



سنجش از دور

و
GIS ایران



سال سوم، شماره اول، بهار ۱۳۹۰
Vol.3, No.1, Spring 2011

سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS

۹۱-۱۰۶

استخراج نواحی دارای پتانسیل طلا در منطقه غرب مشکین شهر با استفاده از تصاویر HYPERION

آذر ارغوانیان^۱، روشنگ درویش زاده*^۲، ایرج رسا^۳، امین حسینی اصل^۴

۱. کارشناس ارشد سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

۲. استادیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

۳. دانشیار گروه زمین شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

۴. مربی گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۰/۹/۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۲/۱۸

چکیده

شناسایی و اکتشاف کانی‌های مناطق به روش سنتی از طریق عملیات زمینی و کارهای میدانی انجام می‌شود. این روش، زمان و هزینه و نیروی انسانی فراوان می‌طلبد و گاه نیز با خطا همراه است. امروزه علم سنجش از دور با بهره‌گیری از رفتارهای طیفی منحصر به فرد کانی‌ها، به عنوان روشی جدید، مورد استفاده علم اکتشاف معدن و زمین‌شناسی قرار گرفته است. با پیشرفت علم سنجش از دور و پیدایش سنجش از دور فراطیفی، امکان دریافت تصاویر با قابلیت و توانایی طیفی بسیار بالا و دسترسی به اطلاعات وسیع‌تر و دقیق‌تر در این زمینه فراهم شده است. در پژوهش حاضر از تصاویر Hyperion ماهواره EO-۱ که در تاریخ ۴ سپتامبر ۲۰۰۴ دریافت شده، برای شناسایی نواحی دارای طلا در منطقه مشکین‌شهر واقع در شمال‌غرب ایران استفاده شده است. دلیل انتخاب طلا، اهمیت و ارزش و کمیاب بودن آن است. انتخاب اعضای مرجع این تحقیق، از عملیات میدانی قبلی در منطقه و اعضای مرجع حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم PPI صورت گرفته است. سپس الگوریتم‌های SAM و LSU با اعضای مرجع انتخاب شده روی تصویر اجرا شدند. در نهایت نقشه طبقه‌بندی شده حاصل از این روش‌ها با نقشه‌های موجود و داده‌های زمینی مقایسه شد و میزان صحت آنها بررسی گردید. دقت پیاده‌سازی روش SAM با انتخاب اعضای مرجع حاصل از PPI، به بیشترین میزان ۹۴ (درصد) بوده است، که خود نشان از اهمیت تصاویر فراطیفی و روش SAM در استخراج نواحی دارای پتانسیل و آنومالی‌های طلا دارد.

کلیدواژه‌ها: اکتشاف، تجزیه طیفی خطی، طلا، نقشه‌بردار زاویه‌ای طیفی، هایپریون.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، اوین دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم زمین، گروه سنجش از دور و GIS، تلفن: ۲۹۹۰۳۱۲۲

۱- مقدمه

منطقه را با نتایج بهتری فراهم می‌سازد (Kurse, 2003). بازتابش کانی‌ها و سنگ‌ها، اطلاعات مفیدی را در مورد عناصر و ترکیب کانی‌شناسی آنها در اختیار قرار می‌دهد.

کشور ایران سرشار از کانی‌های مختلف و معادن آنهاست که بسیاری‌شان هنوز اکتشاف هم نشده‌اند (Gorbani, 2004). از میان کانی‌های مختلف موجود در کشور، فلز طلا به دلیل کمیابی و ارزش اقتصادی آن، اهمیت ویژه‌ای دارد (Babazadeh, 2004). منطقه مورد مطالعه (شهرستان مشکین‌شهر، استان اردبیل) از جمله مناطقی است که در آن سنگ‌های دربردارنده طلا یافت می‌شوند.

از آنجا که نقشه‌ها و اطلاعات موجود در خصوص توزیع پراکندگی این کانی‌ها معمولاً به روش سنتی تهیه می‌شوند و دقت چندان مطلوبی ندارند؛ و با توجه به اینکه تحقیقات کانی‌شناسی انجام‌شده در محدوده سنجش از دور در کشور ما عمدتاً با تصاویر سنجنده‌های چندطیفی صورت گرفته‌اند، در تحقیق حاضر کوشش بر آن بوده است که با بهره‌گیری از قابلیت‌های فناوری سنجش از دور فراطیفی امکان اکتشاف این کانی در منطقه مطالعاتی فراهم آید.

Xianfeng Chen و همکاران در سال ۲۰۰۷، از تصاویر AVIRIS و داده‌های چندطیفی حرارتی MODIS/ASTER به نام MASTER برای تهیه نقشه زمین‌شناسی منطقه Cuprite.Nevada استفاده کردند و بدین منظور الگوریتم‌های SAM^۱ و SFF^۲ را به کار بردند. برای تقویت عوارض جانبی منحنی‌های طیفی الگوریتم Continuum remover نیز روی داده‌ها اعمال شد. در مرحله بعد با استفاده از نقاط نمونه‌برداری زمینی و محاسبه ضریب کاپا برای داده‌های تصاویر میزان تطبیق نتایج حاصل از اعمال الگوریتم‌های تک‌تک با داده‌های زمینی ارزیابی شدند. به‌طور کلی

در چند دهه اخیر، سنجش از دور به موازات علمی همچون ژئوفیزیک و ژئوشیمی، به‌عنوان نوعی معیار یا استاندارد در بسیاری از برنامه‌های اکتشاف معدن - به‌ویژه از مسافت دور - و در نواحی نقشه‌برداری با دقت کم در جهان به‌طور عمومی و گسترده پذیرفته شده است. امروزه علم سنجش از دور با بهره‌گیری از رفتارهای طیفی منحصر به فرد کانی‌ها، به عنوان روشی جدید در اکتشاف معدن و زمین‌شناسی مورد استفاده قرار گرفته است (Alavipanah, 2005; Kurse, 2003). دلایل به‌کارگیری سنجش از دور در اکتشاف کانی‌ها عبارتند از:

- نقشه‌برداری خطواره‌های ناحیه‌ای و روندهای ساختاری در طول مناطقی که احتمال کانسارسازی در آنها وجود دارد؛

- نقشه‌برداری الگوهای شکستگی محلی که ممکن است کنترل‌کننده توده‌های معدنی باشند؛

- شناسایی مناطق دگرسان‌شده مرتبط با توده‌های کانسار؛ و

- تهیه اطلاعات زمین‌شناسی پایه (Sabins, 1996). از ویژگی‌های عمده و مهمی که باعث به‌کارگیری تکنیک‌های سنجش از دور در اکتشاف مواد معدنی شده، این است که با کمک آن می‌توان کانی‌ها و عناصر ویژه‌ای را که با مواد معدنی مخصوصی همراه‌اند - نه خود ماده معدنی - شناسایی کرد؛ و این امر کمک بزرگی در اکتشاف کانی‌هاست (Vincent, 1997). پیشرفت سنجش از دور و پیدایش سنجش از دور فراطیفی، امکان دریافت تصاویر دارای قابلیت و توانایی طیفی بسیار بالا و دسترسی به اطلاعات وسیع‌تر و دقیق‌تر را در این زمینه فراهم ساخته است. در سنجش از دور فراطیفی، اندازه‌گیری بازتابش پدیده‌های سطح زمین در باندهای بسیار باریک (۱۰ نانومتر یا کمتر) در محدوده طیفی ۰/۴ تا ۲/۵ میکرون امکان‌پذیر است. وجود باندهای طیفی باریک و فراوان تصاویر فراطیفی، امکان مطالعات زمین‌شناختی و شناسایی کانی‌های

1. Spectral angular mapper
2. Spectral feature fitting

دقت کلی ۷۵ درصد بودند. نقشه‌های به‌دست‌آمده از روش SAM نیز دقت ۶۰ درصد داشتند.

در این مطالعه، تصاویر هایپریون برای شناسایی مناطق دربردارنده طلا در شهرستان مشکین شهر به کار رفته‌اند. در این مقاله کوشش شده است با در نظر گرفتن نتایج کار محققان پیشین و توجه به شرایط لیتولوژیک و زمین‌شناختی خاص منطقه مطالعاتی، روش‌های نقشه‌برداری زاویه‌ای و تجزیه طیفی خطی به‌منظور تفکیک مناطق دارای طلا به کار برده شود.

۲- موقعیت و خصوصیات زمین‌شناختی منطقه مطالعاتی

منطقه مطالعاتی این تحقیق، بین طول‌های جغرافیایی $37^{\circ} 22'$ و $39^{\circ} 39'$ شرقی و عرض جغرافیایی $59^{\circ} 37'$ و $39^{\circ} 38'$ شمالی در غرب شهرستان مشکین شهر واقع شده است (شکل ۱). گستره مورد بررسی در واقع ادامه جنوبی کمربند متالوژنیک و ولکانو - پلوتونیک قفقاز کوچک، واقع در پهنه ساختمانی البرز - آذربایجان است.

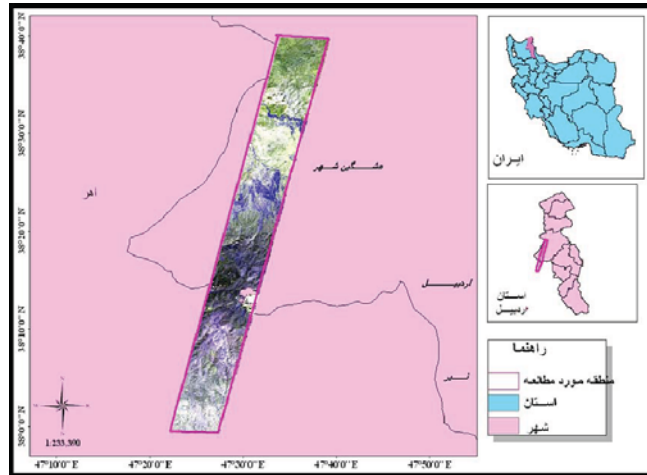
واحدهای آتشفشانی - رسوبی ائوسن که ترکیبی از پیروکسن آندزیت، تراکی آندزیت، تراکی بازالت و آندزیت را دربرمی‌گیرند، بیشترین گسترش را در سطح منطقه دارند. ماگماتیسم منطقه - که شامل گرانودیوریت، دیوریت، کوارتز مونزونیت و مونزونیت است، با نفوذ در کمپلکس آتشفشانی - رسوبی ائوسن، باعث دگرسانی گرمایی گسترده همراه با گسلش و کانی‌سازی شده است.

عملکرد الگوریتم SAM برای تفکیک و طبقه‌بندی کانی‌ها بهتر و دقیق‌تر از دیگر الگوریتم‌ها ارزیابی شده است. Bernard E. Hubbard و همکاران در سال ۲۰۰۵ از تصاویر Hyperion و ترکیبی از تصاویر ASTER، ALI برای تهیه نقشه کانی‌شناسی منطقه شیلی - بولیوی استفاده کردند. ابتدا برای شناسایی اعضای مرجع الگوریتم‌های PCA^1 و MNF^2 و PPI^3 و LSU^4 روی تصاویر اعمال شدند. مقایسه نتایج الگوریتم‌ها بر روی داده‌ها مشخص ساخت که در وهله نخست الگوریتم SAM در جداسازی کانی‌ها و به‌خصوص هماتیت و آلونیت بهتر از الگوریتم LSU عمل می‌کند، دوم اینکه کارایی داده‌های Hyperion با داشتن نسبت S/N^5 پایین و قابلیت تفکیک طیفی بالا، در مقایسه با داده‌های ASTER-ALI با نسبت S/N بالا و قابلیت تفکیک طیفی پایین، برای نقشه‌کشی کانی‌ها اندکی بهتر است.

علیرضا شریفی در سال ۱۳۸۷ از تصاویر AVIRIS و اعمال الگوریتم‌های SVM^6 ، MF^7 ، NN^8 ، BE^9 ، SAM ، SFF^{10} ، MLE^{11} ، برای تهیه نقشه کانی‌شناسی منطقه کوپریت استفاده کرد. اعضای مرجع به کار رفته در این تحقیق از کتابخانه‌های طیفی JPL، JHU، USGS و اعضای مرجع حاصل از اعمال الگوریتم‌های PPI^{11} ، VCA^{11} بودند. نتایج این تحقیق نشان دادند که اعضای کتابخانه طیفی USGS دارای بهترین و کامل‌ترین امضای طیفی‌اند. نقشه‌های حاصل از روش SAM دارای دقت ۹۷ درصد بودند. همچنین الگوریتم MLE به‌عنوان بهترین طبقه‌بندی‌کننده شناخته شد.

D.P. Shrestha و همکاران در سال ۲۰۰۵ از الگوریتم‌های SAM و LSU برای تعیین میزان شوری خاک روی تصاویر Hymap در اسپانیا استفاده کردند. اعضای مرجع به کار رفته در این تحقیق، هم از اعضای موجود در کتابخانه‌های طیفی بودند و هم اعضای مرجع به‌دست‌آمده از نقاط مشخص زمینی. با ارزیابی نتایج این الگوریتم‌های نقشه‌های به‌دست‌آمده از روش تجزیه طیفی نشان‌دهنده مناطق مستعد بیشتر و دارای

1. Principal component analyst
2. Minimum/maximum noise fraction
3. Pixel Purity index
4. Linear Spectral Unmixing
5. Signal/noise
6. Support Vector Machines
7. Matched Filtering
8. Neural Network
9. Bayesian Simple Classification
10. Maximum Likelihood Estimation
11. Vertex Component Analysis



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه (تصویر هایپریون روی نقشه شهرهای منطقه)

ب) تصویر ماهواره‌ای لندست

تصویر ماهواره‌ای لندست ۷ - سنجنده ETM^+ به صورت اورتو^۲ به منظور تصحیح هندسی تصاویر هایپریون تصویر باند ۸ سنجنده ETM، گرفته شده در روز پنجم ژوئن سال ۲۰۰۰ میلادی که دارای اندازه پیکسل ۱۵ متر است و منطقه‌ای به عرض ۱۸۵ کیلومتر را تصویربرداری می‌کند، به منظور تصحیح هندسی تصویر هایپریون به کار رفته است.

۳-۱-۲- داده‌های پایه

الف) اطلس زمین‌شناسی کانی‌ها و عناصر فلزی

ایران

این اطلس در مقیاس ۱:۵۰۰,۰۰۰ و با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ تهیه شده است (سازمان زمین‌شناسی).

ب) گزارش‌های موجود در سازمان صنایع و معادن

استان اردبیل به عنوان داده‌های زمینی طلا و مس گزارش‌ها و داده‌های میدانی موجود در سازمان صنایع و معادن استان اردبیل به عنوان داده‌های زمینی طلا

1. stripping
2. Ortho rectified

توده‌های نفوذی مونزونیت، کوارتز مونزونیت و سیالات گرمابی مرتبط با آنها حاوی کانی‌سازی از نوع پلی‌متال (عناصر Cu, Mo, Pb و فلزات Au و Ag) هستند. سنگ‌های پلیوسن بیشتر شامل داسیت، ریولیت‌اند، و دگرسانی مشخصی ندارند. رسوبات آبرفتی سست و قدیمی و پادگانه‌های آهکی واحدهای کواترنر منطقه را تشکیل می‌دهند.

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- داده‌های مورد استفاده

۳-۱-۱- داده‌های ماهواره‌ای

الف) تصویر ماهواره‌ای EO-۱، سنجنده هایپریون

تصویر ماهواره‌ای مورد استفاده در تحقیق مربوط به سنجنده هایپریون ماهواره EO-۱ با ۲۴۲ باند طیفی است، که از کل باندهای تصویر، تعداد ۴۴ باند طیفی در طول پردازش سطح B1 به میزان صفر تنظیم، ۳۴ باند طیفی نیز به دلیل وجود نویز زیاد و نواری شدن^۱ شدید حذف و در نهایت ۱۶۴ باند به منظور پردازش انتخاب شدند. اندازه پیکسل تصویر این ماهواره ۳۰ متر است و محدوده‌ای با عرض ۶/۶ کیلومتر در جهت عمود بر حرکت ماهواره را پوشش می‌دهد.

داده‌های تصویر که به صورت Digital number بودند، ابتدا به رادیانس تبدیل شدند و سپس به بازتابندگی^۱ مقادیر رقومی محصولات سطح ۱ هایپریون، رادیانس‌های ۱۶ بیتی بودند. باندهای SWIR دارای ضریب مقیاس ۸۰ هستند و باندهای VNIR ضریب مقیاس ۴۰ دارند (در واحد $Wm^{-2}Sr^{-1}\mu m$). بنابراین مطابق رابطه (۱) مقادیر رادیانس برای باندهای این تصویر تصحیح شدند:

رابطه (۱)

$$VNIRL = DigitalNumber/40$$

$$SWIR L = Digital Number/80$$

بازتاب

استفاده از مقادیر بازتاب در مقایسه با مقادیر رادیانس، دو مزیت دارد:

- تأثیر کسینوس زاویه زینت خورشیدی متفاوت، به نسبت اختلاف زمانی بین برداشت داده‌ها، می‌تواند برداشته شود.
- مقادیر مختلف تابش خورشیدی بیرون اتمسفر - که ناشی از اختلاف‌های باند طیفی است - تصحیح می‌شود.

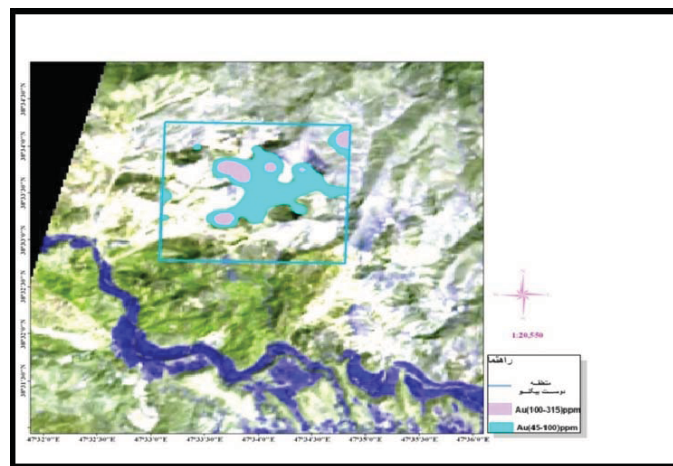
مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این گزارش‌های در مورد اکتشاف کانی‌های فلزات سنگین در منطقه شمال غرب و غرب مشکین شهر انجام شده‌اند و مناطق حاوی این فلزات مشخص شده است. روش کار در این گزارش‌ها به این صورت بود که در منطقه دوست بیگلو که در شمال غرب مشکین شهر واقع است و در شکل ۲ مشخص است، نمونه‌برداری شبکه‌ای با فاصله ۲۰۰ متر انجام شده است و با استفاده از آنها مناطق دربردارنده طلا با عبارهای مختلف مشخص شده است. از اطلاعات و داده‌های این گزارش‌ها به عنوان داده‌های زمینی استفاده شده است (Asvadi, 1999; Mohammadi, 2004). در شکل ۲ بخشی از نواحی استخراج شده برای عبارهای مختلف طلا از این گزارش‌ها آمده است.

۳-۲- پیش پردازش داده‌های ماهواره‌ای

عملیات پیش پردازش مورد نیاز برای آماده‌سازی داده‌ها شامل دو مرحله کلی است: تصحیحات رادیومتریک، و تصحیحات هندسی.

تصحیحات رادیومتریک

به منظور انجام تصحیحات رادیومتریک طی دو مرحله،



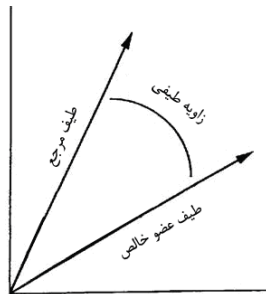
شکل ۲. بخشی از نواحی دربردارنده طلا در منطقه دوست بیگلو (داده‌های زمینی) پلی‌گون a بزرگ‌ترین و پرعبارترین ناحیه طلای به دست آمده از داده‌های زمینی است.

1. reflectance

رابطه (۳)

$$a = \text{ArcCos} \frac{\sum_{i=1}^n t_i r_i}{\left[\sum_{i=1}^n t_i^2 \right]^{1/2} \left[\sum_{i=1}^n r_i^2 \right]^{1/2}}$$

بنابراین، خروجی الگوریتم SAM برای هر پیکسل، فاصله زاویه‌ای بین دو طیف است که با واحد رادیان بیان می‌شود، و از 0 تا $\frac{\pi}{4}$ تغییر می‌کند (شکل ۲). بدین ترتیب، طیفی که کمترین زاویه را با عضو داشته باشد، به‌عنوان شبیه‌ترین طیف تعیین خواهد شد.



شکل ۳. زاویه بین بردار طیف عضو و مرجع

هرچه این زاویه کمتر باشد، میزان شباهت بیشتر خواهد بود.

این شیوه میزان شباهت طیف هر پیکسل را بدون تجزیه به طیف عضوهای شناسایی شده از تصویر می‌سنجند، و خروجی آن تصاویری چندلایه‌ای است که rule نامیده می‌شوند. این تصاویر بهترین هماهنگی SAM بین طیف عضو و طیف مرجع را در هر پیکسل بیان می‌دارند. پیکسل‌های تیره‌تر در تصاویر rule، زاویه کوچک‌تر را نشان می‌دهند، یا در واقع طیف آن پیکسل‌ها شباهت بیشتری به عضوهای طیفی دارد - و برعکس. بنابراین در روش مورد بحث، طبقه‌بندی پیکسل‌های کاملاً تیره نشان‌دهنده عضوهای تصویرند.

بازتاب ترکیبی اتمسفر و سطح زمین بر طبق رابطه (۲) محاسبه شد:

رابطه (۲)

$$\rho_p = \pi L_\lambda d^2 / ESUN \lambda \cos \theta_z$$

در این فرمول،

ρ_p = بازتاب (بدون واحد)؛

L_λ = رادیانس طیفی در روزنه سنجنده؛

d = فاصله زمین تا خورشید (در واحدهای نجومی)

که می‌توان آن را از جدول استخراج کرد؛

$ESUN \lambda$ = تابش ورودی خورشید؛ و

θ_z = زاویه زینت خورشیدی (درجه) (Jinguo

Yuan, 2007).

تصحیحات هندسی

پس از تصحیحات رادیومتریک، تصحیحات هندسی نیز بر روی تصاویر پیاده شدند. برای تصحیح هندسی تصاویر از نقاط کنترل زمینی در هر دو تصویر ماهواره‌ای هابریون و لندست استفاده شد، به‌طوری‌که نقاط مشخص همچون تقاطع جاده‌ها و راه‌ها در تصویر مرجع و پس از انجام این دو مرحله تصاویر برای انجام روش‌های تحقیق آماده شدند.

۳-۳- تکنیک‌های به‌کار رفته

۳-۳-۱- الگوریتم نمایشگر زاویه‌ای طیفی

(SAM)

الگوریتم نمایشگر زاویه طیفی یا SAM، روشی است خودکار یا اتوماتیک، که شباهت میان طیف یک پیکسل و طیف مرجع را محاسبه می‌کند. شباهت میان این دو طیف به‌عنوان زاویه میانگین آن دو بیان می‌گردد. در روش مذکور هر طیف، متناظر با یک بردار در فضایی با ابعاد مساوی با تعداد باندها در نظر گرفته می‌شود. الگوریتم نمایشگر زاویه‌ای طیفی، شباهت میان یک طیف عضو t و یک طیف مرجع r ، برای n باند را از ArcCos ضرب نقطه‌ای دو طیف، بدین صورت محاسبه می‌کند (Van Deer Meer, 2001):

۳-۳-۲- روش تجزیه طیفی خطی (LSU)

چالشی که در تمام تاریخچه سنجش از دور، مفسران با آن روبه‌رو بوده‌اند همانا نیاز به اداره کردن پیکسل‌های آمیخته، یعنی پیکسل‌هایی بوده است که ترکیبی از انواع پوشش یا کلاس‌های اطلاعاتی را ارائه می‌کنند.

با داده‌هایی که قدرت تفکیک طیفی پایین (چندطیفی) دارند، این روش معمولاً با موفقیت چندانی همراه نیست، زیرا بیشتر انواع پوشش‌ها در تعداد کم باندهای استفاده‌شده به‌خوبی مجزا نمی‌شوند.

این فرایند می‌تواند به‌صورت ریاضی در قالب رابطه (۴) نشان داده شود. M تعداد پوشش خالص یا اعضای مرجع در تصویر مورد نظر است؛ نسبت‌های اعضای مرجع یا وزن آنها در یک پیکسل با f_m ($m = 1, 2, M$) نشان داده شده است؛ R_n ($n = 1, 2, \dots, N$) بازتاب مشاهده‌شده پیکسل در n امین باند طیفی سنجنده؛ و $a_{n,m}$ بازتاب طیفی در n امین باند m عضو مرجع است.

$$R_n = \sum_{m=1}^M f_m a_{n,m} + \varepsilon_n$$

$$n = 1, 2, \dots, N$$

که در آن، ε_n خطا در باند n است.

بازتاب مشاهده‌شده در هر باند، از طریق این رابطه به‌صورت مجموع خطی بازتاب‌های اعضای مرجع نشان داده می‌شود که فرمول کلی تجزیه طیفی خطی است. شرط استفاده از رابطه مذکور، این است که انرژی ورودی فقط یک‌بار از منظره به سنجنده می‌رسد و دستخوش پخش چندگانه نمی‌شود.

در این تحقیق همین شرط در نظر گرفته شده است.

رابطه (۴) در فرم ماتریسی به رابطه (۵) تبدیل می‌شود:

$$R = Af + \varepsilon \quad \text{رابطه (۵)}$$

در آن، f یک بردار ستونی با اندازه M است؛ R و ε بردارهای ستونی با اندازه N و A یک ماتریس $N \times M$ مشخصات طیفی عضو مرجع‌اند.

تجزیه طیفی در واقع یافتن مجموعه‌ای از نسبت‌های عضو مرجع است که بردار خطای ε را مینیمم می‌کند. حال، با این فرض که اعضای مرجع درست انتخاب شوند این رابطه نیز به معادله‌ای ساده‌تر تبدیل می‌شود:

$$R = Af \quad \text{رابطه (۶)}$$

برای حل این معادله باید تعداد باندهای تصویر از تعداد اعضای مرجع بیشتر باشند و علاوه بر آن از لحاظ طیفی امکان تفکیک این اعضا در باندهای مورد استفاده وجود داشته باشد. به همین دلایل الگوریتم تجزیه طیفی در داده‌های فراطیفی^۱ با تعداد باندهای زیاد و دقت طیفی بالا استفاده می‌شود.

هدف از پیاده‌سازی تجزیه طیفی، تعیین درصد فراوانی اعضای مرجع است و زمانی که تعداد معادله بیشتر از مجهولات باشد، معکوس کردن ساده رابطه (۶) برای تعیین بردار سهم‌ها امکان‌پذیر نخواهد بود. با به‌کار بردن معکوس مجازی، رابطه (۶) به‌صورت رابطه (۷) درمی‌آید و با استفاده از راه‌حل حداقل مربعات می‌توان سهم هر عضو مرجع را محاسبه کرد. فراوانی هر عضو مرجع با استفاده از رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$f = (A^T A)^{-1} A^T R \quad \text{رابطه (۷)}$$

ناگفته نماند که انتظار می‌رود در نسبت‌های آمیخته اعضای مرجع، دو محدودیت موجود در نظر گرفته شود. نخست اینکه، مجموع فراوانی‌ها باید یک باشد، و دوم اینکه بایستی نامنفی باشند. برای هر m :

$$\sum_{m=1}^M f_m = 1 \quad 0 \leq f_m \leq 1 \quad \text{رابطه (۸)}$$

اگر اعضای مرجع از طیف‌های متوسط پوشش‌ها استخراج شوند، یا انتخاب اعضای مرجع ضعیف باشد، این شرط‌ها گاه نقض می‌شوند (Richards John A., 2006). تجزیه طیفی خطی هر تصویر، مربعات میانگین

عیار طلای (۱۰۰-۳۱۵ و ۴۵-۱۰۰) ppm بودند و عمدتاً نواحی ۳۱۵-۱۰۰ به عنوان نقاط دربردارنده طلا در نظر گرفته شده‌اند، که دارای نمونه‌هایی با عیار ۱۰۰-۴۵ ppm هستند. از عملیات زمینی و مطالعات نمونه‌های برداشت‌شده از منطقه، مشخص شده است که در هیچ یک از نواحی، طلا با درصد بالای کانی‌سازی و کانه طلا وجود نداشته و عنصر طلای موجود به همراه کانی‌های پیریت و کالکوپیریت و عمدتاً مالاکیت یافت شده است (Mohammadi, 2004).

۲- استخراج اعضای مرجع با اعمال الگوریتم تعیین عضو خالص PPI جداسازی نویز از اطلاعات (الگوریتم MNF) تصویر ورودی برای محاسبه شاخص خلوص طیفی، تصویر مؤلفه‌های نخست MNF است. بدین ترتیب، در این تحقیق الگوریتم MNF روی باندهای تصویر اولیه اجرا شده است. شکل ۴ نتیجه اعمال روش MNF بر روی تصاویر هایپریون را نشان می‌دهد. مؤلفه‌های اول MNF دارای نسبت سیگنال به نویز بالایی هستند و به ترتیب مقدار اطلاعات کم می‌شود و نویز افزایش می‌یابد.

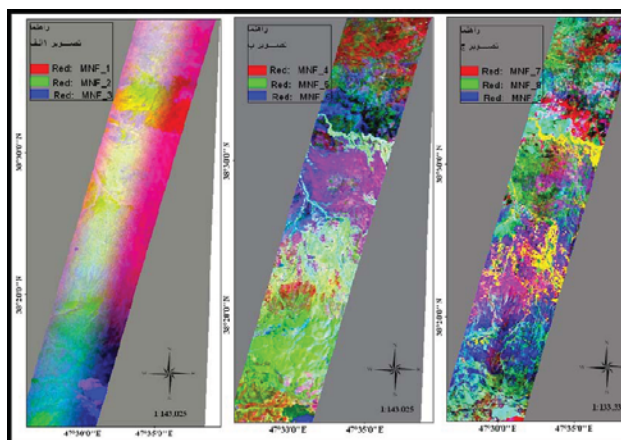
خطا (RMSE) به همراه نقشه‌های فراوانی اعضای مرجع تولید می‌کند. تصویر مربعات میانگین خطا از اختلاف بین طیف پیکسل مشاهده شده و طیف بازسازی شده از نسبت‌های محاسبه شده نتیجه می‌شود. مزیت تصویر مربعات میانگین خطا این است که پیکسل‌های ضعیف طبقه‌بندی شده، مشخص می‌گردند؛ و این خود شیوه‌ای ساده برای ارزیابی است (Van Deer Meer, 2001).

۳-۴- استخراج اعضای مرجع

۱- استخراج اعضای مرجع با استفاده از نقاط مشخص حاصل از عملیات میدانی

برای تعیین اعضای مرجع مورد نیاز برای اعمال روش‌های تحقیق، از گزارش‌های میدانی، که پیش‌تر در محدوده تصویر برای اکتشاف طلا انجام گرفته بود، استفاده شد (Asvadi, 1999; Mohammadi, 2004). در این گزارش‌ها که در منطقه دوست‌بیگلو در شهرستان مشکین‌شهر انجام شده بود، مناطق طلا به‌صورت محدوده‌های موجود در شکل ۲ تعیین گردیدند.

در این تحقیق نواحی پتانسیل‌دار طلا دو گروه با



شکل ۴. تصویرهای حاصل از ترکیب رنگی باندهای نخست MNF بر روی تصاویر هایپریون: (الف) باندهای ۱ و ۲ و ۳؛ (ب) باندهای ۴ و ۵ و ۶؛ و (ج) باندهای ۷ و ۸ و ۹

۴- نتایج

پس از انتخاب اعضای مرجع، روش‌های تحقیق روی تصاویر اعمال شدند. اعضای مرجع منتخب، اینها هستند:

۱- پلی‌گون بزرگ حاوی طلا در داده‌های زمینی (شکل ۲). از آنجا که بیشترین عیار طلا (۳۱۵ ppm) در این پلی‌گون یافت شده بود (Mohammadi, 2004)، پلی‌گون مذکور به تنهایی یک عضو مرجع در نظر گرفته شد.

۲- تمامی نواحی حاوی طلا با عیار (۳۱۵-۱۰۰) ppm در شکل ۲.

۳- عضو مرجع حاصل از اعمال الگوریتم شاخص خلوص طیفی.

۴-۱- نقشه‌های حاصل از اعمال روش SAM

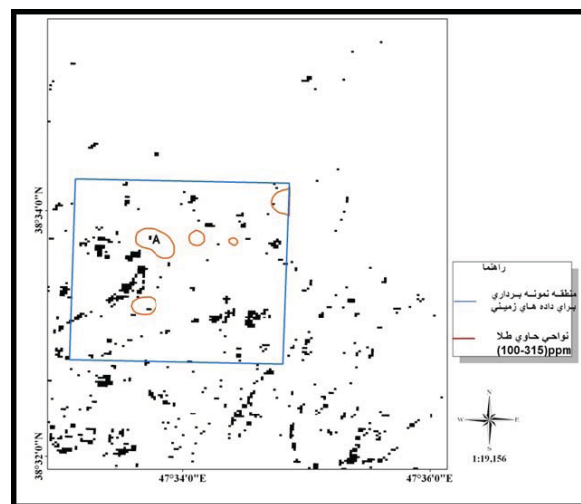
در نقشه‌های حاصل از روش SAM (شکل‌های ۶ و ۷)، از آنجا که مقادیر کوچک‌تر در این روش نشان از احتمال بیشتر وجود عضو مرجع دارند، مقادیر ۰ تا ۰/۰۵ که با رنگ‌های سیاه و آبی نشان داده شده‌اند، پیکسل‌هایی با پتانسیل بالای طلا هستند.

همان‌گونه که از شکل ۴ برمی‌آید، ترکیب باندهای ۷ و ۸ و ۹ تغییرات بیشتر و عوارض مشخص‌تری را نمایان می‌سازد و بهتر از تصویرهای الف و ب است. در بیشتر مواد باند نخست تصویر حاصل از الگوریتم MNF دارای نویز زیاد و اطلاعات کم است. باندهای ۱۰ به بعد تصویر MNF نویز زیادی دارند و اطلاعات کم. بنابراین ۱۰ باند نخست MNF به‌عنوان ورودی الگوریتم PPI انتخاب شدند.

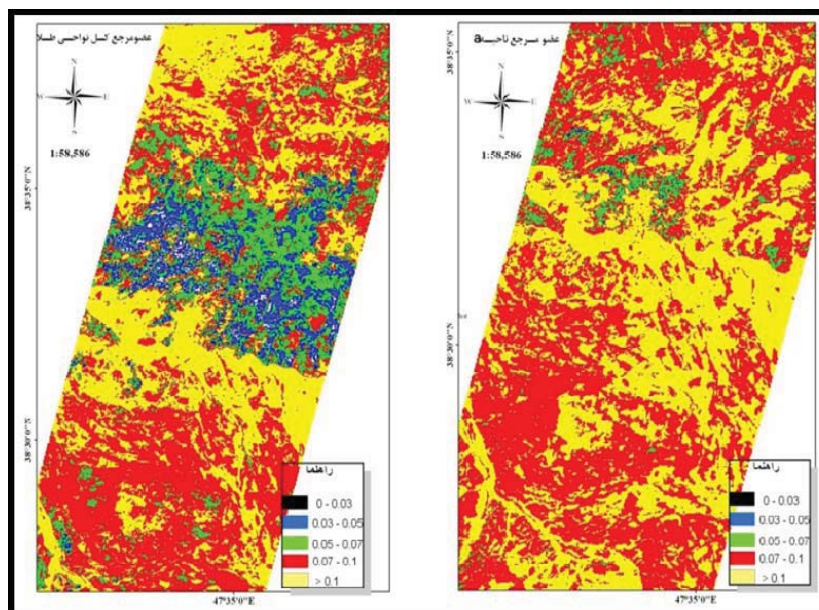
۳- شاخص خلوص طیفی (PPI)

مجزا کردن پیکسل‌های خالص از آمیخته، تعداد پیکسل‌های آنالیز شده را برای برآورد اعضای مرجع کاهش می‌دهد و اعضای مرجع را آسان‌تر مجزا و شناسایی می‌کند.

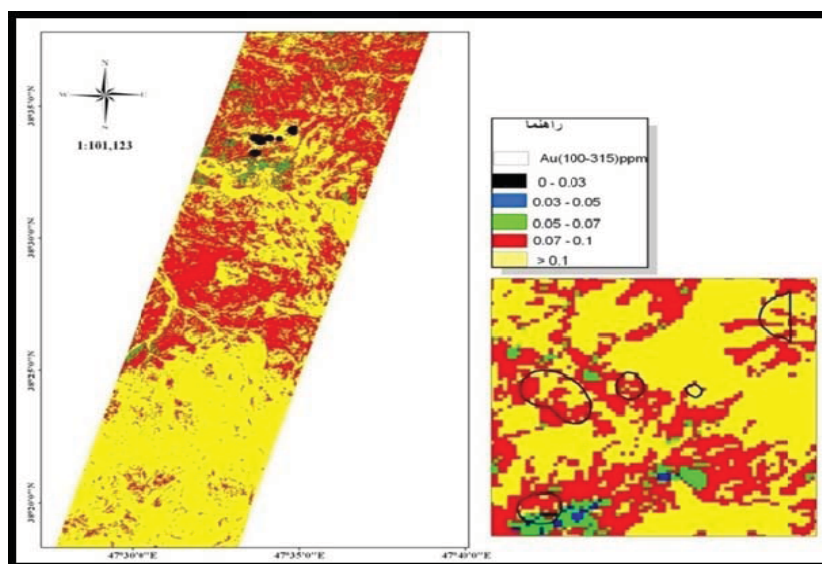
الگوریتم PPI که بودمن و همکاران آن را ایجاد کردند، روشی است ساده که مجموعه‌ای از بردارهای Convex hull را در مجموعه داده‌های L بعدی جست‌وجو می‌کند. این الگوریتم به دلیل در دسترس بودنش در نرم‌افزار ENVI معروف است. این شاخص ابزاری است برای پیدا کردن پیکسل‌های «خیلی خالص» طیفی در تصاویر چندطیفی و فراطیفی. پیکسل‌هایی با خلوص طیفی بسیار بالا به نوعی با اعضای مرجع آمیخته مرتبط‌اند.



شکل ۵. نتیجه حاصل از الگوریتم (PPI) بر روی نقشه MNF



شکل ۶. نقشه‌های طبقه‌بندی شده حاصل از اجرای روش نمایشگر زاویه‌ای طیفی بر روی تصویر هایپریون



شکل ۷. نقشه حاصل از اعمال روش SAM با عضو مرجع PPI بر روی تصویر هایپریون

پلی‌گون طلا واقع در شکل ۲) است؛ و در نقشه «ب» عضو مرجع انتخاب‌شده تمامی پلی‌گون‌های طلا در گزارش‌های عملیات زمینی‌اند (شکل ۲). به دلیل در نظر

در شکل ۶ نقشه‌های به‌دست‌آمده از طبقه‌بندی نتایج اعمال روش SAM نشان داده شده است. در نقشه «الف» عضو مرجع انتخاب‌شده ناحیه A (بزرگ‌ترین

گرفتن تمامی پلی گون‌های طلا در نقشه «ب»، نواحی بیشتری به عنوان مناطق دارای پتانسیل طلا نشان داده شده‌اند.

در شکل ۷، عضو مرجع انتخابی همانا عضو حاصل از اعمال الگوریتم تعیین پیکسل خالص است. نواحی پتانسیل دار به صورت پراکنده در حوالی پلی گون‌ها متمرکز شده‌اند.

۴-۱-۴-۱- ارزیابی دقت نقشه‌های حاصل از روش SAM

به منظور ارزیابی دقت این الگوریتم، نقشه‌های حاصل از این روش به دو مقدار صفر و یک بدل گردیدند، به گونه‌ای مقادیر کمتر از ۰/۰۵ به عنوان نقاط یک در نظر گرفته شدند و بقیه به عنوان نقاط صفر (D.P.Shrestha, 2005)؛ و آن‌گاه با نقشه‌های مرجع مقایسه شدند. در این تحقیق، نقشه‌های مرجع استفاده شده برای ارزیابی صحت طبقه‌بندی، اینها بودند: ۱- نقشه حاصل از گزارش‌های موجود درباره عملیات اکتشافی میدانی (Mohammadi, 2004) که به عنوان داده‌های زمینی به کار رفتند؛ و ۲- نقشه اطلس کانی‌شناسی ایران برای عنصر طلا. بدین ترتیب، دو گروه دقت کلی برای این روش به دست آمدند، که در جدول‌های ۱ و ۲ می‌توان آنها را مشاهده کرد.

دقت کلی طبقه‌بندی با روش SAM در مقایسه با داده‌های زمینی:

جدول ۱. دقت روش SAM با داده‌های زمینی	
اعضای مرجع انتخاب شده	دقت کلی (درصد)
پلی گون a	۶۲
تمامی پلی گون‌های طلا	۶۰
عضو مرجع ppi	۹۴

دقت کلی طبقه‌بندی با روش SAM در مقایسه با اطلس کانی‌شناسی طلا:

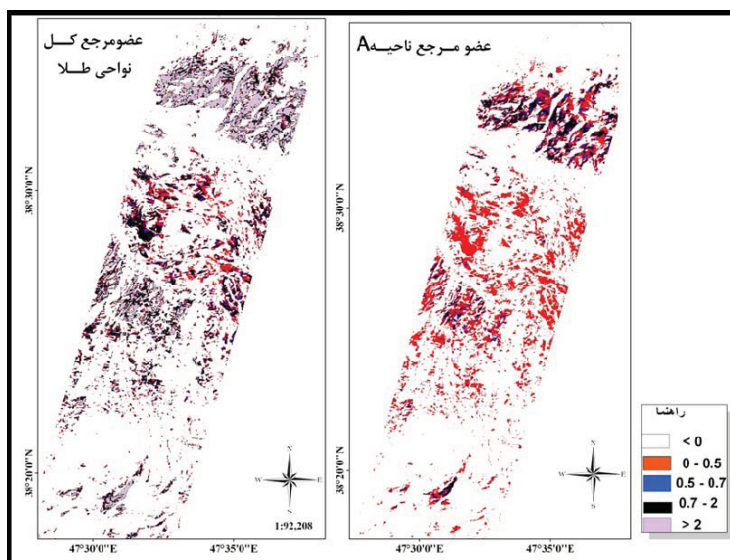
جدول ۲. دقت روش SAM با اطلس کانی‌شناسی	
اعضای مرجع انتخاب شده	دقت کلی (درصد)
پلی گون a	۷۵
تمامی پلی گون‌های طلا	۷۴
عضو مرجع ppi	۶۷

به طور کلی دقت به دست آمده از مقایسه نقشه‌های حاصل از این روش با اطلس کانی‌شناسی، بالاتر از دقت به دست آمده از داده‌های زمینی است. دلیل این امر بزرگی نقشه‌های اطلس و کاهش جزئیات است. همچنین دقت بیش از ۹۴ درصد که با انتخاب عضو مرجع حاصل از الگوریتم PPI به دست آمده، به دلیل خالص بودن این عضو مرجع است؛ در حالی که در حالت دوم (مقایسه با اطلس کانی‌شناسی) به دلیل بزرگ‌تر شدن منطقه، دقت حاصل از انتخاب کل پلی گون‌های طلا بیشتر است و حساسیت روش SAM به خالص بودن عضو مرجع کمتر شده است.

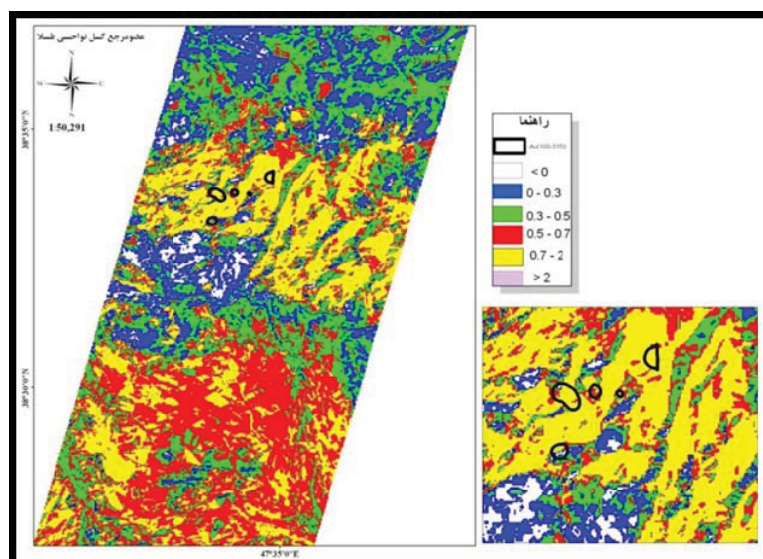
۴-۲- نتایج روش تجزیه طیفی خطی

در شکل ۸، نقشه «الف» با استفاده از عضو مرجع پلی گون a در شکل ۲ تهیه شده، و نقشه «ب» با استفاده از کل نواحی تشخیصی طلا در گزارش‌های زمینی فراهم گردیده است. به دلیل در نظر گرفتن کل نواحی در نقشه «ب» قسمت‌های مستعد طلا نسبتاً بیشتر از نقشه «الف» است.

نقشه ۹ با استفاده از عضو مرجع حاصل از PPI طلا تهیه شده است. در این نقشه انطباق خوبی بین نواحی دارای طلا و بخش‌های مستعد نقشه وجود دارد. به دلیل خالص بودن عضو مرجع انتخاب شده پیکسل‌هایی با مقادیر بزرگ‌تر از ۲ دیده نمی‌شوند.



شکل ۸. نقشه‌های طبقه‌بندی شده حاصل از تجزیه طیفی خطی بر روی تصاویر هایپریون



شکل ۹. نقشه حاصل از اعمال روش LSU با عضو مرجع PPI بر روی تصاویر هایپریون

می‌شوند (D.P. Shrestha, 2005). بنابراین در شکل‌های ۸ و ۹ مناطق قرمز رنگ و زرد رنگ، نشان از پتانسیل بالای طلا دارند. در نقشه‌های RMSE مقدار خطا در بسیاری از این نقشه‌ها از ۰/۴ کمتر است. به‌طور کلی هر چه مقدار این خطا کمتر باشد، دقت فراوانی‌های به‌دست‌آمده بیشتر می‌شود. البته برای

۴-۲-۱- ارزیابی دقت نقشه‌های حاصل از روش

LSU

محصول این روش، نقشه فراوانی هر عضو مرجع انتخابی و نیز نقشه خطای RMSE است. در نقشه‌های فراوانی حاصل از این روش پیکسل‌هایی با مقادیر ۰/۵ تا ۱ به‌عنوان مناطق دارای پتانسیل در نظر گرفته

عضو مرجع، دقت انتخاب کل نواحی طلا را افزایش می‌دهد.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

مقایسه نقشه‌های حاصل از روش‌های مختلف تحقیق با داده‌های میدانی و اطلس کانی‌شناسی مشخص ساخت، که با استفاده از نقشه‌های اطلس، دقت بالاتری به دست می‌آید. به دلیل این امر، بزرگ‌تر بودن نقشه‌های اطلس از نقشه‌های حاصل از گزارش‌های زمینی است. به هر حال بزرگ‌نمایی در منطقه‌ای خاص و مشاهده جزئیات، معمولاً از دقت طبقه‌بندی می‌کاهد.

مقایسه نقشه‌های حاصل از الگوریتم‌های استفاده‌شده در این تحقیق، نشان داد از آنجایی که در هر پیکسل، عوارض دیگری هم به غیر از کانی‌های طلا و مس موجود، هستند که در روش تجزیه طیفی به‌عنوان اعضای مرجع در نظر گرفته نشدند، دقت این روش کمتر از روش SAM است. مقادیر بالاتر از یک که در پیکسل‌های زیادی مشاهده شدند نیز دلیل بر این مدعا هستند و نقشه‌های حاصل از این روش مناطق کانی‌دار زیادی را نشان می‌دهند که چه‌بسا نوعی اغراق تلقی شوند.

به‌علاوه، دقت کلی روش نقشه‌بردار زاویه از روش تجزیه طیفی خطی بیشتر بوده است. دلیل این امر می‌تواند شباهت اعضای مرجع با یکدیگر، به‌دلیل تداخل و با هم بودن عناصر طلا و مس در منطقه، کم بودن اختلاط طیفی در سطح زیرپیکسل (کمتر از ۳۰ متر) و یا وجود کلاس‌های دیگری جز اعضای مرجع در منطقه باشد.

برای هر کانی در هر ناحیه با سه عضو مرجع (پلی‌گون a، تمامی نواحی، و عضو مرجع حاصل از روش PPI)، سه مقدار دقت کلی به‌دست آمد. در بیشتر این موارد دقت حاصل از کاربرد عضو مرجع PPI بیشتر بوده است و این به‌دلیل خالص بودن پیکسل‌های آن از لحاظ طیفی است.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق حاضر و

اعمال این روش باید دست‌کم دو عضو مرجع وجود داشته باشند. به همین دلیل با توجه به داده‌های زمینی استفاده شده (Mohammadi, 2004؛ Asvadi, 1999)، برای پر کردن این خلاء عضو مرجع دیگر، به‌دلیل وجود عنصر مس در منطقه، نواحی دارای مس در نظر گرفته شدند.

نقشه‌های حاصل از روش تجزیه طیفی خطی برای نواحی دارای طلا با داده‌های زمینی و نقشه اطلس کانی‌شناسی طلا مقایسه شدند و با هم‌پوشانی این نقشه‌ها دقت هر مرحله با اعضای مرجع انتخابی تعیین گردید. این دقت‌ها در جدول‌های ۳ و ۴ درج شده‌اند.

جدول ۳. دقت کلی طبقه‌بندی با روش LSU در مقایسه با داده‌های زمینی

اعضای مرجع انتخاب‌شده	میزان دقت کلی (درصد)
پلی‌گون a	۶۳
تمامی پلی‌گون‌های طلا	۵۵
عضو مرجع ppi	۶۷

جدول ۴. دقت کلی طبقه‌بندی با روش LSU در مقایسه با اطلس کانی‌شناسی

اعضای مرجع انتخاب‌شده	میزان صحت کلی (درصد)
پلی‌گون a	۵۷
تمامی پلی‌گون‌های طلا	۶۴
عضو مرجع ppi	۵۴

دقت‌های به‌دست آمده از اجرای روش تجزیه طیفی خطی با اعضای مرجع مختلف، نشان دادند که همانند روش SAM، دقت انتخاب عضو مرجع PPI در حالت مقایسه با داده‌های زمینی بیشتر و در حالت مقایسه با اطلس کانی‌شناسی نیز به دلایل بزرگ‌تر بودن منطقه کاهش جزئیات و حساسیت کمتر روش به خالص بودن

دلیل این ناهمخوانی می‌تواند انتخاب اعضای مرجع مناسب و پیچیدگی و اختلاط نمک‌های سطح زمین در این پژوهش باشد (D.P. Shrestha, 2005).

بدین ترتیب، پیشنهاد می‌گردد که در تحقیقات آتی، الگوریتم SAM به صورت جداگانه در محدوده‌های طیفی VNIR و SWIR اجرا شود و نتایج هر کدام با یکدیگر مقایسه گردد و دقت هر محدوده نیز مورد بررسی قرار گیرد.

نیز پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آتی از سنجنده‌هایی با قدرت تفکیک مکانی بیشتر از هایپریون (با اندازه پیکسل ۳۰ متر) برای شناسایی کانی‌های بارزش استفاده شود، تا نقشه‌هایی با دقت بالاتر تولید گردد.

در مقایسه با نقشه‌های اطلس کانی‌شناسی، نقشه‌های به‌دست‌آمده از این تحقیق - به‌ویژه روش LSU - مناطق وسیع‌تری را که دارای پتانسیل طلا و مس هستند، مشخص ساخت. نتایج این نقشه‌ها، اگر چه با گزارش‌های زمینی و اطلس کانی‌شناسی ارزیابی شدند، برای استفاده از این نقشه‌ها در عملیات اکتشاف، بازدیدهای میدانی وسیع‌تری توصیه می‌گردد.

۶- منابع

Alavipanah, S.K., Komaki, C.B. and Alikhah Asl, M., 2005, **Application of Thermal Remote Sensing in the Enviromantal Studies**, The 9th world multiconfrence on systemics, cybernetics and informatics, WMSCS College of Orlando, USA.

Asvadi, M. , 1999, **Exploration of poli-Metal Minerals Research in West of Meshkinshahr**, Ardabil Industries & mines Organization.

Babazadeh, V. , 2004 , **Metalic and Nonmetallic Ores**, Babazadeh, Tehran.

ارزیابی دقت کلی، روش نقشه‌بردار زاویه‌ای (SAM) با در نظر گرفتن شرایط منطقه، به‌عنوان روشی کارآمد می‌تواند در طبقه‌بندی منطقه بر اساس کانی‌های موجود، در مطالعات اکتشاف معادن فلزی مورد استفاده قرار گیرد.

دیگر اینکه نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش، نتایج Fred.A.Kurse و همکاران را نیز، که در سال ۲۰۰۳ با استفاده از تصاویر HYPERION در منطقه کوپریت امریکا کانی‌های آلونیت (کانی طلا)، بودینگتونیت، موسکویت، سیلیکا، کائولینیت، کلسیت، دولومیت و زئولیت را جداسازی کردند، تصدیق می‌کند. در این مطالعه هم روش SAM، در مقایسه با روش LSU، با دقت بالاتری نواحی دارای طلا را تشخیص داد (Fred A. Kurse, 2003).

نتایج به‌دست‌آمده، افزون بر اینها، نتایج تحقیق Xing-ping Wen و همکاران را هم، که در سال ۲۰۰۹ از تصاویر Hyperion برای تهیه نقشه طبقه‌بندی مس و طلای پورفیری Shangri-la در چین استفاده کردند، تأیید می‌کند. در این تحقیق برای تهیه اعضای مرجع از الگوریتم PPI استفاده شد. دقت کلی به‌دست‌آمده برای روش SAM ۰/۷۶۹ و برای روش MTMF ۰/۶۹۸ در جداسازی نواحی آلتراسیون پورفیری بود (Xing-Ping Wen, 2009).

سرانجام اینکه نتایج حاصل از این پژوهش، با نتایج D.P. Shrestha و همکاران، که در سال ۲۰۰۵ از تصاویر Hymap و الگوریتم‌های SAM و LSU برای تعیین میزان شوری خاک (مقدار ژیبس و کانی‌های کربناته) در اسپانیا استفاده کردند، همخوانی ندارد. در این تحقیق اعضای مرجع به‌کاررفته، عبارت بودند از اعضای موجود در کتابخانه‌های طیفی، اعضای مرجع به‌دست‌آمده از نقاط مشخص زمینی، و اعضای مرجع حاصل از الگوریتم‌های MNF و PPI. نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم‌ها مشخص ساخت که نقشه‌های حاصل از روش تجزیه دارای دقت کلی ۷۵ درصد بودند، لیکن دقت نقشه‌های حاصل از روش SAM ۶۰ درصد بود.

- Bernard E. Hubbard, J.K.C., 2005, **Mineral mapping on the Chilean-Bolivian Altiplano using Co-orbital ALI, ASTER and Hyperion Imagery: Data dimensionality issues and solutions**, Remote sensing of environment, 99: 173-186.
- Fred A. kurse, W.B., Jonathan F. Huntington, 2003, **Comparison of Airborne Hyperspectral Data and EO-1 Hyperion for Mineral Mapping**, IEEE transactions on Geoscience and remote sensing, 41: 1388-1400.
- Gorbani, M., 2004, **Valuable Minerals and ores and Importance of them in Iran**, Pars Centure of Geology research, ArianZamin.
- Jinguo Yuan, Z.N., 2007, **Classification Using EO-1 Hyperion Hyperspectral and ETM+ Data**, Computer Society.
- Mohammadi, M.A., 2004, **Report of Common Metal Exploration in North West of Meshkinshahr**, Ardabil Industries & mines Organization.
- Richards John A, X.J., 2006, **Remote Sensing Digital Image Analysis:an Introduction** springer, New York.
- Sabins, F.F., 1996, **Remote Sensing Principals and Interpretation**, Freeman and company.
- Sharifi, A.R., 2008, **Hyperspectral Image Classification Using Spectral Signature Analysis**, Masters of Science Dessertation,University of Tehran.
- Shrestha D.P., D.E.M., F.van der Meer, H.V. Anh, 2005, **Analysis and Classification of Hyperspectral Data for Mapping Land Degradation:An application in southern Spain**, Applied earth observation and Geoinformation, 7: 85-96.
- Van Deer Meer, F.D., De Jong Steven M., 2001, **Imagins Spectrometry: basic principle and prospective applications**. Academic press.
- Vincent, K.R., 1997, **Fundamentals of Geological and Environmental Remote Sensing**, Prentice Hall.
- Xianfeng Chen, D.J.C., Timothy A.Warner, 2007, **Integrating Visible,near-infrared and Short-wave Infrared Hyperspectral and Multispectral the Rmal Imagery Forgeologica Imapping at Cuprite, Nevada**, remote sensing of environment, 110: 344-356.
- Xing-Ping Wen, X.-F.Y., Guang-Dao Hu, 2009, **Hyperspectral Remote Sensing Data Mining Using Multiple Classifiers Combination**, Remote sensing of environment, 88: 266-278.