



مقاله پژوهشی

ارائه یک الگوریتم چندمرحله‌ای برای شناسایی و تفکیک زون‌های دگرسانی گرمابی در
محدوده استان کرمان ماهواره‌ای ASTER

نسترن استادمهدی عراق^۱، امید اصغری^{۲*}، سعید مجد فی^۳، سجاد طالش حسینی^۴

۱. دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، n.ostadmahdi1994@ut.ac.ir
۲. دانشیار دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، o.asghari@ut.ac.ir
۳. استادیار دانشگاه صنعتی اراک، دانشکده مهندسی معدن، اراک، ایران، mojeddifar@yahoo.com
۴. دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، sajjad.t.hosseini@ut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۱۶ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۳۱

چکیده

پردازش تصاویر سنجش از دور به منظور تفکیک دگرسانی‌های هیدروترمال، در صورت در دسترس نبودن طیف اولیه‌ی پیکسل‌ها، یکی از بحث‌های چالش برانگیز برای محققان است. تحقیق‌های قبلی نشان داده‌اند که تفکیک دقیق زون‌های دگرسانی‌های هیدروترمال از یکدیگر با استفاده از روش‌های مرسوم پردازش تصاویر مبتنی بر خصوصیات طیفی پیکسل‌ها، امکان‌پذیر نمی‌باشد. لذا این تحقیق با ارائه یک الگوریتم چند مرحله‌ای در تلاش است تا زون‌های دگرسانی هیدروترمال موجود در محدوده غربی استان کرمان را با دقت بالایی شناسایی و تفکیک نماید. جهت رسیدن به این هدف، روش آنالیز مولفه‌های اصلی (PCA)، مدل فرکتالی عیار-مساحت (C-A) و مدل زمین آماری کریجینگ شاخص کامل (FIK) در توالی یکدیگر به کار رفته‌اند. نتایج نشان دهنده دقت بالای مدل FIK در شناسایی و تفکیک هر کدام از دگرسانی‌های فیلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک در منطقه مورد مطالعه است. همچنین به منظور ارزیابی خطای طبقه‌بندی، ماتریس درهم آمیختگی بررسی شد. نتایج ماتریس در هم آمیختگی بیان‌گر آن است که مدل FIK عملکرد خوبی را در رابطه با طبقه‌بندی تصویر داشته است و صحت کل آن برابر با ۸۹٫۳۰٪ می‌باشد. همچنین با توجه به تعداد بالای پیکسل‌های آموزشی زون فیلیک، مدل FIK به خوبی توانسته است این نوع دگرسانی را شناسایی نماید.

کلمات کلیدی

دگرسانی‌های هیدروترمال، الگوریتم چند مرحله‌ای، آنالیز مولفه‌های اصلی، مدل فرکتالی عیار-مساحت، کریجینگ شاخص کامل.

* نویسنده مسئول مکاتبات.

۱- مقدمه

۱۰ مقدار حد آستانه مختلف، با توجه به تابع توزیع تجمعی و تغییرات چولگی متغیر مورد مطالعه، جهت رسیدن به این هدف انتخاب می‌شود. لذا انتخاب درست این حد آستانه‌ها پیچیدگی زیادی داشته و نیاز به دقت بالایی دارد [۸]. به منظور افزایش سرعت و کارایی تخمین با استفاده از روش FIK، از روش فرکتالی C-A برای محاسبه حد آستانه‌های بهینه استفاده می‌شود [۱۵]. به دلیل وجود وابستگی بالا میان دگرسانی‌های هیدروترمال موجود در منطقه مورد مطالعه، استفاده از تصویر آنالیز مولفه‌های اصلی سبب افزایش دقت در جداسازی زون‌های دگرسانی خواهد شد. لذا مقادیر پیکسل‌ها براساس خروجی‌های مربوط به روش آنالیز مولفه‌های اصلی به کار گرفته شده برای شناسایی زون‌های دگرسانی فیلک، آرژیلیک و پروپیلیتیک، محاسبه می‌شوند.

در این تحقیق با ارائه یک الگوریتم چند مرحله‌ای، زون‌های دگرسانی فیلک، آرژیلیک و پروپیلیتیک در کمان ماگمایی کرمان شناسایی و تفکیک شده است. هدف از این پژوهش بررسی عملکرد روش FIK در طبقه بندی تصاویر ماهواره ای ASTER و شناسایی زون های دگرسانی هیدروترمال کمان ماگمایی سنوزوئیک کرمان می‌باشد. بدین منظور ابتدا، با استفاده از روش آنالیز مولفه‌های اصلی یک تصویر چند متغیره از منطقه مورد مطالعه برای هر دگرسانی تولید شد. سپس با استفاده از روش کریجینگ شاخص کامل و پیاده سازی آن بر روی تصویر چند متغیره تولید شده، جدایش پیکسل‌های دگرسانی از یکدیگر انجام گرفت. جهت افزایش دقت روش زمین آماری بکار گرفته شده، از روش هندسه فرکتال در الگوریتم مدل‌سازی استفاده شده است. در نهایت، نتایج حاصل از الگوریتم ارائه شده اعتبارسنجی شده‌اند.

۲- زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در بخش جنوبی کمربند آتشفشانی- رسوبی ایران مرکزی قرار گرفته است. ناحیه مورد مطالعه، خاستگاه کانسارهای پورفیری مهمی همچون کدر، گودکولواری، ایجو، سرنو و چاه فیروزه است و در جنوب غربی شهر کرمان واقع شده است. آمیزه رنگین کرتاسه قدیمی ترین و نهشته های کواترنر و مخروط افکنه های گراولی در زمره جوان ترین رخنمون های ناحیه مطالعاتی قرار دارند [۱۶]. رسوبات کرتاسه عمدتاً از سنگ های فلیشی تشکیل شده اند. سنگ های رسوبی کمپلکس آتشفشان رسوبی اغلب از نوع ماسه سنگ و اندکی سنگ آهک می‌باشند. سنگ‌های آتشفشانی توسط سنگ‌های نفوذی الیگوسن میوسن با جنس گرانودیوریت، کوارتز دیوریت،

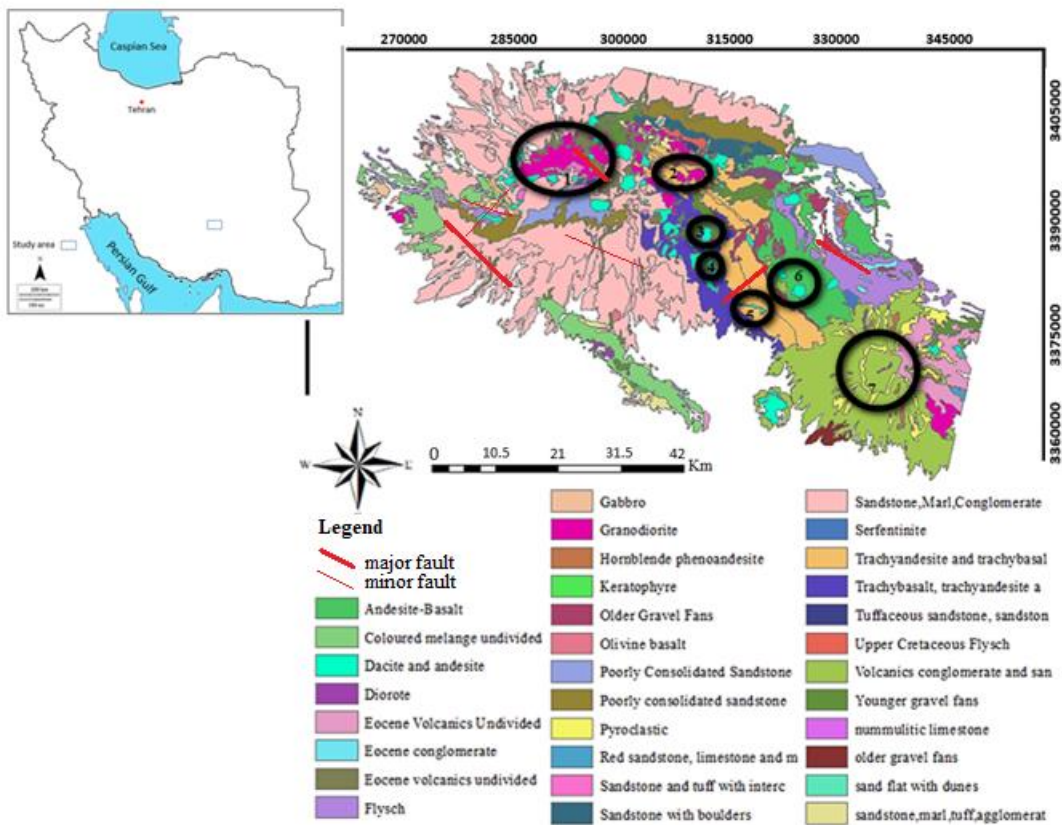
شناخت الگوی دگرسانی و تفکیک بین زون‌های مختلف آن، نقش مهمی در فعالیت‌های اکتشافی و بررسی بسیاری از ذخایر از جمله مس پورفیری دارد [۱ و ۲]. بنابراین شناسایی و تفکیک دقیق انواع دگرسانی‌ها و سنگ‌های میزبان از موارد کلیدی و مهم در آشکارسازی مناطق امید بخش معدنی می‌باشد. در سنجش از دور با استفاده از تکنیک‌های مختلف، تصاویر ماهواره‌ای مورد پردازش قرار گرفته و دگرسانی ذخایر معدنی، رخدادهای کانی‌زایی و پوشش گیاهی و غیره شناسایی می‌گردند. روش‌های نسبت بانندی، آنالیز مولفه‌های اصلی^۱ و ترکیب رنگی کاذب از جمله تکنیک‌های مرسوم پردازش تصاویر در سنجش از دور می‌باشند [۳-۵].

در تحقیقات انجام شده قبلی، تلاش شده است تا با به کارگیری تکنیک‌های مختلف، تفکیک و شناسایی دگرسانی‌ها و اکتشاف ذخایر معدنی با دقت بیشتری انجام شود [۳ و ۶]. روش‌های مبتنی بر تخمین‌های زمین آماری در علوم مختلف کاربرد گسترده‌ای داشته است [۷-۹]. جلالی و همکاران (۱۳۹۰) [۱۰] در مطالعات خود، برای مرز بندی بلوک های کانسنگ و باطله در کانسار مس سرچشمه به بررسی اعتبار برآوردهای کریجینگ خطی و غیر خطی به روش کریجینگ شاخص پرداختند. وانگ و همکاران (۲۰۱۳) [۱۱] با ترکیب روش‌های زمین آماری و فرکتالی به ارزیابی کمی منابع معدنی در کانسار مس پورفیری تانگشان (Tongshan) در چین پرداختند. مرور تحقیقات گذشته نشان داده است که استفاده از روش های زمین آماری به خصوص کریجینگ شاخص در مرزبندی کانی سازی‌ها و آلتراسیون‌ها عملکرد دقیق تری داشته است. بدین منظور هدف اصلی این مطالعه، استفاده از روش کریجینگ شاخص کامل^۲ (FIK) در تفکیک زون های دگرسانی کانسارهای مس پورفیری منطقه مورد مطالعه می‌باشد. در حقیقت این روش نوعی کریجینگ شاخص است که با تبدیل داده‌های پیوسته (برای مثال عیار عناصر) به داده‌های گسسته (داده‌های شاخص صفر و یک) فرایند تخمین را انجام می‌دهد [۱۲ و ۱۳]. در روش FIK، جهت مدل‌سازی متغیر پیوسته با چولگی زیاد، الگوریتم IK در حد آستانه‌های مختلف تکرار می‌شود. برای انتخاب حدود آستانه‌ای جهت تبدیل داده‌های پیوسته به داده‌های شاخص، معمولاً از تابع توزیع تجمعی (CDF) استفاده می‌شود [۱۴]. به طور معمول،

¹ Principal Component Analysis² Full Indicator Kriging

پوشیده می‌شوند. ضخامت این سری‌ها بالغ بر ۲۰۰ متر است. رسوبات نئوژن به وسیله یک دگرشیبی، میان پایین‌ترین و بالاترین اعضا جدا شده‌اند. عضو پایینی عمدتاً از ماسه سنگ‌های متوسط تا ریزدانه همراه با رگه‌های ژیبس و تداخلات هالیت شکل می‌گیرد. عضو بالایی شامل رسوباتی است که طبقه‌بندی سستی را نشان می‌دهند و از استحکام کافی برخوردار نیستند [۱۷ و ۱۸]. شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

مونزونیت، تونالیت و گرانیت تسخیر شده‌اند. سنگ‌های آتشفشانی به واسطه همجواری با توده‌های نفوذی، در بسیاری موارد دچار دگرسانی و تغییر شده‌اند. اغلب سنگ‌های نفوذی و آتشفشانی به طور 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 رخنمون یافته‌اند که به طور دگرشیب به وسیله سازندهای ائوسن



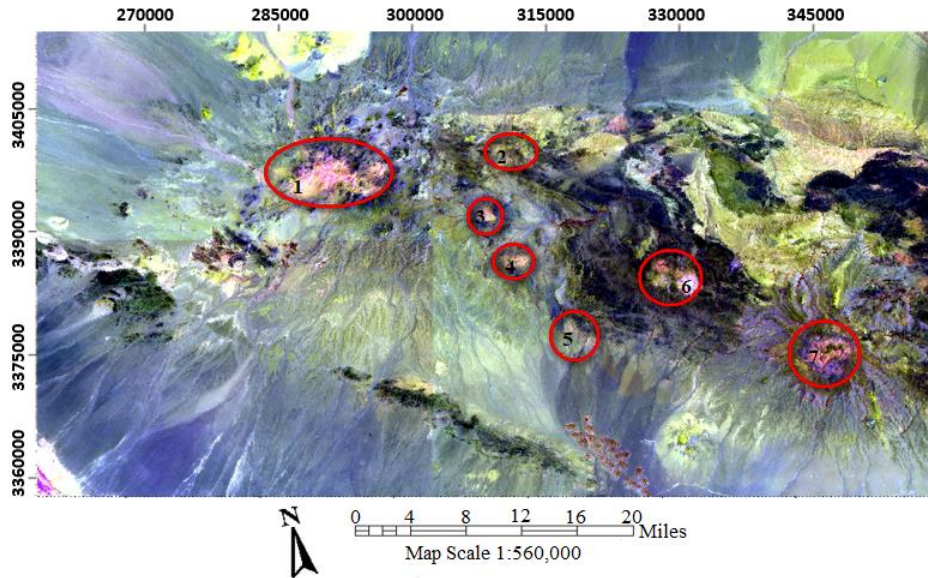
شکل ۱: تصویر زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد مطالعه. مناطق کانی‌سازی شده منطقه شامل (۱) کدر، (۲) گودکلواری، (۳) ایجو، (۴) سرنو، (۵) چاه فیروزه، (۶) میدوک و (۷) آبدر می‌باشند [۳].

۳- روش‌شناسی

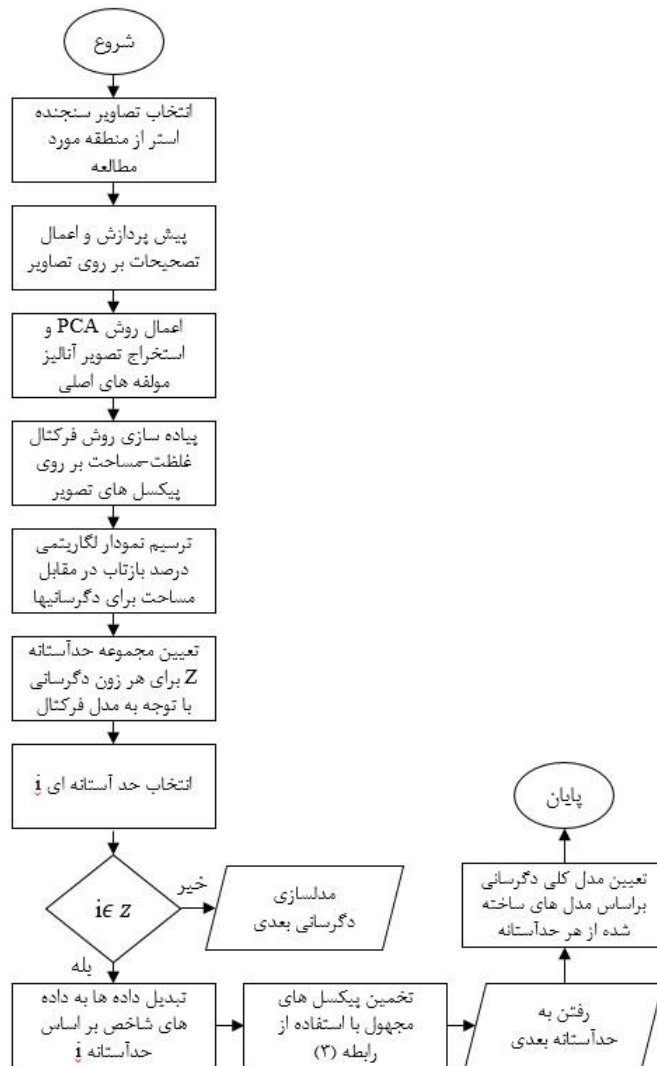
شکل ۳، یک فلوجارت کلی از مراحل انجام کار براساس اهداف تحقیق را نشان می‌دهد. در این مطالعه به منظور نقشه برداری دقیق‌تر دگرسانی‌های هیدروترمال وابسته به ذخایر مس پورفیری، ابتدا خروجی‌های حاصل از آنالیز مولفه‌های اصلی به عنوان ورودی روش فرکتال مورد استفاده قرار می‌گیرند. سپس حدود آستانه‌ای به دست آمده از نمودارهای فرکتالی عیار-مساحت^۱ به عنوان داده‌های ورودی مدل زمین‌آمار

در این تحقیق به دلیل وسعت زیاد منطقه مورد مطالعه، از سه تصویر سنجنده‌ی آستر در سطح L1B استفاده شده است. دو تصویر در ۳۰ فروردین ۱۳۷۹ (۱۸ آوریل ۲۰۰۰) و تصویر دیگر در ۲۵ خرداد ۱۳۸۶ (۱۵ ژوئن ۲۰۰۷) گرفته شده است. تصاویر ابتدا توسط کراستاک و سپس با میانگین نسبی بازتاب‌ها (IARR) تصحیح رادیومتریک شدند و به صورت موزاییک در کنار یکدیگر قرار گرفتند (شکل ۲). شکل ۲، ذخایر شناخته شده‌ی منطقه مورد مطالعه را در تصویر ماهواره‌ای محدوده نشان می‌دهد.

^۱ Concentration-Area



شکل ۲: تصویر ترکیب رنگی کاذب منطقه مورد مطالعه (باند ۴: قرمز، باند ۶: سبز، باند ۱: آبی). مناطق کانی سازی شده منطقه شامل (۱) کدر، (۲) گودکلواری، (۳) ایجو، (۴) سرنو، (۵) چاه فیروزه، (۶) میدوک و (۷) آبدر می باشند.



شکل ۳: توالی انجام پردازش ها.

مقادیر پیکسل‌ها، توزیع فراوانی پیکسل‌ها و همچنین خصوصیات فضایی و هندسی الگوهای تصویر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مدل هدف برقرار کردن رابطه ای میان مساحت و حد آستانه مقدار درصد بازتاب است. این رابطه به صورت زیر بیان می‌شود [۳۰]:

$$A(PR \geq S) \propto PR^{-\alpha} \quad (1)$$

که در آن $A(PR^1)$ مساحت تجمعی محصور شده توسط پیکسل‌هایی است که مقدار درصد بازتاب آن‌ها بزرگتر و مساوی S است. همچنین S حد آستانه در نمودار تمام لگاریتمی عیار مساحت می‌باشد. توان α پارامتر مرتبط با بعد فرکتال است [۲۶]. پس از مشخص شدن این مقادیر، نمودار تمام لگاریتمی $A(PR)$ در مقابل درصد بازتاب رسم می‌شود. نمودار حاصله شامل مجموعه‌ای از خطوط مستقیم و قطعه قطعه می‌باشد. هر قطعه از این نمودار معرف یک جامعه است [۳۰].

۳-۳- مدل زمین آماری کریجینگ شاخص کامل

کریجینگ شاخص [۱۲]، یک روش غیر پارامتری برای برآورد احتمال بیش از یک حد آستانه خاص، $Z(k)$ در داده های مکانی است. با توجه به معادله (۲)، متغیر تصادفی $Z(u)$ توسط توزیع دو جمله ای به کریجینگ شاخص تبدیل می‌شود [۳۴-۳۱].

$$I(u; z_k) = \begin{cases} 1 & \text{if } z(u_\alpha) \leq z_k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

در این رابطه $Z(k)$ یک حد آستانه با مقدار مشخص و ثابت است. کریجینگ شاخص روشی قدرتمند برای بهبود عدم قطعیت در توزیع مکانی داده هاست. به دلیل در نظر نگرفتن هیچگونه فرضی در توزیع داده‌ها، این روش یک روش غیرپارامتری است. همچنین به دلیل عدم وجود هیچگونه اثر خطی در تابع شاخص آن، این روش یک روش غیرخطی است. کریجینگ شاخص دارای حداقل واریانس تخمین محلی است. روش کریجینگ شاخص کامل به صورت زیر بیان می‌شود [۱۳]:

$$I(u; z_k) = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha I(u_\alpha; z_k) + F(z_k) [1 - \sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha] \quad (3)$$

در این معادله $I(u; z_k)$ مقدار تخمینی از روش FIK می‌باشد. λ_α وزن مربوط به هر پیکسل می‌باشد. $I(u_\alpha; z_k)$ مقدار متغیر شاخص در موقعیت پیکسل مورد نظر (α) است. $F(z_k)$ مقدار فراوانی تجمعی در هر حد آستانه است. در FIK،

کریجینگ شاخص کامل مورد استفاده قرار می‌گیرند. به همین منظور ابتدا پیش پردازش های لازم بر روی تصویر استر منطقه مورد مطالعه صورت گرفت. سپس با انجام آنالیز مولفه های اصلی بر روی تصویر مورد نظر، هر یک از دگرسانی های ذخایر مس پورفیری در منطقه بارز شدند. در مرحله بعد به منظور تفکیک پیکسل های مرتبط با دگرسانی های هیدروترمال منطقه از پیکسل های زمینه، روش فرکتالی عیار- مساحت بر روی تصویر حاصل از مرحله قبل اعمال شد و با رسم نمودار لگاریتمی درصد بازتاب در مقابل مساحت برای هر یک از دگرسانی ها، حد آستانه ای های Z برای هر زون دگرسانی استخراج گردید. سپس با در نظر گرفتن حد آستانه ای i و با بررسی اینکه i عضو Z هست یا خیر، داده‌ها به داده های شاخص تبدیل می‌شوند. در نهایت با کاربرد رابطه (۳) پیکسل های مجهول تخمین زده می‌شوند و مدل کلی دگرسانی‌ها بر اساس مدل های ساخته شده از هر حد آستانه تعیین می‌شود.

۳-۱- آنالیز مولفه های اصلی

تجزیه و تحلیل مولفه های اصلی برای فشرده سازی داده‌ها مفید است. مولفه های اصلی در حالت کلی براساس ماتریس واریانس-کواریانس یا ماتریس همبستگی باندها محاسبه می‌شوند. برای مثال اگر p باند وجود داشته باشد، هر یک از ماتریس‌های فوق دارای p سطر و p ستون هستند [۱۹ و ۲۰]. پس از تعیین یکی از ماتریس های مذکور، از طریق روش های جبر خطی مقادیر ویژه برای این ماتریس محاسبه می‌شود. با استفاده از مقادیر ویژه و بردارهای ویژه می‌توان جهت هایی را که دارای بیشترین تغییر پذیری هستند، تعیین کرد و سپس با تعریف متغیر های جدید که یک ترکیب خطی از متغیر های اولیه هستند، ابعاد متغیرها را کاهش داد [۲۱]. به این ترتیب یک تصویر برای هر مولفه اصلی یا بردار ویژه حاصل می‌شود که معرف تغییرپذیری در جهت آن بردار است [۲۲].

۳-۲- مدل فرکتالی عیار - مساحت

مدل فرکتالی عیار- مساحت علاوه بر جداسازی آنومالی‌های ژئوشیمیایی، کاربرد گسترده‌تری در طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای دارد [۲۳-۲۹]. یک تصویر ماهواره‌ای مورد استفاده در سنجش از دور شامل آرایشی از پیکسل می‌باشد. هر پیکسل توسط یک مقدار عددی که نشانگر درصد بازتاب می‌باشد، نشانه گذاری شده است. مدل فرکتالی عیار-مساحت به منظور ارائه دید بهتری از تغییرات و اختلافات موجود در تصویر براساس

¹ Percent of Reflectance

بازتاب بالا می‌باشند. در حالیکه کانی‌های دگرسانی پروپلیتیک همچون کلریت، اپیدوت و کلسیت در باند ۷ و ۹ استر دارای بیشترین بازتاب و در باند ۸ دارای بیشترین جذب می‌باشند. همچنین کانی‌های دگرسانی آرژیلیک در باند ۵ دارای بیشترین بازتاب و در باند ۷ دارای بیشترین جذب می‌باشند. نتایج آنالیز مولفه‌های اصلی انتخابی برای ۶ باند SWIR استر و همچنین برای باندهای ۴، ۵ و ۷ در جدول ۱ و جدول ۲ آمده است.

کریجینگ شاخص برای مجموعه‌ای از حدود آستانه‌ها به ازای $z_k = 1, \dots, k$ با فواصل مشخص از متغیر پیوسته Z انجام می‌شود [۳۱، ۳۵ و ۳۶].

۴- نتایج و بحث

۴-۱- آنالیز مولفه‌های اصلی

کانی‌های دگرسانی فلیک همچون سربیسیت (مسکویت) در باند ۶ سنجنده‌ی استر دارای جذب بالا و در باند ۴ استر دارای

جدول ۱: آنالیز مولفه‌های اصلی انتخابی باندهای SWIR استر.

بندار ویژه	باند ۴	باند ۵	باند ۶	باند ۷	باند ۸	باند ۹
PC1	-۰٫۴۲۸	-۰٫۴۰۱	-۰٫۴۲۶	-۰٫۳۸۶	-۰٫۴۱۷	-۰٫۳۸۸
PC2	-۰٫۷۲۵	-۰٫۱۸۸	-۰٫۰۶۶	۰٫۱۱۳	۰٫۴۷۶	۰٫۴۴۰
PC3	۰٫۵۰۵	-۰٫۵۴۸	-۰٫۵۲۴	۰٫۰۹۴	۰٫۳۹۲	۰٫۰۶۹
PC4	-۰٫۱۸۵	۰٫۰۹۸	-۰٫۱۷۲	۰٫۷۸۸	۰٫۰۵۲	-۰٫۵۴۹
PC5	-۰٫۰۲۹	-۰٫۰۰۰۵	۰٫۲۹۹	-۰٫۳۹۴	۰٫۶۳۷	-۰٫۵۸۹
PC6	۰٫۰۱۷	-۰٫۷۰۲	۰٫۶۴۷	۰٫۲۲۷	-۰٫۱۸۸	-۰٫۲۷۶

جدول ۲: نتایج حاصل از آنالیز مولفه‌های اصلی انتخابی باندهای ۴، ۵ و ۷ استر.

بندار ویژه	باند ۴	باند ۵	باند ۷
PC1	۰٫۶۱۷	۰٫۵۶۸	۰٫۵۴۳
PC2	۰٫۷۷۶	-۰٫۳۳۰	-۰٫۵۳۶
PC3	۰٫۱۲۵	-۰٫۷۵۳	۰٫۶۴۵

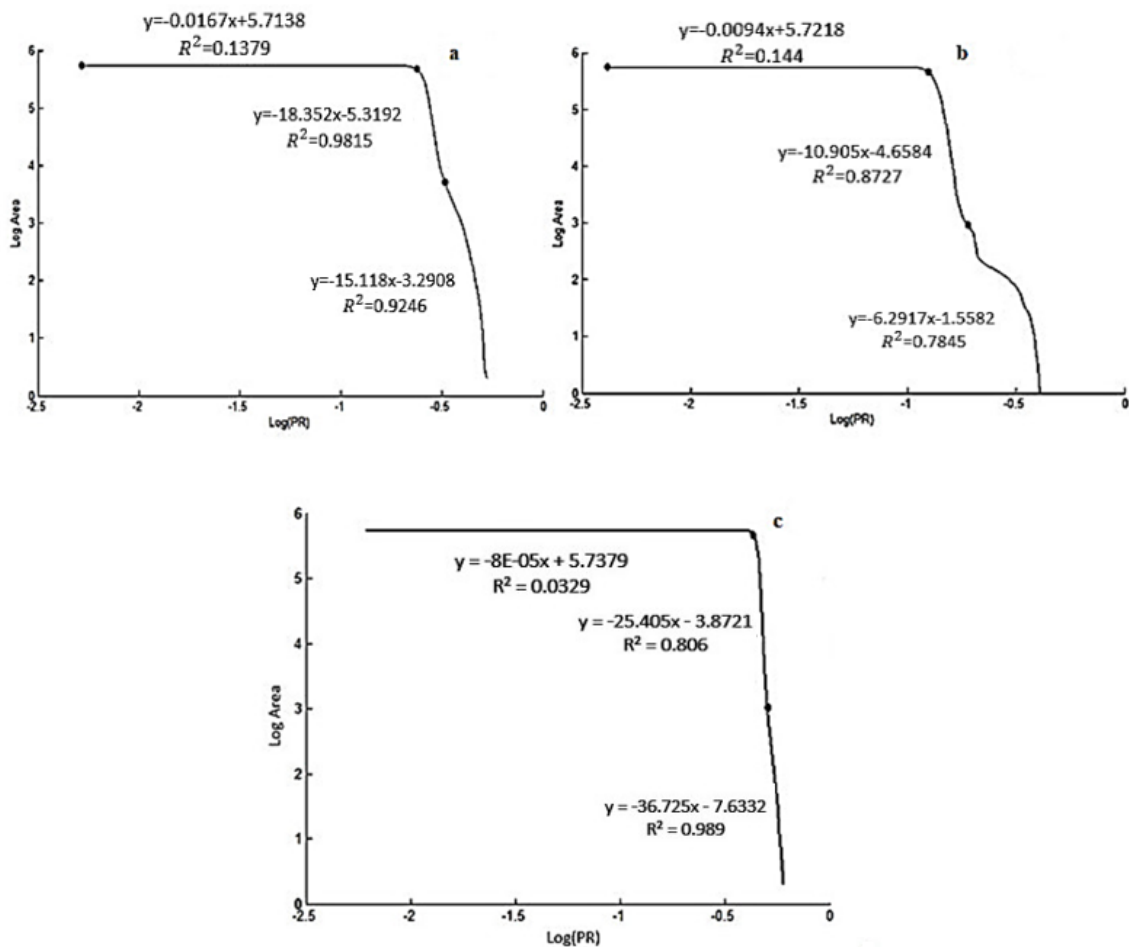
قابل طبقه بندی نیستند. برای حل این مسئله، یک الگوریتم تلفیقی از روش فرکتالی عیار- مساحت و مدل زمین آماری کریجینگ شاخص کامل به منظور شناسایی و تفکیک دگرسانی‌های موجود در منطقه مورد استفاده قرار گرفت. در ابتدا مقادیر عددی درصد بازتاب پیکسل‌های هر یک از تصاویر، به ۵۰ کلاس تقسیم شد و سپس فراوانی آن‌ها در هر کلاس به صورت تجمعی محاسبه گردید. در مرحله بعد نمودار تمام لگاریتمی درصد بازتاب در مقابل مساحت برای هر تصویر ترسیم شد (شکل ۴). به منظور تعیین بعد فرکتال برای هر جامعه حداقل دو و حداکثر سه خط بر روی داده‌ها برازش شد و در نهایت محل تقاطع خطوط مشخص گردید.

مطابق با شکل ۴، نمودارها بیانگر سه جامعه‌ی زمینه، آنومالی ضعیف و آنومالی شدید در توزیع دگرسانی‌های فلیک، آرژیلیک و پروپلیتیک می‌باشند. در این مطالعه به دلیل اهمیت مناطق کانی سازی با درجه بالا (آنومالی شدید)، مقادیر حد آستانه‌ای به دو جامعه زمینه و مناطق کانی سازی کاهش می‌یابد (جدول ۳).

مطابق جدول ۱، مولفه‌ی اصلی مناسب برای آشکار سازی دگرسانی فلیک بر اساس بیشترین اختلاف مشاهده شده بین باند ۴ به عنوان بیشترین بازتاب و باند ۶ به عنوان بیشترین جذب، تصویر مولفه اصلی سوم می‌باشد. همچنین تصویر PC5، مولفه اصلی مناسب برای بارز سازی دگرسانی پروپلیتیک بر مبنای بیشترین اختلاف بین باندهای ۷ و ۹ به عنوان بیشترین بازتاب و باند ۸ به عنوان بیشترین جذب است. بنابراین تصویر PC5- کانی‌های دگرسانی پروپلیتیک را آشکار می‌کند. مطابق جدول ۲، با بررسی بین باندهای ۵ و ۷ به عنوان بیشترین بازتاب و بیشترین جذب، تصویر PC3، مناسب‌ترین تصویر برای شناسایی دگرسانی آرژیلیک معرفی گردید.

۴-۲- مدل سازی زون‌های دگرسانی منطقه

هر پیکسل از تصویر خروجی آنالیز مولفه‌های اصلی حاصل از ترکیب خطی همه‌ی باندهای ورودی است. این پیکسل‌ها خواص طیفی اولیه خود را از دست داده‌اند. بنابراین این پیکسل‌ها توسط روش‌های مبتنی بر تجزیه و تحلیل طیفی،



شکل ۴: نمودار لگاریتمی درصد بازتاب در مقابل مساحت:

الف- دگرسانی فیلیک، ب- دگرسانی پروپیلیتیک، ج- دگرسانی آرژیلیک.

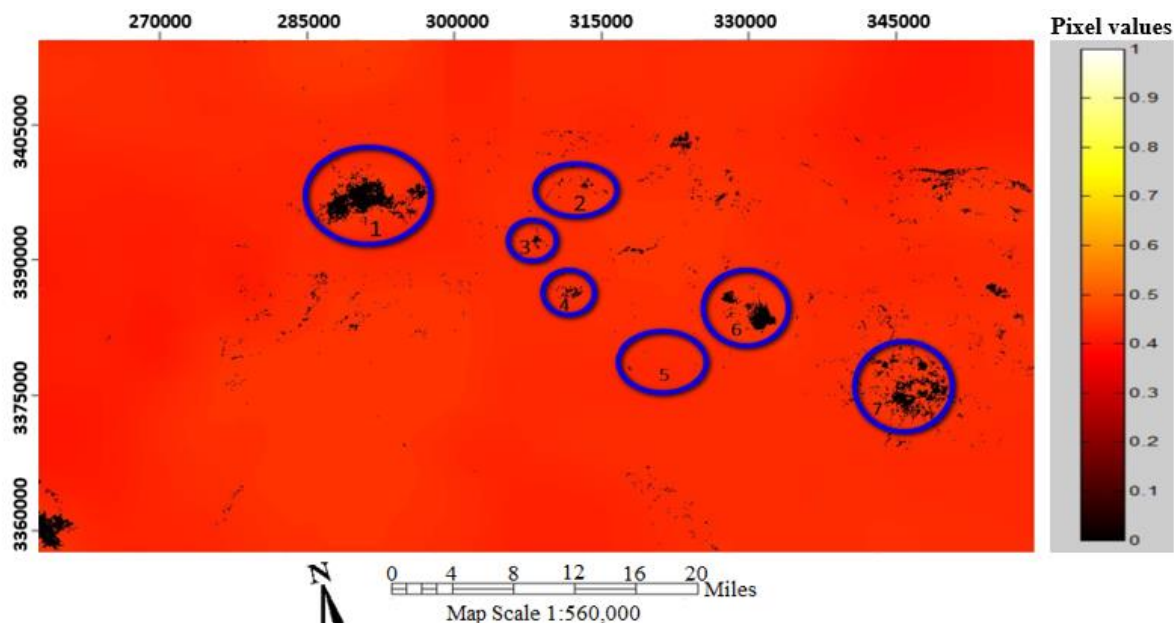
جدول ۳: حد آستانه ای مناطق کانی سازی شده و زمینه برای دگرسانی فیلیک.

زمینه	مناطق کانی سازی	دگرسانی
۰٫۲۵۵ - ۰٫۵۳۸	۰٫۰۵۴ - ۰٫۲۶۶	فیلیک
۰٫۰۶۵۹ - ۰٫۲۷۲	۰٫۱۳۲ - ۰٫۰۶۵۹	پروپیلیتیک
۰٫۱۰۰۶ - ۰٫۵۴۳	۰٫۵۴۳ - ۰٫۶۰۴	آرژیلیک

$(F(Z_k))$ نیز از نمودار فرکتالی عیار- مساحت به دست می‌آید. در نهایت با جایگذاری هر کدام از پارامترهای فوق در معادله (۳) و محاسبه $I(u; Z_k)$ برای هر دگرسانی تصاویر مربوط به نواحی مناطق کانی سازی و زمینه حاصل می‌شود (شکل ۵، ۶ و ۷).

با توجه به جدول ۳، مناطق تعیین شده به عنوان مناطق کانی سازی شده (آنومالی شدید) در شکل ۵ دارای مقادیری بین ۰٫۱۰۵۴ - ۰٫۲۶۶ می‌باشند. همچنین فراوانی کل پیکسل‌های موجود در محدوده کانی سازی ۷۹۴۲ پیکسل می‌باشد که در واقع ۱/۱۵٪ از کل پیکسل‌های موجود در تصویر را شامل می‌شود. براساس شکل ۵، مدل ارائه شده توسط الگوریتم پیشنهادی با دقت بالایی مناطق معدنی کدر، گود کلواری، ایجو، سرنو، میدوک و آبدر را در تصویر آشکار نموده است. همچنین منطقه‌ی چاه فیروزه در این تصویر نمود چندانی نداشته و به خوبی آشکار نشده است.

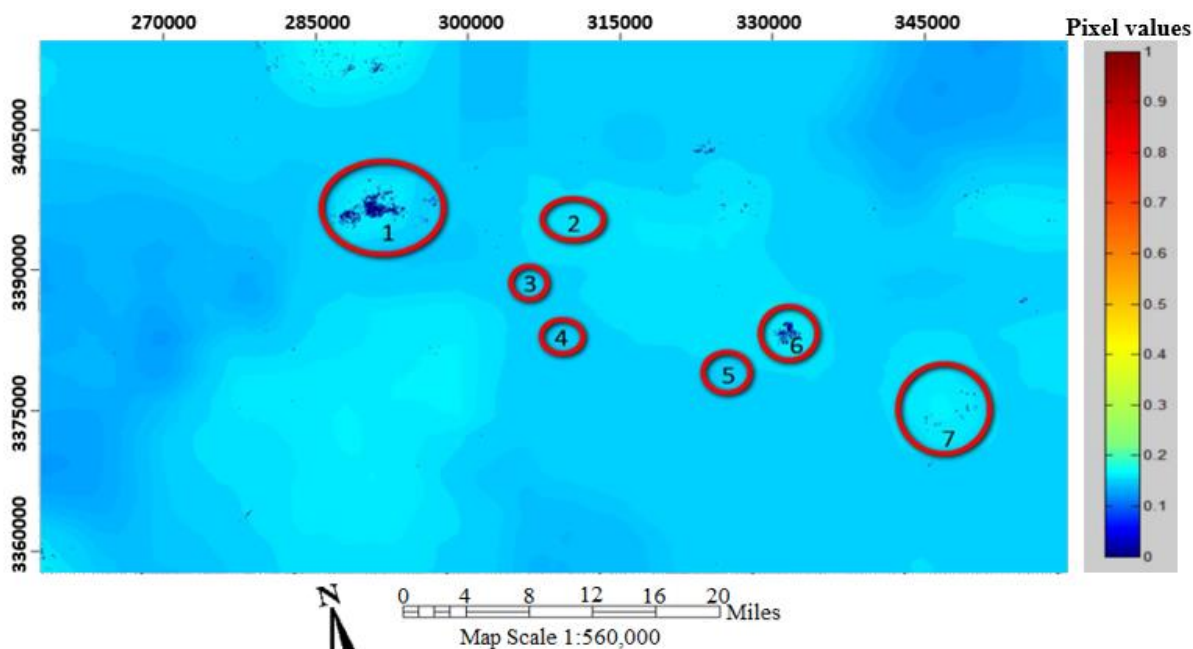
پس از مشخص شدن حد آستانه مربوط به هر کدام از دگرسانی‌ها (جدول ۳)، در مرحله بعد به ازای هر حد آستانه و معادله (۲)، تصویری شاخص از منطقه مورد مطالعه تولید شد. در تصویر حاصله، پیکسل‌ها با مقادیر کوچکتر از حد آستانه با مقدار یک و پیکسل‌ها با مقادیر بزرگتر از حد آستانه با مقدار صفر مشخص می‌شوند. همچنین وزن مربوط به هر پیکسل (λ_α) از طریق میانگین گیری پیکسل‌های موجود در شعاع تاثیر ۲۰۱۰ متری آن پیکسل در تصویر مولفه اصلی محاسبه می‌شود. مقدار فراوانی تجمعی مربوط به هر حد آستانه



شکل ۵: نقشه کریجینگ شاخص کامل دگرسانی فیلیک در منطقه مورد مطالعه.

می‌شود. براساس شکل ۶، مدل ارائه شده توسط الگوریتم پیشنهادی با دقت بالایی مناطق معدنی کدر، میدوک و آبدر را در تصویر آشکار نموده است. اما مناطق گودکلواری، ایجو، سرنو و چاه فیروزه در این تصویر نمود چندانی ندارد.

با توجه به جدول ۳، مناطق تعیین شده به عنوان مناطق کانی سازی شده (آنومالی شدید) در شکل ۶ دارای مقادیری بین ۰.۶۰۴ - ۰.۵۴۳ می‌باشند. همچنین فراوانی کل پیکسل‌های موجود در این محدوده ۱۱۶۲ پیکسل می‌باشد که در واقع ۰.۲۱٪ از کل پیکسل‌های موجود در تصویر را شامل

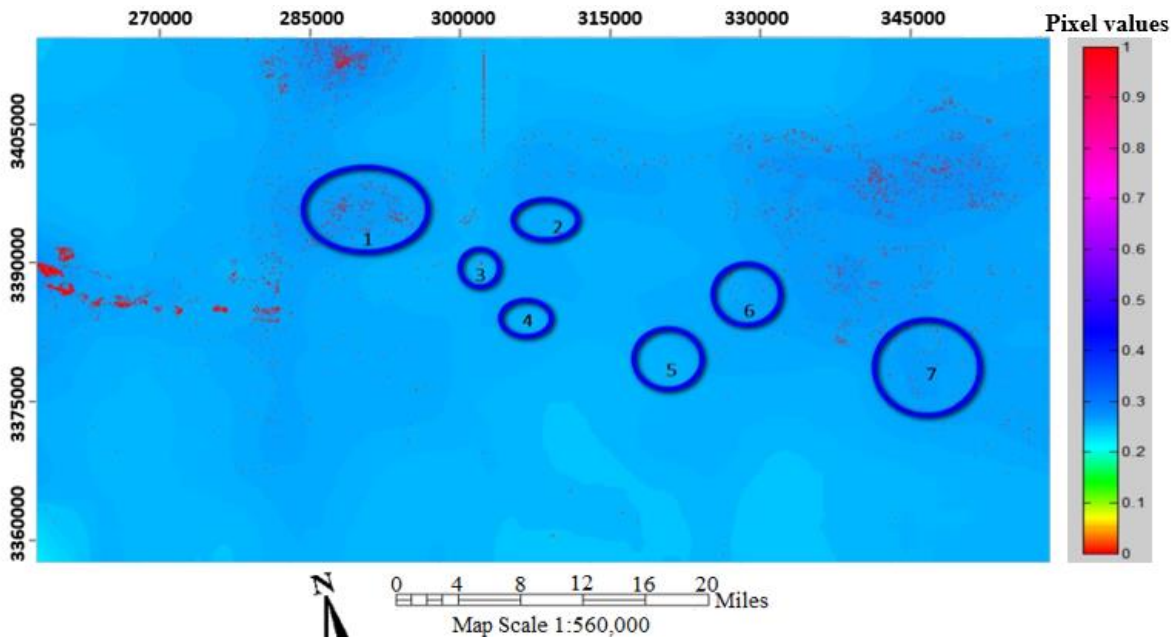


شکل ۶: نقشه کریجینگ شاخص کامل دگرسانی آرژیلیک در منطقه مورد مطالعه.

کل پیکسل‌های موجود در تصویر را شامل می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود، کریجینگ شاخص کامل توانسته است دگرسانی پروپلیتیک را در اطراف مناطق معدنی کدر، گود کلواری، ایجو، میدوک و آبدر آشکار نماید. اما این روش در بعضی از قسمت‌ها

با توجه به جدول ۳، مناطق تعیین شده به عنوان مناطق کانی سازی شده (آنومالی شدید) در شکل ۷ دارای مقادیری بین ۰.۱۳۲ تا ۰.۰۶۵۹ می‌باشند. همچنین فراوانی کل پیکسل‌های موجود در این محدوده ۴۸۷۶۹ پیکسل می‌باشد که در واقع ۰.۹٪ از

پوشش گیاهی را به اشتباه به عنوان منطقه کانی سازی شده شناسایی کرده است که مشکل این روش به حساب می‌آید.

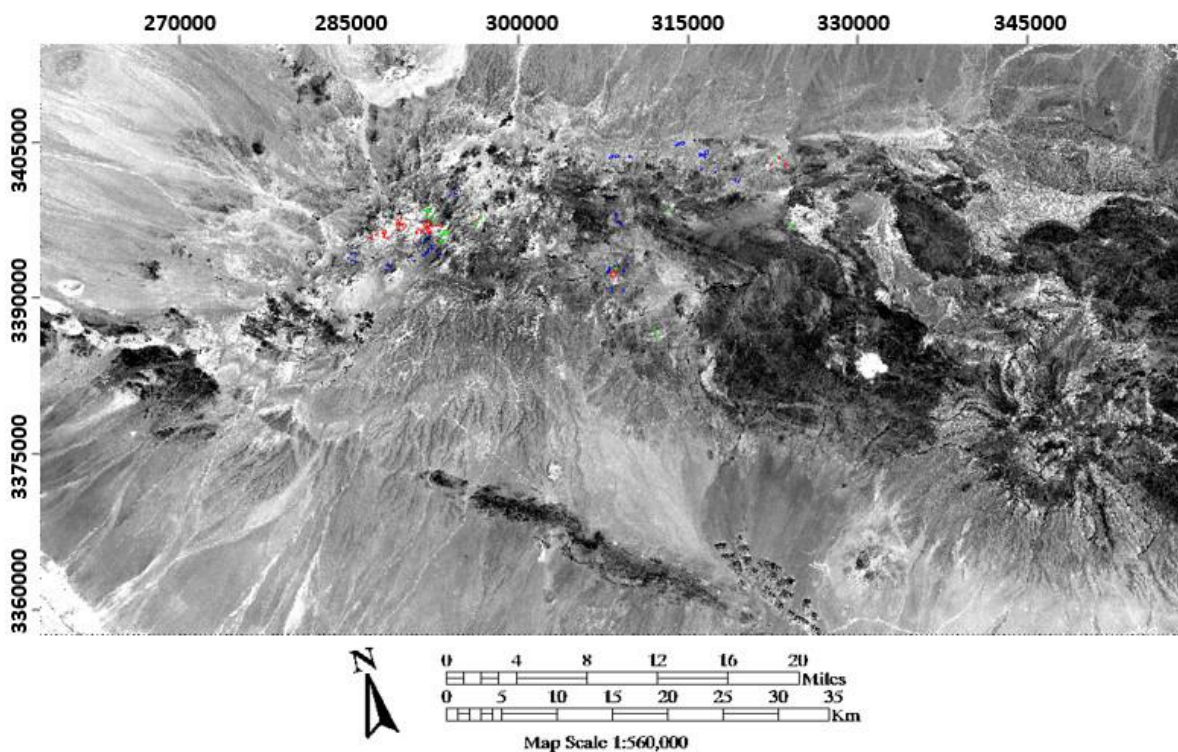


شکل ۷: نقشه کریجینگ شاخص کامل دگرسانی پروپیلیتیک در منطقه مورد مطالعه.

۳-۴- اعتبار سنجی الگوریتم مدل‌سازی

پیکسل از زون آرژیلیک و ۴۹۲ پیکسل از زون پروپیلیتیک به عنوان مناطق کانی سازی شده انتخاب گردید. موقعیت این پیکسل‌ها با رنگ قرمز، سبز و آبی به ترتیب برای زون فیلیک و آرژیلیک و پروپیلیتیک در شکل ۸ نشان داده شده است.

براساس مطالعات زمینی و آزمایشگاهی انجام شده توسط مجدی فر و همکاران (۲۰۱۳) [۳۷] و هنرمند و همکاران (۲۰۱۱) [۳۸]، ۵۹۱ پیکسل از مناطق کانی سازی شده زون فیلیک، ۱۴۴



شکل ۸: مناطق کانی سازی شده زون‌های دگرسانی مختلف (قرمز: فیلیک، سبز: آرژیلیک، آبی: پروپیلیتیک).

تعداد کلاس‌های مشخص جهت ارزیابی کمی روش مورد نظر است. به همین منظور این ماتریس برای سه نوع دگرسانی فیلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک در جدول ۴ ارائه شده است.

در ادامه، به منظور ارزیابی کیفیت طبقه بندی، مدل FIK را در قالب ماتریس درهم آمیختگی کمی سازی شد. ماتریس درهم آمیختگی جدولی با تعداد سطرها و ستون‌های برابر با

جدول ۴: نتایج ماتریس درهم آمیختگی مدل زمین آماری FIK.

ماتریس درهم آمیختگی	فیلیک (واقعی)	آرژیلیک (واقعی)	پروپیلیتیک (واقعی)	جمع کل پیکسل	خطای انجام
فیلیک (FIK)	۵۰۷	۵۱	۰	۵۵۸	۹/۱۳٪
آرژیلیک (FIK)	۰	۶۶	۰	۶۶	۰٪
پروپیلیتیک (FIK)	۲۴	۲۷	۲۷۹	۳۳۰	۱۵/۴۵٪
غیردگرسان	۶۰	۰	۲۱۳	۲۷۳	
جمع کل پیکسل ها	۵۹۱	۱۴۴	۴۹۲	۱۲۲۷	
خطای حذف	۴/۵۱٪	۵۴/۱۶٪	۰٪		صحت کل: ۸۹/۳۰٪

پیکسل‌های آموزشی نسبت به زون‌های دیگر دانست. اما با توجه به این که میزان خطای انجام زون آرژیلیک صفر بوده است، می‌توان نتیجه گرفت که مدل FIK عملکرد خوبی را در رابطه با طبقه بندی تصویر داشته است. همچنین با توجه به تعداد بالای پیکسل‌های آموزشی زون فیلیک، مدل FIK به خوبی توانسته است این نوع دگرسانی را شناسایی نماید.

۵- نتیجه گیری

این تحقیق جهت شناسایی و تفکیک دگرسانی‌های گرمابی در کمربند ماگمایی سنوزوییک کرمان از یک الگوریتم چند مرحله‌ای مبتنی بر هندسه فرکتال و مدل زمین آماری کریجینگ شاخص کامل استفاده نمود. برای این منظور، سه روش آنالیز مولفه‌های اصلی، مدل فرکتالی عیار- مساحت و مدل زمین آماری FIK به فرم ترکیبی استفاده شده و توانایی این الگوریتم در پردازش تصاویر ماهواره‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده توانایی مناسب الگوریتم ارائه شده در شناسایی و تفکیک دگرسانی‌های فیلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک می‌باشد. به منظور ارزیابی خطای طبقه‌بندی، ماتریس درهم آمیختگی بررسی شد. نتایج ماتریس در هم آمیختگی بیان‌گر آن است که خطای حذف زون آرژیلیک برابر با ۵۴/۱۶٪ می‌باشد. این خطای بالا ناشی از کمتر بودن تعداد پیکسل‌های آموزشی در این زون نسبت به زون‌های دیگر است. اما با توجه صفر بودن مقدار خطای انجام زون آرژیلیک، می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم ارائه شده عملکرد خوبی را در رابطه با طبقه بندی تصویر داشته است. همچنین با توجه به تعداد بالای پیکسل‌های آموزشی زون فیلیک، الگوریتم ارائه شده به خوبی توانسته است این نوع دگرسانی را شناسایی نماید.

در ماتریس درهم آمیختگی جدول (۴)، هر ستون اطلاعاتی در مورد پیکسل‌های واقعی به کار گرفته شده در یک زون بدست می‌دهد. بدین معنی که تعداد پیکسل‌های استخراج شده از زون فیلیک ۵۹۱ عدد است که مدل FIK تعداد ۵۰۷ پیکسل را به عنوان زون فیلیک، ۲۴ پیکسل به عنوان زون پروپیلیتیک و ۶۰ پیکسل را به عنوان زون غیردگرسان یا طبقه بندی نشده تشخیص داده است. همچنین هر ردیف از ماتریس درهم آمیختگی اطلاعاتی در مورد پیکسل‌های طبقه بندی شده توسط مدل FIK در هر زون بدست می‌دهد. بدین ترتیب که تعداد پیکسل‌های انتخاب شده به عنوان زون فیلیک توسط مدل FIK برابر ۵۵۸ پیکسل می‌باشد که تنها ۵۰۷ پیکسل آن به درستی انتخاب شده است و ۵۱ پیکسل از زون آرژیلیک به اشتباه به عنوان زون فیلیک طبقه بندی شده است. برای کمی سازی کیفیت طبقه بندی مدل FIK با استفاده از ماتریس درهم آمیختگی، توابع خطای حذف و انجام محاسبه می‌گردند [۳۹]. همچنین پارامتر صحت کل نیز به کار گرفته می‌شود [۳۹]. خطای حذف برای زون فیلیک به این معنی است که ۴/۵۱٪ از پیکسل‌هایی که متعلق به زون فیلیک می‌باشند به اشتباه در زون‌های دیگر طبقه بندی شده‌اند و خطای انجام زون فیلیک این مفهوم را دارد که ۹/۱۳٪ از پیکسل‌های متعلق به زون‌های دیگر به اشتباه در زون فیلیک قرار گرفته‌اند. پارامتر صحت کل که نسبت پیکسل‌های صحیح طبقه بندی شده را به کل پیکسل‌ها نشان می‌دهد در حالت ایده آل باید برابر ۱۰۰٪ باشد این مقدار برای عملکرد مدل FIK برابر ۸۹/۳۰٪ است. با توجه به جدول ۴، مشاهده می‌گردد که خطای حذف زون آرژیلیک برابر با ۵۴/۱۶٪ به دست آمده است و این بدان معنی است که ۵۴/۱۶٪ از پیکسل‌هایی که متعلق به زون آرژیلیک بوده‌اند به اشتباه در زون‌های دیگر طبقه بندی شده‌اند. دلیل این خطای بالا را می‌توان در کمتر بودن تعداد

Environment, 9(1), pp.153-167.

منابع

۱۰. جلالی، محمد؛ رحیمی پور، غلام رضا؛ دیانتی، محمدرضا؛ تقوایی نژاد، مجتبی؛ ۱۳۹۰ "بررسی اعتبار برآوردگرهای کریجینگ خطی و غیرخطی در پهنه بندی بلوک های کانسنگ و باطله در معدن مس سرچشمه"، مجله علوم زمین، ش ۷۹، ص ۹۵ تا ۱۰۰.
11. Wang, G.; Pang, Zh.; B. Boisvert, J.; Hao, Y.; Cao, Y.; Qu, J.; 2013; "Quantitative assessment of mineral resources by combining geostatistics and fractal methods in the Tongshan porphyry Cu deposit (China)", *Journal of Geochemical Exploration*, 134, pp. 85-98.
 12. Journel. A. G. 1983. Nonparametric estimation of spatial distributions. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*. 15(3). 445-468.
 13. Lantuéjoul C. 2013. *Geostatistical simulation: models and algorithms*. Springer Science & Business Media.
 14. Hajsadeghi, S., Asghari, O., Mirmohammadi, M., Meshkani, S.A., 2016. Indirect rock type modeling using geostatistical simulation of independent components in Nohkouhi volcanogenic massive sulfide deposit, Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 168, 137- 149.
 15. Rahimi, H., Asghari, O. and Hajizadeh, F., 2018. Selection of optimal thresholds for estimation and simulation based on indicator values of highly skewed distributions of ore data. *Natural Resources Research*, 27(4), pp.437-453.
 16. Hassanzadeh. J. (1993) *Metallogenic and tectono-magmatic events in the SE sector of the Cenozoic active continental margin of Iran (Shahr-e-Babak area, Kerman province)*. University of California. Los Angeles. pp. 204 Unpublished Ph.D. Thesis.
 17. Dimitrijevic. M. D. 1973. *Geology of the Kerman region*. Geological Survey of Iran publication, Tehran. Rep. 52. 334.
 18. Soheili M. 1981. *Geological Map of Anar, 1:250 000 Map*. Geological Survey of Iran publication. Tehran.
 19. Abdi, H. and Williams, L.J., 2010. Principal component analysis. *Wiley interdisciplinary reviews: computational statistics*, 2(4), pp.433-459.
 20. Bro, R. and Smilde, A.K., 2014. *Principal component analysis*. Springer.
 1. Abedi, M., Norouzi, G.H. and Fathianpour, N., 2015. Mineral potential mapping in Central Iran using fuzzy ordered weighted averaging method. *Geophysical Prospecting*, 63(2), pp.461-477.
 2. Wambo, J.D.T., Pour, A.B., Ganno, S., Asimow, P.D., Zoheir, B., dos Reis Salles, R., Nzenti, J.P., Pradhan, B. and Muslim, A.M., 2020. Identifying high potential zones of gold mineralization in a sub-tropical region using Landsat-8 and ASTER remote sensing data: A case study of the Ngoura-Colomines goldfield, eastern Cameroon. *Ore Geology Reviews*, 122, p.103530.
 3. Fereydooni, H. and Mojeddifar, S., 2017. A directed matched filtering algorithm (DMF) for discriminating hydrothermal alteration zones using the ASTER remote sensing data. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 61, pp.1-13.
 4. Fereydooni, H., Moradzadeh, A., Pahlavani, P. and Mojeddifar, S., 2020. Full unmixing hydrothermal alteration minerals mapping by integration of pattern recognition network and directed matched filtering algorithm. *Earth Science Informatics*, pp.1-15.
 5. Beygi, S., Talovina, I.V., Tadayon, M. and Pour, A.B., 2021. Alteration and structural features mapping in Kacho-Mesqal zone, Central Iran using ASTER remote sensing data for porphyry copper exploration. *International Journal of Image and Data Fusion*, 12(2), pp.155-175.
 6. Farahbakhsh, E., Shirmard, H., Bahroudi, A. and Eslamkish, T., 2016. Fusing ASTER and QuickBird-2 satellite data for detailed investigation of porphyry copper deposits using PCA; Case Study of Naysian Deposit, Iran. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 44(4), pp.525-537.
 7. Remy. N. Boucher. A. Wu. J. 2009. *Applied geostatistics with SGeMS: a user's guide*. New York: Cambridge University Press.
 8. Rossi. M. E. Deutsch. C. V. 2013. *Mineral resource estimation*. Dordrecht: Springer.
 9. Talesh Hosseini, S., Asghari, O. and Ghavami Riabi, S.R., 2018. Spatial modelling of zonality elements based on compositional nature of geochemical data using geostatistical approach: a case study of Baghqloom area, Iran. *Journal of Mining and*

- geochemical anomaly separation. *Natural Resources Research*. 9(1). pp. 43-52.
30. Cheng. Q. Li. Q. 2002. A fractal concentration-area method for assigning a color palette for image representation. *Computers and Geosciences*. 28(4). pp. 567-575.
31. Isaaks. E. H. Srivastava. R. M. 1989. *Applied geostatistics*. New York: Oxford University Press.
32. Badel. M. Angorani. S. Panahi. M. S. 2011. The application of median indicator kriging and neural network in modeling mixed population in an iron ore deposit. *Computers & geosciences*. 37(4). 530-540.
33. Liu. C.-W. Jang. C.-S. Liao. C.-M. 2004. Evaluation of arsenic contamination potential using indicator kriging in the Yun-Lin aquifer (Taiwan). *Science of the Total Environment*. 321(1). 173-188.
34. Kechiched, R., Nezli, I.E., Fougou, A., Belksier, M.S., Benhamida, S.A., Djeghoubbi, R., Slamene, N. and Ameer-zaimche, O., 2020. Fluoride-bearing groundwater in the complex terminal aquifer (a case study in Hassi Messaoud area, southern Algeria): hydrochemical characterization and spatial distribution assessed by indicator kriging. *Sustainable Water Resources Management*, 6, 1-14.
35. Leuangthong. O. Khan. K. D. Deutsch. C. V. 2011. *Solved problems in geostatistics*. New Jersey: John Wiley & Sons.
36. Sakata, Y., Katsura, T. and Nagano, K., 2020. Estimation of ground thermal conductivity through indicator kriging: Nation-scale application and vertical profile analysis in Japan. *Geothermics*, 88, 101881.
37. Mojeddifar. S. Ranjbar. H. Nezamabadi-pour. H. 2013. Adaptive NeuroFuzzy Inference System application for hydrothermal alteration mapping using ASTER data. *Journal of Mining & Environment*. Vol. 4, No. 2 pp. 83-96.
38. Honarmand. M. Ranjbar. H. Shahabpour. J. 2011. Application of Spectral Analysis in Mapping Hydrothermal Alteration of the Northwestern Part of the Kerman Cenozoic Magmatic Arc. Iran. *Journal of Sciences*. Vol. 22. pp. 221-238.
39. Congalton. R. G. Green. K. 2009. *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data—Principles and Practices*. 2nd ed. Lewis publishers. Boca Raton.
- component analysis. *Analytical methods*, 6(9), pp.2812-2831.
21. Kaiser, H.F., 1991. Coefficient alpha for a principal component and the Kaiser-Guttman rule. *Psychological reports*, 68(3), pp.855-858.
۲۲. امینی، جلال: ۱۳۸۸ "پردازش کامپیوتری تصاویر سنجش از دور"، ترجمه، موسسه انتشارات دانشگاه تهران، چاپ اول.
23. Cheng. Q. Agterberg. F.P. Ballantyne. S.B. 1994. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *journal of Geochemical Exploration*. 51(2). pp. 109-130.
24. Cheng. Q. Agterberg. F.P. Bonham-Carter G. F. A 1996. Special analysis method for geochemical anomaly separation. *journal of Geochemical Exploration*. 56(2). pp. 183-195.
25. Cheng. Q. Bonham-Carter. G. F. A. Hall. G. E. M Bajc. A. 1997. Statistical study of trace elements in the soluble organic and amorphous Fe-Mn phases of surficial sediments. *Sudbury Basian*. 1. Multivariate and spatial analysis. *journal of Geochemical Exploration*. 59(1). pp. 27-46.
26. Goncalves. M. A. Vairinho. M. Oliveira. V. 1998. Study of geochemical anomalies in Mombeja area using multifractal methodology and geostatistics. *Proceedings of International Association for Mathematical Geology Meeting(Vol. 2, pp. 590-595)*. 6-9 October. Ischia. Italy.
27. Sim. B. L. Agterberg. F.P. Beaudry. C. 1998. Determining the cut-off between background and anomalous metal concentration in lake sediments for the Frotete area. Quebec. using multifractal methods. In A. Buccianti. G. Nardi. and R. Potenza(Eds). *Proceedings of International Association for Mathematical Geology Meeting(Vol. 2. pp. 612-617)*. 6-9 October. Ischia. Italy.
28. Cheng. Q. Xu. Y. Grunsky. E. 1999. Integrated spatial and spectrum analysis for geochemical anomaly separation. In S. J. Lippard. A. Naess, and R. Sinding –Larsen(Eds). *Proceedings of International Association for Mathematical Geology Meeting(Vol. I, pp. 87-92)*. Trondheim. Norway.
29. Cheng. Q. Xu. Y. Grunsky. E. 2000. Integrated spatial and spectrum analysis for