

مقایسه روش‌های طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان و حداکثر احتمال برای تفکیک واحدهای دگرسانی منطقه تخت گنبد سیرجان

ندا ماهوش محمدی^۱ و اردشیر هزارخانی^{۲*}

۱. دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۲. استاد دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۷/۰۱

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۱/۲۸

چکیده

تفکیک واحدهای دگرسانی، برای بسیاری از فعالیت‌های معدنی از جمله اکتشاف کانسارها، دارای اهمیت می‌باشد. در گذشته از روش‌های رایج کلاسیک بدین منظور استفاده می‌شد اما امروزه روش ماشین بردار پشتیبان (SVM) که یکی از مهم‌ترین مدل‌های داده کاوی است بسیار مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل براساس نظریه یادگیری آماری می‌باشد. در پژوهش حاضر، روش ماشین بردار پشتیبان (SVM) و کرنل‌های مختلف آن با روش حداکثر احتمال به منظور تفکیک واحدهای دگرسانی مواد معدنی منطقه تخت گنبد با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده ASTER مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که روش SVM با تابع کرنل RBF نسبت به سایر کرنل‌ها و روش حداکثر احتمال، بیشترین دقت (۸۹/۱۷ درصد) و ضریب کاپا (۰/۸۳) را دارا می‌باشد. ارزیابی نتایج به دست آمده و مطالعات صحرایی گویای این حقیقت است که روش SVM در طبقه‌بندی دگرسانی‌هایی با تفکیک پایین‌تر در منطقه مورد مطالعه بسیار کارآمدتر از روش‌های مورد بحث دیگر بوده است.

واژه‌های کلیدی: دگرسانی، ماشین بردار پشتیبان، حداکثر احتمال، سنجش از راه دور، استر.

مقدمه

یکی از پرکاربردترین موارد در استفاده از داده‌های سنجش از دور است. روش‌های متعدد طبقه‌بندی وجود دارد که با توجه به نوع روش مورد استفاده نتایج متفاوتی حاصل می‌شود (Guo et al., 2012). متداول‌ترین روش‌های طبقه‌بندی تصویر را می‌توان روش آماری حداکثر احتمال و کمترین فاصله، نام برد (ندوشن و همکاران، ۱۳۸۸). ضعف این روش‌ها در این است که در صورتی که عارضه مورد نظر دارای اختلاف اثر طیفی کمی نسبت به سایر عوارض باشد، تفکیک آن به‌طور اتوماتیک بسیار دشوار می‌شود (Hord, 1982). این

روش‌های سنجش از دور در مقایسه با روش‌های دیگر تولید اطلاعات مانند نقشه‌برداری زمینی، عکس‌برداری هوایی و آمارگیری‌های محلی از مزایای بسیار برخوردار هستند (Campbell and Wynne, 2011). سنجش از دور علاوه بر اینکه مشکل دسترسی به محل و حضور فیزیکی در آن را که لازمه روش‌های زمینی و سنتی است را به حداقل رسانده است، با ایجاد پوشش خوبی از منطقه مورد مطالعه امکان دید کلی از آن را فراهم می‌سازد. طبقه‌بندی و تهیه نقشه

* نویسنده مرتبط: ardehez@aut.ac.ir

نتایج تحقیق نشان داد که SVM با کرنل شعاعی نسبت به دیگر کرنل‌ها دقت بالاتری دارد (Kavzoglu and Colkesen, 2009). علاوه بر آن Pal and Mather در سال ۲۰۰۵ روش‌های حداکثر احتمال، شبکه عصبی و روش SVM را برای طبقه‌بندی پوشش زمین با استفاده از تصاویر ETM به کار برده‌اند، نتایج تحقیق نشان داده است که روش SVM نسبت به سایر روش‌های به کار برده شده، دقت بالاتری دارد، همچنین می‌تواند با استفاده از تعداد داده‌های کمتری بهترین نتیجه را بدهد (Pal and Mather, 2005). مختاری در سال ۱۳۹۴ روش‌های طبقه‌بندی SVM و شبکه عصبی مصنوعی را برای طبقه‌بندی کاربری‌های اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ETM به کار گرفت. نتایج تحقیق نشان دادند که SVM قابلیت جداسازی بهتری نسبت به سایر روش‌ها دارد (مختاری و نجفی، ۱۳۹۴). گودرزی مهر و همکاران در سال ۱۳۹۱ روش‌های SVM و حداکثر احتمال و شبکه عصبی را به منظور تفکیک واحدهای سنگ‌شناسی با یکدیگر مقایسه کرده است، که نتایج به دست آمده، نشان داد که روش SVM در داده‌های با تفکیک‌پذیری پایین بسیار کارآمدتر از دو روش دیگر است (گودرزی مهر و همکاران، ۱۳۹۱).

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش منطقه تخت گنبد واقع در استان کرمان و کمان ماگمایی ارومیه دختر است. کمان ماگمایی ارومیه دختر، یکی از مهم‌ترین مناطق برای اکتشاف کانسارهای مس پورفیری است. بسیاری از معادن مهم ایران مانند سرچشمه، میدوک و چهارگنبد بر روی این کمان قرار دارند. این کمربند، یکی از مناطق اصلی مس دار جهان و بخشی از کمربند کوهزایی برخوردی آلپ-همالیا است که از غرب اروپا آغاز شده، از ترکیه و سپس ایران گذشته و تا غرب پاکستان ادامه دارد (Shafiei et al., 2010). هدف از این پژوهش، ارزیابی روش‌های طبقه‌بندی SVM با انواع کرنل‌های مختلف و حداکثر احتمال با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای استرو و نرم‌افزار ENVI 5.1 برای تفکیک دگرسانی‌های منطقه تخت گنبد می‌باشد.

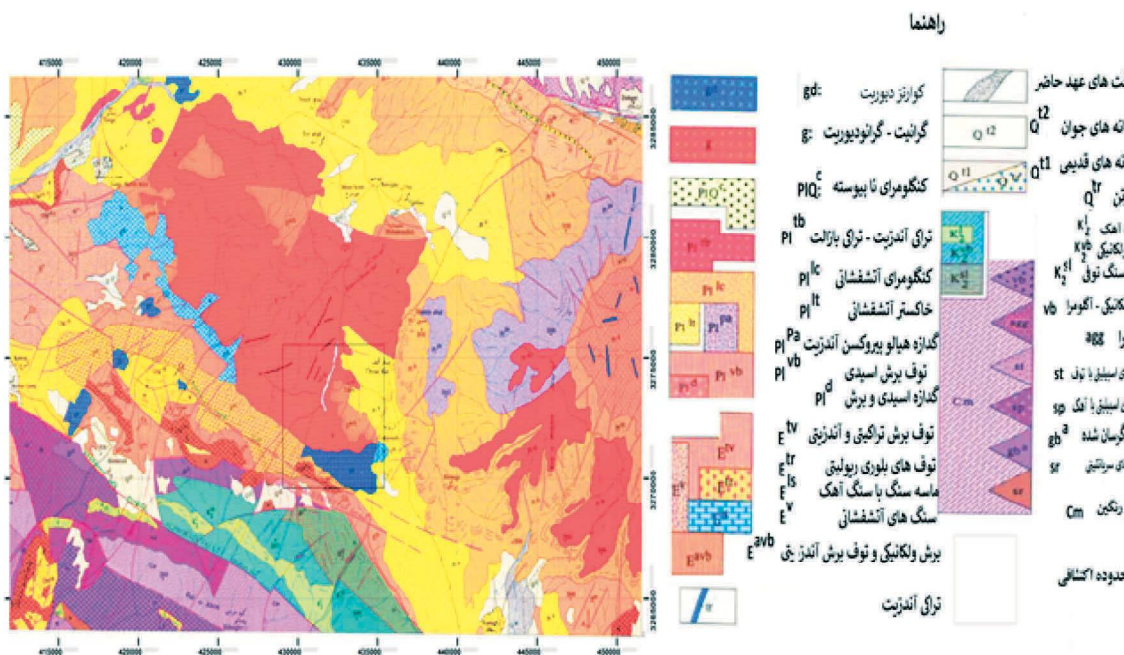
مشکلات منجر به ایجاد روش‌های جدیدتر و استفاده بیشتر از آن‌ها شده است. امروزه روش‌های جدید طبقه‌بندی از جمله روش‌های شبکه عصبی و یادگیری ماشین مانند الگوریتم ماشین بردار پشتیبان، جنگل تصادفی و درخت تصمیم به سرعت توسعه یافته است. هر الگوریتم طبقه‌بندی یک روش پیاده‌سازی مخصوص به خود را دارد، بنابراین همان‌طور که مشهود است، نتایج به دست آمده از هر یک با یکدیگر متفاوت است. یکی از کارآمدترین روش‌ها در تفکیک تصاویر ماهواره‌ای روش ماشین بردار پشتیبان^۱ می‌باشد که از این پس به اختصار با SVM نشان داده می‌شود. روش ماشین بردار پشتیبان در سال ۱۹۹۲ توسط واپنیک معرفی شده است و بر پایه نظریه یادگیری آماری بنا شده است (Vapnik, 1995). مبنای کار آن، طبقه‌بندی داده‌ها به صورت خطی است و در تقسیم خطی داده‌ها سعی می‌شود خط ممیزی انتخاب شود که دارای بیشترین حاشیه باشد. در مسائلی که داده‌ها به صورت خطی جداپذیر نباشند داده‌ها با استفاده از توابع کرنل از هم جدا می‌شوند (Vapnik, 1995). روش SVM مورد استفاده بسیاری از محققین در زمینه‌های مختلف از جمله تفکیک کاربری‌های اراضی، کشاورزی، مطالعات زمین‌شناسی و ... قرار گرفته است (Granian et al., 2016; Abedi et al., 2011; Mountrakis et al., 2012). همچنین در زمینه‌های مختلف زمین‌شناسی از قبیل تهیه نقشه آنومالی‌های مواد معدنی (Shabankareh and Hezarkhani, 2016)، جداسازی زون‌های دگرسانی با استفاده از داده‌های سیالات درگیر (Abbaszadeh et al., 2013) و طبقه‌بندی واحدهای سنگ‌شناسی (Yu et al., 2012) استفاده شده است. علاوه بر آن کاربرد این روش در تصاویر ماهواره‌ای به سرعت افزایش یافته است (Huang et al., 2002; Jiang et al., 2011; Oommen et al., 2008; Camps-Valls et al., 2010). برای مثال برای طبقه‌بندی کاربری اراضی در سال ۲۰۱۲ مقایسه‌ای بین طبقه‌بندی شبکه عصبی و SVM بر روی تصاویر ETM در چین انجام دادند، که نتیجه‌گیری شد، روش SVM عملکرد بهتری نسبت به روش شبکه عصبی دارد (Guo et al., 2012). همچنین در سال ۲۰۰۹ در ترکیه به منظور طبقه‌بندی اراضی از تصاویر ETM استفاده کردند،

1. Support vector machine

زمین‌شناسی منطقه

انواع توف، توفیت، کنگلومرا، ماسه‌سنگ توفی و آهک می‌باشد. بخش دوم شامل فازهای نفوذی الیگوسن و میوسن است که در کانه‌زایی محدوده اکتشافی مؤثر بوده است. در الیگوسن باتولیت اصلی منطقه با ترکیب گرانیته به صورت پلاتفرم‌های کم ارتفاع و در میوسن استوک‌های کانه‌زا با ترکیب میکروگرانودیوریت پورفیری قابل رویت است. بخش سوم شامل سنگ‌های آتشفشانی داسیت و ریوداسیت می‌باشد (حسینی و همکاران، ۱۳۹۴). از دیدگاه زمین‌شناسی ساختمانی، این محدوده اکتشافی بشدت گسله بوده و گسل‌ها عمدتاً شامل گسل‌های امتدادلغز و تراستی می‌باشند. به نظر می‌رسد تیپ کانه‌زایی در این محدوده اکتشافی به صورت پرفیری-اسکارن باشد. کانه‌زایی‌ها بیشتر به صورت رگه، رگچه، افشان و پیچ‌مانند بوده و بیشتر در واحدهای سیلیسی و استوک‌های میکروگرانودیوریت متمرکز است. کانه‌زایی در کانسار مس تخت‌گنبد در ارتباط با ساختار استوک ورک و رگه-رگچه‌های حاصل از نفوذ توده گرانودیوریتی است که موجب ایجاد سیستم کانه‌زایی نوع پورفیری در داخل خود و توف‌های مجاور شده است (شرکت مس تخت‌گنبد سیرجان، ۱۳۸۹).

از لحاظ زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه بخشی از برکه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ چهارگنبد است که بین طول جغرافیایی $E 56^{\circ} 06' 35''$ تا $E 56^{\circ} 28' 10''$ و عرض جغرافیایی $N 29^{\circ} 27' 19''$ تا $N 29^{\circ} 43' 12''$ قرار دارد (شکل ۱). کانسار مس تخت‌گنبد سیرجان در استان کرمان در فاصله ۷۰ کیلومتری شمال خاور شهرستان سیرجان و ۴۲ کیلومتری شمال خاوری روستای بلورد قرار دارد. از نظر موقعیت ساختاری در کمربند ماگمایی ارومیه-دختر واقع شده است. با توجه به نقشه زمین‌شناسی، منطقه مورد مطالعه بیشتر از واحدهای گرانیته-گرانودیوریت، کوارتز دیوریت و توف ریولیتی تشکیل شده است. همچنین به‌طور عمده از سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی ائوسن پوشیده شده است. همچنین نهشته‌های نئوژن به‌صورت رسوبات کربناتی و آواری و نیز سنگ‌های آتشفشانی عمدتاً در بخش‌های جنوب‌غربی، شرق و مرکز ورقه برونزد دارند (خان‌ناظر، ۱۳۷۴). سنگ‌های رخنمون دار محدوده اکتشافی در سه بخش اصلی قرار دارند. بخش اول شامل ردیفی از سنگ‌های ولکانوسدیمتر متعلق به ائوسن است که در اثر فازهای بعدی ماگمایی دگرگون شده‌اند. لیتولوژی این ردیف شامل سنگ‌های آتشفشانی،



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (بخشی از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورقه چهارگنبد: خان‌ناظر، ۱۳۷۴)

دگرسانی‌های منطقه مورد مطالعه

گرمایی و کانی‌سازی است. به‌طرف بیرون ممکن است دگرسانی پروپلیتی و گاهی نیز سنگ سالم آن را احاطه کند. دگرسانی پلاژیوکلازهای سنگ موجب تولید این دگرسانی با حضور کانی‌های گروه کائولینیت، ایلیت، مونت موریلونیت می‌شود.

دگرسانی پروپلیتیک

دگرسانی پروپلیتی اولین و بیرونی‌ترین دگرسانی تشکیل شده پیرامون کانسار در وسعت زیاد است. دگرسانی پروپلیتیک با کانی‌های کلریت، اپیدوت، کلسیت به همراه مقادیر کمتری زئولیت و آمفیبول (اکتینولیت) مشخص می‌شود. عموماً زون دگرسان اولیه در ادامه فعالیت‌های گرمایی با دگرسانی‌های کوارتز-پتاسیک، آرژیلیک و سربیسیت جایگزین می‌شود، لذا تنها بخش‌های حاشیه‌ای آن باقی می‌ماند و به‌صورت غلاف بزرگی که نشانگر محدوده فعالیت محلول‌های گرمایی بوده، کانی‌سازی را فرا می‌گیرد.

داده‌ها و روش تحقیق

روش ماشین بردار پشتیبان

روش SVM براساس این فرض عمل می‌کند که هیچ‌گونه اطلاعاتی از توزیع مجموعه داده‌ها وجود نداشته باشد. مهم‌ترین ویژگی آن‌هم، توانایی بالایی در استفاده از نمونه‌های تعلیمی کمتر و دستیابی به دقت بالاتر نسبت به سایر روش‌های طبقه‌بندی است (Mantero et al., 2005). مبنای کاری دسته‌بندی ماشین بردار پشتیبان، طبقه‌بندی داده‌ها به‌صورت خطی است و در تقسیم خطی داده‌ها سعی می‌شود رده‌ها را با استفاده از یک مرز خطی از هم جدا کند به‌گونه‌ای که این خط دارای بیشترین حاشیه باشد. در ابتدا روش ماشین بردار پشتیبان را برای حالت دومتغیره در فضای دوبعدی که به‌صورت کاملاً جدا از هم باشند در نظر گرفته شده است. سپس حالت غیرخطی یعنی جایی که رده‌ها به‌صورت خطی جداپذیر نیستند، تعمیم داده می‌شود (Hastie et al., 2009). شکل ۲ بهترین برازش خط برای جداسازی رده‌ها را نشان می‌دهد.

دگرسانی‌های اصلی شناخته شده در کانسار مس تخت گنبد شامل فیلیک، آرژیلیک سوپرزن، پروپلیتیک، سیلیسی و کربناتی شدن است. دگرسانی فیلیک با بیشترین گسترش در محدوده، همراه اصلی کانه‌زایی هیپوژن مشاهده می‌شود. دگرسانی پتاسیک تقریباً به‌طور کامل با دگرسانی فیلیک جایگزین شده و فقط به‌طور محلی، بقایایی از بیوتیت ثانویه به‌صورت پراکنده در توده‌های میکروگرانودیوریتی مشاهده می‌گردد. دگرسانی آرژیلیک سوپرزن در سطح و اعماق کم گسترش داشته و دگرسانی فیلیک را تحت تأثیر قرار داده است. دگرسانی پروپلیتیک به‌صورت گسترده در اطراف محدوده کانه‌زایی و عمدتاً در واحدهای توفی مشاهده می‌شود (حسینی و همکاران، ۱۳۸۹).

دگرسانی سربیسیتی (فیلیک)

در دگرسانی کوارتز-سربیسیتی، کانی‌های ایلیت/سربیسیت و نیز تورمالین، کوارتز و کائولینیت غالب هستند. دگرسانی کوارتز-سربیسیتی یا فیلیک متداول‌ترین نوع دگرسانی در سنگ‌های غنی از آلومینیوم در عمق‌های متوسط است. کانی‌های عمده آن سربیسیت (موسکویت/ایلیت)، کائولینیت +/- کوارتز (ژاسپروئید)، تورمالین، کائولینیت و گاهی کانی‌های کربناته است و پیریت اغلب آنها را همراهی می‌کند. در اطراف رگه‌ها کلریت با سربیسیت همراه می‌شود. سربیسیتی شدن معمولاً در فاز آخر کانی‌زایی با دگرسانی فلدسپات و میکاها تشکیل می‌شود که با تولید مقادیر زیادی کوارتز ثانویه همراه است. وفور کانی کوارتز در این زون موجب شده از واژه کوارتز-سربیسیت برای توصیف دقیق‌تر این زون استفاده شود. با اسیدی‌تر شدن محلول، سربیسیت‌های تولیدی جای خود را به کائولن می‌دهند و در صورتی که این فرآیند ادامه یابد، شستشوی شدید سنگ منجر به تولید کانی‌هایی چون آلونیت و پیروفیلیت می‌شود.

دگرسانی آرژیلیک

دگرسانی آرژیلیکی یا آرژیلیک متوسط وسیع‌ترین و متداول‌ترین نوع دگرسانی برای بسیاری از سیستم‌های

بهینه که داده‌ها را رده‌بندی کند کار مشکلی است. یک راه حل بسیار خوب برای حل این مشکل، انتقال داده‌ها به فضای دیگر و یافتن بردارهای جدیدی است که جداسازی داده‌ها در این حالت به صورت خطی امکان‌پذیر باشد و حل مسئله جداسازی داده‌ها ساده‌تر می‌شود. در این صورت تابع K را به عنوان کرنل تعریف می‌کنیم (رابطه ۴). K ، تابعی است که مقدار آن به ازای دو بردار ورودی، برابر با حاصل ضرب داخلی داده‌های نگاشت شده، به فضای جدید می‌باشد و به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود. که در آن ϕ تابع نگاشت داده‌ها به فضای جدید است، فرض بر این است که x_1 و x_2 دو بردار از داده‌های اصلی است (Vapnik, 1995).

$$K_{\phi}(x_i, x_j) = \sum_{j=1}^q \phi_j(x_i) \cdot \phi_j(x_j) \quad (4)$$

تعدادی از توابع معروف کرنل از جمله کرنل خطی، چندجمله‌ای و پایه شعاعی (RBF) در زیر معرفی شده است.

$$\text{خطی} \quad K(x_i, x_j) = x_i^T x_j \quad (5)$$

$$\text{چندجمله‌ای} \quad K(x_i, x_j) = (x_i^T x_j + r)^d \quad (6)$$

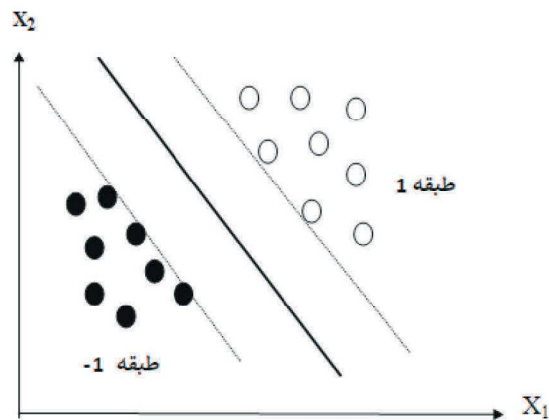
$$\text{RBF} \quad K(x_i, x_j) = \exp(-\|x_i - x_j\|^2 / 2\sigma^2) \quad (7)$$

که در آن x^T ترانزپوز بردار x است، همچنین K باید تابعی مثبت و متقارن باشد (Hastie et al., 2009). بنابراین می‌توان گفت در حقیقت این الگوریتم در پی یافتن یک ابر صفحه‌ای است که بتواند به نحوی عمل کند تا ضمن سازگاری با داده‌های تعلیمی، توانایی تفکیک و جداسازی مجموعه داده از یکدیگر را نیز داشته باشد (Mountrakis et al., 2011).

روش حداکثر احتمال

روش حداکثر احتمال یک روش آماری که هنوز هم جزء رایج‌ترین روش‌های طبقه‌بندی می‌باشد. در ابتدا احتمال اینکه پیکسل موردنظر متعلق به هر یک از کلاس‌های موجود باشد، محاسبه می‌گردد، و در نهایت پیکسل به کلاسی که بیشترین احتمال را دارد تعلق می‌گیرد (Jensen, 2005). قانون بیز (رابطه ۸) برای محاسبه احتمال به صورت زیر معرفی شده است (Oommen, 2008):

$$D = \ln(ac) - [0.5 \ln(\text{Cov})] - [0.5(X - Mt)^T (\text{Cov}^{-1})(X - Mt)] \quad (8)$$



شکل ۲. نمایش خط جداکننده (خط تیره) برای دو طبقه (۱ و -۱)

نزدیک‌ترین داده‌ها به خط جداکننده بردار پشتیبان نامیده می‌شود. به فاصله بین دو صفحه مرزی حاشیه گویند. هدف اصلی در روش طبقه‌بندی SVM ماکزیمم‌سازی حاشیه می‌باشد. معادله خط جداکننده دو رده به صورت $\langle w, x \rangle + b = 0$ تعریف می‌شود. اگر داده‌ها در رابطه $w \cdot x + b \leq 1$ صدق کنند، در رده -۱ قرار می‌گیرند و اگر در رابطه $w \cdot x + b \geq 1$ باشند، در رده +۱ قرار می‌گیرند. داده‌ها به این صورت طبقه‌بندی می‌شوند. فرض کنید داده‌ها شامل n جفت: $\{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\}$ و $y_i \in \{-1, 1\}$ است. در فضای دو بعدی صفحه مورد نظر می‌تواند به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود (Vapnik, 1995).

$$G(x) = \text{sign}[x^T w + b] \quad (1)$$

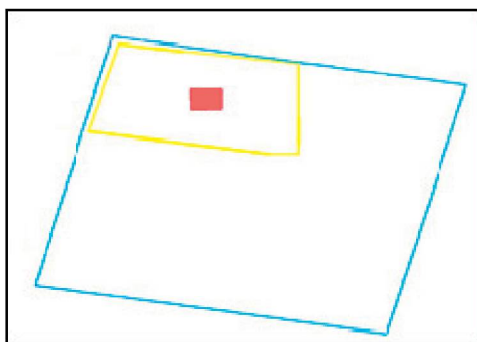
برای به دست آوردن تابع G باید w و b را محاسبه کرد. برای محاسبه w و b از حل معادلات درجه دوم لاگرانژ استفاده می‌شود. در معادلات درجه دوم تابع هدف و تابع مینیمم‌سازی داریم که با توجه به مفروضات مسئله معادلات (۲ و ۳) را داریم:

$$\text{Minimize} \|w\|^2 \quad (2)$$

$$\text{subject to} : y_i (w \cdot x_i + b) \geq 1 \quad (3)$$

این یک مسئله بهینه‌سازی درجه دوم است که با استفاده از مسئله دوگان لاگرانژ قابل محاسبه است. در بسیاری از مواقع داده‌ها به صورت خطی جداپذیر نیستند. در این حالت، ممکن است که جداسازی داده‌ها به وسیله یک منحنی چندجمله‌ای یا دوایر امکان‌پذیر باشد. ولی یافتن منحنی

از آنجایی که حذف کامل خطای رادیومتریک و جوی مستلزم در اختیار داشتن پارامترهای محیطی و جوی زیادی است. لذا برای انجام تصحیح رادیومتریک، از روش Log residual که از قابلیت و کارایی خوبی برخوردار است (لگ، ۱۳۸۰) و همچنین در مطالعات مختلفی استفاده شده است (ماهوش محمدی و همکاران، ۱۳۹۶)، با استفاده از نرم‌افزار ENVI صورت گرفت. پس از آن، جهت تفکیک بهتر مناطق دگرسانی پردازشگر جدید، SVM بر روی تصاویر تصحیح شده انجام شد. یکی از مهم‌ترین عوامل در طبقه‌بندی، انتخاب نمونه‌های تعلیمی است، حتی از انتخاب الگوریتم طبقه‌بندی نیز مهم‌تر است (Hixon et al., 1981). در نتیجه، تاثیر نمونه‌های تعلیمی برای طبقه‌بندی توسط محققین زیادی مورد بررسی قرار گرفته است (گودرزی مهر و همکاران، ۱۳۹۱؛ Genderen and Lock, 1978). یک روش رایج در انتخاب نمونه‌های تعلیمی انتخاب مجموعه‌های کوچکی از پیکسل‌های هموزن در تصویر است (Campbell, 1996). برای تهیه نمونه‌های تعلیمی از برداشت‌های زمینی، مطالعات صحرایی و نقشه دگرسانی منطقه که شرایط همگن بودن پیکسل‌ها در آن لحاظ شده بود، استفاده شده است.



شکل ۳. موقعیت سین ASTER (آبی) پوششی محدوده مطالعاتی (زرد) و محدوده اکتشافی (قرمز)

به‌کارگیری روش SVM

در این پژوهش کارایی روش SVM برای تفکیک واحدهای دگرسانی مورد بررسی قرار گرفته است. لایه‌های هدف شامل سه لایه دگرسانی به نام فیلیک، آرژیلیک و پروپلیتیک و لایه‌های ورودی شامل ۱۴ باند استر است. به‌طور کلی ۱۶۰۰ پیکسل انتخاب شده است که ۱۰۰۰ پیکسل به‌عنوان پیکسل‌های آموزشی و ۶۰۰ پیکسل به‌عنوان پیکسل‌های

D نشان‌دهنده فاصله وزنی، C بیانگر درصد احتمال اینکه پیکسل مورد نظر عضو رده (C) باشد. X معرف بردار اثر طیفی برای پیکسل تحت بررسی، Mt بردار میانگین برای داده‌های تعلیمی در رده ac و Covic نشان‌دهنده ماتریس کوواریانس پیکسل‌های تعلیمی در رده C است (Schrader and Pouncey, 1997؛ گودرزی مهر و همکاران، ۱۳۹۱). با توجه به رابطه ۹ نمونه مورد نظر به کلاس J تعلق می‌گیرد در صورتی که بیشترین مقدار D_i را داشته باشد.

$$j = \arg \max_{i=1 \dots M} D_i \quad (9)$$

در حقیقت در این روش، طبقه‌بندی براساس واریانس و کوواریانس انجام می‌شود. این روش بر این فرض تکیه دارد که پیکسل‌ها در همه‌ی مناطق آموزشی دارای توزیع نرمال هستند (Schrader and Pouncey, 1997؛ ندوشن و همکاران، ۱۳۸۸).

پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای

استر سنجنده‌ای است که حاصل پروژه مشترک آمریکا و ژاپن است و بر روی ماهواره ترا نصب شده است که در سال ۱۹۹۹ توسط ناسا در مدار زمین قرار گرفت. استر تصاویر ماهواره‌ای از زمین را با قدرت تفکیک بالا و در ۱۴ باند مختلف از طیف الکترومغناطیسی در بازه طیف مرئی تا فروسرخ حرارتی را تهیه می‌کند. البته سنجنده SWIR این سنجنده از آوریل ۲۰۰۸ به علت درجه حرارت بالا از کار افتاده است. قدرت تفکیک تصاویر استر از ۱۵ تا ۹۰ متر است. داده‌ای که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، تصویر ماهواره‌ای استر منطقه تخت گنبد واقع در زون ۴۰ N است که به‌منظور پوشش کامل وسعت مطالعاتی منطقه، سین داده استر (مطابق شکل ۳) از سایت UCGS که در تابستان ۲۰۰۷ با پوشش ابر صفر ضبط شده است، انتخاب و به‌کار گرفته شده است.

یکی از مهم‌ترین مراحل قبل از پردازش و آنالیز اصلی داده‌ها، مرحله پیش‌پردازش است، چرا که تمامی محاسبات بعدی براساس تصویر تولیدی در این مرحله انجام می‌گیرد (گودرزی مهر و همکاران، ۱۳۹۱). به‌طور کلی دو فرآیند تصحیح هندسی و تصحیح خطای رادیومتریک بر روی تصاویر اعمال می‌شود.

مقادیر بهینه به دست آمده را نشان می دهد.

جدول ۲. مقادیر بهینه به دست آمده پارامترهای توابع کرنل

توابع کرنل	σ	C	d	T
خطی	-	۱	-	-
RBF	۰/۰۷۱	۱۰۰۰	-	-
چندجمله ای	-	۱۰۰۰۰	۲	۲

نتایج و بحث

با توجه به مقادیر بهینه توابع کرنل ماشین بردار پشتیبان، سه مدل براساس داده های آموزشی و یک مدل براساس روش حداکثر احتمال ساخته می شود. پس از طبقه بندی تصویر برای تفکیک ۳ واحد دگرسانی براساس مدل های ساخته شده، مرحله ارزیابی دقت انجام شد تا روشی که بیشترین دقت را در طبقه بندی دارد مشخص گردد. عملکرد مدل ها را می توان، با استفاده از روش های مختلفی مورد ارزیابی و قیاس قرار داد. یکی از این روش ها محاسبه ماتریس پیش بینی هر مدل است. ماتریس پیش بینی، ماتریسی است که ابعاد آن تعداد کلاس ها است و قطر اصلی آن معرف تعدادی از داده هایی است که کلاس مربوطه، توسط مدل انتخاب شده، به درستی تشخیص داده شده است و بقیه درایه ها به غیر از قطر اصلی داده هایی هستند که اشتباه تشخیص داده شده اند. از این ماتریس معیارهای دقت کلی، ضریب کاپا و دقت کاربر را می توان محاسبه نمود. معیار حساسیت (دقت کاربر)، درستی رده بندی داده ها را نشان می دهد. معیار حساسیت را با نام دیگر (True Positive) هم نشان می دهند. فرمول معیار حساسیت (TP) برابر است با رابطه (۱۰):

$$TPRate = TP/(TP+FN) \quad (10)$$

که (TP) تعداد داده هایی است که درست رده بندی شده اند و (Fals Negative) تعدادی از داده هایی است که به اشتباه طبقه بندی شده اند. همچنین فرمول دقت کلی به زبان ساده به صورت رابطه (۱۱) زیر است:

$$(11) \quad \text{کل نمونه/داده های روی قطر اصلی} = \text{دقت کلی}$$

برای ارزیابی اینکه مدل انتخابی براساس داده های آموزشی مناسب است از داده های آزمون استفاده می شود. بنابراین با استفاده از داده های آزمون عملکرد هر چهار مدل

آزمایشی معرفی شده است (جدول ۱). همان طور که ذکر شد نمونه های آموزشی با توجه به مطالعات صحرایی و رخنمون سنگ های دگرسان شده و همچنین نقشه دگرسانی منطقه که شرایط همگن بودن پیکسل ها در آن لحاظ شده بود انتخاب گردید، که معادل مجموعه کوچکی از پیکسل های هموزن در تصویر است. از طرفی برای اینکه از نمونه های مطمئن تری استفاده شود از تصویر ترکیب رنگی کاذب ۴۶۸ استفاده شده. است تا پیکسل های مشکوک از مجموعه داده های آموزشی مورد نظر حذف شوند. پس از انتخاب داده های آموزشی باید تابع کرنل مناسب برای مدل SVM انتخاب گردد.

جدول ۱. تعداد پیکسل های آموزشی و آزمایشی انتخاب شده برای منطقه تخت گنبد

نام رده	تعداد پیکسل های آموزشی	تعداد پیکسل های آزمایشی
پروپلیتیک	۴۵۰	۲۴۰
آرژلیک	۲۶۰	۱۷۰
فیلیک	۲۹۱۰	۱۹۰
	۱۰۰۰=Total	۶۰۰=Total

از پرکاربردترین توابع کرنل مورد استفاده در ماشین بردار پشتیبان، کرنل خطی، پایه شعاعی و چند جمله ای است (Liu, 2011; Basak et al., 2007). از آنجا که انواع کرنل های مختلف می تواند بر نتایج به دست آمده اثر بگذارد، لذا تأثیر هر کدام از این توابع کرنل ارزیابی می شود. علاوه بر آن، با به دست آوردن مقادیر بهینه پارامترهای توابع کرنل، می توان کرنل مناسب را انتخاب نمود. پارامترهایی مانند درجه کرنل چندجمله ای و مقدار گاما در ابتدا در هر کرنل با استفاده از جستجوی نقطه ای و داده های آموزشی، بهترین مقادیر برای پارامترها به دست می آید. این جستجو با در نظر گرفتن بازه ای برای هر یک از پارامترهای مورد نظر توابع کرنل انجام می گردد و در آن، مجموعه داده آموزشی به دو مجموعه آموزشی و مجموعه اعتبار تقسیم می شود. مجموعه اعتبار حکم یک مجموعه آزمون همزمان را دارد. سپس برای هر یک از توابع مدل های بسیاری با مقادیر متفاوت به دست می آید مدلی که دارای کمترین مقدار خطا باشد به عنوان مدل بهینه انتخاب می شود. جدول ۲، پارامترهای توابع کرنل و

است. و بعد از آن به ترتیب دقت تابع کرنل چندجمله‌ای و سپس کرنل خطی قرار دارد و کمترین مقدار دقت کلی برای روش حداکثر احتمال است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید، در تمام کرنل‌ها روش SVM مقادیر ضریب کاپا و دقت کلی بالاتری نسبت به روش حداکثر احتمال را دارد. روش حداکثر احتمال تا حدود زیادی تحت تأثیر نوع توزیع داده‌های تعلیمی و نزدیکی آن‌ها به توزیع نرمال است. و این امر باعث کاهش دقت این روش شده است.

جدول ۴. مقادیر دقت کلی و ضریب کاپا برای سه کرنل خطی، چندجمله‌ای، RBF و حداکثر احتمال

	ضریب کاپا	دقت کلی
کرنل خطی	۰/۸۱	۸۲/۱۶
کرنل RBF	۰/۸۳	۸۹/۱۷
کرنل چندجمله‌ای	۰/۸۲	۸۶/۳۳
حداکثر احتمال	۰/۷۹	۸۱/۵

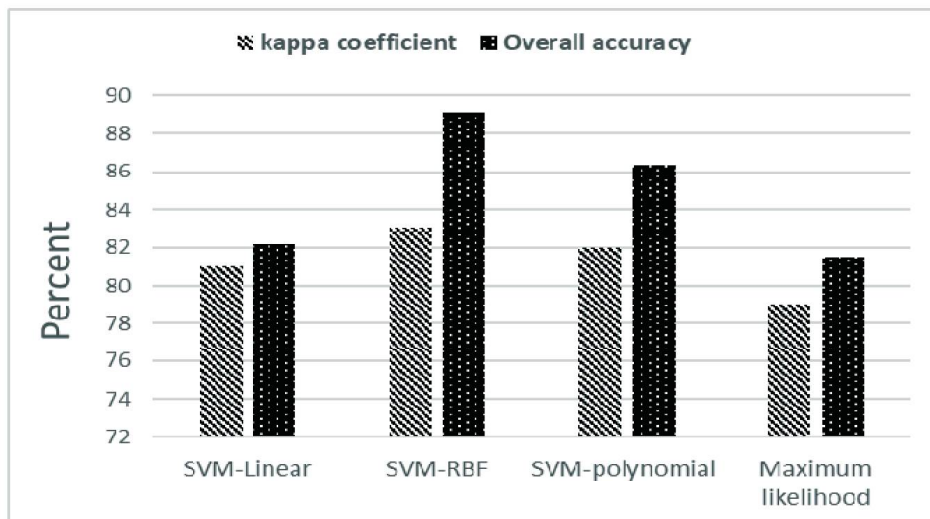
مقدار حساسیت کلاس‌ها برای روش حداکثر احتمال و روش SVM، با استفاده از توابع کرنل خطی، چندجمله‌ای و پایه شعاعی بررسی می‌شود. شکل ۵ نمودار هیستوگرام حساسیت کلاس‌ها است، همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش حداکثر احتمال نسبت به سه تابع کرنل خطی، چندجمله‌ای و پایه شعاعی مقدار حساسیت کمتری دارد. همچنین مقدار حساسیت تابع کرنل خطی نسبت به سایر توابع کرنل، کمتر است. به عبارت دیگر تابع کرنل چندخطی

مورد بررسی و قیاس قرار می‌گیرد تا مشخص شود کدام مدل دقت بالاتری دارد. داده‌های آزمون شامل آنالیز ICP-AES نمونه‌های برداشت شده از ۴۲ گمانه حفاری شده در منطقه برای واحدهای مختلف دگرسانی است که به‌عنوان واقعیت زمینی استفاده شده است. براساس آن ماتریس پیش‌بینی برای هر روش به‌صورت جداگانه محاسبه شد. ممکن است در برخی از مناطق معرفی شده دگرسانی وجود نداشته باشد بنابراین لازم است برای صحت سنجی محدوده‌های معرفی شده کنترل زمینی انجام شود. در جدول ۳، مختصات برخی از نقاط برداشت شده را نشان می‌دهد که برای کنترل زمینی و نتایج به‌دست‌آمده استفاده شده است.

جدول ۳. مشخصات نقاط برداشت شده به‌منظور ارزیابی نتایج به‌دست‌آمده

لیتولوژی	دگرسانی (طیفی)	مختصات نقاط کنترل زمینی (UTM-40N)	
		X	Y
Etr	سیلیسی، آرژلیک، فیلیک، پروپلیتیک	۳۲۶۹۷۶۴	۴۳۳۰۳۳
Etr	سیلیسی، آرژلیک، فیلیک	۳۲۶۹۹۶۵	۴۳۰۴۵۸
Eavb	سیلیسی، فیلیک، پروپلیتیک	۳۲۷۲۹۰۹	۴۳۲۲۶۲
		۳۲۷۲۷۰۹	۴۳۲۲۶۲

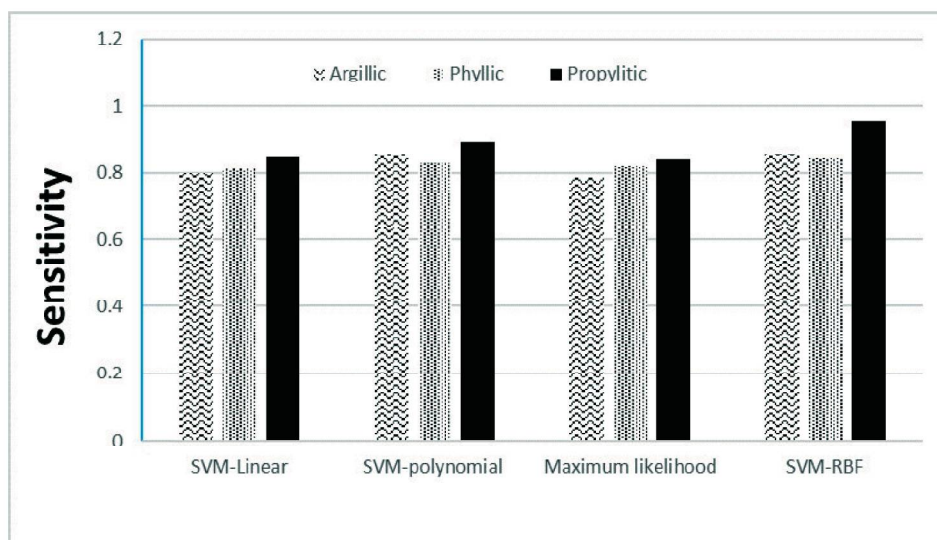
جدول و شکل ۴، دقت کلی و ضریب کاپا برای هر مدل ساخته شده را نشان می‌دهد. بیشترین دقت کلی به‌دست‌آمده برای روش SVM با معادل ۸۹/۱۷ درصد و تابع کرنل RBF



شکل ۴. نمودار ضریب کاپا و دقت کلی برای سه کرنل خطی، چندجمله‌ای، RBF و حداکثر احتمال

حساسیت فیلیک در تابع کرنل خطی با مقدار معادلش در روش حداکثر احتمال تقریباً دارای مقدار مساوی است. ولی به طور کلی مقدار حساسیت برای روش حداکثر احتمال برای هر سه رده نسبت به روش SVM با توابع مختلف کرنل دارای کمترین مقدار است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که کرنل RBF بارز و آشکار است و در طبقه بندی رده ها عملکرد بهتری دارد.

در مقایسه با سایر کرنل های ذکر شده، درستی رده بندی داده ها را به خوبی نشان نمی دهد. روش SVM با تابع کرنل RBF برای هر سه نوع دگرسانی آرژیلیک، فیلیک و پروپلیتیک از مقدار حساسیت بالایی برخوردار است. مقادیر حساسیت ۰/۹۵، ۰/۸۴ و ۰/۸۵ به ترتیب برای رده های پروپلیتیک، فیلیک و آرژیلیک است. بعد از تابع کرنل چندجمله ای بیشترین مقدار حساسیت را دارد. مقدار



شکل ۵. نمودار هیستوگرام حساسیت رده ها با استفاده از روش SVM با کرنل های متفاوت و روش حداکثر احتمال

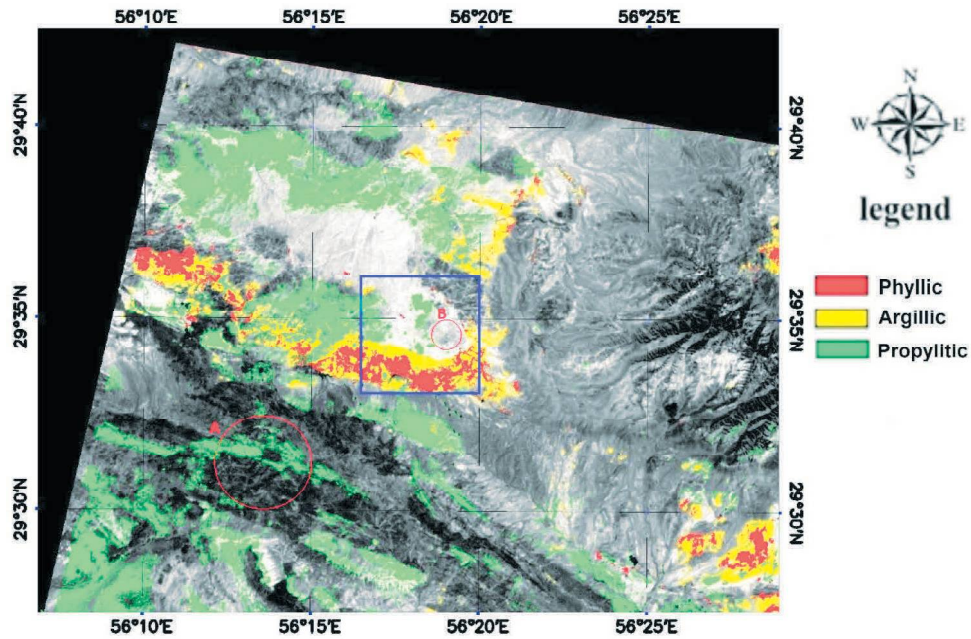
فوق به وفور یافت می شوند و بسیاری از آن ها با دگرسانی پروپلیتیک مرتبط نیستند. نمونه بارز آن بخش های جنوبی- جنوب غربی منطقه است که با افیولیت های غنی از کانی های مافیک و منیزیم دار پوشیده شده است که ارزش اکتشافی ندارند. همچنین در قسمت جنوب شرقی در دامنه جنوبی آتشفشان دگرسانی وسیع و توده ای از آرژیلیک دیده می شود. بر روی این نقطه مقادیر جزئی آلونیت نیز مشاهده شده است. مطابق نقشه زمین شناسی این بخش ها توف- ماسه سنگ و مارن هستند. با مقایسه تصاویر به دست آمده و با توجه به مطالعات صحرایی، دگرسانی هایی که روش SVM نمایش می دهد تا مقدار زیادی به واقعیت نزدیک تر است و روش حداکثر احتمال در برخی نقاط دگرسانی ها را به اشتباه تشخیص داده است. برای مثال با مقایسه محدوده A روی تصاویر طبقه بندی دگرسانی ایجاد شده توسط روش های ذکر شده در تحقیق، تصویر ۶ در این نقطه دگرسانی پروپلیتیک را شدیدتر نشان می دهد در صورتی که

با توجه به نتایج به دست آمده و با بررسی نمودارها، مشخص شد که روش SVM با تابع کرنل RBF دقت کلی، ضریب کاپا و حساسیت بالاتری نسبت به سایر روش ها دارد بنابراین می توان گفت که عملکرد بهتری در طبقه بندی رده ها دارد. تصاویر ۶ و ۷ نقشه طبقه بندی دگرسانی های فیلیک، آرژیلیک و پروپلیتیک منطقه تخت گنبد را با استفاده از روش های SVM با تابع کرنل RBF و حداکثر احتمال نمایش می دهند که رنگ قرمز معرف دگرسانی فیلیک و رنگ زرد و سبز به ترتیب معرف دگرسانی های آرژیلیک و پروپلیتیک است. با توجه به تصاویر به دست آمده و مقایسه آن با نقشه زمین شناسی منطقه و داده های کنترل زمینی (جدول ۳) می توان نتیجه گرفت، که به طور کلی دگرسانی فیلیک در قسمت غرب منطقه به وفور پیدا می شود که با واحد توف ریولیتی ارتباط نزدیک دارد. و دگرسانی پروپلیتیک در قسمت شمال غربی ظاهر شده است. کانی های کلریت، اپیدوت و کلسیت در محدوده اکتشافی

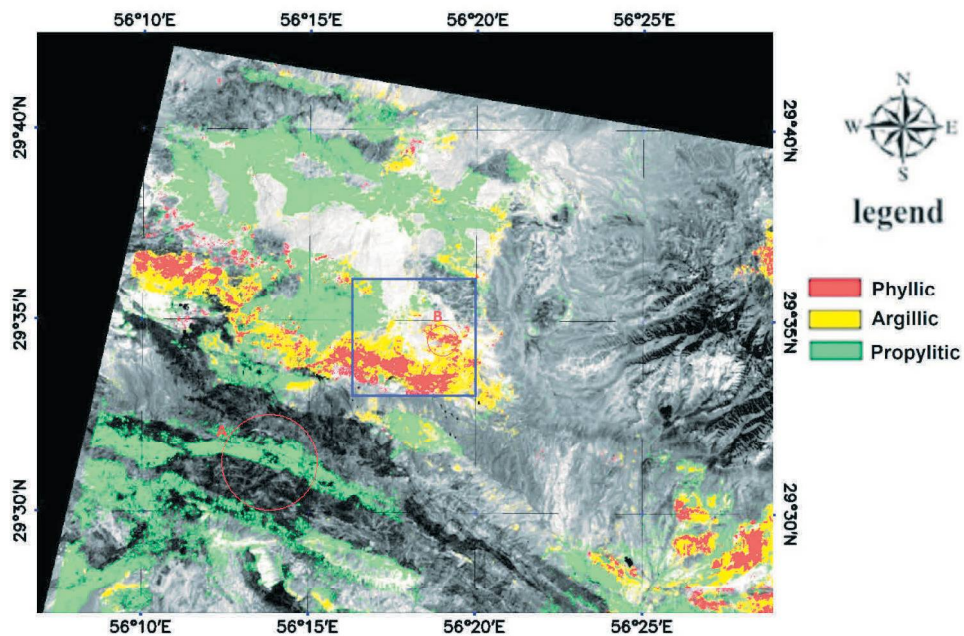
مقایسه روش‌های طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان و حداکثر احتمال ...

که این محدوده فاقد این نوع دگرسانی‌هاست که در روش ماشین بردار پشتیبان به درستی تشخیص داده شده است. بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان به این نتیجه رسید که روش SVM با تابع کرنلی RBF برای تفکیک واحدهای دگرسانی منطقه مورد مطالعه می‌تواند بسیار کارآمد و مؤثر باشد.

این محدوده نماینده واریزه‌هایی است که غنی از کانی‌های مافیک و منیزیم‌دار هستند که با دگرسانی پروپلیتیک ارتباطی ندارند. همچنین در محدوده B همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود روش حداکثر احتمال گسترش دگرسانی‌های فلیک و آرژیلیک را بسیار وسیع نشان داده است در صورتی که با مطالعات صحرایی مشخص شده است



شکل ۶. نقشه دگرسانی به دست آمده از منطقه تخت گنبد با استفاده از روش SVM و تابع کرنل RBF



شکل ۷. نقشه دگرسانی به دست آمده از منطقه تخت گنبد با استفاده از روش حداکثر احتمال

نتیجه‌گیری

برای مقایسه و ارزیابی روش‌های به‌کارگیری در این تحقیق، مقدار دقت کلی و معیار حساسیت مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، روش ماشین بردار پشتیبان با تابع کرنل شعاعی با دقت کلی ۸۹/۱۷ درصد برای تفکیک واحدهای دگرسانی بسیار کارآمدتر است. همچنین مقادیر گاما و ضریب ثابت در تابع کرنل شعاعی ماشین بردار پشتیبان تاثیر زیادی بر نتایج به‌دست‌آمده، دارد. مقدار ضریب کاپا محاسبه شده برای الگوریتم ماشین بردار پشتیبان با تابع کرنل RBF برابر ۰/۸۳ و برای روش حداکثر احتمال برابر ۰/۷۹ است. با توجه به مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با واقعیت‌های زمینی مشخص گردید که بخش عمده‌ای از مناطقی که در زون پروپلیتیک با استفاده از روش حداکثر احتمال بازسازی شده‌اند، در واقع با زون پروپلیتیک مرتبط نیستند و متعلق به بخش‌های افیولیتی و کربناته می‌باشند. همچنین در مقایسه با روش ماشین بردار پشتیبان جدایش دگرسانی آرژلیک و فلیک در برخی نقاط به نحو مطلوبی صورت نمی‌گیرد. بنابراین می‌توان گفت روش ماشین بردار پشتیبان برای تفکیک و طبقه‌بندی پدیده‌هایی که رفتار طیفی نزدیکی دارند، بسیار موفق‌تر از روش‌های رایج طبقه‌بندی عمل می‌کند.

منابع

- لگ، ک.، ۱۳۸۰. ترجمه فرهنگ جاه، دورسنجی و سیستم اطلاعات جغرافیایی، نیروهای مسلح، تهران.
- ماهوش محمدی، ن.، هزارخانی، الف. و مقصودی، ع.، ۱۳۹۶. به‌کارگیری روش‌های مختلف پردازش تصاویر ماهواره‌ای به‌منظور شناسایی و تفکیک بخش‌های دگرسانی منطقه خونی و کالکافی (استان اصفهان)، مجله پژوهش‌های دانش زمین، ۳۳، ۱۳۷-۱۵۲.
- مختاری، م. و نجفی، ا.، ۱۳۹۴. مقایسه روش‌های طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی در استخراج کاربری‌های اراضی از تصاویر ماهواره‌ای لندست TM. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۷۲، ۳۵-۴۴.
- ندوشن، م.، سفیانیان، ع. و خواجه‌الدین، س.ج.، ۱۳۸۸. تهیه نقشه پوشش اراضی شهر اراک با استفاده از روش‌های طبقه‌بندی شبکه عصبی مصنوعی و حداکثر احتمال، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۶۹، ۸۳-۹۸.
- Abbaszadeh, M., Hezarkhani, A. and Soltani-mohammadi, S., 2013. An SVM-based machine learning method for the separation of alteration zones in Sungun porphyry copper deposit, *Chemie der Erde-Geochemistry*. 73,4, 545-554.
- Abedi, M., Norouzi, G. H. and Bahroudi, A. 2012. Support vector machine for multi-classification of mineral prospectivity areas. *Computers and Geosciences*. 46, 272-283. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.12.014>.
- Basak, D., Pal, S. and Patranabis, D.C., 2007. Support vector regression. *Neural Information Process*. 11, 203-225.
- Campbell, J.B., 1996. *Introduction to Remote Sensing*. 2th edition, New York: The Guilford Press. 622.
- Campbell, J.B. and Wynne, R.H., 2011. *Introduction to remote sensing*. Guilford Press. 724.
- Camps-Valls, G., Mooij, J. and Scholkopf, B., 2010. Remote sensing feature selection by kernel dependence measures. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 7, 587-591.
- حسینی، م.ر.، قادری، م. و علیرضایی، س. ۱۳۸۹. انواع سیستم‌های رگه-رگچه و ارتباط آن‌ها با کانه‌زایی در کانسار مس تخت گنبد، شمال شرق سیرجان، پانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تربیت معلم، تهران، ۲۴۵-۲۵۲.
- خان ناظر، ن.ح.، ۱۳۷۴. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ چهارگنبد، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- گزارش زمین‌شناسی کانسار تخت گنبد، ۱۳۸۹. شرکت مس تخت گنبد سیرجان.
- گودرزی مهر، س.، عباسپور، ر.ع.، احدنژاد، و. و خاکباز، ب.، ۱۳۹۱. مقایسه روش ماشین بردار پشتیبان با روش‌های حداکثر احتمال و شبکه عصبی برای تفکیک واحدهای سنگ‌شناسی، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۲۲، ۹۲-۷۵.

- Genderen, V.J.L. and Lock, B.F., 1978. Remote sensing: statistical testing of thematic map accuracy. *Remote Sensing of Environment*. 7, 3-14.
- Granian, H., Tabatabaei, S.H., Asadi, H.H. and Carranza, E.J., 2016. Application of Discriminant Analysis and Support Vector Machine in Mapping Gold Potential Areas for Further Drilling in the Sari-Gunay Gold Deposit, NW Iran. *Natural Resource Research* 25,2, 145-159.
- Guo, Y., De Jong, K., Liu, F., Wang, X. and Li, C., 2012. A Comparison of Artificial Neural Networks and Support Vector Machines on Land Cover Classification, Springer-verlag Berlin Heidelberg, ISICA, CCIS. 316, 531-539.
- Hixon, R.F., Solis Ramirez, M.J. and Villoch, M., 1981. Aspects of morphometric and reproduction of the squid *Ommastrephes petrouis*, Steenstrup 1885 in the western Gulf of Mexico. *American Malacological Bulletin Union*, 54-60.
- Hastie, T., Tibshirani, R. and Friedman, J., 2009. Overview of Supervised Learning. In the *Elements of Statistical Learning*. Springer New York. 9-41.
- Hord, R.M., 1982. *Digital Image Processing of Remotely Sensed Data*, Academic Press, New York, 256.
- Huang, C., Davis, L.S. and Townshend, J.R.G., 2002. An assessment of support vector machines for land cover classification. *International Journal of Remote Sensing*. 23, 725-749.
- Jensen, J.R., 2005. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*, 3rd Edition, Upper Saddle River: Prentice-Hall. 526.
- Jiang, X., Lin, M. And Zhao, C., 2011. Woodland cover change assessment using decision trees, support vector machines and artificial neural networks classification algorithms, Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. 312-315
- Kavzoglu, T. and Colkesen, I., 2009. A kernel functions analysis for support vector machines for land cover classification, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 11, 352-359.
- Liu, G.Q., 2011. Comparison of Regression and ARIMA models with Neural Network models to forecast the daily streamflow. PhD thesis, University of Delaware. 545.
- Mantero, P., Moser, G. and Serpico, S.B., 2005. Partially supervised classification of remote sensing images through SVM-based probability density estimation. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*. 43, 559-570.
- Mountrakis, G., Im, J. and Ogole, C., 2011. Support vector machines in remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 13, 247-259.
- Oommen, T., 2008. An objective analysis of Support Vector Machine based classification for remote sensing. *Mathematical Geosciences*. 40, 409-424.
- Pal, M. and Mather, P.M., 2005. Support vector machines for classification in remote sensing, *International Journal of Remote Sensing*. 26,5, 1007-1011.
- Schrader, S. and Pouncey, R., 1997. *ERDAS Field Guide*. 4th ed. ERDAS, Inc. Atlanta. 825.
- Shabankareh, M. and Hezarkhani, A., 2016. Journal of African Earth Sciences Application of support vector machines for copper potential mapping in Kerman region, Iran, *Journal of*

African Earth Sciences. 25, 102-112.

- Shafiei, B., 2010. Lead isotope signatures of the igneous rocks and porphyry copper deposits from the Kerman Cenozoic magmatic arc (SE Iran), and their magmatic-metallogenetic implications, Ore Geology Reviews. 38, 27-36.

- Vapnik, V.N., 1995. The Nature of Statistical Learning Theory. Springer-Verlag, New York.

- Yu, L., Porwal, A., Holden, E. and Dentith, M.C., 2012. Computers and geosciences towards automatic lithological classification from re-

mote sensing data using support vector machines. 45, 229-239.

- Zhang, X., Pazner, M. and Duke, N., 2007. Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California). ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 62,4, 271-282.

- Zuo, R. and Carranza, E.J.M., 2011. Support vector machine: A tool for mapping mineral prospectivity. Computer Geoscience 37, 12, 1967-1975.