



سنجش از دور

GIS ایران

سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS

سال دهم، شماره اول، بهار ۱۳۹۷
Vol.10, No. 1, Spring 2018

۱-۱۶



به کارگیری الگوریتم طبقه‌بندی نظارت‌شده SAM در تهیه نقشه واحدهای سنگی، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای

پرویز ضیائیان فیروزآبادی^۱، پریسا صفری‌رانوند^{۲*}، علی حسینی‌زاده^۳، رحیم حسینی‌تبار^۴، مهدی صفری‌رانوند^۴

۱. دانشیار گروه سنجش از دور و GIS دانشگاه خوارزمی تهران

۲. کارشناسی ارشد سنجش از دور و GIS، دانشگاه خوارزمی تهران

۳. کارشناس و پژوهشگر جهاد دانشگاهی، لرستان

۴. کارشناسی مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد خرم‌آباد

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۳/۲۱

چکیده

مسئله تهیه نقشه واحدهای سنگی، در روندی رو به بهبود، به نقطه‌ای رسیده است که امروزه آشکارسازی و طبقه‌بندی واحدهای سنگی به کمک سنجش از دور ابرطیفی انجام می‌شود. در این پژوهش، تصاویر هایپریون با در نظر گرفتن نتایج کار محققان پیشین و استفاده از الگوریتم طبقه‌بندی نظارت‌شده SAM در تشخیص و تفکیک واحدهای سنگی در منطقه خرم‌آباد استان لرستان به کار رفته است. SAM یک روش رده‌بندی سریع است که، از راه ارزیابی، میزان تشابه طیف‌های تصویر و مرجع عمل نقشه‌برداری واحدهای زمین‌شناختی را نشان می‌دهد. پس از پیش‌پردازش‌های لازم، از جمله تصحیح اتمسفری که به روش FLAASH اجرا شد، تبدیل خطی MNF به منظور مشخص کردن بعد و حجم اصلی تصویر، جداسازی نویز از دیگر اطلاعات و کاهش میزان پردازش در مراحل بعد استفاده شد و الگوریتم PPI برای پیدا کردن پیکسل‌هایی با خلوص بیشتر در تصاویر چندطیفی یا فراطیفی به کار رفت. از هم‌پوشانی پیکسل‌های خالص با واحدهای سنگی و برپایه داده‌های زمینی از منطقه مورد مطالعه، طیف میانگین برای هر عضو استخراج شد. سپس این اعضای خالص، به‌منزله ورودی جهت الگوریتم ذکر شده، استفاده و طبقه‌بندی تصویر صورت گرفت. در نهایت، نقشه طبقه‌بندی شده حاصل از این روش با نقشه‌های موجود و داده‌های زمینی مقایسه و میزان صحت آن بررسی شد. دقت اجرای روش SAM با بررسی صحت الگوریتم، از طریق محاسبه ماتریس خطا، به بیشترین میزان $68/83\%$ و ضریب کاپای $0/49\%$ بوده است که خود اهمیت تصاویر فراطیفی و روش SAM در تفکیک واحدهای سنگی را نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: تصاویر فراطیفی، نقشه واحدهای سنگی، SAM، MNF، PPI.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: تهران، خیابان مفتاح، دانشگاه خوارزمی، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات مکانی. تلفن: ۰۹۱۶۸۵۵۱۶۵۷-۰۲۱-۰۹۱۹۷۵۶۹

۱- مقدمه

استفاده از فناوری دورسنجی و به‌کارگیری داده‌های ماهواره‌ای اغلب موجب کاهش هزینه و افزایش دقت و سرعت می‌شود (علوی‌پناه، ۱۳۹۲). استفاده از این فناوری در چند دهه اخیر، به‌منزله یکی از مهم‌ترین ابزارهای کسب اطلاعات، توجه بسیاری از کارشناسان و متخصصان علوم گوناگون را به خود جلب کرده است. از جمله این دانش‌ها می‌توان به معدن، محیط‌زیست، هواشناسی و کشاورزی اشاره کرد. از اواخر دهه هشتاد میلادی و با معرفی سنجنده‌های ابرطیفی، گام بلندی در حوزه فناوری سنجش از دور برداشته شد. سنجنده‌های ابرطیفی، در مقایسه با سنجنده‌های قدیمی‌تر چندطیفی، داده‌هایی با تفکیک‌پذیری طیفی بسیار بالاتری تولید می‌کنند و در نتیجه، امکان شناسایی بسیار دقیق‌تر عوارض زمینی را فراهم می‌آورند (Camps-Valls et al., 2014). سنجنده‌های ابرطیفی، به دلیل استفاده از باندهای طیفی بسیار زیاد، حجم فراوانی از داده‌های طیفی را تولید می‌کنند؛ بنابراین، استفاده از روش‌هایی که قادر به پردازش و استخراج اطلاعات ارزشمند از این داده‌های حجیم باشند نیز ضروری است. رابطه زمین‌شناسی و سنجش از دور پیشینه‌ای نزدیک به سی سال دارد (Shrestha et al., 2005). در سنجش از دور فراطیفی، اندازه‌گیری بازتاب پدیده‌های سطح زمین در باندهای بسیار باریک، با پهنای طیفی ۰/۰۱ میکرومتر در محدوده طیفی ۰/۴ تا ۲/۵ میکرون، امکان‌پذیر است. وجود باندهای طیفی باریک و فراوان تصاویر فراطیفی امکان پژوهش‌های زمین‌شناختی و شناسایی واحدهای سنگی منطقه را با نتایج بهتری فراهم می‌سازد (Kruse et al., 1993; Kurse et al., 2003). نقشه‌های موجود واحدهای سنگی اغلب

به‌روش‌های رایج تهیه شده است. در این پژوهش سعی بر این است که، در تفکیک واحدهای سنگی نقشه‌های زمین‌شناسی، از قابلیت‌های فناوری سنجش از دور بهره گرفته شود.

تصاویر حاصل از فناوری سنجش از دور داده‌های کارآمدی را تأمین می‌کنند که، برای استخراج اطلاعات مورد نظر از آن‌ها، به پردازش‌هایی روی تصویر نیاز است. داده‌های حاصل از سنجش از دور، با توجه به فراهم کردن پوشش وسیع از منطقه و ارائه پارامترهای کمی، می‌توانند منبعی مناسب برای به‌روز کردن نقشه‌های سنگی باشند (Rajendran et al., 2007). در میان روش‌های گوناگون سنجش از دور، فن طبقه‌بندی در تجزیه و تحلیل، جداسازی و آشکارسازی واحدهای متفاوت سنگی جایگاه ویژه‌ای دارد. طبقه‌بندی تصویر یکی از مؤلفه‌های اصلی فرایند استخراج اطلاعات موضوعی است که با بررسی رابطه بین اثر طیفی و کلاس‌ها یا طبقات گوناگون حاصل می‌شود (Oommen et al., 2008). در این پژوهش، سعی بر این است که از قابلیت‌های فناوری سنجش از دور در تهیه این نقشه‌ها بهره گرفته شود.

شریفی (۱۳۸۷) از تصاویر AVIRIS و اعمال الگوریتم‌های SVM^۱، MF^۲، NN^۳، BE^۴، SAM^۵، SFF^۶، MLE^۷ برای تهیه نقشه کانی‌شناسی منطقه کوپرت استفاده کرد. اعضای مرجع به‌کاررفته در این تحقیق از کتابخانه‌های طیفی JPL، JHU، USGS و اعضای مرجع حاصل از اعمال الگوریتم‌های

1. Support Vector Machines
2. Matched Filtering
3. Neural Network
4. Binary Encoding Classification
5. Spectral angular mapper
6. Spectral feature fitting
7. Maximum Likelihood Estimation

(۲۰۰۷) از تصاویر AVIRIS و داده‌های چندطیفی حرارتی MODIS/ASTER، به نام MASTER، برای تهیه نقشه زمین‌شناسی منطقه Cuperit نوادا^۷ بهره بردند و بدین‌منظور، از الگوریتم‌های SAM و SFF استفاده کردند. در این مطالعه، برای تهیه نقشه واحدهای سنگی در شهرستان خرم‌آباد، تصاویر هایپریون به‌کار رفت. در مقاله حاضر، کوشش شده است، با در نظر گرفتن نتایج کار محققان پیشین و توجه به شرایط لیتولوژیک و زمین‌شناختی منطقه مطالعاتی، برای تهیه نقشه واحدهای سنگی، روش نقشه‌برداری زاویه‌ای به‌کار رود.

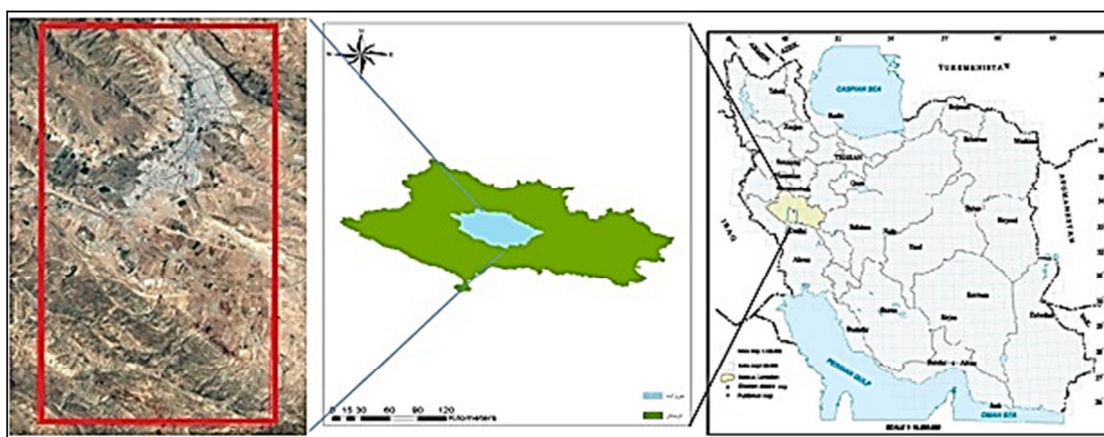
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ - موقعیت منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در غرب کشور ایران، استان لرستان و شهرستان خرم‌آباد، واقع شده است (شکل ۱). موقعیت جغرافیایی خرم‌آباد در حدود $48^{\circ} - 48^{\circ} 20'$ عرض $38^{\circ} 43' - 39^{\circ} 06'$ طول جغرافیایی و $23'$ جغرافیایی قرار دارد.

VCA^۱ و PPI^۲ بود. نتایج این تحقیق نشان داد که اعضای کتابخانه ملی USGS دارای بهترین و کامل‌ترین اعضای طیفی است. نقشه‌های حاصل از روش SAM دارای صحت ۹۷٪ بود. همچنین، الگوریتم MLE^۳ بهترین طبقه‌بندی‌کننده شناخته شد. چانگ^۴ (۲۰۰۳)، در پژوهشی، از الگوریتم‌های SAM و SID و نیز ترکیب آنها، و همچنین از تصاویر AVIRIS برای آشکارسازی طیفی استفاده کرد. شرستا^۵ و همکاران (۲۰۰۵) از الگوریتم‌های SAM و LSU^۵ برای تعیین میزان شوری خاک روی تصاویر Hymap در اسپانیا استفاده کردند.

اعضای مرجع به‌کاررفته در این تحقیق، هم از اعضای موجود در کتابخانه‌های طیفی و هم اعضای مرجع به‌دست‌آمده از نقاط مشخص زمینی بودند. ارزیابی نتایج این الگوریتم‌های نقشه‌های به‌دست‌آمده از روش تجزیه طیفی نشان داد که مناطق مستعد بیشتر و دارای دقت کلی ۷۵٪ بودند. نقشه‌های به‌دست‌آمده از روش SAM نیز دقت ۶۰٪ داشتند. چن^۶ و همکاران



شکل ۱. نمایی از ناحیه مطالعاتی منتخب در استان لرستان. پلی‌گون قرمز نمایانگر تصویر هایپریون محدوده مورد مطالعه، واقع در شهرستان خرم‌آباد است.

1. Vertex Component Analysis
2. Pixel Purity index
3. Chang
4. D.P. Shrestha
5. Linear Spectral Unmixing
6. Chen
7. Nevada

۲-۲- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

خرم‌آباد، از نظر زمین‌شناسی، در حدود ۳۳ درجه و ۲۹ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۲۱ دقیقه طول شرقی واقع شده و دارای چهار جاده ورودی درجه یک است. جاده اول از شمال، دومی از شرق، سومی از جنوب و جنوب‌غرب (S-SW) و چهارمی از غرب و جنوب‌غرب (W-SW) وارد شهر می‌شوند. در سمت جنوب‌غرب خرم‌آباد، طاق‌دیس مهمی وجود دارد که، در قسمت فوقانی در دیدرس، جنس آن بیشتر از آهک‌های نازک لایه کرتاسه پایین کشیده شده است. این سنگ‌ها، در قسمت مجاور خود، به آهک‌های آبی کرتاسه فوقانی می‌رسند. این دو نوع سنگ مهم‌ترین سنگ‌های قدیمی موجود در اطراف شهر خرم‌آباد به‌شمار می‌روند و در امتداد این طاق‌دیس واقع شده‌اند که طول آن دست‌کم حدود یکصد کیلومتر و از قسمت شمال‌غرب به جنوب‌شرق قرار گرفته است. به‌غیر از سنگ‌های اشاره‌شده، دیگر سنگ‌های موجود مربوط به بخش فوقانی دوران سنوزوئیک، یعنی کواترنر، است که

بیشتر به رسوبات مخروط‌افکنه و زمین‌لغزه مربوط‌اند. در اطراف خرم‌آباد و در فاصله‌ای دورتر، گونه‌های سنگ‌ها متنوع‌تر می‌شوند؛ به‌طوری‌که در فاصله پنج کیلومتری این شهرستان سنگ‌های سازند امیران با جنس شیل، ماسه‌سنگ، کنگلومرا با زمان تقریبی اواخر کرتاسه فوقانی تا اواخر پالئوسن وجود دارند و بعد از آن، سازند کشکان با جنس کنگلومرا، ماسه‌سنگ و مارن‌های قرمز قرار می‌گیرد (آزادبخت، ۱۳۸۲). با توجه به داده‌های میدانی برداشت‌شده در منطقه مورد مطالعه، در نهایت پنج نمونه از این واحدها، که داده‌های حقیقت زمینی معتبری داشتند، در عملیات طبقه‌بندی و آشکارسازی وارد شدند و نتایج نهایی این پژوهش نیز براساس این پنج عضو خالص طیفی عرضه شده است. با توجه به اطلاعاتی که سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور براساس بخشی از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ (شکل ۲) تهیه کرده، مشخصات توصیفی هریک از این واحدها مطابق جدول ۱ است.

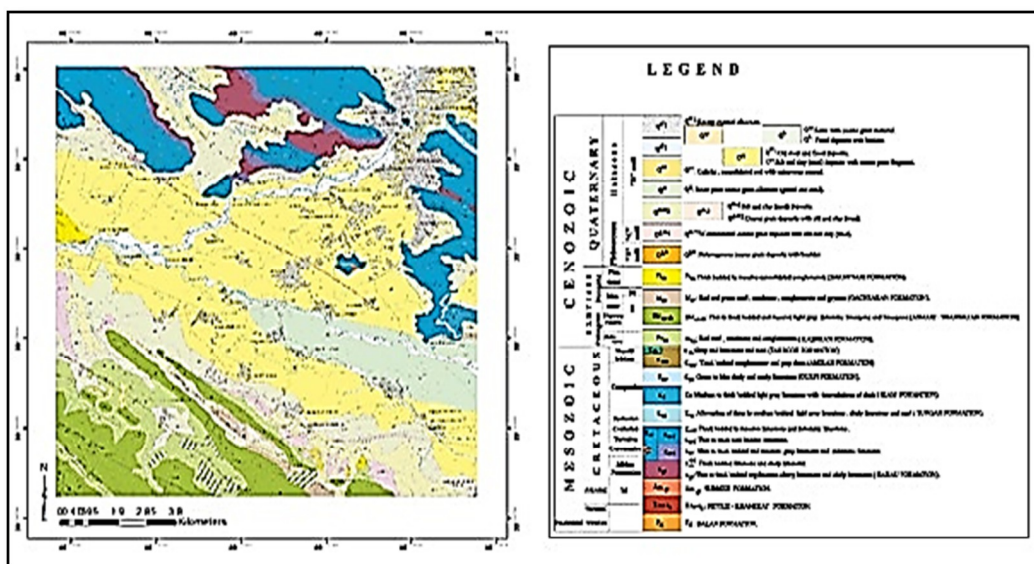
جدول ۱. معرفی مهم‌ترین واحدهای لیتولوژی موجود (اهداف مورد مطالعه) در محدوده مورد بررسی

ردیف	علامت	لیتولوژی
۱	Plbk	کنگلومرای توده‌ای سیمانی با دگرسانی شدید و ماسه‌سنگ اندکی هوازده با چینه‌بندی متقاطع (واحد بختیاری)
۲	Mgs	انیدریت، نمک، مارن خاکستری و قرمز با میان‌لایه‌های گچ، آهک آرژیلیتی و آهک (واحد گچساران)
۳	EMas-sb	سنگ‌های تفکیک‌نشده سازند شهبازان و آسماری
۴	Pekn	کنگلومرای قرمز، ماسه‌سنگ و سلستون (واحد کشکان)
۵	Ksv	سنگ آهک خاکستری و آهک دولومیتی (واحد سروک)

به این ترتیب انجام شد که تعدادی از واحدها، با حضور در منطقه، شناسایی شدند. تیمی متشکل از متخصصان زمین‌شناسی و محققان سنجش از دور، طی چهار مرحله (آبان ۱۳۹۴ / نوامبر ۲۰۱۵)، این داده‌های حقیقت زمینی را از منطقه خرم‌آباد جمع‌آوری کردند. در مجموع، محل نمونه‌های سنگی در هجده نقطه از نمونه‌های سنگی (آسماری، سروک، کشکان، بختیاری، گچساران) به صورت ثبت GPS (شکل ۳) شد. تعدادی از نقاط نمونه‌برداری شده در جدول ۲ آمده است.

از منطقه مورد مطالعه، هجده نمونه سنگی برداشت شد. پس از برداشت و نمونه‌برداری سیستماتیک، از نمونه‌ها مقاطع نازک میکروسکوپی^۱ (شکل ۴) تهیه شد. سپس برای شناسایی اجزای تشکیل‌دهنده این مقاطع، در آزمایشگاه زمین‌شناسی و با استفاده از میکروسکوپ، آنها را به دقت مطالعه کردند.

در این بررسی، برای به‌دست‌آوردن داده‌های حقیقت زمینی با هدف ارزیابی نتایج حاصل از این تحقیق، برداشت داده‌های میدانی از منطقه مطالعاتی



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه مطالعاتی (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور)



شکل ۳. موقعیت نمونه‌های برداشت‌شده از منطقه مطالعاتی

1. thin section

جدول ۲. تعدادی از نقاط نمونه‌برداری شده

X	Y	Zone	سازند	ردیف
۲۵۲۷۷۱	۲۵۲۷۷۱	۳۹	سروک	۱
۲۵۱۳۸۵	۳۷۰۶۶۹۸	۳۹	سروک	۲
۲۵۱۲۸۳	۳۷۰۶۶۴۷	۳۹	سروک	۳
۲۵۲۵۵۸	۳۶۹۶۹۲۹	۳۹	سروک	۴
۲۵۲۱۹۱	۳۷۰۳۶۶۷	۳۹	سروک	۵
۲۵۲۱۷۴	۳۷۰۳۴۷۷	۳۹	سروک	۶
۲۵۲۲۶۱	۳۷۰۳۵۲۰	۳۹	سروک	۷
۲۴۷۷۳۲.۹۵	۳۶۹۷۵۵۸	۳۹	کشکان	۸
۲۵۰۷۴۴.۳۲	۳۶۹۷۳۴۱.۱۴	۳۹	کشکان	۹
۲۵۲۴۹۳	۳۶۹۶۵۸۹	۳۹	کشکان	۱۰
۲۵۱۴۱۱	۳۶۹۶۷۴۱	۳۹	آسماری	۱۱
۲۴۸۶۹۹	۳۶۹۹۲۹۹	۳۹	آسماری	۱۲
۲۵۰۳۴۸	۳۶۹۷۸۱۶	۳۹	آسماری	۱۳
۲۵۱۲۸۴	۳۶۹۶۹۱۸	۳۹	آسماری	۱۴
۲۵۱۴۰۷	۳۶۹۵۹۱۵	۳۹	آسماری	۱۵
۲۴۸۸۵۴	۳۶۹۸۸۹۵	۳۹	گچساران	۱۶
۲۵۲۵۵۸	۳۶۹۶۹۲۹	۳۹	بختیاری	۱۷
۲۵۲۵۴۹	۳۶۹۶۹۶۸	۳۹	بختیاری	۱۸



شکل ۴. (الف) نمایی از واحد سنگی کشکان در جنوب خرم‌آباد (راست)، مقطع میکروسکوپی (چپ)؛ (ب) نمایی از واحد سنگی سروک (راست)، مقطع میکروسکوپی نمونه (چپ)؛ (ج) نمایی از واحد سنگی بختیاری (راست)، مقطع میکروسکوپی نمونه (چپ)؛ (د) نمایی از واحد سنگی گچساران (راست)، مقطع میکروسکوپی (چپ)؛ (ه) نمایی از واحد سنگی بختیاری (راست)، مقطع میکروسکوپی (چپ)

۳-۲-۳ داده‌های مورد استفاده
 ۳-۲-۱- تصویر ماهواره‌ای EO-1 سنجنده هایپریون
 ناسا ماهواره EO-1 را در ۲۱ نوامبر ۲۰۰۰ م. به منظور مقایسه با داده‌های ETM+، به صورت آزمایشی در مدار قرار داد. سه سنجنده متفاوت روی ماهواره EO-1 قرار دارد؛ سنجنده فراطیفی هایپریون، سنجنده چندطیفی ALI و سنجنده فراطیفی AC (Beck, 2003). هایپریون از فناوری جاروب کردن^۳ در تصویربرداری بهره می‌برد که، در هر صحنه تصویری طیفی را از محدوده‌ای به پهنای ۳۰ متر، در جهت حرکت، و ۷/۷ کیلومتر، در جهت عمود بر حرکت، دریافت می‌کند (Folkman et al., 2001). بخش نوری هایپریون از یک تلسکوپ و دو طیف‌سنج

۳-۲-۳ داده‌های مورد استفاده
 ۳-۲-۱- تصویر ماهواره‌ای EO-1 سنجنده هایپریون
 ناسا ماهواره EO-1 را در ۲۱ نوامبر ۲۰۰۰ م. به منظور مقایسه با داده‌های ETM+، به صورت آزمایشی در مدار قرار داد. سه سنجنده متفاوت روی ماهواره EO-1 قرار دارد؛ سنجنده فراطیفی هایپریون، سنجنده چندطیفی ALI و سنجنده فراطیفی AC (Beck, 2003). هایپریون از فناوری جاروب کردن^۳ در تصویربرداری بهره می‌برد که، در هر صحنه تصویری طیفی را از محدوده‌ای به پهنای ۳۰ متر، در جهت حرکت، و ۷/۷ کیلومتر، در جهت عمود بر حرکت، دریافت می‌کند (Folkman et al., 2001). بخش نوری هایپریون از یک تلسکوپ و دو طیف‌سنج

1. Advanced Land Imager
2. Atmospheric Corrector
3. pushbroom
4. Visible and Near-Infrared
5. Short-Wavelength Infrared

استفاده از تصویر زمین‌مرجع‌شده سنجنده‌ی ALI، با دقت تصحیحاتی بسیار بالا و همچنین، وارد کردن ۳۰ نقطه و میزان خطای ۰/۲۳ در نرم‌افزار ENVI و با استفاده از روش Image to Image این کار انجام شد و به دقت ۰/۲۴ رسیدیم.

۳- روش اجرا

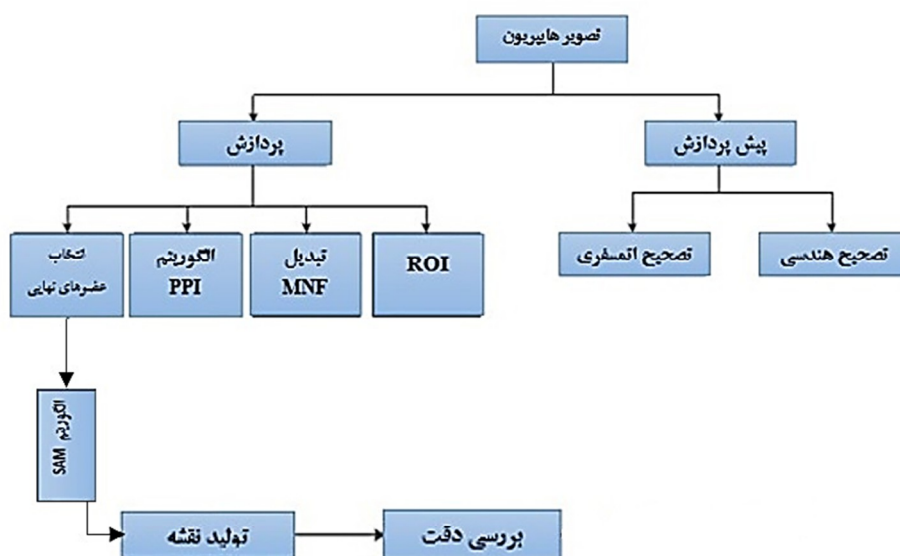
ابتدا داده‌ها، شامل حذف باندهای بد و غیرکالیبره، پیش‌پردازش شدند و سپس نوارشدگی و خطوط بد تصویر برطرف شد. پس از آن، تصحیح اتمسفری و هندسی روی تصویر اعمال و تصویر به مرحله‌ی پردازش رسید.

ادامه‌ی مراحل کار طبق فلوجارت زیر است (شکل ۵):

که در این مطالعه استفاده می‌شود، در ۵ سپتامبر ۲۰۱۰، از منطقه‌ی خرم‌آباد گرفته شده است.

۲-۳-۲- تصویر ماهواره‌ی ALI

سنجنده‌ی ALI یکی از سه سنجنده‌ی است که ناسا، با استفاده از ماهواره‌ی EO۱، در نوامبر ۲۰۰۰ به فضا پرتاب کرد. ALI به‌منظور تصحیح هندسی تصاویری که هایپریون در پنجم ژوئن ۲۰۱۰ گرفت، ۹ باند با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و یک باند پانکروماتیک با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر دارد و تصاویرش را با روش جارویی رو به جلو برداشت می‌کند (Hubbard et al., 2003). از آنجاکه سطح پردازشی تصویر مورد استفاده LIR است، به تصحیحات هندسی نیاز داشت که با



شکل ۵. دیاگرام مراحل اجرای تحقیق

منبع: نگارنده

۳-۱- پیش‌پردازش داده‌های ماهواره‌ای

عملیات پیش‌پردازش مورد نیاز برای آماده‌سازی داده‌ها شامل دو مرحله کلی تصحیح رادیومتریک و تصحیح هندسی است. در این مطالعه، داده‌های سطح یک^۱ تصویر هایپریون^۲ به کار رفت. تصویر مورد استفاده در این مطالعه تصویری است که پردازش‌های «سطح یک» روی آن انجام گرفته است؛ در پردازش‌های سطح یک، پیش‌پردازش‌هایی همچون تصحیح لکه^۴، تصحیح اکوا^۵، حذف پس‌زمینه^۶، تصحیحات پرتوسنجی اولیه^۷، اصلاح پیکسل‌های معیوب^۸ و بررسی کیفیت تصویر صورت گرفته است و ضمن آن، برای تبدیل داده رادیانس به واحد تابش (DN)، روی داده‌های سطح صفر، باندهای مربوط به محدوده فرسوخ نزدیک^۹ (VNIR) در ضریب ۴۰ و باندهای محدوده طول موج کوتاه^{۱۰} (SWIR) در ۸۰ ضرب شده‌اند (Boardman, 1994). به‌منظور تبدیل این داده به بازتابندگی سطحی، باید تصحیحاتی شامل برخی از پیش‌پردازش‌های خاص داده‌های هایپریون و نیز تصحیحات اتمسفری روی این تصاویر انجام گیرد که، در ادامه، بیان خواهد شد. یکی از تصحیح‌های لازم برای داده‌های هایپریون تصحیح اثر انحنای طیفی در تصویر است که با عنوان لبخند^{۱۱} و اخم^{۱۲} از آن یاد می‌شود و بر اثر فناوری تصویربرداری جاروب‌کردن به‌وجود آمده و در تمامی داده‌های هایپریون وجود دارد (سیدین، ۱۳۹۴). اثر لبخند طیفی موجب به‌وجود آمدن گرادیان در تصویر می‌شود که در باندهای منفرد نمی‌توان آن را مشاهده کرد؛ بنابراین، از تبدیل کمینه‌سازی کسر نویز^{۱۳} برای واضح کردن آن استفاده می‌شود (Goodenough et al., 2003). برای حذف اثر لبخند طیفی، تا کنون سه روش مطرح شده است (Chang, 2003): برآزش خطی و درون‌یابی^{۱۴}، ستون‌های میانگین تعدیل‌شده در فضای رادیانس^{۱۵}، ستون‌های میانگین تعدیل‌شده در فضای MNF^{۱۶}. در این مطالعه، از روش تعدیل میانگین ستون در فضای رادیانس در نرم‌افزار ENVI استفاده شد. طبق این روش، برای هر باند منفرد داده‌های هایپریون، مقدار

میانگین هر ستون برابر با مقدار میانگین باند گذاشته می‌شود (Goodenough et al., 2003). نوارهای عمودی از دیگر خطاهای تصاویر هایپریون است که برای برطرف کردن آنها از نرم‌افزار ENVI استفاده شد. داده‌های تصویر، که به‌صورت عدد رقومی بود، ابتدا به رادیانس و سپس به بازتابندگی تبدیل شد. مقادیر رقومی محصولات سطح ۱ هایپریون رادیانس‌های شانزده بیتی بود. باندهای VNIR دارای ضریب مقیاس ۴۰ است و باندهای SWIR ضریب مقیاس ۸۰ دارد (در واحد $\mu\text{m}^2/\text{Wm}^2\text{Sr}1$). بنابراین مطابق رابطه (۱)، مقادیر رادیانس برای باندهای این تصویر تصحیح شد:

$$\text{VNIRL} = \text{Digital Number}/40 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\text{SWIRL} = \text{Digital Number}/80$$

تصحیح اتمسفری سبب تبدیل مقادیر رادیانس به مقادیر انعکاس در پیکسل می‌شود. اطلاعات انعکاس، در مقایسه با رادیانس، مطلوبیت بیشتری دارد زیرا اطلاعات انعکاسی در همه‌جای دنیا، به‌طور نسبی، مشابه است و به ویژگی‌های هر ماده بستگی دارد؛ درحالی‌که اطلاعات رادیانس متفاوت است و تحت تأثیر شاخص‌های گوناگون اتمسفر قرار می‌گیرد. تصحیح جوی تصویر هایپریون و تبدیل رادیانس به بازتابندگی به‌کمک الگوی تصحیح اتمسفری FLAASH^{۱۷} در نرم‌افزار ENVI انجام شد و پس از تصحیح رادیومتریک، تصحیح هندسی نیز روی تصاویر صورت گرفت. برای

1. level-1
2. hyperion
3. <http://earthexplorer.usgs.gov>
4. smear correction
5. echo removal
6. background removal
7. apply calibration
8. repair known bad pixel
9. Visible-Near Infrared
10. Short Wave Infrared
11. smile
12. frown
13. Minimum Noise Fraction Transform (MNF)
14. Moving Linear Fitting and Interpolation
15. Column Mean Adjusted in Radiance Space
16. Column mean Adjusted in MNF space
17. Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes

یک تبدیل خطی است که برای مشخص کردن بعد و حجم اصلی تصویر، جداکردن نویز از دیگر اطلاعات و کاهش میزان پردازش در مراحل بعد استفاده می‌شود. در این تبدیل، ابتدا تصویر به دو بخش نویز و غیرنویز تبدیل می‌شود و سپس بخش غیرنویز را جزء اصلی در نظر می‌گیرند و نویز را حذف می‌کنند (رنگزن و همکاران، ۱۳۹۰).

۳-۲-۳- اجرای اندیس خلوص پیکسل (PPI)

الگوریتم PPI برای پیدا کردن پیکسل‌های دارای خلوص بیشتر (پیکسل‌های انتهایی) در تصاویر فراتطیفی به کار می‌رود. معمولاً این روش در مورد پیکسل‌های مخلوط‌شده استفاده می‌شود. PPI با تصویرسازی تکراری نمودار پراکنش n بعدی داده‌ها در نموداری تصادفی محاسبه می‌شود؛ بدین معنای که هنگام جداکردن پیکسل‌های خالص، نمودار پراکنش دو باند متفاوت را ترسیم می‌کنیم و پیکسل‌هایی را به‌منزله پیکسل‌های خالص جدا می‌کنیم که در انتها و اطراف نقاط پراکنش قرار می‌گیرند. بدین منظور، ده عدد از باندهای نخست خروجی تبدیل MNF را، که بدون نویز است، ورودی به الگوریتم PPI قرار می‌دهیم و خروجی این الگوریتم تصویری است که پیکسل‌های خالص را مشخص می‌نماید.

۳-۲-۴- استخراج طیف مرجع^۱

بسیاری از الگوریتم‌های طبقه‌بندی در تصاویر فراتطیفی، برای شروع پردازش، نیاز به وارد کردن مشخصه‌های طیفی عضوها دارند. به هر کلاس یا عارضه‌ای که در تصویر فراتطیفی طبقه‌بندی یا آشکارسازی شود «عضو» گویند.

۳-۲-۵- استخراج اعضای انتهایی از طریق

شناسایی پیکسل‌های خالص (PPI)

اعضای خالص، از مناطقی که نوع واحد سنگی آن شناسایی شده بود، استخراج شد. با چهار مرحله

تصحیح هندسی تصاویر، از نقاط کنترل زمینی مانند تقاطع جاده‌ها و راه‌ها، که در هر دو تصویر ماهواره‌ای هایپریون و ALI به‌وضوح نمایان بود، استفاده شد. پس از این دو مرحله، تصویر برای اجرای روش‌های تحقیق آماده شد.

۳-۲-۲- پردازش تصویر

پس از مراحل پیش‌پردازش، شامل تصحیح هندسی و اتمسفری، تصویر reflectance ایجادشده باید وارد مرحله پردازش و استخراج اطلاعات مورد نیاز شود که مراحل کار، در ادامه، آمده است.

۳-۲-۱- انتخاب باند

از بین ۲۴۲ باند طیفی سنجنده هایپریون مورد استفاده در این تحقیق، ۱۹۶ باند کالیبره و منحصربه‌فردند. در صورتی که باندهای جذبی آب را حذف کنیم و باندهای با نویز فراوان را هم به‌صورت بصری شناسایی و حذف کنیم، ۱۵۵ باند، مطابق جدول ۳، وارد مرحله پردازش می‌شود.

جدول ۳. باندهای قابل قبول برای ورود به پردازش

محدوده طیفی	باندهای قابل قبول
محدوده VNIR	۸-۵۷
	۷۹
	۸۳-۱۱۹
محدوده SWIR	۱۳۳-۱۶۴
	۱۸۳-۱۸۴
	۱۸۸-۲۲۰

۳-۲-۲- تبدیل کسر کمترین نویز (MNF)

در استفاده از داده‌های فراتطیفی نویز و ابعاد داده را باید کاهش داد. الگوریتم MNF دو عمل حذف همبستگی و افزونگی بین باندها و حذف نویز از تصاویر را هم‌زمان انجام می‌دهد. تبدیل MNF به‌منزله تبدیل کاهش‌دهنده نویز مطرح شده است (Boardman, 1994). این تبدیل

1. endmember

یک محور مختصات، رسم می‌شود (شکل ۷). سپس نقاط به‌دست‌آمده به مبدأ رسم می‌شود و زاویه بین دو خط حاصل زاویه شناسایی پیکسل در نظر گرفته می‌شود. برای به‌دست‌آوردن زاویه α بین دو بردار، از رابطه (۲) حاصل از طیف نقاط تصویر t و مرجع r استفاده شد (Van Der Meer and De Jong Steven, 2001).

$$\alpha = \cos^{-1} \left[\frac{\vec{r} \cdot \vec{t}}{\|\vec{r}\| \|\vec{t}\|} \right] \quad \text{رابطه (۲)}$$

که بدین صورت نیز می‌توان آن را نوشت:

$$\alpha = \cos^{-1} \left[\frac{\sum_{i=1}^{nb} t_i r_i}{\left[\sum_{i=1}^{nb} t_i^2 \right]^{\frac{1}{2}} \left[\sum_{i=1}^{nb} r_i^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \right] \quad \text{رابطه (۳)}$$

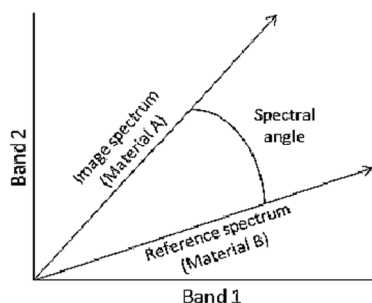
در این فرمول:

bn : تعداد باندها

ti : طیف مورد آزمایش

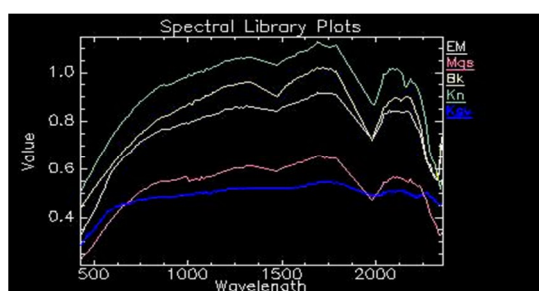
ri : طیف مرجع.

مهم‌ترین مزیت الگوریتم SAM سادگی ساختار آن و استفاده سریع برای نمایش شباهت طیفی بین طیف تصویر و طیف مرجع محسوب می‌شود. مشکل طبقه‌بندی، با استفاده از این الگوریتم، در نظر نگرفتن مشکل پیکسل‌هایی با طیف مخلوط است (فهم‌نژاد، ۱۳۸۶). در شکل ۸، نقشه حاصل از الگوریتم SAM آمده است.



شکل ۷. زاویه بین بردارهای طیف مورد آزمایش و طیف استاندارد در روش SAM (Kruse et al., 1993)

برداشت و پیمایش میدانی و ثبت مختصات واحدهای سنگی، با استفاده از دستگاه GPS، با دقت بالا و استفاده از نقاط نمونه‌برداری شده‌ای که با پیکسل‌های خالص استخراج‌شده از الگوریتم PPI منطبق شده بودند، طیف مرجع میانگین واحدها را، از خود تصویر، استخراج و این طیف مرجع، به‌منزله ورودی، برای الگوریتم طبقه‌بندی استفاده شد (شکل ۶).



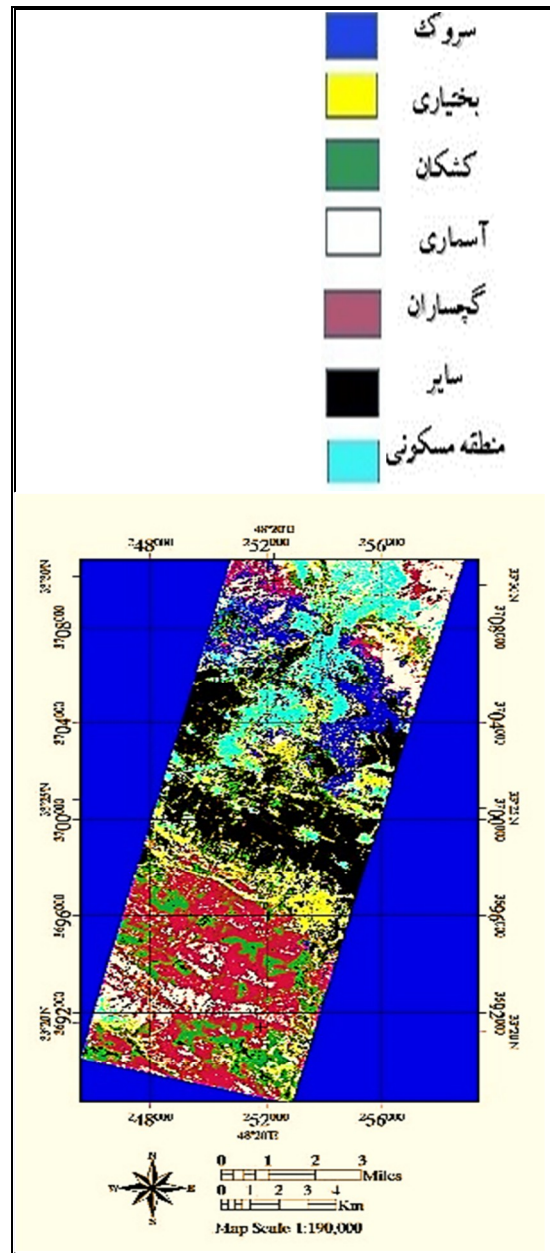
شکل ۶. طیف استخراج‌شده از تصویر مربوط به واحدهای سنگی منطقه مورد مطالعه

۴- نقشه‌برداری زاویه طیفی (SAM)

نقشه‌برداری زاویه طیفی روشی برای طبقه‌بندی هدایت‌شده و شیوه‌ای کارآمد به‌منظور مقایسه طیف تصاویر با طیف استاندارد یا طیف مرجع است. الگوریتم این روش مشابهت بین دو طیف را، با زاویه طیفی بین آن دو، محاسبه می‌کند (شکل ۷). 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، جهت بردارها اهمیت دارد و نه طول آن‌ها و به همین علت، میزان روشنایی پیکسل در طبقه‌بندی آن تأثیری ندارد. هرچه مقدار زاویه (بین ۰ تا ۱) کمتر باشد، شناسایی دقیق‌تر خواهد بود (Manolakis et al., 2003). در صورتی که مقدار زاویه ۱ باشد، کل تصویر را مورد نظر تلقی می‌کنند. مثلاً برای مقایسه یک پیکسل، طیف پیکسل مورد نظر با طیف همان پیکسل، در بین طیف‌های مرجع روی دو باند در

طبقه‌بندی است که این داده‌های معلوم را واقعیت زمینی^۱ یا داده‌های مرجع^۲ می‌نامند (فاطمی و رضایی، ۱۳۹۱). در این پژوهش، تصویر کلاس‌بندی‌شده تهیه شد. سپس، برای ارزیابی صحت، از نقاط GPS برداشت‌شده با مشاهدات زمینی، در جایگاه نقشه واقعیت زمینی، استفاده شد تا از طریق محاسبه ماتریس خطا^۳، دقت طبقه‌بندی این روش مشخص شود. در نهایت، این روش برای برآورد نقشه واحدهای سنگی معرفی شد. نتایج ارزیابی صحت معمولاً به صورت ماتریس خطا بیان می‌شود که در این صورت، انواع پارامترها و مقادیری که دقت و یا نوعی خطا در نتایج را نشان می‌دهند از این ماتریس استخراج می‌شوند. این ماتریس حاصل مقایسه پیکسل به پیکسل پیکسل‌های معلوم با پیکسل‌های متناظر در نتایج طبقه‌بندی است. داده‌های زمینی در ستون‌ها و داده‌های مربوط به نتایج طبقه‌بندی در سطرهای ماتریس خطا آورده می‌شود. اعدادی که روی قطر اصلی ماتریس قرار می‌گیرند تعداد پیکسل‌هایی را مشخص می‌کنند که برچسب آن‌ها در دو مجموعه داده هم‌خوانی دارد یا، به عبارت دیگر، تعداد پیکسل‌هایی که درست طبقه‌بندی شده‌اند روی این قطر قرار می‌گیرد. عناصر غیرقطری مجموعه خطاها محسوب می‌شوند. برای بیان صحت و خطا، پارامترهای متعددی بر مبنای ماتریس خطا استخراج می‌شود. در جدول ۴، صحت کلی و ضریب کاپا آمده است.

در این پژوهش، نتایج ارزیابی به صورت صحت کلی^۴ و ضریب کاپا^۵ عرضه شده است. صحت کلی عبارت است از میانگینی از صحت طبقه‌بندی که نسبت پیکسل‌های صحیح طبقه‌بندی‌شده به جمع کل پیکسل‌های معلوم را نشان می‌دهد و براساس رابطه (۴) به دست می‌آید (Villa et al., 2011). ضریب کاپا دقت



شکل ۸. نقشه حاصل از الگوریتم SAM

۵- ارزیابی نتایج طبقه‌بندی

راه‌های گوناگونی برای بررسی ارزیابی نتایج طبقه‌بندی وجود دارد. متداول‌ترین روش، برای ارزیابی کمی صحت طبقه‌بندی، انتخاب تعدادی پیکسل نمونه معلوم و مقایسه کلاس آنها با نتایج

1. ground truth
2. reference data
3. error matrix
4. overall accuracy
5. Kappa coefficient

جدول ۴. ماتریس خطا، صحت کلی و ضریب کاپا برای نتایج الگوریتم SAM

کلاس	داده زمینی (پیکسل‌های آزمایشی)						تمامی پیکسل‌ها
طبقه‌بندی نشده	سروک	گچساران	آسماری	کشکان	بختیاری	مسکونی	۰.۸۶
سروک	۰.۴۴	۱.۴۰	۱.۴۰	۰	۴.۲۴	۱.۳۵	۵۴.۹۵
گچساران	۷۹.۹۶	۳.۱۷	۰.۴۵	۰.۰۰	۸.۹۳	۳.۷۱	۹.۱۸
آسماری	۲.۸۸	۳۱.۸۱	۹.۷۵	۱۷.۴۷	۱۲.۷۵	۱.۰۵	۳.۸۳
کشکان	۶.۰۸	۴.۴۲	۷۱.۲۷	۰	۱۷.۱۳	۱.۱	۴.۲۷
بختیاری	۰.۰۰	۰.۸۵	۰	۵۵.۰۸	۵.۰۸	۰	۱۱.۹۱
مسکونی	۵.۵۷	۱۱.۶۶	۱۱.۸۲	۱.۰۱	۵۶.۹۳	۴.۹	۴.۸۰
سایر	۳.۷۱	۱.۰۵	۱.۱۰	.	۴.۹۰	۹۳.۳۱	۱۰.۲
تمامی پیکسل‌ها	۳.۳۴	۲۲.۸۹	۰	۳۴.۷۴	۶.۷۶	۰	۱۰۰.۰۰
	۱۰۰.۰۰	۱۰۰.۰۰	۱۰۰.۰۰	۱۰۰.۰۰	۱۰۰.۰۰	۱۰۰.۰۰	۶۸.۸۳

ضریب کاپا: ۰.۴۹

دقت کلی: ۶۸.۸۳

با صحت کلی ۶۸/۸۳٪ و ضریب کاپای ۰/۴۹ در نظر گرفته شد.

۶- نتیجه‌گیری

تهیه نقشه واحدهای سنگی، طی سالیان متمادی و پس از مطالعات و پژوهش‌های گسترده، در حال حاضر به نقطه‌ای رسیده است که به جای حضور در منطقه و کار میدانی و صرف هزینه و زمان زیاد، به کمک دانش سنجش از دور و استفاده از تصاویر فراطیفی، طی زمان کوتاه و با دقت بالا، انجام‌پذیر است. در این تحقیق، الگوریتم SAM برای شناسایی واحدهای سنگی ارزیابی شد.

با توجه به نتایجی که از محاسبه مساحت واحدهای سنگی متفاوت موجود در منطقه مورد مطالعه به دست آمده است (جدول ۵)، واحدهای سنگی گچساران بالاترین آشکارسازی مساحت با روش طبقه‌بندی یادشده را دارند.

طبقه‌بندی را در مقایسه با یک طبقه‌بندی کاملاً تصادفی محاسبه می‌کند؛ به این معنا که مقدار کاپا دقت طبقه‌بندی را به نسبت حالتی به دست می‌دهد که تصویری کاملاً تصادفی طبقه‌بندی شود و از طریق رابطه (۵) به دست می‌آید (Richards et al., 1999).

$$OA = \frac{\sum_{i=1}^C E_{ii}}{N} \quad \text{رابطه (۴)}$$

C : تعداد کلاس‌ها

N : تعداد کل پیکسل‌های معلوم

E_{ii} : اعضای قطری ماتریس خطا.

رابطه محاسبه این ضریب به صورت زیر است:

$$kappa = \frac{N \sum_{i=1}^k x_{ii} - \sum_{i=1}^k (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^k (x_{i+} * x_{+i})} \quad \text{رابطه (۵)}$$

در این رابطه، N تعداد کل پیکسل‌های واقعیت زمینی، x_{i+} مجموع عناصر سطر i و x_{+i} مجموع عناصر ستون i است. این الگوریتم و صحت آن در طبقه‌بندی تصاویر فراطیفی ارزیابی شد و در طبقه‌بندی، الگوریتم

۷- منابع

- آزادبخت، س.، ۱۳۸۲، سنگ‌چینه‌نگاری و زیست‌چینه‌نگاری سازند سورگه در شرق خرم‌آباد (زاگرس)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه پیام نور تهران، دانشکده علوم پایه، گروه چینه‌شناسی و فسیل‌شناسی، تعداد صفحات ۱۳۵.
- رنگزن، ک.، صابری، ع.، جوکار، ا.، محمدیان، ف.، ۱۳۹۰، شناسایی و تخمین سطح زیرکشت اراضی کشاورزی با استفاده از داده‌های بهنگام سنجنده‌های پیرون، همایش ژئوماتیک ۹۰.
- سیدین، ع.، ۱۳۹۴، اکتشاف چشمه‌های نفتی (هیدروکربنی) با استفاده از روش‌های آشکارسازی هدف در تصاویر ابرطیفی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، دانشکده نقشه‌برداری.
- شریفی، ا.ر.، ۱۳۸۷، طبقه‌بندی تصاویر ابرطیفی از طریق تجزیه و تحلیل امضای طیفی پدیده‌ها، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته سنجش از دور و GIS، دانشگاه تهران.
- علوی پناه، س.ک.، ۱۳۹۲، کاربرد سنجش از دور در علوم زمین، تهران، مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران، چاپ چهارم.
- فاطمی، س.ب.، رضایی، ی.، ۱۳۸۵، مبانی سنجش از دور، انتشارات آزاده.
- فهم‌نژاد، ح.، ۱۳۸۶، ارزیابی تفکیک نوع محصولات کشاورزی با استفاده از داده‌های سنجش از دور (سنجنده فراطیفی هایپریون)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، دانشکده نقشه‌برداری.
- نقشه زمین‌شناسی خرم‌آباد، مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

جدول ۵. مساحت واحدهای سنگی به دست آمده از الگوریتم مورد

استفاده (واحد: کیلومتر مربع)

واحد سنگی	الگوریتم SAM
سروک	۲۳۰۴/۰۹
گچساران	۴۳۸۷/۳۲
آسماری	۱۶۹۹/۴۷
کشکان	۱۹۸۴/۵۹
بختیاری	۲۳۷۱/۰۵

ارزیابی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مقایسه نقشه واحدهای سنگی، که نقشه آن‌ها با استفاده از الگوریتم SAM حاصل شد، با نقشه‌هایی که پیش‌تر سازمان سنگی استان لرستان و سازمان زمین‌شناسی کشور تهیه کرده بودند این واقعیت را بیان می‌کند که الگوریتم SAM، با صحت کلی ۶۸/۸۳٪ و ضریب کاپای ۰/۴۹٪، دارای صحت نسبتاً خوبی است (جدول ۴). همچنین نتایج نشان می‌دهد، با در نظر گرفتن شرایط منطقه، برای طبقه‌بندی منطقه بر اساس واحدهای سنگی موجود در تحقیقات تهیه نقشه‌های سنگی، الگوریتم SAM روشی کارآمد به‌شمار می‌رود. با توجه به قابلیت بسیار تصاویر فراطیفی در تفکیک‌پذیری پدیده‌ها، شناسایی و جداسازی واحدهای سنگی، استفاده از این تصاویر سهولت و دقتی بیشتر از روش‌های دیگر، مانند استفاده از تصاویر چندباندی، دربر دارد؛ بنابراین، پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آتی، برای شناسایی واحدهای سنگی با ارزش، از سنجنده‌های با قدرت تفکیک مکانی بیشتر از هایپریون (با اندازه پیکسل ۳۰ متر) استفاده شود تا به تهیه نقشه‌هایی با دقت بالاتر بینجامد.

- Barry, P., 2001, **EO-1/ Hyperion Science Data User's Guide, Level 1_B**, TRW Space, Defense & Information Systems.
- Beck, R., 2003, **EO-1 User Guide**, Ed. University of Cincinnati, PP. 1–74.
- Boardman, J.W., 1994, **Automating Spectral Unmixing of AVIRIS Data Using Convexgeometry Concepts**, In :Summaries of the 4th Annual JPL Air borne Geoscience Workshop, Pasadena, PP. 11–14.
- Camps-Valls, G., Tuia, D., Bruzzone, L. & Benediktsson, J.A., 2014, **Advances in Hyperspectral Image Classification: Earth Monitoring with Statistical Learning Methods**, IEEE Signal Processing Magazine, 31(1), PP. 45–54.
- Chang, C.I., 2003, **Hyperspectral Imaging: Techniques for Spectral Detection and Classification**, Orlando, FL: Kluwer Academic.
- Chen, X., Warner, T.A. & Campagna, D.J., 2007, **Integrating Visible, Near-Infrared and Short-Wave Infrared Hyperspectral and Multispectral Thermal Imagery for Geological Mapping at Cuprite**, Nevada, Remote Sensing of Environment, 110(3), PP. 344–356.
- Folkman, M., Pearlman, J., Liao, L.B. & Jarecke, P.J., 2001, **EO-1/Hyperion Hyperspectral Imager Design, Development, Characterization, and Calibration**, in Second International AsiaPacific Symposium on Remote Sensing of the Atmosphere, Environment, and Space, PP. 40–51.
- Goodenough, D., Niemann, K.O., Pearlman, J.S., Hao, C., Han, T., Murdoch, M. & West, C., 2003, **Processing Hyperion and ALI for Forest Classification**, Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, Vol. 41, PP. 1321–1331.
- Hubbard, B.E., Crowley, J.K. & Zimbelman, D.R., 2003, **Comparative Alteration Mineral Mapping Using Visible to Shortwave Infrared (0.4–2.4 μm) Hyperion, ALI, and ASTER Imagery**, Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, No. 6, PP. 1401–1410.
- Kruse, F., Lefkoff, A., Boardman, J., Heidebrecht, K., Shapiro, A., Barloon, P. & Goetz, A., 1993, **The Spectral Image Processing System (SIPS) - Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data**, Remote Sensing of Environment, Vol. 44, Issues 2–3, PP. 145–163.
- Kurse, F.A., Boardman, J.W. & 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.
- Manolakis, D. & Marden, G.A., 2003, **Shaw,—Hyperspectral Image Processing for Automatic Target Detection Applications**, Lincoln Laboratory Journal, 14, PP. 154–176.
- Oommen, T., Misra, D., Twarakavi, N.K., Prakash, A., Sahoo, B. & Bandopadhyay, S., 2008, **An Objective Analysis of Support Vector Machine Based Classification for Remote Sensing**, Mathematical Geosciences, 40(4), PP. 409–424.
- Rajendran, S., Srinivasamoorthy, K. & Aravindan, S., 2007, **Mineal Exploration: Recent Strategies**, New India Publishing.
- Richards, J.A. & Jia, X., 1999, **Remote Sensing Digital Image Analysis—Springer**, Berlin, Germany.
- Shrestha, D.P., Margate, D.E., Van der Meer, F. & Anh, H.V., 2005, **Analysis and Classification of Hyperspectral Data for Mapping Land Degradation: An Application in Southern Spain**, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 7(2), PP. 85–96.
- Van Deer Meer, F.D. & De Jong Steven, M., 2001, **Imagins Spectrometry: Basic Principle and Prospective Applications**, Academic press.
- Villa, A., Benediktsson, J.A., Chanussot, J. & 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.