نشریه علمی پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال ششم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۷

Vol.6, No.3, Autumn 2018

۹۳-۱۱۴

این مقاله در نخستین کنفرانس ملی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی به‌عنوان مقاله برگزیده انتخاب شده است که پس از تکمیل، داوری مجدد و اخذ پذیرش در این شماره از نشریه به چاپ می‌رسد.

انتخاب باندهای بهینه جهت بهبود جداسازی طیفی تصاویر ابرطیفی

امید غفاری[1*]، محمدجواد ولدان زوج[2] ، مهدی مختارزاده[3]

۱- دانشجوی دکتری سنجش از دور، دانشکده نقشه‌برداری ،دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی؛ مربی گروه نقشه‌برداری، دانشگاه زنجان

۲- استاد گروه فتوگرامتری و سنجش ازدور، دانشکده نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳- دانشیار گروه فتوگرامتری و سنجش ازدور، دانشکده نقشه‌برداری ، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۲۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۲۰

چکیده

مدل آنالیز ترکیب خطی به طور گسترده‌ای برای برآورد سهم هر ماده خالص در اختلاط طیفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. راه‌حل ریاضی مسئله ترکیب، حل مجموعه‌ای از معادلات خطی با استفاده از روش کمترین مربعات می‌باشد. اما بیشترین منبع خطا در روش‌های متداول آنالیز ترکیب طیفی ناشی از عدم امکان محاسبه تغییرات طیفی اعضای خالص در سیر زمان و مکان است. در این فرآیند از اعضای خالص ثابتی برای کل صحنه تصویربرداری استفاده می‌شود. علاوه بر این، اگر اعضای خالص به شدت به یکدیگر وابسته باشند ماتریس ضرایب دچار کمبود رنک شده و حل مسئله معکوس همراه با ناپایداری خواهد بود. به این ترتیب فراوانی‌های برآورد شده به شدت به خطاهای تصادفی حساس می‌گردند. در این مقاله روش جدیدی برای انتخاب باند متشکل از اولویت‌بندی باندها در راستای کاهش اثر تغییرپذیری طیفی و کاهش همبستگی بین باندها برمبنای زاویه آنها ارائه شده‌است. با استفاده از روش پیشنهادی و به کمک داده‌های شبیه‌سازی شده و واقعی نشان داده شد که می‌توان به‌طور موثری به حذف تعداد زیادی از باندهای غیر ضروری اقدام نمود. آزمایش‌ها نشان داد که با انتخاب باندهای مناسب، کمتر از ۲۰ درصد باندها، می‌توان به نتایج قابل مقایسه و حتی بهتری از نتایج حاصل از تمام باندها رسید.

کلیدواژه‌ها: تصاویر ابرطیفی، جداسازی طیفی، انتخاب باند، تغییرپذیری طیفی، معیارهای شباهت

*نویسنده مکاتبه کننده: تهران - خیابان ولیعصر - تقاطع میرداماد غربی – دانشکده مهندسی نقشه برداری دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی – گروه سنجش از دور

تلفن: ۰۹۱۲۴۲۶۲۲۱۸

Email: Ghaffari@znu.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-01]

[DOI: 10.29252/jgit.6.3.101]

۱- مقدمه

در دهه گذشته روش‌های آنالیز متعددی در زمینه جداسازی طیفی[1] تصاویر ابرطیفی ارائه شده‌است. آنالیز ترکیب طیفی[2] یکی از متداول‌ترین روش‌های به کار رفته در کاربردهای مختلف می‌باشد. منحنی طیفی پیکسل‌های مختلط به طور کلی با استفاده از مدل‌های ترکیب خطی و یا غیرخطی مدلسازی می‌شوند. این مدل‌ها، منحنی طیفی هر پیکسل را به سهم عددی (نقشه فراوانی[3]) اجزاء سازنده آن (اعضای خالص[4]) تبدیل می‌نمایند. پاسخ به این سوال که در این فرآیند کدام دسته از این مدل‌ها (خطی یا غیرخطی) برتری دارند به روشنی مشخص نبوده و به نوع ترکیب مکانی عوارض و کاربردهای آن بستگی دارد. که البته با توجه به دقت قابل قبول مدل‌های خطی و سادگی آنها محققین بیشتری را به خود جلب نموده است [۱].

دقت جداسازی طیفی به شدت وابسته به انتخاب اعضای خالص جامع و مناسب است؛ که همین امر باعث توسعه الگوریتم‌های استخراج اعضای خالص متعددی در سال‌های اخیر شده‌است [۱]. دقت برآورد نقشه‌های فراوانی به‌دست آمده از آنالیز ترکیب خطی تحت تاثیر خطای طیفی باقیمانده از تصحیح اتمسفری غیردقیق، نسبت سیگنال به نویز نامناسب و نویز حاصل از درنظر نگرفتن اثرات غیرخطی ورودی‌ها است؛ اما بیشترین منبع خطا در آنالیز ترکیب طیفی ناشی از عدم امکان محاسبه تغییرات طیفی اعضای خالص در سیر زمان و مکان می‌باشد [۲]. در این الگوریتم‌ها به طور معمول از مشخصه طیفی ثابتی برای هر عضوخالص و مدلسازی کل تصویر استفاده می‌شود؛ که در واقع این یک ساده‌سازی است، چون در حالت‌های زیادی ممکن است رفتار اعضای‌خالص تصویر در شرایط مکانی و زمانی اندکی متفاوت باشد.

به‌طور معمول دو نوع تغییرپذیری در میان نمونه‌های کلاس‌های مختلف قابل تشخیص می‌باشد: ۱- تغییرپذیری میان اعضای خالص یک کلاس (تغییرپذیری داخل کلاسی)، ۲- شباهت طیفی مابین اعضای خالص کلاس‌های مختلف (تغییرپذیری بین کلاسی). دقت برآورد مقادیر فراوانی در سطح زیر پیکسل به‌صورت خطی نسبت به افزایش تغییرپذیری داخل کلاسی کاهش می‌یابد [۲]. از طرفی در برخی از محیط‌ها و یا برای برخی کاربردها تفکیک عوارض مشابه مدنظر می‌باشد؛ که در این حالت تشابه میان طیف بازتابی اعضای خالص مختلف (مانند محصولات زراعی و علف‌های هرز در زمین‌های کشاورزی و یا تشابه طیفی میان مواد معدنی مختلف) مشکلاتی را در به‌دست آوردن نتایج جداسازی برای کلاس‌ها ایجاد می‌کنند. تشابه طیفی میان اعضای‌خالص منجر به وابستگی شدید بین آنها، که خود باعث ناپایداری در حل مسئله معکوس می‌گردد. این موضوع با وجود اثرات جدی در مدل ترکیب طیفی و تخریب اعتمادپذیری نتایج جداسازی طیفی عمدتا مورد چشم پوشی قرار می‌گیرد [۳].

تلاش‌های انجام شده برای کاهش اثر تغییرپذیری طیفی را می‌توان در پنج دسته کلی خلاصه نمود : ۱- استفاده از مجموعه‌ای از اعضای‌خالص برای هر جزء سازنده در یک فرآیند تکراری، ۲- انتخاب زیرمجموعه‌ای از ویژگی‌های طیفی پایدار، ۳- وزندهی طیفی به باندها، ۴- تبدیلات طیفی و ۵- جداسازی طیفی محلی [۲]. انتخاب دقیق باندهایی که نسبت به تغییرپذیری طیفی مقاوم باشند بطور قابل ملاحظه‌ای توانایی بهبود دقت برآورد نقشه‌های فراوانی را دارا هستند. از این رو به منظور کاهش اثر تغییرپذیری طیفی الگوریتمی از این دسته به نام جداسازی طیفی

[1] Spectral Unmixing
[2] Spectral Mixture Analysis
[3] Abundance map
[4] Endmembers

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-01]
[DOI: 10.29252/jgit.6.3.101]

در نـــواحی پایـــدار (SZU[1]) [۴] مـــورد توجـــه قرار گرفته است.

عدم تعامد اعضای خالص هنگامی که همبستگی خطی بین دو عضو و یا همبستگی چندگانـه بـین چنـد عضـو وجود داشته باشد ایجاد می‌گـردد. حـال آنکـه هـر چـه این وابستگی میان اعضـای خـالص بیشـتر شـود، مـدل ترکیبی به سمت ناپایداری گرایش می‌یابد و بـه شـدت بـــه تغییـــرات کوچـــک در طیـــف ورودی و نـــویز حساس می‌شود. راهکارهای مورد استفاده در این زمینه را می‌توان به گروه‌های ۱- حـذف عضـوخالص وابسـته، ۲- حـذف وابسـتگی بـا اسـتفاده از تبـدیلات طیفـی، ۳- شیوه‌های تکـراری بـرای انتخـاب اعضـای خـالص و ۴- پایدارســـازی معـــادلات جداســـازی طیفـــی دسته‌بندی نمود [۳]. بـا توجـه بـه افزونگـی باندها در تصاویر ابرطیفی شناسایی زیرمجموعـه‌ای از باندها کـه این وابستگی را در بین اعضای‌خالص کاهش دهد دور از انتظار نیست. به این ترتیب با استفاده از تجزیه مقـادیر منفرد (SVD[2]) و عدد شرط ماتریس ضـرایب، وضـعیت همبستگی بین اعضای خالص قابل بررسی است.

در این مقاله روشی کارا و موثر ارائه شده که با انتخـاب باندهای بهینه اثر تغییرپذیری طیفـی اعضـای‌خـالص و وابستگی بین آنها کاهش یابد. روش پیشنهادی متشکل از دو مرحله است؛ در ابتدا تمام باندها بـر اسـاس رفتـار طیفـــی مجموعـــه اعضـــای خـــالص بـــه گونـــه‌ای مرتب می‌شوند که کمترین حساسیت را به تغییرپذیری طیفی در آن باندها داشته باشند. در مرحله بعد انتخاب باندهای مناسب بر پایه این اولویت‌بندی انجـام خواهـد شد و از آنجائیکه در این فرآیند وابسـتگی طیفـی بـین بانـــدها لحـــاظ نمـــی‌شـــود در مرحلـــه دوم بانـــدهای غیر وابسته با استفاده از زاویه بین آنها انتخاب می‌شوند.

[1] Stable Zone Unmixing (SZU)
[2] Sigular Value Decomposition (SVD)

بـه ایـن ترتیـب وابسـتگی بـین اعضـای خـالص نیـز کاهش می‌یابند.

ادامه این مقاله بـدین صـورت سـازماندهی شـده‌اسـت؛ در بخـش ۲ تئـوری و الگـوریتم‌هـای مطـرح پیشـین معرفی می‌شوند، بخش ۳ به تشریح الگوریتم پیشنهادی پرداخته و در ادامه آزمایش‌ها و نتیجه‌گیری بـه ترتیـب در بخش‌های ۴ و ۵ ارائه می‌شوند.

۲- تئوری

برای ورود به مباحـث مربـوط بـه کـاهش تغییرپـذیری طیفی و کاهش وابستگی مابین اعضای خـالص در ایـن قسمت مروری شده بر روش‌های مطرح موجـود کـه در هر دسـته قـرار دارنـد. در زمینـه کـاهش تغییرپـذیری طیفی الگوریتم‌های متعددی توسعه یافته‌اند که بررسی تمامی آنها خارج از حوصله این مقاله بوده ولی با توجـه به مرکزیت روش پیشنهادی که بر پایه انتخاب باندهای بهینه است فقط الگوریتم‌های که با انتخاب ویژگـی بـه این موضـوع پرداختـه‌انـد تشـریح مـی‌شـود. در زمینـه کاهش وابستگی اعضای خالص نیز بـا محوریـت حـذف باندهای دارای افزونگی اطلاعات، مـروری بـر مهمتـرین الگوریتم‌های موجود شده است.

۲-۱- الگوریتم‌هـای انتخـاب ویژگـی بـه‌منظـور کاهش اثر تغییرپذیری طیفی

انتخاب دقیق باندهایی که نسبت به تغییرپذیری طیفـی مقاوم باشـند (بـه عنـوان مثـال باندهایی کـه موجـب حداقل شدن واریانس داخل کلاسی و حـداکثر نمـودن پراکندگی بین کلاسی می‌شوند) بطور قابل ملاحظـه‌ای توانایی بهبود دقت برآورد سهم فراوانی‌ها را دارا هستند. با توجه به مطالعات صورت گرفته بـر روی تغییرپـذیری خصوصیات نوری برگ، خاشاک و خاک در مناطق بـایر و نیمه بایر نشان داده شده که در محدوده مادون قرمـز مـوج کوتـاه ۲ (SWIR2[3]) از ۲۰۵۰ تـا ۲۵۰۰ نـانومتر

[3] Short wave infrared 2 (SWIR2)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-01]
[DOI: 10.29252/jgit.6.3.101]

کمترین وابستگی به تغییرات ساختاری و خواص زیست شیمی این مواد وجود دارد؛ بنابراین این محدوده در [۵] به عنوان محدوده طیفی پایدار نسبت به تغییرپذیری برگ، خاشاک و خاک در مناطق بایر و نیمه بایر برای استفاده در آنالیز ترکیب طیفی انتخاب و الگوریتم مادون قرمز موج کوتاه خودکار (AutoSWIR[1]) توسعه داده شد. اما از آنجائی‌که انتخاب محل باند، محدوده و تعداد محدوده‌های طیفی پایدار به پیچیدگی‌های مکانی، طیفی، زمانی و ترکیب اعضای خالص حاضر در صحنه تصویربرداری وابسته است این الگوریتم قابل تعمیم به اکوسیستم‌های مختلف نبود. در ادامه الگوریتم‌های انتخاب باند آماری و استخراج ویژگی دیگری برای استفاده در آنالیز ترکیب خطی ارائه گردید، که هرچند این روش‌ها ابعاد طیفی داده را کاهش می‌دهند اما کمکی در بهبود برآورد سهم فراوانی‌ها از خود نشان نمی‌دهند [۲].

در [۴] الگوریتم انتخاب ویژگی طیفی با جنبه کاربردی و بر پایه شواهد تجربی با نام جداسازی طیفی در نواحی پایدار (SZU) ارائه گردید. در این الگوریتم طول موج‌های حساس به تغییرپذیری طیفی با استفاده از شاخص ناپایداری (ISI[2]) به کمک رابطه (۱) مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. این شاخص با استفاده از نسبت پراکندگی داخل کلاسی (مجموع انحراف معیارهای اعضای خالص هر کلاس) به تغییرپذیری بین کلاسی اعضای خالص (متوسط فاصله اقلیدسی بین میانگین کلاس‌ها) برای هر باند تعریف می‌شود. مقدار یک نشان‌دهنده یکسان بودن تغییرات داخل کلاسی و بین کلاسی است و مقادیر بیشتر از یک حاکی از پیشی گرفتن تغییرات داخل کلاسی از بین کلاسی می‌باشد.

رابطه (۱)

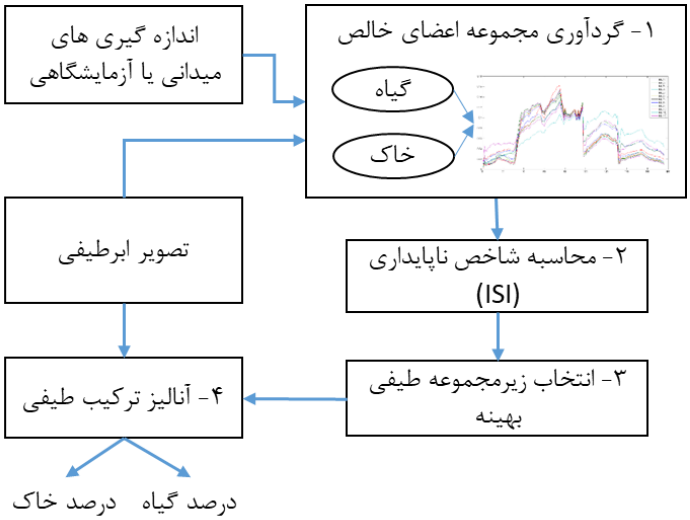
$$ISI_{\lambda}=\frac{\Delta_{within,\lambda}}{\Delta_{between,\lambda}}=\frac{2}{p(p-1)}\sum_{i=1}^{p-1}\sum_{j=i+1}^{p}\frac{1.96\left(\sigma_{i,\lambda}+\sigma_{j,\lambda}\right)}{\left|\bar{m}_{i,\lambda}-\bar{m}_{j,\lambda}\right|}$$

که p تعداد اعضای‌خالص، $\sigma_{i,\lambda}$ و $\bar{m}_{i,\lambda}$ انحراف معیار و میانگین کلاس i در باند λ می‌باشد. سپس بر اساس همین شاخص پروتکلی ارائه می‌دهد تا انتخاب زیرمجموعه‌ای از باندها را بوسیله موازنه بین تعداد طول موج‌های به‌کار رفته در آنالیز (اطلاعات) و شاخص ISI (تغییرپذیری طیفی) بهینه نماید. در این روش وقتی مجموعه اعضای‌خالص انتخاب شدند، باندها بر اساس شاخص ISI مرتب می‌شوند و تغییرات نسبی بین باندهای متوالی (مرتب شده) برای ارزیابی تحقق معیار موازنه مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل (۱) نمایی کلی از مراحل این الگوریتم را به تصویر کشیده است.

در روش‌هایی همچون AutoSWIR و SZU این موضوع که باندهای مجاور در تصاویر ابرطیفی به شدت وابسته هستند درنظر گرفته نشده‌است. زمانیکه تنها از باندهای غیر وابسته در آنالیز ترکیب خطی استفاده شود، پتانسیل مضاعفی در کارآیی محاسبات و دقت برآورد مقادیر فراوانی می‌تواند ایجاد شود [۲].

[1] Auto short wave infrared (AutoSWIR)
[2] InStability Index (ISI)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-01]
[DOI: 10.29252/jgit.6.3.101]



شکل ۱: طرح کلی از الگوریتم SZU [۴]

۲-۲- الگوریتم‌های کاهش همبستگی اعضای خالص

متداول‌ترین روش برای مقابله با همبستگی اعضای خالص حذف عضو وابسته است؛ که این خود دو مشکل به همراه دارد: ۱- اگر دو عضو به یکدیگر وابستگی شدید داشته باشند کدام یک می‌بایست حذف شود و ۲- وقتی این عضو کنار گذاشته می‌شود ممکن است حاوی اطلاعات مفیدی باشد که موجب بی‌ثباتی مدل ترکیب خطی شود. راه‌حل دیگر ترکیب دو کلاس وابسته و تشکیل عضو جدید می‌باشد که این خود موجب از بین بردن زیرکلاس‌های یک گروه می‌شود. اما تبدیلاتی همچون PCA[1] و MNF[2] نیز وجود دارند که می‌توان به‌کار گرفت تا وابستگی اعضای خالص را کاهش دهند زیرا این تبدیلات وابستگی باند به باند را از بین می‌برند. اما مشکل عمده این روشها رسیدن به اعضای خالصی است که پاسخ طیفی آنها ماهیت فیزیکی ندارد.

راه‌حل مشهود دیگری که به ذهن می‌آید، استفاده از زیرمجموعه‌ای از باندها است. با توجه به قدرت تفکیک طیفی بالای تصاویر ابرطیفی این امکان وجود دارد که دامنه طیفی را به بخش‌ها مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز موج کوتاه تجزیه نمود و از بخش‌هایی که در آن محدوده‌های جذبی پدیده‌های مورد نظر قرار دارند، در کاربردهای مناسب استفاده کرد. که البته شاید از لحاظ تئوری بخش‌های مختلف امواج الکترومغناطیس برای بررسی پدیده‌های متفاوت (بطور مثال استفاده از مادون قرمز موج کوتاه در آنالیز مواد معدنی) مناسب باشد اما کاهش این محدوده موجب افزایش وابستگی بین اعضای خالص می‌شود.

گروه دیگری از الگوریتم‌ها به صورت تکراری اعضای خالص را به گونه‌ای از تصویر استخراج می‌کنند که مجموعه حاصل بهترین توصیف را از تغییرپذیری طیفی کل تصویر با کمترین تعداد اعضای‌خالص غیر وابسته داشته باشد، که این مجموعه، از رئوس ابر نقاط طیفی و در فضای ویژگی به‌دست آمده‌اند. و بالاخره آخرین دسته از الگوریتم‌های این گروه را می‌توان به روش‌های پایدارسازی حل مسئله کمترین مربعات همچون تیخونوف نسبت داد که با تعیین ضریب فیلتر پایدارسازی مناسب سعی در بهبود شرایط حل مسئله معکوس کمترین مربعات دارد [۳].

[1] Principal Component Analysis (PCA)
[2] Minimum Noise Fraction (MNF)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-01]
[DOI: 10.29252/jgit.6.3.101]

۲-۲-۱- محاسبه همبستگی میان اعضای‌خالص

برای محاسبه کمی همبستگی اعضای خالص تشکیل دهنده ماتریس ضرایب از دو معیار می‌توان استفاده کرده: ۱- با استخراج سنجه‌ای از ماتریس ضرایب و براساس مقادیر منفرد[1] آنها، ۲- با استخراج سنجه‌ای از همبستگی میان طیف‌های اعضای خالص.

تجزیه مقادیر منفرد (SVD) ماتریس اعضای‌خالص (M) برای استخراج مقادیر منفرد (جذر مقادیر ویژه) به صورت $M = U\Sigma V^T$ می‌باشد که U و V ماتریس‌های مربعی و اورتونرمال هستند و Σ ماتریس قطری با مقادیر منفرد M می‌باشد. نسبت بزرگترین مقدار منفرد به کوچکترین آن به عنوان **عدد شرط ماتریس** شناخته می‌شود. عدد شرط ۱ در حالت ایده‌آل و نشان از تعامد ماتریس دارد و هرچه این عدد افزایش می‌یابد بیانگر رخداد همبستگی میان اعضای‌خالص و افزایش احتمال سینگولار شدن ماتریس می‌باشد. وقتی همبستگی میان اعضا از ۰٫۶ افزایش می‌یابد عدد شرط به صورت نمائی افزایش می‌یابد. به این ترتیب عدد شرط معیار مناسبی برای بررسی همبستگی میان اعضای‌خالص می‌باشد.

جدول (۱) ماتریس وابستگی برای آلتراسیون‌های متداول معدنی (رس، فلدسپار، سولفات و ...) را نشان می‌دهد که در مطالعات زمین شناسی مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ جدول (۲) همبستگی همین مجموعه معدنی را در محدوده مادون قرمز موج کوتاه (SWIR) نشان می‌دهد که در این محدوده باندهای جذبی این مواد واقع شده‌اند. از مقایسه این دو جدول به وضوح مشخص است استفاده تنها از نواحی SWIR که از دیدگاه زمین شناسی منطقی بوده و مشخصه‌های جذبی مواد برای شناسایی آنها حضور دارند، همبستگی میان اعضا به شدت افزایش می‌یابد.

بنابراین به کمک ماتریس کرولیشن اعضا و **میانگین همبستگی** آنها می‌توان به سنجه‌ای دست یافت که بیانگر همبستگی جزئی و کلی اعضا باشد.

۳- روش پیشنهادی

در این مقاله به طور مشخص کاهش اثر تغییرپذیری طیفی و کاهش همبستگی اعضای‌خالص تشکیل دهنده ماتریس ضرایب با انتخاب باندهای بهینه هدف گذاری شده‌است؛ که این دو عامل به طور مستقیم در بهبود دقت و اعتمادپذیری نقشه مقادیر فراوانی برآورد شده اعضای‌خالص نقش دارند. در ادامه ابتدا فلوچارت روش پیشنهادی و مراحل آن ذکر شده و سپس نوآوری‌های به عمل آمده در هر بخش تشریح می‌گردد.

۳-۱- الگوریتم پیشنهادی

به منظور جانمایی اجزا مختلف روش پیشنهادی فلوچارتی مطابق شکل (۲) از مراحل آن ارائه و سپس جزئیات آن در قالب شبه کد برنامه تشریح شده‌است. همانطور که ملاحظه می‌شود با استفاده از نقشه واقعیت زمینی برای هر کلاس مجموعه‌ای از طیف‌های خالص که تغییرپذیری آن کلاس را نشان می‌دهد تهیه می‌شود. از این مجموعه‌ها برای تولید طیف خالص هر کلاس و آنالیزهای آماری در هر باند استفاده می‌شود. با استفاده از آنالیزهای داخل کلاسی و بین کلاسی که در قالب شاخص‌هایی همچون ISI صورت می‌پذیرد باندهای مقاوم به پدیده تغییرپذیری طیفی مرتب می‌شوند. سپس بر مبنای باندهای الویت‌بندی شده و با استفاده از جانمایی باندها در فضای پدیده (PS) و زاویه میان آنها در این فضا شروع به انتخاب باند کرده و باندهایی که عملکرد یکسانی دارند از مجموعه باندهای مرتب شده حذف می‌گردند و به این ترتیب جداسازی طیفی در باندهای باقیمانده انجام و نقشه فراوانی هر عضوخالص محاسبه می‌شود.

[1] Singular Values

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-01]

[DOI: 10.29252/jgit.6.3.101]

جدول ۱: ماتریس وابستگی طیف بازتابی از آلتراسیون‌های معدنی متداول در محدوده ۲.۵-۰.۴ میکرومتر [۳]

	Alunite	Buddingtonite	Chlorite	Halloysite	Illite	Kaolinite	Montmorillonite	Talc
Alunite	۱/۰۰							
Buddingtonite	۰/۲۲	۱/۰۰						
Chlorite	-۰/۵۲	۰/۴۰	۱/۰۰					
Halloysite	**۰/۸۷**	۰/۰۱	**-۰/۶۶**	۱/۰۰				
Illite	-۰/۵۱	۰/۱۷	**۰/۸۴**	-۰/۵۸	۱/۰۰			
Kaolinite	**۰/۸۸**	۰/۳۱	-۰/۳۴	**۰/۹۰**	-۰/۳۳	۱/۰۰		
Montmorillonite	**۰/۶۷**	**۰/۶۷**	-۰/۰۸	**۰/۶۶**	-۰/۱۴	**۰/۸۰**	۱/۰۰	
Talc	۰/۵۹	۰/۱۹	۰/۰۳	۰/۵۹	-۰/۰۲	**۰/۷۵**	۰/۵۶	۱/۰۰

جدول ۲: ماتریس وابستگی طیف بازتابی از آلتراسیون‌های معدنی متداول در محدوده ۲.۵-۲.۰ میکرومتر [۳]

	Alunite	Buddingtonite	Chlorite	Halloysite	Illite	Kaolinite	Montmorillonite	Talc
Alunite	۱/۰۰							
Buddingtonite	-۰/۱۳	۱/۰۰						
Chlorite	۰/۱۴	**-۰/۹۴**	۱/۰۰					
Halloysite	**۰/۷۳**	**-۰/۶۶**	**۰/۶۷**	۱/۰۰				
Illite	۰/۵۱	**-۰/۸۲**	**۰/۸۱**	**۰/۹۲**	۱/۰۰			
Kaolinite	**۰/۷۵**	**-۰/۶۳**	**۰/۶۵**	**۰/۹۹**	**۰/۸۹**	۱/۰۰		
Montmorillonite	۰/۵۷	**-۰/۸۱**	**۰/۷۵**	**۰/۸۸**	**۰/۹۴**	**۰/۸۴**	۱/۰۰	
Talc	۰/۱۱	**-۰/۸۶**	**۰/۹۳**	۰/۵۸	**۰/۶۶**	۰/۵۹	**۰/۶۱**	۱/۰۰

شبه کد روش پیشنهادی:

۱- اولویت‌بندی باندهای مقاوم در برابر تغییرپذیری طیفی به کمک شاخص مربوطه و داده‌های آموزشی.

$$\Omega = \{B_i\}_{i=1}^{L} \quad where \quad B_1 \geq B_2 \geq \cdots B_L$$

که Ω مجموعه باندهای اولویت‌بندی شده و i اندیس اولویت‌بندی باندها می‌باشد.

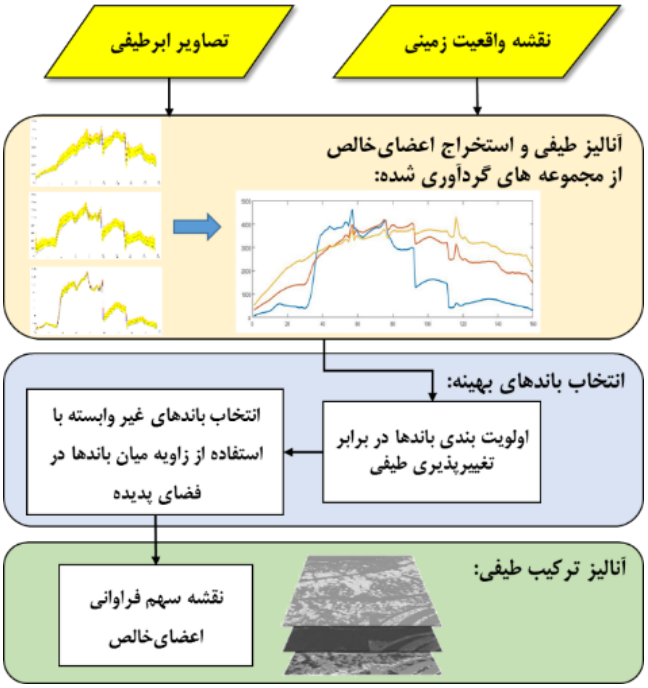
۲- انتخاب بهترین باند پس از اولویت‌بندی $\Omega_1 = \{B_1\}$

۳- انتخاب باند B_i و محاسبه زاویه آن با تمامی اعضای Ω_{i-1} در فضای پدیده

۴- اگر زاویه میان باند مورد بررسی با تمام باندهای انتخاب شده پیشین بزرگتر از حد آستانه تعریف شده بود $\Omega_i = \Omega_{i-1} \bigcup \{B_i\}$ در غیر اینصورت $\Omega_i = \Omega_{i-1}$ و باند با اولویت i ام حذف می‌گردد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-01]

[DOI: 10.29252/jgit.6.3.101]



شکل ۲: فلوچارت روش پیشنهادی

۳-۲- کاهش اثر تغییرپذیری طیفی با انتخاب باندهای بهینه

بر خلاف روش‌های متداول آنالیز ترکیب طیفی که از کل محدوده طیفی (باندها) استفاده می‌کنند، روش SZU بر پایه انتخاب باندهای مقاوم بر پدیده تغییرپذیری طیفی با استفاده از شاخص ISI طراحی شده‌است. مقدار این شاخص که بر مبنای تابع تفکیک‌پذیری فیشر به‌دست آمده از رابطه (۱) برای هر باند به‌دست می‌آید. از آنجائی‌که این شاخص تفکیک‌پذیری دو به دو کلاس‌ها را در هر باند محاسبه و در نهایت از میانگین آنها استفاده می‌کند نکات زیر از نتایج شاخص ISI قابل توجه است. ۱- فاصله بین کلاسی در هر باند فاصله اقلیدسی آنهاست، ۲- چنانچه تفکیک‌پذیری کلاسی از سایر کلاس‌ها زیاد باشد ولی سایر کلاس‌ها فاصله چندانی نداشته باشند این شاخص تحت تاثیر کلاسی که تفکیک‌پذیری مناسبی دارد به نتایج نسبتا مناسبی از تفکیک‌پذیری کلاس‌ها می‌رسد.

در سال‌های اخیر معیارهای متعددی برای انتخاب باندهای بهینه پیشنهاد شده‌است. بطور مثال معیارهای سنجش فاصله (فاصله باهاتاچاریا[1] و جفریز ماتوسیتا (JM[2])، روش‌های تئوری اطلاعات (دیورژانس[3]، دیورژانس تبدیل یافته[4] و اطلاعات متقابل[5]) و آنالیز مقادیر ویژه (برپایه مولفه‌های اصلی و برمبنای بهبود دقت طبقه‌بندی[6]). با توجه به تحقیقات به‌عمل آمده معیار فاصله JM و دیورژانس تبدیل‌یافته معیارهای مناسبی جهت انتخاب باند معرفی شده‌اند [۶]. فاصله JM با افزایش تفکیک‌پذیری کلاس‌ها رفتاری اشباع شده دارد و چنانچه توزیع نمونه‌های کلاس‌های مختلف نرمال باشد با استفاده از رابطه (۲) قابل محاسبه است .

[1] Bahattacharyya
[2] Jeffreys-Matusita (JM)
[3] Divergence
[4] Transformed Divergence
[5] Mutual Information
[6] Minimum misclassification canonical analysis (MMCA)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-01]
[DOI: 10.29252/jgit.6.3.101]

رابطه (۲)
$$JM_{\lambda} = \sqrt{2\left(1-e^{-Bhat_{\lambda}}\right)}$$

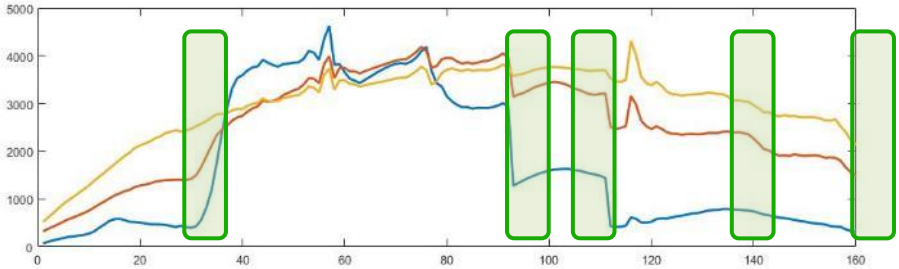
که $Bhat_{\lambda}$ فاصله باهاتاچاریا میان دو کلاس در باند λ بوده و از رابطه (۳) به‌دست می‌آید. همانطور که از این رابطه مشخص است برای محاسبه فاصله کلاس‌ها به توزیع آنها نیز توجه شده‌است. با محاسبه میانگین فاصله JM میان کلاس‌های مختلف در هر باند می‌توان به شاخصی رسید که وضعیت تفکیک‌پذیری تمامی کلاس‌ها در آن باند بوده و حداکثر می‌تواند مقدار ۲ را به خود بگیرد.

رابطه (۳)
$$Bhat_{ij,\lambda} = \frac{1}{8}\left(\bar{m}_{i,\lambda} - \bar{m}_{j,\lambda}\right)^{T}\left(\frac{\Sigma_{i,\lambda}+\Sigma_{j,\lambda}}{2}\right)^{-1}\left(\bar{m}_{i,\lambda} - \bar{m}_{j,\lambda}\right) + \frac{1}{2}Ln\left[\frac{\left|\Sigma_{i,\lambda}+\Sigma_{j,\lambda}/2\right|}{\sqrt{\left(\left|\Sigma_{i,\lambda}\right|\cdot\left|\Sigma_{j,\lambda}\right|\right)}}\right]$$

که $\Sigma_{i,\lambda}$ و $\bar{m}_{i,\lambda}$ انحراف معیار و میانگین کلاس i در باند λ می‌باشد. از اینرو برای اولویت‌بندی باندها پیشنهاد می‌گردد از فاصله JM به جای شاخص ISI استفاده شده و عملکرد این دو معیار که در دو دسته متفاوت هستند مورد بررسی قرار گیرد.

۳-۳- کاهش همبستگی اعضای‌خالص با انتخاب باندهای بهینه

همبستگی خطی بین دو و یا چند عضوخالص همواره در جداسازی طیفی تصاویر ابرطیفی وجود داشته، هرچند کمتر مورد توجه قرار گرفته‌است. یکی دیگر از اهداف این مقاله کاهش این همبستگی‌ها بدون حذف عضو وابسته است؛ زیرا همانطور که اشاره شد در برخی از کاربردها ممکن است تمایز گونه‌های مختلف یک کلاس مدنظر باشد. از طرفی در فرآیند اولویت‌بندی باندها برای کاهش اثر تغییرپذیری طیفی وابستگی رفتار طیفی مجموعه اعضای خالص در باندهای مجاور در نظر گرفته نشده‌است. این دو موضوع به‌طور تنگاتنگی با یکدیگر مرتبط هستند، بطوری‌که با حذف باندهایی که مجموعه اعضای خالص در آنها رفتار مشابهی دارند می‌توان به مشخصه‌های طیفی برای این اعضا دست یافت که وابستگی کمتری از خود نشان می‌دهند. همانگونه که از شکل (۳) مشخص است باندهایی که در محدوده‌های مشخص شده قرار دارند دارای افزونگی اطلاعات هستند و علاوه بر آن همین محدوده‌ها نیز ممکن است با یکدیگر همبستگی داشته باشند.

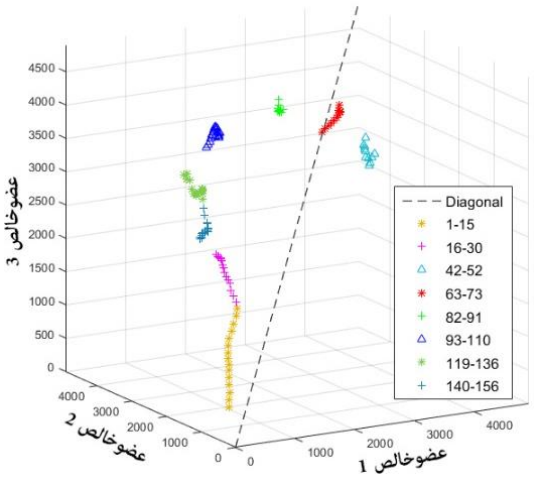


شکل ۳: منحنی طیفی سه عضوخالص و محدوده‌های دارای همبستگی بالا در باندهای مجاور

برای محاسبه وابستگی بین باندها روش‌هایی بر مبنای دیورژانس و کرولیشن، بر روی هیستوگرام پیکسل‌های باندهای مختلف تصویر پیشنهاد شده‌است. اما از آنجائیکه هدف بهبود وضعیت ماتریس ضرایب و کاهش همبستگی اعضای‌خالص می‌باشد در این مقاله استفاده از زاویه مابین باندها به عنوان معیاری از همبستگی رفتار آن مجموعه از اعضای خالص در آن دو باند مدنظر

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-01]
[DOI: 10.29252/jgit.6.3.101]

قرار گرفته است. به عبارتی با تشکیل فضای پدیده[1] [۷] که به کمک اعضای خالص صورت می‌گیرد و نمایش باندها در آن فضا می‌توان باندهای وابسته و دارای رفتار مشابه را شناسایی کرد. مزیت این روش در این نکته می‌باشد که وابستگی بین باندها در تعامل با مجموعه اعضای‌خالص مورد بررسی قرار می‌گیرد زیرا محورهای تشکیل دهنده فضا اعضای‌خالص هستند و چنانچه ترکیب این اعضا در صحنه تصویربرداری تغییر یابد روش پیشنهادی باز باندهایی را انتخاب می‌کند که در آن ترکیب کمترین همبستگی را دارند. شکل (۴) فضای پدیده حاصل از سه عضوخالص شکل (۳) را به نمایش می‌گذارد. در این شکل باندهایی که از نظر پاسخ طیفی دارای شباهت رفتاری هستند به‌صورت بصری دسته‌بندی شده‌اند.



شکل ۴: فضای پدیده حاصل از سه عضوخالص

همانطور که مشخص است زاویه میان این باندها به یکدیگر نزدیک بوده و حتی محدوده‌هایی که از نظر طول موج مجاور هم نیستند ولی رفتار طیفی یکسانی دارند دارای زوایای نزدیک به هم می‌باشند. به این ترتیب با استخراج زوایای میان باندها می‌توان همبستگی آنها در تعامل با اعضای‌خالص موجود را درک کرد.

۴- آزمایش‌ها

آزمایش‌های پیشرو برای انتخاب باندهای بهینه در راستای کاهش اثر تغییرپذیری طیفی و همبستگی بین اعضای خالص طراحی شده و نقش آن را در نتایج جداسازی طیفی نشان می‌دهد. این آزمایش‌ها در دو بخش ابتدا بر روی تصاویر شبیه‌سازی شده و سپس بر روی تصویر واقعی انجام شده‌است.

۴-۱- داده شبیه سازی شده

در این بخش برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها، از تصویری شبیه‌سازی شده با ابعاد ۱۰۰ در ۱۰۰ پیکسل که در ساخت پیکسل‌های آن از ۵ مشخصه طیفی، که از کتابخانه طیفی سازمان زمین شناسی ایالت متحده آمریکا (USGS[2]) انتخاب شده به‌عنوان اعضای خالص استفاده شده‌است . همان‌طور که از شکل و زوایای اعضای‌خالص استفاده شده مطابق شکل (۵) مشخص است رفتار طیفی این اعضا به یکدیگر نزدیک بوده و شرایط مناسبی را برای بررسی عملکرد الگوریتم‌ها فراهم می‌نماید. شبیه‌سازی تحت شرایط کنترل شده و با نسبت سیگنال به نویز ۱:۳۰ انجام شده‌است.

[1] ProtoType Space (PS)

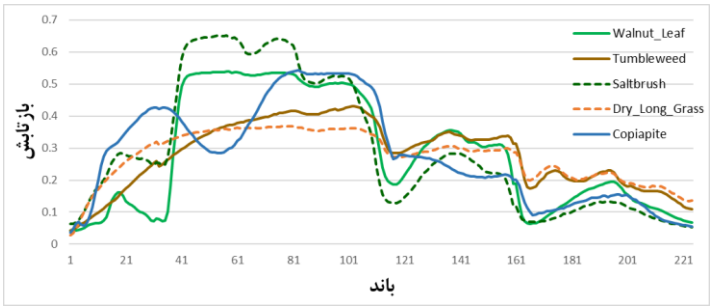
[2] United States Geological Survey (USGS)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-01]

[DOI: 10.29252/jgit.6.3.101]

عضو خالص	۲	۳	۴	۵
۱	۵.۶۱	۱۲.۲۳	۱۵.۱۸	۱۷.۱۵
۲		۶.۶۳	۱۰.۰۲	۱۳.۷۵
۳			۵.۰۳	۱۱.۸۳
۴				۷.۶۲
۵				

(ب)



(الف)

شکل ۵: (الف) مشخصه طیفی و (ب) زاویه اعضای خالص استفاده شده در تصویر شبیه سازی شده

برای بازسازی مقادیر فراوانی پیکسل‌های تصویر از تابع Dirichlet با توزیع مندرج در رابطه (۴) استفاده شده است.

$$p(\alpha_1,\alpha_2,...,\alpha_p)=\frac{\Gamma(\mu_1+\mu_2+...+\mu_p)}{\Gamma(\mu_1)\Gamma(\mu_2)...\Gamma(\mu_p)}\times\alpha_1^{\mu_1-1}\alpha_2^{\mu_2-1}\times...\times\alpha_p^{\mu_p-1} \quad \text{رابطه (۴)}$$

که میانگین i امین مقدار فراوانی(α_i) برابر است با $\mathrm{E}[\alpha_i]=\mu_i/\sum_{l=1}^{p}\mu_l$. در این توزیع قیود $0\le\alpha_i\le1$ و $\sum_{i=1}^{p}\alpha_i=1$ به طور همزمان بر روی مقادیر فراوانی اعمال می‌گردند. در این تحقیق اثرات ناشی از تغییرپذیری طیفی اعضای خالص و نوسان روشنایی[1] ناشی از توپوگرافی بر روی انرژی انعکاسی مدل گردیده‌است. تغییرپذیری طیفی به‌طور ساده به‌عنوان عدم تغییر در شکل کلی طیف مرتبط با اعضای خالص توصیف می‌گردد [۸]؛ به عبارت دیگر با حفظ شکل کلی منحنی طیفی عضوخالص، دامنه آن تحت تاثیر قرار گرفته و مقدار بازتاب را در طول موج‌های مختلف افزایش یا کاهش می‌دهد. بر این اساس تغییرپذیری طیفی iامین عضوخالص در هر پیکسل را می‌توان به‌صورت رابطه (۵) مدل نمود.

$$\mathbf{m}_i=\psi_i\mathbf{m}_i^{\circ}+\boldsymbol{\eta}_i \quad \text{رابطه (۵)}$$

که $\mathbf{m}_i^{\circ}$ مشخصه طیفی خالصی است که از کتابخانه طیفی انتخاب شده و $\psi_i\ge0$ ضریبی است که دامنه طیفی مربوطه را تحت تاثیر خود قرار داده و $\boldsymbol{\eta}_i$ برداری تصادفی با میانگین صفر می‌باشد؛ نویز برای مدل نمودن تغییراتی درنظر گرفته شده که با استفاده از ψ_i مدل نشده‌اند. با جایگزینی رابطه (۵) در رابطه ترکیب خطی ($\mathbf{r}=\mathbf{M}\boldsymbol{\alpha}+\mathbf{n}$) می‌توان به رابطه‌ای رسید که تاثیر تغییرپذیری طیفی را برای هر پیکسل مدل می‌نماید.

$$\mathbf{r}=\mathbf{M}\boldsymbol{\psi}\boldsymbol{\alpha}+\sum_{i=1}^{p}\alpha_i\boldsymbol{\eta}_i+\mathbf{n} \quad \text{رابطه (۶)}$$

که $\boldsymbol{\psi}\equiv diag(\psi_1,\psi_2,...,\psi_p)$ یک ماتریس قطری $p\times p$ می‌باشد. اعمال این ضرایب بدین ترتیب می‌باشد که با درنظر گرفتن مقداری به عنوان انحراف معیار تغییرات (sd) و با پیروی از یک تابع تصادفی که از توزیع نرمال تبعیت می‌کند ضرایبی به صورت تصادفی در بازه $1\pm sd$ تولید شده که در مشخصه طیفی اصلی ضرب می‌گردد. این ضرایب پیکسل به پیکسل متفاوت بوده و به خوبی اثر تغییرپذیری طیفی

[1] Illumination Fluctuation

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-01]
[DOI: 10.29252/jgit.6.3.101]

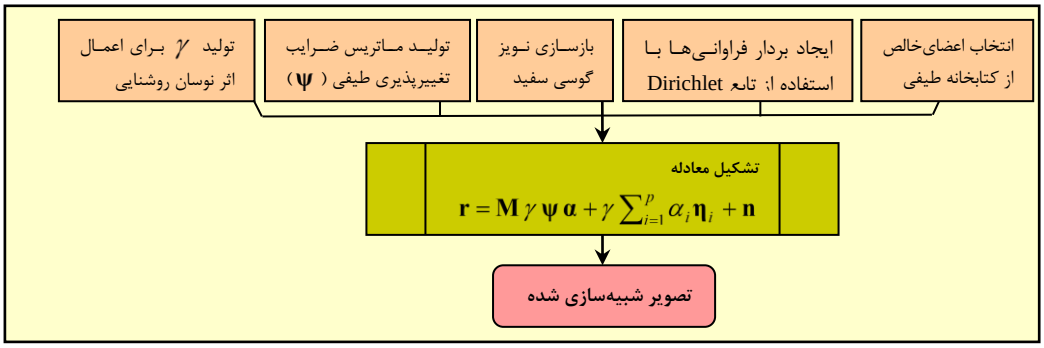
را مدل می‌نماید. در این آزمایش از عدد ۰.۲ برای مقدار sd استفاده شده‌است.

تغییرپذیری روشنایی و یا به‌عبارت بهتر نوسان روشنایی ناشی از توپوگرافی بر روی تمام باندها به‌طور یکسان اثرگذار بوده و به عنوان یک نویز افزایشی در نظر گرفته می‌شود [۹]. برای مدل نمودن این اثر با ثابت درنظر گرفتن ماتریس مشخصه‌های طیفی و ضرب مقادیر فراوانی هر پیکسل در ضریبی همچون γ می‌توان این اثر را نیز مدل نمود. به این ترتیب خواهیم داشت.

رابطه (۷)

$$\mathbf{r}=\mathbf{M}\gamma\boldsymbol{\psi}\boldsymbol{\alpha}+\gamma\sum_{i=1}^{p}\alpha_i\boldsymbol{\eta}_i+\mathbf{n}\ \ =\mathbf{M}\mathbf{s}+\mathbf{n}'$$

رابطه (۷)، مدلی است که در آزمایش‌های این تحقیق اتخاذ شده و همچنان خطی می‌باشد. این مدل نوسان‌های روشنایی، تغییرپذیری طیفی و نویز موجود در تصاویر را مدل می‌نماید. شکل (۶) به‌طور خلاصه مراحلی که برای ساخت یک تصویر شبیه‌سازی شده در این تحقیق دنبال شده‌است را به نمایش می‌گذارد.



شکل ۶: مراحل بازسازی تصاویر شبیه‌سازی شده

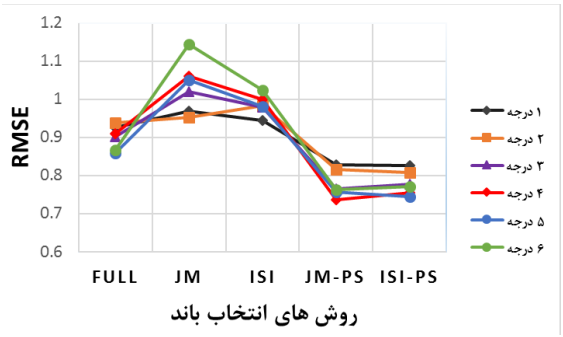
پس از ساخت تصویر شبیه‌سازی شده با مشخصات فوق، به کمک شاخص ISI و فاصله JM باندهای تصویر با رویکرد افزایش تفکیک‌پذیری کلاس‌ها و کاهش اثر تغییرپذیری طیفی مرتب می‌شوند. از آنجائیکه وابستگی بین باندها در این حالت درنظر گرفته نمی‌شود به کمک زوایای میان باندها در فضای پدیده، باندهای با افزونگی اطلاعات (باندهای وابسته)، شناسایی و از مجموعه باندهای اولویت‌بندی شده خارج می‌گردند. در این حالت برای بررسی اثر مجموعه باندهای انتخابی در هر روش بر روی برآورد نقشه فراوانی اعضای‌خالص و با توجه به مشخص بودن سهم واقعی هر عنصر در هر پیکسل می‌توان خطای RMSE را در هر روش محاسبه نمود.

همانطور که در مرحله ۴ الگوریتم پیشنهادی بیان شده از حد آستانه‌ای برای تشخیص باندهای غیر وابسته استفاده می‌گردد؛ به عبارتی چنانچه زاویه باندی که مورد سنجش قرار گرفته با تمام باندهای انتخاب شده قبلی از این حد آستانه بزرگتر باشد نشانه تمایز رفتاری آن در تعامل با باندهای انتخابی می‌باشد. انتخاب این حدآستانه متاثر از تعداد اعضای‌خالص، شباهت رفتاری مجموعه اعضای خالص نسبت به یکدیگر، تنوع اعضای موجود در صحنه تصویربرداری و تعداد باندهای به‌دست آمده می‌باشد. انتخاب این حدآستانه ماهیت تجربی داشته اما در صورتیکه نقشه واقعیت زمینی دقیق در دسترس باشد از خطای RMSE حاصل از مقایسه این نقشه با نقشه سهم فراوانی برآورد شده، می‌توان به برآورد صحیحی در تعیین حدآستانه مذکور دست یافت.

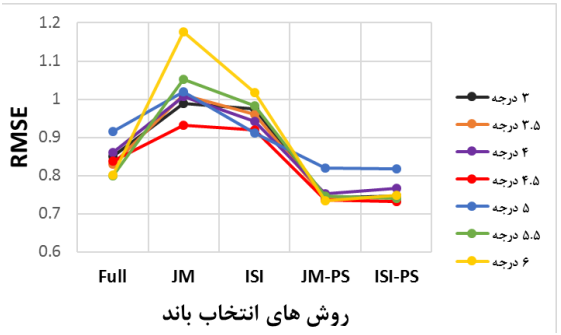
بدین منظور در ابتدا با انتخاب زوایایی در محدوده ۱ تا ۶ درجه و با فاصله زاویه‌ای ۱ درجه الگوریتم‌های

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-01]
[DOI: 10.29252/jgit.6.3.101]

معرفی شده اجرا و RMSE حاصل از هر روش در شکل (۷- الف) به نمایش گذارده شده‌است. لازم به ذکر است که نتایج مربوط به هر زاویه از میانگین نتایج ۱۰ تصویر با اعضای خالص شکل (۵) به‌دست آمده که در هر تصویر به‌طور تصادفی ۱۰ درصد از پیکسل‌های خالص نقشه واقعیت زمینی به‌عنوان داده آموزشی و از مابقی پیکسل‌ها به‌عنوان داده تست استفاده شده‌است.

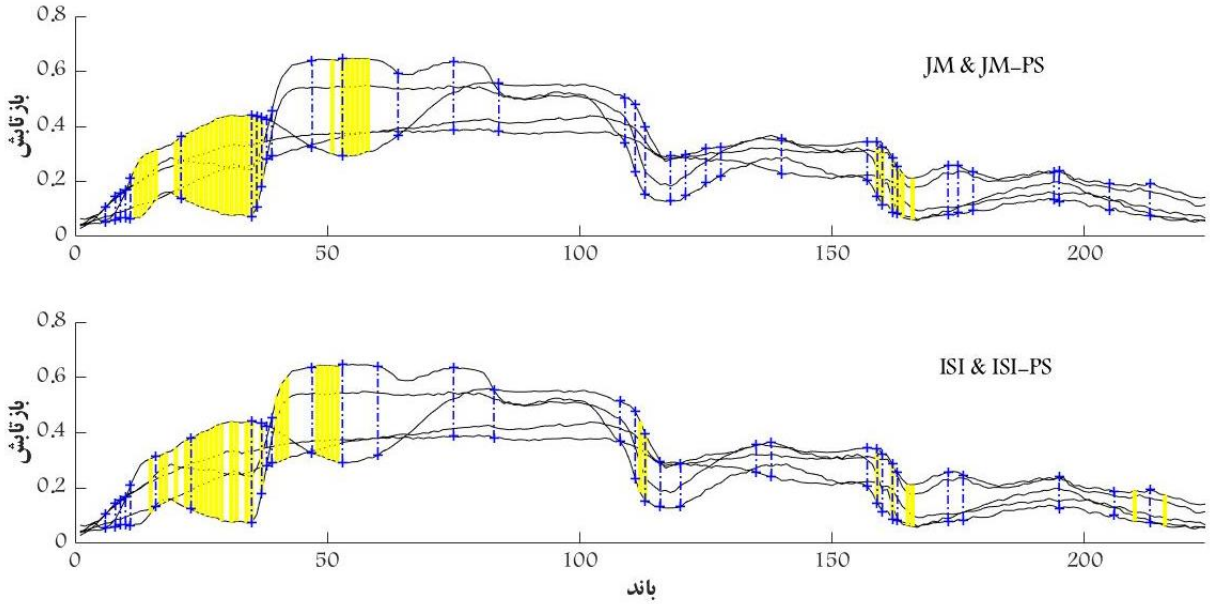


(الف)



(ب)

شکل ۷: مقایسه خطای RMSE نقشه‌های فراوانی برآورد شده با مقادیر واقعی در روش‌های انتخاب باند مختلف (الف) در زوایای ۱ تا ۶ درجه با فاصله زاویه‌ای ۱ درجه ، (ب) در زوایای ۳ تا ۶ درجه با فاصله زاویه‌ای ۰.۵ درجه

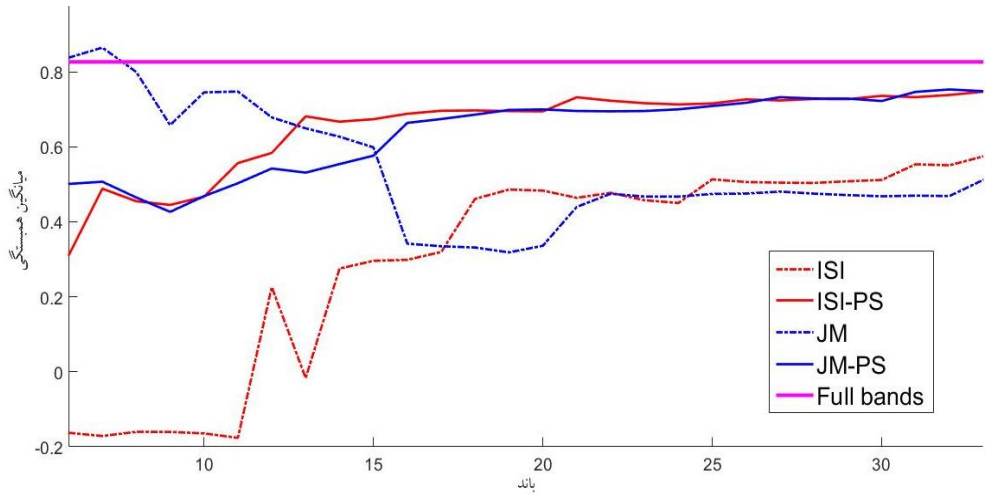


شکل ۸: مقایسه باندهای انتخابی پس از اعمال شرط زاویه در فضای پدیده (خطوط خط‌چین آبی رنگ) با باندهای اولویت‌بندی شده (خطوط زرد رنگ) به کمک شاخص‌های JM و ISI

اما روش‌های استفاده شده چه تاثیری بر همبستگی اعضای‌خالص داشته‌اند؟ برای بررسی این موضوع از میانگین کرولیشن ماتریس ضرایب با تعداد باندهای مختلف در هر روش استفاده شده که شکل (۹) این مقادیر را با افزایش باندهای الویت‌بندی شده در حالت‌های مختلف به نمایش گذارده است. همبستگی میان اعضای‌خالص در صورتی از تمام باندها استفاده شود ۰٫۸۱، در صورتی‌که از باندهای الویت‌بندی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-01]
[DOI: 10.29252/jgit.6.3.101]

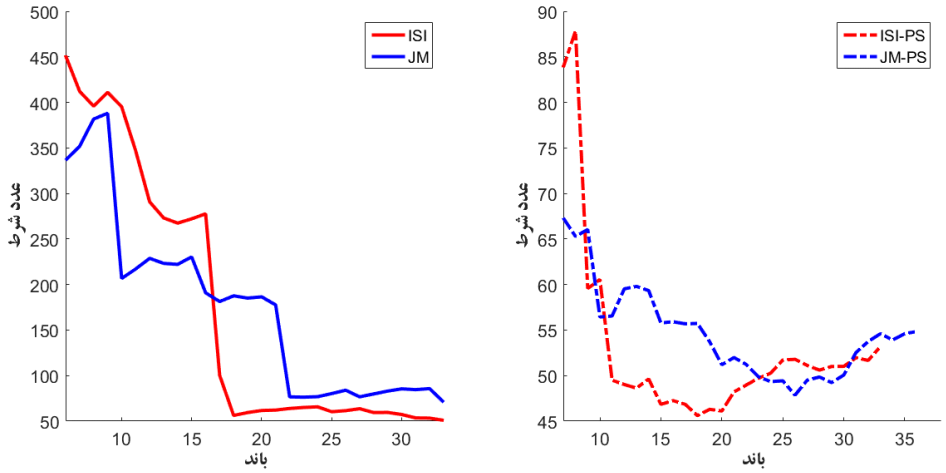
شده با شاخص‌های ISI و JM استفاده شود در حدود ۰/۷۰ و چنانچه باندهای وابسته نیز به کمک فضای پدیده حذف گردند این همبستگی به حدود ۰/۵۰ کاهش می‌یابد.



شکل ۹: میانگین همبستگی اعضای‌خالص، حاصل از ماتریس اعضای‌خالص با افزایش باندهای منتخب

علاوه بر این در شکل (۱۰) مقایسه‌ای شده بین عدد شرط ماتریس ضرایب در حالتی که همبستگی میان باندها لحاظ نشده و حالتی که این عمل به کمک فضای PS درنظر گرفته شده‌است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با حذف باندهای وابسته عدد شرط کاهش یافته که بیانگر بهبود وضعیت حل معادلات کمترین مربعات و بهبود اعتمادپذیری نتایج خواهد بود.

آنچه که از نتایج آزمایش‌ها مشخص است الگوریتم پیشنهای JM به طور مشخص قابل رقابت با شاخص ISI می‌باشد.



شکل ۱۰: عدد شرط حاصل از ماتریس ضرایب اعضای خالص با افزایش باندهای منتخب در روش‌های مختلف

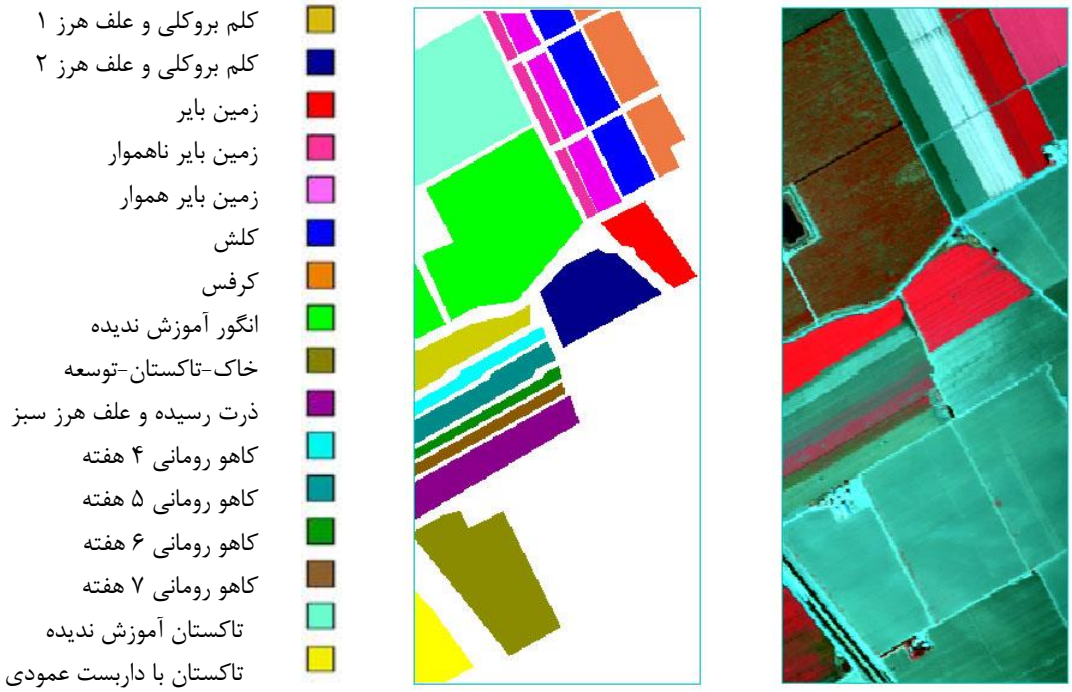
۴-۲- داده واقعی

این آزمایش با استفاده از تصویر سنجنده AVIRIS انجام شده که در تاریخ ۹ اکتبر ۱۹۹۸ از فراز دره Salinas در جنوب کالیفرنیا گردآوری شده و در واحد تابندگی[1] می‌باشد. کل صحنه تصویربرداری متشکل از ۵۱۲ سطر در ۲۱۷ ستون با ۱۶۰ باند طیفی

[1] Radiance

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-01]
[DOI: 10.29252/jgit.6.3.101]

(پس از حذف باندهای نویزی و جذب آب) از محدوده ۰/۴ تا ۲/۵ میکرومتر، با رزولوشن طیفی اسمی ۱۰ نانومتر و قدرت تفکیک رادیومتریک ۱۶ بیت می‌باشد. این تصویر در ارتفاع کم با پیکسل سایز ۳/۷ متر اخذ شده که ترکیب رنگ کاذب آن در شکل (۱۰-الف) نمایش داده شده‌است.



شکل ۱۰: (الف) تصویر AVIRIS با ترکیب رنگی کاذب، (ب) نقشه واقعیت زمینی

این داده از منطقه‌ای کشاورزی اخذ شده و نقشه واقعیت زمینی[1] آن طبق شکل (۱۰-ب) در ۱۶ کلاس گردآوری شده‌است. محصولات این مزرعه شامل گیاهان، خاک لخت و مزارع انگور با زیر کلاس‌هایی به‌شرح زیر می‌باشد. زیر کلاس کلم بروکلی و علف هرز با استفاده از شماره ۱ که کوتاه‌تر و علف هرز کمتری دارد و شماره ۲ که بلندتر و علف هرز بیشتری دارد و در هر دو مورد سطح خاک را پوشانده تفکیک شده است. زیرکلاس کاهو با توجه به هفته کاشت و میزان رشد آن که پوشش متفاوتی بر روی خاک دارند دسته‌بندی شده‌اند. گروه خاک با توجه به عمق شخم به زیرکلاس‌های زمین بایر ناهموار که اخیرا شخم خورده و رطوبت بیشتری دارد، زمین بایر که با عمق کمتری شخم خورده و زمین بایر هموار که عمق شخم آن باز هم کمتر بوده متمایز شده‌است؛ البته در این گروه زیرکلاس کلش شامل خاک لخت و باقیمانده گیاه درو شده (کاه) می‌باشد. زیرکلاس خاک-تاکستان-توسعه شامل خاکی است که شخم خورده به‌همراه علف‌های هرز که ارتفاع کمی داشته و تیرک‌های چوبی و پلاستیکی منظمی که برای ایجاد تاکستان توسعه داده شده‌است. در گروه تاکستان، زیرکلاس تاکستان آموزش ندیده درختان مو بر روی پست‌های چوبی و پلاستیکی رشده کرده و پخش تاج پوشش به‌گونه‌ای است که تقریبا سطح خاک را پوشیده در حالی که در زیرکلاس تاکستان با داربست عمودی سطح خاک بیشتر نمایان می‌باشد و تاج پوشش درختان کمتر است. دو زیرکلاس تاکستان و انگور

[1] Ground Truth Map

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-01]
[DOI: 10.29252/jgit.6.3.101]

آموزش ندیده عملا مشابه هم می‌باشند. شکل (۱۱) تصاویری از وضعیت کلاس‌های پوششی انتخاب شده در محدوده تصویربرداری و در لحظه گذر سنسور برفراز منطقه را نشان می‌دهد.

شکل ۱۱: تصاویر کلاس‌های پوششی انتخاب شده در محدوده تصویربرداری

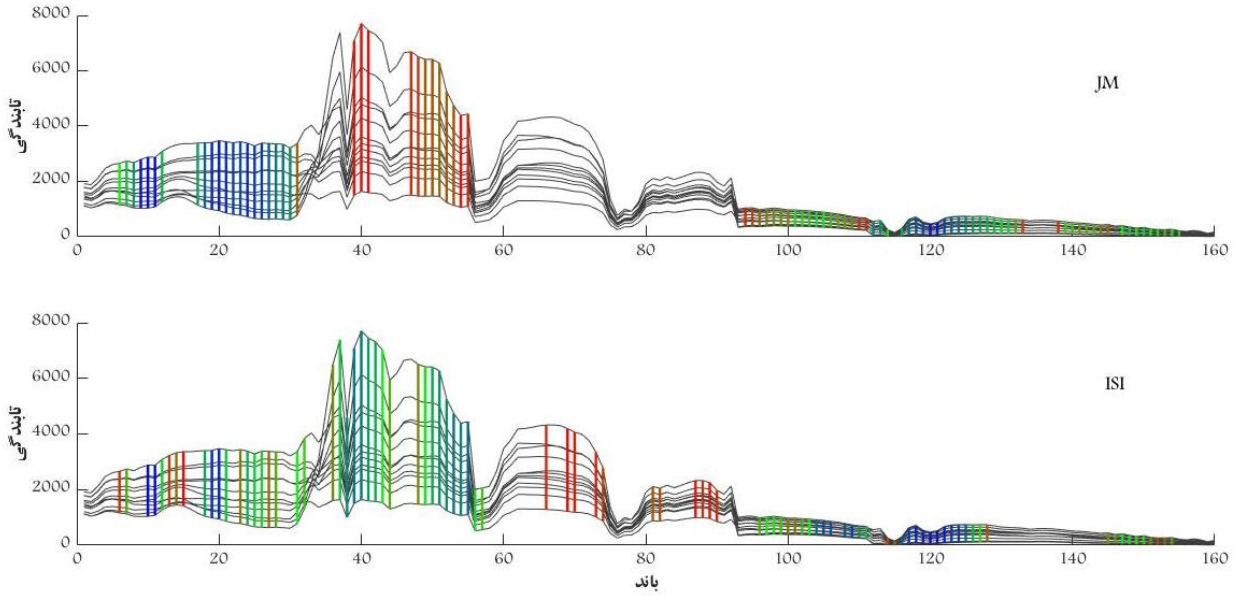
از آنجائیکه یکی از اهداف این مقاله مدیریت تغییرپذیری طیفی عوارض در سطح تصویر با انتخاب باندهای مناسب و بهبود حل مسئله کمترین مربعات جداسازی طیفی می‌باشد؛ به منظور ایجاد کلاس‌هایی که در داخل آن این پدیده وجود داشته باشد کلاس کلم بروکلی و علف هرز ۱ و ۲ در یکدیگر ادغام گردید؛ این فرآیند در خصوص کلاس انگور و تاکستان آموزش ندیده نیز صورت گرفت. در خصوص کلاس خاک، کلاس‌های زمین بایر و زمین بایر هموار با توجه به شباهت طیفی و میزان رطوبت موجود در آن، یک کلاس دیده شده اما زمین بایر ناهموار با توجه به تفاوت مقدار رطوبت آن در مقایسه با دو کلاس قبلی به صورت مستقل لحاظ شده‌است. از طرفی از آنجائی‌که یکی از خواسته‌ها از الگوریتم‌های انتخاب باند با رویکرد کاهش اثر تغییرپذیری طیفی، تفکیک کلاس‌های طیفی نزدیک به یکدیگر نیز می‌باشد؛ کلاس‌های کاهو با هفته‌های کاشت متفاوت در این بررسی مجزا لحاظ گردید در صورتی که بطور مثال کلاس کاهو ۴ هفته با کلاس زمین بایر و زمین بایر هموار به شدت تشابه طیفی دارند و یا طیف‌های کاهو ۶ هفته و ۷ هفته عملا طیف کاملا مشابهی دارند. به این ترتیب داده مورد استفاده شرایط جامعی را در خصوص پدیده مورد نظر در جداسازی طیفی فراهم نموده‌است.

برای استخراج اطلاعات هر کلاس، از ۵ درصد پیکسل‌های آن که در نقشه واقعیت زمینی و به‌صورت تصادفی انتخاب شده‌اند به عنوان داده آموزشی استفاده گردیده و با توجه به تغییرات درون کلاسی، برای هر کلاس یک مجموعه از مشخصه‌های طیفی به این ترتیب جمع‌آوری شده‌است. میانگین هر یک از این مجموعه‌ها در ادامه به عنوان طیف عضوخالص آن کلاس مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در ابتدا کیفیت باندهای تصویر، برای تفکیک کلاس‌های مختلف با رویکرد کاهش اثر تغییرپذیری

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-01]
[DOI: 10.29252/jgit.6.3.101]

طیفی با استفاده از فاصله JM و به کمک داده‌های آموزشی بالا مرتب شده و نتایج را با باندهای به‌دست آمده از شاخص ISI مقایسه می‌کنیم. شکل (۱۲) محل باندهای انتخاب شده بر روی منحنی طیفی اعضای خالص را به تصویر کشیده‌است. برای تشخیص رتبه باندها برمبنای شاخص ISI و فاصله JM به ترتیب با تخصیص طیف مرئی از آبی به سبز و قرمز، ۹۰ باند اولیه از هر روش نمایش داده‌شده‌اند.



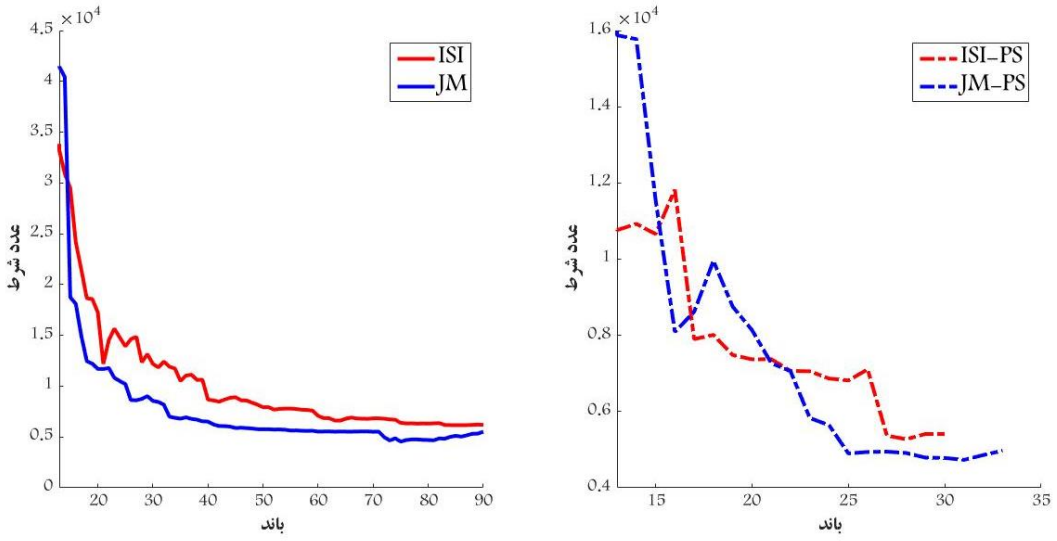
شکل۱۲: اولویت بندی ۹۰ باند نخست انتخاب شده از آبی به سبز به قرمز بر مبنای دو شاخص ISI و JM

سپس به کمک دو معیار تلاش می‌کنیم همبستگی موجود میان اعضای‌خالص را با افزایش تعداد باندهای مرتب شده مورد سنجش قرار دهیم، این دو معیار عبارت است از: ۱- عدد شرط ماتریس اعضای خالص که بر مبنای مقادیر منفرد آن به‌دست می‌آید، ۲- به‌کمک همبستگی متوسط از ماتریس کرولیشن اعضای‌خالص. شکل (۱۳-الف) عدد شرط حاصل از تجزیه مقادیر منفرد (SVD) ماتریس ضرایب را باافزایش تعداد باندهای مرتب شده بر اساس شاخص ISI و فاصله JM نمایش می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود استفاده از فاصله JM قابل رقابت با نتایج ISI بوده و حتی نتایج بهتری به نمایش می‌گذارد.

در فرآیند اولویت‌بندی باندها همان‌طور که پیشتر نیز گفته شد همبستگی بین باندها لحاظ نمی‌شود. این موضوع به روشنی از شکل (۱۲) مشخص است زیرا همان‌طور که مشاهده می‌شود باندهای متعددی با رنگ‌بندی یکسان در مجاورت یکدیگر انتخاب شده‌اند در صورتی که رفتار مجموعه اعضای‌خالص در آنها نزدیک است. بعبارتی چنانچه بتوان این افزونگی را نیز با انتخاب باندهای بهینه در هر محدوده کاهش داد می‌توان به نتایج مناسبی در دقت و حجم محاسبات رسید.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-01]

[DOI: 10.29252/jgit.6.3.101]

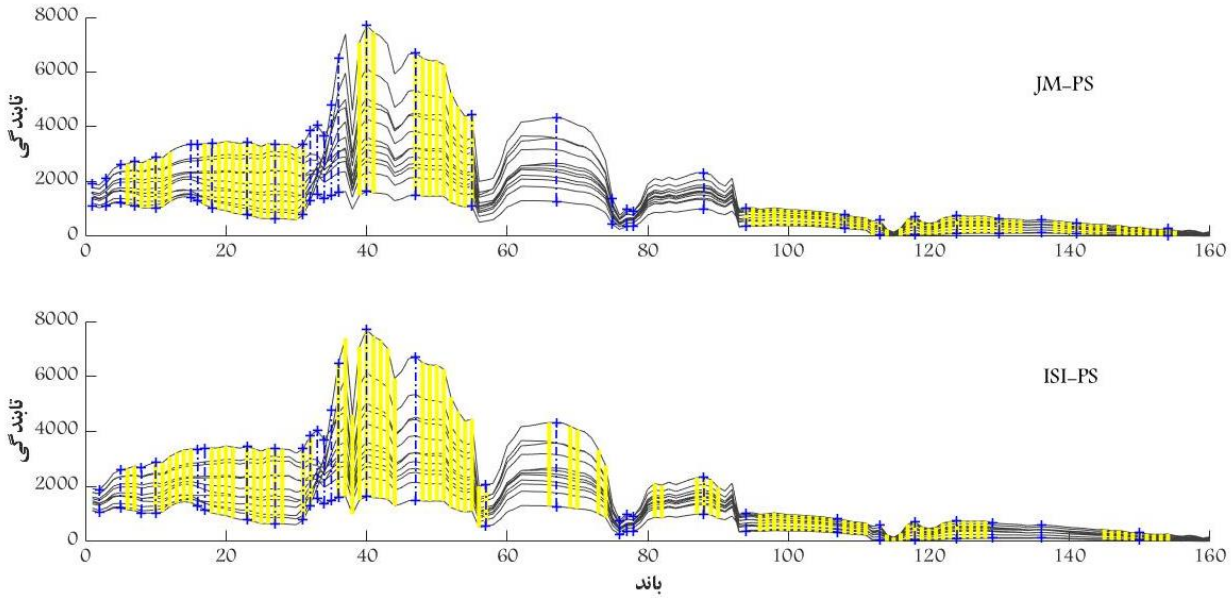


شکل ۱۳: عدد شرط حاصل از ماتریس اعضای خالص با افزایش باندهای اولویت بندی شده (الف) بدون اعمال قید زاویه، (ب) با اعمال قید زاویه میان باندها در فضای PS

برای تشخیص میزان همبستگی باندها از زاویه آنها در فضای پدیده (PS) استفاده می‌شود. در این آزمایش از زاویه ۱.۷ درجه به عنوان حدآستانه همبستگی باندها استفاده شده‌است. انتخاب حدآستانه متاثر از تعداد اعضای خالص، شباهت رفتاری مجموعه اعضای خالص نسبت به یکدیگر، تنوع اعضای موجود در صحنه تصویربرداری و تعداد باندهای به‌دست آمده می‌باشد. به‌صورت تجربی انتخاب حدآستانه‌ای که همراه با انتخاب حداقلی باندهای در محدوده‌های رفتاری یکسان باشند مناسب است. شکل (۱۴) محل باندهای انتخاب شده با اولویت‌بندی شاخص‌های ISI و JM را به تصویر کشیده است. خطوط عمودی آبی رنگ خط چین خطوطی است که پس از اعمال زاویه در فضای PS بر باندهای مرتب شده به‌دست آمده‌اند؛ همان‌طور که ملاحظه می‌شود تقریبا در هر دسته نماینده‌ای انتخاب شده‌است. شکل (۱۳-ب) عدد شرط ماتریس ضرایب با افزایش باندهای مرتب شده با اعمال قید زاویه را به تصویر می‌کشد. در این حالت بدون نیاز به تعیین تعداد باندهای مناسب و صرفا با مشخص کردن حدآستانه و دسته‌بندی باندها به کمک زوایای آنها در فضای PS زیرمجموعه‌ای مناسب از باندها به‌دست می‌آید. همانطور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود زمانیکه از قید زاویه استفاده نمی‌شود تقریبا به دو برابر حالتی که وابستگی بین باندها لحاظ می‌شود باند لازم است تا به عدد شرط نسبتا مناسبی رسید.

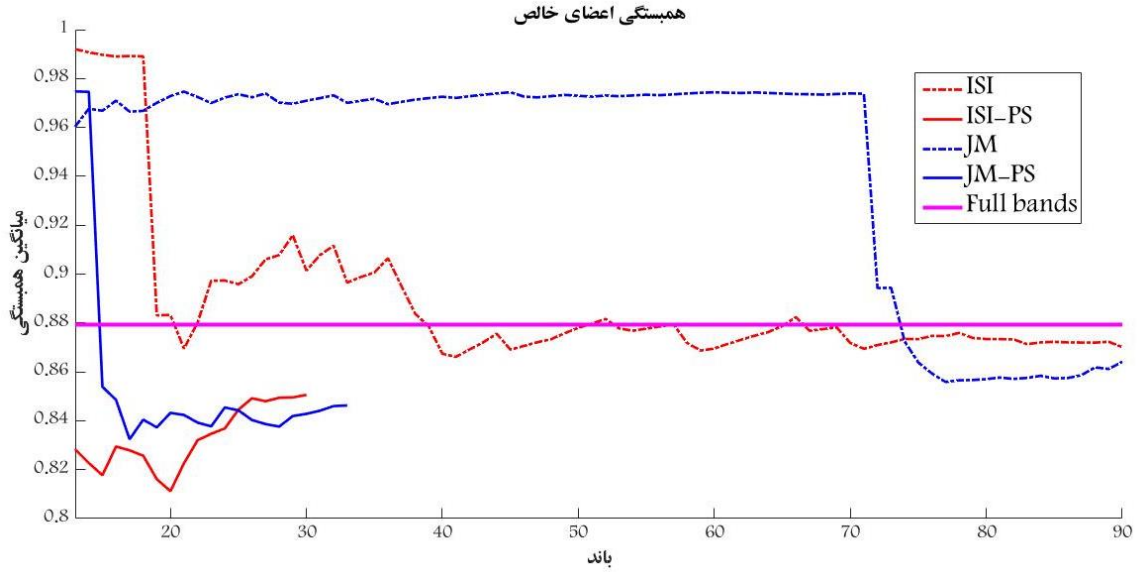
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-01]

[DOI: 10.29252/jgit.6.3.101]



شکل ۱۴: باندهای انتخابی پس از اعمال شرط وابستگی بر باندهای اولویت بندی شده در فضای PS

علاوه بر عدد شرط، برای بررسی وضعیت همبستگی مجموعه اعضای خالص در باندهای منتخب از میانگین کرولیشن ماتریس ضرایب نیز استفاده شده‌است. در شکل (۱۵) همبستگی اعضای خالص با کل باندها و با افزایش باندهای منتخب که یک بار از نتایج شاخص‌های ISI و فاصله JM و بار دیگر با اعمال قید زاویه در فضای PS بین آنها به‌دست آمده، ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با انتخاب تنها ۳۰ باند از ۱۶۰ باند می‌توان به همبستگی قابل قبول و حتی بهتری از اعضای‌خالص نسبت به حالتهای دیگر دست یافت.



شکل ۱۵: میانگین همبستگی ماتریس اعضای‌خالص در روش‌های مختلف با افزایش باندهای منتخب

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-01]
[DOI: 10.29252/jgit.6.3.101]

در ادامه نتایج حاصل از جداسازی طیفی به کمک مجموعه باندهای مختلف ارائه می‌شود تا بتوان نقش انتخاب باندهای بهینه در بهبود نتایج جداسازی طیفی و کاهش اثر تغییرپذیری طیفی اعضای خالص را بررسی نمود. به منظور انجام جداسازی طیفی و ارائه برآوردهای دقیق و قابل اطمینان از مقادیر فراوانی، نیاز به اعمال دو شرط ASC[1] و ANC[2]، بر روی مقادیر فراوانی مواد تشکیل دهنده یک پیکسل می‌باشد. حاصل اعمال این دو قید روشی است که تحت عنوان کمترین مربعات مقیدشده کامل[3] (FCLS) شناخته می‌شود. در این مقاله از روشی که در [۱۰] معرفی شده برای برآورد مقادیر فراوانی استفاده شده است. در این روش الگوریتم NNLS[4] با در برگرفتن قید ASC به‌گونه‌ای توسعه یافته که به‌طور همزمان قیود ذکر شده را اعمال نماید.

در نهایت برای ارزیابی نقش انتخاب باندهای مقاوم به تغییرپذیری طیفی در فرآیند جداسازی تصویر، با اعضای خالص یکسان و نقشه‌های فراوانی‌های برآورد شده از هر روش سعی در بازسازی تصویر اولیه داریم. به عبارتی با پذیرش مدل ترکیب خطی برای صحنه تصویربرداری و صحت اعضای خالص می‌توان هر پیکسل از تصویر واقعی p_k را با استفاده از $\hat{p}_k = \sum_{i=1}^{E} \alpha_k \mathbf{e}_i$ تقریب زد. که E تعداد مشخصه‌های طیفی، α_k بردار مقادیر فراوانی برآورد شده برای پیکسل k و $\mathbf{e}_i$ عضوخالص i می‌باشد. با این تفاسیر تصویر اصلی را می‌توان به صورت $I = (p_k)_{k=1}^{P}$ و تصویر بازسازی شده با مدل ترکیب خطی را به صورت $R = (\hat{p}_k)_{k=1}^{P}$ درنظر گرفت. دقت بازسازی بین I و R را می‌توان با استفاده از RMSE و به‌صورت رابطه (۸) به‌دست آورد.

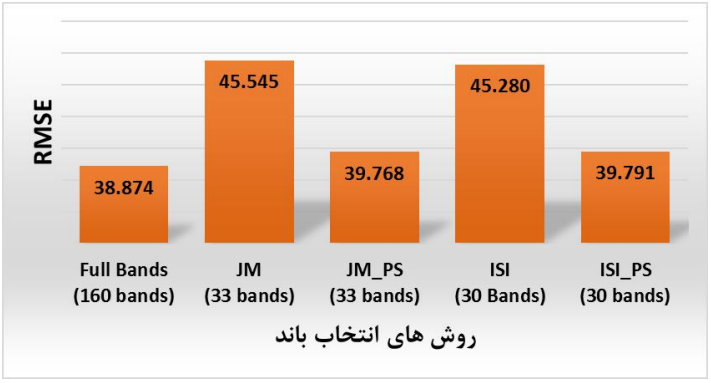
رابطه (۸)

$$RMSE\ (I,R) = \left(\frac{1}{P} \cdot \sum_{k=1}^{P} [\, p_k - \hat{p}_k \,]^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

شکل (۱۶) مقدار RMSE حاصل از بازسازی تصویر با تمام باندهای آن، باندهای به‌دست آمده از شاخص ISI و فاصله JM که با هدف کاهش اثر تغییرپذیری طیفی اولویت‌بندی شده‌اند و باندهای منتخب پس از حذف وابستگی بر روی باندهای الویت‌بندی شده در مرحله قبل را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌گردد مشابه نتایج به‌دست آمده از تصاویر شبیه‌سازی شده در حالتی که همبستگی باندها لحاظ می‌گردد، بالطبع شرایط ماتریس ضرایب از نظر سینگولاریتی بهبود یافته و در نتیجه نقشه‌های فراوانی برآورد شده از مسئله معکوس کمترین مربعات با حفظ اعضای خالص یکسان با قابلیت اعتماد پذیری بالاتری به‌دست آمده که خود منجر به بازسازی بهتر تصویر می‌گردد.

[1] Abundance Sum-to-one Constrained (ASC)
[2] Abundance Nonnegativity Constrained (ANC)
[3] Fully Constrained Least Squares (FCLS)
[4] Non Negativity Least Square (NNLS)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-01]
[DOI: 10.29252/jgit.6.3.101]



شکل ۱۶: خطای برآورد تصویر ابرطیفی با استفاده از نقشه فراوانی به‌دست آمده از ماتریس ضرایب با باندهای متفاوت

در آنالیز ترکیب طیفی، اعضای خالص به‌عنوان بردارهای پایه فضای تصویر ابرطیفی محسوب می‌شوند؛ چنانچه این بردارها مستقل خطی نباشند با ترکیب‌های خطی مختلف می‌توان به نتایج یکسان رسید. بنابراین RMSE به‌دست آمده از مقایسه تصویر بازسازی شده با تصویر اصلی نمی‌تواند تنها ملاک ارزیابی نتایج جداسازی طیفی باشد و از آنجائیکه تهیه نقشه واقعیت زمینی مختلط کار بسیار دشواری است این روش به‌عنوان راه‌حلی نسبی ارائه شده‌است. اما به روشنی واضح است که با بهبود شرایط حل مسئله کمترین مربعات به نتایجی با قابلیت اعتماد پذیری بالاتر خواهیم رسید و این موضوع به روشنی از کاهش چشمگیر RMSE در حالتی که از باندهایی استفاده می‌شود که همبستگی میان اعضای خالص و مقدار عدد شرط ماتریس ضرایب را کاهش می‌دهند نتیجه می‌شود.

۴-۱- نتایج

در این مقاله روش انتخاب باند جدیدی متشکل از اولویت بندی باندها برای کاهش اثر تغییرپذیری طیفی اعضای خالص و کاهش همبستگی آنها با استفاده از زاویه میان باندها در فضای پدیده ارائه شده است. برای اولویت بندی باندها از فاصله JM به جای شاخص ISI در بررسی وضعیت تفکیک‌پذیری کلاس‌ها در هر باند استفاده شد، فاصله JM با افزایش تفکیک‌پذیری کلاس‌ها رفتاری اشباع شده دارد و چنانچه تفکیک‌پذیری یک کلاس از سایر کلاس‌ها زیاد باشد این موضوع نتایج کلی را تحت تاثیر قرار نمی‌دهد. از طرفی با در نظر داشتن توزیع هر کلاس در تعریف فاصله بین کلاسی، انتخاب باندها به گونه‌ای صورت می‌گیرد که تغییرپذیری طیفی را نیز در برداشته باشد.

در فرآیند اولویت‌بندی باندها در روش‌های پیشین همبستگی بین باندها لحاظ نمی‌گردید؛ از اینرو برای حذف افزونگی باندها از زاویه آنها در فضای پدیده استفاده شد. از آنجائی‌که این فضا به کمک اعضای خالص ساخته می‌شود با ترسیم باندها در این فضا رفتار باندها در تعامل با مجموعه اعضای خالص بارز می‌شود و باندهایی که زاویه میان آنها نزدیک به هم است دارای رفتارهای نسبتا یکسانی می‌باشند.

با حفظ باندهایی که نسبت به تغییرپذیری طیفی مقاوم بوده و حذف باندهایی که دارای افزونگی اطلاعات در تعامل با مجموعه اعضای خالص هستند صحت نتایج حاصل از برآورد مقادیر فراوانی کلاس ها بهبود یافت. این مهم با بررسی عدد شرط و میانگین همبستگی ماتریس اعضای خالص حاصل از باندهای انتخابی در هر روش حاصل گردید؛ که با رسیدن به اعداد قابل قبول، پایداری حل معادلات معکوس افزایش یافته و نتیجه آن در صحت نقشه‌های فراوانی به‌دست آمده نمود می‌یابد. این موضوع با بررسی RMSE میان مقادیر فراوانی برآورده شده با مقادیر واقعی آن در

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-01]
[DOI: 10.29252/jgit.6.3.101]

تصاویر شبیه‌سازی شده و RMSE حاصل از بازسازی تصویر ابرطیفی واقعی در حالت‌های مختلف صورت پذیرفت؛ که خود حاکی از شرایط حل بهتر مسئله معکوس با حذف باندهای غیر ضروری می‌باشد و اهمیت آن زمانی دو چندان می‌شود که تعداد باندهای باقیمانده کمتر از ۲۰ درصد باندهای اولیه باشد.

نتایج حاصل از فاصله JM در انتخاب باند نه تنها توانایی رقابت با شاخص ISI را داشته که در بسیاری از موارد حتی نتایج بهتری را ثبت می‌نماید؛ بنابراین می‌توان از آن در الویت‌بندی باندها نسبت به پدیده تغییرپذیری طیفی استفاده نمود.

مراجع

[1] J. M. Bioucas-Dias, A. Plaza, N. Dobigeon, M. Parente, Q. Du, P. Gader, et al., "Hyperspectral unmixing overview: Geometrical, statistical, and sparse regression-based approaches," Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of, vol. 5, pp. 354-379, 2012.

[2] B. Somers, G. P. Asner, L. Tits, and P. Coppin, "Endmember variability in spectral mixture analysis: A review," Remote Sensing of Environment, vol. 115, pp. 1603-1616, 2011.

[3] F. D. Van der Meer and X. Jia, "Collinearity and orthogonality of endmembers in linear spectral unmixing," International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 18, pp. 491-503, 2012.

[4] B. Somers, S. Delalieux, W. Verstraeten, J. Van Aardt, G. Albrigo, and P. Coppin, "An automated waveband selection technique for optimized hyperspectral mixture analysis," International Journal of Remote Sensing, vol. 31, pp. 5549-5568, 2010.

[5] G. P. Asner and D. B. Lobell, "A biogeophysical approach for automated SWIR unmixing of soils and vegetation," Remote sensing of environment, vol. 74, pp. 99-112, 2000.

[6] C.-I. Chang, Q. Du, T.-L. Sun, and M. L. Althouse, "A joint band prioritization and band-decorrelation approach to band selection for hyperspectral image classification," Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 37, pp. 2631-2641, 1999.

[7] B. Mojaradi, H. Abrishami-Moghaddam, M. J. V. Zoej, and R. P. W. Duin, "Dimensionality reduction of hyperspectral data via spectral feature extraction," Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 47, pp. 2091-2105, 2009

[8] D. C. Heinz, "Fully constrained least squares linear spectral mixture analysis method for material quantification in hyperspectral imagery," Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 39, pp. 529-545, 2001.

[9] J. M. P. Nascimento, "Unsupervised hyperspectral unmixing," Universidade Técnica de Lisboa, 2006.

[10] D. C. Heinz, "Fully constrained least squares linear spectral mixture analysis method for material quantification in hyperspectral imagery," Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 39, pp. 529-545, 2001.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-01]

[DOI: 10.29252/jgit.6.3.101]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.6, No.3, Autumn 2018

A band selection technique for optimized hyperspectral unmixing

Omid Ghaffari [1*], Mohammad Javad Valadan Zoej [2], Mehdi Mokhtarzade [3]

1- PhD student of remote sensing in Department of Photogrammetry and Remote Sensing, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology
2- Professor in Department of Photogrammetry and Remote Sensing, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology
3- Associate professor in Department of Photogrammetry and Remote Sensing, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology

Abstract

Linear spectral mixture analysis (SMA) has been used extensively in remote sensing studies to estimate the sub pixel composition of spectral mixtures. The mathematical solution of the mixing problem is to resolve a set of linear equations using least squares approaches. The lack of ability to account for temporal and spatial variability between and among endmembers has been acknowledged as a major shortcome of conventional SMA approaches applying a linear mixture model using a set of fixed endmembers. Also, if endmembers are highly correlated, the matrix will become non-orthogonal, the inversion will be unstable and the inverse or estimated fractions will become highly sensitive to random errors (e.g., noise). In this paper, we present a new band selection method that comprises a band prioritization and a band de-correlation. The band prioritization will prioritizes all bands according to the reduced spectral variability of endmembers which will be used for unmixing. Bands are then selected on the basis of their associated priorities. Since the band prioritization does not consider as spectral correlation, a band de-correlation using the angles between bands are being applied to de-correlate prioritized bands. It is shown that the proposed band selection method effectively eliminates a great number of insignificant bands. Surprisingly, the experimental results on real and synthetic data sets show that with a proper band selection less than 0.2 of the total number of bands can achieve comparable performance using all bands.

Key words:. Hyperspectral Images, Unmixing, Band selection, Spectral Variability, Similarity Measures.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-01]

[DOI: 10.29252/jgit.6.3.101]

Correspondence Address: Department of Photogrammetry and Remote Sensing, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
Tel: +98 9124262218