

ارزیابی شیء مبنای کیفیت طیفی تصاویر ادغام شده ماهواره‌ای با قدرت تفکیک بالا

احمد طوسی^۱، فرزانه دادرسیان^{۲*}، فرهاد صمدزادگان^۳

^۱ کارشناس ارشد نقشه برداری، فتوگرامتری - دانشکده نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی -

دانشگاه تهران

ahmadtoosi71@ut.ac.ir

^۲ استادیار دانشکده نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

fdadrasjavan@ut.ac.ir

^۳ استاد دانشکده نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

samadz@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت اردیبهشت ۱۳۹۸، تاریخ تصویب اردیبهشت ۱۳۹۹)

چکیده

تصاویر پانکروماتیک و چند طیفی ماهواره‌های سنجش از دوری با یکدیگر ادغام شده تا تصویری چند طیفی با قدرت تفکیک مکانی بالا به دست آید. کیفیت طیفی تصاویر ادغام شده از اهمیت زیادی برخوردار بوده چرا که کیفیت تعداد زیادی از محصولات سنجش از دوری به طور عمده به آن بستگی دارد. با توجه به اهمیت کیفیت طیفی تصاویر ادغام شده ارزیابی آن نیز اهمیت خاصی دارد. این مقاله استراتژی شیء مبنایی برای ارزیابی کیفیت طیفی تصاویر ادغامی با هدف فائق آمدن بر محدودیت‌های روش رایج پیکسل مبنا و سایر روش‌های شیء مبنا ارائه می‌دهد. این نوع ارزیابی از طریق تمرکز بر روی اشیاء همگن دارای رفتارهای طیفی و بافتی مشابه و انجام عملیات میانگین‌گیری از مقادیر شاخص‌های ارزیابی کیفیت در محدوده قطعات و کلاس‌های تصویری معنادار تحقق می‌یابد. در فاز پیاده‌سازی ایده پس از تعیین یک شاخص طیفی بهینه (شاخص SAM)، طرح شیء مبنای پیشنهادی بر روی پنج مجموعه داده از چهار نوع سنجنده ماهواره‌ای مختلف اعمال و رفتار طیفی ۲۹ روش ادغام در هفت کلاس تصویری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که رفتار طیفی روش‌های ادغام در کلاس‌های مختلف از قاعده مشخصی تبعیت نمی‌کند. در نهایت از تحلیل‌های آماری برای تعیین بهترین روش‌های ادغام در هر کلاس استفاده شد و لیستی از الگوریتم‌های برتر در کلاس‌های تصویری مختلف در اختیار محققان حوزه سنجش از دور و ادغام تصاویر قرار گرفته است. اغلب روش‌های برتر جزء روش‌های مبتنی بر جایگزینی مولفه (CS) و با سرعت محاسباتی نسبتاً بالایی بوده‌اند. نتایج تجزیه و تحلیل آماری ۵۸٪ با داده اعتبارسنجی انطباق داشته است. این رهیافت به جامعه علمی مرتبط با این نوشتار کمک خواهد نمود تا با نگاهی واقع‌گرایانه به انتخاب الگوریتم ادغام متناسب با تصاویر ماهواره‌ای مورد نظر خود مبادرت نمایند.

واژگان کلیدی: قدرت تفکیک بالا، ادغام تصاویر، ارزیابی طیفی، شیء مبنا

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

ماهواره‌های سنجش از دوری نظیر GeoEye، QuickBird و ... بطور معمول یک تصویر چند طیفی با قدرت تفکیک مکانی پایین و اطلاعات طیفی غنی، و یک تصویر پانکروماتیک با قدرت تفکیک مکانی بالا و فاقد اطلاعات طیفی تولید می‌کنند و سپس این تصاویر طی فرآیند ادغام تصاویر^۱ با یکدیگر تلفیق می‌شوند [۱-۳]. تصاویر ادغامی به صورت مصنوعی تولید می‌شوند و در مراحل پردازشی بعدی، خود به عنوان داده‌های مستقلی محسوب می‌گردند، بنابراین لازم است کیفیت آن‌ها بطور دقیق ارزیابی گردد [۴-۷].

روش‌های مختلف ارزیابی کیفیت تصویر ادغامی به دو دسته کیفی و کمی طبقه‌بندی می‌شوند [۸]. ارزیابی کیفی بر اساس مقایسه بصری رنگ‌ها و جزئیات مکانی در تصویر ادغامی با ویژگی‌های متناظر در داده‌های چند طیفی و پانکروماتیک انجام می‌گیرد [۷]، [۹-۱۲]. از آنجایی که ارزیابی کیفی هزینه بر و زمان بر است و نتایج آن بستگی به نظر کارشناسان دارد، استفاده از آن چندان مقرون به صرفه نیست [۵]، [۹-۷]، [۱۲]. از سوی دیگر، معیارهای کمی نیز برای ارزیابی کمی کیفیت تصاویر ادغامی پیشنهاد شده است [۸]. این معیارها به دو دسته طیفی و مکانی تقسیم می‌شوند که شباهت بین ویژگی-های متناظر در تصاویر چند طیفی، پانکروماتیک و ادغامی را بررسی می‌کند [۱۳]. معیارهای کمی براساس سطح اطلاعات طیفی به دو دسته تک سطحی و چند سطحی تقسیم می‌شوند [۱۴ و ۱۵].

علاوه بر این با ظهور تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک بسیار بالا تصاویر ادغام شده قابلیت استفاده در تولید نقشه‌های مختلف را دارند بنابراین اشیاء در تصویر ادغامی می‌بایست رفتار مکانی مشابه با اشیاء مربوطه در تصویر پانکروماتیک داشته باشند [۱۶-۱۸].

در راهبرد معمول ارزیابی کیفیت طیفی، موسوم به استراتژی پیکسل مبنا، کیفیت تصویر با استفاده از یک مقدار که با میانگین گیری از مقادیر شاخص طیفی برای پیکسل‌های تصویر بدست می‌آید ارزیابی می‌گردد [۱۹]. این راهبرد دیدگاه محدودی نسبت به رفتار توابع ادغام در

رابطه با بخش‌های مختلف تصویر دارد، چرا که پاسخ (رفتار) قسمت‌های مختلف به الگوریتم ادغام یکنواخت نمی‌باشد [۱۴ و ۲۰]. با توجه به مباحث مطرح شده در این مقاله روش قابل اعتماد و کارآمدی برای ارزیابی کیفیت طیفی تصاویر ادغام شده پیشنهاد خواهد گردید.

۲- مطالعات مروری

استراتژی مبتنی بر پیکسل‌های تصویری ایده‌ای رایج در مقالات مختلف جهت ارزیابی کیفیت تصاویر ادغام شده می‌باشد. در مقالات مذکور از یک سری معیارهای ارزیابی کیفیت طیفی شامل CC، SAM، ERGAS، UIQI، Q^{2n} ، QNR^2 ، $SSIM$ و $RMSE$ استفاده شده است که در آن‌ها مقادیر شاخص برای هر پیکسل تصویری محاسبه شده و در نهایت کیفیت کلی تصویر بر اساس میانگین گیری بدست می‌آید [۲ و ۳]، [۱۲]، [۲۱-۲۵]. با توجه به محدودیت‌های استراتژی مبتنی بر پیکسل، مطالعاتی برای حل این محدودیت‌ها از طریق در نظر گرفتن اشیاء تصویری به جای پیکسل‌های تصویر انجام شده است.

Buntilov و همکاران (۲۰۰۴) رویکردی مبتنی بر اشیای تصویری را برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های ادغام پیشنهاد نموده که در آن تصویر چند طیفی به مناطقی دارای خواص مکانی مختلف تقسیم بندی و سپس تغییرات طیفی و مکانی هر بخش بین تصاویر چند طیفی و ادغامی به طور جداگانه اندازه گیری می‌گردد. با اعمال یک پنجره^۴ مربعی به مقادیر انحراف معیار تصویر چند طیفی، و اختصاص دادن مقادیر درون پنجره به پیکسل میانی آن، تصویر جدیدی ایجاد شده تا وارد روند قطعه بندی گردد. به این منظور دو حد آستانه برای هیستوگرام تصویر به دست آمده اعمال می‌شود و بر این اساس مقادیر کوچکتر از آستانه اول بیانگر مناطق همگن، مقادیر بزرگتر از آستانه دوم متعلق به مناطق بسیار ناهمگون، و پیکسل-هایی با مقادیر بین دو حد آستانه نیز نشان دهنده مناطق متوسط می‌باشند. در نهایت تغییرات طیفی و مکانی تصویر ادغامی محاسبه شده و با تصویر چند طیفی در هر یک از سه بخش مذکور مقایسه می‌گردد [۱۷].

^۲ Quality with No Reference^۳ Spectral Information Divergence^۴ Kernel^۱ Image Fusion

Seeta و همکاران (۲۰۰۸) ایده Buntilov و همکاران (۲۰۰۴) را بر روی سه مجموعه داده ماهواره‌ای مختلف اجرا، و کیفیت تصاویر ادغامی حاصل از چهار روش ادغام را ارزیابی نمودند. در استراتژی پیشنهاد شده شباهت تنوع مکانی بخش‌ها اهمیت زیادی دارد به طوری که ممکن است دو نوع مختلف از اشیاء (به عنوان مثال پوشش آبی و پوشش گیاهی) در یک دسته قرار گیرند که این موضوع در این مقاله مورد بحث رخ داده است [۲۶].

DadrasJavan و Samadzadegan (۲۰۱۴) برای اولین بار رویکرد ارزیابی کیفیت مبتنی بر پیکسل را به چالش کشیدند. آنها تفاوت بین مقادیر شاخص طیفی در مناطق مختلف تصویر را مورد بررسی و روش پیکسل مینا را مورد انتقاد قرار داده و روشی شیء مینا برای حل مشکل پیشنهاد کردند. آنها قطعاتی (اشیاء) را در تصویر چند طیفی با استفاده از قطعه بندی شیء گرا استخراج نموده و ارزیابی کیفیت را با دو دیدگاه متمایز به کیفیت طیفی و مکانی تصویر انجام دادند. اشیاء تصویری به عنوان عناصری با رفتار بافتی، طیفی و مکانی مشابه و دارای رفتار مشابه نسبت به الگوریتم‌های ادغام بوده و از این رو تنها محاسبه مقادیر شاخص در محدوده یک جسم همگن منطقی بود. ارزیابی کیفیت طیفی کمی بر اساس شباهت بین رفتار طیفی هر شیء و متناظر آن در تصویر مرجع انجام می‌شود. در طرح پیشنهادی میانگین مقادیر شاخص‌ها در هر قطعه (شیء) محاسبه شده و سپس به طور جداگانه به هر شیء اختصاص داده می‌شود. در نهایت نیز نتایج ارزیابی طیفی اشیاء تصویری به صورت کیفی طبقه بندی و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند [۲۷].

Hasanlou و Saradjian (۲۰۱۶) با اشاره به ضعف رویکرد پیکسل مینای ارزیابی کیفیت، روشی را پیشنهاد کردند که در آن تصویر ادغامی به طور جداگانه از لحاظ هندسی (مکانی) و رادیومتریکی (یا طیفی) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این روش، اطلاعات فرکانس بالا که عمدتاً مربوط لبه اشیاء تصویری هستند با استفاده از الگوریتم‌های تشخیص لبه استخراج شده و سپس این اطلاعات از روی تصویر با استفاده از اپراتورهای مورفولوژیکی حذف می‌شوند. تصویر به جای مانده به عنوان مولفه پس زمینه شناخته می‌گردد. جزء دیگر نیز حاوی اطلاعات لبه می‌باشد. در ادامه یک شاخص کیفیت به دو بخش هندسی و رادیومتریکی تقسیم شده و برای

ارزیابی رادیومتریکی شاخص رادیومتریکی بر روی مولفه پس زمینه تصاویر چند طیفی و ادغامی اعمال می‌گردد و مقدار عددی به عنوان کیفیت رادیومتریکی تصویر ادغام شده بدست می‌آید. فرایند مشابهی نیز برای بخش هندسی ارزیابی کیفیت انجام می‌شود. در نهایت با یک ترکیب خطی وزن دار عددی به عنوان کیفیت رادیومتریکی-هندسی تصویر به دست می‌آید. فرایند ارزیابی در این مقاله به نوعی مشابه با استراتژی مبتنی بر پیکسل سابق عمل می‌کند [۱۸].

Rodriquez-Esparagon و همکاران (۲۰۱۷) با انتقاد از شیوه ارزیابی پیکسل مینا، طرح شیء مینایی را پیشنهاد کردند که در آن قطعات تصویری در تصویر ادغامی با استفاده از الگوریتم Watershed استخراج شده و نتایج ارزیابی کیفیت طیفی، با یافتن مقادیر شاخص برای پیکسل‌های قطعات تصویری همگن، در قالب نقشه‌های کیفیت رنگی ارائه می‌گردد [۱۹].

از آنجایی که استراتژی ارزیابی پیکسل مینا کارایی جامع و صحیحی نداشته و همچنین دیدگاه محدودی در رابطه با رفتار تابع ادغام ارائه می‌دهند لذا در تعدادی از مقالات ذکر شده تلاش شده است تا توانایی روش‌های شیء مینا را برای غلبه بر این محدودیت‌ها بکار گیرند. در تحقیقات نام برده شده کیفیت قطعات تصویری به عنوان اشیاء تصویری مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر خلاف این تحقیقات که تعریف معنی دار و مناسبی از اشیاء موجود در دنیای واقعی ارائه نکرده‌اند در این تحقیق سعی شده است تعریف واضحی از اشیاء مورد استفاده در ارزیابی مطابق با با معنای فیزیکی و نمود خارجی مشخص ارائه گردد.

برای غلبه بر محدودیت‌های استراتژی پیکسل مینای رایج در ارزیابی کیفیت ادغام، این مقاله رویکرد شیء مینایی را بر اساس ویژگی‌های طیفی و کاربردی اشیاء ارائه می‌دهد. این رویکرد شیء مینا قابلیت ارزیابی کیفیت خروجی ادغام برای هر شیء تصویری مورد نظر را در رابطه با پارامترهای مختلفی از جمله نوع شیء و اهمیت اشیاء مختلف در مجموعه داده مورد نظر برای کاربران فراهم می‌کند. در برخی از کاربردهای سنجش از دوری هدف کاربران از فرایند ادغام شناسایی هر چه بهتر ویژگی‌های مربوط به برخی از اشیاء مورد نظر است. در این حالت علاوه بر کیفیت کلی تصویر ادغامی به دست آمده از فرایند پیکسل مینا، کیفیت اشیاء مورد نظر در

خروجی ادغام نیز باید بصورت جداگانه طبق استراتژی شیء مبنای ارزیابی شود. در این مقاله پس از بررسی نقایص استراتژی پیکسل مبنای روش ارزیابی شیء مبنای پیشنهاد شده است بطوریکه در آن روش‌های ادغام براساس استراتژی پیشنهادی ارزیابی می‌شوند و بهترین روش‌ها در هر کلاس از لحاظ عملکرد طیفی معرفی می‌شوند.

۳- مواد و روش‌ها

با توجه به ضرورت ارزیابی کیفیت طیفی تصاویر ادغامی از یک طرف و ضعف روش ارزیابی پیکسل مبنای از طرفی دیگر، در این مقاله استراتژی شیء مبنای ارائه شده و برای ارزیابی کیفیت طیفی، به منظور ترمیم محدودیت‌های استراتژی پیکسل مبنای و بهبود آن به کار برده شده است. شکل ۱ طرحواره‌ای از روش پیشنهادی ارائه می‌دهد که در آن کل فرایند طرح پیشنهادی متشکل از سه مرحله تعیین شاخص طیفی بهینه، ارزیابی شیء مبنای کیفیت طیفی و بررسی نحوه عملکرد طیفی الگوریتم‌های ادغام در کلاس‌های مختلف است که به ترتیب با کادرهای قرمز، سبز و آبی مشخص شده‌اند.

۳-۱- تعیین شاخص طیفی بهینه

شاخص‌های ارزیابی کیفیت بر اساس سطوح اطلاعات طیفی در نظر گرفته شده در آن به دو دسته تک سطحی و چند سطحی تقسیم بندی می‌شوند، که به ترتیب کیفیت ادغام را بصورت کلی و جداگانه برای هر باند تصویر بررسی می‌کنند [۹]، [۱۴ و ۱۵]. از معیارهای تک سطحی رایج می‌توان به اختلاف واریانس (DIV)، انحراف معیار (SD)، شاخص شباهت ساختاری (SSIM)، آنتروپی (Entropy)، ضریب همبستگی (CC) و خطای میانگین مربعی (RMSE) اشاره کرد. از سوی دیگر ERGAS، SAM و SCM^۱ از جمله رایج ترین متریک‌های چند سطحی هستند [۱۳].

با توجه به نتایج تحقیقات پیشین [۲۰] شاخص SAM از میان شاخص‌های کیفیت به عنوان شاخص برتر برای استفاده در این مقاله انتخاب شده است. این شاخص یکی از پرکاربردترین متریک‌های طیفی است که اغلب برای

ارزیابی طیفی ادغام استفاده می‌شود [۲۸]. این شاخص چند سطحی زاویه طیفی بین بردارهای طیفی تصاویر چند طیفی و ادغامی را مطابق رابطه ۱ محاسبه می‌کند.

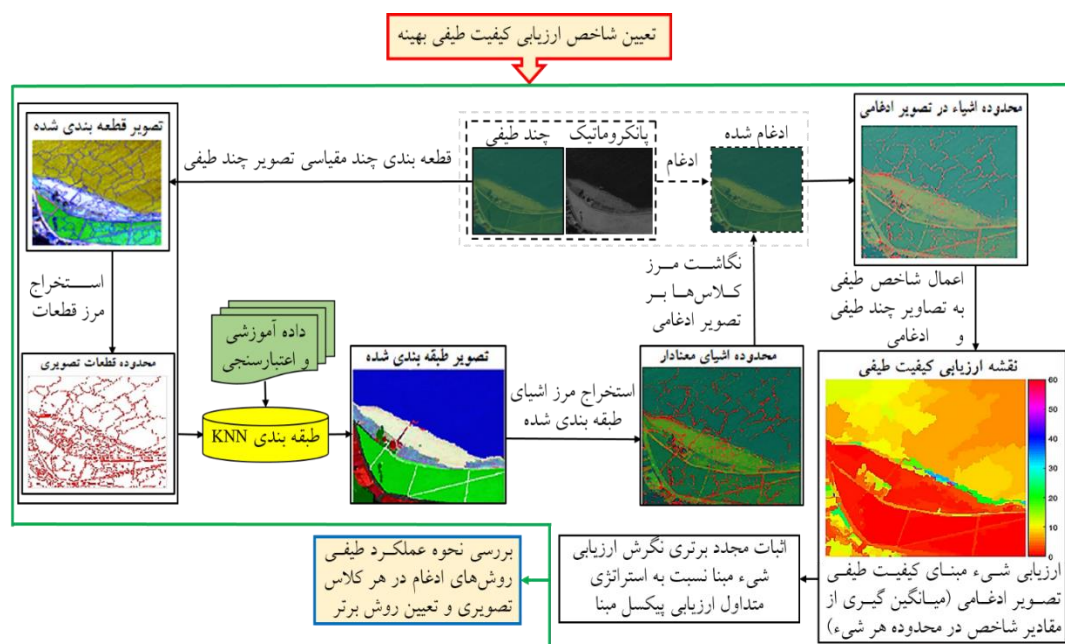
$$SAM(I_r, I_f) = \text{Arc cos} \left(\frac{\sum_{i=1}^n (I_r(i) - I_f(i))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n I_r(i)} \sqrt{\sum_{i=1}^n I_f(i)}} \right) \quad (1)$$

که در آن $I_r = (I_{r1}, I_{r2}, \dots, I_{rm})$ و $I_f = (I_{f1}, I_{f2}, \dots, I_{fn})$ به ترتیب بردارهای طیفی تصاویر چند طیفی و ادغامی با n باند طیفی هستند. پارامتر i نیز بیانگر هر باند طیفی مورد نظر است. مقادیر شاخص به دست آمده بین صفر تا ۹۰ درجه متغیر بوده و مقدار ایده آل آن صفر می‌باشد [۹]، [۲۰].

۳-۲- ارزیابی شیء مبنای کیفیت طیفی

با توجه به پاسخ‌های متفاوت نقاط مختلف تصاویر به الگوریتم‌های ادغام، واضح است که اشیای دارای رفتار طیفی و بافتی مشابه پاسخ مشابهی به الگوریتم ادغام داده و لذا منطقی است که کیفیت تنها در محدوده هر شیء با رفتار بافتی و طیفی همگن ارزیابی گردد. در این حالت اشیاء تصویری به عنوان واحدهای محاسباتی در عملیات پردازشی در نظر گرفته می‌شوند. روش شیء مبنای بر این اصل استوار است که تمامی محاسبات پس از اعمال شاخص‌های طیفی باید در محدوده قطعات همگنی با عنوان اشیاء تصویری که رفتار طیفی، مکانی و بافتی مشابهی دارند انجام شود. از این رو لازم است که قطعات تصویری در تصاویر چند طیفی و ادغامی طی فرآیند قطعه بندی شیء گرا استخراج گردند. برای به دست آوردن اشیاء تصویری مذکور، در گام دوم، پس از ادغام تصاویر چند طیفی و پانکروماتیک، تصویر چند طیفی با پایین‌ترین سطح اطلاعات مکانی وارد الگوریتم قطعه‌بندی می‌شود. تصویر چند طیفی برای این منظور انتخاب شده است چرا که دارای کمترین قدرت تفکیک مکانی و حاوی پایین‌ترین سطح اطلاعات مکانی نسبت به تصاویر پانکروماتیک و ادغامی است و در صورتی که در سختگیرانه‌ترین حالت مرزی از قطعات در تصویر چند طیفی تشخیص داده شود، پیکسل‌های آن مرز حتما در تصاویر پانکروماتیک و ادغامی نیز قابل تشخیص و استخراج خواهند بود.

^۱ Spectral Correlation Mapper



شکل ۱- طرحواره‌ای از روش شیء مبنای پیشنهادی در ارزیابی کیفیت طیفی تصاویر ادغام شده

۳-۲-۱- قطعه بندی تصویر چند طیفی

در این مقاله از الگوریتم قطعه‌بندی چند مقیاسی^۱ موجود در نرم افزار eCognition برای تولید قطعات در تصویر چند طیفی استفاده شده است. این الگوریتم بر اساس استراتژی نگاه از پایین به بالا^۲ عمل می‌کند، بدان معنا که قطعات کوچکتر برای ایجاد یک شیء تصویری بزرگتر طبق مراحل تکراری ترکیب می‌شوند و در نهایت زمانی که معیارهای ناهمگونی متوسط قطعات به حداقل مقدار ممکن برسد فرایند متوقف می‌گردد [۲۹]. در این روش طبق معادله ۲، برای تولید قطعات تصویری به اطلاعاتی در مورد رنگ و شکل (نرمی و فشردگی) هر قطعه نیاز است که می‌بایست توسط کاربر تعریف گردد. در رابطه ۲، F_H معیار کلی ناهمگونی بوده که باید کمینه گردد و زمانی که این معیار به حد آستانه از پیش تعیین شده برسد فرایند قطعه‌بندی متوقف خواهد شد [۲۹ و ۳۰].

$$F_H = w_{color} \cdot \Delta h_{color} + w_{shape} \cdot \Delta h_{shape} \quad (2)$$

w_{shape} و w_{color} پارامترهای وزنی در بازه صفر و یک معرف ویژگی‌های رنگی و شکلی و Δh_{color} و Δh_{shape} نیز بیانگر ناهمگونی رنگی و شکلی قطعات می‌باشند.

۳-۲-۲- طبقه بندی تصویر چند طیفی

از آنجا که قطعات تولید شده برچسبی نداشته و صرفاً بخش‌هایی هستند که از یکدیگر مجزا شده‌اند، بهتر است آن‌ها را با استفاده از فرایند طبقه بندی برچسب گذاری کرده تا نوع کلاسی که هر قطعه به آن تعلق دارد تعیین گردد. در این تحقیق از الگوریتم نظارت شده K-نزدیکترین همسایگی^۳ (KNN) استفاده شده است. KNN بر اساس قانون Tobler در علم جغرافیا مبنی بر اینکه اشیای مجاور به یکدیگر شبیه‌ترند تا اشیای دورتر پایه ریزی شده است [۳۱]. در این الگوریتم فاصله بین یک پیکسل مجهول (که اطلاعاتی در مورد عضویت آن به کلاس‌های تعریف شده وجود ندارد) و پیکسل‌های نماینده کلاس‌های همسایه آن محاسبه می‌شود. پیکسل‌های نماینده هر کلاس با تعریف داده‌های آموزشی^۴ به الگوریتم طبقه بندی به وجود می‌آیند. تعریف داده‌های آموزشی به الگوریتم طبقه بندی به این معنی است که پیکسل‌های قطعات تصویری (که وضعیت عضویت آن‌ها به یک کلاس مشخص است) باید به عنوان نمونه‌ای از آن کلاس مورد نظر معرفی گردند. سپس پیکسل مجهول با پیکسل‌های نمونه هر کلاس مقایسه شده و هر همسایگی با توجه به فاصله آن تا پیکسل مجهول نسبت به شباهت پیکسل

^۳ K-Nearest Neighbor
^۴ Training Data

^۱ Multi-resolution
^۲ Bottom-up

مجهول به پیکسل‌های حوزه خود رأی خواهد داد. فاصله کمتر به منزله شباهت بیشتر است و بالعکس. با این رویکرد پیکسل مجهول به کلاسی که بیشترین شباهت را دارد تعلق می‌یابد [۳۲]. ارزیابی دقت فرایند طبقه بندی انجام شده نیز با داده‌های اعتبارسنجی^۱ انجام می‌پذیرد. پس از طبقه بندی محدوده اشیاء معنی دار استخراج شده و سپس بر روی تصویر ادغامی نگاشته می‌شود تا مرز اشیاء معنی دار در تصویر ادغامی نیز تعیین گردد.

۳-۲-۳- اعمال شاخص طیفی به تصاویر چند طیفی و ادغامی و میانگین گیری شیء مبنا

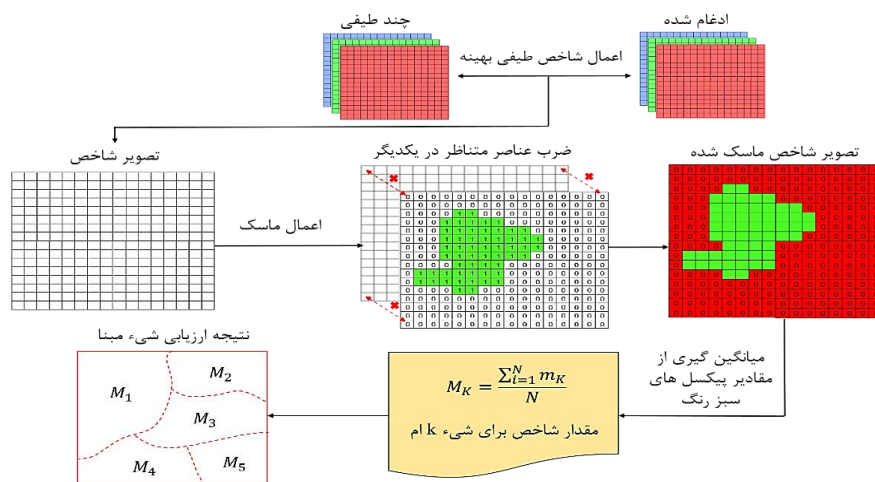
بطور معمول در ارزیابی کیفیت ادغام از یک استراتژی با عنوان پروتکل Wald استفاده می‌شود که از رایج ترین رویکردهای موجود در ارزیابی عملیات ادغام است [۲] و [۳]، [۲۳ و ۲۴]، [۳۳-۳۵]. در این راهکار تصاویر چند طیفی و پانکروماتیک اولیه در ابتدا به یک سطح پایین‌تر down-sample می‌شوند و عملیات ادغام بر روی تصاویر خروجی از این مرحله انجام می‌پذیرد [۳۷ و ۳۸]. با توجه به توضیحات مذکور در مرحله بعدی طرح پیشنهادی شاخص طیفی SAM طبق پروتکل Wald به تصاویر چند طیفی اولیه و ادغامی اعمال می‌شود. سپس با میانگین-گیری از مقادیر شاخص مربوط به پیکسل‌های هر شیء همگن، کیفیت طیفی اشیاء بر اساس استراتژی شیء مبنا ارزیابی می‌شود. در توضیح این مطلب همانطور که در شکل ۲ ملاحظه می‌گردد با تعیین مختصات مرزهای اشیاء و استخراج پیکسل‌های موجود در داخل و خارج هر قطعه و کلاس، ماسک‌های تصویری مختلفی تعریف و به تصویر شاخص اعمال می‌گردد (این تصویر ماتریسی است که حاوی مقادیر شاخص طیفی مربوط به پیکسل‌های تصاویر چند طیفی و ادغامی است). ماسک‌های تعریف شده ماتریس‌های باینری (حاوی ۰ و ۱) هستند که ابعادی برابر با ابعاد تصاویر چند طیفی و ادغامی (مطابق پروتکل Wald) دارند. در ماسک‌های تعریف شده مقادیر پیکسل-های مرز و درون اشیاء یک و مابقی آن‌ها صفر می‌باشند. با ضرب عناصر ماسک‌های تعریف شده (به تعداد قطعات یا کلاس‌ها) در عناصر متناظر آن‌ها در تصویر شاخص، تنها مقادیر شاخص منتسب به پیکسل‌های مرزی

و درون اشیاء باقی می‌ماند و مقادیر مناطق بیرونی برابر صفر خواهند شد. پیکسل‌هایی از تصویر شاخص که پس از اعمال ماسک همچنان باقی مانده‌اند نشان دهنده مقادیر شاخص برای پیکسل‌های متناظر مورد نظر در تصاویر چند طیفی و ادغامی هستند. بنابراین کافیت تنها مقادیر غیر صفر در تصویر شاخص برای تعیین مقدار شاخص طیفی برای آن قطعه یا کلاس مورد نظر مشخص گردند. این فرایند باید برای تمامی قطعات و یا کلاس‌ها انجام گردد بسته به اینکه ارزیابی قطعات تصویری مد نظر است و یا کلاس‌های تصویری؟ خروجی این مراحل یک نقشه کیفیت طیفی است که در آن مقدار کیفیت طیفی هر شیء به طور جداگانه مشخص می‌گردد. این نقشه شامل میانگین مقادیر شاخص طیفی SAM برای هر شیء است.

۳-۲-۴- اثبات یکنواختی رفتار طیفی پیکسل‌های یک کلاس و تفاوت رفتار آن‌ها در کلاس‌های مختلف

در بخش نهایی از گام دوم طرح پیشنهادی پس از روشن شدن تمامی جوانب روش ارزیابی کیفیت شیء مبنا، رفتار الگوریتم‌های ادغام مختلف را می‌توان در کل تصویر با استفاده از شاخص SAM بررسی نمود. برای این منظور نیاز است که ثابت گردد رفتار توابع ادغام در کل تصویر یکسان نیست. در واقع هدف از این بخش اثبات مجدد این موضوع است که استراتژی شیء مبنا در مقایسه با روش ارزیابی نه چندان کار آمد پیکسل مبنا بهتر عمل می‌کند. به این منظور با اعمال شاخص SAM به کل تصاویر چند طیفی و ادغامی، یک بار از مقادیر شاخص پیکسل‌های درون قطعات مربوط به یک کلاس خاص و بار دیگر عملیات مشابه برای کلاس‌های مختلف انجام می‌شود. هدف نشان دادن آن است که رفتار طیفی پیکسل-های مربوط به کلاس‌های مختلف متفاوت است در حالی که رفتار طیفی پیکسل‌ها در یک کلاس همگن مشابه است. این کار با استفاده از مقایسه شاخص‌های آماری نظیر مقادیر کمینه، بیشینه، واریانس و انحراف معیار مقادیر متریک طیفی در قطعات و کلاس‌های تصویری تحقق می‌یابد.

^۱ Test Data



شکل ۲- اعمال شاخص طیفی و ادغامی و میانگین گیری شیء مبنا

۳-۳- بررسی رفتار طیفی الگوریتم های ادغام در کلاس های مختلف

روش های مذکور بر روی انواع مختلفی از مجموعه داده های ماهواره ای پیاده سازی می شوند. هدف از این کار یافتن پاسخی برای این پرسش است که "آیا رفتار طیفی توابع ادغام در کلاس های مختلف از یک قاعده مشخصی تبعیت می کند و یا خیر؟"؛ به عبارت دیگر در پی آنیم که دریابیم آیا قادر به تعیین یک روش ادغام بهینه متناظر با هر کلاس، که همواره بهترین عملکرد طیفی را در آن داشته باشد، هستیم؟ اگر تنها یک روش ادغام در هر کلاس قابل تعیین نباشد، روش های ادغامی که از برخی از جنبه ها مشابه هستند (به عنوان مثال همه آنها جزء روش های مبتنی بر مویک هستند) را می توان به عنوان بهترین روش معرفی نمود. پس از بررسی نتایج اگر رفتار طیفی روش های ادغام به هیچ وجه قانونمند نباشد، برای تعیین یک روش ادغام با بهترین عملکرد طیفی در هر کلاس، به ناچار از آنالیزهای آماری کمک خواهیم گرفت.

میانگین گیری یکی از ساده ترین ابزارهای آماری است که می تواند در این مورد از آن استفاده گردد، به این معنا که می توان نتایج ارزیابی کیفیت طیفی توابع ادغام در هر کلاس را میانگین گیری کرد و از این رو الگوریتمی را به عنوان بهترین روش در هر کلاس تعیین نمود. بدیهی است که هر اندازه اعضای جامعه آماری بیشتر و داده ها از انواع سنجنده ها و مکان های متنوعی گردآوری شوند نتایج تحلیل های آماری دقیق تر و قابل اطمینان تر خواهند بود.

در گام سوم از طرح پیشنهادی در ابتدا عملکرد طیفی ۲۹ الگوریتم ادغام شامل PCA^۱، [۱۲] Brovey، [۳۹] GIHS، [۴۰] GIHS-TP، [۴۱] GIHS-AW، [۴۲] Nonlinear IHS، [۲۴] Ehlers، [۶] Gram-Scmidt، [۶] BDSD، [۲۵] MMP، [۴۴] Indusion، [۴۳] SFIM، [۴۵] HCS، [۴۷] HPF، [۴۶] PRACS، [۴۸] SW، [۴۹] AW، [۵۰] Contrast pyramid، [۵۱] MF-HG، [۳۴] MTF-GLP، [۲] MTF-، [۱۵] GLP-CBD، [۲] GLP-HPM، [۲] MTF-GLP-SDM، [۱۷] AWLP، [۴۹] AWI، [۵۳] SWI، [۵۲] WWI، [۴۰] SWPC، [۵۳] و AWPC، [۵۵] مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

- ^۱ Principal Component Analysis
- ^۲ Generalized Intensity-Hue-Saturation
- ^۳ GIHS with Tradeoff parameter
- ^۴ Improved GIHS with Additive Weights
- ^۵ Smoothing Filter-based Intensity Modulation
- ^۶ Matting Model Pansharpening
- ^۷ Band-Dependent Spatial Detail with local parameter estimation
- ^۸ Partial Replacement Adaptive Component Substitution
- ^۹ High Pass Filter
- ^{۱۰} Hyperspectral Color Space
- ^{۱۱} Substitutive Wavelet
- ^{۱۲} Additive Wavelet
- ^{۱۳} Morphological Half Gradient
- ^{۱۴} Modulation Transfer Function-Generalized Laplacian Pyramid
- ^{۱۵} MTF-GLP-Context-Based Decision
- ^{۱۶} MTF-GLP with High-Pass Modulation model
- ^{۱۷} GLP with MTF-adjusted filter and Spectral Distortion Minimization
- ^{۱۸} Substitutive Wavelet Intensity
- ^{۱۹} Additive Wavelet Intensity
- ^{۲۰} Additive Wavelet Luminance Proportional
- ^{۲۱} Weighted Wavelet Intensity

^{۲۲} Substitutive Wavelet Principal Component

^{۲۳} Additive Wavelet Principal Component

۴- نتایج پیاده سازی

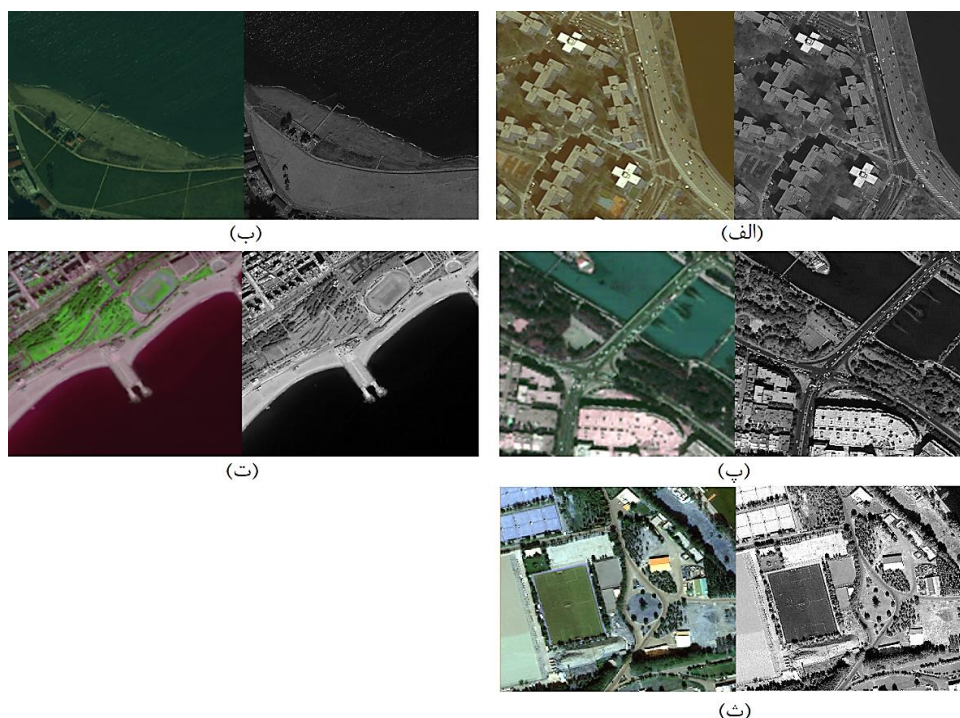
برای بررسی قابلیت استراتژی ارزیابی کیفیت طیفی شیء مبنای پیشنهاد شده از پنج مجموعه داده ماهواره‌ای حاوی تصاویر چند طیفی و پانکروماتیک استفاده شده است که به ترتیب در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. اطلاعات مربوط به این تصاویر نیز در جدول ۱ ارائه شده است.

۴-۱- ارزیابی شیء مبنای کیفیت طیفی

برای نمایش محدودیت های استراتژی پیکسل مبنا از مجموعه داده سانفرانسیسکو استفاده شده است. تصویر ادغامی تولید شده از روش ادغام BDS در شکل ۴-الف نشان داده شده است. شکل ۴-ب نتایج حاصل از قطعه بندی را نشان می‌دهد که در آن ۲۳۸ قطعه استخراج شده است. نتیجه فرایند طبقه بندی نیز در شکل ۴-پ قابل ملاحظه است. هر یک از اشیاء تصویری متعلق به یکی از هفت کلاس چمن، درخت، آب، جاده، خاک، شن و ساختمان هستند. در مرحله بعد، مرز اشیاء استخراج و بر روی تصویر چند طیفی نگاشته شده است. سپس مختصات مرزها در سیستم مختصات تصویری (شکل ۴-ت) تعیین شده است. با انجام این عمل تمامی پیکسل‌های داخل و خارج از شیء قابل تشخیص هستند. به عنوان مثال در شکل ۴-ث تمام پیکسل‌های متعلق به کلاس چمن با

رنگ قرمز و پیکسل‌های خارج از آن با رنگ آبی نشان داده شده‌اند. در ادامه متریک SAM به تصاویر چند طیفی و ادغامی اعمال شده است.

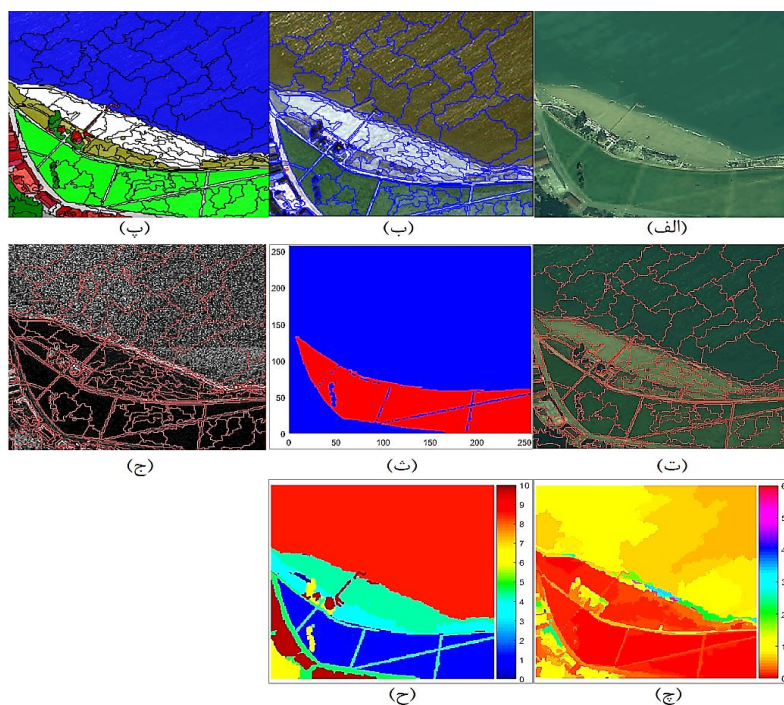
نمایشی از مقادیر SAM برای پیکسل‌های مربوط به تصاویر چند طیفی و ادغامی در شکل ۴-ج نشان داده شده است. بر اساس استراتژی ارزیابی شیء مبنا و طبق مطالبی که قبلاً نیز توضیح داده شده بود، خروجی‌های ارزیابی کیفیت طیفی برای قطعات و کلاس‌های تصویری به ترتیب در شکل‌های ۴-چ و ۴-ح نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که مقادیر شاخص طیفی برای قطعات متعلق به کلاس‌های مختلف به طور قابل ملاحظه‌ای متفاوت هستند (شکل ۵-الف)، در حالی که این تفاوت برای قطعات عضو یک کلاس نسبتاً کم‌تر است (شکل ۵-ب). شاخص‌های آماری جدول ۲ نیز این مدعا را تایید می‌کنند (به تفاوت بین شاخص‌های آماری کمینه و بیشینه و میزان واریانس یا انحرافات استاندارد توجه شود). علاوه بر این، با توجه به شکل ۵-پ ضعف استراتژی پیکسل مبنا بار دیگر نشان داده شده است، از آنجایی که مقدار میانگینی (خط چین قرمز) که بر اساس روش پیکسل مبنا به دست آمده متفاوت از مقادیر شاخص‌های اختصاص داده شده به ۲۳۸ قطعه تصویری است.



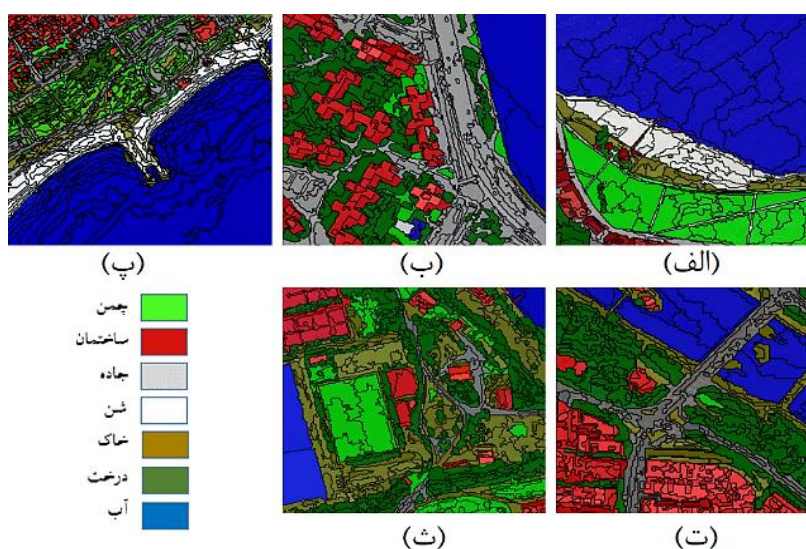
شکل ۳- تصاویر چند طیفی و پانکروماتیک از پنج مجموعه داده: (الف) سانفرانسیسکو، (ب) نیویورک، (پ) بارسلونا، (ت) اصفهان، (ث) تهران

جدول ۱- اطلاعاتی پیرامون مجموعه داده‌های مورد استفاده

مورد	سنجنده	مکان	قدرت تفکیک مکانی (پانکروماتیک - چند طیفی)	باند های طیفی
الف	QuickBird	سانفرانسیسکو	۲/۴-۰/۶ متر	blue, green, red and NIR
ب	WorldView-4	نیویورک	۱/۲-۰/۳ متر	red, green, blue and NIR
پ	Deimos-2	بارسلونا	۴-۱ متر	blue, green, red and NIR
ت	QuickBird	اصفهان	۲/۴-۰/۶ متر	blue, green, red and NIR
ث	WorldView-3	تهران	۱/۲۴-۰/۳ متر	red, red edge, coastal, blue, green, yellow, NIR-1 and NIR-2



شکل ۴- روش ارزیابی کیفیت طیفی شیء مبنا: (الف) خروجی روش ادغام BDSD، (ب) تصویر قطعه بندی شده، (پ) تصویر طبقه بندی شده، (ت) مرز اشیاء در سیستم مختصات تصویری، (ث) پیکسل‌های داخل (قرمز) و خارج (آبی) یک کلاس مشخص، (ج) مرز اشیاء بر روی تصویر شاخص SAM، (چ) نقشه کیفیت طیفی برای قطعات تصویری، (ح) نقشه کیفیت طیفی برای کلاس‌های تصویری

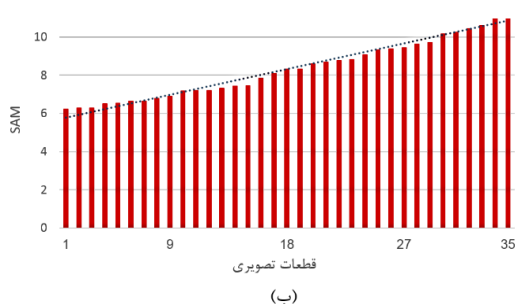


شکل ۵- تجزیه و تحلیل رفتار طیفی پیکسل‌ها: (الف) مقادیر SAM متفاوت در کلاس‌های مختلف، (ب) مقادیر SAM مشابه برای قطعات عضو یک کلاس خاص (کلاس آب)، (پ) اختلاف بین مقدار میانگین (۵/۹۲)، حاصل از استراتژی پیکسل مبنا و نمایش داده شده با خط چین قرمز رنگ، و مقادیر شاخص برای ۲۳۸ قطعه تصویری

جدول ۲- شاخص‌های آماری مربوط به شکل ۵

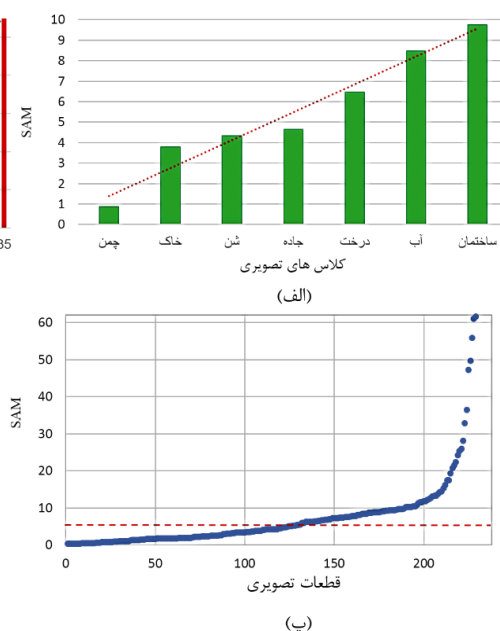
مورد	کمینه	بیشینه	میانگین	واریانس	انحراف معیار
شکل ۵-الف	۰/۸۷۱۶	۹/۷۴۱۲	۵/۴۷۵۳	۹/۰۲۷۶	۳/۰۰۴۶
شکل ۵-ب	۶/۲۱۰۷	۱۱/۵۷۷۱	۸/۳۱۹۰	۲/۴۱۷۶	۱/۵۵۴۷

نیویورک شامل هفت کلاس چمن، درخت، آب، جاده، خاک، شن و ساختمان می‌باشند ولی مجموعه داده‌های تهران و اصفهان فاقد پوشش شن و ماسه بوده و لذا برای رفع این کمبود از دو برش مربعی از منطقه‌ای ساحلی در مجموعه داده‌های بارسلونا و سانفرانسیسکو استفاده شده است. نتایج حاصل از فرایند قطعه بندی و طبقه بندی پنج تصویر چند طیفی در شکل ۶ نشان داده شده است.



۲-۴- بررسی رفتار طیفی الگوریتم‌های ادغام در کلاس‌های مختلف

در بخش دیگری از طرح پیشنهادی ایده ارزیابی کیفیت شیء مبنا بر روی نتایج ۲۹ الگوریتم ادغام با استفاده از شاخص بهینه SAM پیاده سازی شده است. در این مورد از پنج تصویر ماهواره‌ای که در شکل ۳ نشان داده شده بود استفاده شده است. توجه داشته باشید که سه مورد از مجموعه داده‌های بارسلونا، سانفرانسیسکو و



شکل ۶- نتایج قطعه بندی و طبقه بندی پنج مجموعه داده مورد بحث: (الف) سانفرانسیسکو، (ب) نیویورک، (پ) بارسلونا، (ت) اصفهان، (ث) تهران

بنابراین تعیین تنها یک روش ادغام با بهترین عملکرد طیفی برای هر کلاس امکان پذیر نیست. از این رو با استفاده از میانگین گیری تلاش می‌گردد الگوریتم ادغام مطلوب در هر کلاس تعیین گردد. بر اساس نتایج مجموعه داده‌های سانفرانسیسکو، نیویورک، بارسلونا و تهران MF-HG بهترین روش در کلاس چمن تعیین شده است؛ الگوریتم Brovey بهترین عملکرد را در پوشش‌های درخت و شن داشته است؛ MMP نیز موفق‌ترین تکنیک ادغام از لحاظ کیفیت طیفی در کلاس‌های آب و ساختمان بوده است؛ NIHS بهترین الگوریتم در کلاس جاده، و Indusion نیز الگوریتم برتر در کلاس خاک شناخته شده‌اند. مجموعه

عملیات طبقه بندی با دقت کلی $90/92\%$ ، $85/68\%$ ، $82/01\%$ ، $86/49\%$ و $85/02\%$ به ترتیب برای مجموعه‌های سانفرانسیسکو، نیویورک، بارسلونا، اصفهان و تهران انجام شده است. نتایج حاصل از ارزیابی کیفیت طیفی کمی ۲۹ الگوریتم ادغام در هفت کلاس مورد بررسی قرار گرفته است و بهترین روش‌های ادغام در هر کلاس در جدول ۳ آورده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان دریافت که رفتار طیفی روش‌های ادغام در کلاس‌های مختلف از قاعده مشخصی تبعیت نمی‌کند.

۱ Overall Accuracy

است که بین نتایج مجموعه اصفهان و نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آماری ۵۸ درصد انطباق وجود دارد.

داده اصفهان نیز برای اعتبار سنجی این نتایج آماری مورد استفاده قرار گرفته است. با مقایسه نتایج ملاحظه شده

جدول ۳- روش‌های برتر از لحاظ عملکرد طیفی در هر کلاس

کلاس	مجموعه داده				
	سانفرانسیسکو	نیویورک	بارسلونا	تهران	اصفهان
چمن	Indusion	SWMS	Indusion	Brovey	SFIM
درخت	Contrast Pyramid	Indusion	Indusion	HCS	Brovey
آب	MMP	MMP	SFIM	AWLP	MMP
جاده	SWMS	Gram-Scmidth	Indusion	AWLP	Gram-Scmidth
خاک	Brovey	MMP	Nonlinear IHS	IGIHS	Nonlinear IHS
شن	SWMS	Indusion	Brovey	Indusion	Brovey
ساختمان	MMP	Gram-Scmidth	PCA	HCS	PRACS/MMP

۵- بحث و نتیجه گیری

در این مقاله اشکالاتی از استراتژی ارزیابی کیفیت طیفی پیکسل مبنا مورد بحث و بررسی قرار گرفت و به جای آن روش شیء مبنایی پیشنهاد و پیاده سازی شده است. استراتژی پیشنهادی دارای سه مرحله اصلی می-باشد. در گام اول از میان شاخص‌های طیفی مختلف یک شاخص بهینه تعیین شده است. در مرحله دوم استراتژی ارزیابی کیفیت شیء مبنای پیشنهادی مورد بحث و پیاده سازی قرار گرفت و با استفاده از یک روش ادغام، یک مجموعه داده و شاخص طیفی بهینه پیاده سازی شده است. استراتژی پیشنهادی بر این واقعیت استوار است که پیکسل‌های یک تصویر با رفتار طیفی و بافتی مشابه پاسخ مشابهی به عملکرد توابع ادغام دارند. در نتیجه در روش پیشنهادی کیفیت خروجی فرایند ادغام به طور جداگانه برای هر یک از کلاس‌های تصویری مورد بررسی قرار گرفته است. در فاز سوم نیز رفتار طیفی انواع روش‌های ادغام در کلاس‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته و نتایج بررسی بطور خلاصه بیان شده است.

در مرحله اول معیارهای طیفی بهینه بر اساس نتایج تحقیقات قبلی تعدادی از نویسندگان مقاله پیش رو که به بررسی رفتار شاخص‌های ارزیابی کیفیت نسبت به خطای هم مرجع بودن تصاویر ورودی ادغام پرداخته است تعیین شده است. بر اساس نتایج تحقیقات متریک SAM به عنوان معیار بهینه‌ای انتخاب و در تمامی مراحل پردازشی بعدی مورد استفاده قرار گرفته است. در گام بعدی قطعات تصویری ابتدا با فرایند قطعه بندی چند مقیاسی استخراج

و سپس از طریق فرایند طبقه بندی KNN برچسب گذاری شده‌اند. پس از آن، ارزیابی کیفیت طیفی شیء مبنا با استفاده از اعمال شاخص SAM به تصاویر چند طیفی و ادغامی (مطابق پروتکل Wald) و با میانگین گیری از مقدار SAM در محدوده قطعات همگن و کلاس-های تصویر انجام شده است. در مرحله سوم نیز کیفیت طیفی نتایج ۲۹ الگوریتم ادغام مورد بررسی قرار گرفته است (با استفاده از پنج مجموعه داده چند طیفی و پانکروماتیک شامل هفت کلاس آب، چمن، درخت، خاک، شن و ماسه، جاده و ساختمان) تا مشخص گردد که آیا امکان یافتن یک قاعده کلی برای رفتار طیفی توابع ادغام در کلاس‌های مختلف وجود دارد؟ با بررسی دقیق نتایج به دست آمده ملاحظه گردید که چنین امکانی وجود ندارد.

در نهایت بر اساس نتایج شاخص SAM در هفت کلاس از مجموعه داده‌های مذکور، بهترین روش ادغام در هر کلاس تصویری تعیین و معرفی گردیده است. نتایج به دست آمده عبارتند از MF-HG در کلاس چمن، Brovey در پوشش درخت و شن، MMP در کلاس‌های آب و ساختمان، IHS غیر خطی در کلاس جاده و Indusion در کلاس خاک.

نکته جالب توجه این است که اکثر روش‌های برتر جدول ۳ جزء روش‌های مبتنی بر جایگزینی مولفه^۱ بوده که نسبت به روش‌های مبتنی بر آنالیز چندمقیاسی^۲ و ترکیبی^۳ [۳۸] سرعت محاسباتی بالاتری داشته‌اند لذا این گونه روش‌ها در عین اینکه کیفیت طیفی را به خوبی

^۱ Component Substitution (CS)

^۲ Multi-resolution Analysis (MRA)

^۳ Hybrid

حفظ می‌کنند زمان محاسباتی و پیچیدگی الگوریتمی پایینی نیز دارند بطوریکه این موضوع می‌تواند بیش از پیش بر ارزش آن‌ها بیفزاید. نتایج این مقاله امکانی را برای محققان مرتبط با این مقاله اعم از محققان حوزه سنجش از دور، پردازش تصاویر

و... فراهم خواهد کرد تا بتوانند با نگاهی واقع گرایانه نسبت به رفتار طیفی الگوریتم‌های ادغام در داده‌های ماهواره‌ای مختلف به انتخاب الگوریتم ادغام متناسب با تصاویر ماهواره‌ای مورد نظر خود اقدام نمایند.

مراجع

- [1] DadrasJavan, F., & Samadzadegan, F. (2014). An object-level strategy for pan-sharpening quality assessment of high-resolution satellite imagery. *Advances in Space Research*, 54(11), 2286-2295.
- [2] Vivone, G., Alparone, L., Chanussot, J., Dalla Mura, M., Garzelli, A., Licciardi, G. A., ... & Wald, L. (2015). A critical comparison among pansharpening algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(5), 2565-2586.
- [3] Snehmani, Gore, A., Ganju, A., Kumar, S., & Srivastava, P. K. (2017). A comparative analysis of pansharpening techniques on QuickBird and WorldView-3 images. *Geocarto International*, 32(11), 1268-1284.
- [4] Piella, G., & Heijmans, H. (2003, September). A new quality metric for image fusion. In *Proceedings 2003 International Conference on Image Processing* (Cat. No. 03CH37429) (Vol. 3, pp. III-173). IEEE.
- [5] Wald, L. (2000, January). Quality of high resolution synthesised images: Is there a simple criterion?. In *Third conference" Fusion of Earth data: merging point measurements, raster maps and remotely sensed images"*(pp. 99-103). SEE/URISCA.
- [6] Klonus, S., & Ehlers, M. (2009, July). Performance of evaluation methods in image fusion. In *2009 12th International Conference on Information Fusion* (pp. 1409-1416). IEEE.
- [7] Zhang, Y. (2008). Methods for image fusion quality assessment—a review, comparison and analysis. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(PART B7), 1101-1109.
- [8] Shi, W., Zhu, C., Tian, Y., & Nichol, J. (2005). Wavelet-based image fusion and quality assessment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 6(3-4), 241-251.
- [9] Alparone, L., Wald, L., Chanussot, J., Thomas, C., Gamba, P., & Bruce, L. M. (2007). Comparison of pansharpening algorithms: Outcome of the 2006 GRS-S data-fusion contest. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(10), 3012-3021.
- [10] Blasch, E., Li, X., Chen, G., & Li, W. (2008, June). Image quality assessment for performance evaluation of image fusion. In *2008 11th International Conference on Information Fusion* (pp. 1-6). IEEE.
- [11] Chen, Y., & Blum, R. S. (2005, July). Experimental tests of image fusion for night vision. In *2005 7th International Conference on Information Fusion* (Vol. 1, pp. 8-pp). IEEE.
- [12] Fonseca, L., Namikawa, L., Castejon, E., Carvalho, L., Pinho, C., & Pagamisse, A. (2011). Image fusion for remote sensing applications. In *Image fusion and its applications*. IntechOpen.
- [13] Jagalingam, P., & Hegde, A. V. (2015). A review of quality metrics for fused image. *Aquatic Procedia*, 4, 133-142.
- [14] Samadzadegan, F., & Javan, F. D. (2011). New Object Level Strategy for Image Fusion Quality Assessment of High Resolution Satellite Imagery. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, 2011(3), 123-133.
- [15] Xydeas, C. A., & Petrovic, V. (2000). Objective image fusion performance measure. *Electronics letters*, 36(4), 308-309.
- [16] Javan, F., Samadzadegan, F., & Reinartz, P. (2013). Spatial quality assessment of pan-sharpened high resolution satellite imagery based on an automatically estimated edge based metric. *Remote Sensing*, 5(12), 6539-6559.
- [17] Bunttilov, V., & Bretschneider, T. (2004, September). Objective content-dependent quality measures for image fusion of optical data. In *IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (Vol. 1). IEEE.
- [18] Hasanlou, M., & Saradjian, M. R. (2016). Quality assessment of pan-sharpening methods in high-resolution satellite images using radiometric and geometric index. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(1), 45.

- [19] Rodríguez-Esparragón, D., Marcello, J., Eugenio, F., García-Pedrero, A., & Gonzalo-Martín, C. (2017). Object-based quality evaluation procedure for fused remote sensing imagery. *Neurocomputing*, 255, 40-51.
- [20] Samadzadegan, F., & DadrasJavan, F. (2011). Evaluating the sensitivity of image fusion quality metrics to image degradation in satellite imagery. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 39(4), 431-441.
- [21] Zhu, X. X., & Bamler, R. (2013). A sparse image fusion algorithm with application to pan-sharpening. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 51(5), 2827-2836.
- [22] Alimuddin, I., Sumantyo, J. T. S., & Kuze, H. (2012). Assessment of pan-sharpening methods applied to image fusion of remotely sensed multi-band data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18, 165-175.
- [23] DadrasJavan, F., Samadzadegan, F., Fathollahi, F. (2018). Spectral and Spatial Quality assessment of IHS and Wavelet Based Pan-sharpening Techniques for High Resolution Satellite Imagery. *Advances in Image and Video Processing*, 6(2), 01. DOI: <http://dx.doi.org/10.14738/aivp.62.4226>.
- [24] Ghahremani, M., & Ghassemian, H. (2016). Nonlinear IHS: A promising method for pan-sharpening. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 13(11), 1606-1610.
- [25] Kang, X., Li, S., & Benediktsson, J. A. (2014). Pansharpening with matting model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(8), 5088-5099.
- [26] Seetha, M., MuraliKrishna, I. V., & Deekshatulu, B. L. (2008). Content Dependent Quality Measures for Image Fusion. *International Journal of Geoinformatics*, 4(1).
- [27] Samadzadegan, F., & Javan, F. D. (2011). New Object Level Strategy for Image Fusion Quality Assessment of High Resolution Satellite Imagery. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, 2011(3), 123-133.
- [28] Meng, X., Shen, H., Li, H., Zhang, L., & Fu, R. (2019). Review of the pansharpening methods for remote sensing images based on the idea of meta-analysis: practical discussion and challenges. *Information Fusion*, 46, 102-113.
- [29] eCognition Developer, T. (2014). 9.0 User Guide. Trimble Germany GmbH: Munich, Germany.
- [30] Benz, U. C., Hofmann, P., Willhauck, G., Lingenfelder, I., & Heynen, M. (2004). Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 58(3-4), 239-258.
- [31] Tobler, W. R. (1970). A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic geography*, 46(sup1), 234-240.
- [32] Mucherino, A., Papajorgji, P. J., & Pardalos, P. M. (2009). K-nearest neighbor classification. In *Data mining in agriculture*(pp. 83-106). Springer, New York, NY.
- [33] Zeng, D., Hu, Y., Huang, Y., Xu, Z., & Ding, X. (2016). Pan-sharpening with structural consistency and ℓ_1/ℓ_2 gradient prior. *Remote sensing letters*, 7(12), 1170-1179.
- [34] Restaino, R., Vivone, G., Dalla Mura, M., & Chanussot, J. (2016). Fusion of multispectral and panchromatic images based on morphological operators. *IEEE Transactions on Image Processing*, 25(6), 2882-2895.
- [35] Dou, W. (2018). Image Degradation for Quality Assessment of Pan-Sharpning Methods. *Remote Sensing*, 10(1), 154.
- [36] Duran, J., Buades, A., Coll, B., Sbert, C., & Blanchet, G. (2017). A survey of pansharpening methods with a new band-decoupled variational model. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 125, 78-105.
- [37] Ranchin, T., & Wald, L. (2000). Fusion of high spatial and spectral resolution images: the ARSIS concept and its implementation. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 66(1), 49-61.
- [38] Ghassemian, H. (2016). A review of remote sensing image fusion methods. *Information Fusion*, 32, 75-89.
- [39] Mandhare, R. A., Upadhyay, P., & Gupta, S. (2013). Pixel-level image fusion using brovey transform and wavelet transform. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2(6), 2690-2695.
- [40] Zhang, Y., & Hong, G. (2005). An IHS and wavelet integrated approach to improve pan-sharpening visual quality of natural colour IKONOS and QuickBird images. *Information Fusion*, 6(3), 225-234.
- [41] Choi, J., Yu, K., & Kim, Y. (2011). A new adaptive component-substitution-based satellite image fusion by using partial replacement. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(1), 295-309.
- [42] Xu, J., Guan, Z., & Liu, J. (2008). An improved IHS fusion method for merging multi-spectral and panchromatic images considering sensor spectral response. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci*, 37, 1169-1174.

- [43] Wald, L., & Ranchin, T. (2002). Liu'Smoothing filter-based intensity modulation: A spectral preserve image fusion technique for improving spatial details'. *International Journal of Remote Sensing*, 23(3), 593-597.
- [44] Khan, M. M., Chanussot, J., Condat, L., & Montanvert, A. (2008). Indusion: Fusion of multispectral and panchromatic images using the induction scaling technique. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 5(1), 98-102.
- [45] Garzelli, A., Nencini, F., & Capobianco, L. (2008). Optimal MMSE pan sharpening of very high resolution multispectral images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(1), 228-236.
- [46] Choi, J., Yu, K., & Kim, Y. (2011). A new adaptive component-substitution-based satellite image fusion by using partial replacement. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(1), 295-309.
- [47] Chavez, P., Sides, S. C., & Anderson, J. A. (1991). Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data- Landsat TM and SPOT panchromatic. *Photogrammetric Engineering and remote sensing*, 57(3), 295-303.
- [48] Padwick, C., Deskevich, M., Pacifici, F., & Smallwood, S. (2010, April). WorldView-2 pan-sharpening. In *Proceedings of the ASPRS 2010 Annual Conference, San Diego, CA, USA*(Vol. 2630).
- [49] Kim, Y., Lee, C., Han, D., Kim, Y., & Kim, Y. (2011). Improved additive-wavelet image fusion. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8(2), 263-267.
- [50] Amolins, K., Zhang, Y., & Dare, P. (2007). Wavelet based image fusion techniques—An introduction, review and comparison. *ISPRS Journal of photogrammetry and Remote Sensing*, 62(4), 249-263.
- [51] Zhang, X., & Han, J. I. U. Q. I. A. N. G. (2004). Multiscale contrast image fusion scheme with performance measures. *Optica Applicata*, 34(3), 453-461.
- [52] Aiazzi, B., Alparone, L., Baronti, S., Garzelli, A., & Selva, M. (2003, May). An MTF-based spectral distortion minimizing model for pan-sharpening of very high resolution multispectral images of urban areas. In *2003 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas* (pp. 90-94). IEEE.
- [53] González-Audícana, M., Saleta, J. L., Catalán, R. G., & García, R. (2004). Fusion of multispectral and panchromatic images using improved IHS and PCA mergers based on wavelet decomposition. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*, 42(6), 1291-1299.
- [54] Nunez, J., Otazu, X., Fors, O., Prades, A., Pala, V., & Arbiol, R. (1999). Multiresolution-based image fusion with additive wavelet decomposition. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*, 37(3), 1204-1211.
- [55] González-Audícana, M., Otazu, X., Fors, O., & Seco, A. (2005). Comparison between Mallat's and the 'à trous' discrete wavelet transform based algorithms for the fusion of multispectral and panchromatic images. *International Journal of Remote Sensing*, 26(3), 595-614