



سخن از دور

و

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS
سال سوم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۰
Vol.3, No.2, Summer 2011
۹۷-۱۱۴

بهبود صحت آشکارسازی طیفی بام ساختمان‌ها از طریق تلفیق هوشمند روش‌های تشخیص هدف در تصاویر فراتطیفی

داود اکبری*^۱، سعید همایونی^۲، محمد سعادت سرشت^۳

۱. دانشجوی دکتری سنجش از دور، گروه مهندسی نقشه‌برداری، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
۲. استادیار سنجش از دور، گروه مهندسی نقشه‌برداری، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
۳. استادیار فتوگرامتری، گروه مهندسی نقشه‌برداری، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۰/۱۲/۲۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۲/۱

چکیده

پیچیدگی و حجم سنگین داده‌های حاصل از سنجنده‌های فراتطیفی باعث شده است که امروزه روش‌های هرچه پیشرفته‌تر آنالیز داده‌های فراتطیفی به منظور استخراج اطلاعات دقیق‌تر و کامل‌تر از آنها مورد توجه قرار گیرند. یکی از آنالیزهایی که بر روی تصاویر فراتطیفی انجام می‌شود، آشکارسازی طیفی هدف است. در این مقاله به منظور بررسی روش‌های آشکارسازی طیفی هدف و امکان‌سنجی بهبود آنها، جمعاً چهارده الگوریتم در قالب سه دسته اندازه‌گیری‌های قطعی، اندازه‌گیری‌های آماری و آشکارسازی آنامولی پیاده‌سازی شده است. سپس تصاویر حاصل از بهترین الگوریتم‌ها در هر دسته انتخاب شده و به روش‌های مختلف در دو مرحله با یکدیگر تلفیق گردیده‌اند تا تصویر تلفیقی بهینه‌ای با بالاترین صحت به‌دست آید. در بررسی‌های انجام شده در زمینه دسته الگوریتم‌های آشکارسازی مذکور، مشخص گردید که به ترتیب دو الگوریتم SCS (Spectral Correlation Similarity) و SAM (Spectral Angle Measure)، دو الگوریتم (Information Covariance-based Matched Filter) و JMD (Jeffries-Matusita Distance) و سه الگوریتم RMFM (Correlation-based Matched Filter Measure) و CEM (Constrained Energy minimizing)، CMFM (Measure of Spectral Divergence) و SID (Spectral Divergence) در این مقاله به‌منظور تلفیق نتایج آشکارسازی، دو روش باینری - شامل عملگر بولی و فاصله اقلیدسی - و نیز دو روش استنتاج فازی شامل دستی FIS (Fuzzy Inference System) و اتوماتیک ((ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference) - پیاده‌سازی شده است.

آزمون‌های انجام گرفته بر روی تصویری از سنجنده فراتطیفی CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager) از منطقه شهری تولوز واقع در جنوب فرانسه برای آشکارسازی بام ساختمان‌ها، نشان داد که در بین چهار روش تلفیق یاد شده، روش ANFIS به عنوان روشی هوشمند و خودکار، پس از اعمال روی نتایج هفت الگوریتم آشکارسازی طیفی مذکور، توانسته است به بالاترین صحت با ضریب کاپای ۰/۹ دست یابد.

کلیدواژه‌ها: تصاویر فراتطیفی، الگوریتم‌های آشکارسازی، سیستم استنتاج فازی، منحنی ROC، ماتریس خطا.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: سیستان و بلوچستان، زابل، پردیس جدید دانشگاه زابل، دانشکده فنی و مهندسی، گروه نقشه‌برداری، تلفن: ۰۹۱۵۵۶۱۹۷۹۹

۱- مقدمه

طیفی^۳ و فضای ویژگی^۴. در این زمینه، بسته به اینکه از کدام فضای محاسباتی استفاده شود، الگوریتم‌های مختلف محاسباتی به منظور استخراج اطلاعات از این داده‌ها به کار گرفته می‌شود (Landgrebe, 1999).

یکی از آنالیزهایی که بر روی تصاویر فراطیفی انجام می‌گیرد، آشکارسازی طیفی هدف است. در این مقاله به آشکارسازی ساختمان‌ها در محیطی شهری - به‌عنوان هدف - از طریق یک سری تصویر فراطیفی پرداخته شده است. از آنجا که محیط شهری دارای ویژگی‌های پیچیده‌ای از جنبه‌های فیزیکی و هندسی و عناصر به کار گرفته شده در ساختمان‌هاست، داده‌های فراطیفی کمک مؤثری به شناسایی و استخراج و تولید نقشه از عناصر سازنده محیط شهری می‌کنند. شناسایی مواد ساختمان‌ها در محیط‌های شهری اهمیت زیادی در کاربردهای گوناگون دارد، که از آن جمله‌اند: ارتباطات تلفن‌های همراه، واقعیت مجازی، معماری و مدل‌سازی شهری، و برنامه‌ریزی و مدیریت شهرها.

از دو دهه پیش تاکنون تحقیقات مستمر و متعددی در خصوص آشکارسازی طیفی هدف صورت پذیرفته است. چانگ به همراه هینز در سال ۲۰۰۰ به بررسی سه الگوریتم آشکارسازی طیفی بر روی تصاویر AVIRIS پرداخت (Chang, 2000). چانگ در سال ۲۰۰۲ نیز روش‌های فاصله (موسوم به) مهالانوبیس^۵ و فاصله فیلتر انطباقی^۶ را به عنوان روش‌های آشکارسازی آنامولی^۷ مطرح ساخت و آنها را بر روی تصاویر فراطیفی AVIRIS پیاده‌سازی کرد (Chang, 2002). در همین سال باکر با استفاده از الگوریتم‌های فاصله طیفی^۸ و زاویه طیفی (SAM) به آشکارسازی لبه‌ها بر روی تصویر فراطیفی HYMAP پرداخت (Bakker, 2002).

فناوری سنجش از دور طیفی، در دو دهه گذشته با پیشرفت گسترده‌ای همراه بوده است. این پیشرفت در طراحی و ساخت سنجنده‌ها و همچنین در توسعه و پیاده‌سازی روش‌های پردازش داده‌ها بسیار مشهود بوده است (Varshney, 2004). در تصاویر فراطیفی صدها باند طیفی متوالی ثبت شده‌اند و بنابراین حجم داده طیفی جمع‌آوری شده بسیار زیاد است. به دلیل حساسیت بالای سنجنده‌های فراطیفی، معمولاً سیگنال‌های ناشناخته زیادی در تصاویر ثبت می‌شوند که هیچ‌گونه اطلاعات قبلی درباره آنها وجود ندارد؛ به‌خصوص اینکه بسیاری از این سیگنال‌ها مربوط به عوارضی هستند که ابعادی کوچک‌تر از ابعاد یک پیکسل دارند و نمی‌توان آنها را به شیوه دیداری شناسایی کرد. در این شرایط شناسایی این عوارض با روش‌های رایج آشکارسازی مبتنی بر پیکسل، امکان‌پذیر نیست و پردازش‌ها باید در سطح زیرپیکسل و به کمک ویژگی‌های طیفی عوارض انجام گیرد (Change, 2003). با آنکه توانایی تولید داده‌هایی با خصوصیات طیفی و مکانی و رادیومتریکی بالا منجر به تجزیه و تحلیل بهتر و شناسایی موفقیت‌آمیز عوارض زمینی می‌شود، ولی مشکلاتی نیز پدید می‌آید که در مقایسه با داده‌های چندطیفی تجربه جدیدی است. نخستین مشکل حجم نسبتاً زیاد این داده‌هاست. این حجم انبوه داده‌ها نیازمند سخت‌افزارها و نرم‌افزارهای ویژه‌ای برای پردازش است. زمان مورد نیاز برای پردازش این نوع داده‌ها را می‌توان جزو دیگر مشکلات در این زمینه برشمرد (Homayouni, 2003).

روش‌هایی که در پردازش داده‌های فراطیفی استفاده می‌شوند، همگی جزو گروه‌های مختلف روش‌های شناسایی الگو^۱ قرار می‌گیرند بر این اساس و با توجه به سطح دانش به کار رفته، می‌توان به روش‌هایی از این دست اشاره کرد: کشف، طبقه‌بندی، شناسایی و تفکیک اشیا. فضاهای بازنمایی این داده‌ها برای محاسبات عبارت‌اند از فضای تصویر^۲، فضای

1. Pattern Recognition
2. Image Space
3. Spectral Space
4. Feature Space
5. Mahalanobis Distance
6. Matched Filter Distance
7. Anomaly Detection
8. Spectral Distance Measures

هدف اصلی این مقاله، تلفیق نتایج الگوریتم‌های مختلف آشکارسازی طیفی هدف به‌منظور بهبود صحت آشکارسازی بوده است.

بدین منظور روش‌های متعددی در این مقاله پیاده‌سازی شده است که آنها را می‌توان به سه دسته اندازه‌گیری‌های قطعی^۴، اندازه‌گیری‌های آماری^۵ و آشکارسازی آنامولی تقسیم‌بندی کرد. به دو دسته نخست، الگوریتم‌های هم‌یابی طیفی^۶ نیز می‌گویند که در آنها با استفاده از حداقل اطلاعات مربوط به عارضه مورد شناسایی، یک معیار شباهت نیز بین بردار مرجع و تک تک پیکسل‌های تصویر تعریف می‌شود. در دسته اندازه‌گیری‌های قطعی از روش‌های اندازه‌گیری فاصله و زاویه طیفی و همبستگی طیفی و مقدار تشابه طیفی^۷ استفاده شده؛ و در دسته اندازه‌گیری‌های آماری نیز روش‌های واگرایی اطلاعات طیفی و فاصله Jeffries-Matusita به کار رفته است. همچنین در دسته آشکارسازی آنامولی از روش‌های کمینه‌سازی مقید انرژی، فاصله Mahalanobis، فاصله فیلتر انطباقی مبتنی بر ماتریس کواریانس و کورولیشن و طبقه‌بندی حداکثر احتمال استفاده شده است. از آنجا که هر یک از این روش‌ها دارای نقاط قوت و ضعف خاص خود هستند.

در این مقاله به‌منظور حفظ نقاط قوت آنها و رفع نقاط ضعف‌شان، روش‌های مناسب در هر دسته انتخاب شده و با هم تلفیق گشته‌اند.

نکته در خور اهمیت در اینجا آن است که علاوه بر روش‌های آشکارسازی طیفی انتخابی، روش تلفیق آنها نیز در کسب نتیجه نهایی بهینه و کیفیت خروجی مؤثر است. از این رو تلفیق روش‌های آشکارسازی طیفی به

همایونی و روکس در سال ۲۰۰۳ سه روش آشکارسازی طیفی زاویه، همبستگی طیفی (SCS) و کمینه‌سازی مقید انرژی (CEM) را مورد ارزیابی قرار دادند (Homayouni, 2003). در همین سال، لومه پروژه دیگری را به منظور آشکارسازی و طبقه‌بندی پوشش گیاهی با استفاده از الگوریتم‌های زاویه و وابستگی طیفی و حداکثر احتمال^۱ بر روی تصاویر فراطیفی AISA به انجام رساند (Lumme, 2003). تحقیق دیگری نیز در سال ۲۰۰۴ به‌وسیله دو و چانگ بر روی تصویر AVIRIS و با استفاده از الگوریتم‌های زاویه طیفی و واگرایی اطلاعات طیفی (SID) و همچنین ترکیب آنها به‌منظور آشکارسازی طیفی انجام گرفت (Du, 2004). در سال ۲۰۰۶ نگهبانی در پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود بر اساس اهداف full-pixel و یا sub-pixel به بررسی برخی از الگوریتم‌های آشکارسازی هدف پرداخت. وی الگوریتم‌های خود را بر روی تصاویر به‌دست آمده از سنجنده Hymap از منطقه Cuprite در NEVADA برای آشکارسازی مواد معدنی پیاده‌سازی کرد، و منحنی‌های ROC^۲ را به‌منظور ارزیابی عملکرد آشکارسازها مورد استفاده قرار داد. آفری و امامی در سال ۲۰۰۷ با استفاده از دو الگوریتم زاویه طیفی و حداکثر احتمال به آشکارسازی و طبقه‌بندی تصویر AVIRIS مربوط به یک منطقه کشاورزی پرداختند (Emami, 2007).

در تمامی این تحقیقات، روش‌های مختلف آشکارسازی طیفی هدف ایجاد و ارزیابی شده است. مشکلی که در اینجا وجود دارد، خطای جدی در آشکارسازی طیفی هدف بوده است که افراد مختلف کوشیده‌اند با روش‌های گوناگون آشکارسازی، این خطا را کاهش دهند. عواملی نظیر حجم بالای اطلاعات غیرمفید ناشی از نویز سنجنده و اتمسفر، وابستگی طیفی^۳، شرایط ایجاد پیکسل‌های مختلط مانند هم‌پوشانی طیفی پدیده‌های زمینی و ناهمگن بودن بیشتر پدیده‌ها، و در نتیجه افزایش واریانس داخلی هدف موجب افزایش خطای آشکارسازی در تصاویر فراطیفی خواهد شد (Landgrebe, 1999). از این رو،

1. Maximum likelihood classification
2. Receiver Operating Characteristic
3. Spectral Correlation
4. Deterministic Measure
5. Stochastic Measures
6. Spectral Matching
7. Spectral Similarity Value

می‌گیرد و نتایج آنها ارائه می‌گردد. بخش چهارم نیز به بررسی و مقایسه نتایج می‌پردازد و نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای ادامه تحقیق بیان می‌شود.

۲- مبانی نظری روش پیشنهادی

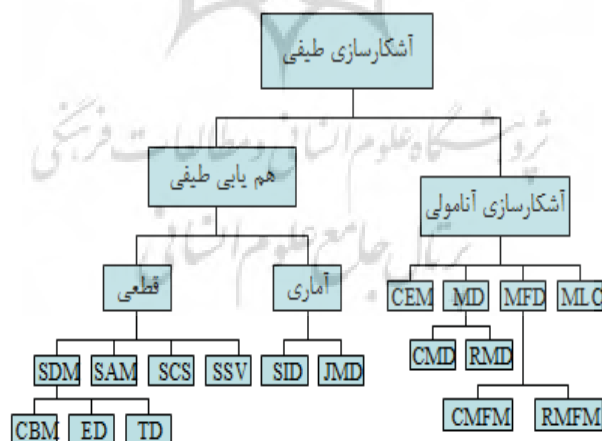
در این بخش، ابتدا مبانی الگوریتم‌های آشکارسازی طیفی مرور می‌شود و سپس روش‌های تلفیق نتایج آشکارسازی همراه با خصوصیات هر یک تشریح می‌گردد. در ادامه کلیات معیار مقایسه و ارزیابی نتایج، که به وسیله ماتریس اغتشاش^۱ و منحنی ROC بر مبنای داده‌های چک ایجاد شده است، تبیین می‌شود.

۲-۱- الگوریتم‌های آشکارسازی طیفی

تاکنون الگوریتم‌های متعددی برای آشکارسازی طیفی ارائه شده است (Chang, 2003). در این تحقیق، با توجه به مشکلات ذکر شده در مورد تصاویر فراطیفی، الگوریتم‌هایی که دارای سادگی و سرعت در تجزیه و تحلیل این نوع داده‌ها هستند، مورد توجه قرار گرفته‌اند (شکل ۱).

چهار روش مختلف شامل عملگر بولی^۱، فاصله اقلیدسی^۲، استنتاج فازی و ANFIS پیاده‌سازی شده است. بدین منظور دو پیکربندی به کار رفته‌اند. در پیکربندی نخست ابتدا روش‌های مناسب در هر دسته از الگوریتم‌های آشکارسازی طیفی انتخاب می‌شوند. سپس این روش‌ها با هم تلفیق می‌گردند تا نتیجه بهینه هر دسته به دست آید. در انتها نتایج دسته‌ها مجدداً با هم تلفیق می‌شوند. روش تلفیق نیز در دو مرحله یک‌سان است. در پیکربندی دوم کلیه روش‌های انتخابی به صورت یکجا و با روش ANFIS با هم تلفیق می‌گردند. علت این امر همانا افزایش سرعت و کارایی و کم کردن دخالت کاربر در فرایند تلفیق با توجه به هوشمند بودن روش تلفیق ANFIS است.

در ادامه، در بخش دوم مقاله مروری می‌شود بر کلیه چهارده الگوریتم آشکارسازی طیفی و چهار روش تلفیق، و خصوصیات کلی آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد. به علاوه، در این بخش معیار مقایسه و ارزیابی نتایج تشریح می‌شود. در بخش سوم، آزمون‌های متعدد طراحی شده برای انتخاب بهترین الگوریتم آشکارسازی طیفی، بهترین روش تلفیق و بهترین پیکربندی انجام



شکل ۱. الگوریتم‌های آشکارسازی طیفی مورد استفاده در تحقیق

1. Boolean Operator
2. Euclidian Operator
3. Confusion Matrix

در این رابطه‌ها s_i و s_j به ترتیب امضای طیفی مربوط به دو بردار پیکسل Γ_i و Γ_j هستند و L تعداد باندهای تصویر است و CBD^2 و ED^2 و TD^2 به ترتیب معرف اندازه‌گیری فاصله در نرم‌های l_1 ، l_2 و l_∞ هستند. در روش فاصله طیفی، برای داشتن تصویری بین صفر تا یک لازم است بعد از پیاده‌سازی روابط لازم، تصویر حاصل نرمالیزه شود، در این حالت اگر فاصله طیفی بین پیکسل هدف و پیکسل مجهول برابر یا نزدیک به صفر باشد، می‌توان این پیکسل را به عنوان عارضه مورد جست‌وجو، شناسایی کرد.

ب) اندازه‌گیری زاویه طیفی (SAM)

این الگوریتم با استفاده از ضرب داخلی و محاسبه زاویه طیفی بین دو بردار منحنی طیفی مرجع و پیکسل تصویر، تشابه بین دو بردار را تعیین می‌کند و بدین صورت محاسبه می‌شود (Yuhas, 1992):

رابطه (۴)

$$SAM = \cos^{-1} (s_i \cdot s_j / \|s_i\| \|s_j\|) = \cos^{-1} (\sum_{l=1}^L s_{il} s_{jl} / [\sum_{l=1}^L s_{il}^2]^{1/2} [\sum_{l=1}^L s_{jl}^2]^{1/2})$$

در این رابطه s_i و s_j به ترتیب امضای طیفی مربوط به دو بردار پیکسل Γ_i و Γ_j هستند و L تعداد باندهای تصویر است. از آنجا که مقدار زاویه طیفی عددی بین صفر تا ۹۰ است، از این رو برای داشتن تصویری در بازه صفر تا یک کافی است تصویر به دست آمده بر عدد ۹۰ تقسیم شود. در این حالت هر چه زاویه بین دو بردار کوچک‌تر باشد (نزدیک به صفر)، نشان‌دهنده تشابه بیشتر این دو بردار است.

الگوریتم‌های انتخابی، به حداقل اطلاعات و دخالت کاربر نیاز دارند، به گونه‌ای که این اطلاعات می‌توانند فقط مختص عارضه مورد نظر باشند و نیازی هم به دانستن اطلاعات از کلیه عوارض موجود در تصویر نیست.

۲-۱-۱- اندازه‌گیری‌های قطعی

ایده اصلی در روش‌های هم‌یابی طیفی، تعریف یک معیار شباهت بین بردار الگو یا مرجع، معرف عارضه مورد شناسایی و تک‌تک پیکسل‌های تصویر است. تا به امروز در تحلیل داده‌های فراطیفی، دو خانواده از معیارها مورد مطالعه و استفاده قرار گرفته‌اند: معیارهای آماری و معیارهای قطعی. در دسته اندازه‌گیری‌های قطعی از روش‌های قطعی مانند فاصله و زاویه، به‌منظور اندازه‌گیری تشابه بین دو بردار استفاده می‌شود (Homayouni, 2003).

الف) اندازه‌گیری فاصله طیفی (SDM)

فاصله بین امضاهای طیفی^۱ مربوط به دو بردار پیکسل، می‌تواند به سه شکل نرم‌های l_1 و l_2 و l_∞ به دست آید، که بدین صورت محاسبه می‌شوند (Chang, 2003):

رابطه (۱)

$$CBD = \sum_{l=1}^L |s_{il} - s_{jl}|$$

رابطه (۲)

$$ED = \|s_i, s_j\| = [\sum_{l=1}^L (s_{il} - s_{jl})^2]^{1/2}$$

رابطه (۳)

$$TD = \max_{1 \leq l \leq L} \{ |s_{il} - s_{jl}| \}$$

1. Spectral Signatures
2. City Block Distance
3. Euclidean Distance
4. Tchebyshev Distance

مانند احتمال و واگرایی (دایورجنس) و بی‌نظمی (آنتروپی)، میزان شباهت بین بردار عارضه مورد نظر و هر پیکسل تصویر تعیین می‌گردد.

الف) دایورجنس اطلاعات طیفی (SID)

SID تشابه طیفی بین دو بردار پیکسل را براساس اختلاف توزیع احتمال به‌دست آمده از امضاهای طیفی آنها، اندازه‌گیری می‌کند. بر این اساس (Chang, 2003):

رابطه (۷)

$$SID = \sum_{l=1}^L p_l \log(p_l / q_l) + \sum_{l=1}^L q_l \log(q_l / p_l)$$

$$p_l = s_{il} / \sum_{k=1}^L s_{ik} \quad q_l = s_{jl} / \sum_{k=1}^L s_{jk}$$

در روابط مذکور، p_l و q_l به ترتیب احتمال مؤلفه طیفی s_{il} و s_{jl} مربوط به دو بردار پیکسل I_i و I_j هستند و L بعد بردار یا تعداد باندهای تصویر است. در این روش، به‌منظور داشتن تصویری در بازه صفر تا یک لازم است مقدار به‌دست آمده نرمالایزه شود.

ب) فاصله Jeffries-Matusita (JMD)

روش آماری دیگر برای تشابه طیفی و آشکارسازی هدف، روش فاصله Jeffries-Matusita است که از این رابطه پیروی می‌کند (Chang, 2003):

رابطه (۸)

$$JMD = \sqrt{\sum_{l=1}^L [\sqrt{p_l} - \sqrt{q_l}]^2}$$

$$p_l = s_{il} / \sum_{k=1}^L s_{ik} \quad q_l = s_{jl} / \sum_{k=1}^L s_{jk}$$

در روابط نوشته شده، p_l و q_l به ترتیب احتمال مؤلفه طیفی s_{il} و s_{jl} مربوط به دو بردار پیکسل I_i و I_j هستند و L بعد بردار است. با نرمالایزه کردن خروجی الگوریتم، می‌توان به تصویری بین صفر تا یک رسید.

ج) تشابه همبستگی طیفی (SCS)

معیار دیگر برای شباهت طیفی، همبستگی پیرسون بین دو بردار است و طبق رابطه‌ای که در پی می‌آید تعریف می‌شود (Homayouni, 2003).

رابطه (۵)

$$SCS = \frac{1}{n-1} \left(\frac{\sum_{l=1}^L (s_{il} - \mu_{s_i})(s_{jl} - \mu_{s_j})}{\sigma_{s_i} \sigma_{s_j}} \right)$$

در این رابطه، μ میانگین و σ انحراف معیار مقادیر بردارهای هدف و پیکسل است و s_{ij} و s_{jl} امضای طیفی مربوط به دو بردار، L تعداد باندهای فراطیفی و n تعداد پیکسل‌های تصویر است. مقادیر همبستگی بین $+1$ و -1 ، محدود شده‌اند، که مقدار همبستگی یک و نزدیک به آن، بیانگر شباهت زیاد بین دو پیکسل است. در روش ذکر شده، برای داشتن تصویری در بازه صفر تا یک مقادیر منفی در نظر گرفته نمی‌شوند.

د) مقدار تشابه طیفی (SSV)

روش اندازه‌گیری مقدار تشابه طیفی، ترکیبی از دو روش تشابه همبستگی و فاصله طیفی در نرم I_4 است و بدین صورت تعریف می‌شود (Homayuni, 2003):

رابطه (۶)

$$SSV = \sqrt{ED^2 + (1 - SCS)^2}$$

هر چه مقدار SSV به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده نزدیکی یا تشابه بین دو بردار پیکسلی است. مقدار SSV در بازه $[0, \sqrt{2}]$ قرار می‌گیرد. از این رو برای داشتن تصویری در بازه صفر تا یک، می‌بایست مقدار SSV را بر $\sqrt{2}$ تقسیم کرد.

۲-۱-۲- اندازه‌گیری‌های آماری

در روش اندازه‌گیری‌های آماری با استفاده از ویژگی‌های تصویر و تعریف برخی از خصوصیات طیفی

۲-۱-۳- آشکارسازی آنامولی

هدف از آشکارسازی آنامولی تعیین موقعیت و جست‌وجو برای عوارضی است که به طور کلی چندان شناخته‌شده نیستند، اما نسبتاً کوچک‌اند، و احتمال رخداد چندانی در تصاویر ندارند. روش‌های مذکور براساس خصوصیات ماتریس کواریانس و یا کورولیشن به آشکارسازی عارضه مورد نظر می‌پردازند.

الف) کمینه‌سازی مقید انرژی (CEM)

در روش کمینه‌سازی مقید انرژی، براساس بردار عارضه مورد نظر d ، فیلتری مثل w طراحی می‌شود که بعد از اعمال آن به داده‌های فراطیفی، تصویری به‌دست می‌آید که در آن پیکسل‌های مشابه عارضه آشکارتر شده‌اند. براین اساس و برطبق روابطی که در پی می‌آیند، مقادیر هر پیکسل در تصویر نهایی محاسبه می‌شوند (Harsanyi, 1993):

رابطه (۹)

$$y_i = \sum_{l=1}^L w_l r_{il} = w^T r_i \quad w = \frac{R_{L \times L}^{-1} d}{d^T R_{L \times L}^{-1} d}$$

در روابط مذکور، r مجموعه تصاویر ورودی، y تصویر نهایی و R ماتریس خودهمبستگی (Autocorrelation Matrix) تصاویر ورودی و L تعداد باندهای تصویر است. در تصویر نهایی هرچه مقادیر پیکسل به مقدار یک نزدیک‌تر باشد، بیانگر وجود موادی شبیه به عارضه مورد نظر در این پیکسل است.

ب) فاصله Mahalanobis (MD)

فاصله Bhattacharyya^۱ که به وسیله رابطه‌ای که در ادامه ذکر می‌شود تعریف می‌گردد، دو مشخصه طیفی S_i و S_j را با استفاده از ماتریس‌های کواریانس مربوط به آنها (K_i و K_j) طبقه‌بندی می‌کند (Landgrebe, 1999).

رابطه (۱۰)

$$BD = \frac{1}{\lambda} (s_i - s_j)^T \left(\frac{K_i + K_j}{2} \right)^{-1} (s_i - s_j) + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{|(K_i + K_j)/2|}{\sqrt{|K_i| |K_j|}} \right)$$

در این رابطه، اگر $K_i = K_j = K$ فرض شود، فاصله Bhattacharyya به فاصله Mahalanobis (رابطه ۱۱)

کاهش می‌یابد.

رابطه (۱۱)

$$CMD = (s_i - s_j)^T K_{L \times L}^{-1} (s_i - s_j)$$

Chang و Chiang (Chang, 2002) این را مطرح کرده‌اند که با استفاده از رابطه (۱۱) می‌توان برای اندازه‌گیری اختلاف طیفی بین دو مشخصه طیفی S_i و S_j استفاده کرد؛ بدین ترتیب که هر چه این مقدار کوچک‌تر باشد، تفکیک‌پذیری بین دو عارضه کمتر است و این دو پیکسل به کلاس یارده طیفی واحدی تعلق دارند. به رابطه (۱۱)، روش فاصله Mahalanobis مبتنی بر ماتریس کواریانس^۲ (CMD) نیز گفته می‌شود. اگر در این رابطه $K_{L \times L}^{-1}$ به وسیله معکوس ماتریس همبستگی ($R_{L \times L}^{-1}$) جایگزین شود، با رابطه (۱۲) اندازه‌گیری دیگری با عنوان RMD^۳ (Chang, 2002) به‌دست می‌آید.

رابطه (۱۲)

$$RMD = (s_i - s_j)^T R_{L \times L}^{-1} (s_i - s_j)$$

ج) فاصله فیلتر انطباقی (MFD)

روش فاصله فیلتر انطباقی، میزان انطباق بین دو مشخصه طیفی S_i و S_j را بعد از این که میانگین کلی μ حذف شده، اندازه‌گیری می‌کند. بنابراین هر چه

1. Bhattacharyya Distance
2. Covariance-based Mahalanobis Distance
3. Correlation-based Mahalanobis Distance

۲-۲-۱- عملگر بولی (BO)

در این روش نقشه نهایی از فصل مشترک نقشه‌های اولیه به دست می‌آید. مثلاً برای دسته اندازه‌گیری‌های قطعی، این رابطه مربوطه بدین صورت است:

رابطه (۱۶)

$$\text{Boolean}_{\text{map}} = \text{SAM}_{\text{map}} \cap \text{SCS}_{\text{map}}$$

۲-۲-۲- فاصله اقلیدسی (ED)

در این روش از خروجی الگوریتم‌ها - که عددی بین صفر تا یک است - استفاده می‌شود. از این رو فاصله اقلیدسی برای دسته نخست بدین صورت تعریف می‌شود:

رابطه (۱۷)

$$ED = \sqrt{(\text{DN}_{\text{SAM}} - 1)^2 + (\text{DN}_{\text{SCS}} - 1)^2}$$

سپس با اعمال حد آستانه مناسب روی ED می‌توان به نقشه مورد نظر دست یافت.

۲-۲-۳- استنتاج فازی (FIS)

استنتاج فازی شامل سه بخش اصلی است که عبارت‌اند از: عملگرهای منطق فازی، توابع عضویت و قوانین IF-THEN. عملگرهای منطق فازی شامل AND، OR، NOT فازی است که در ترکیب فرضیات در قسمت مقدم هر قانون از آنها استفاده می‌شود. این عملگرها تعاریف مختلفی دارند که در این تحقیق از عملگرهای منطقی سوگنو استفاده شده است. توابع عضویت، برای فازی‌سازی متغیرهای زبانی به کار می‌روند. این توابع را می‌توان به روش‌های گوناگونی تعریف کرد که در این تحقیق برای قابلیت انعطاف کافی در تعریف آنها مشابه شکل ۲ تعریفی دوزنقه‌ای شکل آورده شده است.

برای تعریف تابع عضویت دوزنقه‌ای می‌بایست فردی خبره مطابق رابطه‌ای که در پی می‌آید، چهار پارامتر a، b، c، d را تنظیم کند.

مقدار انطباق بزرگ‌تر باشد احتمال تعلق دو عارضه به یک کلاسی واحد بیشتر می‌شود. این معیار به CMFM اشاره دارد (Chang, 2002) و به صورت رابطه (۱۳) مشخص می‌شود.

رابطه (۱۳)

$$\text{CMFM} = (s_i - \mu)^T K_{L \times L}^{-1} (s_j - \mu)$$

علاوه بر این، اگر $K_{L \times L}^{-1}$ در رابطه (۱۳) با معکوس ماتریس همبستگی ($R_{L \times L}^{-1}$) جایگزین شود، RMFM (Chang, 2002) با رابطه ۱۴ شکل می‌گیرد.

رابطه (۱۴)

$$\text{RMFM} = s_i^T R_{L \times L}^{-1} s_j$$

د) طبقه‌بندی حداکثر احتمال (MLC)

قاعده تصمیم‌گیری طبقه‌بندی حداکثر احتمال، مبتنی بر احتمال است و هر پیکسل به کلاسی تعلق می‌گیرد که در آن مقدار احتمال بیشینه (ماکزیمم) باشد. بر این اساس،

رابطه (۱۵)

$$\text{MLC} = -\ln |K_i| - (s - \mu_i)^T K_i^{-1} (s - \mu_i)$$

در رابطه ذکر شده، μ_i و K_i به ترتیب میانگین و ماتریس کواریانس هست و s مشخصه طیفی مربوط به یک بردار پیکسل است.

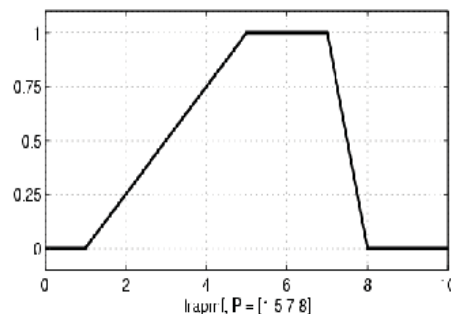
۲-۲- روش‌های تلفیق نتایج آشکارسازی طیفی

برای دستیابی به نتایج بهتر، می‌توان ترکیبی از الگوریتم‌های مذکور را در نظر گرفت. بدین منظور در هر دسته بهترین روش‌ها انتخاب و با یکدیگر ترکیب می‌شوند و سپس تصویر بهینه مربوط به هر دسته ترکیب می‌گردد، که در نهایت می‌توان به تصویری با دقت بهینه دست یافت. در ادامه چهار روش برای ترکیب نتایج آزمون‌ها بیان می‌شود.

۲-۳- معیار ارزیابی نتایج آشکارسازی طیفی

به‌منظور ارزیابی نتایج، ابتدا نقشه واقعیت زمینی - که نواحی یا پیکسل‌های مربوط به عارضه مورد نظر در آن مشخص شده است - تهیه می‌شود. سپس نتیجه آشکارسازی طیفی با آن مقایسه می‌گردد و ماتریس خطا به‌دست می‌آید. خطاهای commission و omission، در ماتریس خطا برای هدف مورد نظر تعیین می‌گردد و سپس این چهار معیار استخراج می‌شود: دقت کلی^۲ (OA)، ضریب کاپا^۳ (K)، نویز و عدم انطباق^۴ از ماتریس خطا. OA به صورت تقسیم مجموع تعداد پیکسل‌های عارضه و زمینه‌ای که به درستی طبقه‌بندی شده‌اند بر کل پیکسل‌ها، به دست می‌آید. از آنجا که OA معیار چندان مناسب و کاملی از صحت روش نیست، معیار K برای ارزیابی صحت روش محاسبه می‌شود (Rosenfield, 1986). نویز تقسیم مجموع تعداد پیکسل‌های عارضه و زمینه‌ای را که به اشتباه طبقه‌بندی شده است، بر کل پیکسل‌ها نشان می‌دهد. عدم انطباق نیز از تقسیم تعداد پیکسل‌های عارضه که به اشتباه در داخل کلاس زمینه قرار گرفته‌اند، بر کل پیکسل‌های تصویر به‌دست می‌آید.

برای بررسی عملکرد الگوریتم‌ها و صحت تصمیم‌گیری آنها در آشکارسازی طیفی هدف، علاوه بر ماتریس خطا، از منحنی ROC نیز که فراوانی خطای آشکارسازی را روی داده‌های چک نشان می‌دهد، استفاده شده است (Bradley, 1997). این منحنی براساس مفاهیم احتمال توان آشکارسازی^۵ یا احتمال مثبت^۶ و احتمال تشخیص اشتباه^۷ ترسیم می‌شود. منحنی ROC نتایج آشکارسازی تصویر را برای حد آستانه‌های مختلف با اطلاعات واقعیت زمینی مقایسه



شکل ۲. تابع عضویت فازی دوزنقه‌ای

رابطه (۱۸)

$$f(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases}$$

در این تحقیق برای هر متغیر ورودی دو تابع عضویت در نظر گرفته می‌شود و از آنجا که هدف آشکارسازی ساختمان‌هاست، متغیر خروجی دارای دو حالت صفر و یک خواهد بود.

۲-۲-۴- ANFIS

اصول این روش مشابه روش استنتاج فازی است، با این تفاوت که در روش استنتاج فازی توابع عضویت، قوانین و عملگرهای مرتبط، دستی و به روش سعی و خطا و با کمک فردی خبیره تنظیم می‌شوند، در حالی که در ANFIS به‌وسیله برخی از داده‌های آموزشی می‌توان به صورت کاملاً خودکار در فرایند بهینه‌سازی، مقادیر بهینه پارامترهای توابع عضویت انتخابی را مشخص ساخت و قوانین مناسب را به‌گونه‌ای استخراج کرد که نتایج روش استنتاج فازی بیشترین انطباق را با داده‌های چک داشته باشند. روش ANFIS نوعی سیستم نوروفازی^۱ است؛ برای آگاهی از مبانی آن، ن.ک. (Jang, 1993) برای کاهش پارامترهای بهینه‌سازی از توابع عضویت مثلثی شکل استفاده شده است.

1. Neuro-Fuzzy
2. Overall Accuracy
3. Kappa coefficient
4. Mis-Matching
5. Detection power
6. Positive Probability
7. False Alarm Probability

فراطیفی با قدرت تفکیک طیفی یا حداکثر تعداد باند ۲۲۸، که البته می‌توان بنا به نیاز کاربر این تعداد را تغییر داد. باندهای طیفی محدوده‌ای شامل ۰/۴ تا ۱ میکرومتر را پوشش می‌دهند. قدرت تفکیک مکانی سنجنده نیز به ارتفاع سکوی حامل - یعنی هواپیما - بستگی دارد و از ۱ تا ۱۰ متر متغیر است.

تصاویر مورد پردازش در این تحقیق، تصاویری با ۳۲ باند طیفی و قدرت تفکیک ۲ متر هستند که در ماه مه سال ۲۰۰۱ از منطقه شهری تولوز واقع در جنوب فرانسه برداشت شده‌اند. از این تصاویر، مناطق مختلفی که اهداف مورد نیاز برای شناسایی را در خود داشتند، انتخاب و ارزیابی شدند. شکل ۴-۱ ترکیب رنگی کاذبی را از یک منطقه، شامل ۱۲۸ در ۱۲۸ پیکسل نشان می‌دهد.

برای ارزیابی کمی و محاسبه ماتریس خطا، با انجام تفسیر بصری دقیق و مشاهده طیف مواد مختلف، نقشه واقعیت زمینی منطقه که پیکسل‌های متعلق به کلاس هدف - یعنی بام‌های ساختمانی - را در خود داشت استخراج شد (شکل ۴-۲). منحنی طیفی آن نیز به وسیله میانگین‌گیری از طیف پیکسل‌های انتخاب شده به صورت دستی ایجاد گردید (شکل ۴-۳).

می‌کند. در عمل تعدادی حد آستانه بین کمترین و بیشترین مقدار اطلاعات واقعی در نظر گرفته می‌شود؛ و سپس برای هر حد آستانه می‌توان دو منحنی ROC در نظر گرفت: یکی منحنی احتمال آشکارسازی در برابر احتمال تشخیص اشتباه و یکی هم منحنی احتمال آشکارسازی در برابر حد آستانه (شکل ۳).

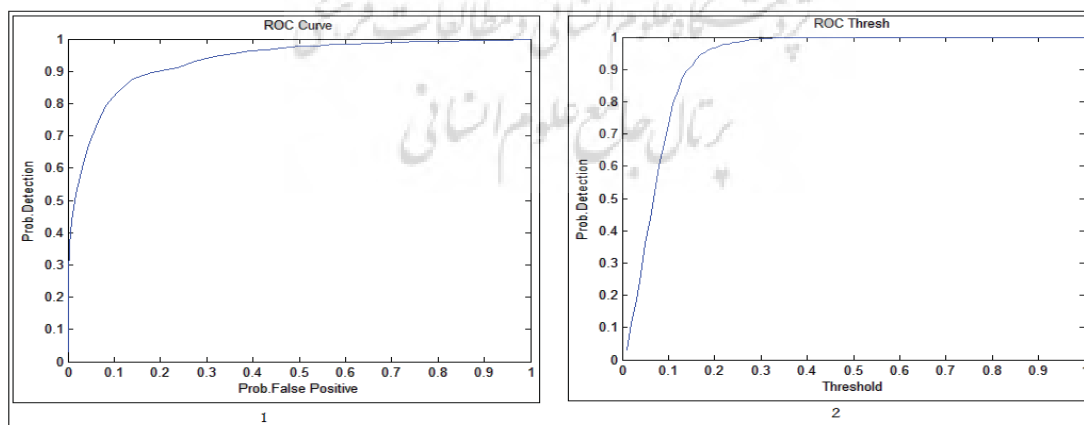
خروجی هر الگوریتم (تصویر تشابه) را می‌توان با انتخاب یک حد آستانه مناسب از طریق منحنی‌های ROC و با در نظر گرفتن مقداری برای احتمال تشخیص اشتباه به تصویری دودویی تبدیل کرد.

۳- آزمون‌های عملی

در این بخش ابتدا خصوصیات داده‌های مورد آزمون تشریح می‌شود. سپس نرم‌افزار پیاده‌سازی شده براساس مبانی نظری مطرح شده در بخش پیشین ارائه می‌گردد. در انتها نیز با توجه به هدف تحقیق، فهرستی از آزمون‌های عملی تعیین، و نتایج هر آزمون به‌صورت‌های کیفی و کمی ارائه می‌شود.

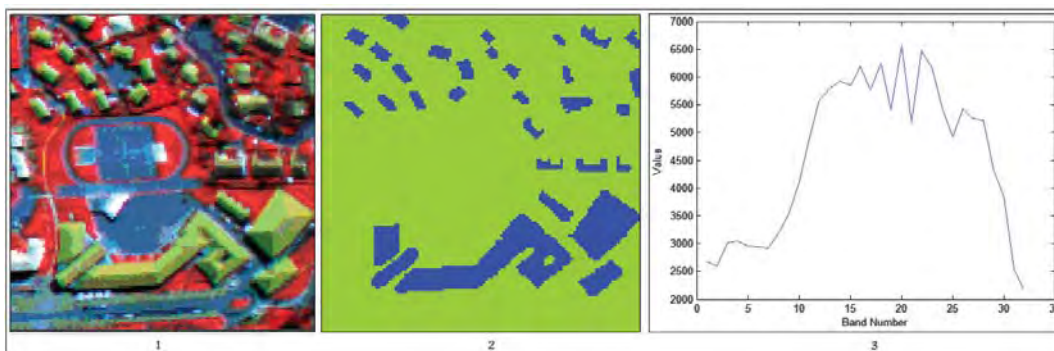
۳-۱- داده‌های مورد آزمون

برای انجام این تحقیق از داده‌های تصویری سنجنده CASI استفاده شده است. CASI سنجنده‌ای است



شکل ۳. (۱) منحنی احتمال آشکارسازی در برابر احتمال تشخیص اشتباه؛ و (۲) منحنی احتمال آشکارسازی در برابر حد آستانه

بهبود صحت آشکارسازی طیفی بام ساختمان‌ها از طریق تلفیق هوشمند روش‌های تشخیص هدف در تصاویر فراطیفی



شکل ۴. (۱) ترکیب رنگی - کاذب تصویر CASI ($R=0.914$, $G=0.620$, $B=0.451$) میکرومتر؛ (۲) داده‌های جمع‌آوری شده به منظور ارزیابی کمی-کیفی؛ و (۳) منحنی طیفی مربوط به پشت‌بام ساختمان‌ها

۲-۳- آزمون‌های انجام شده

جدول ۱. کمیت‌های محاسبه شده در ارزیابی صحت الگوریتم‌های آشکارسازی طیفی

	الگوریتم	دقت کلی	ضریب کاپا	نویز	عدم انطباق
اندازه‌گیری قطعی	ED	۰/۸۸۶	۰/۶۰۱	۰/۱۱۴	۰/۰۴۲
	CBD	۰/۸۸۰	۰/۵۴۶	۰/۱۲۰	۰/۰۶۱
	TD	۰/۹۰۰	۰/۶۵۲	۰/۱۰۰	۰/۰۳۳
	SAM	۰/۹۶۱	۰/۸۴۷	۰/۰۳۹	۰/۰۲۵
	SCS	۰/۹۶۲	۰/۸۵۲	۰/۰۳۸	۰/۰۲۶
اندازه‌گیری آماری	SSV	۰/۹۳۸	۰/۷۷۹	۰/۰۶۲	۰/۰۱۸
	SID	۰/۹۶۳	۰/۸۵۲	۰/۰۳۷	۰/۰۲۸
آشکارسازی آنامولی	JMD	۰/۹۶۲	۰/۸۵۳	۰/۰۳۸	۰/۰۲۲
	CEM	۰/۹۶۶	۰/۸۷۳	۰/۰۳۴	۰/۰۱۵
	CMD	۰/۹۱۹	۰/۶۹۴	۰/۰۸۱	۰/۰۴۲
	CMFM	۰/۹۶۸	۰/۸۸۰	۰/۰۳۲	۰/۰۱۸
	RMD	۰/۹۰۴	۰/۶۶۵	۰/۰۹۶	۰/۰۳۳
	RMFM	۰/۹۶۶	۰/۸۷۳	۰/۰۳۴	۰/۰۱۵
	MLC	۰/۹۱۹	۰/۶۹۴	۰/۰۸۱	۰/۰۴۲

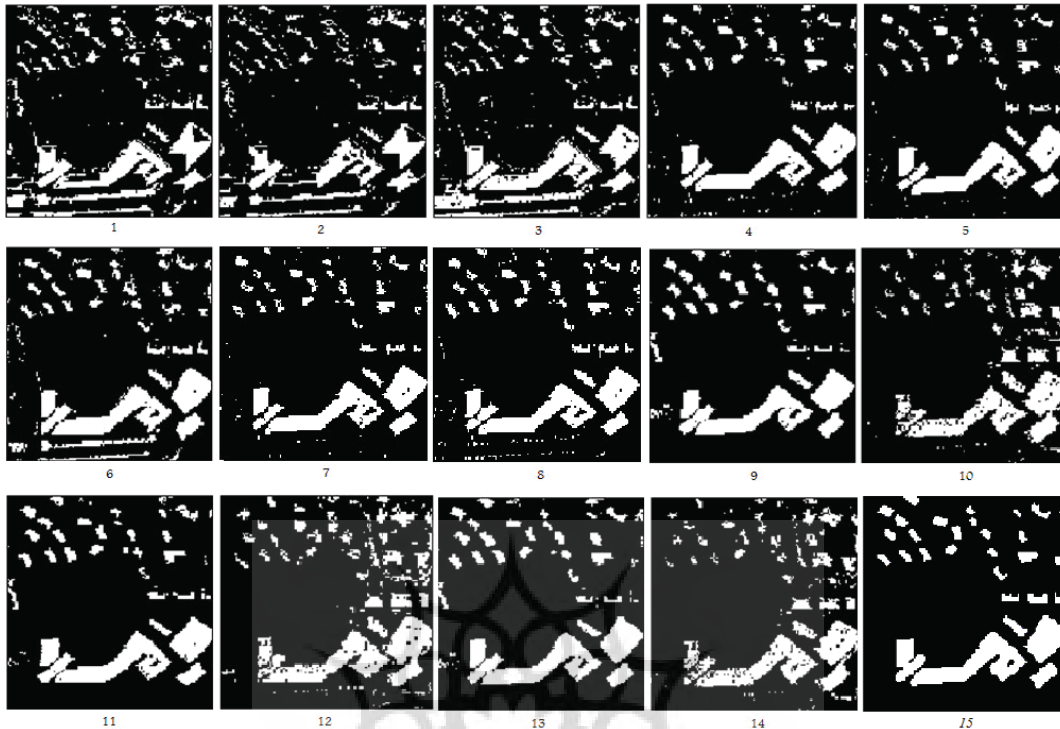
آزمون‌های انجام گرفته در این بخش را می‌توان در سه گروه کلی جای داد:

(الف) آزمون‌های ارزیابی صحت سه دسته الگوریتم آشکارسازی طیفی؛

(ب) آزمون‌های مقایسه روش‌های تلفیق نتایج الگوریتم‌های انتخابی در دو مرحله متوالی؛ و

(ج) آزمون تلفیق یکجای کلیه الگوریتم‌های انتخابی با روش خودکار ANFIS.

هدف از انجام آزمون‌های دسته نخست، انتخاب الگوریتم‌های آشکارسازی طیف با صحت بالاتر در هر دسته است. بدین منظور شش الگوریتم دسته اندازه‌گیری قطعی، دو الگوریتم دسته اندازه‌گیری آماری و شش الگوریتم دسته آشکارسازی آنامولی، و در مجموع ۱۴ الگوریتم آشکارسازی طیفی تشریح شده در بخش ۲-۱ مورد آزمون قرار گرفت. شکل ۵ نتایج حاصل از اعمال روش‌های اندازه‌گیری قطعی، اندازه‌گیری آماری و آشکارسازی آنامولی را نشان می‌دهد. در جدول ۱ نیز کمیت‌های محاسبه شده از ماتریس خطا برای هر سه دسته از الگوریتم‌های مذکور نشان داده شده‌اند.



شکل ۵. تصاویر به دست آمده از اعمال الگوریتم‌های (۱) اندازه‌گیری فاصله طیفی (نرم L_2)؛ (۲) اندازه‌گیری فاصله طیفی (نرم L_1)؛ (۳) اندازه‌گیری فاصله طیفی (نرم L_∞)؛ (۴) اندازه‌گیری زاویه طیفی؛ (۵) تشابه همبستگی طیفی؛ (۶) مقدار تشابه طیفی؛ (۷) دایورجنس اطلاعات طیفی؛ (۸) فاصله Jeffries-Matusita؛ (۹) کمینه‌سازی مقید انرژی؛ (۱۰) فاصله Mahalanobis مبتنی بر کواریانس؛ (۱۱) فاصله فیلتر انطباقی مبتنی بر کواریانس؛ (۱۲) فاصله Mahalanobis مبتنی بر کواریانس؛ (۱۳) فاصله فیلتر انطباقی مبتنی بر کواریانس؛ (۱۴) طبقه بندی حداکثر احتمال؛ (۱۵) نقشه واقعیت زمینی

آشکارسازی را در دو مرحله با روش‌های مختلف نشان می‌دهد. در جدول ۲ نتایج کمی این آزمون‌ها - به دست آمده از ماتریس خطاها - نشان داده شده‌اند. هدف از انجام آزمون (ج) ارائه روشی با حداکثر اتوماسیون است، به گونه‌ای که دخالت کاربر در تنظیم پارامترها در آن به کمترین میزان رسد و سرعت کار افزایش یابد. از این رو هفت الگوریتم انتخابی مربوط به سه دسته الگوریتم آشکارسازی طیفی، یکجا از طریق روش هوشمند ANFIS با هم تلفیق شده‌اند. شکل ۷ نتیجه کیفی تلفیق را نشان می‌دهد، و ردیف آخر جدول ۲ نتایج کمی آن را.

هدف از انجام آزمون‌های «ب» تلفیق الگوریتم‌های آشکارسازی انتخابی در دو مرحله متوالی است. در مرحله نخست الگوریتم‌های آشکارسازی انتخابی در هر دسته با هم تلفیق می‌شوند و برای هر دسته یک تصویر آشکارسازی به دست می‌آید. در مرحله دوم سه تصویر آشکارسازی طیفی حاصل از سه دسته الگوریتم با هم تلفیق می‌شوند تا یک تصویر آشکارسازی نهایی به دست آید. البته در دو مرحله آزمون‌ها با چهار روش مختلف تلفیق تشریح شده در بخش ۲-۲ صورت می‌گیرد تا بهترین روش تلفیق نیز در این میان تعیین گردد. شکل ۶ نتایج کیفی تلفیق الگوریتم‌های

بهبود صحت آشکارسازی طیفی بام ساختمان‌ها از طریق تلفیق هوشمند روش‌های تشخیص هدف در تصاویر فراطیفی



شکل ۶. (a) نتایج به‌دست آمده از اپراتور بولی در ترکیب (۱) SAM و SCS؛ (۲) SID و JMD؛ (۳) CEM، CMFM و RMFM؛ (۴) هر سه؛ و (۵) نقشه واقعیت زمینی. (b) نتایج به‌دست آمده از فاصله اقلیدسی در ترکیب (۱) SAM و SCS؛ (۲) SID و JMD؛ (۳) CEM، CMFM و RMFM؛ (۴) هر سه؛ و (۵) نقشه واقعیت زمینی. (c) نتایج به‌دست آمده از روش استنتاج فازی در ترکیب (۱) SAM و SCS؛ (۲) SID و JMD؛ (۳) CEM، CMFM و RMFM؛ (۴) هر سه؛ و (۵) نقشه واقعیت زمینی. (d) نتایج به‌دست آمده از روش ANFIS در ترکیب (۱) SAM و SCS؛ (۲) SID و JMD؛ (۳) CEM، CMFM و RMFM؛ (۴) هر سه؛ و (۵) نقشه واقعیت زمینی.



شکل ۷. (راست) نتیجه به‌دست آمده از روش ANFIS در ترکیب همزمان SAM، SCS، SID، JMD، CEM، CMFM و RMFM، و مقایسه آن با نقشه واقعیت زمینی (چپ)

جدول ۲. ارزیابی دقت ترکیب روش‌ها

	الگوریتم ترکیب	دقت کلی	ضریب کاپا	بویز	عدم انطباق
F.BO	۱- SAM,SCS	۰/۹۶۲	۰/۸۵۱	۰/۰۳۸	۰/۰۲۸
	۲- SID, JMD	۰/۹۶۳	۰/۸۵۲	۰/۰۳۷	۰/۰۲۸
	۳- CEM,CMFM,RMFM	۰/۹۶۸	۰/۸۷۶	۰/۰۳۲	۰/۰۱۸
F.ED	۱،۲،۳	۰/۹۶۱	۰/۸۴۲	۰/۰۳۹	۰/۰۳۵
	۱- SAM,SCS	۰/۹۶۲	۰/۸۵۰	۰/۰۳۸	۰/۰۲۶
	۲- SID, JMD	۰/۹۶۳	۰/۸۵۳	۰/۰۳۷	۰/۰۲۸
FIS	۳- CEM,CMFM,RMFM	۰/۹۶۶	۰/۸۷۴	۰/۰۳۴	۰/۰۱۴
	۱،۲،۳	۰/۹۷۱	۰/۸۸۹	۰/۰۲۹	۰/۰۱۸
	۱- SAM,SCS	۰/۹۶۳	۰/۸۵۴	۰/۰۳۷	۰/۰۲۷
ANFIS	۲- SID, JMD	۰/۹۶۲	۰/۸۵۳	۰/۰۳۸	۰/۰۲۲
	۳- CEM,CMFM,RMFM	۰/۹۶۸	۰/۸۷۹	۰/۰۳۲	۰/۰۱۵
	۱،۲،۳	۰/۹۶۷	۰/۸۷۶	۰/۰۳۳	۰/۰۱۵
ANFIS	۱- SAM,SCS	۰/۹۶۱	۰/۸۵۰	۰/۰۳۹	۰/۰۲۵
	۲- SID, JMD	۰/۹۶۲	۰/۸۵۳	۰/۰۳۸	۰/۰۲۲
	۳- CEM,CMFM,RMFM	۰/۹۶۸	۰/۸۸۳	۰/۰۳۲	۰/۰۱۳
	۱،۲،۳	۰/۹۷۲	۰/۸۹۴	۰/۰۲۸	۰/۰۱۵
	SAM,SCS, SID, JMD, CEM,CMFM,RMFM	۰/۹۷۳	۰/۹۰۰	۰/۰۲۷	۰/۰۱۲

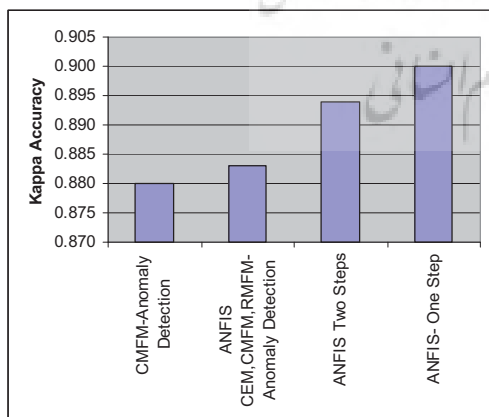
۳-۳- ارزیابی نتایج آزمون‌ها
 صحت مشاهده شده ناشی از عملکرد الگوریتم بوده است. از سوی دیگر علت دست نیافتن به صحت صددرصد نقشه، ریشه در واقعیت زمینی و توانایی الگوریتم آشکارسازی به کار گرفته شده دارد. با توجه به نکات مذکور، هدف از این تحقیق در وهله نخست تلفیق روش‌های آشکارسازی برای دستیابی به نتیجه‌ای با بالاترین صحت ممکن است. بدین منظور الگوریتم‌های دارای صحت بالاتر در هر دسته با هم به روش‌های مختلف تلفیق شدند. نتایج تلفیق که در شکل ۹ درج گردیده‌اند، نشان از آن دارند که تلفیق دسته الگوریتم‌های آشکارسازی آنومالی به‌طور معنی‌داری نسبت به تلفیق دسته الگوریتم‌های

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در دسته اندازه‌گیری‌های قطعی دو روش SAM و SCS دارای بالاترین دقت را دارند؛ و دو روش SID و JMD در دسته اندازه‌گیری‌های آماری دارای دقت نسبتاً خوب‌اند؛ در دسته آشکارسازی آنومالی سه روش CEM، CMFM و RMFM در بردارنده بهترین نتایج در میان روش‌های موجود هستند. مطابق شکل ۸ - که از جدول ۱ به دست آمده است - هر هفت روش انتخابی دارای ضریب کاپای بزرگ‌تر از ۰/۸ هستند. از آنجا که نقشه واقعیت زمینی و حد آستانه به‌کار گرفته شده برای تمامی الگوریتم‌ها یکی بوده، می‌توان نتیجه گرفت که اختلاف

بهبود صحت آشکارسازی طیفی بام ساختمان‌ها از طریق تلفیق هوشمند روش‌های تشخیص هدف در تصاویر فراطیفی

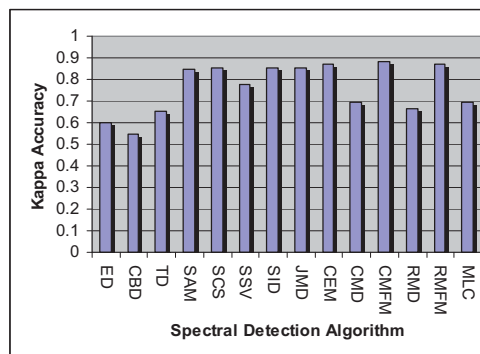
مرحله تلفیق الگوریتم‌های آشکارسازی طیفی تا اینجا با بیشترین صحت همراه بوده است.

به این ترتیب در ادامه تحقیق قرار شد روش ANFIS به صورت مستقیم و یکجا در یک مرحله روی هر هفت الگوریتم آشکارسازی انتخابی اعمال شود، تا اینکه در وهله نخست دخالت کاربر در انتخاب مرحله‌ای الگوریتم‌ها کاهش یابد، و دوم اینکه اندرکنش نتایج الگوریتم‌ها با هم بیشتر شود تا احتمال دستیابی به نتیجه‌ای با صحت بالاتر، بیشتر شود. صحت کاپای ۰/۹ در ردیف آخر جدول ۲ مؤید همین استدلال بود. همان‌طور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، در چهار مرحله به تدریج صحت آشکارسازی بهبود یافته است. در مرحله نخست روش آشکارسازی طیفی CMFM در دسته آشکارسازی آنومالی، بهترین صحت را داشته است. در مرحله دوم تلفیق الگوریتم‌های انتخابی دسته آشکارسازی آنومالی با کمک روش ANFIS باعث بهبود جزئی صحت از ۰/۸۸۰ به ۰/۸۸۳ شده است. در مرحله سوم تلفیق مجدد نتایج سه دسته الگوریتم آشکارسازی به روش ANFIS، به بهبود معنی‌دار صحت تا ۰/۸۹۴ انجامیده است. در مرحله چهارم نیز علاوه بر افزایش اتوماسیون، صحت نتیجه تلفیقی با ANFIS روی کلیه هفت الگوریتم آشکارسازی SAM, SCS, SID, CMFM, RMD, RMFM, JMD, CEM تا ۰/۹۰۰ افزایش یافته است.

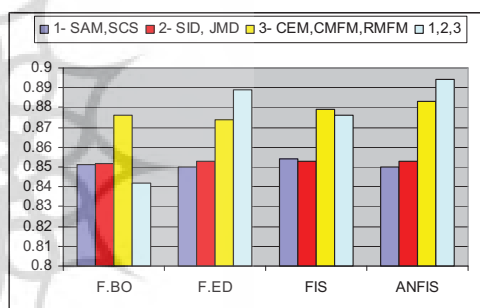


شکل ۱۰. بهبود تدریجی صحت در تلفیق الگوریتم‌های آشکارسازی طیفی

اندازه‌گیری قطعی و آماری دارای پاسخ صحیح‌تری هستند.



شکل ۸. صحت روش‌های مختلف آشکارسازی طیفی



شکل ۹. مقایسه صحت نتایج تلفیق با روش‌های مختلف

علت این امر در مدل‌سازی پیکسل‌های مختلط در دسته الگوریتم‌های آشکارسازی آنومالی است. همچنین نحوه انتخاب الگوریتم‌های آشکارسازی اهمیت بیشتری در مقایسه با انتخاب روش تلفیق آنها دارد، زیرا صحت تصاویر تلفیقی صرف‌نظر از روش تلفیق به‌کار گرفته شده تقریباً یکی است. از سوی دیگر، تلفیق نتایج مرحله نخست سه دسته الگوریتم آشکارسازی با روش ANFIS به طور معنی‌داری باعث افزایش صحت - و با روش عملگر بولی باعث کاهش صحت - شده است. البته در دو روش فاصله اقلیدسی و فازی چندان تغییر صحت معناداری مشاهده نمی‌شود. به این ترتیب، می‌توان نتیجه گرفت که اعمال روش ANFIS در دو

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله، روش‌ها یا تکنیک‌های آشکارسازی طیفی هدف، و شیوه‌های تلفیق آنها در آنالیز تصاویر فراطیفی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به حجم بالای تصاویر فراطیفی، در بیشتر الگوریتم‌های انتخاب شده پارامتر سرعت و دقت مدنظر قرار گرفته است، به طوری که بتوان در کمترین زمان ممکن به دقیق‌ترین نتایج رسید. این الگوریتم‌ها برای آشکارسازی فقط به اطلاعات طیفی هدف مورد نظر نیاز است. در بین الگوریتم‌های آشکارسازی طیفی که از معیارهای قطعی استفاده می‌کنند، الگوریتم‌های همبستگی طیفی و زاویه طیفی با موفقیت نسبی در کشف هدف مورد نظر همراهان؛ هر چند که خطا در این کشف نیز در برخی از مناطق که موادی نسبتاً مشابه دارند، زیاد است. الگوریتم‌های مقدار تشابه طیفی و فاصله از این نظر در مراتب بعدی قرار می‌گیرند.

همچنین دو الگوریتم آماری مطرح شده در این مقاله در مقایسه با الگوریتم‌های قطعی، نتایج بهتری را به دست می‌دهند و میزان نویز و عدم انطباق در آنها کمتر است. در بین الگوریتم‌های آشکارسازی آناملوی الگوریتم‌های کمینه‌سازی مقید انرژی و فیلترهای انطباقی - چه از نظر کمی و چه از نظر کیفی - با موفقیتی نسبی همراهان، در حالی که سه الگوریتم دیگر دقت پایین‌تری دارند و میزان خطا در آنها زیاد است. در بین روش‌های تلفیق نیز روش ANFIS در مقایسه با روش‌های عملگر بولی و فاصله اقلیدسی و استنتاج فازی، نتایج بهتری را در حد ۹۰ درصد به همراه دارند.

در تحقیقات آتی، به‌منظور بهبود صحت آشکارسازی، پیشنهاد می‌شود که علاوه بر استفاده از اطلاعات طیفی در فرایند تحقیق، از اطلاعات مکانی عوارض نیز استفاده شود. بدین منظور می‌توان برای دخالت همبستگی مکانی به روش‌هایی مانند

بخش‌بندی بهینه تصویر به نواحی همگون با توجه به مشخصات بافتی اشاره کرد تا براساس این نواحی همگون بتوان آشکارسازی طیفی را با دقت بیشتری انجام داد، و یا با به‌کارگیری مفاهیم آنالیز حد تفکیک چندگانه - مثلاً با استفاده از ابزار موجک - به بهبود آشکارسازی طیفی پرداخت. همچنین می‌توان عواملی را که موجب اریب شدن برآوردهای کمترین مربعات در جداسازی طیفی می‌شوند - مانند پارامترهای اضافه و وابستگی طیفی - بررسی کرد.

۵- قدردانی

در اینجا لازم به سپاس و قدردانی از دکتر Michel Roux، به خاطر در اختیار قرار دادن داده‌های به کار رفته در این تحقیق است.

۶- منابع

- Bakker, W.H. and Schmidt, K.S., 2002, **Hyperspectral Edge Filtering for Measuring Homogeneity of Surface Cover Types**, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 56, 246- 256.
- Bradley, A.P., 1997, **The Use of the Area Under the ROC Curve in the Evaluation of Machine Learning Algorithms**, Pattern Recognition, Vol.30, No.7, 1145-1159.
- Carvalho, O.A. and Meneses, P.R., 2002, **Spectral Correlation Mapper (SCM): An Improvement on the Spectral Angle Mapper (SAM)**, Asa Norte, 70910-900, Brasília, DF, Brasil.
- Chang, C.I., 2003, **Hyperspectral Imaging: Techniques for spectral Detection and Classification**, Orlando, FL: Kluwer Academic.

- Chang, C.I. and Chiang, S.S., 2002, **Anomaly Detection and Classification for Hyperspectral Imagery**, IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, vol.40, No.6.
- Chang, C.I. and Heinz D.C., 2000, **Constrained Subpixel Target Detection for Remotely Sensed Imagery**, IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 38, NO. 3.
- Du, Y., Chang C.I. and Ren H., 2004, **New Hyperspectral Discrimination Measure for Spectral Characterization**, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers.
- Emami, H., Afary, A., 2007, **Subpixel Classification on the Hyperspectral Images for Accuracy Improvement of Classification Results**, Dep. of Geodesy and Geomatic Eng, K.N.Toosi University of Technology, Tehran-Iran.
- Farrand, W.H. and Harsanyi, J.C., 1997, **Mapping the Distribution of Mine Tailings in the Coeur d'Alene River Valley, Idaho, Through the Use of a Constrained Energy Minimization Technique**, Remote Sensing of Environment, No.59, 64-76.
- Frolov, D. and Smith, R.B., 1999, **Locally Adaptive Constrained Energy Minimization for AVIRIS Image**, Eighth JPL Airborne Earth Science (AVIRS), <http://www.microimages.com/papers/>.
- Granahan, J.C. and Sweet, J.N., 2001, **An Evaluation of Atmospheric Correction Techniques Using The Spectral Similarity Scale**, IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vol. 5, 2022-2024.
- Harsanyi, J.C., 1993, **Detection and Classification of Subpixel Spectral Signatures in Hyperspectral Image Sequences**, Ph.D. Dissertation, University of Maryland, Baltimore County, 116 pp.
- Homayouni, S. and Roux, M., 2003, **Material Mapping from Hyperspectral Images Using Spectral Matching in Urban Area**, IEEE Workshop on Advances in Techniques for analysis of Remotely Sensed Data, NASA Goddard center, Washington DC, USA.
- Jang, J.S.R., 1993, **ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems**, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 23, No. 3, 665-685.
- Keranen, P., Kaarna, A. and Toivanen, P., 2002, **Spectral Similarity Measures For Classification in Lossy Compression of Hyperspectral Images**, Proceedings of the 9th International Symposium on Remote Sensing, SPIE, Vol.4885, Crete, Greece, September 2002, 285-296.
- Landgrebe, D., 1999, **Some Fundamentals and Methods for Hyperspectral Image Data Analysis**, SPIE Int. Symp. On Biomedical Optics (Photonics West), San Jose CA, Proc. SPIE Vol. 3603, 104-113.
- Lumme J.H., 2003, **Classification of Vegetation and Soil Using Imaging Spectrometer**

Data, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Helsinki University of Technology, P.O.Box 1200, FIN-02015 HUT.

Rosenfield, G.H. and Fitzpatrick-Lins, K., 1986, **A Coefficient of Agreement as a Measure of Thematic Classification Accuracy**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 52, No. 2, 223-227.

Varshney, P.K. and Arora, M.K., 2004, **Advanced Image Processing Techniques for Remotely Sensed Hyperspectral Data**, Springer Berlin Heidelberg New York.

Yuhas, R.H., Goetz, F.H. and Boardman, J.W., 1992, **Discrimination Among Semi-arid landscape Endmembers Using the Spectral Angle Mapper (SAM) Algorithm**, In Summaries of the Third Annual JPL Airborne Geosciences Workshop, JPL publication 92-14. Vol. 1. 147-149.

CASI Technical Documentations, Itres Research Canada, <http://www.itres.com/>.