



سنگه از دور

و

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS
سال دوم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۸۹
Vol.2, No.4, Winter 2011
۱۰۱-۱۱۸

ارزیابی رده‌بندی‌های پیکسلی و زیرپیکسلی داده‌های استر در آشکارسازی توزیع مکانی کانی‌های رسی (مطالعه موردی: معدن استقلال آباده)

مجید هاشمی تنگستانی*^۱، مسلم عزیزی^۲

۱. دانشیار بخش علوم زمین و مرکز دورسنجی و GIS، دانشگاه شیراز
۲. کارشناس ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه شیراز

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۰/۶/۱۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۶/۲۸

چکیده

معدن خاک نسوز استقلال آباده در زون زمین‌شناختی ایران مرکزی و در ۱۰ کیلومتری شمال‌شرق شهر آباده در شمال استان فارس واقع شده و با تولیدی در حدود یک میلیون تن کائولینیت و پیروفیلیت در سال، یکی از بزرگ‌ترین کانسارهای رسوبی در ایران قلمداد می‌شود. مدل زیرپیکسلی پالایش تطبیقی تنظیم‌شده آمیخته و الگوریتم رده‌بندی‌کننده تمام‌پیکسلی نقشه‌بردار زاویه طیفی با هدف آشکارسازی توزیع مکانی کانی‌های رسی موجود در این معدن بر روی دسته داده‌های مرئی - فرورسرخ نزدیک و فرورسرخ موج کوتاه (NVIR+SWIR) سنجنده استر با استفاده از طیف‌های تصویر و کتابخانه طیفی USGS اجرا شد. روش‌های مخروط محدب بیشترین زاویه متوالی و شاخص خلوص پیکسل برای انتخاب عضوهای خالص از این دسته داده‌ها به کار گرفته شدند. مقایسه نتایج رده‌بندی‌های پیکسلی و زیرپیکسلی بر پایه نتایج XRD نمونه‌های گردآوری‌شده از محدوده مورد مطالعه که منطبق بر خروجی‌های الگوریتم‌ها هستند، و همچنین نتایج آزمایش طیف‌سنجی و شواهد و کنترل‌های میدانی پیکسل‌های متناظر زمین نشان داد که روش پالایش تطبیقی تنظیم‌شده آمیخته، در مقایسه با الگوریتم نقشه‌بردار زاویه طیفی، قابلیت بهتری در تعیین توزیع مکانی کانی‌های رسی در ناحیه مورد مطالعه دارد. ارزیابی فراوانی زیرپیکسلی داده استر نشان داد که پیکسل‌هایی با فراوانی نسبی بیش از ۵۰ درصد از دو کانی کائولینیت و پیروفیلیت در دو محدوده زمین‌ریخت‌شناختی متفاوت تمرکز و رخنمون پیدا کرده‌اند.

کلیدواژه‌ها: رده‌بندی پیکسلی، رده‌بندی زیرپیکسلی، استر، پالایش تطبیقی تنظیم‌شده آمیخته، نقشه‌بردار زاویه طیفی.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: شیراز، چهارراه ادبیات، دانشگاه شیراز، دانشکده علوم پایه، بخش علوم زمین. تلفن: ۰۷۱۱۶۱۳۷۲۲۲

۱- مقدمه

گرفته‌اند. مقادیر بالای کانی پیروفیلیت نسبت به کائولینیت مرغوبیت ماده اولیه خاک‌نسوز را برای استفاده در صنایع مختلف بالا می‌برد و تعیین تقریبی پراکندگی این کانی‌ها در محیط‌های معدنی خاک‌نسوز، باعث تسهیل در امر اکتشاف، بالا بردن کارایی برنامه‌های اکتشافی دقیق‌تر (مانند عملیات گمانه‌زنی) و هدفمند کردن عملیات بهره‌برداری خواهد شد.

هدف از این مطالعه بارزسازی و نقشه‌برداری پیکسلی و زیرپیکسلی کانی‌های رسی (کائولینیت، پیروفیلیت) معدن خاک‌نسوز استقلال است که به منظور مقایسه طیف‌های صحرایی با طیف‌های استخراجی از کتابخانه‌های طیفی موجود از طیف تصویر داده‌های سنجنده استر و طیف استاندارد کتابخانه‌ای حاصل از کتابخانه طیفی سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) استفاده شد. پژوهش حاضر بر تحلیل توزیع مکانی کانی‌های اصلی محدوده معدنی و مقایسه قابلیت‌های فنی دو مدل SAM و MTMF (به عنوان دو رده‌بندی‌کننده پیکسلی و زیرپیکسلی) تمرکز یافته است. نتایج به‌وسیله مشاهدات میدانی، تجزیه‌های کانی‌شناختی^۴ XRD و تفسیرهای طیف‌سنجی حاصل از نمونه‌های میدانی متناظر با پیکسل‌های خروجی ارزیابی شدند. در ادامه، به برخی از پژوهشگرانی که پیش از این، الگوریتم‌های تمام‌پیکسلی و زیرپیکسلی را مورد استفاده قرار داده‌اند، اشاره می‌شود. گالواو و همکاران در سال ۲۰۰۴ با استفاده از داده SWIR سنجنده استر و طی اجرای روش نقشه‌برداری زاویه طیفی^۵، کانی‌های رسی موجود در دگرسانی‌های گرمایی را مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند (Galvao et al., 2004). تنگستانی و همکاران با استفاده از داده ۶

یکی از رهیافت‌های اصلی سنجش از دور زمین‌شناختی، تلاش برای بهبود روش‌های نقشه‌برداری انواع کانی‌ها و سنگ‌هاست. از آنجا که کانی‌های رسی و دگرسانی اهمیت اقتصادی مستقیم و غیرمستقیم دارند و سیمای طیفی مشخص در واقع کلیدی برای شناسایی آنها از راه فناوری سنجش از دور به شمار می‌آیند، زمین‌شناسان در تحقیقات پیشین نیز بیشتر به بررسی این کانی‌ها پرداخته‌اند.

سنجنده استر^۱ همراه با چهار سنجنده دیگر سوار بر ماهواره ترا، از سال ۱۹۹۹ به فضا پرتاب شده و داده‌های آن از سال ۲۰۰۰ در اختیار کاربران قرار گرفته است. از آنجا که سنجنده مذکور توان تفکیک مکانی، طیفی و انرژی نسبتاً بالایی دارد از همان ابتدا به طور گسترده مورد استفاده زمین‌شناسان قرار گرفته است. رفتار طیفی گروه‌های مهم کانی‌ها، به‌ویژه کانی‌های دگرسانی در زیرسیستم‌های مرئی - فروسرخ نزدیک (VNIR) استر با سه باند طیفی در محدوده ۰/۵۲ تا ۰/۸۶ میکرومتر، زیرسیستم فروسرخ موج کوتاه (SWIR) با شش باند طیفی در محدوده ۱/۶۰ تا ۲/۴۳ میکرومتر و زیرسیستم فروسرخ گرمایی (TIR) آن با پنج باند طیفی در محدوده ۸/۱۲۵ تا ۱۱/۶۵ میکرومتر (Yamaguchi et al., 1998) به استفاده وسیع این دسته داده‌ها در شناسایی و اکتشاف منابع معدنی منجر شده است. این سیستم‌ها به ترتیب دارای توان تفکیک مکانی ۱۵، ۳۰ و ۹۰ متر است. تصویرهای سطح تصحیحات^۲ L1A که داده‌های خام سنجنده استر هستند، پس از تصحیحات رادیومتریکی و هندسی به سطح تصحیحات^۳ LIB تبدیل می‌شوند و برای کاربری‌های مختلف مهیا می‌گردند.

با توجه به قابلیت داده‌های استر در بارزسازی و ارزیابی فراوانی کانی‌های رسی (Qiu et al., 2006) و گسترش کانی‌های کائولینیت و پیروفیلیت در محدوده معدنی استقلال و اهمیت آنها به عنوان ماده استخراجی اصلی، در پژوهش حاضر، این دو کانی مورد بررسی قرار

1. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)
2. Level-1A
3. Level-1B
4. X-ray Diffraction
5. Spectral Angle Mapper (SAM)

کانی‌ها) ممکن است به صورت آمیختگی‌های همگن یافت شوند که خود می‌تواند تشخیص آنها را با ابهام مواجه سازد (Van der Meer, 1999). پیکسل‌های آمیخته را براساس مدل‌های سنجنده، شیئی و جوی نیز بیان می‌کنند (Abkar, 1999).

در سنجنش از دور برای تعیین یک پدیده و یا بیش از آن، در هر پیکسل از تصاویر چندطیفی یا ابرطیفی، و روش‌های تحلیلی تمام‌پیکسلی و زیرپیکسلی استفاده می‌شود (شکل ۱). این رده‌بندی‌ها به طور معمول به‌وسیله مقایسه طیف پیکسل‌های تصویر با طیف عضوهای خالص اجرا می‌شود. روش‌های زیرپیکسلی به عنوان رده‌بندی نرم^۲ و روش‌های تمام‌پیکسلی به عنوان رده‌بندی سخت^۳ در نظر گرفته می‌شوند. در رده‌بندی سخت به ازای هر پیکسل تصویر، فقط یک رده طیفی - زمینی یا یک پوشش زمینی ارائه می‌شود (Foody, 2004). یکی از روش‌های پردازش تمام پیکسلی برای داده‌های چندطیفی، نقشه‌برداری زاویه طیفی (Kruse et al., 1993) است.

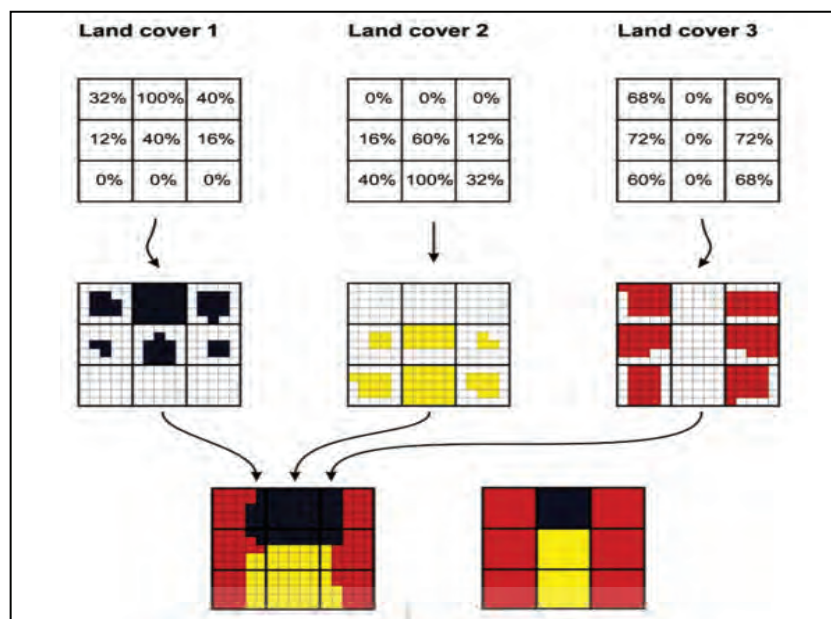
با وجود اینکه پیکسل‌های تشکیل‌دهنده ماتریس تصویر از نوع آمیخته‌اند، اما هنوز یک پیکسل را به صورت یک رده از پوشش زمینی در پردازش‌های آماری مطرح می‌کنند (Van Der Meer, 1995). مشکل پیکسل‌های آمیخته را می‌توان از طریق رده‌بندی‌کننده نرم (زیرپیکسلی) برطرف کرد. پردازش زیرپیکسلی قابلیت آشکار کردن و رده‌بندی اهداف کوچک‌تر از اندازه یک پیکسل از تصویر را دارد. مدل آمیختگی طیفی خطی^۴ از مدل‌های رده‌بندی زیرپیکسلی برای درک بهتر ارتباط بین تابش مشاهده‌شده و بازتاب سطحی است (Roberts, 1991; Sohn and McCoy, 2001; Zhu and Eastman, 1997).

باندی SWIR سنجنده استر و با اجرای الگوریتم SAM به ارزیابی طیف بازتابندگی کانی‌های رسی و شاخص مناطق دگرسانی پروپلیتیک، فلیک و آرزیلیک برای نقشه‌برداری مناطق دگرسانی اطراف ذخایر مس پورفیری ناحیه میدوک پرداختند (Tangestani et al., 2008). در نخستین بررسی‌های مدل زیرپیکسلی، آدامز و همکاران این مدل را برای شناسایی و جداسازی تنوع طیفی ناشی از آمیختگی کانی‌های سطحی به کار گرفتند (Adams and Smith, 1986). ریوارد مدل زیرپیکسلی را برای نقشه‌کشی افیولیت ملانژهای شرق مصر بر روی داده TM لندست اجرا کرد (Rivard, 1989). بوردمند و کرووز و همکاران آنها با توجه به میزان صحت رده‌بندی‌های مدل زیرپیکسلی برای داده‌های بسیاری از سنجنده‌ها، به‌کارگیری این مدل را برای بررسی عوارض زمین‌شناختی تأیید کرده‌اند (Boardman, 1998 & Kruse et al., 2003). اسیس و همکاران با اجرای الگوریتم MTMF بر روی داده ETM⁺ لندست و با انتخاب عضوهای انتهایی مناسب و تهیه تصاویر توانستند وضعیت نواحی مستعد و مرتبط با فرسایش خاک را در نواحی گرمسیری مورد بررسی و شناسایی دقیق قرار دهند (Asis et al., 2008).

۲- پیشینه نظری

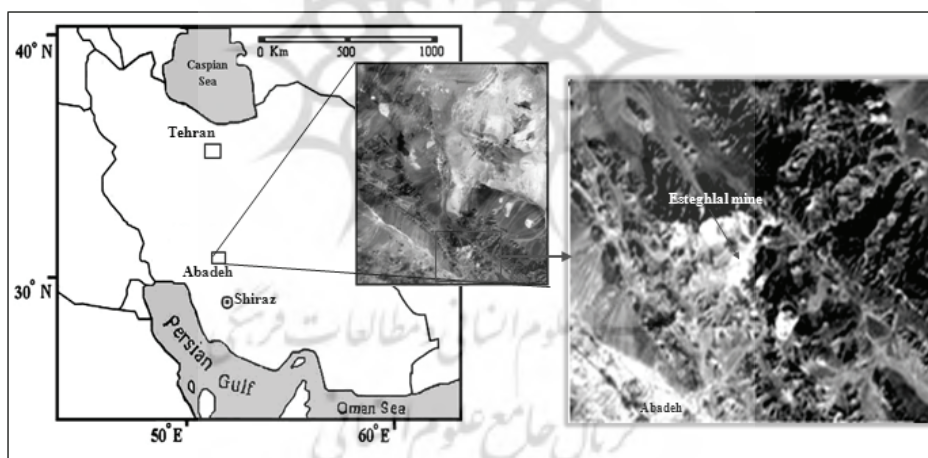
به طور معمول هر پیکسل تصویر چندطیفی از پدیده‌های زمینی می‌تواند حاوی چند نوع پوشش و در نتیجه شامل ترکیبی از چند طیف بازتابندگی باشد. از این رو این پیکسل‌ها (برخلاف پیکسل‌های خالص که دارای طیف بازتابندگی واحد هستند) به عنوان پیکسل‌های آمیخته^۱ شناخته می‌شوند. پیکسل‌های آمیخته به دو دلیل وجود دارند: نخست اینکه توان تفکیک مکانی سنجنده‌های چندطیفی در مقیاس چندین متر است، که در نتیجه آن پوشش مکانی هر پیکسل می‌تواند چند پدیده مختلف را با رفتارهای طیفی متفاوت در بر گیرد، و دوم اینکه صرف‌نظر از توان تفکیک مکانی، پدیده‌های مجزا (مانند

1. Mixed pixels
2. Soft classification
3. Hard classification
4. Linear Spectral Mixture



شکل ۱. مقایسه شماتیکی دو مدل رده‌بندی پیکسلی و زیرپیکسلی نمونه

منبع: Tompkins et al., 1997



شکل ۲. موقعیت محدوده مورد مطالعه

پژوهشگران بسیاری روش پیش گفته را در مطالعات سنجش از دورشان مورد استفاده قرار داده‌اند. (Boardman, 1993)؛ (Settle & Drake, 1993 و Boardman, 1993) مدل آمیختگی طیفی خطی بر این فرضیه استوار است که پاسخ طیفی برای یک پیکسل، ترکیب خطی از چنگال تابشی هر مؤلفه پوشش زمینی موجود در آن پیکسل است (Shimabukuro & Smith, 1991)؛ (Rogge et al., 2006)؛ (Harsanyi & Chang, 1994).

یکی از شیوه‌های مدل آمیختگی خطی، روش پالایش تطبیقی تنظیم‌شده آمیخته^۱ (Boardman, 1993) است که فراوانی عضوهای خالص مرتبط با طیف پیکسل‌های تصویر را با استفاده از رویکرد ناآمیختگی بخشی مورد ارزیابی قرار می‌دهد (Harsanyi & Chang, 1994).

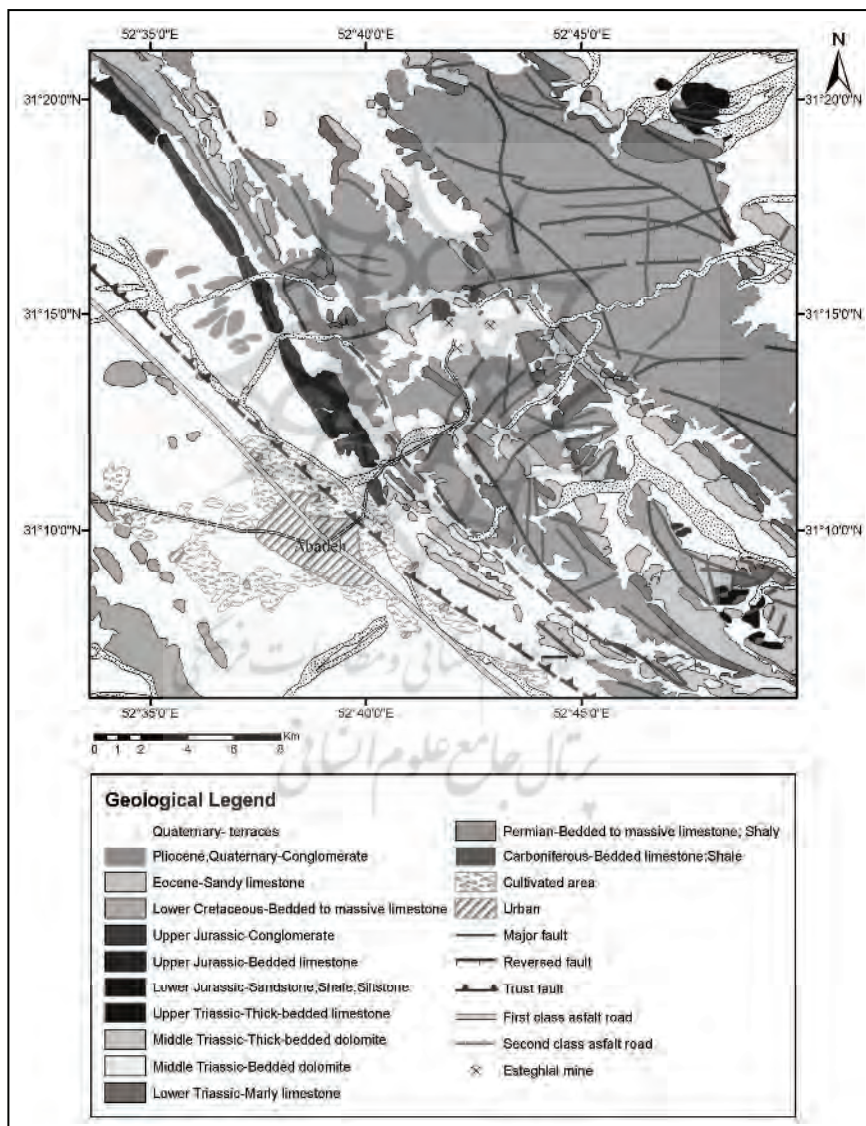
1. Mixture Tuned Matched Filtering (MTMF)

ارزیابی رده‌بندی‌های پیکسلی و زیرپیکسلی داده‌های استر در آشکارسازی توزیع مکانی کانی‌های رسی (مطالعه موردی: معدن استقلال آباده)

۳- زمین‌شناسی

ماسه‌سنگ پالئوزوئیک زیرین پوشیده شده است. رس‌های دونین، ماسه‌سنگ‌های پالئوزوئیک زیرین را می‌پوشانند و در زیر ماسه‌سنگ و آهک کربونیفر قرار دارند. همچنین سنگ‌های پرمین، تریاس و کرتاسه به وضوح در ناحیه آباده به صورت توالی آهک با مارن نازک دیده می‌شوند که به وسیله توالی‌های آهک و مارن ائوسن، الیگوسن و میوسن پوشیده شده‌اند (شکل ۳).

منطقه مطالعاتی (شکل ۲) در شمال آباده (عرض جغرافیایی ۳۱°۶' تا ۳۱°۲۱' و طول جغرافیایی ۵۲°۳۳' تا ۵۲°۵۰') در بین زون سنندج سیرجان و صفحه ایران مرکزی واقع شده است. براساس گزارش گروه تحقیقاتی ایرانی - ژاپنی (Iranian-Japanese Research Group, 1981). ستون چینه‌شناسی ناحیه آباده با سنگ‌های آذرین پرکامبرین شروع می‌شود که از شیل و



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه که براساس نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ آباده تعمیم یافته است

منبع: Kholghi, 2002

است (Etemadi & Al-e-Sadi, 1999; Al-e-Sadi, 1999). کنکرسیون‌های آهنی در میان لایه‌های مواد معدنی وجود دارند. در محدوده این کانسار سنگ‌های دونین، کربونifer زیرین، پرمین، تریاس و نهشته‌های کواترن گسترش دارند. بر روی ماسه‌سنگ، شیل و رس‌های دونین، سنگ آهک و ماسه‌سنگ کربونifer با ضخامت نزدیک به ۳۰۰ متر قرار دارد که به‌وسیله آهک و دولومیت‌های پرمین پوشیده می‌شوند. سنگ آهک خاکستری تیره تریاس، به طور عمده در قسمت جنوبی و شرقی کانسار گسترش دارد. دایک‌های دیابازی و توده‌های دیوریتی و گرانودیوریتی به سن تقریبی پرمین تا اوایل تریاس سنگ‌های آذرین را تشکیل می‌دهد. براساس مطالعات نصراله‌زاده (۲۰۰۴) کانی کائولینیت از هوازدگی سنگ‌های اولیه گرانیت - ریولیت در شرایط آب و هوایی گرم و مرطوب تشکیل شده و سپس طی فرآیند حمل‌ونقل به محیط فعلی منتقل شده‌اند. در ادامه به دلیل حضور کائولینیت، کوارتز و دمای تأمین‌شده از توده‌های نفوذی منطقه، کانی‌زایی پیروفیلیت نیز صورت گرفته است. به عبارتی می‌توان گفت که کانی کائولینیت به صورت نابرجا و کانی پیروفیلیت به صورت برجا بوده است. به همین دلیل کائولینیت در بخش‌های سطحی معدن گسترش دارد و پیروفیلیت با افزایش عمق نمایان می‌شود.

معدن استقلال در محدوده‌ای به وسعت ۱۵ کیلومترمربع در فاصله تقریبی ۱۰ کیلومتری شمال شرق آباده و ۲۶۵ کیلومتری شیراز (شکل ۲) قرار دارد، و با ذخیره کلی حدود ۸۵ میلیون تن یکی از بزرگ‌ترین کانسارهای رسوبی به‌شمار می‌آید که مواد معدنی در آن به صورت روباز و پلکانی استخراج می‌شود. گستره ماده مفید معدنی نزدیک به ۱۰۰۰ متر درازا و ۸۰۰ متر پهنا دارد و ضخامت نهشته‌های رسی آن در حدود ۲۰۰ متر است. از مهمترین بخش‌های معدن می‌توان به معادن استقلال - ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۸، معدن چاه محفوظ، سایت انبار ماده معدنی مرغوب، سایت SP700 و SPL (به‌عنوان دپوی ماده معدنی نیمه‌مرغوب) و سایت باطله‌ها اشاره کرد (شکل ۴). شکل ۴ از پایگاه اطلاعاتی Google Earth گرفته شده و مربوط به تاریخ ۲۰۱۰ با ترکیب رنگی طبیعی از ماهواره لندست است.

براساس سن کنودنت‌ها، میان لایه‌های نازک آهکی در نهشته‌های رس، متعلق به آشکوب فامنین میانی هستند (Mawson, et al; 1998). بنابراین سن نهشته‌های رس پایین، کمتر از آشکوب فرانسین بالایی و نهشته‌های بالا، به سن فامنین بالایی (دونین) هستند. از نظر کانی‌شناسی، ماده معدنی کانسار استقلال به طور عمده دارای کانی‌های کائولینیت، پیروفیلیت و به شکل فرعی ایلیت، کلریت، کوارتز، آناتاز و اکسیدهای آهن



شکل ۴. تصویر ماهواره‌ای از بخش‌های مختلف محدوده معدنی استقلال (Google Earth)

۴- روش تحقیق

ماه سال ۱۳۸۸، پس از تعیین موقعیت مکان‌های مورد نظر با استفاده از GPS، تعداد ۳۰ نمونه سطحی از پیکسل‌های با درصد فراوانی بالا از دو کانی کائولینیت و پیروفیلیت برداشت شد. از آنجا که کانی‌های رسی را نمی‌توان با استفاده از مطالعات میکروسکوپی شناسایی و تفکیک کرد، از روش‌های تجزیه XRD و آزمایش طیف‌سنجی برای شناسایی آنها بهره گرفته شد. تجزیه کانی‌شناختی XRD نمونه‌ها در داخل کشور و استخراج ویژگی‌های طیفی آنها در آزمایشگاه شرکت^۵ AGARSS استرالیا، با استفاده از دستگاه طیف‌سنج^۶ ASD انجام شد. در ادامه، نتایج دو الگوریتم SAM و MTMF با نتایج تحلیل‌های XRD و نمونه‌های طیف‌سنجی مقایسه گردید و میزان سازگاری آنها با شواهد میدانی محدوده‌های ویژه معدنی مانند سایت‌های بهره‌برداری و استخراجی ماده معدنی (استقلال ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۸)، دپوهایی از مواد معدنی مرغوب (انبار معدن) و نیمه‌مرغوب (SPL-SP700) و سایت باطله‌های معدنی، مورد مقایسه و بررسی قرار گرفتند.

۴-۱- انتخاب عضوهای خالص

انتخاب و شناسایی عضوهای خالص تصویر، رکن اصلی در موفقیت در روش ناآمیختگی طیفی خطی است. عضوهای خالص مواد مشخصی هستند که به صورت کامل یا جزئی بخش‌های مختلف پیکسل‌های تصویر ماهواره‌ای را تشکیل می‌دهند و به طور معمول دارای مشخصه طیفی بارزی هستند (Tompkins et al., 1997). سیمای طیفی مجموعه عضوهای خالص موجود در هر پیکسل مشخص، طیف آن پیکسل را می‌سازد.

در این مطالعه ابتدا دسته داده‌های VNIR و SWIR از سطح LIB که در تاریخ ۸ مارس ۲۰۰۱ به‌وسیله استر تهیه شده بود براساس توان تفکیک مکانی دسته اول ابعاد ۱۵×۱۵ متر مورد بازنویسی قرار گرفت تا تمام پیکسل‌های نه باند دارای ابعاد ۱۵×۱۵ متر باشند. به منظور رفع خطاهای هندسی و کنترل نتایج پردازش‌ها بر مبنای محدوده متناظر زمینی پیکسل‌های تصویر، تصحیح هندسی داده‌ها نیز با استفاده از مختصات ۴۸ نقطه از نقاط کنترل زمینی که از ده نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ منطقه استخراج شده‌اند با میزان خطای^۱ RMS برابر ۰/۰۱۴ صورت گرفت. از آنجا که برهمکنش امواج الکترومغناطیسی با جو زمین سبب افزایش یا کاهش بازتاب‌های واقعی از سطح زمین می‌شود ضروری است تا در مراحل اولیه تحلیل تصویرهای ماهواره‌ای، تصحیح جوی نیز بر روی آنها صورت گیرد. روش به‌کار گرفته شده در پژوهش حاضر، کالیبراسیون بازتاب نسبی متوسط داخلی^۲ است که برای تصحیح داده‌های سنجنده‌های تصویری - به‌ویژه در نواحی خشک و نیمه‌خشک - و در صورت عدم دسترسی به داده‌های میدانی کافی بسیار مفید می‌نماید (Kruse, 1988). تنگستانی و همکاران پیش‌تر کارایی این روش را برای مناطق نیمه‌خشک ایران اثبات کرده‌اند (Tangestani et al., 2008). در ادامه از روش‌های مخروط محدب بیشترین زاویه متوالی^۳ (SMACC) و شاخص خلوص پیکسل^۴ (PPI) برای استخراج عضوهای خالص تصویر و همچنین از کتابخانه طیفی USGS به عنوان مرجعی برای تحلیل طیف‌های تصویر و نیز انتخاب عضوهای خالص مرتبط با کانی‌های رسی استفاده شد. پس از انتخاب عضوهای خالص، الگوریتم SAM برای رده‌بندی پیکسلی و MTMF برای رده‌بندی زیرپیکسلی و تحلیل آمیختگی طیفی به کار گرفته شد و تعداد ۳۰ پیکسل مرتبط با بخش‌های مختلف سایت معدنی از خروجی‌های دو الگوریتم پردازشی انتخاب گردید. طی بازدید صحرایی در مرداد

1. Root Mean Square
2. Internal Average Relative Reflectance (IARR)
3. Sequential Maximum Angle Convex Cone
4. Pixel Purity Index
5. Australian Geological and Remote Sensing Services
6. Analytical Spectral Devices

طبیعتاً نمی‌توانند در الگوریتم‌های طیف پایه مورد استفاده قرار گیرند؛ به همین دلیل از آن دسته از منحنی‌های طیفی که دارای بیشترین شباهت با رفتار طیفی کائولینیت و پیروفیلیت بودند استفاده شد (شکل‌های ۶ و ۷).

روش PPI پیکسل‌های خالص طیفی را در داده‌های ابرطیفی و چندطیفی پیدا می‌کند (Boardman et al., 1995). این پیکسل‌ها از نظر طیفی مرتبط با موادی هستند که به طور خطی همه طیف‌های تصویر را می‌سازند. با استفاده از این روش می‌توان پیکسل‌هایی را که از نظر مشخصات طیفی در مقایسه با پیکسل‌های دیگر تصویر دارای کمترین تنوع کانمایی هستند، پیدا کرد. استخراج عضوهای خالص تصویر از طریق PPI با استفاده از سه پردازش کسر تمرین نوفه^۵ (MNF)، شاخص خلوص پیکسل و مجسم‌کننده^۶ n بعدی انجام می‌شود. کسر کمترین نوفه برای تعیین ابعاد ذاتی داده‌های تصویری، جدایش نوفه در داده‌ها و کاهش محاسبات مورد نیاز برای پردازش‌های بعدی به کار می‌رود. پس از اجرای MNF، پیکسل‌های تصویر با کمک ویژه‌مقدارها نمایش داده می‌شود. ارزیابی ویژه‌مقدارها در تصویر ذی‌ربط، نشان داد که مؤلفه‌های ۱، ۲ و ۳ خروجی MNF بیشترین مقدار واریانس را دارند و باندهای باقی‌مانده دارای کمترین واریانس هستند. بنابراین سه مؤلفه اول با بیشترین اطلاعات برای پردازش PPI انتخاب شدند (شکل ۵).

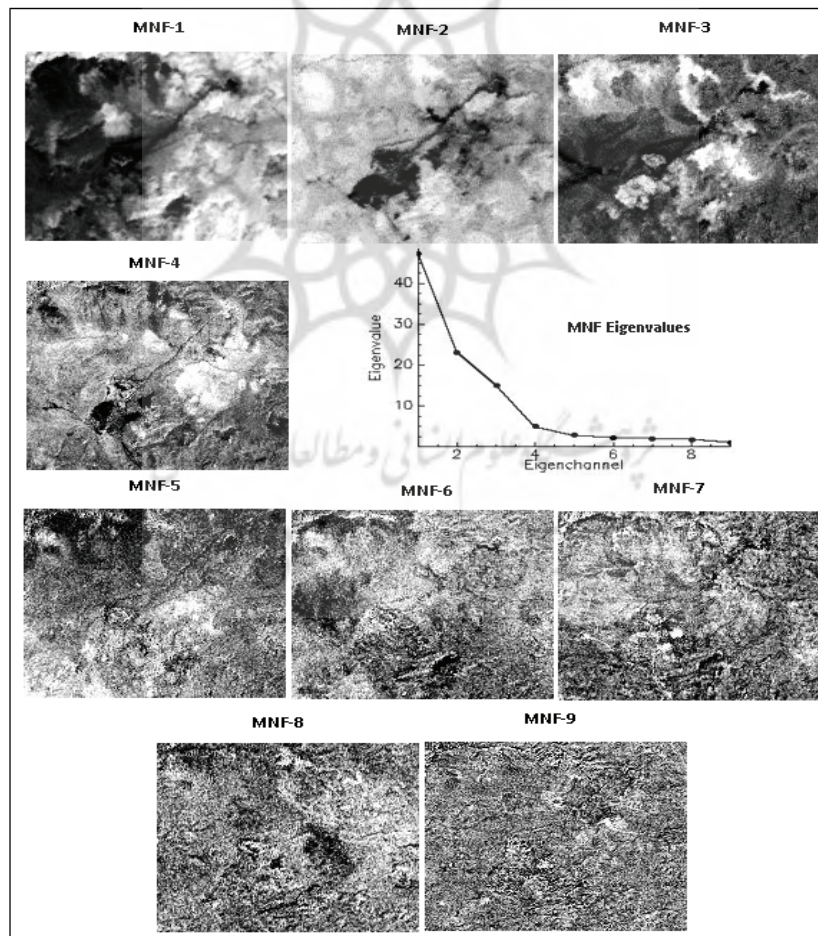
الگوریتم PPI بر روی تصویرهای MNF از راه طرح‌ریزی مکرر دیاگرام‌های پراکندگی n بعدی روی یک بردار واحد تصادفی اجرا می‌شود. نرم‌افزار ENVI پیکسل‌های نهایی در هر طرح‌ریزی را که در انتهای بردار واحد قرار گرفته‌اند، ثبت می‌کند. تصویر PPI

در شرایط ایده‌آل، هر عضو انتهایی می‌تواند یک ماده خالص طیفی باشد اما پیکسل‌های خالص هر عضو انتهایی الزاماً نمی‌توانند در تصویر وجود داشته باشند. در تحلیل تصویرهای چندطیفی، جداسازی پیکسل‌های خالص از پیکسل‌های آمیخته به‌منظور استخراج عضوهای خالص امری لازم و ضروری به شمار می‌آید. در پژوهش حاضر، برای انتخاب عضوهای خالص تصویرهای ماهواره‌ای، روش‌های SMACC (Boardman, 1993) و PPI (Gruninger et al., 2004) مورد استفاده قرار گرفتند. الگوریتم SMACC برای استخراج عضوهای خالص از داده‌های چندطیفی ETM⁺، MODIS^۲ و ASTER^۳ به کار گرفته شده است (Cheney et al., 2009). الگوریتم طیفی مخروط محدب، بیشترین زاویه متوالی عضوهای خالص داده‌های چندطیفی‌ای را که پیش‌تر کالبره شده‌اند به صورت خودکار پیدا می‌کند (Gruninger et al., 2004). در این روش ابتدا روشن‌ترین پیکسل در تصویر تعیین می‌گردد و سپس پیکسلی که در مقایسه با پیکسل اول متمایز باشد انتخاب می‌شود. این فرایند تا اکتساب تعداد ویژه‌ای از عضوهای خالص تصویر تکرار خواهد شد. طیف استخراجی از یک پیکسل تصویر می‌تواند نشان‌دهنده سایر سیماهای موجود در تصویر نیز باشد. SMACC مدل مخروط محدب را به همراه محدودیت‌هایی برای شناسایی طیف عضو انتهایی مورد استفاده قرار می‌دهد. به عنوان مثال اگر داده اولیه دسته داده بازتابی کالبره شده باشد، می‌بایست محدودیت‌های مثبت بودن^۳ یا حاصل جمع تا یک یا کمتر^۴ را انتخاب کرد. این الگوریتم بر روی داده‌های کالبره‌شده^۵ اجرا شد و در ادامه با احتساب محدودیت مثبت بودن برای داده بازتابی IARR تعداد ۱۰ عضو انتهایی به دست آمد. به دلیل تنوع در پوشش گیاهی، نوع کانی‌ها و میزان حضور آنها در هر محدوده پیکسلی، این ۱۰ عضو انتهایی دارای سیماهای طیفی متنوعی هستند. تنوع در پوشش زمین به طور معمول منجر به تولید عضوهای خالص با رفتار طیفی متفاوت نسبت به عضوهای خالص مورد نظر تحقیق می‌شوند که

1. Enhanced Thematic Plus
2. Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
3. Positivity
4. Sum-to-unity or less
5. Minimum Noise Fraction (MNF)
6. N-Dimensional visualization

مجسم‌کننده n بعدی تعداد ۸ رده طیفی تهیه شد. عضوهای خالص به‌دست آمده از طریق الگوریتم‌های SMACC و PPI در باندهای ۲، ۳، ۵، ۶، ۷ و ۸ عمدتاً دارای سیمای جذبی مشخصی هستند. که نشان‌دهنده حضور کانی‌های کلسیت، اکسیدهای آهن، کائولینیت، ژیپس، جاروسیت، پیروفیلیت، کلریت و پوشش گیاهی است. با توجه به هدف مقاله برای بارسازی کانی‌های کائولینیت و پیروفیلیت، دو عضو انتهایی مشابه با رفتار طیفی این دو کانی از میان ۱۰ عضو انتهایی خروجی SMACC و ویژگی طیف‌های خروجی SMACC PPI انتخاب شدند. ویژگی طیف‌های خروجی SMACC و PPI با کتابخانه طیفی USGS پس از بازنویسی آنها به صورت ۹ باند بازتابی استر مورد بررسی قرار گرفت.

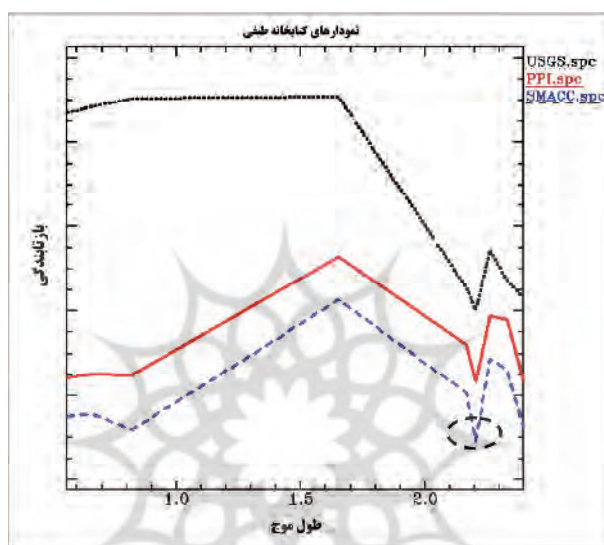
زمانی ایجاد می‌شود که درجه روشنایی هر پیکسل با تعداد دفعاتی که آن پیکسل در انتهای بردار واحد قرار می‌گیرد مطابقت داشته باشد. نتیجه حاصل از این پردازش به صورت داده‌های ورودی در مجسم‌کننده n بعدی به کار می‌رود. عملکرد شاخص خلوص پیکسل برای اجرا شدن، به دو پارامتر تکرار و آستانه نیاز دارد. در پژوهش حاضر، پردازش شاخص خلوص پیکسل بر روی مجموعه داده‌های MNF (از VNIR+SWIR) با دوره تکرار ۱۰۰۰۰ و فاکتور حد آستانه ۲/۵ اجرا شد. حد آستانه در آنالیزهای بعدی برای جداسازی پیکسل‌های خالص استفاده می‌شود، که آشکارا تعداد این پیکسل‌ها را در پردازش بعدی کاهش می‌دهد. در پایان با استفاده از حد آستانه تصویر و روش



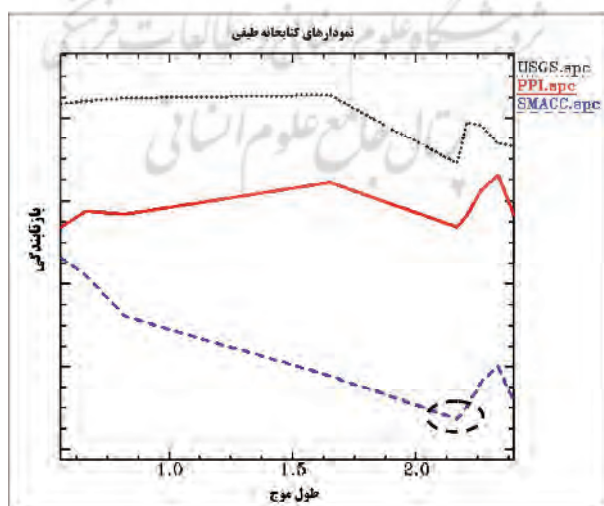
شکل ۵. تصویرهای MNF دسته داده VNIR+SWIR استر؛ در شکل از چپ به راست (از باند یک MNF تا باند نه MNF) مقادیر MNF کاهش می‌یابد.

برای این عضو انتهایی نشان می‌دهد. در شکل‌های ۶ و ۷ باند جذبی ضعیفی در نزدیکی طول موج ۰/۸۰ میکرومتر در هر دو خروجی دیده می‌شود، که مربوط به انتقال الکترونی در اکسیدهای آهن است. وجود این اکسیدها در معدن استقلال به شکل کانی فرعی پیش‌تر گزارش شده است (Etemadi & Al-e-Sadi, 1999).

انطباق محدوده جذبی باند ۶ (۲/۲۰۵ میکرومتر) طیف‌های خروجی SMACC و PPI با طیف خالص کائولینیت کتابخانه طیفی USGS، بیانگر سازگاری این طیف‌ها با طیف کائولینیت است (شکل ۶). همچنین انطباق محدوده جذبی باند ۵ (۲/۱۶۵ میکرومتر) طیف پیروفیلیت کتابخانه USGS با طیف‌های خروجی SMACC و PPI (شکل ۷) طیف عمومی پیروفیلیت را



شکل ۶. طیف تصویر به‌دست آمده از روش‌های SMACC و PPI و طیف کائولینیت کتابخانه طیفی USGS. هر یک جذب مشخصی در محدوده ۲/۲۰۵ میکرومتر از باند ۶ داده استر دارند.



شکل ۷. طیف تصویر به‌دست آمده از روش‌های SMACC و PPI و طیف پیروفیلیت کتابخانه طیفی USGS. هر یک جذب مشخصی در محدوده ۲/۱۶۵ میکرومتر از باند ۶ داده استر دارند.

۴-۲- نقشه‌برداری زاویه طیفی (SAM)

نقشه‌برداری زاویه طیفی روش رده‌بندی سریعی است که بر مبنای تشابه طیفی بین طیف‌های بازتابی تصویر و مرجع، عمل نقشه‌برداری واحدهای زمین‌شناختی را انجام می‌دهد (Kruse and Lefkof, 1993). نقشه‌برداری زاویه طیفی تشابه طیفی را با اندازه‌گیری زاویه بین دو طیف مرجع و تصویر (که به صورت بردارهایی در فضای n بعدی قرار گرفته است) (شکل ۸) یا به عبارت دیگر زاویه طیفی بین طیف هر پیکسل و طیف پدیده مورد نظر را محاسبه می‌کند. زاویه‌های کوچک‌تر بین این طیف‌ها تشابه بیشتر و زاویه‌های بزرگ‌تر تشابه کمتری را نشان می‌دهند. خروجی‌های این روش شامل یک تصویر رده‌بندی و تصویرهای rule به ازای هر عضو انتهایی است، که فاصله زاویه‌ای واقعی را (برحسب رادیان) بین هر طیف در تصویر و طیف مرجع نشان می‌دهند. پیکسل‌های تیره‌تر در تصویرهای rule کوچک‌ترین زاویه‌های طیفی را نشان می‌دهند و بیشترین شباهت را با طیف مرجع دارند (Van Der Meer & Dejong, 2001). الگوریتم SAM با استفاده از طیف‌های تصویر حاصل از روش‌های SMACC و PPI و طیف‌های کتابخانه‌ای USGS دو کانی کائولینیت و پیروفلیت بر روی دسته داده NVIR+SWIR از خروجی IARR استر به اجرا درآمد و آستانه‌های برش چگالی برای تعیین تجربی مناطقی که بیشترین تطابق را با طیف مرجع دارند به کار گرفته شد. شکل ۷ نشان‌دهنده خروجی‌های SAM حاصل از طیف‌های ورودی عضوهای خالص کائولینیت (با کمترین زاویه به دست آمده برای خروجی طیف SMACC برابر ۰/۰۱۲ تا ۰/۰۶۸ رادیان، خروجی طیف PPI برابر ۰/۰۱۹ تا ۰/۰۷۵ رادیان و برای خروجی طیف USGS برابر ۰/۱۵۴ تا ۰/۱۸۸ رادیان) و پیروفلیت (با کمترین زاویه به دست آمده برای خروجی طیف SMACC برابر ۰/۰۱۴ تا ۰/۰۴۹ رادیان، خروجی طیف PPI برابر ۰/۰۱۷ تا ۰/۰۷۲ رادیان و برای خروجی طیف USGS برابر ۰/۱۳۵ تا ۰/۱۷۲ رادیان) است.

۴-۳- پالایش تطبیقی تنظیم‌شده آمیخته (MTMF)

رده‌بندی زیرپیکسلی روشی توانمند است که برای محاسبه کمی مواد هدف در هر پیکسل از تصویر استفاده می‌شود. رده‌بندی مذکور این اصل را مورد توجه قرار می‌دهد که یک پیکسل نمی‌تواند به عنوان پوششی واحد مطرح شود (Fisher, 1997). یکی از الگوریتم‌های رده‌بندی زیرپیکسلی، پالایش تطبیقی تنظیم‌شده آمیخته است که فراوانی عضوهای خالص را با استفاده از نگرش ناآمیختگی بخشی ارزیابی می‌کند. مهم‌ترین مزیت این روش (در مقایسه با دیگر روش‌های مدل آمیختگی طیفی)، اجرای آن به وسیله حتی یک عضو انتهایی است، بدین معنا که در این روش نیازی به حضور همه عضوهای خالص موجود در تصویر نیست. خروجی‌های M/TMF شامل تصویرهای پالایش تطبیق‌یافته (MF) و تصویرهای با ارزش‌های امکان‌ناپذیری^۱ به ازای هر عضو انتهایی هستند. مقدار MF از کمینه صفر شروع شده و پیکسل‌های با ارزش بزرگ‌تر از صفر کسری از مؤلفه هدف را نشان می‌دهد. ارزش‌های امکان‌ناپذیری حاصل از MTMF در کاهش موقعیت‌های نادرست و افزایش دقت پالایش آمیخته مفید است. پالایش تطبیق‌یافته پاسخ طیفی هدف را از میان زمینه ناشناخته آشکار می‌سازد و فراوانی نسبی هر عضو انتهایی را در تصویری خاکستری نشان می‌دهد. در خروجی این الگوریتم کسرهای فراوانی مساوی یا کمتر از ۱۰۰ درصد به عنوان مقادیر فراوانی مورد پذیرش و کاربردی، و کسرهای بیش از ۱۰۰ درصد به عنوان مقادیر فراوانی غیرکاربردی و با دقت پایین تفسیر می‌شوند.

با استفاده از طیف‌های تصویر حاصل از روش‌های SMACC و PPI و طیف‌های کتابخانه‌ای USGS دو کانی کائولینیت و پیروفلیت، الگوریتم MTMF بر روی سه مؤلفه اول MNF (حاصل از اجرای MNF بر روی دسته داده VNIR+SWIR از خروجی IARR استر) با

1. Infeasibility

طیفی کانی کلسیت است، در این خروجی‌ها بخشی از واریزهای آهنی و مناطق ناپذیرفتنی از محدوده معدنی بارز شده است. با توجه به شکل ۸ (الف و ب) و (ج و د) تصاویر حاصل از روش SAM با استفاده از عضوهای خالص الگوریتم SMACC در مقایسه با خروجی‌های SAM برگرفته از طیف‌های PPI از نظر ارزش زاویه‌ای، دقت بالا و توزیع مکانی درستی از کانی‌های رسی محدوده معدنی را نشان می‌دهند.

به طور کلی الگوریتم MTMF پاسخ طیفی هدف را از میان زمینه ناشناخته آشکار می‌سازد و فراوانی نسبی هر عضو انتهایی را در تصویری خاکستری به نمایش می‌گذارد. با توجه به اینکه کسرهای نسبی بالاتر از ۵۰ درصد از ارزش‌های زمینه ناشناخته دورتر و دارای دقت بالاتری هستند، از این رو کسر فراوانی خروجی‌ها در الگوریتم MTMF بالاتر از ۵۰ درصد انتخاب شد تا خروجی‌های این الگوریتم صحت لازم را در خصوص هر یک از طیف‌های هدف داشته باشند و نمایانگر پیکسل مرتبط با عضو خالص مورد نظر باشند. از آنجا که کانی پیروفلیت به صورت برجای از کائولینیت نابرجا در عمق بیشتری تشکیل شده است (Nasrolahzadeh, 2004) بهره‌برداری‌های روباز معدن منجر به رخنمون کانی پیروفلیت گشته است.

تصویرهای خروجی الگوریتم MTMF برگرفته از طیف‌های روش SMACC، پراکندگی پیکسل‌های دارای فراوانی ۱۰۰-۵۰ درصد از عضو انتهایی کائولینیت را در حاشیه معدن کاری (حوضچه رسوبی کنار معدن) و سایت SP700 (دپوی ماده معدنی نیمه مرغوب) (شکل ۹ - الف) و توزیع مکانی پیکسل‌های با همین فراوانی از عضو انتهایی پیروفلیت را به طور عمده در بخش‌های معدن کاری، انبار ماده معدنی مرغوب و سایت SPL (دپوی ماده معدنی نیمه مرغوب) (شکل ۹-ب) و در عمق بیشتر نشان می‌دهند. تصویرهای خروجی الگوریتم MTMF برگرفته از طیف‌های روش PPI (شکل ۹-ج، د)، پراکندگی پیکسل‌های دارای فراوانی ۱۰۰-۵۰ درصد از عضو

بیش از ۹۰ درصد تجمع داده اجرا شد و براساس نمودار پراکنش دو بعدی، پیکسل‌های با ارزش امکان‌ناپذیری پایین‌تر از حد آستانه ۵ و ارزش‌های بیش از ۵۰ درصد از خروجی پالایش تطبیق‌یافته جدا شدند. کسر فراوانی و توزیع مکانی دو عضو انتهایی کائولینیت و پیروفلیت در تصویر خروجی‌های الگوریتم MTMF در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج به‌وسیله مشاهدات میدانی، تجزیه‌های XRD و تفسیرهای طیف‌سنجی از نمونه‌های میدانی متناظر با پیکسل‌های خروجی ارزیابی شدند.

۵- نتایج

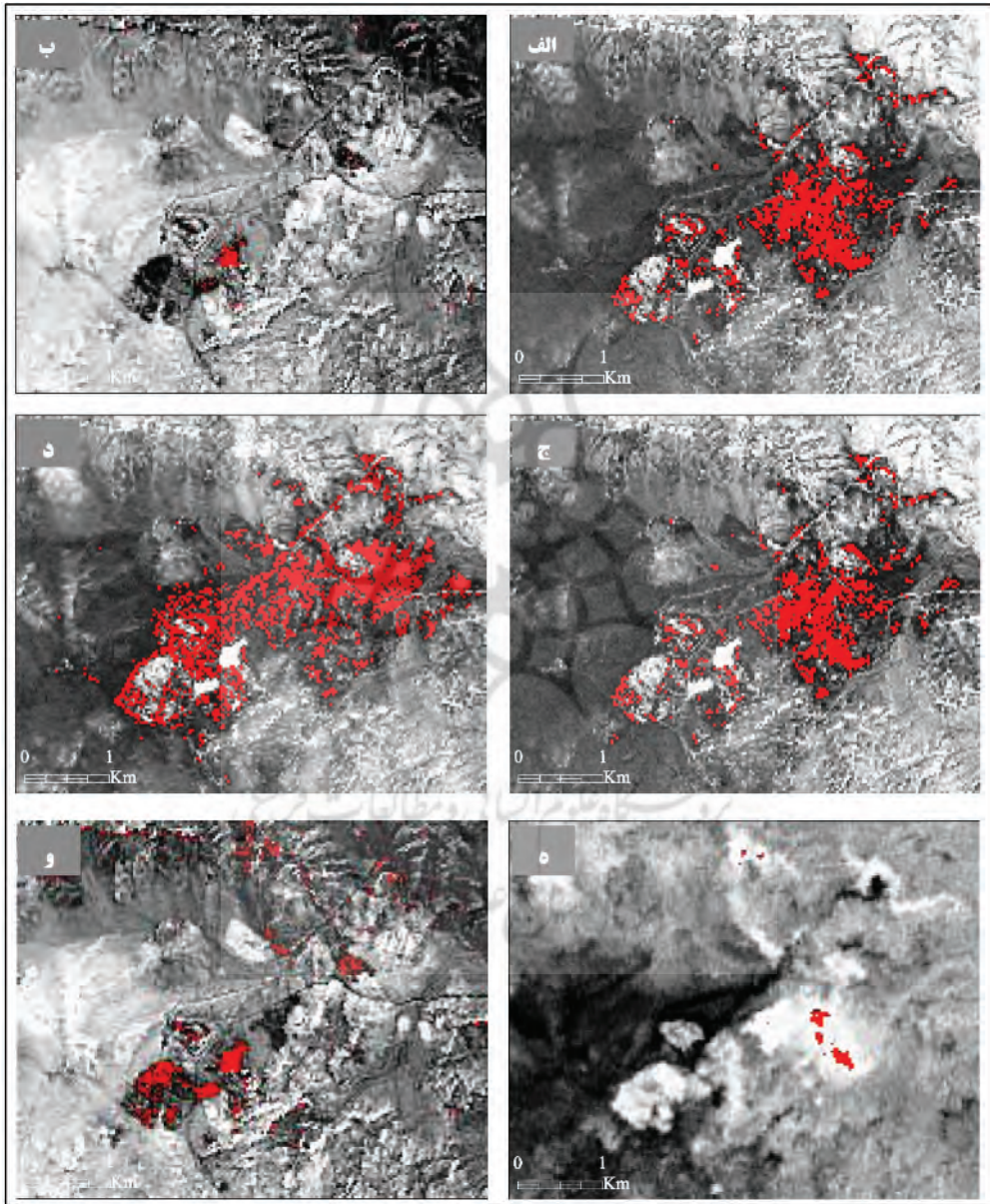
پس از اجرای الگوریتم SAM، خروجی طیف کائولینیت و پیروفلیت حاصل از روش SMACC کمترین زاویه‌های طیفی به ترتیب ۰/۰۱۲ تا ۰/۰۶۸ رادیان و ۰/۰۱۴ تا ۰/۰۴۹ رادیان را برای بهترین توزیع مکانی این کانی‌ها نشان دادند (شکل ۸- الف و ب).

براساس پیش‌فرض نرم‌افزار ENVI در نتایج الگوریتم SAM پیکسل‌های با زاویه طیفی بالاتر از ۰/۱ رادیان، به عنوان پیکسل‌های نامناسب برای عضو انتهایی مورد نظر شناخته می‌شوند. تصویرهای خروجی این الگوریتم برای طیف کائولینیت و پیروفلیت حاصل از روش PPI با کمترین زاویه‌های طیفی به ترتیب ۰/۰۱۹ تا ۰/۰۷۵ رادیان (شکل ۸-ج) و ۰/۰۱۷ تا ۰/۰۷۲ رادیان (شکل ۸-د) مورد ارزیابی قرار گرفتند. همچنین خروجی الگوریتم SAM بر مبنای طیف کائولینیت و پیروفلیت از کتابخانه USGS کمترین زاویه‌های طیفی به ترتیب ۰/۱۵۴ تا ۰/۱۸۸ رادیان و ۰/۱۳۵ تا ۰/۱۷۲ رادیان را برای بهترین توزیع مکانی از این کانی‌ها نشان داد (شکل ۸- ه و و) که از نظر ارزش زاویه‌ای و توزیع مکانی عضوهای خالص دارای کمترین دقت در مقایسه با خروجی‌های حاصل از طیف‌های تصویر است. با وجود این، به دلیل جذب ناچیز در باند ۸ طیف‌های کائولینیت و پیروفلیت کتابخانه طیفی USGS، از آنجا که باند ۸ نمایانگر نشان

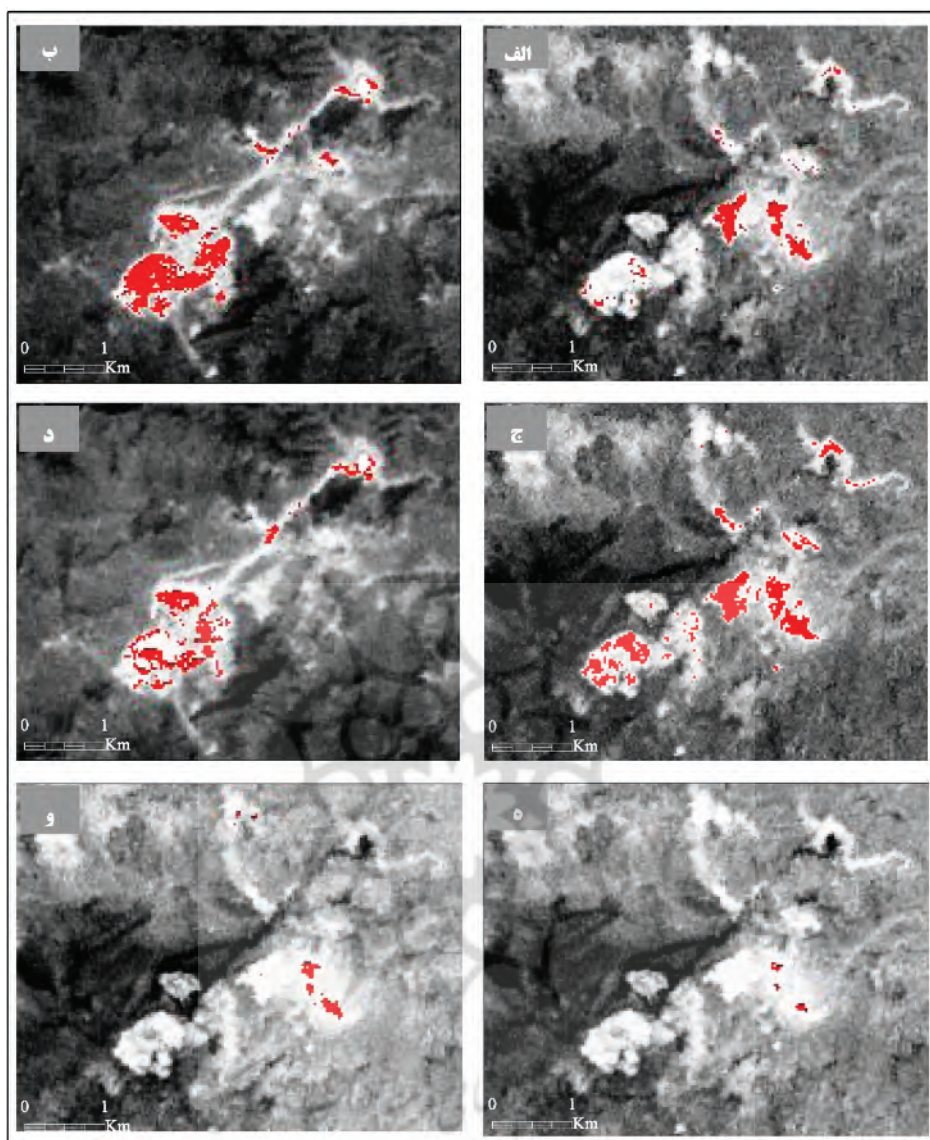
ارزیابی رده‌بندی‌های پیکسلی و زیرپیکسلی داده‌های استر در آشکارسازی توزیع مکانی کانی‌های رسی (مطالعه موردی: معدن استقلال آباده)

USGS حاصل از طیف‌های کتابخانه MTMF (شکل ۹-ه، و)، فراوانی پایین (۷۰-۵۰ درصد) و پراکندگی محدود و نامناسبی را در خارج از محدوده معدنی نشان می‌دهند

انتهایی کائولینیت و توزیع مکانی پیکسل‌های با همین فراوانی از عضو انتهایی پیروفیلیت را با دقت پایین، فراوانی نسبی و پراکندگی مکانی نامناسب در مقایسه با شکل ۹-الف و ب نشان می‌دهند. خروجی‌های الگوریتم



شکل ۸. توزیع مکانی کانی‌های رسی براساس نتایج الگوریتم SAM؛ الف و ب) تصویرهای خروجی SAM نسبت به طیف تصویر کانی‌های کائولینیت (الف) و پیروفیلیت (ب) به‌دست آمده از روش SMACC؛ ج و د) تصویرهای خروجی SAM نسبت به طیف تصویر کانی‌های کائولینیت (ج) و پیروفیلیت (د) به‌دست آمده از روش PPI؛ ه، و) تصویرهای خروجی SAM نسبت به طیف کتابخانه‌ای USGS کانی‌های کائولینیت (ه) و پیروفیلیت (و)



شکل ۹. توزیع مکانی کانی‌های رسی براساس نتایج الگوریتم MTMF (الف و ب) تصویرهای خروجی MTMF نسبت به طیف تصویر کانی‌های کائولینیت (الف) و پیروفیلیت (ب) به‌دست آمده از روش SMACC؛ ج و د) تصویرهای خروجی MTMF نسبت به طیف تصویر کانی‌های کائولینیت (ج) و پیروفیلیت (د) به‌دست آمده از روش PPI؛ ه، و) تصویرهای خروجی MTMF نسبت به طیف کتابخانه‌ای USGS کانی‌های کائولینیت (ه) و پیروفیلیت (و).

توزیع مکانی آنها در محدوده معدنی بر روی دسته داده VNIR+SWIR و طیف‌های کتابخانه USGS دو کانی کائولینیت و پیروفیلیت برای تعیین توزیع مکانی آنها در محدوده معدنی بر روی دسته داده VNIR+SWIR از خروجی IARR استر اجرا شد. کارایی این روش‌ها در نقشه‌برداری‌های پوشش زمین و مطالعات زمین‌شناختی

۶- بحث و نتیجه‌گیری

الگوریتم‌های SAM (از مدل رده‌بندی پیکسلی تصویرهای ماهواره‌ای) و MTMF (از مدل رده‌بندی زیرپیکسلی) با استفاده از طیف‌های تصویر حاصل از روش‌های SMACC و PPI و طیف‌های کتابخانه USGS دو کانی کائولینیت و پیروفیلیت برای تعیین

تقریباً ۵۰ درصد از نمونه‌های میدانی مرتبط با خروجی الگوریتم SAM (براساس طیف‌های تصویر حاصل از روش SMACC) از نظر فراوانی و نوع کانی هدف دارای صحت بودند، و به دلیل منطبق بودن خروجی MTMF با زمین‌ریخت‌شناسی مناطق بهره‌برداري - که نشان‌دهنده رخنمون کانی پیروفیلیت در مناطق عمیق‌تر و کائولینیت در نواحی سطحی‌تر است - می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم MTMF در مقایسه با الگوریتم SAM دارای دقت بیشتری است. نتایج این تحقیق با نتایجی که وندرمیر (۱۹۹۵)، بن‌دور و همکاران (۲۰۰۱)، کی‌یو و همکاران (۲۰۰۶) و ژوو و همکاران (۲۰۰۷) به آنها دست یافتند، مطابقت دارد. وندرمیر با استفاده از الگوریتم MTMF توانست فراوانی پیکسل‌های پوشش‌دهنده توده پریدوتیتی، سنگ‌های دگرگونی و آهکی جنوب اسپانیا و مرز واحدهای زمین‌شناختی را با دقت بالا مورد ارزیابی قرار دهد (Van der Meer, 1995). بن‌دور و همکاران الگوریتم رده‌بندی MTMF را برای بررسی و تعیین عوارض شهری با استفاده از عضوهای انتهایی بهینه مدنظر قرار دادند، و نتایج به‌دست آمده را دارای دقت بسیار بالا ارزیابی کردند (Ben-Dor et al., 2001). کی‌یو و همکاران نیز طی اجرای الگوریتم MTMF بر روی داده‌های استر از منطقه بیابانی واقع در جنوب مصر توانستند نتایج بهتری را در مقایسه با روش SAM به‌دست آورند (Qiu et al., 2006). ژوو که با استفاده از روش‌های رده‌بندی MTMF و SAM به نقشه‌کشی پوشش گیاهی منطقه‌ای در لس‌پدزا میسوری پرداخت، نتایج حاصل از رده‌بندی MTMF را در مقایسه با SAM دارای دقت بالاتری می‌داند (Zhou, 2007).

نتایج این مطالعه همچنین نشان داد که رده‌بندی زیرپیکسلی داده‌های استر (که در آن به ازای هر پیکسل، ویژگی همه اجزا و فراوانی آنها نشان داده می‌شود) برای اکتشاف کانی‌های رسی و تعیین

پیش از این مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته‌اند و نتایج حاصل از آنها نشان می‌دهد که روش رده‌بندی زیرپیکسلی می‌تواند نتایج پذیرفتنی‌تر و مستندتری را به‌دست دهد.

نتایج حاصل از اجرای الگوریتم MTMF (براساس طیف‌های تصویر حاصل از روش SMACC) در مقایسه با خروجی مدل SAM (برگرفته از طیف‌های SMACC) در منطقه مطالعاتی، پراکندگی مناسب‌تر و غنی‌شدگی بیشتر دو کانی کائولینیت و پیروفیلیت را نشان می‌دهند. مقایسه تصویرهای (الف) شکل‌های ۸ و ۹ نشان می‌دهد که پیکسل‌های حاصل از خروجی الگوریتم MTMF (برای عضوهای خالص SMACC) پتانسیل بیشتری برای بررسی‌های دقیق‌تر اکتشافی دارند. همچنین در شکل ۸-ب پیکسل‌های با فراوانی بالاتر از ۵۰ درصد از کانی پیروفیلیت، دارای گسترش و غنی‌شدگی بیشتری در مقایسه با خروجی الگوریتم SAM هستند، و همین امر حضور پیروفیلیت را در عمق بیشتر تأیید می‌کند. با توجه به اینکه با افزایش عمق در محدوده معدنی از میزان فراوانی و حضور کانی کائولینیت کاسته و بر فراوانی کانی پیروفیلیت افزوده می‌شود، در خروجی الگوریتم MTMF، مناطق با عمق بهره‌برداري زیاد (مانند استقلال ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۸ و بخشی از معدن چاه محفوظ) و انبار ماده معدنی مرغوب (مانند SPL) بارزشدگی پیروفیلیت را نشان می‌دهند، در حالی که به دلیل فراوانی کائولینیت در سطح، این کانی در بخش‌های سطحی محدوده معدنی (مانند دیوهای خاک‌برداری سطحی، سایت باطله‌ها، سایت SP700 با مواد معدنی نیمه‌مرغوب و حوضچه رسوبی کنار معدن) بارز شده است.

براساس مشاهدات میدانی نتایج طیف‌سنجی و تجزیه XRD نمونه‌ها، و با توجه به اینکه حدود ۷۵ درصد از نمونه‌های صحرائی مرتبط با خروجی‌های الگوریتم MTMF (برگرفته از طیف‌های SMACC) و

- Asis, A.M., Omasa, k., Oki.k. and Shimizu,Y., 2008, **Accuracy and Applicability of Linear Spectral Unmixing in Delineating Potential Erosion Areas in Tropical Watersheds**, International Journal of Remote Sensing, Vol. 29, No.14, 4151–4171.
- Ben-Dor, E., Levin, N. and Saaroni, H., 2001, **A Spectral Based Recognition of the Urban Environment Using the Visible and Near-Infrared Spectral Region (0.4-1.1 μm), a case study over Tel-Aviv**, International Journal of Remote Sensing, Vol. 22, No.11, 2193-2218.
- Boardman, J.W., 1993, **Automating Spectral Unmixing of AVIRIS Data Using Convex Geometry concepts**, In: Summaries of the 4th Annual JPL Air-borne Geoscience Workshop, Pasadena, 11–14.
- Boardman, J.W., 1998, **Leveraging the High Dimensionality of AVIRIS Data for Improved Sub-pixel Target Unmixing and Rejection of False Positives: Mixture Tuned Matched Filtering**, Summaries of the Seventh JPL Airborne Geoscience Workshop, JPL Publication 97-1. NASA Jet Propulsion Lab., Pasadena, CA, 55–56.
- Boardman, J.W., Kruse, F.A., Green, R.O., 1995, **Mapping Target Signatures Via Partial Unmixing of AVIRIS Data**, In summaries, fifth JPL airborne earth science workshop, JPL Publication 95-1, Vol. 1, 23-26.
- غنی‌شدگی نسبی آنها در مناطق معدنی خاک نسوز، پیش از نمونه‌گیری، انجام تجزیه‌های آزمایشگاهی و کانی‌شناختی و عملیات گمانه‌زنی، در مقایسه با رده‌بندی پیکسلی (که در آن به ازای هر پیکسل فقط یک رده زمینی بدون تعیین فراوانی ارائه می‌شود) دارای نتایج پذیرفتنی‌تری است، که خود می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌ها و بالا بردن کارایی برنامه‌های اکتشافی و تسهیل در امر اکتشاف شود.
- ۷- تشکر و قدردانی**
- نویسندگان مقاله از مرکز^۱ LPDAA واقع در سازمان زمین‌شناسی ایالات متحد (USGS) امریکا برای تأمین داده‌های ASTER و از آقای دکتر باب آگار مدیر شرکت AGARSS استرالیا برای تجزیه طیفی نمونه‌ها کمال تشکر و قدردانی را به عمل می‌آورند.
- ۸- منابع**
- Abkar, A.A., 1999, **Likelihood-based Segmentation and Classification of Remotely Sensed Images - A Bayesian Optimisation Approach for Combining RS and GIS**, Ph.D. Thesis, University of Twente, Enschede, the Netherlands, ISBN 90-6164-169-1, ITC publication number 73.
- Adams, J.B. and Smith, M.O., 1986, **Spectral Mixture Modeling: A New Analysis of Rock and Soil Types at the Viking Lander 1 site**, Journal of Geophysical Research., Vol. 91, 8098-8112.
- Al-e- Sadi, H., 1999, **Geochemistry and Mineralogy of the Clay Minerals of the Esteghlal Deposit**, Abadeh, M.Sc. Thesis, University of Shiraz, Iran (In Persian).

1. Land Processes Distributed Active Archive

- Cheney, M.S., Gregory S.O. and Thomas, H.P., 2009, **Indices for Estimating Fractional Snow cover in the Western Tibetan Plateau**, Journal of Glaciology, Vol. 55, No.192, 737-745.
- Etmadi, B. and Al-e- Sadi, H., 1999, **The Clay Mineral Detection in the Esteghlal Mine, Abadeh by the use of X-ray diffraction (XRD)**, 3th symposium of the Geological Society of Iran, 64-70 (In Persian).
- Fisher, P., 1997, **The Pixel: A Snare and a Delusion**, INT. J. Remote Sensing, Vol. 18, 679-685.
- Foody, G.M., 2004, **Thematic Map Comparison: Evaluating the Statistical Significance of Differences in Classification Accuracy**, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol.70, No.5, 627-633.
- Galvao, L.S., Filho, R.A. and Vitorello, C., 2004, **Spectral Discrimination of Hydrothermal Altered Materials Using ASTER Short-wave Infrared Bands, Evaluation in a Tropical Savannah Environment**, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol.7, 107-114.
- Gruninger, J., Ratkowski, A. & Hoke, M., 2004, **The Sequential Maximum Angle Convex Cone (SMACC) Endmember Model**, Proceedings SPIE, Algorithms for multispectral and hyper-spectral and ultraspectral Imagery, 5425, 1-14.
- Harsanyi, J.C. and Chang, C., 1994, **Hyperspectral Image Classification and Dimensionality Reduction: an Orthogonal Subspace Projection Approach**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 32, 779- 785.
- Iranian-Japanese Research Group, 1981, **The Permian and Lower Triassic System in Abadeh Region, Central Iran**, Memoir of Faculty of Science, Kyoto University 47, 61-133.
- Kholghi, M.J., 2002, **Geological Map of Abadeh, 1:100000**, Geogcal Survey of Iran (In Persian).
- Kruse, F.A., 1998, **Use of Airborne Imaging Spectrometer Data to Map Minerals Associated with Hydrothermally Altered Rocks in the Northern Grapevine Mountains, Nevada, and California**, Remote Sensing of Environment, Vol. 24, 31-51.
- Kruse, F.A., Boardman, J.W., and Hunnington, J.F., 2003, **Comparison of Airborne Hyperspectral Data and EO-1 Hyperion for Mineral Mapping**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, No. 6, 1388-1400.
- Kruse, F.A., Lefkoff, A.B., Boardman, J.B., Heidebrecht, K.B., Shapiro, A.T., Barloon, P.J. and Goetz, A. F. H., 1993, **The Spectral Image Processing System (SIPS)-interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data**, Remote Sensing of Environment., Vol. 44, 145-163.

- Kruse, F.A. and Lefkoff, A.B., 1993, **z on remote sensing for exploration geology**, Calgary, 847-859.
- Roberts, D.A., 1991, **Separating Spectral Mixtures of Vegetation and Soils**, Ph.D. dissertation, University of Washington, USA.
- Rogge, D.M., Rivard, B., Zhang, J. and Feng, J., 2006, **Iterative Spectral Unmixing for Ptimizing Per-pixel Endmember Sets**, IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, Vol.44, No.12, 3725-3736.
- Settle, J. J. and Drake, N. A., 1993, **Linear Mixing and the Estimation of Ground Cover Proportions**, International Journal of Remote Sensing, Vol.14, 1159-1177.
- Shimabukuro, Y. E. and Smith, A. J., 1991, **The Least-squares Mixing Models to Generate Fraction Images Derived from Remote Sensing Multispectral Data**, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing Vol.29, No.1, 16-20.
- Sohn, Y. and Mccoy, R.M., 1997, **Mapping Desert Shrub Rangeland Using Spectra Unmixing and Modeling Spectral Mixtures with TM Data**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.63, 707-716.
- Tangestani, M.H., Mazhari, N., Agar, B. and Moore, F., 2008, **Evaluating Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Data for Alteration Zone Enhancement in a Semiarid Area, Northern Shahr-e-Babak, SE Iran**, INT.J. Remote Sensing, Vol. 29, No.10, 2833-2850.
- Tompkins, S., Mustard, J. F., Pieters, C. M., and Forsyth, D. W., 1997, **Optimization of Endmembers for Spectral Mixture Analysis, Remote Sensing of Environment**, Vol. 59, 472-489.
- Van Der Meer .F., 1999, **Iterative Spectral Unmixing**, International Journal of Remote Sensing, Vol. 20, No.17, 3431-3436.
- Van Der Meer, F. and Dejong, S.M., 2001, **Remote Sensing and Digital Image Processing**, Imaging spectroscopy, Kluwer Academic, the Netherlands, P. 306.
- Van Der Meer, F., 1995, **Spectral Unmixing of Landsat Thematic Mapper Data**, International Journal of Remote Sensing, Vol. 16, 3186-3194.
- Yamaguchi, Y., Kahle, A.B., Tsu H., Kawakami, T. and Pniel, M., 1998, **Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.36, No.4, 1062-1071.
- Zhou, B., 2007, **Application of Hyperspectral Remote Sensing in Detecting and Mapping Sericea Lespedeza in Missouri**, M.Sc. Thesis, Faculty of the Graduate School University of Missouri, Columbia.
- Zhu, H. and Eastman, J.R., 2001, **Probability Guided and Minimum Residual Exhaustive Searching Approaches for Subpixel Classification**, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '01, Vol. 4, 9-13, Sydney, Australia, 1883-1885.