



# سنجش از دور & GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران / سال چهارم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۱  
Iranian Remote Sensing & GIS / Vol.4, No.4, Winter 2013

۲۱-۲۶

## روشی کارا برای افزایش توأمان قدرت تفکیک طیفی و مکانی در تصاویر ماهواره‌ای در محیط شهری

فاخره علی‌دوست<sup>۱</sup>، محمدرضا مباشری<sup>۲\*</sup>، علی‌اکبر آبکار<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲. دانشیار گروه سنجش از دور، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۳. استادیار گروه سنجش از دور، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۵/۷

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۸/۱۵

### چکیده

یکی از پارامترهای فیزیکی دست‌یافتنی از داده‌های سنجش از دور، بازتابندگی سطح در نواحی مختلف طیف بازتابی الکترومغناطیسی است. تقریباً همه پیکسل‌های شهری تصویر شده به‌وسیله سنجنده‌هایی با قدرت تفکیک مکانی پایین یا متوسط، پیکسل‌های مختلط‌اند. بازتابندگی پیکسل مختلط، ترکیبی از بازتابندگی چندین عارضه‌ی جداست که درون میدان دید سنجنده قرار گرفته‌اند. یکی از روش‌های معمول برای توصیف محیط‌های شهری استفاده از روش‌های طبقه‌بندی و مدل‌های جداسازی است. از پرکاربردترین مدل‌های جداسازی نیز تحلیل اختلاط طیفی است، که بازتابندگی پیکسل مختلط را به صورت ترکیب خطی از بازتابندگی و درصد حضور هر یک از مواد موجود در آن پیکسل بیان می‌کند. تحلیل اختلاط طیفی به دو مدل جداسازی طیفی و مکانی تقسیم می‌شود. هدف در مدل جداسازی مکانی، تعیین طیف بازتابندگی کلاس‌های شهری است. در این مقاله، با استفاده از اطلاعات مکانی تصویر IKONOS با قدرت تفکیک مکانی ۴ متر و تعداد ۴ باند و اطلاعات طیفی تصویر Hyperion با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و تعداد ۲۴۲ باند و روش جداسازی مکانی خطی، طیف بازتابندگی برخی از مواد شهری تعیین گردید. برای ارزیابی نتایج، مقایسه‌ی پیکسل بازسازی شده‌ی تصویر Hyperion و پیکسل واقعی به کار گرفته شد. پس از تعیین طیف مواد شهری، تصویری با قدرت تفکیک مکانی ۴ متر و ۱۳۶ باند تهیه گردید که تا حد ممکن تغییرپذیری مواد شهری در آن در نظر گرفته شده است.

**کلیدواژه‌ها:** تحلیل اختلاط طیفی، قدرت تفکیک مکانی، قدرت تفکیک طیفی، پیکسل مختلط.

\* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، خیابان ولی‌عصر، تقاطع میرداماد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، تلفن: ۰۹۱۲۱۲۲۶۶۳۰

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با رشد سریع شهرها، شناخت ترکیبات بیوفیزیکی و وضعیت پویای شهر به عنوان موضوع مهم تحقیقاتی مطرح شده است. یکی از پارامترهای فیزیکی دست‌یافتنی از داده‌های سنجنش از دور، که مستقل از میزان تابش خورشیدی است و تنها به خواص سطوح بستگی دارد، بازتابندگی سطح در نواحی مختلف طیف بازتابی الکترومغناطیسی است. سامانه‌های ابرطیفی توان ایجاد تمایز بین پدیده‌های سطحی مختلف را در سطح زمین دارند. چنین چیزی در داده‌های با پهنای باند نسبتاً وسیع‌تر چندطیفی که قدرت تفکیک طیفی کمتری دارند امکان‌پذیر نیست. اما به علت تغییرات مکانی فراوان پدیده‌ها و ساختار شهری در مقایسه با توان تفکیک مکانی سامانه‌های ابرطیفی و همچنین وجود پدیده‌ها و موادی که از نظر طیفی مشابه‌اند، محیط‌های شهری در تصاویر ابرطیفی معمولاً در قالب پیکسل‌های مختلط<sup>۱</sup> ظاهر می‌شوند. معمول‌ترین روش برای توصیف محیط‌های شهری با استفاده از تصاویر سنجنش از دور، طبقه‌بندی پوشش زمین و استفاده از مدل‌های جداسازی<sup>۲</sup> است. یکی از پرکاربردترین این مدل‌ها به منظور تجزیه پیکسل مختلط در محیط شهری، مدل اختلاط طیفی<sup>۳</sup> خطی است، که آن را می‌توان به دو دسته کلی مدل‌های جداسازی طیفی و مکانی<sup>۴</sup> تقسیم کرد. در مدل‌های جداسازی طیفی، با استفاده از اطلاعات طیفی مواد موجود در تصویر، می‌توان درصد حضور هر ماده را در پیکسل مختلط محاسبه کرد. معمولاً اطلاعات طیفی از سه منبع به دست می‌آیند: داده‌های آزمایشگاهی، داده‌های زمینی و تصاویر ابرطیفی. در گروه دوم یعنی مدل‌های جداسازی مکانی، با استفاده از اطلاعات مکانی مواد موجود در تصویر می‌توان طیف بازتابندگی هر ماده را در بخش‌هایی از طیف الکترومغناطیس تعیین کرد. معمولاً اطلاعات مکانی که همان درصد حضور مواد است، از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا و نقشه‌های کاربری زمین به دست می‌آید.

مدل اختلاط طیفی روشی برای کمی کردن بازتابندگی است. تحقیقات انجام‌شده حاکی از آن‌اند که در محیط شهری، بازتابندگی اندازه‌گیری شده به وسیله سنجنده، ترکیبی خطی از بازتابندگی مواد واقع در میدان دید لحظه‌ای سنجنده است. در نتیجه برای محیط‌های شهری نیز می‌توان از مدل اختلاط طیفی خطی استفاده کرد (Pue, et al., 2008). در مدل اختلاط طیفی خطی، بازتابندگی پیکسل ( $\rho_\lambda$ ) به صورت ترکیب خطی از بازتابندگی هر ماده درون پیکسل ( $\rho_{i\lambda}$ ) به همراه درصد حضور آن ماده ( $f_i$ ) در پیکسل، به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

رابطه (۱)

$$\rho'_\lambda = \sum_{i=1}^N f_i * \rho_{i\lambda} + \varepsilon_\lambda$$

که در آن N تعداد کلاس‌ها و  $\varepsilon_\lambda$  خطای مدل است.

در مدل‌های جداسازی طیفی، هدف تعیین درصد حضور هر ماده، یعنی مقادیر ( $f_i$ ) است. این مدل با دو قید مثبت بودن درصدهای حضور و واحد بودن مجموع درصدها با روش کمترین مربعات حل می‌شود. اما در مدل‌های جداسازی مکانی، هدف تعیین طیف بازتابندگی هر ماده، یعنی مقادیر ( $\rho_{i\lambda}$ ) است. این مدل با دو قید مثبت بودن ( $\rho_{i\lambda}$ )، و کوچک‌تر بودن ( $\rho_{i\lambda}$ ) از بیشینه (ماکزیمم) پاسخ سنجنده در باند موردنظر با روش کمترین مربعات حل می‌شود. فرم ماتریسی دستگاه معادلات در باند برای چند پیکسل مختلف به صورت رابطه (۲) است:

رابطه (۲)

$$\begin{bmatrix} \rho'_1 \\ \rho'_2 \\ \vdots \\ \rho'_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{m1} & f_{m2} & \dots & f_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \vdots \\ \rho_n \end{bmatrix}$$

1. Mixed Pixel
2. Unmixing Model
3. Spectral Mixture Analysis (SMA)
4. Spectral / Spatial Unmixing

مانند قدرت تفکیک مکانی و طیفی تصاویر اولیه و نوع پوشش زمین منطقه مورد مطالعه. به این منظور از معیار ERGAS برای ارزیابی دقت استفاده شد (Zurita-Milla et al., 2009).

تلفیق تصاویر براساس مدل جداسازی مکانی در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ به‌وسیله J. Amoros Lopez و همکاران برای تلفیق تصاویر MERIS و Landsat به ترتیب با قدرت تفکیک‌های مکانی ۳۰۰ متر و ۲۵ متر و با تعداد ۱۵ و ۶ باند در اسپانیا بررسی گردید. در این تحقیقات استفاده از خوشه‌بندی فازی نقشه خودسازمانده<sup>۱۱</sup> برای تعیین درصد حضور مواد و روش تنظیم‌سازی برای تعیین تعداد معادلات و مجهولات بهینه و بررسی تأثیر تغییر تعداد آنها مدنظر قرار گرفته است. برای ارزیابی کیفی تصویر نهایی از NDVI<sup>۱۲</sup> استفاده شد و برای ارزیابی کمی نیز به مقایسه باندهای مشترک دو تصویر MERIS و Landsat و تصویر نهایی پرداخته شد (Amoros-Lopez et al., 2011). تلفیق تصاویر ASTER SWIR و Landsat ETM+ به ترتیب با قدرت تفکیک‌های مکانی ۳۰ متر و ۱۵ متر، در سال ۲۰۰۹ به‌وسیله Nouha Mezned و همکاران برای تهیه نقشه‌هایی با جزئیات دقیق از معادن در شمال افریقا انجام شد (Mezned & Abdeljaoued, 2009). روش جداسازی مکانی در سال ۲۰۰۵ به‌وسیله Victor F. Haertel و همکاران برای تعیین طیف گیاه و خاک در جنگل‌های آمازون با استفاده از تصاویر MODIS و Landsat ETM+ به ترتیب با قدرت تفکیک‌های مکانی

روش تلفیق تصاویر براساس مدل جداسازی مکانی برای افزایش دقت رادیومتریکی و مکانی تصاویر را Boris Zhukov و همکاران در سال ۱۹۹۹ با استفاده از تصاویر Landsat TM و ASTER و داده‌های DAIS-7915 را به ترتیب با قدرت تفکیک‌های مکانی ۳۰ متر و ۱۵ متر و ۶ متر در آلمان انجام دادند. در این تحقیق حساسیت مدل به خطاهای سنجنده بررسی گردید و نشان داده شد که خطای ثبت متقابل دو تصویر<sup>۱</sup> نباید بیشتر از ۰/۲-۰/۱ اندازه پیکسل تصویر با قدرت تفکیک مکانی پایین باشد. همچنین این دقت با روش‌های ثبت متقابل دو تصویر جدید دست‌یافتنی است. در این تحقیق از طبقه‌بندی کننده IsoData برای تعیین درصد حضور مواد، از روش تنظیم‌سازی<sup>۲</sup> برای تعیین تعداد بهینه معادلات و مجهولات، و از میانگین طیف‌های به‌دست‌آمده برای تعیین طیف هر ماده استفاده شده است (Zhukov et al., 1999). پایش گیاه و محاسبه شاخص‌های MTCI<sup>۳</sup> و MGVI<sup>۴</sup> در تحقیقات Zurita Milla و همکاران در سال‌های ۲۰۰۷، ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ با استفاده از مدل جداسازی مکانی بر روی تصاویر MERIS و Landsat TM به ترتیب با قدرت تفکیک‌های مکانی ۳۰۰ متر و ۲۵ متر و با تعداد ۱۵ و ۶ باند در هلند انجام گرفت. در تحقیقات آنان به بررسی تأثیر ثبت کردن<sup>۵</sup> دو تصویر نسبت به هم و نیز تأثیر PSF<sup>۶</sup> بر روی درصد حضور هر ماده پرداخته شد. آنها در تحقیقات‌شان محدودیت روش نمونه‌برداری مجدد<sup>۷</sup> در ثبت متقابل دو تصویر را به این صورت بیان کرده‌اند: «روش نزدیک‌ترین همسایه<sup>۸</sup> مقدار اصلی پیکسل را حفظ می‌کند اما دقت هندسی چندانی ندارد. روش‌های Bi-linear و Bi-cubic دارای دقت هندسی‌اند اما باعث تخریب مقدار پیکسل می‌شوند.» به همین دلیل در این تحقیق نشان داده شد که با استفاده از اطلاعات مداری سنجنده و مدل ارتفاعی رقومی<sup>۹</sup>، مقادیر میدان دید لحظه‌ای زمینی<sup>۱۰</sup> واقعی هر پیکسل در تصویر با قدرت تفکیک مکانی پایین می‌تواند محاسبه شود. دقت تصویر حاصل از تلفیق داده‌ها به عوامل زیادی بستگی دارد،

1. Co-registration
2. Regularization
3. MERIS Terrestrial Chlorophyll Index
4. MERIS Global Vegetation Index
5. Registration
6. Point Spread Function
7. Resampling
8. Nearest Neighbor
9. Digital Elevation Model
10. Ground Instantaneous Field of View
11. SOM
12. Normalized Difference Vegetation Index

اطلاعات مکانی و نیز طیفی تصویری با قدرت تفکیک مکانی بالا و روش جداسازی مکانی خطی، طیف بازتابندگی برخی از مواد شهری تعیین گردد. پس از این کار می‌توان تصویری تهیه کرد که هم قدرت تفکیک طیفی زیاد و هم قدرت تفکیک مکانی بالایی دارد؛ و البته تا حد ممکن تغییرپذیری مواد شهری در آن در نظر گرفته شده است. این تصویر می‌تواند مبنای انجام تحلیل‌ها و پردازش‌های دیگر در محیط‌های شهری برای تعیین تأثیر آلودگی‌های شهری بر روی تصاویر ماهواره‌ای، ایجاد شاخص‌های طیفی برای شناسایی مواد پرکاربرد شهری، توصیف جزئی پوشش زمین شهری برای تهیه نقشه سطوح نفوذناپذیر و یا پایش گیاهان شهری، تعیین مرغوبیت مواد مورد استفاده در بافت شهری، تعیین رفتار ترافیک بر بازتابندگی شهر، مدل‌سازی محیط شهری، آشکارسازی تغییرات و تعیین بافت فرسوده شهر و مانند اینها قرار گیرد. البته ناگفته نماند که علمی نظیر گیاه‌شناسی و کشاورزی دقیق، آب‌شناسی و مهندسی سواحل، مطالعات گازهای جو و هواشناسی، مدیریت و برنامه‌ریزی شهری، مدیریت منابع انرژی و برخی دیگر نیز به تصاویری با دقت مکانی و طیفی بالا نیاز دارند. بعد از تعریف مسئله و بیان پیشینه انجام تحقیق، در بخش‌های دوم و سوم این مقاله به معرفی منطقه و داده‌های مورد استفاده و پیش‌پردازش آنها پرداخته می‌شود. در بخش چهارم، روش انجام تحقیق به صورت کلی و معیارهای ارزیابی دقت با ذکر روابط بیان می‌گردد. بخش پنجم مربوط به پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق است. بخش ششم مشتمل است بر نتیجه‌گیری نهایی و پیشنهادهایی برای انجام مطالعات وسیع‌تر در تحقیقات آینده.

## ۲- منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

شهر قدس با مساحت ۲۷۰۰ هکتار و با آب‌وهوای کوهپایه‌ای در جنوب غربی شهر تهران واقع شده است (شکل ۱).

۵۰۰ متر و ۲۵ متر، در برزیل به کار برده شد. تصویر Landsat ETM<sup>+</sup> با نقشه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ با دقت ۰/۵ پیکسل زمین‌مرجع گردید، و از تصویر زمین‌مرجع شده MODIS نیز با فرض مناسب بودن دقت آن استفاده شد. برای ارزیابی نتایج، درصد حضور مواد در تصویر Landsat ETM<sup>+</sup> یک بار با استفاده از روش جداسازی طیفی و یک بار با به‌کارگیری طیف‌های حاصل از روش جداسازی مکانی محاسبه شده است (Haertel & Edemir Shimabukuro, 2005). بهبود تخمین NDVI در مقیاس زیرپیکسل برای تصاویر MODIS با قدرت تفکیک‌های مکانی ۵۰۰ متر در سال ۲۰۰۸ به‌وسیله Lorenzo busetto و همکاران در ایتالیا انجام گرفت. در این تحقیق از میزان مشابهت طیفی پیکسل‌ها و فاصله مکانی آنها از هم، به‌عنوان وزن در سیستم معادلات استفاده شد. درصد حضور مواد از نقشه‌های کاربری زمین در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰ که از تفسیر بصری عکس‌های هوایی تهیه شده‌اند به‌دست آمد. برای ارزیابی نتایج، NDVI حاصل از جداسازی مکانی تصویر MODIS با NDVI حاصل از تصاویر Landsat 5TM مقایسه شد (Busetto, et al., 2008). استخراج طیف گیاهان جنگلی و مدل‌سازی نوری-هندسی در سال ۲۰۰۷ به‌وسیله Yuan Zeng و همکاران با استفاده از تصاویر QuickBird و Hyperion ترتیب با قدرت تفکیک‌های مکانی ۰/۶ متر و ۳۰ متر در چین صورت پذیرفت (Zeng et al., 2007).

در بیشتر روش‌های مذکور، نحوه انتخاب پیکسل‌های تصویر برای تشکیل معادلات و همچنین تعیین نوع و تعداد مواد موجود در هر پیکسل مورد بحث قرار گرفته است. با بررسی کلی این تحقیقات، در مورد روش جداسازی مکانی می‌توان گفت که هنوز چالش‌ها و مسائل زیادی در خصوص استفاده از این روش به‌ویژه در محیط‌های شهری و استفاده از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا (مانند Geoeye, QuickBird, IKONOS) مطرح است. به‌طور مشخص در این تحقیق سعی شده است با استفاه از تلفیق



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

### ۳- پیش‌پردازش داده‌ها

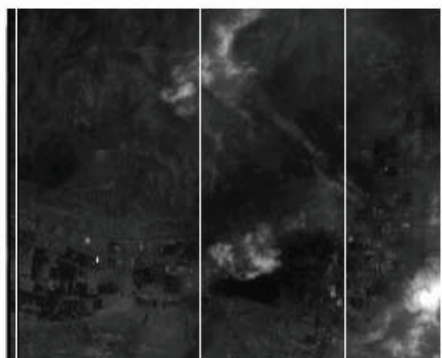
پیش‌پردازش تصاویر به منظور آماده‌سازی آنها برای انجام پردازش‌ها و تحلیل و اعمال مدل است. نوع پیش‌پردازش کاملاً بستگی به نوع داده‌های مورد نیاز، کیفیت آنها و هدف تحقیق دارد. در انتخاب نوع تصحیحات رادیومتریکی و جوی بر روی تصویر Hyperion باید دقت کرد، زیرا هدف این تحقیق تعیین طیف بازتابندگی مواد است و خطا در این مرحله می‌تواند منجر به بروز خطا در نتایج گردد. در نتیجه از بین روش‌های معمول برای انجام تصحیحات، روش‌هایی که اطلاعات طیفی تصویر را کمتر تغییر دهند به کار رفتند.

#### ۳-۱- تصحیح رادیومتریکی تصویر Hyperion

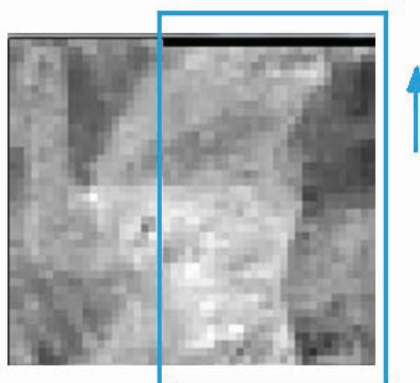
ابتدا باندهای ۸-۵۷ در ناحیه VNIR و باندهای ۷۹-۲۲۴ در ناحیه SWIR به عنوان باندهایی با مقدار غیر صفر از بین ۲۴۲ باند تصویر Hyperion انتخاب شدند. تصحیحات رادیومتریکی برای تصویر Hyperion که در این مطالعه به کار برده شد، عبارت‌اند از: جابه‌جایی نیمه‌راست تصویر SWIR به اندازه یک پیکسل به بالا (شکل ۲) (Stanz et al., 2002)، تصحیح نوارهای بد در تصویر با روش میانگین‌گیری (شکل ۳) (Goodenough & Dyk, 2003).

تنوع پوشش‌ها و کاربری زمین شهری در این منطقه شایان تأمل است. در دسترس بودن داده‌های ماهواره‌ای مناسب نیز از جمله دلایل انتخاب منطقه مذکور است.

برای انجام تحقیق به دو مجموعه داده‌های با قدرت تفکیک طیفی بالا یا داده‌های ابرطیفی و داده‌های با قدرت تفکیک مکانی بالا از منطقه‌ای با اختلاف زمانی کم، نیاز است. سنجنده ابرطیفی Hyperion که بر روی ماهواره EO1 قرار گرفته، به عنوان اولین سنجنده ابرطیفی فضایی شناخته شده است. از منطقه مورد مطالعه یک تصویر ابرطیفی Hyperion در سطح پردازش LIR با فرمت HDF، گرفته شده در تاریخ ۲۰۰۴/۸/۲۱ با پوشش ابر ۰-۱۰ درصد و زاویه دید نزدیک به دید قائم (۵/۱۴۶۷ درجه) تهیه شد. این تصاویر در آرشیوی در سایت USGS موجود است و می‌تواند در اختیار کاربران قرار گیرد. این تصاویر دارای ۲۴۲ باند طیفی و قدرت تفکیک مکانی ۳۰ مترند تصاویر سنجنده IKONOS به عنوان مجموعه داده‌های با قدرت تفکیک مکانی بالا انتخاب شد. بدین منظور تصاویر IKONOS گرفته شده در تاریخ ۲۰۰۴/۰۶/۲۹ موجود در سازمان نقشه‌برداری کشور به کار رفتند. این تصاویر پوشش کاملی از شهر را به دست می‌دهند و می‌توان جزئیات ساختار شهری را - چندان که باید - از آن استخراج کرد. تصاویر مورد بحث دارای ۴ باند طیفی با قدرت تفکیک مکانی ۴ مترند.



شکل ۳. نوارهای بد در تصویر Hyperion



شکل ۲. جابه‌جایی تصویر SWIR

جدول ۱. انتخاب باندهای مناسب

Wavelengths (nm)	Channels	Name
446-750	10-40	VNIR_1
770-926	42-57	VNIR_2
970-1105	82-97	SWIR_1
1160-1340	102-120	SWIR_2
1490-1790	134-146	SWIR_3
1980-2406	183-223	SWIR_4

### ۳-۳- تصحیح هندسی

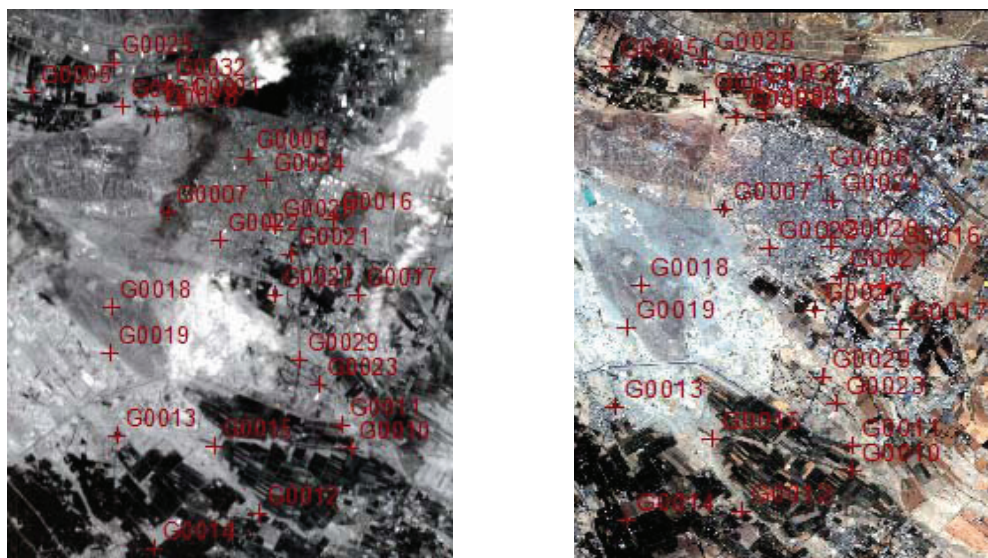
تصویر IKONOS با نقشه‌های ۱:۲۰۰۰ و روش نمونه‌برداری مجدد نزدیک‌ترین همسایه به‌وسیله سازمان نقشه‌برداری کشور زمین‌مرجع شده است. تصویر Hyperion نسبت به تصویر زمین‌مرجع شده IKONOS و روش نمونه‌برداری مجدد نزدیک‌ترین همسایه در نرم‌افزار PCI 9.1(R) با ۲۵ نقطه کنترل و چندجمله‌ای درجه ۲ با دقت ۰/۲ اندازه پیکسل تصویر Hyperion (۵/۵۸ متر) زمین‌مرجع شد. همان‌طور که در بخش مقدمه بیان گردید، به نظر می‌رسد این دقت برای استفاده در مدل جداسازی مکانی کافی باشد. با توجه به دقت هندسی تصویر IKONOS تصحیح شده به‌وسیله سازمان نقشه‌برداری، انتخاب نقاط کنترل در منطقه‌ای شهری، تعداد و توزیع مناسب نقاط کنترل در تصاویر (شکل ۴)، این دقت دست‌یافتنی است.

### ۳-۲- تصحیح جوی تصویر Hyperion

از آنجا که جو تأثیر مهمی بر روی داده‌های سنجش از دور دارد، در تحقیقاتی که هدف تحلیل اطلاعات طیفی است، حذف یا کاهش تأثیر جو از جمله مراحل اصلی پیش‌پردازش به‌شمار می‌رود.

تصحیح جوی تصویر Hyperion و تبدیل رادیانس به بازتابندگی با نرم‌افزار FLAASH در نرم‌افزار ENVI 4.7(R) انجام شد. سپس مدل جوی مناسب با توجه به داده‌های هواشناسی موجود از منطقه برگزیده شد و سرانجام به کمک راهنمای (Barry, 2001) EO1HSDData مجموعه‌ای ۱۳۶ باندهای به‌عنوان مناسب‌ترین باندها که شامل باندهای غیرجذبی و بدون نویز است، انتخاب گردید (جدول ۱).

روشی کارا برای افزایش توأمان قدرت تفکیک طیفی و مکانی در تصاویر ماهواره‌ای در محیط شهری



شکل ۴. توزیع نقاط کنترل در تصاویر Hyperion و IKONOS

آن همپوشانی دارد، صورت گرفت. در تحقیقات مشابه معمولاً از طبقه‌بندی نظارت‌نشده برای تعیین کلاس‌ها استفاده شده است، زیرا در روش‌های نظارت‌شده به علت دخالت نداشتن کاربر در روند تعیین کلاس‌ها، ادغام کلاس‌هایی با اطلاعات طیفی متفاوت کمتر اتفاق می‌افتد. در طبقه‌بندی نظارت‌نشده باید تعداد کلاس‌ها به الگوریتم معرفی شود. در این تحقیق کلاس‌های شهری در تصویر IKONOS با روش خوشه‌بندی K-Means و Fuzzy C-Means مشخص شد. خوشه‌بندی چندین بار با تعداد کلاس‌های متفاوت (۳ کلاس، ۴ کلاس، ... ۹ کلاس، ۱۰ کلاس) بر روی تصویر IKONOS اعمال شد. پس از اعمال روش جداسازی مکانی با توجه به میزان خطای نهایی مدل، بهترین مقدار برای تعداد کلاس‌ها مشخص می‌گردد. در این تحقیق پس از تهیه تصویر طبقه‌بندی‌شده، از شیوه‌ای جدید برای تعیین درصد حضور هر کلاس در یک پیکسل مختلط استفاده شد. در این شیوه جدید، مساحت پیکسل‌های تصویر خوشه‌بندی‌شده IKONOS متناظر با هر پیکسل تصویر Hyperion در سیستم مختصات نقشه محاسبه شد. به این ترتیب مقادیر خرده‌پیکسل‌های تصویر خوشه‌بندی‌شده که در ایجاد

#### ۴- روش انجام تحقیق

##### ۴-۱- مدل جداسازی مکانی

مدل جداسازی مکانی بر مبنای مدل اختلاط طیفی است و برای تعیین اطلاعات طیفی موادی که در میدان دید لحظه‌ای سنجنده واقع شده‌اند به کار می‌رود. فرم ماتریسی این مدل در یک باند برای چند پیکسل تصویر Hyperion به صورت رابطه ۲ است. مقادیر معلوم در این سیستم معادلات، مقدار بازتابندگی هر پیکسل تصویر Hyperion ( $\rho_{i\lambda}$ ) یعنی بازتابندگی هر پیکسل مختلط و درصدهای حضور مواد در یک پیکسل مختلط ( $f_i$ ) است. درصد حضور هر ماده در پیکسل مختلط را می‌توان از نتایج طبقه‌بندی تصویر IKONOS استخراج کرد. مقادیر مجهول در این سیستم معادلات، طیف بازتابندگی هر یک از مواد موجود در پیکسل‌های مختلط ( $\rho_{i\lambda}$ ) است. بدین ترتیب، تعداد کلاس‌های موجود در پیکسل‌های مختلط همان تعداد مجهولات خواهد بود.

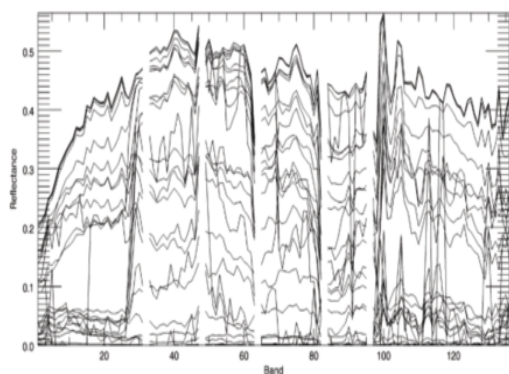
##### ۴-۲- طبقه‌بندی تصویر IKONOS

تعیین درصد حضور مواد در پیکسل مختلط تصویر Hyperion به کمک اطلاعات تصویر IKONOS که با

کوچک باشد، ممکن است تعداد معادلات کمتر از تعداد مجهولات شود.



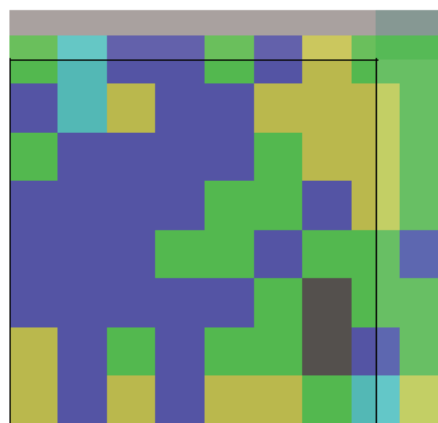
شکل ۶. انتخاب یک پنجره بر روی تصویر



شکل ۷. تعیین چندین طیف بازتابندگی برای یک کلاس

در تحقیقات مشابه که در بخش مقدمه بیان شدند، موضوع مورد بحث نحوه انتخاب بهینه ابعاد همسایگی و تعداد کلاس است. در برخی از روش‌ها از مسائل بهینه‌سازی استفاده شده است که هزینه محاسباتی بالایی دارد (Amoros-Lopez et al., 2011)، (Zhukov, et al., 1999) و در دیگر روش‌ها طراحی‌های مختلفی از ابعاد همسایگی و تعداد کلاس‌ها آزمون شده‌اند (Mezned & abdeljaoued, 2009). در این تحقیق، از آنجا که منطقه مورد مطالعه منطقه‌ای شهری است و حتی در فاصله‌های مکانی کم تغییرات بین کلاسی جدی وجود دارد، باید کوچک‌ترین ابعاد همسایگی ممکن یعنی پنجره‌هایی با ابعاد  $3 \times 3$  و

طیف پیکسل مختلط سهم دارند (شکل ۵) نیز در نظر گرفته می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، با توجه به قدرت تفکیک مکانی دو تصویر، در یک پیکسل Hyperion ۴۹ پیکسل کامل IKONOS و تعدادی خرده پیکسل قرار می‌گیرند.



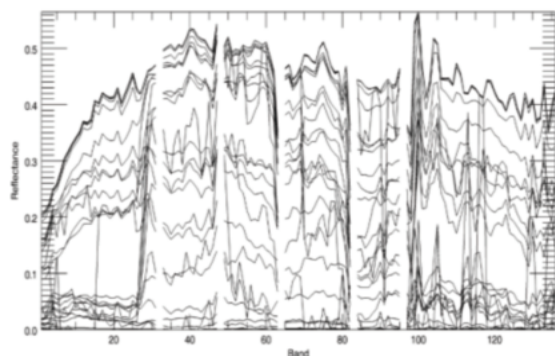
شکل ۵. پیکسل‌های طبقه‌بندی شده IKONOS موجود در یک پیکسل Hyperion

#### ۴-۳- اعمال مدل جداسازی مکانی

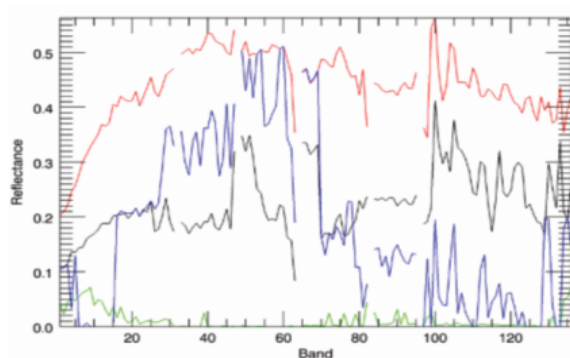
به کمک سرشکنی خطی مقید، معادلات بیان شده در بخش ۴-۱ حل شدنی است. اگر سیستم معادلات در یک باند، برای همه کلاس‌ها و همچنین برای کل تصویر Hyperion تشکیل شود. دو مشکل شکل می‌گیرند: بزرگ شدن ماتریس ضرایب یعنی ماتریس درصدهای حضور، و در نظر گرفته نشدن تغییرپذیری یک کلاس در کل تصویر، زیرا برای هر کلاس تنها یک طیف بازتابندگی به دست می‌آید. در نتیجه از راه حل منطقه‌ای برای تشکیل سیستم معادلات استفاده می‌شود. پنجره‌ای با ابعاد فرد بر روی تصویر حرکت می‌کند و هر بار اطلاعات حاصل از سرشکنی مربوط به پیکسل مرکزی ثبت می‌شود (شکل ۶).

به این ترتیب برای هر کلاس چندین طیف بازتابندگی به دست می‌آید (شکل ۷). انتخاب ابعاد پنجره از آن رو اهمیت دارد که اگر ابعاد پنجره بزرگ باشد، تغییرپذیری در نظر گرفته نخواهد شد و اگر ابعاد





(الف)



(ب)

شکل ۸. (الف): نتایج سرشکنی برای یک کلاس؛ (ب): نتایج K-Means بر روی نتایج به‌دست‌آمده از سرشکنی برای یک کلاس

#### ۴-۵- بازسازی تصویر ابرطیفی و ارزیابی نتایج

با توجه به مدل اختلاط طیفی و رابطه (۱)، اگر طیف بازتابندگی هر کلاس  $(\rho_{i\lambda})$  و درصد حضور آن کلاس  $(f_i)$  در اختیار باشد، می‌توان طیف بازتابندگی پیکسل مختلط را بازسازی کرد. با مقایسه مقدار بازسازی شده و مقدار واقعی یک پیکسل مختلط میزان خطا محاسبه می‌گردد. برای این منظور، از پیکسل‌هایی که در مدل جداسازی مکانی برای تعیین طیف‌های بازتابندگی کلاس‌ها به کار نرفته‌اند استفاده می‌شود. برای ارزیابی نتایج، معیارهای  $RMSE^2$  و  $NCC^3$  برطبق رابطه‌های (۴) و (۵) برای هر یک از پیکسل‌های بازسازی‌شده

$5 \times 5$  در نظر گرفته شوند. همچنین برای افزایش دقت و ایجاد تمایز بین پیکسل‌های موجود در پنجره می‌توان از معیار وزن استفاده کرد. وزن در هر پنجره براساس نسبت شباهت طیفی به فاصله مکانی هر یک از آرایه‌ها از آرایه مرکزی محاسبه می‌گردد. معیار  $SID^1$  برای شباهت طیفی به کار رفته است و معیار فاصله اقلیدسی برای فاصله مکانی (رابطه ۳). در نتیجه پیکسل‌هایی با شباهت طیفی بیشتر و نزدیک‌تر به پیکسل مرکزی، وزن بیشتری در سیستم معادلات خواهند داشت.

رابطه (۳)

$$W = \frac{\text{Similarity}}{\text{Distance}}$$

#### ۴-۴- انتخاب طیف / طیف‌های نمونه هر کلاس

همان‌طور که در بخش قبل بیان شد، بعد از انجام سرشکنی می‌توان برای هر کلاس مجموعه‌ای از طیف‌های بازتابندگی را به‌دست آورد. طیف / طیف‌های نمونه برای هر کلاس، مجموعه‌ای است که آن کلاس را به بهترین شکل نمایش دهد. از جمله روش‌ها برای اختصاص تنها یک طیف به هر کلاس، میانگین‌گیری از مجموعه است، که خود به معنای نادیده انگاشتن تغییرات درون کلاسی در کل تصویر است. روش دیگر استفاده از تمام طیف‌های مجموعه است که در مسائلی با مجموعه‌های بزرگ، راه‌حل مناسبی نیست. در این مطالعه به شیوه‌ای جدید، طیف / طیف‌های نمونه برای هر کلاس به کمک خوشه‌بندی K-Means تعیین شد. همان‌طور که در شکل ۸ (الف) می‌توان دید، نتایج سرشکنی برای یک کلاس، مجموعه‌ای از طیف‌هاست.

اختلاف در طیف‌های این مجموعه می‌تواند نشان‌دهنده تغییرات درون کلاسی باشد. برای انجام تحلیل و پردازش‌های بعدی باید از این مجموعه زیرمجموعه‌ای با تعداد طیف کمتر انتخاب کرد. بدین منظور در این مطالعه از روش خوشه‌بندی K-Means استفاده شد. به عنوان مثال، در شکل ۸ (ب)، با این روش خوشه‌بندی مجموعه‌ای از ۴ طیف به عنوان طیف‌های نمونه یک کلاس انتخاب شده‌اند.

1. Spectral Information Divergence
2. Root Mean Square Error
3. Normalized Cross Correlation

Hyperion به دست آید. نتیجه این مرحله از پردازش، تصویری با قدرت تفکیک مکانی ۴ متر و تعداد ۱۳۶ باند است، که البته تغییرپذیری کلاس‌ها در کل تصویر در آن در نظر گرفته شده است.

#### ۵- نتایج و تحلیل

تمام مراحل پردازش در نرم‌افزار ENVI4/7<sup>(R)</sup> و در محیط برنامه‌نویسی IDL 7.1.1 انجام شد. شکل‌های ۹ و ۱۰، تصاویر IKONOS و Hyperion، به ترتیب با ابعاد ۲۲۰ × ۲۲۰ و ۳۰ × ۳۰ پیکسل مورد استفاده برای تعیین طیف بازتابندگی کلاس‌های شهری و ارزیابی نتایج را نشان می‌دهند. شکل ۱۱ تصویر Hyperion بازسازی شده را نشان می‌دهد.

این تصویر ۱۳۶ باند دارد. همان‌گونه که در بخش ۴-۵ بیان شد، برای یک پیکسل بازسازی شده و یک پیکسل واقعی متناظر، یک RMSE و یک NCC، در ۱۳۶ باند محاسبه شد. این عملیات برای تمام پیکسل‌های تصویر انجام می‌شود و سپس میانگین این مقادیر به عنوان معیار کلی برای آن تصویر مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین در بخش ۴-۲ بیان شد که خوشه‌بندی چندین بار با تعداد کلاس‌های متفاوت (۳ کلاس، ۴ کلاس، ...، ۹ کلاس، ۱۰ کلاس) بر روی تصویر IKONOS اعمال شده است. مقدار میانگین RMSE برای ۳ تا ۱۰ کلاس در روش‌های خوشه‌بندی K-Means و Fuzzy C-Means در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در نتیجه با مقایسه مقدار میانگین در حالت‌های مختلف خوشه‌بندی، می‌توان تعداد بهینه کلاس‌ها را تعیین کرد. خوشه‌بندی Fuzzy C-Means با ۶ کلاس کمترین مقدار میانگین RMSE یعنی ۰/۰۳۵۴ را داشت؛ و میانگین NCC در این حالت ۰/۸۶ بود. به علاوه، برای این حالت خوشه‌بندی، بیشترین کمترین مقدار RMSE به ترتیب ۰/۲۴۸۶ و ۰/۰۰۹۸ بود.

محاسبه گردید. در این روابط n تعداد باندها و N تعداد پیکسل‌های بازسازی شده است. فرض کنید پیکسل مختلط مشتمل است بر ۴ کلاس {۱، ۲، ۳، ۴} و برای هر کلاس ۳ طیف نمونه تعیین شده است. برای بازسازی این پیکسل مختلط چندین حالت اختلاط بدین صورت وجود دارد:

$$\{11,12,13\}, \{21,22,23\}, \{31,32,33\}, \{41,42,43\}$$

بهترین انتخاب مربوط به مخلوطی است که کمترین مقدار RMSE را داشته باشد. این روش اختلاط، بر مبنای <sup>۱</sup>MESMA (Powell, et al., 2007) عمل می‌کند.

رابطه (۴)

$$RMSE_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\rho_i^C - \rho_i^O)^2}{n-1}} \quad j=1:N$$

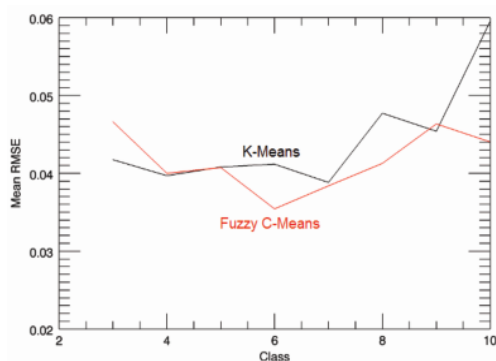
رابطه (۵)

$$NCC_j = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(\rho_i^C - \rho_m^C)(\rho_i^O - \rho_m^O)}{\sigma_C \sigma_O} \quad j=1:N$$

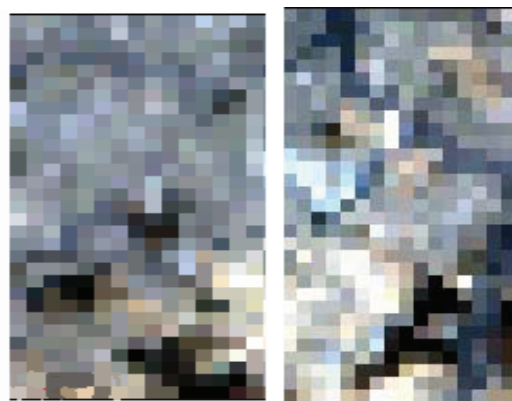
#### ۴-۶- تلفیق داده‌ها

منظور از تلفیق داده‌ها در این بخش در واقع تولید تصویری است که هم قدرت تفکیک طیفی زیاد داشته باشد و هم قدرت تفکیک مکانی بالایی. در تصویر خوشه‌بندی شده IKONOS متناسب با کلاس هر پیکسل، طیف بازتابندگی آن کلاس اختصاص داده شد. همان‌طور که در بخش ۴-۵ نیز اشاره گردید، هر کلاس می‌تواند چند طیف بازتابندگی داشته باشد، که نشان‌دهنده تغییرات درون کلاسی است. برای پیکسل تصویر IKONOS، از بین طیف‌های نمونه هر کلاس، طیفی انتخاب می‌شود که در صورت اختلاط طیفی و بازسازی پیکسل مختلط تصویر Hyperion، کمترین مقدار RMSE نسبت به پیکسل مختلط واقعی

روشی کارا برای افزایش توأمان قدرت تفکیک طیفی و مکانی در تصاویر ماهواره‌ای در محیط شهری

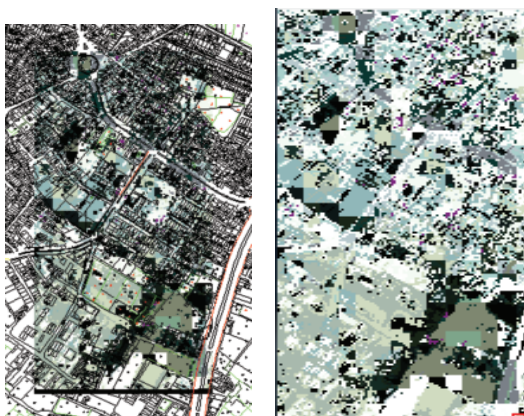


شکل ۱۲. میانگین RMSE برای خوشه‌بندی‌های K-Means و Fuzzy C-Means برای ۱۵ تا ۳ کلاس



(الف) (ب)

شکل ۹. تصویر Hyperion (الف): تصویر ارزیابی ۱۵ × ۳۰ پیکسل؛ (ب): تصویر انجام سرشکنی ۱۵ × ۳۰ پیکسل



(الف) (ب)

شکل ۱۳. (الف): تصویر حاصل از تلفیق در ۳ باند؛ و (ب): تصویر حاصل از تلفیق در ۳ باند به همراه نقشه ۱:۲۰۰۰



(الف) (ب)

شکل ۱۰. تصویر IKONOS (الف): تصویر ارزیابی ۱۱۰ × ۲۲۰ پیکسل؛ (ب): تصویر انجام سرشکنی ۱۱۰ × ۲۲۰ پیکسل

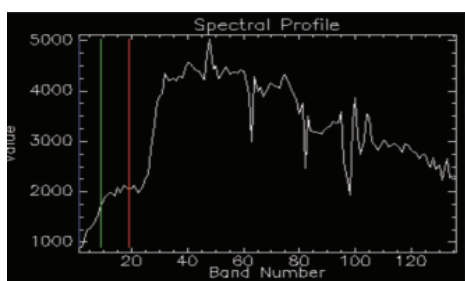
شکل ۱۳ تصویر به‌دست‌آمده از تلفیق را که تصویری با قدرت تفکیک مکانی ۴ متر و ۱۳۶ باند است، به همراه نقشه، ۱:۲۰۰۰ از همان منطقه نشان می‌دهد. در این تصویر تأثیر خطای زمین‌مرجع در برخی از پیکسل‌های تصویر دیده می‌شود. در شکل ۱۴، تصویر به‌دست‌آمده از تلفیق با قدرت تفکیک مکانی ۴ متر در سه باند رنگی برای یک میدان به همراه نقشه ۱:۲۰۰۰ مشاهده می‌شود. در این میدان، همان‌گونه که در نقشه ۱:۲۰۰۰ می‌توان دید، پوشش گیاهی وجود دارد. طیف بازتابندگی این پوشش گیاهی از تصویر به‌دست‌آمده از تلفیق در ۱۳۶ باند در شکل ۱۴ (ب) نشان داده شده است. در شکل ۱۵، تصویر به‌دست‌آمده از تلفیق با قدرت تفکیک مکانی ۴ متر در سه باند رنگی



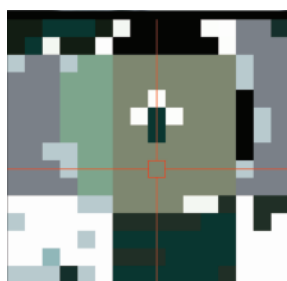
شکل ۱۱. تصویر Hyperion بازسازی شده

اطلاعات طیفی تصویر به دست آمده از تلفیق، می تواند در تشخیص نوع پوشش سطح مفید باشد. در شکل ۱۶ (ب) یک پیکسل در تصویر IKONOS مشخص شده است که در همان عرصه وجود دارد. با استفاده از تصویر به دست آمده از تلفیق و نمودار بازتابندگی این پیکسل در ۱۳۶ باند، مشخص می شود که در این پیکسل پوشش گیاهی وجود دارد. شکل ۱۶ (ج) طیف بازتابندگی این پیکسل را نمایش می دهد که همان طیف معروف گیاه است.

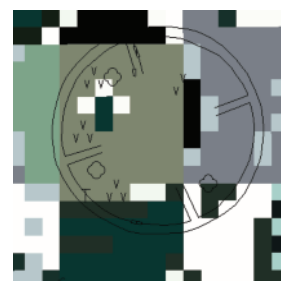
برای یک عرصه به همراه نقشه ۱:۲۰۰۰ دیده می شود. در شکل ۱۵ (ب) تصویر IKONOS همان منطقه را می توان به همراه نمودار طیفی در سه باند رنگی مشاهده کرد. پیکسل مشخص شده در این تصویر مربوط به سطح زمین است. از تصویر IKONOS و نقشه ۱:۲۰۰۰، به دلیل کمبود اطلاعات طیفی نمی توان نوع پوشش سطح را تشخیص داد. در شکل ۱۵ (ج) تصویر به دست آمده از تلفیق به همراه نمودار طیفی بازتابندگی در ۱۳۶ باند برای همان پیکسل مورد نظر مشاهده می شود. در نتیجه می توان گفت که



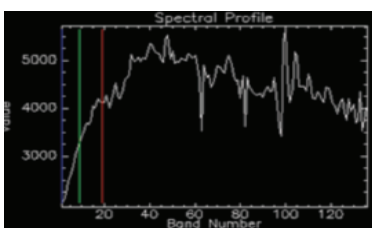
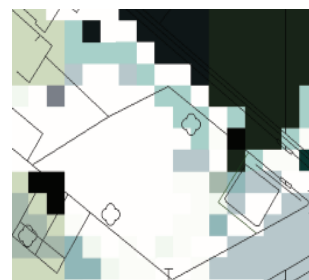
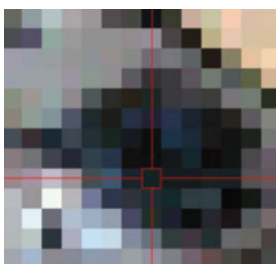
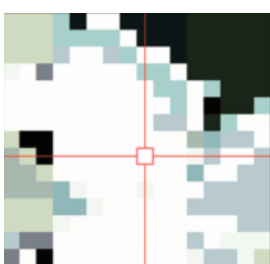
(ب)



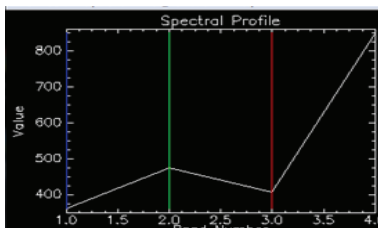
(الف)



شکل ۱۴. تصویر به دست آمده از تلفیق در ۳ باند، (الف): تصویر حاصل از تلفیق در ۳ باند برای یک میدان به همراه نقشه ۱:۲۰۰۰؛ (ب): تصویر به دست آمده از تلفیق با قدرت تفکیک مکانی ۴ متر؛ و نمودار طیف بازتابندگی یک پیکسل در میدان مورد نظر



(ج)

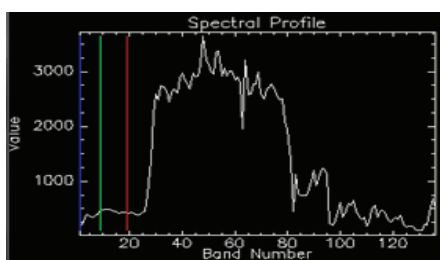
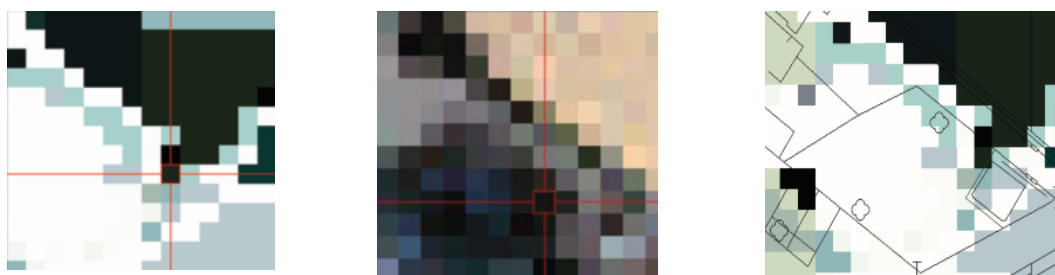


(ب)

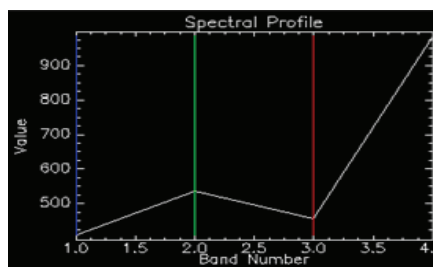
(الف)

شکل ۱۵. تصویر حاصل از تلفیق در ۳ باند، (الف): تصویر حاصل از تلفیق در ۳ باند برای یک عرصه به همراه نقشه ۱:۲۰۰۰؛ (ب): تصویر IKONOS به همراه نمودار طیفی یک پیکسل؛ (ج): تصویر حاصل از تلفیق؛ و نمودار طیفی همان پیکسل

روشی کارا برای افزایش توأمان قدرت تفکیک طیفی و مکانی در تصاویر ماهواره‌ای در محیط شهری



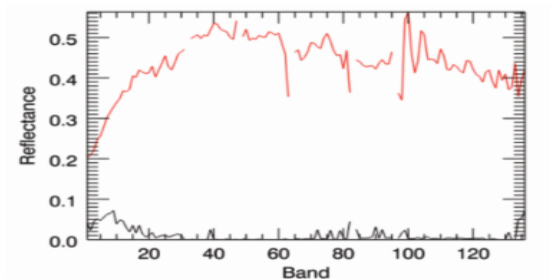
(ج)



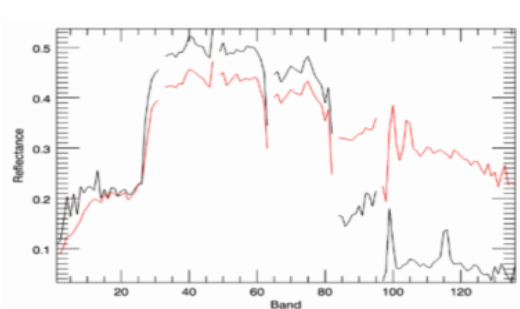
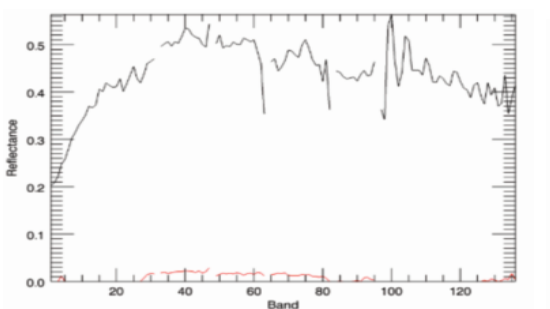
(ب)

(الف)

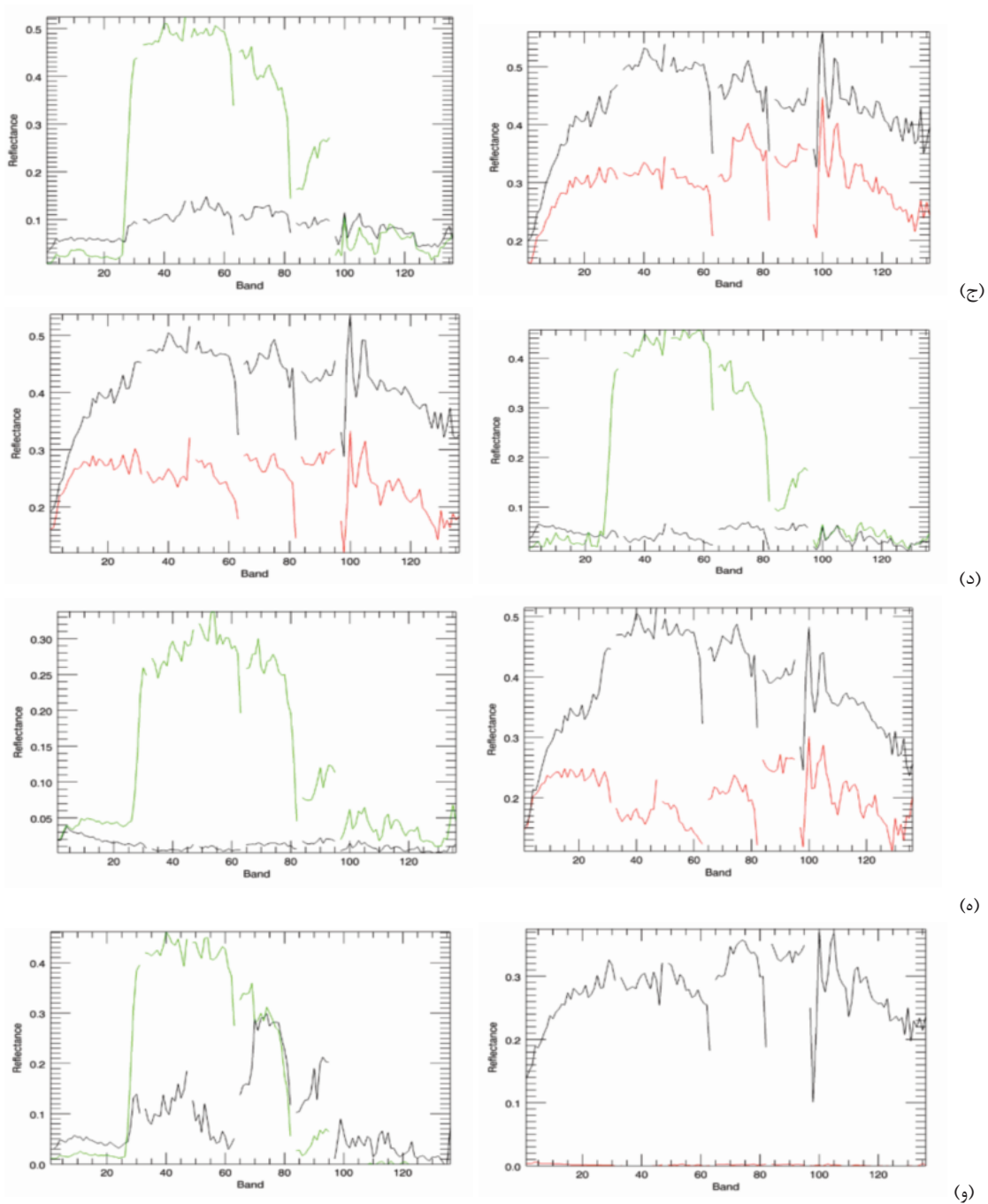
شکل ۱۶. تصویر به‌دست‌آمده از تلفیق در ۳ باند، (الف): تصویر تصویر حاصل از تلفیق در ۳ باند برای یک عرصه به همراه نقشه ۱:۲۰۰۰؛ (ب): تصویر IKONOS به همراه نمودار طیفی یک پیکسل؛ و (ج): تصویر حاصل از تلفیق به همراه نمودار طیفی همان پیکسل



(الف)



(ب)



شکل ۱۷. طیف بازتابندگی ۶ کلاس شهری، تصاویر «الف» تا «و» طیف‌های کلاس‌های اول تا ششم

طیف‌های متفاوت در یک کلاس می‌تواند نشانه‌ای از تغییرات درون کلاسی و یا خطای خوشه‌بندی Fuzzy C-Means در تعیین کلاس‌های کاملاً مجزا از هم در تصویر IKONOS باشد.

شکل ۱۷ طیف‌های نمونه بازتابندگی هر کلاس را که با خوشه‌بندی K-Means تعیین شده‌اند، نشان می‌دهد. در شکل ۱۷، در هر کلاس طیف با بازتابندگی پایین به آب و یا سایه منسوب می‌شود. حضور

Busetto, L., Meroni, M. & Colombo, R., 2008, **Combining Medium and Coarse Spatial Resolution Satellite Data to Improve the Estimation of Sub-pixel NDVI Time Series**, Remote Sensing of Environment 112, PP. 118-131.

Goodenough, D.G., Dyk, A., 2003, **Processing Hyperion and ALI for Forest Classification**, IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, PP. 1321-1331

Haertel, V. & Edemir Shimabukuro, Y., 2005, **Spectral Linear Mixing Model in Low Spatial Resolution Image Data**, IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, 2555-2562.

Mezned, N. & Abdeljaoued, S., 2009, **Unmixing Based Landsat ETM+ and ASTER Image Fusion For Hybrid Multispectral Image Analysis**, Advances In Geoscience and Remote Sensing, PP. 407-418.

Powell, R.L., Roberts, D.A., Dennison, P.E., Hess, L.L., 2007, **Sub-pixel Mapping of Urban Land Cover Using Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis: Manaus, Brazi**, Remote Sensing of Environment 106, PP. 253-267.

Pu, R., Gong, P. & Michishita, R., 2008, **Spectral Mixture Analysis for Mapping Abundance of Urban Surface Components from the Terra/ASTER Data**, Remote Sensing of Environment 112, PP. 939-954.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای نخستین بار بهبود دقت طیفی تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا در منطقه‌ای شهری در نظر گرفته شده است. بدین منظور کوشش گردید بر مبنای روش جداسازی مکانی، اطلاعات طیفی و مکانی تصاویر Hyperion و IKONOS تلفیق شود؛ و در نهایت تصویری با قدرت تفکیک مکانی ۴ متر و ۱۳۶ بانده از منطقه شهری تهیه شد. همچنین طیف بازتابندگی کلاس‌های شهری با استفاده از این روش به دست آمد. برای ارزیابی دقت طیف‌های به دست آمده نیز به بازسازی تصویر ابرطیفی و مقایسه آن با تصویر واقعی پرداخته شد. میانگین RMSE و میانگین NCC به ترتیب ۰/۰۳۵۴ و ۰/۸۶ به دست آمد. تصحیح جوئی تصویر Hyperion و تصحیح هندسی دو تصویر را می‌توان به عنوان دو عامل مؤثر در نتایج نهایی به شمار آورد. استفاده از روش‌های طبقه‌بندی دقیق‌تر برای تعیین کلاس‌های شهری، یافتن روشی برای افزایش دقت تصحیح هندسی و ارتباط دو تصویر با هم، بررسی تأثیر PSF بر روی درصد حضور مواد در یک پیکسل مختلط، انجام عملیات طیف‌سنجی میدانی برای بهبود نتایج، موضوعاتی است که می‌تواند در تحقیقات آینده مورد توجه قرار گیرد.

## ۷- منابع

Amoros Lopez, J., GomezChova, L., Alonso, L. & Guanter, L., 2011, **Regularized Multiresolution Spatial Unmixing for ENVISAT/MERIS and Landsat/TM Image Fusion**, IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS, PP. 844-848.

Barry, P., 2001, **EO-1/ Hyperion Science Data User's Guide**, TRW Space, Defense & Information Systems.

- Small, C., 2003, **High Spatial Resolution Spectral Mixture Analysis of Urban Reflectance**, Remote Sensing of Environment 88, PP. 170–186.
- Staenz, K., Neville R.A., Clavette, S., 2002, **Retrieval of Surface Reflectance from Hyperion Radiance Data**, IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS, Vol.3, PP. 1419-1421
- Zeng, Y., E. Schaepman, M., & Wu, B., 2007, **Using Linear Spectral Unmixing Of High Spatial Resolution And Hyperspectral Data For Geometric-Optical Modelling**, ISPRS, Vol. XXXVI/7-C50.
- Zhukov, B., Oertel, D., Lanzl, F. & Reinhackel, G., 1999, **Unmixing-Based Multisensor Multiresolution Image Fusion**, IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, 1212-1226.
- Zurita-Milla, R., Kaiser, G., Clevers, J. & Schneider, W., 2009, **Downscaling Time Series of MERIS Full Resolution Data to Monitor Vegetation Seasonal Dynamics**, Remote Sensing of Environment 113, PP. 1874–1885.