو، سرنو، چاه فیروزه و کدر غالب است که ماشین بردار پشتیبان توانسته است توزیع دگرسانی فیلک را در ذخایر کدر، ایجو، سرنو و چاه فیروزه آشکارسازی کند. علاوه بر این، دگرسانی آرژیلیک در ذخایر کدر، سرنو و گودکولواری در پژوهش های زمینی مشاهده شده است که به وسیله ماشین بردار پشتیبان در مناطق کدر و سرنو به خوبی شناسایی شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، کاملاً مشخص است که ماشین بردار پشتیبان نمی تواند زون های دگرسانی فیلک و آرژیلیک را از یک دیگر تفکیک کند زیرا نتوانسته است دگرسانی آرژیلیک را در گودکولواری نشان دهد و طبقه بندی تقریباً مشابهی با زون فیلک نشان می دهد. دلیل را می توان در شباهت طیفی کانی های کائولینیت و سربسیت دانست.

نقشه برداری زون دگرسانی پروپیلیتیک

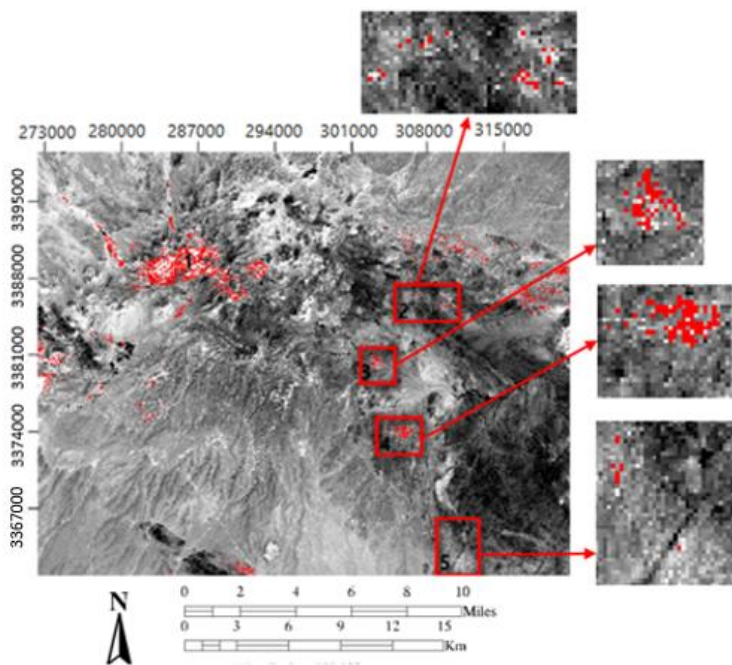
برای آشکارسازی زون پروپیلیتیک به وسیله ماشین بردار پشتیبان، تابع پایه شعاعی به عنوان تابع هسته این الگوریتم انتخاب شد و هم چنین تعداد ۵۰۰ پیکسل به عنوان منطقه آموزشی انتخاب شد. موقعیت پیکسل های آموزشی زون پروپیلیتیک در شکل ۷ با رنگ آبی نشان داده شده است. این تحقیق از ۹ باند مرئی و مادون قرمز نزدیک سنجنده آستر به عنوان ورودی الگوریتم ماشین بردار پشتیبان استفاده کرد. شکل ۱۱ ساختار ورودی های زون دگرسانی پروپیلیتیک را نشان می دهد

هنرمند و همکاران (۲۰۱۱) بیان می کنند که دگرسانی های فیلک، آرژیلیک و پروپیلیتیک در منطقه کدر به صورت یک نواخت مشاهده می شود. هم چنین تحقیقات آن ها نشان می دهد که دگرسانی پروپیلیتیک در اطراف بیش تر ذخایر معدنی پورفیری منطقه توزیع شده است. شکل ۱۲ خروجی دگرسانی پروپیلیتیک با استفاده از ماشین بردار پشتیبان را نشان می دهد. شکل ۱۲ دقیقاً نتیجه پژوهش های زمینی و آزمایشگاهی را تأیید می کند و در اطراف ذخایر پورفیری منطقه، دگرسانی پروپیلیتیک آشکارسازی شده است. کدر منطقه ای است که به وسیله

ماشین بردار پشتیبان هر سه زون دگرسانی آن به‌خوبی شناسایی شده است.



شکل ۱۱. ساختار داده‌های ورودی الگوریتم ماشین بردار پشتیبان برای طبقه‌بندی زون دگرسانی پروپلیتیک



شکل ۱۲. رداری زون دگرسانی پروپلیتیک با استفاده از ۹ باند مرئی و مادون قرمز نزدیک سنجنده آستر به‌وسیله ماشین بردار پشتیبان
اعتبارسنجی روش ماشین بردار پشتیبان

زون های دگرسانی فیلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک با کانی های شاخص سریسیت، کائولینیت و کلریت و اپیدوت شناخته می شوند. البته کانی های ثانویه متداول دیگری مانند گوتیت، ژاروسیت و هوماتیت نیز در بیش تر ذخایر پورفیری منطقه دیده شده است. مهم ترین کانی هایی که هم پوشانی طیفی زیادی از خود نشان می دهند کانی های سریسیت و کائولینیت می باشند که این معضل به خوبی در نتایج ماشین بردار پشتیبان (شکل ۹ و ۱۰) مشاهده می شود. این الگوریتم نتوانسته است تفکیک قابل توجهی میان این دو زون دگرسانی برقرار کند. علاوه براین، تحقیق حاضر تلاش دارد کیفیت طبقه بندی الگوریتم ماشین بردار پشتیبان را در قالب ماتریس درهم آمیختگی کمی سازی کند. ماتریس درهم آمیختگی جدولی با تعداد سطر و ستون های برابر با تعداد کلاس ها است که می تواند توانایی الگوریتم کلاسه بندی کننده را ارزیابی کمی کند. برای این منظور ماتریس درهم آمیختگی برای سه کلاس دگرسانی فیلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک در جدول ۳ ارائه شده است

جدول ۳. ماتریس درهم آمیختگی نتایج طبقه بندی ماشین بردار پشتیبان

خطای انجام	مجموع پیکسل ها	پروپیلیتیک (FIELD)	فیلیک (FIELD)	آرژیلیک (FIELD)	ماتریس درهم آمیختگی
۷۱/۹۴ %	۳۳۵	۴	۲۳۷	۹۴	آرژیلیک (SVM)
۲۰/۱۸ %	۶۴۹	۴	۵۱۸	۱۲۷	فیلیک (SVM)
۴/۶۱ %	۱۳۰	۱۲۴	۶	۰	پروپیلیتیک (SVM)
	۱۱۸۰	۳۶۸	۵۱۷	۲۹۵	طبقه بندی نشده
	۲۲۹۴	۵۰۰	۱۲۷۸	۵۱۶	کل پیکسل ها
صحت: ۶۶/۰۶ % کل		۶/۰۶ %	۳۱/۹۳ %	۵۷/۴۶ %	خطای حذف
ضریب: ۰/۶۵۲۲ کاپا		۷۳/۶ %	۴۰/۴۵ %	۵۷/۱۷ %	خطای کور

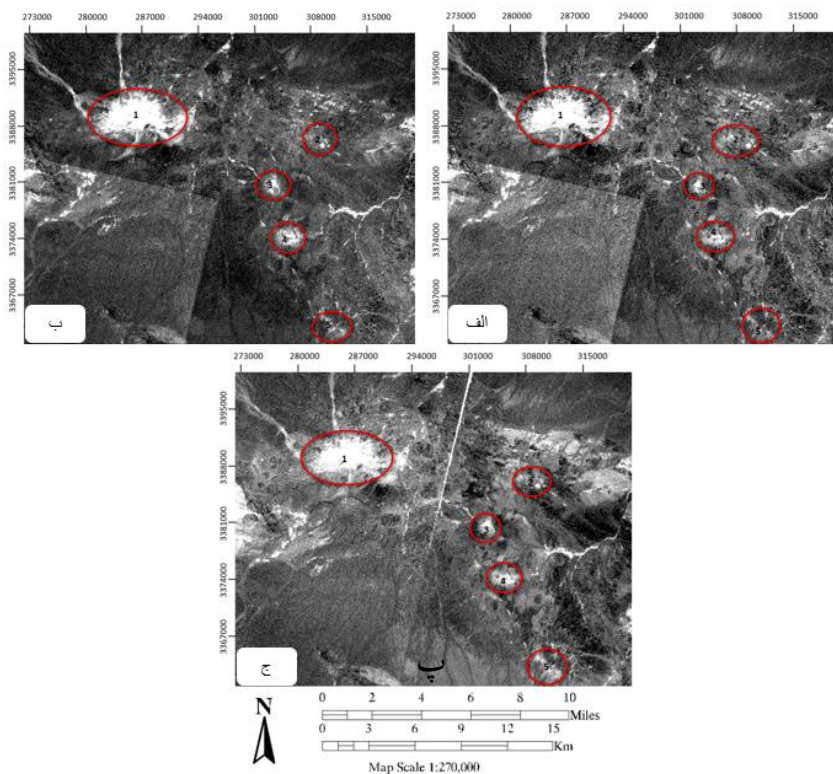
در ماتریس درهم آمیختگی جدول ۳، هر ستون درباره پیکسل های واقعی به کار گرفته شده در یک زون اطلاعات می دهد. بدین معنی که تعداد پیکسل های استخراج شده از زون آرژیلیک ۵۱۶ عدد است که ماشین بردار پشتیبان تعداد ۹۴ پیکسل را به عنوان زون آرژیلیک،

۱۲۷ پیکسل به‌عنوان زون فیلک و ۲۹۵ پیکسل را به‌عنوان زون غیردگرسان یا طبقه‌بندی نشده تشخیص داده است. هر ردیف از ماتریس درهم آمیختگی نیز دربارهٔ پیکسل‌های طبقه‌بندی شده به‌وسیلهٔ ماشین بردار پشتیبان در هر زون اطلاعات می‌دهد. بدین ترتیب که تعداد پیکسل‌های انتخاب شده به‌عنوان زون آرژیلیک به‌وسیلهٔ ماشین بردار پشتیبان برابر ۳۳۵ پیکسل است که تنها ۹۴ پیکسل آن به‌درستی انتخاب شده است و ۲۳۷ پیکسل از زون فیلک و ۴ پیکسل از زون پروپیلیتیک به اشتباه به‌عنوان زون آرژیلیک طبقه‌بندی شده است. برای کمی‌سازی کیفیت طبقه‌بندی الگوریتم ماشین بردار پشتیبان با استفاده از ماتریس درهم آمیختگی، توابع خطای حذف و انجام، محاسبه می‌شوند [۱۴]. هم‌چنین پارامتر صحت کل و ضریب کاپا نیز به‌کار گرفته می‌شوند [۱۴]. خطای حذف برای زون آرژیلیک به این معنی است که ۵۷/۶۶ درصد از پیکسل‌هایی که متعلق به زون آرژیلیک هستند به اشتباه در زون‌های دیگر طبقه‌بندی شده‌اند و خطای انجام زون آرژیلیک این مفهوم را دارد که ۷۱/۹۱ درصد از پیکسل‌های متعلق به زون‌های دیگر به اشتباه در زون آرژیلیک قرار گرفته‌اند. پارامتر صحت کل که نسبت پیکسل‌های صحیح طبقه‌بندی شده را به کل پیکسل‌ها نشان می‌دهد در حالت ایده‌آل باید برابر ۱۰۰ درصد باشد و ضریب کاپا که میزان تطابق طبقه‌بندی انجام شده با واقعیت را بیان می‌کند که کانگالتون و گرین (۲۰۰۹) فرمول آن ارائه کرده‌اند، در بهترین حالت برابر یک خواهد بود. با توجه به جدول ۳، مشاهده می‌شود علی‌رغم کم‌تر بودن پیکسل‌های آموزشی زون پروپیلیتیک ولی ماشین بردار پشتیبان بهترین عملکرد را در ارتباط با این زون نشان می‌دهد و خطاهای حذف و انجام این زون به ترتیب برابر با ۶/۰۶ و ۴/۶۱ درصد به‌دست آمده است. ولی عملکرد الگوریتم استفاده شده در زون فیلک و آرژیلیک ضعیف‌تر می‌شود زیرا هم‌پوشانی طیفی بین کانی‌های مشخصهٔ این زون‌ها چشم‌گیر است و باعث می‌شود نتایج ماشین بردار پشتیبان تحت تأثیر قرار گیرد. نتایج الگوریتم در زون آرژیلیک به بدترین حالت خود می‌رسد که دلیل را می‌توان در کم‌تر بودن تعداد پیکسل‌های آموزشی نسبت به زون فیلک دانست. اما نکتهٔ دیگری که در جدول ۳ وجود دارد و در توابع خطای ذکر شدهٔ فوق نادیده گرفته شده است، پیکسل‌های دگرسانی واقعی

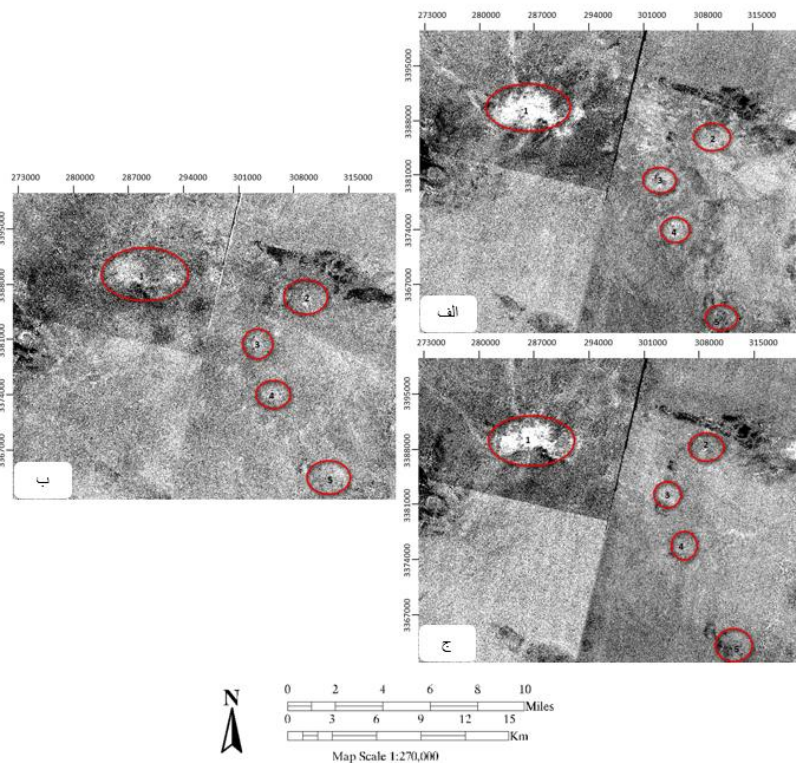
است که الگوریتم آن‌ها را در هیچ‌یک از زون‌های دگرسانی طبقه‌بندی نکرده است و به‌عنوان پیکسل‌های طبقه‌بندی نشده یا غیردگرسان معرفی شده است. بدین‌منظور که این رفتار الگوریتم ماشین بردار پشتیبان نیز کمی‌سازی شود این تحقیق پارامتر خطایی را به‌عنوان خطای کور تعریف کرده است که نسبت پیکسل‌های واقعی دگرسانی طبقه‌بندی نشده در هر زون را معرفی می‌کند. برای زون آرژیلیک خطای کور بدین معنی است که $57/17$ درصد از پیکسل‌های زون دگرسانی آرژیلیک اصلاً به‌عنوان زون دگرسان تشخیص داده نشده‌اند و به‌عنوان زون غیردگرسان معرفی می‌شوند. خطای کور محاسبه شده در جدول ۳ نشان می‌دهد که ماشین بردار پشتیبان علی‌رغم کم‌ترین خطا در جدایش پیکسل‌ها در زون پروپیلیتیک، بیش‌ترین خطای کور را دارد یعنی قطعاً پیکسل‌های دگرسانی در منطقه وجود دارد که به‌وسیله این الگوریتم شناسایی نشده است. علاوه بر ماتریس در هم آمیختگی، این تحقیق از روش‌های مرسوم آنالیز نسبت‌های بانندی و کراستا استفاده می‌کند تا میزان جدایش‌پذیری زون‌های دگرسانی را در مقایسه با الگوریتم ماشین بردار پشتیبان مقایسه کند. احمدی روحانی و همکاران (۱۳۹۳) در پژوهش‌های خود نسبت‌های بانندی $\frac{4}{6}$ و $\frac{4}{6}$ را به‌ترتیب برای شناسایی زون‌های دگرسانی فیلیک و آرژیلیک مؤثر دانسته‌اند. هم‌چنین آن‌ها نسبت بانندی $\frac{4}{7}$ را برای شناسایی کانی‌های زون دگرسانی پروپیلیتیک معرفی کرده‌اند. چنان‌که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، نسبت‌های بانندی مذکور استفاده شده‌اند و زون‌های معدنی با دایره نشان داده شده‌اند. مقایسه سه تصویر خروجی هم‌پوشانی سه زون دگرسانی را در منطقه نشان می‌دهد و عملاً قابلیت تفکیک‌پذیری زون‌های معدنی وجود ندارد.

آلیانی و همکاران (۱۳۹۳) برای آشکارسازی زون‌های فیلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک از روش انتخابی کراستا استفاده نمودند. آنها باندهای 4، 5، 7 را برای دگرسانی آرژیلیک و باندهای 4، 6، 7 را برای دگرسانی فیلیک و باندهای 7، 8، 9 را برای دگرسانی پروپیلیتیک به عنوان ورودی روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی به کار بردند. این تحقیق تلاش نموده است با به کارگیری مؤلفه‌های اصلی مذکور (شکل ۱۴)، تفکیک‌پذیری دگرسانی‌ها را نسبت به الگوریتم بردار پشتیبان مقایسه نماید. همانطور که شکل ۱۴ نشان می‌دهد شناسایی دگرسانی

پروپیلیتیک توسط مؤلفه‌های ۷، ۸ و ۹ به صورت ضعیف انجام شده است و دگرسانی‌های فیلک و آرژیلیک همپوشانی قابل توجهی با یکدیگر دارند. براساس نتایج آنالیز نسبت‌های بانندی و کراستا، تفکیک دگرسانی‌ها از یکدیگر قابل انجام نیست و باید از یک روش متفاوتی استفاده شود که نتایج ماشین بردار پشتیبان نشان می‌دهد این تفکیک پذیری را با صحت بیشتری انجام می‌دهد.



شکل ۱۳. نقشه برداری الف) زون دگرسانی آرژیلیک با استفاده از نسبت بانندی $\frac{4}{5}$ ؛ زون دگرسانی فیلک با استفاده از نسبت بانندی $\frac{4}{6}$ ، ج) زون دگرسانی پروپیلیتیک با استفاده از نسبت بانندی $\frac{4}{7}$



شکل ۱۴. تصاویر حاصل از آنالیز مؤلفه‌های اصلی، الف) تصویر مؤلفه سوم حاصل از آنالیز مؤلفه‌های ۴، ۶ و ۷ شناسایی زون دگرسانی فیلیک، ب) تصویر معکوس مؤلفه سوم حاصل از آنالیز باندهای ۷، ۸ و ۹ برای شناسایی زون دگرسانی پروپیلیتیک، ج) تصویر مؤلفه سوم حاصل از آنالیز باندهای ۴، ۵، ۷ برای شناسایی زون دگرسانی آرژیلیک

نتیجه‌گیری

در این تحقیق تلاش شده است تفکیک دگرسانی‌های فیلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک در ذخایر مس پورفیری کمربند سنوزوییک ماگمایی کرمان را با استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان بررسی شود. برای این منظور ۹ باند محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک سنجنده آستر به‌عنوان ورودی‌های این الگوریتم انتخاب شدند. نتایج نشان می‌دهند تفکیک

دگرسانی‌های فیلیک و آرژیلیک با استفاده از ماشین بردار پشتیبان به درستی امکان‌پذیر نیست به دلیل این که کائولینیت به‌عنوان کانی مشخصه زون آرژیلیک هم‌پوشانی طیفی چشم‌گیری با سریسیت کانی مشخصه زون فیلیک دارد. این واقعیت در ماتریس درهم آمیختگی محاسبه شده نیز مشاهده می‌شود. این ماتریس بیان می‌کند که خطاهای طبقه‌بندی برای زون فیلیک و آرژیلیک زیاد است در صورتی که زون پروپیلیتیک به‌خوبی طبقه‌بندی می‌شود. از طرف دیگر نکته‌ای که این تحقیق به آن پرداخته است معرفی تابع خطایی به نام خطای کور است که با استفاده از ماتریس درهم آمیختگی محاسبه می‌شود. این خطا معیاری از پیکسل‌هایی است که اصلاً به‌وسیله الگوریتم به‌عنوان زون دگرسان تشخیص داده نمی‌شوند. براساس این معیار، ماشین بردار پشتیبان بیش‌تر پیکسل‌های زون پروپیلیتیک را به‌عنوان زون غیردگرسان طبقه‌بندی می‌کند ولی در صورت طبقه‌بندی به‌عنوان زون دگرسان به‌خوبی می‌تواند آن‌ها را از زون‌های فیلیک و آرژیلیک متمایز کند. هم‌چنین نتایج مرسوم پردازش تصویر مانند آنالیز نسبت‌های بانندی و کراستا نشان از نداشتن توانایی این روش‌ها در تفکیک دگرسانی‌ها از یک‌دیگر می‌باشد. در صورتی که ماشین بردار پشتیبان با دقت بیش‌تری تفکیک‌پذیری را انجام می‌دهد. در نهایت می‌توان گفت الگوریتم ماشین بردار پشتیبان نسبتاً ابزار مناسبی برای تشخیص دگرسانی‌های فیلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک است ولی نمی‌تواند تفکیک قابل‌قبولی بین زون‌های فیلیک و آرژیلیک انجام دهد هم‌چنین زون پروپیلیتیک با دقت خوبی انتخاب می‌شود ولی خطای کور این زون زیاد است و باید با روش‌های دیگری تصحیح انجام شود.

منابع

۱. آلیانی ف.، دادفر ث.، معانی جو م.، "آشکارسازی زون‌های دگرسانی کانسار آهن حاجی آباد، با استفاده از داده‌های (SWIR+VNIR) سنجنده آستر"، مجله علوم زمین، شماره ۹۴ (۱۳۹۳) ۷۳-۸۰.
۲. امینی ج.، "پردازش کامپیوتری تصاویر سنجنش از دور"، ترجمه، مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران، چاپ اول (۱۳۸۸).

۳. عباسزاده س.، رنجبر ح.، رحیمی پور غ. ر.، علیخانی ا.، "کاربرد روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی و انتخابی روی داده‌های سنجنده آستر جهت نقشه‌برداری مناطق دگرسان شده، مطالعه موردی، منطقه حراران، استان کرمان"، همایش ملی ژئوماتیک (۱۳۸۹).
۴. گودرزی مهر س.، عباسپور ر. ع.، احدنژاد و.، خاکباز ب.، "مقایسه روش ماشین بردار پشتیبان با روش حداکثر احتمال و شبکه عصبی برای تفکیک واحدهای سنگ شناسی"، فصل‌نامه زمین‌شناسی ایران، شماره ۲۲ (۱۳۹۱) ۷۵-۹۲.
۵. قاسمی ا.، "تلفیق و مدل‌سازی چندمتغیره داده‌های ژئوفیزیک با حفاری‌های اکتشافی انجام شده در کانسارهای مس پورفیری علی‌آباد و دره زرشک جهت شناسایی کلیدهای اکتشافی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان (۱۳۹۰).
۶. ایران خواه ا.، ظریف م.، مزروعی راد ا.، "تشخیص بیماری‌های صرع توسط همبستگی متقابل ماشین‌های بردار پشتیبان برای دسته بندی سیگنال مغزی"، یازدهمین سمپوزیوم پیشرفت‌های علوم و تکنولوژی، کمیسیون اول: مهندسی برق، الکترونیک، پزشکی و سرزمین پایدار، مشهد، ۴ دی ماه (۱۳۹۵).
۷. احمدی روحانی ر.، کریم پور م. ح.، رحیمی ب.، ملک زاده شفارودی آ.، "بارسازی پهنه‌های دگرسانی و ساختارهای خطی در محدوده خاور بچستان با استفاده از پردازش داده‌های SPOT و ASTER+ و Landsat ETM+ و داده‌های ژئوفیزیک"، مجله علوم زمین، شماره ۹۴ (۱۳۹۳) ۲۵۳-۲۶۲.
8. Huang H., Gong P., Clinton N., Hui F., "Reduction of atmospheric and topographic effect on landsat TM data for forest classification", *International Journal of Remote Sensing*, 29 (2008) 5623- 5643.
9. Oommen T., "An objective analysis of Support Vector Machine based classification for remote sensing", *Mathematical Geosciences*, 40 (2008) 409-424.
10. Dimitrijevic M. D., "Geology of the Kerman region. Geological Survey of Iran publication", Tehran, Rep, 52 (1973) 334.

11. Wang L., "Support Vector Machine, Theory and Applications, springer" (2005).
12. Mojeddifar S., Ranjbar H., Nezamabadi-pour H., "Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System application for hydrothermal alteration mapping using ASTER data, Journal of Mining & Environment", Vol. 4, No. 2 (2013) 83-96.
13. Honarmand M., Ranjbar H., Shahabpour J., "Application of Spectral Analysis in Mapping Hydrothermal Alteration of the Northwestern Part of the Kerman Cenozoic Magmatic Arc", Iran, Journal of Sciences 22 (2011) 221-238.
14. Congalton R. G., Green K., "Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data-Principles and Practices", 2nd ed. Lewis publishers, Boca Raton, (2009).