

استفاده از تکنیک‌های پیکسل مینا و زیر پیکسل مینا جهت شناسایی مناطق دگرسانی (مطالعه موردی: محدوده تنگ بستانک استان فارس)

احمد نوحه‌گر - استاد دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران
محمد کاظمی* - دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشگاه هرمزگان
سید جواد احمدی - دانشیار پژوهشکده چرخه سوخت، سازمان انرژی اتمی
حمید غلامی - استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه هرمزگان
رسول مهدوی - استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه هرمزگان

پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۲۵ تأیید نهایی: ۱۳۹۵/۰۴/۱۵

چکیده

آشکارسازی طیفی کانی‌ها با استفاده از تصاویر چند طیفی سنجنده‌ها، به منظور شناسایی و اکتشاف کانی‌های هر منطقه با بهره‌گیری از رفتارهای منحصر به فرد کانی‌ها شیوه‌ای نوین در زمینه علوم محیطی محسوب می‌گردد. تحقیق حاضر با استفاده از داده‌های سنجنده لندست ۸ و با روش‌های مختلف پیکسل مینا و زیر پیکسل مینا مانند روش نسبت گیری بانندی، آنالیز مؤلفه‌های انتخابی (کروستا)، نقشه بردار زاویه طیفی (SAM)، برازش مشخصه طیفی (SFF)، روش ACE و فیلتر انطباقی تعدیل یافته (MTMF) به مطالعه و شناسایی زون‌های دگرسانی در منطقه تنگ بستانک در استان فارس می‌پردازد. انجام پردازش‌های لازم و استفاده از تکنیک‌های ذکر شده منجر به شناسایی دگرسانی‌های مختلفی از جمله آرژیلیک، فلیک و پروپلیتیک شده است. همچنین در این تحقیق با در دست داشتن نقشه واقعیت زمینی منطقه دولومیتی از سطح منطقه، دقت‌های طبقه‌بندی از جمله دقت کلی، کاپا، دقت ناظر و دقت تولید کننده محاسبه گشت. همچنین با استفاده از نمونه برداری تصادفی از سطح منطقه و انجام آزمایش ICP-MASS، مجموع مربعات باقیمانده برای هر کدام از روش‌های پیکسل مینا و زیر پیکسل مینا محاسبه و آنالیز XRD جهت تدقیق نتایج شناسایی اهداف با استفاده از نمونه برداری تصادفی روی مناطق مختلف انجام شد. نتایج نشان داد روش SFF با مجموع مربعات باقیمانده ۱/۵ و ضریب کاپا و کلی ۰/۶۷۹ و ۸۴/۸۰ بیشترین دقت در شناسایی زون‌های دگرسانی و روش PCA با مجموع مربعات باقیمانده ۳/۴۶ و ضریب کاپا و کلی ۰/۲۷۹ و ۴۴/۴ کمترین دقت را در شناسایی این مناطق دارد. همچنین بعد از گزینش مناسب‌ترین روش شناسایی مساحت مناطق مختلف محاسبه گشت که مناطق دولومیتی، کلسیتی و کوارتز (سیلیسی) به ترتیب با ۳۷/۱۴۴، ۳۳/۳۲ و ۲۷/۸۶ کیلومتر مربع بیشترین مساحت از سطح منطقه مورد مطالعه را به خود اختصاص داده‌اند.

واژگان کلیدی: دگرسانی، برازش مشخصه طیفی، پیکسل مینا، سنجنده از دور، تنگ بستانک

مقدمه

ایده‌ی اساسی طراحی و توسعه‌ی سنجنده‌های فراطیفی بر مبنای مفاهیم فیزیکی موردتوجه در سنجنش‌ازدور، در مورد طیف الکترومغناطیس شکل گرفته است. هر عنصر یا ماده خاص بر اساس ترکیب و ساختار مولکولی خود، عکس‌العمل بازتابی مشخصی به نواحی مختلف طیف الکترومغناطیس در طول موج‌های گوناگون نشان می‌دهد و این عکس‌العمل برای عناصر و مواد مختلف در شرایط یکسان، متفاوت بوده است (مانولاکیس^۱، ۲۰۰۳:۷۹). استفاده از داده‌های ماهواره‌ای به دلیل دید فرامنطقه‌ای، تکرار داده‌ها در مدت‌زمان کم، دسترسی آسان، چندباندی بودن، توانایی بازسازی و فراهم نمودن تصاویر رنگی جهت انجام مهم‌ترین کارهای صحرایی از قبیل تعیین موقعیت زون‌های آلتراسیون، تعیین موقعیت قرارگیری، نقشه‌برداری ساختاری و سنگ‌شناسی به کارگرفته شده و سبب صرفه‌جویی در وقت، هزینه، نیروی انسانی و افزایش دقت می‌شود (نوحه‌گر و همکاران، ۲۰۱۳:۲). در تصاویر فراطیفی و چندطیفی حجم داده‌ی طیفی جمع‌آوری شده، بسیار زیاد است. به دلیل حساسیت بالای سنجنده‌های چند طیفی و فراطیفی، به‌طور معمول سیگنال‌های ناشناخته‌ی زیادی در تصاویر ثبت می‌شود که هیچ‌گونه اطلاعات قبلی درباره‌ی آن‌ها وجود ندارد و نمی‌توان آن‌ها را به شیوه‌ی دیداری شناسایی کرد. در این شرایط شناسایی این عوارض با روش‌های رایج آشکارسازی مبتنی بر پیکسل، امکان‌پذیر نیست و پردازش‌ها باید در سطح زیر پیکسل و به کمک ویژگی‌های طیفی عوارض انجام گیرد (اکبری، ۱۳۹۰:۹۸). مواد معدنی به‌طور همگن در تمام سطح زمین پراکنده نشده است، پس برای اکتشاف، در مرحله‌ی اول، مطالعات اولیه برای مشخص نمودن مناطقی که باید مورد جستجو قرار بگیرند، صورت می‌گیرد. انجام این مطالعات، نقش چشمگیری در استفاده‌ی بهینه از امکانات، برای پیشبرد هدف اکتشاف کانسارها، خواهد داشت (کریمی بارونقی، ۱۳۹۱:۵). از ویژگی‌های عمده و مهمی که سبب به‌کارگیری فناوری سنجنش‌ازدور در اکتشاف مواد معدنی شده است، این است که با کمک آن می‌توان کانی‌ها و عناصر ویژه را شناسایی کرد (وین‌سنت^۲، ۱۹۹۷:۱۲۱). قابل ذکر است که تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی از طریق فن‌آوری سنجنش‌ازدور، بسیار کم‌هزینه است؛ به‌طوری که قیمت تمام‌شده آن در حدود یک‌دهم روش‌های سنتی تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی می‌باشد (اگزی اوجیا و همکاران^۳، ۲۰۱۰:۵۲). تصاویر سنجنش‌ازدور دو کاربرد عمده در اکتشاف مواد معدنی دارند: ۱- تهیه نقشه‌ی زمین‌شناسی و شناسایی گسل‌ها و شکستگی‌هایی که نهشته‌های معدنی در بردارند، ۲- شناسایی سنگ‌های دگرسان شده بر اساس ویژگی‌های طیفی آن‌ها (سابینز^۴، ۱۹۹۹:۱۵۹). توانایی تفکیک باندی در طول موج‌های محدودتر و بیشتر سبب شده که در چند سال اخیر علاوه بر سنجنده‌های مختلف از داده‌های سنجنده لندست ۸ نیز برای بازسازی پدیده‌های مختلف زمین استفاده شود (بیرانوند و هاشیم^۵، ۲۰۱۵:۱۵۷). ماهواره لندست ۸ در تاریخ ۱۱ ژانویه سال ۲۰۱۳ به فضا پرتاب شد. این ماهواره دارای دو سنجنده و ۱۱ باند می‌باشد که ۹ باند با طول موج کوتاه مربوط به سنجنده (Operational Land Imager) OLI و دو باند با طول موج حرارتی آن مربوط به سنجنده TIRS (and the Thermal Infrared Sensor) می‌باشد (بیرانوند و هاشیم، ۲۰۱۵:۱۵۹). این سنجنده نسبت به دیگر سنجنده‌های طیفی قدیمی‌تر لندست از توان تفکیک طیفی بالاتری برخوردار بوده و دارای توانایی بهتری برای تشخیص و شناسایی دگرسانی‌ها و تمایز واحدهای سنگ‌شناختی می‌باشد (بیرانوندپور و هاشیم، ۲۰۱۵:۱۵۶). به کلیه تغییرات شیمیایی و کانی‌شناسی که تحت تأثیر آب‌های ماگمایی و یا گرمابی در سنگ‌ها ایجاد می‌شود را دگرسانی می‌گویند. دگرسانی ساده‌ترین، ارزان‌ترین و مناسب‌ترین وسیله در اکتشاف مواد معدنی است (کریم‌پور و همکاران، ۱۳۸۴:۳۱۸). بهترین روش برای پیدا کردن دگرسانی‌ها، کمک گرفتن از پردازش داده‌های ماهواره‌ای است. تغییرات شیمیایی و کانی‌شناسی حاصل از دگرسانی سنگ‌ها، میزان انعکاس منعکس شده و یا جذب شده در این سنگ‌ها را تغییر می‌دهد (کریم‌پور و همکاران، ۱۳۸۴:۲۱۴). بیرانوندپور و هاشیم (۲۰۱۵) با استفاده از نسبت‌گیری باندی بروی داده‌های لندست ۸ اقدام به شناسایی مناطق دگرسانی در معادن مس سرچشمه کردند. آن‌ها بیان کردند که باندهای ۲، ۴، ۶، ۷ و ۱۰ دارای اطلاعات بیسار مفیدی جهت شناسایی زون‌های دگرسانی و خصوصاً مناطق مس پورفیری هستند. پریهانتارو^۶ (۲۰۱۲) در مطالعه‌ای به بررسی ویژگی‌های خاک و تهیه نقشه‌ی خاک بر مبنای اختلاط مقادیر پیکسل‌ها

¹ Manolakis² Vincent³ Xiaojia et al.⁴ Sabins⁵ Beiranvand-Pour and Hashim⁶ Prihantarto

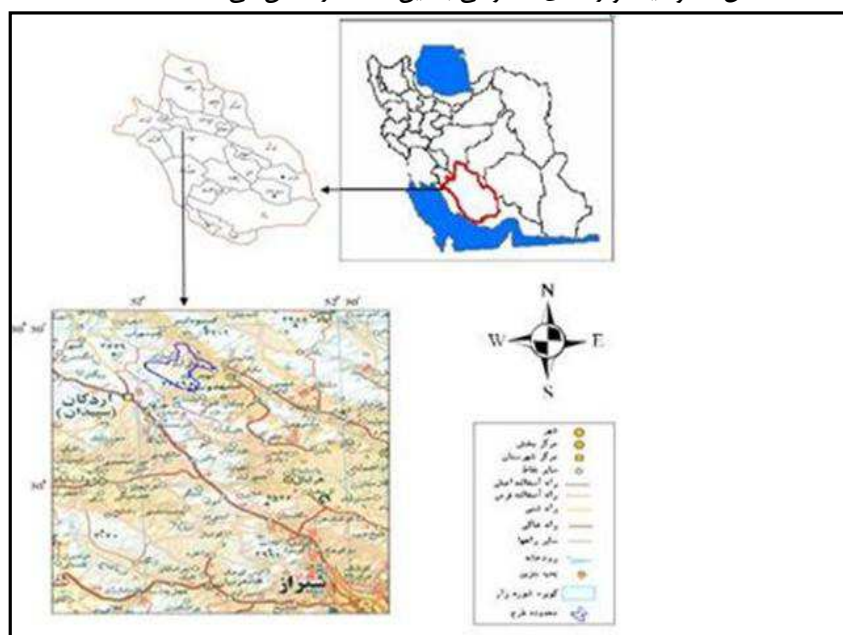
پرداختند و توانستند با استفاده از روش‌های زیر پیکسلی و بر اساس استفاده از تصاویر چندطیفی EOI-ALI ویژگی‌های خاک را تعیین کنند. قولام و عامر^۱ (۲۰۱۱) باهدف پیدا کردن زون‌های دگرسانی حاوی طلا، از داده‌های سنجنده ASTER استفاده کردند و به کمک روش‌های تحلیل مؤلفه‌های اصلی، نسبت‌گیری طیفی، ترکیب بانندی کاذب (CEM) و روش MTMF به آشکارسازی طلا پرداختند و به این نتیجه رسیدند که روش‌های مبتنی بر ویژگی‌های طیفی در فضای N بعدی بهترین نتیجه را ارائه می‌دهد. بلواسی و همکاران (۱۳۹۴) در شناسایی مناطق دارای مس منطقه قزل‌داش شهرستان خوی از تصاویر هایپریون و روش‌های پیکسل مینا استفاده کردند. نامبردگان به دقت بالای روش پیکسل مینای SAM جهت شناسایی تفکیک این مناطق با دقت بالا اشاره کردند. بینقی و همکاران (۱۳۹۳) در تحقیقی در منطقه جنوب‌غربی سبزوار جهت شناسایی تپه‌های ماسه‌ای از روش‌های پیکسل مینا بهره بردند و بیان کردند که روش MTMF دارای دقت بسیار خوبی جهت شناسایی این عوارض خاص نسبت به دیگر پیکسل‌های زمینه می‌باشد. نوحه‌گر و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از داده‌های ASTER در منطقه سیاه‌کوه استان کرمان بیان کردند که روش‌های زیرپیکسل دقت بیشتری نسبت به روش‌های پیکسل مینا دارد و روش ACE را دارای بیشترین دقت در شناسایی مناطق دگرسانی معرفی نمودند.

هدف از تحقیق حاضر استفاده از روش‌های مختلف پیکسل مینا و زیرپیکسل مینا جهت شناسایی زون‌های مختلف دگرسانی در منطقه تنگ بستانک استان فارس با استفاده از سنجنده OLI لندست ۸ بود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق با مساحت $۸۱/۷۳ \text{ km}^2$ تحت عنوان حوضه آبخیز بهشت گمشده (تنگ بستانک) در حدود ۸۰ کیلومتری شمال غرب شهرستان شیراز و در موقعیت جغرافیایی $۲۵^{\circ} ۱۸'$ تا $۲۵^{\circ} ۰۳'$ و $۵۲^{\circ} ۱۳'$ شرقی و $۳۳^{\circ} ۱۶'$ تا ۳۰° شمالی واقع شده است. شکل ۱ موقعیت و راه‌های دسترسی به این منطقه را نشان می‌دهد.



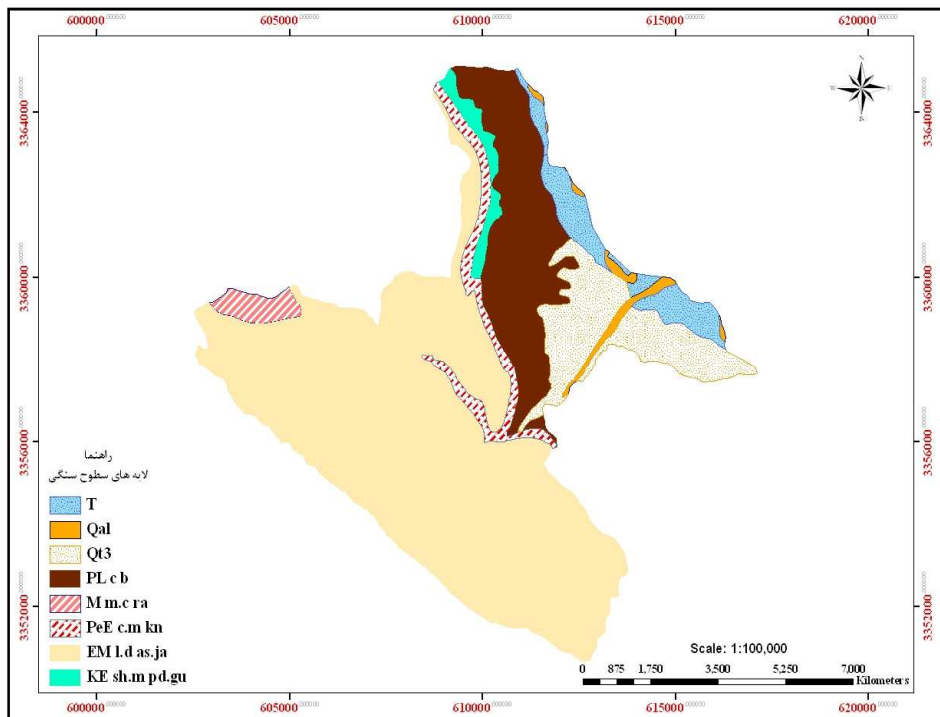
شکل ۱. موقعیت محدوده مورد مطالعه و راه‌های دسترسی به آن

زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد مطالعه در زون زاگرس چین‌خورده واقع شده است. بنابراین روند ساختارهای زمین‌شناسی منطقه با روند عمومی چین‌خورده زاگرس یعنی از شمال غرب به جنوب شرق می‌باشد. این منطقه از نظر تکتونیکی یال جنوب غربی یک تاقدیس می‌باشد که مرکز آن در سمت شمال شرق رودخانه کر و خارج از محدوده مورد مطالعه قرار گرفته است. همان‌طور که شکل ۲ نشان می‌دهد در این منطقه شاهد آهک و آهک دولومیتی سازند آسماری جهرم (واحد زمانی الیگوسن تا میوسن پیشین)، سازند مارنی و آهک

¹ Ghulam

مارنی پابده‌گورپی که مرز بالای سازند پابده با سنگ آهکی آسماری هم‌شیب و تدریجی هست و نیز گاهی سازند پابده زیر سازند آسماری قرار می‌گیرد (از لحاظ زمانی سن آن از پالتوسن پسین تا اوایل الیگوسن هست)، رسوبات عهدحاضر، سازند کشکان که جزو سازندهای سنوزوئیک زاگرس هست و سن آن پالتوسن تا ائوسن میانی می‌باشد و عمدتاً از ماسه‌سنگ و کنگلومرا که قسمت عمده آن را چرت تشکیل می‌دهد. همچنین در این منطقه می‌توان سازند رازک از لحاظ سنی بوردیگالین تا میوسن میانی هست و جنس آن مارن می‌باشد (در کنار سازنده پابده‌گورپی دیده می‌شود) و نیز به سازند بختیاری که از لحاظ زمانی یلیوسن پسین تا پلئستوسن هست و از کنگلومرای سخت و مقاوم که با سیمانی از جنس سیلیس و آهک به هم جوش خورده است تشکیل شده، اشاره کرد.



شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی و سازندهای منطقه مورد مطالعه

فایل تصویر با مشخصات LC81630392015274LGN00 از سایت <http://earthexplorer.usgs.gov> اخذ شد. تصویر موردنظر مربوط به تیرماه سال ۲۰۱۵ می‌باشد.

ACE (Adaptive Coherence Estimator)

این آشکارساز از یک تابع توزیع به‌منظور مدل کردن پس‌زمینه استفاده می‌کند. به عبارت دیگر این روش نیازی به طیف‌های مربوط به اجزای خالص پس‌زمینه ندارد که این فرض معادل با حذف پس‌زمینه ساختاریافته است. در این روش پس‌زمینه به صورت یک تابع توزیع گوسین با میانگین صفر و کوواریانس مقیاس شده σ^2 با فرض‌های زیر مدل‌سازی می‌شود.

رابطه (۱)

$$H_0: x \sim N(0, \sigma_0^2 I)$$

$$H = x \sim N(Sa_s, \sigma_1^2 I)$$

عبارت مقیاس σ^2 معمولاً به صورت تجربی به دست نمی‌آید. به‌هرحال این عبارت باید به صورت تئوریک به دست آید که توضیح داده خواهد شد. از آنجاکه طیف زمینه در این الگوریتم وارد نمی‌شود بنابراین شروط غیر منفی بودن فراوانی‌ها و مجموع برابر ۲ بودن آن‌ها ارضا نخواهد شد، همچنین در این روش فرض بر این است که یک مجموعه داده مستقل به صورت رابطه زیر وجود داشته باشد (برودواتر، ۲۰۰۷: ۹۲).

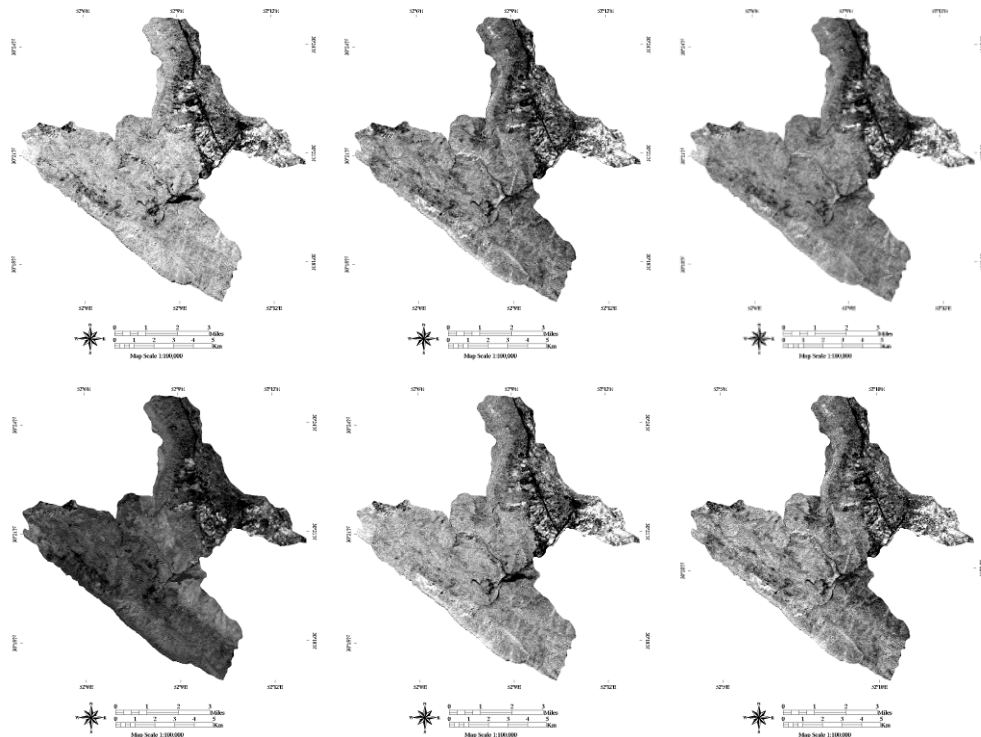
رابطه (۲)

$$Y = \{Y_i | y_i \sim N(0, I), i = 1, \dots, N\}$$

با ترکیب روابط بالا، رابطه احتمال توام فرض H_0 و H_1 قابل استخراج خواهد بود. سپس اگر مقدار N یک مقدار بسیار بزرگ فرض شود می‌توان واریانس و کوواریانس را تخمین زد. در نهایت می‌توان آشکارساز ACE را در غالب رابطه زیر بیان کرد (نوحه‌گر و همکاران، ۱۳۹۲:۸): رابطه (۳)

$$T = \frac{(d^T I^{-1} x)^2}{(d^T I^{-1} d)(x^T I^{-1} x)}$$

در این معادله d طیف مرجع و X طیف پیکسل می‌باشد. در صورت انطباق کامل طیف پیکسل با طیف مرجع $x=d$ حاصل این عبارت برابر با ۱ خواهد بود و هر چه اختلاف دو طیف کمتر شود حاصل عبارت کمتر از یک خواهد بود. اجرای این الگوریتم با استفاده از نرم‌افزار ENVI4.8 و با استفاده از طیف کتابخانه طیفی USGS موجود در این نرم‌افزار پس از بازنویسی مجدد به باندهای لندست ۸ صورت گرفت. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم ACE در شکل ۳ آمده است.



شکل ۳. تصاویر مربوط به خروجی روش ACE به ترتیب مربوط به کانی‌های مسکویت، ایلیت، کلسیت، کلریت، دولومیت و کائولینیت به منظور مشخص کردن زون‌های فیلیک، پروپیلیتیک و آرژلیک (به ترتیب از راست به چپ، الف، روش (ACE) مسکویت، الف، روش (ACE) ایلیت، ب، روش (ACE) کلسیت، ب، روش (ACE) کلریت، ب، روش (ACE) دولومیت، ج، روش (ACE) کائولینیت)

MTMF (Mixture tuned matched filtering)

در این روش با معرفی منحنی طیفی یک هدف خاص فراوانی این هدف تعیین می‌گردد. الگوریتم MTMF شامل دو مرحله می‌باشد: ۱- محاسبه یک فیلتر انطباقی^۱ جهت تخمین زدن فراوانی ۲- محاسبه یک معیار اختلاف طیفی برای شناسایی و حذف مقادیر مثبت اشتباه^۲ در بحث سنجش از دور مرئی^۳ فیلترهای انطباقی را می‌توان به‌عنوان فرآیندی که در آن داده‌های ورودی که بیشترین انطباق را باهدف دارند در مقابل طیف پس‌زمینه فیلتر می‌شوند مطرح نمود. قدرت شاخص در الگوریتم

^۱ Matched filtering

^۲ False positives

^۳ Optical Remote Sensing

MTMF در مرحله دوم آن است که در آن یک عدد محاسبه می‌شود که می‌توان آن را به‌عنوان میزان امکان‌ناپذیری^۱ و یا به‌عبارت‌دیگر معیاری برای تعیین میزان درستی انطباق هر پیکسل طبقه‌بندی‌شده توسط روش MTMF تعبیر نمود. در روش MTMF می‌بایست داده‌ها برای بهبود محاسبات میزان کردن مخلوط طیفی^۲ مانند خروجی الگوریتم MNF درای میانگین صفر و نویز واحد باشند. امتیاز فیلتر انطباق یافته با تصویر کردن داده تبدیل یافته توسط روش MNF بر روی بردار فیلتر انطباقی تعیین می‌گردد (رابطه ۴). این بردار حاصل تبدیل طیف هدف در فضای MNF و تصویر نمودن آن بر روی معکوس کوواریانس داده و نرمال کردن آن به بزرگای طیف هدف می‌باشد (مانت و همکاران^۳، ۲۰۰۷: ۱۰۶). این موضوع در رابطه ۴ نشان داده شده است:

رابطه (۴):

$$\vec{V} =$$

$$\frac{[C_{MNF}]^{-1} \# \vec{t}_{MNF}}{(\vec{t}) \# [C_{MNF}]^{-1} \# \vec{t}_{MNF}}$$

در رابطه فوق بردار فیلتر انطباقی، $[C_{MNF}]^{-1}$ معکوس ماتریس کوواریانس تبدیل MNF (یک ماتریس قطری از مقادیر ویژه دوسویه) و \vec{t}_{MNF} بردار هدف در فضای MNF می‌باشد. علامت # در این رابطه بیانگر، عمل تصویر کردن^۴ می‌باشد. در مرحله بعد با تصویر نمودن داده ورودی (که در فضای MNF است) بر روی فیلتر انطباقی مقادیر خروجی الگوریتم MF حاصل می‌گردد. رابطه ۵ بیانگر این موضوع هست: رابطه (۵):

$$MF = \vec{V} \# [MNF]$$

در معادله بالا مقادیر خروجی یا همان MF ها دارای توزیع نرمال و میانگین صفر می‌باشند. در حالت ایده آل مقادیر خروجی صفر و کمتر نشان‌دهنده پس‌زمینه (عدم وجود هدف) بوده و پیکسل‌های با مقادیر MF بین صفر و یک دارای کسری از هدف (به‌اندازه MF) در خود می‌باشند (مانت و همکاران^۳، ۲۰۰۷: ۱۰۶). مرحله دوم الگوریتم MTMF به ارزیابی توانایی تخمین خطای موجود در مقادیر MF برای هر پیکسل بر اساس مفهوم عدم امکان‌پذیری می‌پردازد. محاسبه این مقدار برای هر پیکسل در سه مرحله ذیل صورت می‌گیرد. ۱- تعیین اجزای بردار هدف پیکسل ۲- درون‌یابی مقادیر ویژه مربوط به اجزای بردار هدف ۳- محاسبه جدایی استاندارد بین یک پیکسل و اجزای بردار هدف ایده آل. همان‌طور که در رابطه ۶ بیان گردیده است اجزای بردار هدف یک پیکسل از ضرب عددی مقادیر MF در بردار هدف محاسبه می‌شوند: رابطه (۶):

$$\vec{C}_i = MF_i \times \vec{t}_{MNF}$$

در رابطه بالا C_i اجزای بردار هدف برای پیکسل i و MF_i مقادیر MF برای پیکسل i می‌باشد. واحدهای فضای MNF برحسب انحراف معیار استاندارد نویز تعیین می‌گردند. در این روش اندازه‌گیری واریانس توسط مفهوم عدم امکان‌پذیری (میزان درستی انطباق) در رابطه ۷ نشان داده شده است:

$$\vec{e}_i = (\sqrt{\vec{e}_{MNF}} - MF_i \times (\sqrt{\vec{e}_{MNF}} - \vec{e}_n))^2 \quad \text{رابطه (۷):}$$

در فرمول فوق e_i مقادیر ویژه درون‌یابی شده برای پیکسل i : e_{MNF} و e_n ، بردار مقادیر ویژه نویز داده MNF (بردار با درایه ۱) می‌باشد. این استانداردسازی با درون‌یابی خطی مقادیر ویژه بین پیکسلی که شامل صددرصد هدف است و پیکسل شامل صددرصد پس‌زمینه (مقادیر ویژه خیلی بزرگ‌تر از ۱ که بیانگر درجه آزادی اختلاط بالاست انجام می‌گیرد. در نهایت مقدار درستی انطباقی که به‌عنوان فاصله هندسی بین یک پیکسل تا بردار هدف قلمداد می‌شود، توسط مقدار حد آستانه واریانس مربوطه‌اش نرمال‌سازی می‌شود. رابطه ۸ بیانگر این مطلب هست: رابطه (۸):

^۱ Infeasibility

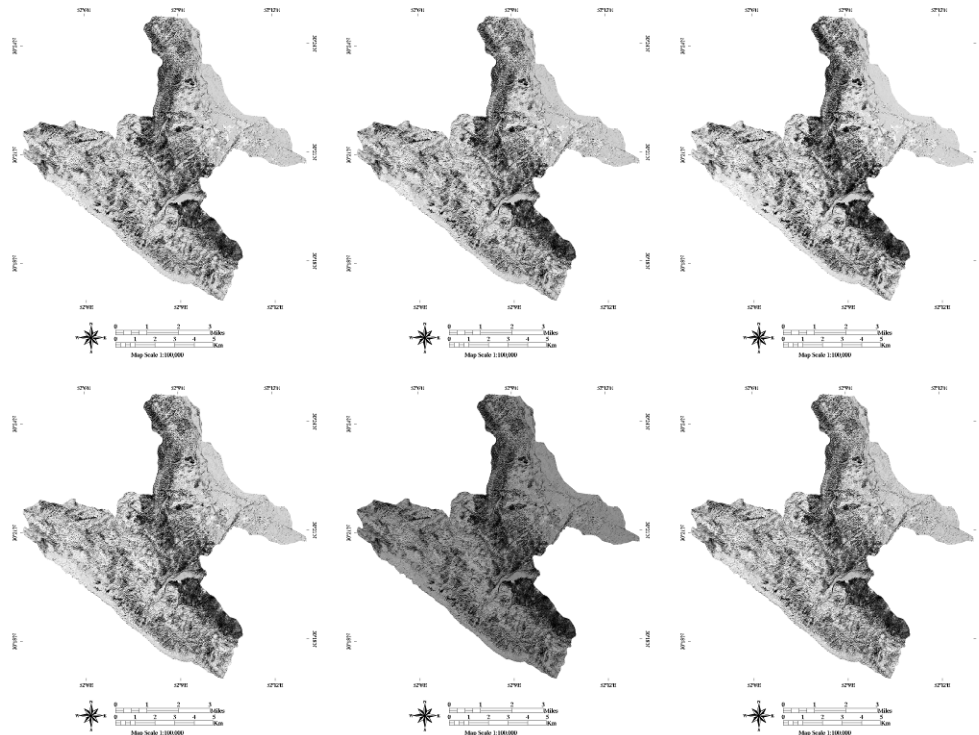
^۲ Mixture Tuning calculation

^۳ Mundt Streutker and Gleen

^۴ projection

$$I = \frac{\|\vec{S}_i - \vec{C}_i\|}{\|\vec{e}_i\|}$$

در این رابطه I_i ، مقدار عدم امکان‌پذیری (میزان درستی انطباق) برای پیکسل i و S_i ، منحنی MNF پیکسل i می‌باشد. نتیجه اجرای الگوریتم MTMF بر روی داده دو تصویر MF و Infeasibility برای هر هدف معرفی شده به الگوریتم می‌باشد. ایجاد یک تصویر واحد حاصل از نسبت تصویر MF به تصویر عدم امکان‌پذیری باشد که در تصویر حاصل پیکسل‌های روشن‌تر برای هدف موردنظر مطلوب‌تر خواهد بود (بهرام‌بیگی، ۱۳۹۱). شکل‌های ۴ نتایج مربوط به الگوریتم MTMF را نشان می‌دهند.



شکل ۴. شاخص نسبت MF/ Infeasibility برای زون‌های فلیک، پروپیلیتی و آرچلیک (الف) شاخص نسبت MF/ Infeasibility برای مسکویت و ایلیت (از راست به چپ)، ب) شاخص نسبت MF/ Infeasibility برای کلریت، کلسیت و دولومیت، ج) شاخص نسبت MF/ Infeasibility برای کائولینیت

روش‌های پیکسل مینا

روش‌های پیکسل مینا به کاربرده شده شامل روش تحلیل مؤلفه‌های انتخابی (کروستا)، نقشه‌بردار زاویه طیفی و برازش مشخصه طیفی می‌باشد.

SAM (Spectral Angle Mapper)

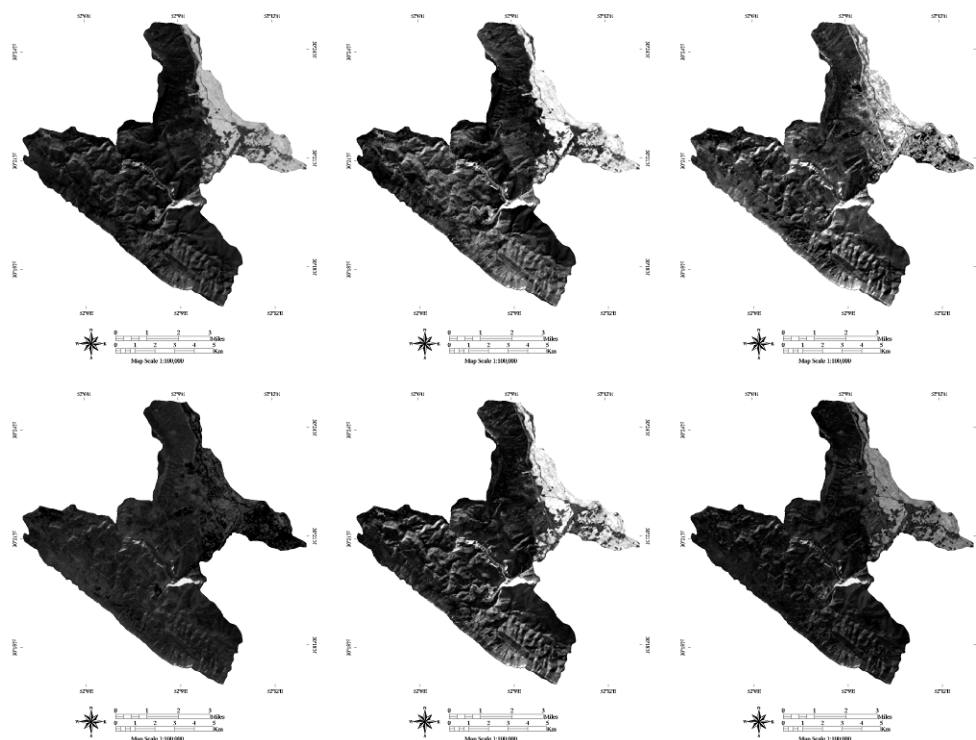
نقشه‌بردار زاویه طیفی روشی کارآمد برای مقایسه طیف تصاویر نسبت به طیفی مشخص یا طیفی استاندارد (کتابخانه‌ای) است. الگوریتم این روش، مشابهت بین ۱ طیف را به وسیله زاویه طیفی بین آن دو محاسبه می‌کند. در واقع با تبدیل طیف‌ها به بردار در فضایی به ابعاد تعداد باندها، زاویه بین دو بردار محاسبه می‌شود. در این روش برای محاسبه زاویه بردار جهت بردارها اهمیت دارد و نه طول آن‌ها، بنابراین در این روش فاکتورهای دیگر در نظر گرفته نمی‌شود (می‌تر، ۲۰۰۴: ۲۱۸). در واقع هرچه مقدار زاویه بین ۰ و ۱ کمتر باشد، شناسایی دقیق‌تر خواهد بود. در صورتی که مقدار زاویه ۲ باشد، کل تصویر به عنوان پدیده موردنظر شناسایی می‌شود. برای مقایسه یک پیکسل، طیف پیکسل موردنظر از منطقه مورد مطالعه با طیف همان پیکسل در آزمایشگاه (کتابخانه) بر روی دوباند در یک محور مختصات رسم می‌گردد. سپس نقاط به دست آمده به مبدأ وصل می‌شود و زاویه بین دو خط به دست آمده به عنوان زاویه شناسایی پیکسل شناخته می‌شود. برای به دست آوردن زاویه α بین دو بردار (به دست آمده از طیف نقاط آزمایشگاهی t و مرجع r) از رابطه ۹ استفاده می‌شود:

رابطه (۹):

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{\vec{t} \cdot \vec{r}}{\|\vec{t}\| \cdot \|\vec{r}\|}\right)$$

در صورتی که از تعداد n باند برای شناسایی پدیده مورد نظر استفاده شود، از رابطه زیر برای به دست آوردن زاویه استفاده می‌شود:
رابطه (۱۰):

که در آن nb تعداد باندها می‌باشد. خروجی این محاسبات یک تصویر رده‌بندی شده و تصاویر Rule به تعداد عضوهای انتهایی است. تصویر رده‌بندی شده بهترین تطابق و تصاویر Rule زاویه طیفی بین طیف مرجع و طیف تصویر را نشان می‌دهد. پیکسل‌هایی که زاویه طیفی کوچک‌تری دارند در تصاویر Rule تیره‌تر دیده شده و بیشترین جورشدگی را با طیف مرجع نشان می‌دهند (پری^۱، ۲۰۰۰:۲۳۴؛ میر و همکاران، ۲۰۱۱:۱۹۶). در تحقیق حاضر به منظور انجام روش نقشه‌بردار زاویه طیفی از کانی‌های کائولینیت و مونتوریلونیت به عنوان معرف زون آرژلیک، ایلیت و مسکویت به عنوان معرف زون فیلیک، کلسیت، دولومیت و کلریت به عنوان معرف زون پروپیلیتیک استفاده شد. با اعمال این روش تصویر رده‌بندی شده و RULE در مورد هر کدام به دست آمد. شکل ۵ تصویر مربوط به RULE زون‌های آرژلیک، فیلیک و پروپیلیتیک را نشان می‌دهد.



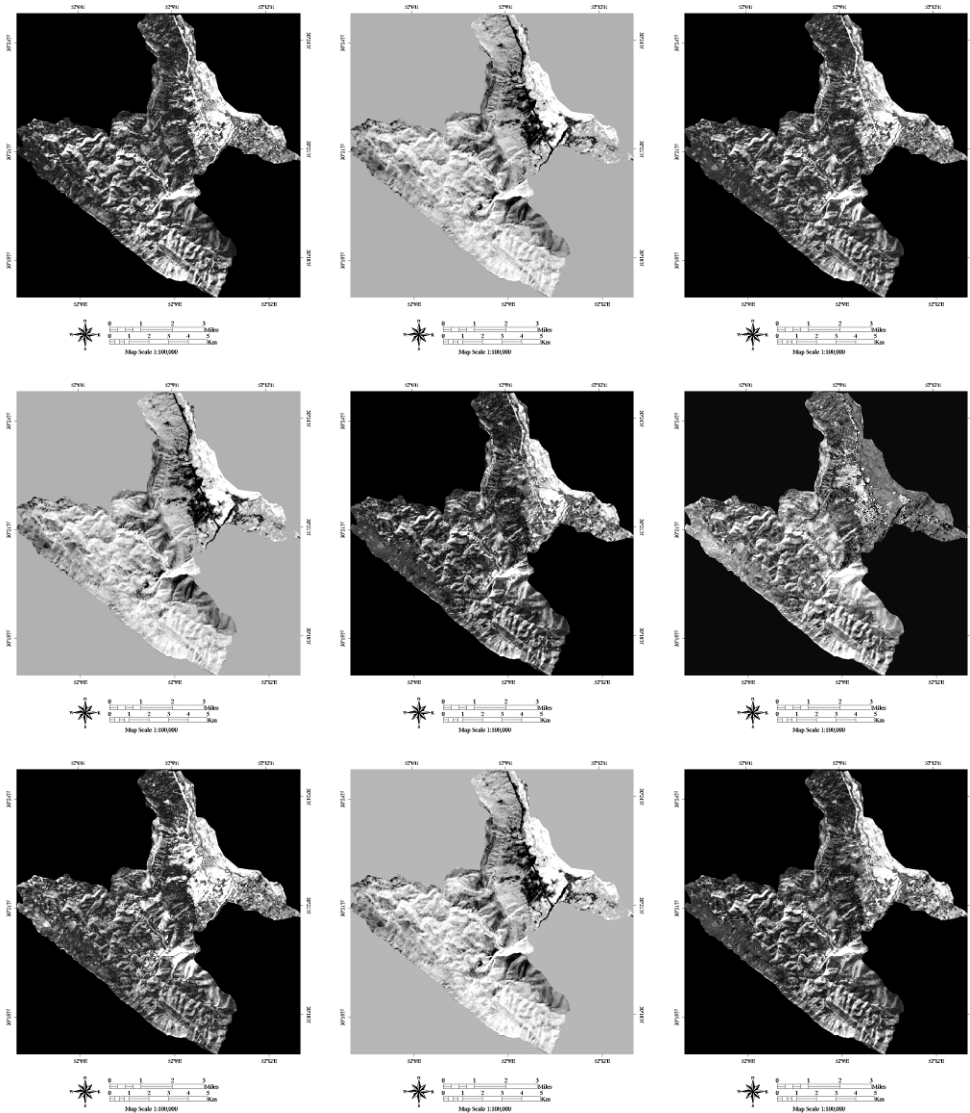
شکل ۵: تصاویر Rule مربوط به نقشه‌بردار زاویه طیفی در زون‌های فیلیک، پروپیلیتیک و آرژلیک (الف) مسکویت
الف (۲) ایلیت (از راست به چپ)، ب (۱) کلریت، ب (۲) کلسیت، ب (۳) دولومیت، ج (۱) کائولینیت

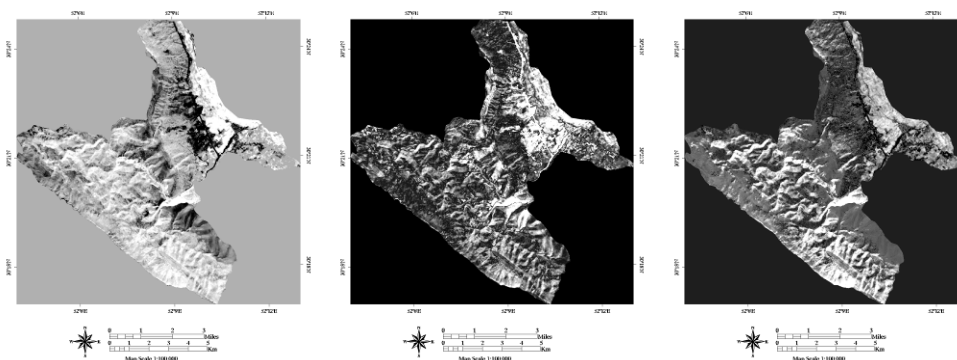
(Spectral Feature Fitting)SFF

روش برازش مشخصه طیفی یکی از روش‌های پردازشی طیف مینا در پردازش داده‌های طیفی است که به بررسی انطباق محدوده‌های جذبی طیف پیکسل‌های ناشناس با طیف مرجع می‌پردازد. مهم‌ترین ویژگی در یک نمودار طیفی که به عنوان یک سیمای شاخص در شناسایی مواد مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد شدت، شکل و محل قرارگیری پیک‌های جذبی در نمودار الگوی طیفی ماده مورد نظر است. روش برازش مشخصه طیفی از روش‌های آنالیز محدوده‌های جذبی در الگوریتم‌های پردازش

¹ Perry

تصویر به حساب می‌آید (عباس‌زاده و هزارخانی، ۲۰۱۳: ۱۹۵۹). پیک‌های جذبی طول‌موج‌هایی از طیف الکترومغناطیسی را نشان می‌دهند که در آن‌ها جسم دارای حداقل بازتاب انرژی تابشی است و قسمت اعظم انرژی تابشی در طیف طول‌موجی مذکور توسط سطح جسم جذب می‌شود. عامل اصلی جذب در کانی‌ها وجود کاتیون‌ها، آنیون‌ها، ناخالصی‌ها و عناصر کمیاب و تأثیر میدان بلوری کانی است. این روش بر اساس انطباق شکل طیف مجهول با طیف مرجع در محدوده کامل یا محدوده‌های کوچک‌تری از طول‌موج بنا نهاده شده و درجه شباهت بین دو طیف را اندازه‌گیری می‌کند. در واقع، برآزش مشخصه طیفی یک روش مبتنی بر شدت جذب مشخصه‌های اصلی است که با انطباق طیف تصویر با طیف مرجع، مواد مختلف را شناسایی می‌کند. طیف مرجع، از عضوهای انتهایی مشتق شده از تصویر و یا کتابخانه طیفی استخراج می‌شود. پیکسل‌های روشن در تصویر Scale نشان‌دهنده انطباق آن پیکسل‌ها با مواد مرجع است و پیکسل‌های تیره در تصویر RMS نشان‌دهنده خطای پایین هستند. نتایج مربوط به برآزش مشخصه طیفی در شکل ۶ آورده شده است. قابل‌ذکر است که طیف مرجع در این روش طیف استخراج‌شده از تصویر می‌باشد که از طریق کتابخانه طیفی USGS نمونه‌گیری مجدد شده است (شکل ۷).





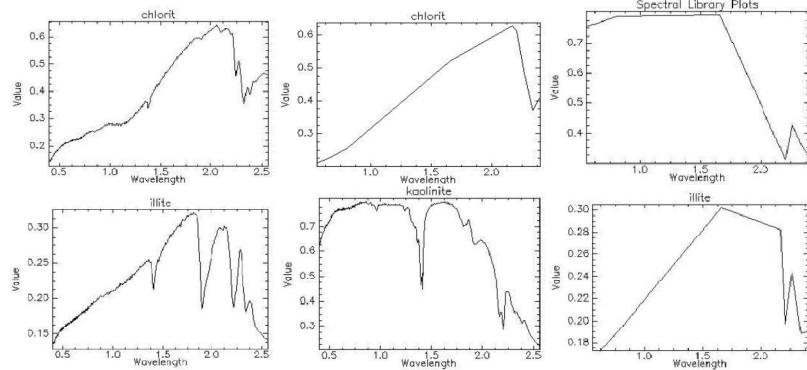
شکل ۶: تصاویر مربوط به RMS و SCALE روش برازش مشخصه طیفی برای کانی‌های کائولینیت، ایلیت، مسکویت، کلسیت، کلریت و دولومیت به منظور مشخص کردن زون‌های آرژلیک، فیلیک و پروپیلیتیک (از راست به چپ بترتیب، الف) کائولینیت، الف) کائولینیت، ب) (RMS) ایلیت، ب) (SCALE) ایلیت، ج) (RMS) مسکویت، ج) (SCALE) مسکویت، د) (RMS) کلسیت، د) (SCALE) کلسیت، ر) (RMS) کلریت، ر) (SCALE) کلریت، ز) (RMS) دولومیت، ز) (SCALE) دولومیت

تحلیل مؤلفه‌های انتخابی^۱ (کروستا)

تحلیل مؤلفه‌های اصلی یک تکنیک مفید آماری برای توصیف داده‌های چند متغیره با ابعاد زیاد است. وقتی تعداد متغیرها (ابعاد داده‌ها) زیاد باشد، به سختی می‌توان نقشه و طرح خاصی را در داده‌ها، تشخیص داد، لذا می‌توان با حداقل اطلاعات، بعد مشاهدات را تا حد زیادی کاهش داد. استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی شیوه‌ای برای کمینه کردن اثر پوشش گیاهی و تکیه بر باندهای طیفی خاص برای بارسازی کانی‌های مناطق دگرسانی است. در واقع یکی از اهداف اصلی آنالیز مؤلفه‌های اصلی، تعیین تعداد ابعاد موجود در داده‌های چند طیفی تصاویر ماهواره‌ای می‌باشد. در آنالیز مؤلفه اصلی تجمع اطلاعات در چند مؤلفه اول بیشتر بوده و مؤلفه‌های بعدی بیشتر شامل نویز^۲ می‌باشند (این مؤلفه‌ها فقط وقتی با تصاویر قوی‌تر ترکیب شوند می‌توانند دارای کاربرد مؤثری باشند). در روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی، اطلاعات چند تصویر در یک تصویر متراکم شده و اختلاف درجات روشنایی به حداکثر می‌رسد؛ تعداد مؤلفه‌های ساخته شده بستگی به تعداد باندهای انتخاب شده دارد و می‌توان پس از اعمال روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی، چند تصویر جداگانه داشت. در انتخاب باندها برای اعمال این تکنیک باید باندهایی را انتخاب کرد که باهم همبستگی کمتری داشته باشند. وجود همبستگی بین باندها نشان‌دهنده وجود داده‌های مشترک یا به عبارت دیگر تکرار داده‌ها است؛ بنابراین درجایی که تلفیق داده‌ها جهت به دست آوردن حداکثر اطلاعات ممکن مدنظر باشد، هر چه میزان همبستگی باندها کمتر باشد ترکیب آن‌ها حاوی اطلاعات بیشتری خواهد بود. از سویی، برای محاسبه همبستگی بین تصاویر باندهای مختلف، ضرایب همبستگی برای دوه‌دو باندهای مختلف محاسبه شده و در غالب یک ماتریس همبستگی معرفی می‌گردد (چاندر، ۲۰۰۲: ۸۹۵).

^۱ Principal Components Analysis

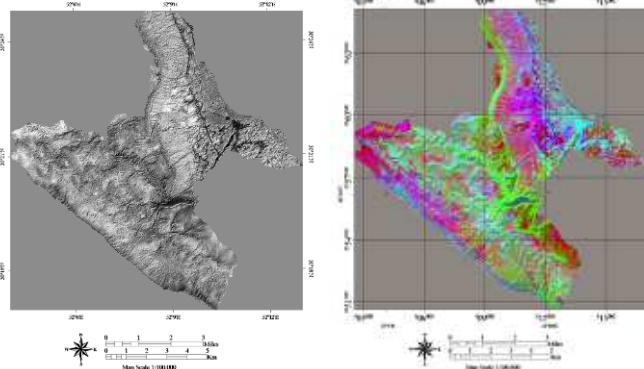
^۲ Noise



شکل ۷. پاسخ طیفی کانی‌ها در باندهای مختلف لندست ۸. قسمت (۱) مربوط به طیف مواد در کتابخانه طیفی USGS و قسمت (۲) مربوط به طیف بازنویسی شده مواد بر اساس بادهای و تصاویر لندست ۸ می‌باشد (الف) (۱). طیف کلریت، الف (۲). طیف بازنویسی کلریت، ب (۱) طیف کائولینیت، ب (۲) طیف بازنویسی کائولینیت، ج (۱) طیف ایلیت، ج (۲) طیف بازنویسی ایلیت) بر اساس نمودار پاسخ طیفی کانی کلریت در طیف الکترومغناطیس و باندهای لندست ۸، مؤلفه پنجم (PC5) به‌عنوان شاخص کلریت انتخاب شد. مطابق با طیف این ماده در باند دو جذب و در باند هفت انعکاس داریم. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت اختلاف شدید و مختلف‌العلامت در بارگزاری مقادیر بردار ویژه، نشانه‌ای از بروز کانی کلریت در مؤلفه اصلی متناظر با آن می‌باشد. باند دو بارگذاری شدید مثبت و باند هفت بارگذاری شدید منفی دارد (جدول ۲) و (شکل ۸).

جدول ۲. مقادیر بردار ویژه برای مؤلفه ۵

بردار ویژه	باند دو	باند هفت
مؤلفه پنجم	+۰/۷۷۱	-۰/۲۷۱



شکل ۸. تصویر مؤلفه پنجم بردار مقادیر ویژه برای کانی کلریت. تصویر ترکیب رنگی مؤلفه‌های پنج، شش و هفت ماتریس مقادیر ویژه (رنگ قرمز و صورتی نشان‌دهنده کانی کلریت هستند).

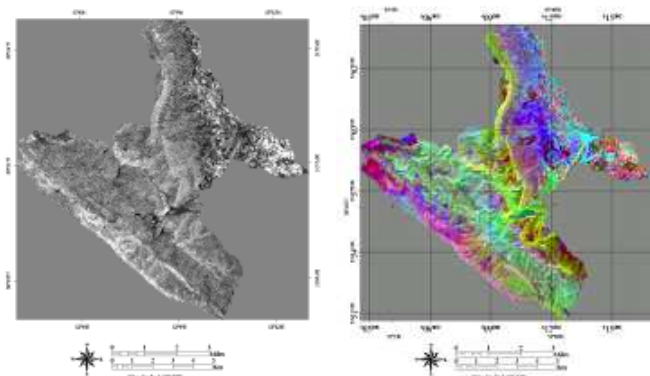
جدول ۳. مقادیر بردار ویژه برای مؤلفه ۶ و ۷

بردار ویژه	باند دو	باند سه	باند شش
مؤلفه ششم	—	۰/۲۱	-۰/۶۹
مؤلفه هفتم	۰/۶۵	—	-۰/۱۵

بر اساس نمودار پاسخ طیفی کانی کائولینیت در طیف الکترومغناطیس و باندهای لندست ۸، مؤلفه نهم (PC9) به‌عنوان شاخص کائولینیت انتخاب شد. مطابق با طیف این ماده در باند پنج انعکاس و در باند هفت جذب داریم. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت اختلاف شدید و مختلف‌العلامت در بارگزاری مقادیر بردار ویژه، نشانه‌ای از بروز کانی کائولینیت در مؤلفه اصلی متناظر با آن می‌باشد. باند پنج بارگذاری شدید منفی و باند هفت بارگذاری شدید مثبت دارد (جدول ۴ و ۵ و شکل ۹).

جدول ۴. مقادیر بردار ویژه برای مؤلفه ۹

بردار ویژه	باند پنج	باند هفت
مؤلفه پنجم	-۰/۱۰۴	۰/۸۰۱



شکل ۹. تصویر مؤلفه نهم بردار مقادیر ویژه برای کانی کائولینیت. تصویر ترکیب رنگی مؤلفه‌های نه، هفت و شش ماتریس مقادیر ویژه (رنگ زرد نشان‌دهنده کانی کائولینیت هست).

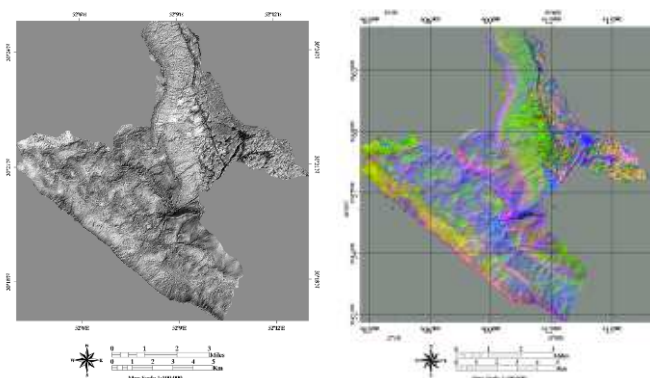
جدول ۵. مقادیر بردار ویژه برای مؤلفه ۶ و ۷

بردار ویژه	باند دو	باند سه	باند شش
مؤلفه ششم	۰/۲۱	—	-۰/۶۹
مؤلفه هفتم	—	۰/۶۵	-۰/۱۵

بر اساس نمودار پاسخ طیفی کانی ایلیت در طیف الکترومغناطیس و باندهای لندست ۸، مؤلفه پنجم (PC5) به‌عنوان شاخص ایلیت انتخاب شد. مطابق با طیف این ماده در باند دو جذب و در باند شش انعکاس داریم. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت اختلاف شدید و مختلف‌العلامت در بارگذاری مقادیر بردار ویژه، نشانه‌ای از بروز کانی ایلیت در مؤلفه اصلی متناظر با آن می‌باشد. باند شش بارگذاری شدید منفی و باند دو بارگذاری شدید مثبت دارد (جدول ۶ و ۷ و شکل ۱۰).

جدول ۶. مقادیر بردار ویژه برای مؤلفه ۹

بردار ویژه	باند دو	باند شش
مؤلفه پنجم	۰/۷۷۱	-۰/۱۵۱



شکل ۱۰. تصویر مؤلفه پنجم بردار مقادیر ویژه برای کانی ایلیت. تصویر ترکیب رنگی مؤلفه‌های پنج، نه و شش ماتریس مقادیر ویژه (رنگ صورتی نشان‌دهنده کانی ایلیت هست).

جدول ۷. مقادیر بردار ویژه برای مؤلفه ۹ و ۶

بردار ویژه	باند دو	باند شش	باند هفت
مؤلفه نهم	—	-۰/۳	۱/۱
مؤلفه ششم	۰/۲۱	-۰/۶۹	—

پس پردازش و اعتبار سنجی نتایج

ارزیابی نتایج طبقه‌بندی یکی از مراحل مهم پس طبقه‌بندی می‌باشد. ارائه نتایج طبقه‌بندی بدون هیچ‌گونه پارامتری که کیفیت و یا صحت این نتایج را بیان کند؛ از ارزش آن می‌کاهد و در بعضی مواقع آن را بدون استفاده می‌کند؛ بنابراین این نکته را باید در نظر داشت همیشه در کنار انجام طبقه‌بندی نتایج آن نیز ارزیابی شده و به کاربر عرضه می‌گردند. متداول‌ترین روش برای ارزیابی کمی دقت طبقه‌بندی انتخاب یک سری پیکسل‌های نمونه معلوم و مقایسه کلاس‌های آن‌ها با نتایج طبقه می‌باشد. این داده‌های معلوم را واقعیت زمینی^۱ یا داده‌های مرجع می‌نامند (فاطمی و رضایی، ۱۳۹۱؛ ۲۳۳) در این مطالعه نقشه واقعیت زمینی بر اساس نمونه‌برداری‌های میدانی و بازدیدهای صحرائی برای زون پروپیلیتی و بر اساس کانی دولومیت انجام گرفت. و در ارزیابی دقت خروجی از این دگرسانی استفاده شد. یکی از روش‌های معمول جهت سنجش دقت طبقه‌بندی انجام شده، استفاده از ماتریس سردرگمی^۲ می‌باشد. اصطلاحاتی مثل Error Matrix و یا Contingency matrix نیز معادل ماتریس سردرگمی می‌باشند. در این ماتریس ستون‌ها نشان‌دهنده واقعیت زمینی و سطرها نشان‌دهنده کلاس‌های نقشه تولید شده هستند. همان‌طور که از نام این ماتریس مشخص است، این معنا از آن قابل برداشت است که این ماتریس برای ما مشخص می‌کند که الگوریتم طبقه‌بندی کننده کدام کلاس‌ها را و به چه میزان با یکدیگر اشتباه گرفته است. عناصر قطر اصلی این ماتریس، نشان‌دهنده میزان تطابق کلاس‌ها با واقعیت زمینی و سایر، عناصر نشان‌دهنده میزان عدم تطابق می‌باشند. در واقع عناصر غیر قطری در هر سطر نشان‌دهنده میزان خطای منظور کردن^۳ کلاس و عناصر غیر قطری در هر ستون نشان‌دهنده میزان خطای حذف^۴ برای هر کلاس می‌باشند. با استفاده از این ماتریس می‌توان دقت کلی^۵ طبقه‌بندی را محاسبه نمود که عبارتند از جمع عناصر موجود در قطر اصلی ماتریس تقسیم بر کل نمونه‌ها. دقت کلی میانگینی از دقت طبقه‌بندی است که نسبت پیکسل‌های صحیح طبقه‌بندی شده به جمع کل پیکسل‌های معلوم را نشان می‌دهد و به صورت زیر محاسبه می‌گردد (ویلا و همکاران^۶، ۲۰۱۱؛ ۴۸۶۹):

رابطه (۱۱):

$$O.A. = \frac{\sum_{i=1}^C E_{ii}}{N}$$

که در آن C تعداد کلاس‌ها، N تعداد کل پیکسل‌های معلوم، E_{ii} اعضا قطری ماتریس خطا و O.A. دقت کلی طبقه‌بندی می‌باشد. دقت کلی یکی از ساده‌ترین پارامترهای دقت است که نیاز به عملیات پیچیده برای محاسبه ندارد. ضریب کاپا دقت طبقه‌بندی را نسبت به یک طبقه‌بندی کاملاً تصادفی محاسبه می‌کند. به این معنی که ضریب کاپا دقت طبقه‌بندی را نسبت به حالتی که یک تصویر کاملاً به صورت تصادفی طبقه‌بندی شود به دست می‌دهد. این کار را می‌توان به این صورت معنی کرد که پس از حذف تأثیر شانس در طبقه‌بندی مقدار تطابق با واقعیت زمینی محاسبه خواهد شد. یکی از معروف‌ترین برآوردهای کاپا استفاده از عناصر ماتریس خطا عبارت است از:

رابطه (۱۲):

^۱ Ground Truth

^۲ Confusion matrix

^۳ Commission

^۴ Omission

^۵ Overall accuracy

^۶ Villa et.al.

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r X_{ii} - \sum_i^r X_{i+} X_{+i}}{N^2 - \sum_i^r X_{i+} X_{+i}}$$

که در آن N تعداد کل پیکسل‌های واقعیت زمینی، X_{i+} مجموع عناصر سطر i ام و X_{+i} مجموع عناصر ستون i ام می‌باشند که به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

رابطه (۱۳):

$$N = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c X_{ij}$$

ضریب کاپا این مزیت را نسبت به دقت کلی دارد که از مقادیر حاشیه‌ای (غیر قطری) ماتریس خطا نیز برای محاسبه دقت استفاده کرده و بنابراین به دقت بهتری می‌رسد (هونگ‌مین و همکاران، ۲۰۱۴؛ ۱۰). معمولاً این گونه عنوان می‌شود که دقت کلی یک برآورد خوش‌بینانه بوده و همیشه دقت را بالاتر از مقدار واقعی محاسبه می‌کند و ضریب کاپا برآوردی بدبینانه بوده و دقت را کمتر از مقدار واقعی بیان می‌کند. دقت تولیدکننده بیانگر دقت طبقه‌بندی پیکسل‌های مربوط به یک کلاس خاص در نقشه واقعیت زمینی می‌باشد. به بیان دیگر این عدد بیانگر احتمال این است که طبقه‌بندی کننده پیکسلی را به یک کلاس خاص نسبت داده باشد، در صورتی که کلاس واقعی آن مشخص باشد؛ اما آنچه برای استفاده‌کنندگان مهم است دقت کاربر است. دقت کاربر بیانگر احتمال طبقه‌بندی یک کلاس خاص مطابق با همان کلاس در نقشه واقعیت زمینی می‌باشد. دقت کاربر معادل نسبت پیکسل‌های صحیح طبقه‌بندی شده به مجموع پیکسل‌های یک کلاس می‌باشد (رابطه ۱۴ و ۱۵)

$$Pa = (ta \div \text{رابطه (۱۴)})$$

$$ga) \times 100$$

$$Ua = (ta \div \text{رابطه (۱۵)})$$

$$ni) \times 100$$

P_a درصد دقت کلاس a برای دقت تولیدکننده، t_a تعداد پیکسل‌های درست طبقه‌بندی شده به عنوان کلاس a ، g_a تعداد پیکسل‌های کلاس a در واقعیت زمینی. U_a درصد دقت کلاس a برای دقت کاربر، n تعداد پیکسل‌های کلاس a در نتیجه طبقه‌بندی. همچنین برای محاسبه خطاهای گماشته شده (commision) و حذف شده (ommission) از روابط ۱۶ و ۱۷ استفاده می‌شود:

رابطه (۱۶):

$$Ce = 1 - Ua$$

رابطه (۱۷):

$$Oe = 1 - Pa$$

همچنین قابل ذکر است که برای محاسبه دقت روش‌های شناسایی و طبقه‌بندی از حضور یا عدم حضور عنصر سیلیسیم (Si) به عنوان فراوان‌ترین عنصر استفاده شد. بدین منظور تعداد ۴۴ نقطه نمونه برداری و با انجام آزمایش ICP-Mass، وجود یا عدم وجود این عنصر مشخص شد. سپس با استفاده از روش‌های پیکسل مینا و زیرپیکسل مینا تصویر لندست، مورد طبقه‌بندی واقع گشت. بر اساس رابطه زیر مقدار RMSE برای هر روش محاسبه و به نوعی میزان خطا در طبقه‌بندی و شناسایی مواد محاسبه شد.

رابطه (۱۸):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_{real,i} - P_{estimated,i})^2}{n}}$$

در این رابطه n تعداد نقاط نمونه برداری شده، P_{real} ، نقاطی از واقعیت زمینی که عنصر مورد نظر وجود دارد و $P_{estimated}$ ، نقاطی از تصویر که روش‌های مذکور آن‌ها را ماده مورد نظر معرفی کرده است (هاشیم و بیرانوند، ۲۰۱۵؛ ۱۶۱). قابل ذکر است که در مرحله آخر و با مشخص شدن بهترین روش شناسایی و طبقه‌بندی، چندین نقطه به طور تصادفی انتخاب و مورد آزمایش XRD واقع شدند. این آزمایش نشان داد که در طیف پراش پرتو ایکس چه موادی در نقاط نمونه برداری حضور دارند و دقت روش مذکور در شناسایی زون‌های دگرسانی چقدر با واقعیت منطبق می‌باشد.

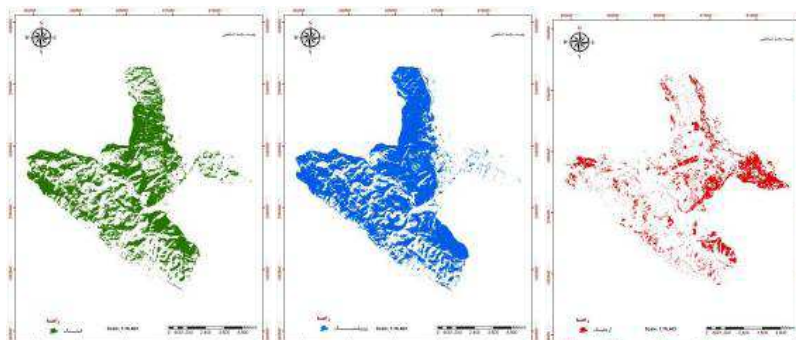
نتایج و بحث

نتایج روش‌های اعمال شده بر روی داده‌های لندست

در مورد روش‌های شناسایی دگرسانی‌ها در تصویر لندست حد مناسب برای آستانه گذاری مجموع میانگین و $1/5$ تا 2 برابر انحراف معیار انتخاب شدند؛ که البته $1/5$ برابر انحراف از معیار زمانی بکار گرفته شد که واریانس خروجی پایین بود و در صورت بالا بردن مقدار آستانه تا مقدار 2 برابر انحراف معیار اعمال شد. در نهایت برای نقشه دولومیت (در تمامی روش‌های پیکسل و زیرپیکسل مبنا) که واقعیت زمینی آن حاصل شده بود، نیز یک ماتریس سردرگمی به منظور استخراج پارامترهای تعیین دقت و اعتبار سنجی تهیه شد.

نتایج روش‌های پیکسل مبنا

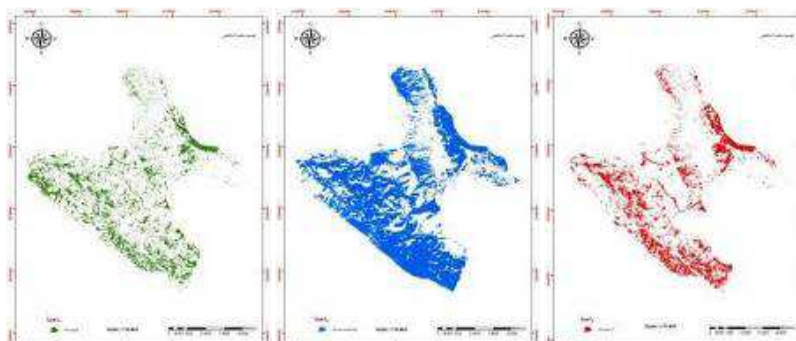
در این روش از کانی‌های ایلیت و مسکویت به عنوان شاخص دگرسانی فیلک، از کانی کائولینیت به عنوان شاخص دگرسانی آرچلیک و از کانی‌های کلریت، کلسیت و دولومیت به عنوان شاخص دگرسانی پروپیلیتیک استفاده شد. شکل ۱۱ زون‌های فیلک، آرچلیک و پروپیلیتیک به این روش را نشان می‌دهد و جدول ۸ نتایج دقت این روش را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱. خروجی روش نقشه بردار زاویه طیفی برای زون‌های فیلک، پروپیلیتیک و آرچلیک
جدول ۸. ماتریس درهمی برای سه کلاس خروجی در روش SAM برای داده‌های لندست

واقعیت زمینی			طبقه بندی نشده	طبقه بندی نشده	کلاس نقشه
کل	دولومیت	طبقه بندی نشده			
۵۷/۱۴	۲۶/۱۷	۷۸/۵۷	طبقه بندی نشده		
۴۲/۸۶	۷۳/۸۳	۲۱/۴۳	دولومیت		
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	کل		
دقت کاربر	دقت تولیدکننده	خطای حذف	خطای لحاظ شدن	دولومیت	
۷۲/۰۶	۷۳/۸۳	۲۶/۱۷	۲۷/۹۴		
مساحت (کیلومتر مربع): ۳۹/۳۶		درصد ضریب کاپا: ۵۹/۹۵		دقت کلی: ۷۱/۰۹	

شکل ۱۲ زون‌های آرچلیک، پروپیلیتیک و فیلک را نشان می‌دهد. جدول ۹ دقت این روش را نشان می‌دهد.

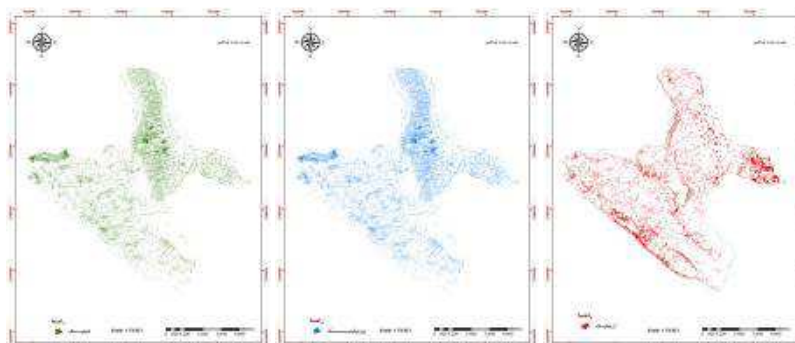


شکل ۱۲. خروجی روش SFF برای زون‌های آرچلیک، پروپیلیتیک و فیلک

جدول ۹. ماتریس درهمی برای سه کلاس خروجی در روش SFM برای داده‌های لندست

واقعیت زمینی				کلاس نقشه
کل	دولومیت	طبقه‌بندی نشده	طبقه‌بندی نشده	
۳۳/۷	۲۱/۷۸	۵۷/۵۸	دولومیت	
۶۶/۳	۸۱/۵۲	۴۲/۴۲	کل	
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰		
دقت کاربر	دقت تولیدکننده	خطای حذف	خطای لحاظ شدن	
۸۳/۹۱	۸۱/۵۲	۱۸/۴۸	۱۶/۰۹	دولومیت
مساحت (کیلومتر مربع): ۳۷/۱۶		درصد ضریب کاپا: ۶۷/۹		دقت کلی: ۸۴/۸

شکل ۱۳. زون‌های فیلیک، پروپیلیتیک و آرچلیک و جدول ۱۰ دقت را نشان می‌دهند.

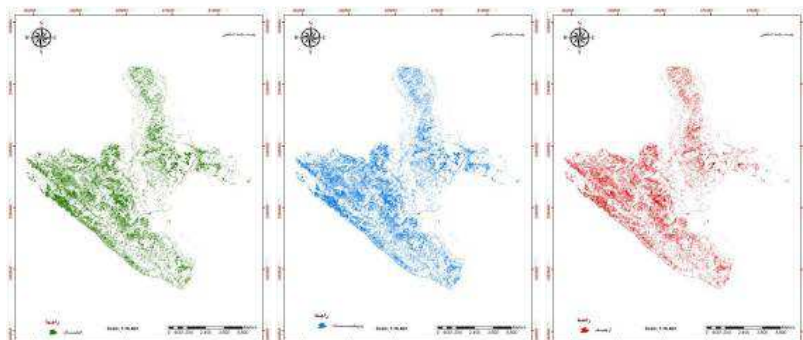


شکل ۱۳. خروجی روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای زون‌های فیلیک، پروپیلیتیک و آرچلیک
جدول ۱۰. ماتریس درهمی برای سه کلاس خروجی در روش PCA برای داده‌های لندست

واقعیت زمینی				کلاس نقشه
کل	دولومیت	طبقه‌بندی نشده	طبقه‌بندی نشده	
۷۲/۷۷	۷۷/۷۲	۸۵/۱۵	دولومیت	
۲۷/۲۳	۲۲/۲۸	۱۴/۸۵	کل	
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰		
دقت کاربر	دقت تولیدکننده	خطای حذف	خطای لحاظ شدن	
۴۴/۵۵	۲۲/۲۸	۷۷/۷۲	۵۵/۴۵	دولومیت
مساحت (کیلومتر مربع): ۱۵/۴		درصد ضریب کاپا: ۲۷/۹		دقت کلی: ۴۴/۴

نتایج روش‌های زیرپیکسل مبنا

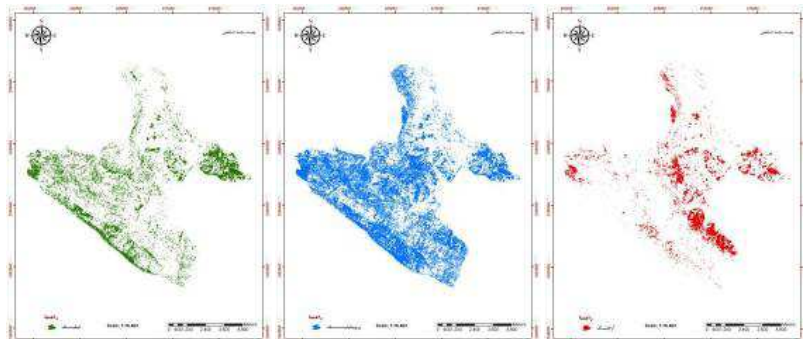
در این روش از کانی‌های ایلیت و مسکویت به‌عنوان شاخص دگرسانی فیلیک، از کانی کائولینیت به‌عنوان شاخص دگرسانی آرچلیک و از کانی‌های کلریت، کلسیت و دولومیت به‌عنوان شاخص دگرسانی پروپیلیتیک استفاده شد. جدول ۷ زیر نحوه آستانه گذاری بروی نتایج حاصل از روش MTMF را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۱۴ زون‌های فیلیک، آرچلیک و پروپیلیتیک به این روش را نشان می‌دهد و جدول ۱۱ نتایج دقت این روش را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴. خروجی روش MTMF برای زون‌های فیلیک، پروپیلیتیک و آرچلیک
جدول ۱۱. ماتریس درهمی برای سه کلاس خروجی در روش MTMF برای داده‌های لندست

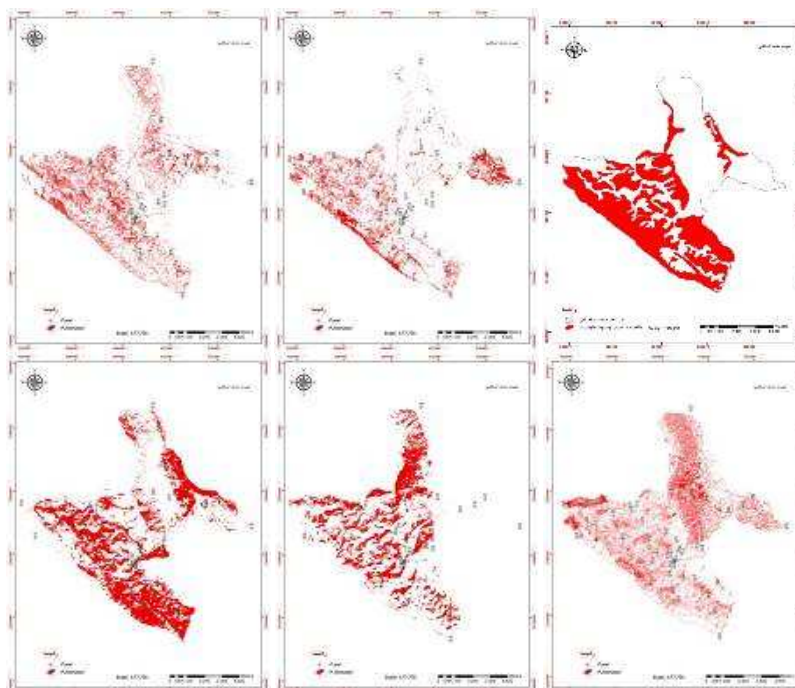
واقعیت زمینی					
کل		دولومیت	طبقه‌بندی نشده	کلاس نقشه	
۴۱/۵۶		۴۸/۱۸	۴۵/۶۸		طبقه‌بندی نشده
۵۸/۴۴		۷۸/۲۲	۵۴/۳۲		دولومیت
۱۰۰		۱۰۰	۱۰۰		کل
دقت کاربر	دقت تولیدکننده	خطای حذف	خطای لحاظ شدن		
۷۴/۷۱	۷۸/۲۲	۲۱/۷۸	۲۵/۲۹	دولومیت	
مساحت (کیلومتر مربع): ۳۳/۰۳		درصد ضریب کاپا: ۶۰/۹۱		دقت کلی: ۷۵/۶	

شکل ۱۵. زون‌های آرچلیک، پروپیلیتیک و فیلیک را نشان می‌دهد. جدول ۱۲ دقت این روش را نشان می‌دهد.



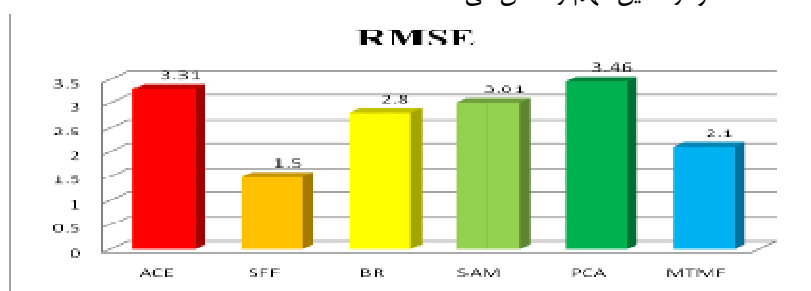
شکل ۱۵. خروجی روش ACE برای زون‌های فیلیک، پروپیلیتیک و آرچلیک
جدول ۱۲. ماتریس درهمی برای سه کلاس خروجی در روش ACE برای داده‌های لندست

واقعیت زمینی					
کل		دولومیت	طبقه‌بندی نشده	کلاس نقشه	
۵۹/۹		۴۳/۹۱	۶۳/۹۷		طبقه‌بندی نشده
۴۰/۱		۵۶/۰۹	۳۶/۰۳		دولومیت
۱۰۰		۱۰۰	۱۰۰		کل
دقت کاربر	دقت تولیدکننده	خطای حذف	خطای لحاظ شدن		
۷۰/۲	۵۶/۰۹	۴۳/۹۱	۲۹/۸	دولومیت	
مساحت (کیلومتر مربع): ۱۹/۴۶		درصد ضریب کاپا: ۵۶/۴۵		دقت کلی: ۷۲/۹۵	



شکل ۱۶. نقشه واقعیت زمینی دولومیت (شکل اول از بالا سمت راست) و نقاط نمونه برداری تصادفی (تعیین عنصر با آزمایش ICP) و نتایج خروجی روش‌های SFF، SAM، PCA، MTMF، ACE

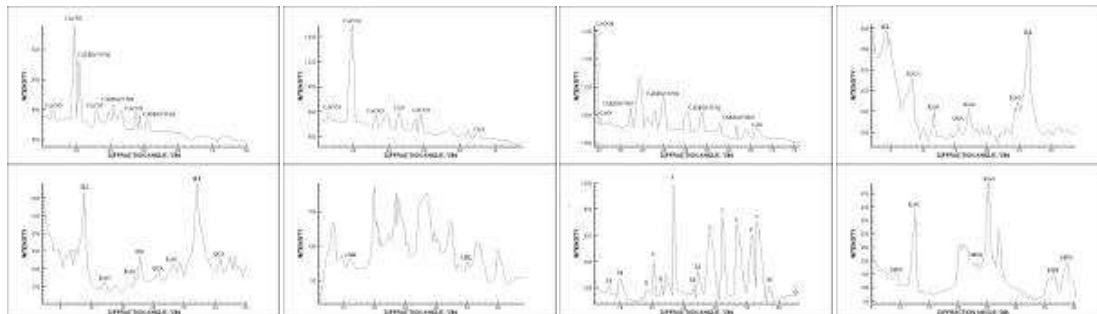
همان گونه که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود. با انجام آزمایش ICP-MASS حضور عنصر Si در نقاط مختلف بررسی شد و سپس با توجه به اینکه این عنصر به عنوان فراوان ترین عنصر در پوسته سطح زمین مطرح می‌باشد اقدام به استخراج نقشه این ماده با روش‌های مذکور گردید. در آخر با توجه به تطابق حضور این عنصر بروی زمین و نقشه‌های خروجی از هر روش میزان RMSE محاسبه گشت که نمودار ۱ این مهم را نشان می‌دهد.



نمودار ۱. مقدار RMSE روش‌های پیکسل و زیرپیکسل مبنا در دقت خروجی‌ها

با استفاده از ماتریس سردرگمی و مشتقات آن نمودارهایی تهیه شده است که در ادامه مشاهده می‌گردد. در میان روش‌های مختلف SFF کمترین خطا و ACE بیشترین خطا را دارد. در این میان به نظر می‌رسد، پیکسل‌های مربوط به بسیاری از روش‌ها به درستی شناسایی شده و خطای مربوط به آن‌ها نسبتاً مناسب هست. برای مثال دولومیت در روش SFF با کمترین میزان خطای حذف و خطای لحاظ شدن پایین از بقیه کلاس‌ها کمتر حذف شده و همین امر سبب شده تا بتواند دقت مناسبی را به خود اختصاص دهد. همان گونه که دقت تولیدکننده نشان می‌دهد، که در واقع نسبت تعداد پیکسل‌های شناسایی شده صحیح به مقادیر واقعی پیکسل‌های کلاس در زمین است، روش SFF بهترین دقت را داشته است. در مورد کلاس طبقه‌بندی نشده که بیشترین دقت تولیدکننده را داراست، نمی‌توان قضاوت درستی نمود چراکه نسبت بالایی از پیکسل‌ها به این کلاس تعلق پیدا کرده‌اند که این خود می‌تواند در تحلیل نتایج خلل ایجاد کند. دقت کاربر معادل نسبت پیکسل‌های صحیح طبقه‌بندی شده به مجموع پیکسل‌های یک کلاس می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌شود SFF بالاترین میزان دقت کاربر را دارد. با قبول اینکه ضریب کاپا معیار مناسبی جهت قضاوت در مورد روش‌های شناسایی طیفی می‌باشد، چنین نتیجه‌گیری می‌شود که روش‌های پیشرفته طیف‌سنجی

همچون SFF و MTMF بالاترین مقادیر شاخص، بهترین روش‌ها در میان روش‌های بکار برده شده جهت شناسایی طیفی کانی‌های دگرسانی می‌باشد.



شکل ۱۷. نتایج آنالیزهای ژئوشیمیایی نمونه‌های تصادفی از مناطق دگرسانی (به ترتیب از بالا به پایین و از راست به چپ: دولومیت (۳ تصویر اول)، کائولینیت و ایلیت (تصویر ۴ و ۵)، کلریت (تصویر ۶)، کلسیت (تصویر ۷)، مسکویت (تصویر ۸)

نتیجه‌گیری

توانایی تشخیص سنگ‌های دگرسانی از غیر دگرسانی در تحقیقات زمین‌شناسی الزامی می‌باشد. بدین منظور موادی همچون مسکویت با داشتن ALOH در ۲/۲ میکرومتر تا ۲/۳۵ میکرومتر از طیف الکترومغناطیس جذب شدید دارد. به‌عنوان مثال کائولینیت به‌عنوان معرف منطقه آرژلیک در ۲/۱۶۵ میکرومتر تا ۲/۲ میکرومتر جذب شدید دارد و یا کانی کاریت به‌عنوان نماینده دگرسانی پروپیلیتیک با عناصر CO_3 ، $MgOH$ و Fe از ۲/۳۱ تا ۲/۳۳ میکرومتر از طیف الکترومغناطیس جذب شدید دارند. رس‌ها و کربنات‌ها در باند ۷ لندست ۸ (از ۲/۱ تا ۲/۴ میکرومتر) جذب و در باند ۶ لندست ۸ بازتاب دارند (از ۱/۵۵ تا ۱/۷۵ میکرومتر) واتنیت و ماتسوه (۲۰۰۳). سیلیکات‌ها در ۸/۵ تا ۹/۳ و ۱۰/۵ تا ۱۱/۷ میکرومتر خود را نشان می‌دهند. باند ۷ لندست به خاطر وجود حساسیت روی موادی همچون Fe ، ALO ، $MgOH$ ، $Soil$ ، Co_3 انتخاب می‌شود. در این زمینه بیرانوندپور و هاشیم (۲۰۱۵) با استفاده از روش نسبت‌گیری باندهای MTMF داده‌های سنجنده لندست ۸ در شناسایی دگرسانی هیدروترمالی معادن مس سرچشمه نشان دادند که داده‌های سنجنده OLI لندست ۸ و نیز باندهای حرارتی آن برای شناسایی دگرسانی مس پورفیری و نیز دیگر اهداف زمین‌شناسی مفید می‌باشد. آن‌ها اعلام کردند که باندهای ۲، ۴، ۶، ۷ و ۱۰ این سنجنده اطلاعات بسیار مفیدی برای شناسایی مناطق دگرسانی پورفیری دارند. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که همیشه نمی‌توان گفت روش‌های زیر پیکسل مینا دقت بیشتری در شناسایی کانی‌ها نسبت به روش‌های پیکسل مینا دارند. این موضوع از سنجنده به سنجنده و از منطقه به منطقه و هدف مطالعه تغییر می‌کند. تنگستانی و عزیز (۱۳۸۹) با استفاده از روش‌های زیرپیکسل مینا همچون MTMF و LSU و با استفاده از شاخص خلوص پیکسل به آشکارسازی کسر فراوانی و توزیع مکانی کانی‌های رسی پرداختند. بعد از انتخاب عضوهای انتهایی و بررسی روش‌ها دریافتند که روش MTMF پراکندگی و غنی‌شدگی دو کانی کائولینیت و پیروپیلیت را نسبت به روش LSU بهتر ارائه می‌دهد. مهرمنش (۱۳۸۹) با استفاده از تصاویر Hyperion پس از بررسی چندین شاخص در هر دگرسانی و استفاده از روش‌های مختلف روش SAM را با دقت پایین‌تری نسبت به روش نسبت‌گیری باندهای معرفی نمود، درحالی‌که در تحقیق حاضر دقت روش SAM نسبت به روش نسبت‌گیری باندهای بیشتر است. این موضوع بسته به تنوع باندها و تفکیک جزئی طول‌موج آن‌ها از سنجنده‌ای به سنجنده دیگر متفاوت هست. مثلاً در سنجنده استر به دلیل باندهای طیفی بیشتر و تداخل طیفی کمتر نسبت به سنجنده لندست دقت روش SAM نسبت به روش نسبت‌گیری باندهای کمتر خواهد بود. رفاهی (۱۳۹۱) با استفاده از داده‌های سنجنده ی استر در محدوده‌ی نقشه‌ی ۱:۲۵۰۰۰ اوغلاونسر با استفاده از تکنیک‌های مختلف سنجش‌ازدوری نقشه‌بردار زاویه طیفی، کسر کمترین نوفه و روش‌های دیگر اقدام به شناسایی و تفکیک دگرسانی‌ها نموده و در نهایت با اعتبارسنجی صحرائی دقت ۹۰ درصدی برای نقشه‌های تهیه‌شده را مورد تأیید قرار می‌دهد. کریمی بارونقی (۱۳۹۱) با بررسی روش‌های مختلف پیکسل مینا و زیر پیکسل مینا، با استفاده از داده‌های استر و Hyperion، پس از اعتبارسنجی نتایج، نشان داد روش MTMF و ACE با بالاترین ضریب کاپا، بهترین روش در شناسایی دگرسانی‌های گرمایی می‌باشد.

منابع

- اکبری، د.، همایونی، س.، سعادت سرشت، م.؛ . ۱۳۹۰. بهبود صحت آشکارسازی طیفی بام ساختمان‌ها از طریق تلفیق هوشمند روش‌های تشخیص هدف در تصاویر فرا طیفی، نشریه‌ی سنجش‌ازدور و GIS ایران، سال سوم، شماره‌ی دوم، صص ۹۷-۱۱۴.
- بلواسی، م.، اصغری، ص.، زینالی، ب.، صاحبی وایقان، س.، ۱۳۹۴، اکتشاف نواحی دارای مس در منطقه قزل‌دش شهرستان خوی با استفاده از تصاویر هایپریون، مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۴۷، شماره ۲، صص ۲۸۷-۳۰۲.
- بهرام‌بیگی، ب.، رنجبر، ج.ا.، شهاب‌پور، ج.، ۱۳۹۱. مقایسه روش‌های داده پایه و طیف مینا جهت نقشه‌برداری از مناطق دارای کائولینیت در آتشفشان مساحیم با استفاده از داده‌های هایپریون. مجله زمین‌شناسی اقتصادی ۴ شماره ۲.
- بینقی، م.، علی‌آبادی، ک.، امیراحمدی، ا.ب.، ۱۳۹۳، شناسایی اهداف محیزی با استفاده از روش *MTMF* و *MNF* (مطالعه موردی: جنوب غربی سبزوار)، مجله ژئومورفولوژی کاربردی ایران، سال دوم، شماره سوم، صفحات ۳۲-۴۶.
- رفاهی، داوود. ۱۳۹۱. بررسی زمین‌شناسی اقتصادی و شناسایی زون‌های دگرسانی در منطقه شمال سراب (برگه ۱:۲۵۰۰۰ اوغلان سر) با تاکید ویژه بر استفاده از داده‌های ماهواره استر، تهران: پایان‌نامه کارشناسی ارشد؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات.
- معصومی، ف. ا.، رنجبر، ح. ا.، ۱۳۹۰، مقایسه بین داده‌های ژئوفیزیک هوایی و تصاویر حسگر استر در نقشه‌برداری از مناطق دگرسانی گرمایی به منظور اکتشاف کانی سازی مس در منطقه بافت کرمان". مجله فیزیک زمین و فضا: ۱۸.
- مهرمنش، امین ۱۳۸۹. پتانسیل‌یابی معدنی با بهره‌گیری از سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی". پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی.
- کریم پور، محمدحسن، ملک‌زاده، آزاده. حیدریان، محمدرضا. ۱۳۸۴، اکتشاف ذخایر معدنی مدل‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمی، ماهواره‌ای و ژئوفیزیکی، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، شماره ۴۵۳.
- کریمی بارونقی، حسن ۱۳۹۱. ارزیابی تکنیک‌های تحلیل طیفی داده‌های سنجش‌ازدور، در تعیین دگرسانی‌ها و اهداف آینده برای منابع کانی‌های فلزی. دانشکده علوم انسانی. گروه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی دانشگاه تربیت مدرس. کارشناسی ارشد.
- نوحه‌گر، ا.، بداعی، م.، کاظمی، م.، کمالی، ع.ر.، ۱۳۹۲، مقایسه روش‌های پیکسل مینا و زیرپیکسل مینا در شناسایی و استخراج زون‌های دگرسانی با استفاده از داده‌های *ASTER*، مجله پژوهش‌های دانش زمین، سال چهارم، شماره ۱۶، صفحات ۱-۱۳.
- هاشمی تنگستانی، مجید. عزیزی، مسلم ۱۳۸۹. آشکارسازی کسر فراوانی و توزیع مکانی کانی‌های رسی با استفاده از رده بندی زیرپیکسلی داده‌های استر. مطالعه موردی معدن استقلال آباد. "مجله زمین‌شناسی اقتصادی دانشگاه فردوسی مشهد. شماره ۱. جلد ۲ صفحه ۳۹-۴۹.
- Abbaszadeh, M., Hezarkhani, A., 2013, Enhancement of hydrothermal alteration zones using the spectral feature fitting method in Rabor area, Kerman, Iran, Arabian journal of Geosciences, volume 6, issue 6, pp 1957-1964.
- Azizi, H., Tarverdi, M. A. & Akbarpour, A., 2010- Extraction of hydrothermal alterations from ASTER SWIR data from east Zanjan, northern Iran. Advances in Space Research, 46: 99-109.
- Alavi-panah, S.K. 2012. Application of Remote Sensing in the Earth Sciences (soil). 4th Edition. Tehran: University of Tehran Press. (In Persian).
- Beiranvand-Pour, A. and Hashim, M. 2011. "The Earth Observing-1 (EO-1) Satellite Data for Geological Mapping, Southeastern Segment of the Central Iranian Volcanic Belt". Iran. International Journal of the Physical Sciences. Vol. 6. No. 33. pp. 7638 - 7650
- Broadwater, J.B., 2007, PHYSICS-BASED DETECTION OF SUBPIXEL TARGETS IN HYPERSPECTRAL IMAGERY, Dissertation submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, 161 pp.
- Ghulam, A., Amer, R., 2010, Mineral Exploration Zone Mapping in Estern Desert of Egypt Using ASTER Data, ASPRS Annual Conference, San Diego, PP.26-30.
- Fatemi. S.B. and Rezaei.Y. 2010. Principles of Remote Sensing. Tehran: Azadeh publication. (In Persian).

- Kurse, F.A., Boardman, J.W. and Huntington, J.F. 2003. "Comparison of Airborne Hyperspectral Data and EO-1 Hyperion for Mineral Mapping". *IEEE transactions on Geoscience and remote sensing*, No. 41. pp. 1388-1400.
- Perry, D. 2000. "Visual And Near-Infrared Imagery Using NVIS". M.S thesis. NAVAL postgraduate school. California. USA.
- ManolakisDimitris, David Marden, and Gary A. Shaw(2003) *Hyperspectral Image Processing for Automatic Target Detection Applications*, Lincoln laboratory Journal, volume 14, number 1 Lincoln Laboratory Journal pp 79-116
- Mather, P.M., 2004, "Computer Processing of Remotely- Sensed Image– An Introduction", London, John Wiley & Sons Inc, Third edition, 350p .
- Meer, V.D., Freek, D. and De Jong, S.M. 2001. *Imagins Spectrometry: basic principle and prospective applications*. Academic press. Springer Netherlands.
- Moore, F., Rastmanesh, F., Asadi, H. and Modabberi, S., 2008- Mapping mineralogical alteration using principal-component analysis and matched filter processing in the Takab area, north-west Iran, from ASTER data, *International Journal of Remote Sensing*, 29: 2851–2867.
- Mund t , J . T . , Streutker , D . R . , and Glenn , N . F . , 2007 . Par t ia l unmix ing of hyperspec tra l imagery: Theory and methods . *Proceed ings of the American Soc iety of Pho togramme try and Remo te Sens ing* .
- Prihantarto, W.A., Nugroho, Y.A., Wicaksono, P., Barianto, B.H. 2012, *Soil Prime Minerals Mapping Using Linear Spectral Unmixing Technique in Multispectral Imagery Data*, Japan Geosciences Union Meeting. May 2025, Makuhari, Chiba, Japan, p.1
- Sabins, F. F. 1999. "Remote sensing for mineral exploration." *Ore Geology Reviews*: 158-173.
- Vincent, R.K. 1997. *Fundamentals of Geological and Environmental Remote Sensing*. Prentice Hall.
- Villa, A., Benediktsson, J.A., Chanussot, J. and Jutten, J. 2011. "Hyperspectral Image Classification With Independent Component Discriminant Analysis". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 49. No. 12. pp. 4865-4876.
- Xiaojia, B., MIAO Fang, WU Bin, LI Jiaguang, and WANG Dong (2010). "Hyperion hyperspectral remote sensing application in altered mineral mapping in east Kunlun of the Qinghai-Tibet plateau." *International Conference on Challenges in Environmental Science and Computer Engineering Chengdu, China*, 2010. 519-523
- Watanabe, K. Matsuo, Rock type classification by multi-band TIR of ASTER, *Geosci. J.* 7. 2003. 347–358.
- Wenkai, L. and Qinghua, G. 2014. "A New Accuracy Assessment Method for One- Class Remote Sensing Classification". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 52. No. 8. pp. 1- 13.