

ارائه روش جدید تولید واژه‌نامه در روش‌های نمایش تنک جهت کشف هدف درون تصاویر فراطیفی

رضا عزیزی^{۱*}، مهران ستاری^۲، مهدی مومنی^۳

^۱ کارشناس ارشد سنجش از دور - گروه مهندسی نقشه‌برداری - دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل - دانشگاه اصفهان
rezaazizi7189@gmail.com

^۲ استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری - دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل - دانشگاه اصفهان
sattari@eng.ui.ac.ir

^۳ دانشیار گروه مهندسی نقشه‌برداری - دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل - دانشگاه اصفهان
momeni@eng.ui.ac.ir

(تاریخ دریافت دی ۱۳۹۷، تاریخ تصویب اردیبهشت ۱۳۹۹)

چکیده

داده‌های فراطیفی در حوزه سنجش‌ازدور، با قدرت تفکیک طیفی بسیار مناسب (حدود ۱۰ نانومتر) تهیه شده و شامل باندهای زیادی هستند. کشف ماده هدف، از مهمترین کاربردهای داده‌های فراطیفی است. یکی از مسائل کشف ماده هدف، تغییرپذیری طیفی مواد ناشی از تأثیر توپوگرافی و اختلاط طیفی است. علاوه بر این، نویز حاصل از نقص سنجنده و اثرات اتمسفری نیز باعث عدم ثبات طیفی یک ماده در موقعیت‌های مختلف می‌شود. روش‌های کشف هدف، این تغییرات را مدل‌سازی نموده و بر این اساس استخراج هدف را انجام می‌دهند. روش‌های آماری و روش‌های برمبنای زیرفضا، دو مورد از معروف‌ترین الگوریتم‌های کشف هدف می‌باشند. ضعف این روش‌ها، در نظر گرفتن فرضیات آماری خاص و مدل‌سازی تغییرات طیفی با پارامترهای محدود می‌باشد. از این رو در این مقاله یکی از روش‌های قدرتمند کشف هدف، به نام نمایش تنک استفاده شده است که شرایط مختلف رفتار طیفی هدف و زمینه را به صورت ماتریس‌هایی، تحت عنوان واژه‌نامه، مدل‌سازی نموده و درواقع زیرفضای کاملی از طیف مواد و تغییرات آن ایجاد می‌نماید. چالش اصلی روش‌های نمایش تنک، جهت کشف ماده هدف، ارائه واژه‌نامه خالص (بدون اختلاط طیفی) می‌باشد. در تحقیقات پیشین، سه روش جفت پنجره، عمومی و آموزش واژه‌نامه پیشنهاد شده است. ایراد اساسی این روش‌ها ایجاد اختلاط طیفی بین اتم‌های واژه‌نامه و طیف هدف می‌باشد. با توجه به نقاط ضعف روش‌های ذکر شده، در این پژوهش روشی جهت ساخت واژه‌نامه پیشنهاد شده است که اتم‌های واژه‌نامه، علاوه بر ایجاد زیرفضاهای کامل و مدل‌سازی تغییرات طیفی، در حد امکان خالص نیز می‌باشد. در روش پیشنهادی دو مقصود تشکیل زیرفضاهای زمینه و به حداقل رساندن اختلاط طیفی اتم‌های واژه‌نامه و هدف دنبال می‌شود. به منظور رسیدن به این دو مقصود، همبستگی طیف هدف و کل پیکسل‌های تصویر محاسبه شده و از میان پیکسل‌های تصویر، از کمترین تا بیشترین میزان همبستگی با طیف هدف، واژه‌نامه‌های متفاوتی برای زمینه ایجاد می‌شود. در نهایت از بین واژه‌نامه‌های ایجاد شده، واژه‌نامه‌ای انتخاب می‌شود که زیرفضای کاملی از تصویر ایجاد نماید و آن زیرفضا نیز، کمترین میزان همبستگی با طیف هدف را داشته باشد. در این مقاله روش پیشنهادی ساخت واژه‌نامه به همراه یک مدل نمایش تنک، به نام SRBBH به کار رفته و تحت عنوان روش Proposed+SRBBH معرفی شده است. برای بررسی میزان کارآمدی روش‌های ارائه شده، یک مجموعه داده شبیه‌سازی و سه داده واقعی استفاده شد و به منظور ارزیابی روش‌ها، مساحت زیر سطح نمودار ROC مورد استفاده قرار گرفت. در آزمایش‌های اجرا شده بر دو داده Cuprite و Sandiego، مساحت زیر نمودار به ترتیب ۰/۹۹۹۷ و ۰/۹۹۶۱ به دست آمد که نسبت به سایر روش‌ها مقادیر بیشتری را نشان می‌دهد. برای دو مجموعه داده دیگر نیز برای اکثر هدف‌ها، روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها عملکرد بهتری را نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: کشف ماده هدف، داده‌های فراطیفی، روش‌های نمایش تنک، واژه‌نامه

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

امروزه سنجش از دور با استفاده از تصاویر فراطیفی به دلیل باندهای زیاد و قدرت تفکیک طیفی بالا، مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. تصاویر فراطیفی کاربردهای وسیعی در زمینه‌های مختلف از جمله نظامی، کشاورزی، شهری و استخراج معدن دارند [۱، ۲]. کشف ماده هدف، یکی از کاربردهای مهم تصاویر فراطیفی می‌باشد که در واقع یک نوع طبقه‌بندی تصاویر به دو کلاس هدف و پس‌زمینه محسوب می‌شود. جهت کشف هدف در داده‌های فراطیفی، روش‌های مختلفی ارائه شده است.

یکی از عوامل اصلی اختلال در کشف هدف، تغییرات طیفی مواد، تحت تأثیر عوامل مختلف (تغییرپذیری طیفی) است. هر ماده، تحت تأثیر عوامل مختلف، دارای پاسخ طیفی متفاوتی می‌باشد، این در حالی است که حتی در شرایط آزمایشگاهی نیز به دلیل تغییرات سطح نمونه‌برداری، پاسخ طیفی متفاوتی از سطح نمونه گزارش می‌شود. در داده‌های فراطیفی نیز این عوامل وجود دارد، تغییرات در موقعیت سنجنده، تغییر شرایط اتمسفری، توپوگرافی منطقه و نقص سنجنده، از جمله این عوامل می‌باشند [۳].

گروهی از الگوریتم‌های کشف هدف بر مبنای روش‌های آماری می‌باشند که بطور نمونه می‌توان به ACE^۱، AMF^۲ و CEM^۳ اشاره نمود [۴] [۵]. در نظر گرفتن یک فرض آماری خاص برای همه داده‌ها و در همه شرایط و همچنین مدل‌سازی تغییرات طیفی با پارامترهای محدود، از جمله نقاط ضعف این روش‌ها می‌باشد [۶].

در سال‌های اخیر، جهت کشف هدف، روش‌هایی مبتنی بر نمایش تنک ارائه شده است. این روش‌ها، در زمینه‌های پردازش سیگنال، برای حذف نویز و بازیابی و فشرده‌سازی سیگنال و در زمینه‌های پردازش تصویر، برای طبقه‌بندی به‌کاررفته است. در این روش‌ها، برای هر پیکسل، یک آزمون دو فرضی در نظر گرفته می‌شود. در هر فرض، پیکسل نمونه به‌صورت ترکیب طیف مواد مختلف (نمونه‌های آموزشی) نوشته شده و ترکیب طیفی مربوط به هر یک از فرض‌ها، با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی محاسبه می‌گردد. در نهایت پیکسل نمونه به آن فرضی

نسبت داده می‌شود که ترکیب طیفی آن فرض بتواند پیکسل نمونه را دقیق‌تر بازسازی نماید. در این روش‌ها، نمونه‌های آموزشی، شامل اتم‌های یک واژه‌نامه می‌باشد که تعدادی از آن‌ها مربوط به واژه‌نامه ماده هدف (زیرفضای هدف) و تعدادی مربوط به واژه‌نامه زمینه (زیرفضای زمینه) می‌باشد [۶]. روش‌های نمایش تنک، به‌جای مدل‌سازی تغییرات طیفی با پارامترهای محدود، از ماتریس‌هایی با ابعاد زیاد، جهت مدل‌سازی تغییرات طیفی استفاده نموده و هیچ فرض آماری نیز در آن‌ها وجود ندارد.

سه مرحله ساخت واژه‌نامه، ارائه مدل و الگوریتم‌های بهینه‌سازی، از جمله قدم‌های اصلی در استفاده از روش‌های مبتنی بر نمایش تنک می‌باشد که از این بین، ساخت واژه‌نامه یکی از چالش‌های اصلی در این روش‌ها می‌باشد. جهت ساخت واژه‌نامه تاکنون سه روش محلی، عمومی و آموزشی، توسط محققین ارائه شده است [۶، ۷].

در روش عمومی، تصویر به چند کلاس تقسیم و از هر کلاس، تعدادی پیکسل به‌عنوان اتم انتخاب شده و واژه‌نامه زمینه را با استفاده از آنها می‌سازند [۶، ۷]. طبقه‌بندی کل تصویر و استفاده از همه آن‌ها جهت ساخت واژه‌نامه زمینه و عدم بکارگیری هر گونه قیدی در انتخاب پیکسل‌های هدف از جمله مشکلات این روش می‌باشد.

در روش محلی، یک جفت پنجره روی پیکسل نمونه قرار گرفته و فرض بر این است که پیکسل‌های واقع در پنجره بیرونی اتم‌های زمینه را می‌سازند. در این روش‌ها، احتمال قرار گرفتن پیکسل‌های هدف داخل پنجره بیرونی و اختلاط طیفی وجود دارد.

روش‌های آموزش‌مبنا برای ساخت واژه‌نامه زمینه به کار می‌رود. در این روش‌ها، یک واژه‌نامه اولیه، با مقادیر تصادفی تعریف می‌شود، سپس طی چندین تکرار، پیکسل‌های تصویر به صورت تصادفی انتخاب شده و در هر تکرار، واژه‌نامه آموزش داده می‌شود. خروجی روش‌های آموزش‌مبنا، واژه‌نامه‌ای است که خطای بازسازی پیکسل‌های تصویر را کمینه کرده و در واقع واژه‌نامه‌ای با زیرفضاهای کامل تصویر ایجاد می‌نماید [۸، ۹]. در این روش به دلیل انتخاب تصادفی کل پیکسل‌های تصویر در فرآیند ساخت واژه‌نامه زمینه، احتمال انتخاب پیکسل‌های هدف نیز وجود دارد. در کل، ایراد اساسی همه روش‌های ساخت واژه‌نامه، اختلاط طیف‌های زمینه و هدف می‌باشد. در این پژوهش، روشی جهت ساخت واژه‌نامه ارائه می‌شود

^۱ Adaptive Coherence/Cosinus Estimator

^۲ Adaptive Matched Filter

^۳ Constrained Energy Minimization

که زیر فضای کاملی از تصویر ایجاد نموده و درعین حال، اختلاط طیفی نیز در آن به کمترین میزان می‌رسد.

از نمونه تحقیقات اخیر در حوزه نمایش تنک، مقاله Zhang و همکاران در سال ۲۰۱۷ می‌باشد. ایشان در تحقیق خود، روش جفت پنجره را به کار بردند و به منظور بهبود عملکرد روش نمایش تنک و تشخیص بهتر پس-زمینه و هدف، از الگوریتمی جهت کاهش اطلاعات اضافی باندها استفاده نمودند. در این الگوریتم، باندهای همسایه شبیه به یکدیگر، به چند زیر تصویر از تصویر اصلی تقسیم شدند و از طریق جستجو در بین زیرتصاویر، اطلاعات اضافی باندها کاهش یافتند [۱۰].

مقاله Zhu و همکاران، از جمله تحقیقات ارائه شده در سال ۲۰۱۹ می‌باشد که از روش جفت پنجره جهت ساخت واژه‌نامه زمینه استفاده کرده‌اند. ایشان جهت ساخت واژه‌نامه هدف، به جای انتخاب دستی پیکسل‌های هدف، ابتدا الگوریتم CEM را به کار بردند و پیکسل‌های خروجی این الگوریتم را به عنوان واژه‌نامه هدف معرفی نمودند [۱۱]. اختلاط طیف هدف در هنگام ساخت واژه‌نامه زمینه از جمله مشکلات این دو تحقیق می‌باشد که از روش جفت پنجره استفاده کرده‌اند و عبارت دیگر در این تحقیقات، به موضوع ساخت واژه‌نامه خالص پرداخته نشده است.

همان‌طور که پیشتر بیان شد، ارائه مدل، دومین مرحله روش‌های مبتنی بر نمایش تنک، می‌باشد که شامل آزمون‌های دو فرضی برای هر پیکسل هستند و در هر فرض آن، پیکسل‌های نمونه، به صورت ترکیبی از طیف اتم‌های واژه‌نامه نوشته می‌شود. مدل‌های STD^۱ و SRBBH^۲ از معروف‌ترین مدل‌ها در این زمینه محسوب می‌شوند [۶، ۷، ۱۲، ۱۳]. در این تحقیق از مدل SRBBH جهت مدل‌سازی نمایش تنک استفاده شده است [۱۴]. مخلوط در نظر گرفتن ماده هدف و زمینه در فرضیات مورد استفاده در این روش از جمله دلایل مربوط به استفاده از آن در این تحقیق می‌باشد.

در سومین مرحله، محاسبه ترکیب طیفی مربوط به هر فرض با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی صورت می‌گیرد و در نهایت، کشف هدف، با میزان تعلق پیکسل به ترکیب طیفی واقع در هر فرض انجام می‌شود. از جمله روش‌های

بهینه‌سازی مورد استفاده برای محاسبه بردارهای تنک می‌توان به روش‌های OMP^۳، SP^۴، KOMP^۵ و SOMP^۶ [۱۲، ۱۵-۱۷] اشاره کرد که در این تحقیق بدلیل پیچیدگی محاسباتی پایین از الگوریتم OMP استفاده شده است [۱۴].

روند ادامه‌ی مطالب در این پژوهش به این صورت است: در بخش دوم مدل‌های نمایش تنک جهت کشف ماده هدف ارائه خواهند شد، در بخش سوم روش پیشنهادی جهت ساخت واژه‌نامه شرح داده می‌شود، در بخش چهارم منطقه و داده‌ی مطالعاتی معرفی می‌گردد، در بخش پنجم نتایج و بحث و بررسی پیرامون آزمایش‌های انجام شده روی داده‌ها ارائه شده و نهایتاً در بخش ششم نتایج نهایی مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۲- مدل‌های نمایش تنک جهت کشف ماده هدف

یکی از بخش‌های مهم روش‌های نمایش تنک، ایجاد مدل، جهت کشف هدف می‌باشد. با توجه به این که پیکسل‌های تصاویر فراطیفی ترکیبی از چند ماده مختلف (هدف و زمینه) است، بنابراین در این تحقیق، از بین مدل‌های STD و SRBBH، مدل SRBBH که ترکیب طیفی مواد را در نظر می‌گیرد استفاده شده که در ادامه به توضیح آن می‌پردازیم.

۲-۱- مدل نمایش تنک SRBBH

هر پیکسل تصویر فراطیفی به صورت ترکیب خطی طیف مواد (واژه‌نامه) بیان می‌شود. اگر به طور فرض، x پیکسل مربوط به زمینه تصویر باشد، بردار این پیکسل در فضای ویژگی، در محدوده بردارهای زمینه قرار گرفته و مطابق رابطه (۱)، به صورت ترکیب خطی از این بردارها نوشته می‌شود. پیکسل مورد نظر ماده هدف نیز در فضای ویژگی در محدوده بردارهای هدف قرار گرفته و می‌توان آن را به صورت ترکیب خطی از این بردارها نوشت. پیکسل‌های تصویر فراطیفی در واقعیت مخلوطی از ماده هدف و زمینه می‌باشند. بنابراین طبق رابطه (۲)، پیکسل‌های آن باید به صورت ترکیب خطی از طیف هر دو ماده نوشته شود.

^۳ Orthogonal Matching Pursuit

^۴ Subspace Pursuit

^۵ Kernelized Orthogonal matching Pursuit

^۶ Simultaneous Orthogonal Matching Pursuit

^۱ Sparsity-Based Target Detector

^۲ Sparse Representation-Based Binary Hypothesis

با توجه به مطالب فوق، در سال ۲۰۱۵، Zhang و همکارانش [۱۸]، مدل دو فرضی SRBBH را مطابق رابطه (۳)، پیشنهاد نمودند که در فرض اول (فرض صفر) آن، هر پیکسل تصویر، به صورت ترکیب خطی طیف های زمینه و در فرض دوم آن (فرض یک) به صورت ترکیب خطی طیف های زمینه و هدف نوشته می شود.

$$x \approx \gamma_1 D_1^b + \gamma_2 D_2^b + \dots + \gamma_{N_b} D_{N_b}^b \\ = [D_1^b D_2^b \dots D_{N_b}^b] [\gamma_1 \gamma_2 \dots \gamma_{N_b}]^T = D^b \gamma^b \quad (1)$$

$$x \approx (\beta_1^b D_1^b + \beta_2^b D_2^b + \dots + \beta_{N_b}^b D_{N_b}^b) + \\ (\beta_1^t D_1^t + \beta_2^t D_2^t + \dots + \beta_{N_t}^t D_{N_t}^t) \\ = [D_1^b D_2^b \dots D_{N_b}^b] [\beta_1^b \beta_2^b \dots \beta_{N_b}^b]^T \\ + [D_1^t D_2^t \dots D_{N_t}^t] = D^b \beta^b + D^t \beta^t = D \beta \quad (2)$$

$$H_0: x = D^b \gamma, \quad \text{target absent} \\ H_1: x = D^b \beta^b + D^t \beta^t \\ = D \beta, \quad \text{target present} \quad (3)$$

در رابطه های فوق، x ، D^b و D ، به ترتیب پیکسل نمونه، واژه نامه زمینه و واژه نامه زمینه و هدف می باشند، همچنین γ سهم اتم های واژه نامه زمینه و β سهم اتم های واژه نامه زمینه و هدف در تشکیل پیکسل نمونه هستند. سهم هریک از طیف ها، با استفاده از روش های بهینه سازی محاسبه شده و هر پیکسل با استفاده از سهم ها (ضرایب) و اتم های واژه نامه، بازسازی می شوند. مقدار بازسازی شده از مقدار واقعی در هر دو فرض، کسر شده (رابطه های (۴) و (۵)) و در نهایت، مطابق رابطه (۶)، اختلاف های دو فرض از یکدیگر کسر می گردند.

$$r_0(x) = \|x - D^b \hat{\gamma}\| \quad (4)$$

$$r_1(x) = \|x - D \hat{\beta}\| \quad (5)$$

$$D_{\text{SRBBH}}(x) = r_0(x) - r_1(x) \quad (6)$$

جهت تعیین پیکسل هدف، بر روی اختلاف نهایی $(D(x))$ یک حد آستانه قرار می گیرد. اگر مقدار $D(x)$ از حد آستانه بیشتر شود پیکسل مورد نظر هدف و در غیر این صورت پس زمینه خواهد بود [۱۶]. باید توجه داشته باشید که اندازه بردار باقیمانده فرض یک، نسبت به بردار باقیمانده فرض صفر کوچک تر است. در صورت زمینه بودن پیکسل نمونه، بردار باقیمانده دو فرض، به یکدیگر نزدیک بوده و در صورت هدف بودن پیکسل نمونه، اندازه بردار

باقیمانده فرض صفر، نسبت به فرض یک مقدار بیشتری خواهد داشت [۱۶].

Zhang و همکارانش در سال ۲۰۱۵، مدل فوق را نسبت به STD برای کشف هدف مناسب تر می دانند. [۱۶] ایشان دلیل آن را این گونه بیان می کنند که مواد هدف و زمینه در برخی از پیکسل های تصویر به صورت مخلوط با یکدیگر می باشند و در عمل هیچگاه پیکسل های زمینه و هدف خالص نبوده و طیف مواد نسبت به حالت ایده آل خود متفاوت می باشند. این در حالی است که مخلوط بودن ماده هدف و زمینه در فرض اول SRBBH لحاظ شده و پیکسل تصویر به صورت ترکیب خطی از هر دو طیف زمینه و هدف نوشته می شود.

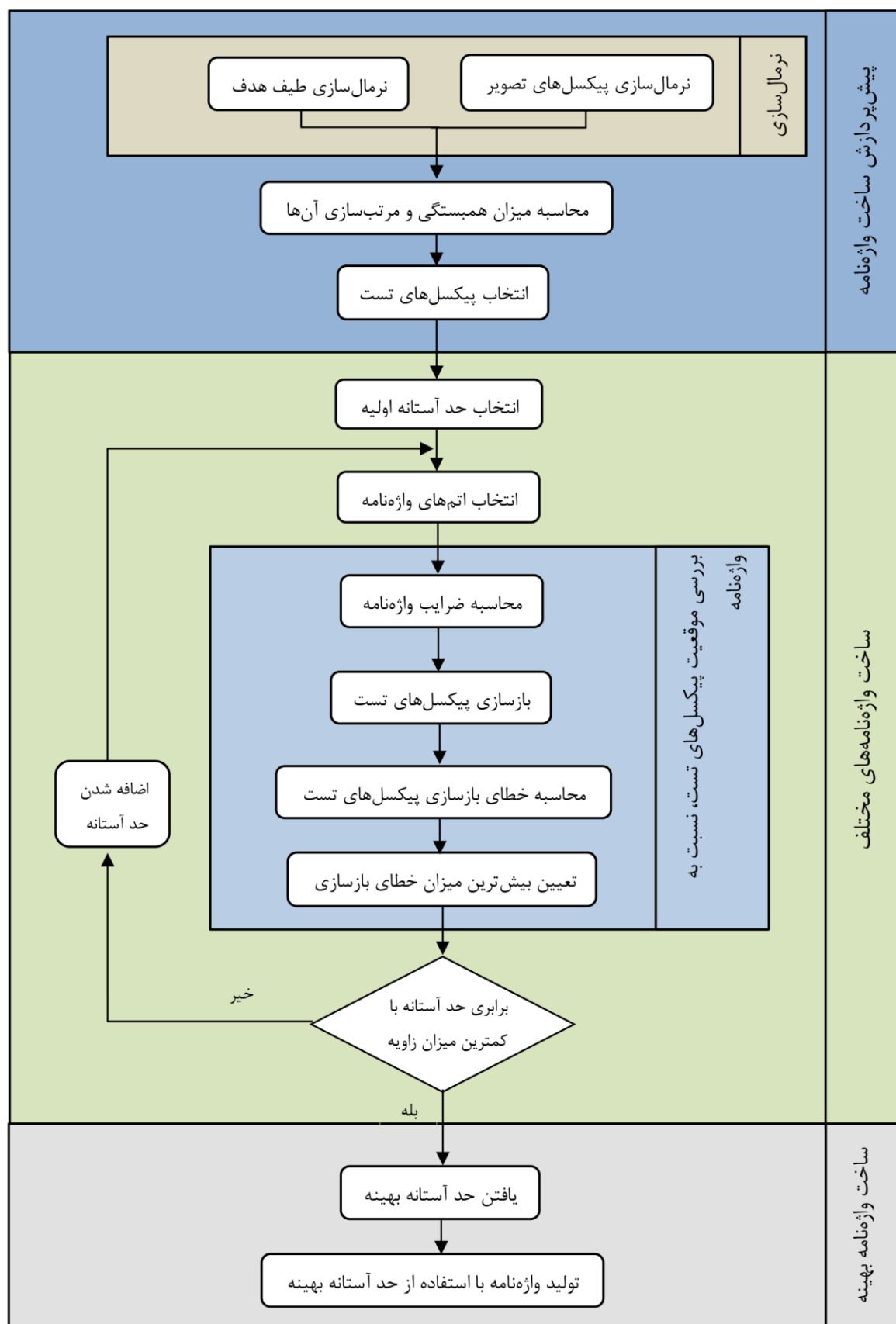
همانطور که بیان شد ساخت واژه نامه یکی از مراحل مهم روش های نمایش تنک، می باشد. با توجه به چالش اصلی در روش های معمول ساخت واژه نامه، یعنی اختلاط طیفی، در ادامه روشی پیشنهاد می شود که تا حد امکان واژه نامه ای خالص ارائه داده و نقاط ضعف روش های قبلی را ندارد.

۳- روش پیشنهادی جهت ساخت واژه نامه

در روش پیشنهادی دو مقصود دنبال می شود. مقصود اول، تشکیل زیرفضاهای مربوط به زمینه یا به عبارتی تشکیل واژه نامه فراکامل زمینه و مقصود دوم، به حداقل رساندن اختلاط طیفی اتم های واژه نامه و هدف می باشد. به منظور رسیدن به این دو مقصود، همبستگی طیف هدف و کل پیکسل های تصویر محاسبه شده و از میان پیکسل های تصویر، از کمترین تا بیشترین میزان همبستگی، واژه نامه های متفاوتی برای زمینه ایجاد می شود. اتم های این واژه نامه ها تشکیل دهنده ی زیرفضای زمینه می باشند. در ادامه کل تصویر به چندین قطعه تقسیم شده و از هر قطعه، یک پیکسل به عنوان تست انتخاب می شود و فاصله پیکسل های تست (موقعیت آن ها) نسبت به زیرفضاهای زمینه ارزیابی می گردند. در نهایت از بین زیرفضاهای ایجاد شده، زیرفضایی انتخاب می شود که پیکسل های تست، کمترین فاصله نسبت به آن زیرفضا را داشته و آن زیرفضا نیز، کمترین میزان اختلاط طیفی با هدف را داشته باشد. با توجه به مطالب بیان شده، روش پیشنهادی جهت ساخت واژه نامه ی زمینه، طی سه مرحله پیش پردازش ساخت

تمامی مراحل آن مطابق شکل ۱ می باشد که در ادامه، به توضیح تمامی مراحل خواهیم پرداخت.

واژه نامه، ساخت واژه نامه های مختلف و در نهایت ساخت واژه نامه بهینه صورت میگیرد. فلوچارت روش پیشنهادی و



شکل ۱- فلوچارت روش پیشنهادی جهت ساخت واژه نامه

۳-۱- مرحله اول: پیش پردازش ها جهت ساخت واژه نامه

به منظور اجرای دقیق تر محاسبات تولید واژه نامه ها، در ابتدا چند گام کوتاه اجرا می شوند که عبارتند از:

۳-۱-۱- گام اول: نرمال سازی

در این گام، طیف هدف و پیکسل های تصویر، به ترتیب با استفاده از رابطه های (۷) و (۸) نرمال می شوند.

$$t^n = t / \text{norm}(t) \quad (7)$$

$$x_i^n = x_i / \text{norm}(x_i) \quad , \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

در رابطه های فوق، t طیف ماده هدف، x_i پیکسل های تصویر و N تعداد آن ها می باشد. در صورتی که تعداد باندهای تصویر L باشد، ابعاد t و هر یک از x_i ها برابر $L \times 1$ خواهد بود. بنابراین رابطه نرم (norm) برای بردار t ، مطابق رابطه (۹) بیان می شود.

$$\text{norm}(t) = \left(\sum_{l=1}^L t_l \right)^2 \quad , \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (9)$$

با استفاده از روابط فوق، مقادیر عددی هر یک از بردارها بر اندازه آن تقسیم می شود و اندازه بردارهای t^n و x_i^n برابر یک می گردد. انجام گام نرمال سازی، به این علت است که اندازه بردارهای طیف هدف و پیکسل های تصویر بر انجام محاسبات تأثیرگذار نباشند.

۳-۱-۲- گام دوم: محاسبه میزان همبستگی و مرتب سازی آن ها

پس از نرمال سازی طیف هدف و پیکسل های تصویر، همبستگی بین آن ها با استفاده از ضرب داخلی و مطابق رابطه (۱۰) انجام می پذیرد.

$$S = [s_1 \ s_2 \ \dots \ s_N] = [x_1^n \ x_2^n \ \dots \ x_N^n]^T t^n \quad (10)$$

در رابطه فوق، $s_1 \ s_2 \ \dots \ s_N$ ، میزان همبستگی، یا به عبارتی زاویه بین تک تک پیکسل های تصویر و طیف هدف می باشند (به دلیل استفاده از ضرب داخلی، اندازه زاویه بعنوان مقدار همبستگی محسوب می شود).

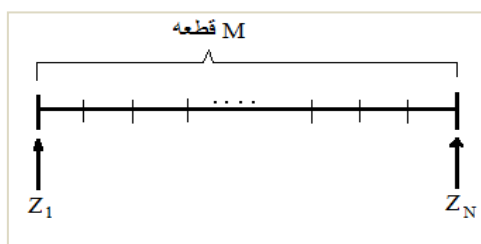
پس از محاسبه زاویه، این مقادیر، به صورت زیر مرتب سازی می شوند.

$$Z = \text{sort}(s_1, s_2, \dots, s_N) \quad , \quad Z = [z_1, z_2, \dots, z_N] \quad (11)$$

در رابطه فوق، $z_1, z_2, \dots, z_N$ ، مقادیر مرتب شده همبستگی (زاویه) می باشند. در این تحقیق، Z فضای همبستگی نامیده می شود.

۳-۱-۳- گام سوم: انتخاب پیکسل های تست

در این گام، کل فضای همبستگی به M قطعه تقسیم شده و از ابتدای هر قطعه یک پیکسل به عنوان تست انتخاب می شود (شکل ۲). همان طور که در بخش ۳ بیان شد، انتخاب پیکسل های تست به منظور بررسی موقعیت پیکسل های تصویر نسبت به زیر فضای زمینه انجام می پذیرد. انتخاب تعداد محدود پیکسل های تست نیز، به منظور کوتاه تر شدن زمان اجرای محاسبات مراحل بعدی انجام می گردد. به عبارت دیگر به جای استفاده از کل پیکسل های تصویر، نماینده هایی از آن ها (پیکسل های تست) انتخاب می شوند.



شکل ۲- طبقه بندی تصویر به M قسمت و انتخاب پیکسل های تست

۳-۲- مرحله دوم: ساخت واژه نامه های مختلف

در این مرحله، با انتخاب یک حد آستانه اولیه بر روی مقدار همبستگی پیکسل های تصویر با طیف هدف در فضای همبستگی، واژه نامه اولیه ای تشکیل شده و پیکسل های تست با استفاده از اتم های این واژه نامه اولیه بازسازی می شوند. سپس در یک روال تکرار شونده، حد آستانه نهایی مناسب و بدنبال آن واژه نامه فرا کامل بدست می آید. در این فرآیند، هر کدام از واژه نامه ها نیز بر اساس تقسیم فضای همبستگی به زیر بخش ها و انتخاب یک پیکسل از هر فضا به عنوان اتم های آن ساخته می شود. در ادامه به بیان گام های مربوط به این مرحله پرداخته می شود.

۳-۲-۱- گام اول: انتخاب حد آستانه اولیه

در اولین گام از این مرحله پس از تشکیل فضای همبستگی و تعیین کمترین و بیشترین مقدار همبستگی، حد

در رابطه فوق، x, D و γ به ترتیب واژه‌نامه، پیکسل تست و ضرایب مربوط به اتم‌های واژه‌نامه هستند و M و L به ترتیب تعداد باند و تعداد پیکسل‌های تست می‌باشند. با توجه به اینکه حدآستانه در یک روال تکرار شونده تغییر می‌کند، بر اساس آن واژه‌نامه‌های جدید ساخته می‌شود، ممکن است برای برخی حدآستانه‌ها، تعداد اتم‌های ایجادشده کمتر از تعداد باندهای تصویر می‌باشد. بنابراین برای این حالت، از منظر مسئله بهینه‌سازی، تعداد مشاهدات (تعداد اتم‌های واژه‌نامه) نسبت به مجهولات (تعداد باندها)، کمتر است. از این رو، برای محاسبه ضرایب واژه‌نامه‌ها باید روشی غیر از کمترین مربعات، مثل "تعقیب‌کننده حریص"^۱ و یا بهینه‌سازی محدب استفاده شود. در این تحقیق جهت محاسبه ضرایب، روش OMP به دلیل سادگی و پایین بودن پیچیدگی محاسباتی نسبت به سایر روش‌های تعقیب‌کننده حریص، مورد استفاده قرار گرفته شد [۱۱، ۱۲، ۱۸-۲۰].

• بازسازی و محاسبه میزان خطای بازسازی پیکسل‌های تست:

کل پیکسل‌های تست، با استفاده از اتم‌ها و ضرایب محاسبه‌شده در گام قبل، مطابق رابطه (۱۴) بازسازی می‌شوند.

$$\hat{x} = D\gamma \quad (14)$$

سپس مقدار واقعی هر یک از پیکسل‌های تست، از مقدار برآورد شده آن‌ها کسر می‌گردد. این اختلاف، تحت عنوان خطای بازسازی بیان می‌شود و برای تمام پیکسل‌ها مطابق رابطه (۱۵) محاسبه می‌شوند.

$$r_l(x) = \|x_l - D\gamma\|_2, \quad l = 1, 2, \dots, M \quad (15)$$

در نهایت بیشترین میزان خطای بازسازی، مطابق رابطه (۱۶) تعیین می‌شود.

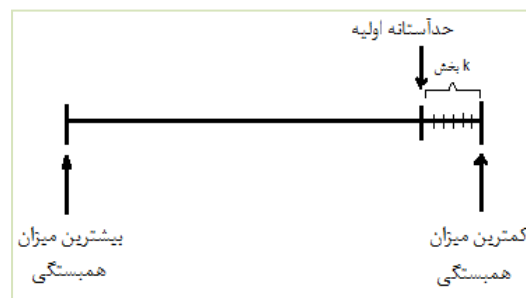
$$R_j = \max(r_l), \quad l = 1, 2, \dots, M, \quad (16)$$

مقدار محاسبه شده R_j ، دورترین فاصله یک پیکسل تصویر نسبت به زیرفضای ایجاد شده می‌باشد.

آستانه‌ی اولیه‌ای مطابق رابطه (۱۲) در بازه همبستگی و نزدیک به کمترین میزان آن در نظر گرفته می‌شود (شکل ۳).

$$\tau_1 = \min(Z) + \text{step} \quad (12)$$

در رابطه بالا، مقدار Z با استفاده از رابطه (۱۱) محاسبه شده و $\min(Z)$ ، کمترین مقدار از بین مقادیر Z است. step نیز فاصله بین کمترین میزان همبستگی و حد آستانه می‌باشد.



شکل ۳- تقسیم‌بندی محدوده زاویه‌ای به k بخش، برای تشکیل واژه‌نامه

۳-۲-۲- گام دوم: انتخاب اتم‌های واژه‌نامه

در این گام محدوده همبستگی، از کمترین میزان تا حد آستانه، به k قسمت تقسیم شده و مطابق شکل ۳، از ابتدای هر قسمت، یک پیکسل به‌عنوان اتم واژه‌نامه انتخاب می‌شود. بدین ترتیب واژه‌نامه با استفاده از تعداد k اتم انتخابی تشکیل می‌گردد. تقسیم‌بندی فضای همبستگی محدود شده توسط حدآستانه به این علت انجام می‌گیرد که زیرفضاهای زمینه از کلاس‌های مختلف تشکیل شود و از هر کلاس یک اتم، به‌عنوان نمونه انتخاب گردد.

۳-۲-۳- گام سوم: بررسی موقعیت پیکسل‌های تست نسبت به واژه‌نامه

پس از این که واژه‌نامه ساخته شد، موقعیت پیکسل‌های تصویر با استفاده از اتم‌های هر واژه‌نامه، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این گام خود به چندین زیربخش تقسیم می‌شود که به شرح ذیل می‌باشد.

• محاسبه ضرایب واژه‌نامه:
پس از تشکیل اتم‌های واژه‌نامه و انتخاب پیکسل‌های تست، مسئله بهینه‌سازی، مطابق رابطه (۱۳) تعریف شده و با استفاده از روش بهینه‌سازی، ضرایب مربوط به اتم‌ها محاسبه می‌گردند.

$$\hat{\gamma}_{M \times L} = \operatorname{argmin} \|x - D\gamma\|_2 \quad (13)$$

^۱ Greedy Pursuit

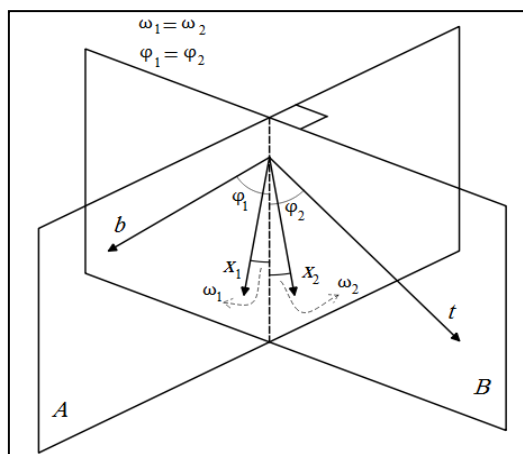
۳-۲-۴- بررسی شرط تکرار

پس از ساخت واژه نامه ابتدایی و بررسی موقعیت پیکسل های تست نسبت به زیر فضای تولید شده، مقدار step، به حد آستانه اولیه اضافه شده و حد آستانه بعدی مطابق رابطه (۱۷) ایجاد می شود.

$$\tau_{j+1} = \tau_j + \text{step} \quad (17)$$

در رابطه فوق، z عدد تکرار و step، فاصله بین حد آستانه ها می باشد. پس از محاسبه حد آستانه و تشکیل زیر فضای جدید، گام های دوم و سوم مرحله دوم، مجدداً تکرار می شوند. این روند تا زمان برابر شدن حد آستانه و بیشترین میزان همبستگی ادامه می یابد. در هر تکرار، محدوده همبستگی از کمترین میزان همبستگی تا حد آستانه همان تکرار، به k بخش تقسیم شده و مطابق آنچه در بخش (۳-۲-۲) بیان شد، k اتم از این محدوده، انتخاب و واژه نامه جدید با استفاده از این k اتم تشکیل می شوند. بدین ترتیب پس از اتمام تعداد تکرارها، واژه نامه های مختلفی با میزان همبستگی های متفاوت نسبت به طیف هدف ساخته می شوند.

از بین واژه نامه های تولید شده، واژه نامه های مربوط به حد آستانه های اولیه، کمترین میزان همبستگی (اختلاط طیفی) با طیف هدف را دارند. مشکل این واژه نامه ها این است که واژه نامه فراکاملی برای زمینه نخواهد بود و کشف هدف را دچار اختلال می نماید. شکل ۴ گویای این موضوع می باشد. در این شکل، t طیف ماده هدف و b یک طیف با کمترین میزان همبستگی نسبت به طیف هدف است و این دو طیف، در صفحه B قرار دارند. در این شکل t و b فاصله یکسانی نسبت به صفحه A داشته ($\varphi_1 = \varphi_2$) و x_1 و x_2 بردارهایی واقع در صفحه A هستند و فاصله یکسانی نسبت به صفحه B دارند ($\omega_1 = \omega_2$). با توجه به فاصله یکسان دو بردار x_1 و x_2 نسبت به بردارهای t و b ، اگر t و b به ترتیب اتم های واژه نامه هدف و زمینه در نظر گرفته شوند، خطای بازسازی دو بردار x_1 و x_2 با استفاده از اتم های واژه نامه هدف و زمینه، مقادیر یکسانی خواهند داشت. در صورتی که یک اتم دیگر، به مجموعه اتم ها اضافه شود، مقادیر باقیمانده متفاوتی ایجاد می شود. در صورت زمینه بودن اتم اضافه شده، بردارهای x_1 و x_2 متناسب با نزدیک بودن به اتم جدید، برچسب دهی می شوند.

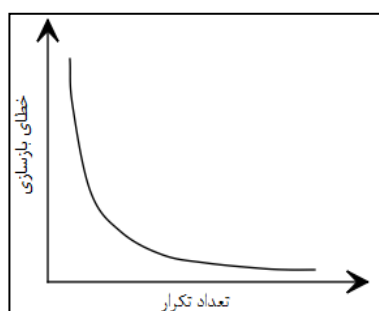


شکل ۴- نمایش اتم های واژه نامه و پیکسل های تصویر در فضای ویژگی به صورت شماتیک

با توجه به مطالب فوق، انتخاب واژه نامه هایی با کمترین میزان همبستگی (بیشترین میزان زاویه)، کشف هدف را دچار اختلال می نماید. واژه نامه های مربوط به حد آستانه های نزدیک به طیف هدف نیز، اختلاط طیفی بالایی با طیف هدف دارند. بنابراین از بین واژه نامه های مختلف، واژه نامه ای با اختلاط طیفی پایین نسبت به طیف هدف، انتخاب می شود.

شکل ۵ به صورت شماتیک نشان دهنده طیف هدف و پیکسل های تصویر می باشد. در این شکل، $x_1, x_2, \dots, x_5$ درون آبرصفحه A و پیکسل x_6 و طیف هدف (t) بیرون آبرصفحه قرار دارند. شکل ۶ نمایش دیگری از شکل ۵ است و نشان دهنده طیف هدف و حد آستانه های مختلف می باشد. با توجه به این شکل، می توان به خوبی، حد آستانه ها و زیرفضاهای مربوط به آن ها را درک نمود. در این شکل نیز موقعیت پیکسل های $x_1, x_2, \dots, x_6$ و طیف هدف، همانند شکل ۵ می باشد. با توجه به شکل ۶، اگر بردار x_1 (مربوط به حد آستانه اولیه) به عنوان اتم واژه نامه زمینه در نظر گرفته شود، خطای بازسازی پیکسل x_6 با استفاده از این اتم، برابر مقدار $\|e_1\|_2$ (اندازه بردار e_1) است. در صورتی که x_1 و x_2 بردارهای پایه فضای ابر صفحه A باشند، خطای بازسازی پیکسل x_6 با استفاده از اتم های واقع در حد آستانه دوم (x_1, x_2) به اندازه فاصله بردار t از ابرصفحه A و برابر مقدار $\|e_2\|_2$ (اندازه بردار e_2) خواهد بود. با توجه به اینکه x_1 و x_2 بردارهای پایه فضای A می باشند، در صورتی که مجموعه اتم های x_3, x_4, x_5 به مجموعه اتم های x_1, x_2 اضافه شوند، این اتم ها در زیر فضای x_1, x_2 واقع در آبرصفحه A قرار گرفته و خطای بازسازی پیکسل x_6 با

محور افقی این نمودار تعداد تکرارها و محور قائم آن، بیشینه خطای بازسازی در هر تکرار است. در اینجا باید در نظر داشته باشید که بازاء هر بار تکرار، یک واژه‌نامه تولید می‌شود و بدین ترتیب این نمودار دوبعدی بیان کننده مقدار خطای بازسازی بازاء هر کدام از واژه‌نامه‌ها نیز می‌باشد. عبارت دیگر بازاء هر عدد تکرار یک واژه‌نامه تولید می‌شود و عدد تکرار نشان‌دهنده این است که آن واژه‌نامه در چندمین تکرار و به دنبال آن بازاء کدام حدآستانه تولید شده است. این نمودار را می‌توان به طور کلی مطابق شکل ۷ تصور کرد.

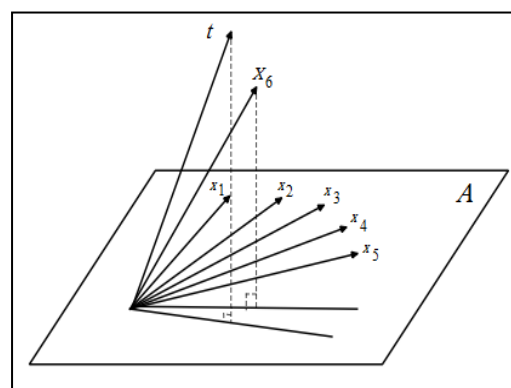


شکل ۷- نمودار دوبعدی (شماتیک)، بیش‌ترین خطای بازسازی برحسب تعداد تکرار

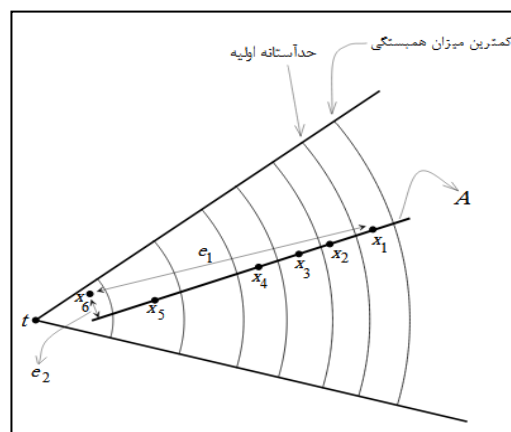
با توجه باینکه در نمودار فوق، افزایش تعداد تکرار در روی محور افقی نشان‌دهنده تشکیل واژه‌نامه بازاء حدآستانه بزرگتر می‌باشد لذا می‌توان گفت که مقادیر محور افقی، نشان‌دهنده میزان اختلاط طیفی نیز هست. به عبارت دیگر، با اضافه شدن تعداد تکرارها، واژه‌نامه‌های حاصل شده، همبستگی بیشتری با طیف هدف خواهند داشت. مقادیر محور قائم نیز میزان در بر گرفته شدن پیکسل‌های تصویر، توسط زیرفضای ایجاد شده هر واژه‌نامه را نشان می‌دهند. با توجه به این که مقصود، داشتن زیرفضای کامل است، بنابراین بیشینه خطای بازسازی، باید به کمترین میزان برسد و با توجه به مقصود اول (کمینه بودن اختلاط طیفی اتم‌های واژه‌نامه و طیف هدف)، فاصله مبدأ نمودار نسبت به تک تک نقاط نمودار محاسبه می‌شود و نقطه‌ای که نزدیک‌ترین فاصله را با مبدأ نمودار داشته باشد، به عنوان نقطه بهینه معرفی شده و حد آستانه و واژه‌نامه مربوط به آن نیز، واژه‌نامه بهینه می‌باشد. به عبارت دیگر این نقطه دو مقصود کمینه بودن اختلاط طیفی و کمینه بودن خطای بازسازی (زیرفضای کامل) را شامل می‌شود.

با توجه به تفاوت در کمیت‌های محور افقی و قائم نمودار شکل ۷، بازه عددی محور قائم و محور افقی، اختلاف بسیار زیادی با یکدیگر خواهند داشت. از این رو به منظور تأثیرگذاری

استفاده از اتم‌های $x_1, x_2, \dots, x_5$ نیز برابر $\|e_2\|_2$ می‌باشد. با توجه به مطالب فوق، مشخص است که مجموعه اتم‌های x_3, x_4, x_5 نیز در همان زیرفضای x_1, x_2 قرار دارند و تنها تفاوت آن‌ها، میزان اختلاط طیفی‌شان با طیف هدف می‌باشد. بنابراین از بین واژه‌نامه‌های مختلف، واژه‌نامه‌ای انتخاب می‌گردد که زیرفضای کاملی از زمینه ارائه دهند و درعین حال کمترین میزان اختلاط طیفی را با هدف داشته باشد. تولید واژه‌نامه با ویژگی‌های بیان شده، تحت عنوان واژه‌نامه بهینه می‌باشد و در طی مرحله مجزا انجام می‌شود که در ادامه به توضیح آن می‌پردازیم.



شکل ۵- طیف ماده هدف و پیکسل‌های تصویر، در فضای ویژگی، به صورت شماتیک



شکل ۶- طیف هدف (t) و پیکسل‌های واقع در تقسیمات زاویه‌ای

۳-۳- ساخت واژه‌نامه بهینه

این مرحله، در دو گام انجام می‌شود که به شرح ذیل می‌باشند.

۳-۳-۱- گام اول: یافتن حد آستانه بهینه

بیشترین خطای بازسازی (مربوط به پیکسل‌های تست)، به ازای تعداد تکرارها، نموداری دوبعدی ایجاد می‌نماید.

یکسان این دو بازه برای ساخت واژه نامه بهینه، مطابق رابطه (۱۸) مقادیر بازه محور قائم در بازه محور افق قرار می گیرد.

$$P_j = \left(\frac{R_j - \min(R_j)}{\max(R_j) - \min(R_j)} \times j \right) + 1 \quad (18)$$

در رابطه فوق، j عدد تکرار و R_j بیشینه خطای بازسازی در تکرار j ام هستند. اعداد P_j نیز در بازه اعداد j می باشد. با توجه به این که ماده هدف نسبت به زمینه، بخش کمتری از تصویر را شامل می شود و از طرفی، تعداد تکرار در شکل ۷، نشان دهنده میزان اختلاط طیفی اتم ها با طیف هدف می باشد؛ بنابراین به کمینه اختلاط طیفی (محور افقی) نسبت به خطای بازسازی (محور قائم) وزن کمتری نسبت داده می شود و مطابق رابطه (۱۹)، محور قائم در یک عدد به عنوان وزن، ضرب شده و فاصله مبدأ نمودار به صورت وزن دار از تک تک نقاط نمودار محاسبه می شود.

$$P_j^W = n \times P_j \quad (19)$$

در رابطه فوق، n عدد وزن و P_j^W مقادیر محور قائم به صورت وزن دار می باشند.

۳-۳-۲- گام دوم: تولید واژه نامه با استفاده از حد آستانه بهینه

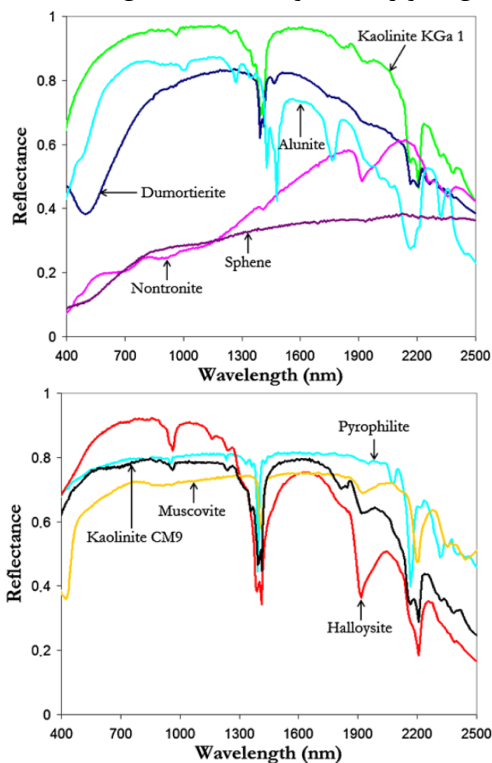
پس از تعیین نقطه بهینه روی نمودار و عدد تکرار مربوط به آن، با استفاده از رابطه (۱۷) حد آستانه بهینه مشخص می شود. در نهایت مطابق آنچه در بخش ۲-۳-۲ بیان شد، محدوده همبستگی از کمترین مقدار تا حد آستانه بهینه، به k قسمت تقسیم شده و از هر قسمت، یک پیکسل به عنوان اتم واژه نامه زمینه انتخاب می شود.

در این الگوریتم، چند پارامتر باید تنظیم شوند. یکی از این پارامترها، پارامتر $step$ یا به عبارتی فاصله بین حد آستانه ها می باشد. در صورت بزرگ انتخاب شدن مقدار پارامتر $step$ ، فاصله بین حد آستانه ها زیاد شده و تعیین مقدار حد آستانه با دقت پایین انجام می شود، از طرف دیگر با کوچک انتخاب شدن مقدار پارامتر $step$ ، زمان اجرای الگوریتم طولانی تر شده و تأثیری بر بهبود دقت کشف ماده هدف، نخواهد داشت. M و k نیز، به ترتیب تعداد پیکسل های تست و تعداد اتم های واژه نامه در هر تکرار می باشند. در صورت بزرگ انتخاب شدن این مقادیر، زمان اجرای الگوریتم طولانی شده و با کوچک انتخاب شدن

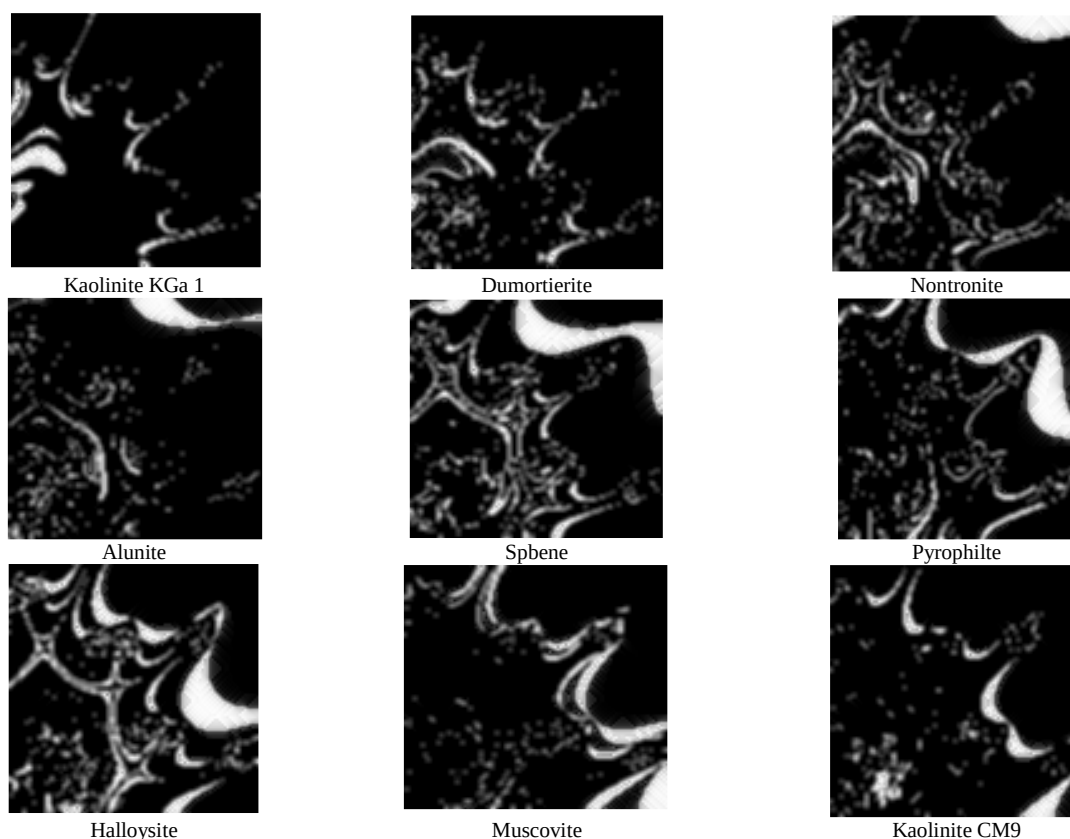
آن ها، توزیع مناسبی از پیکسل های تست و اتم های واژه نامه ایجاد نخواهد شد. با توجه به مطالب فوق، به منظور پیاده سازی الگوریتم، مقدار عددی $step$ ، بسیار کوچک و مقادیر عددی k و M تقریباً بزرگ در نظر گرفته شدند.

۴- داده های مورد استفاده

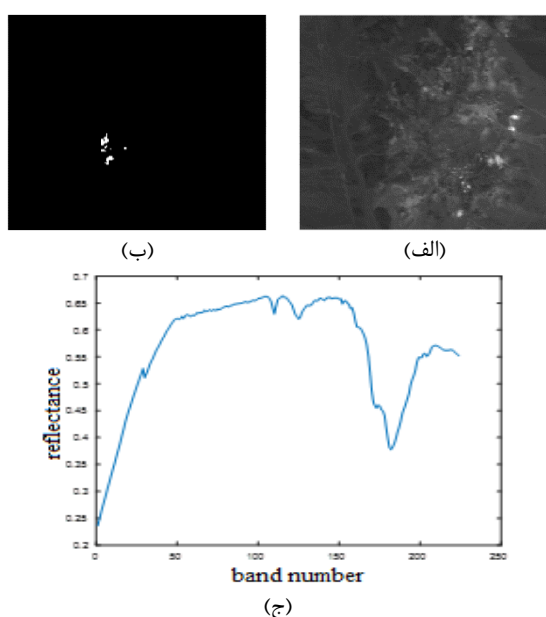
در این تحقیق به منظور بررسی عملکرد الگوریتم های کشف هدف و مقایسه روش پیشنهادی با سایر روش ها، از ۳ داده واقعی و یک داده شبیه سازی استفاده شد. اولین داده مورد مطالعه fractal_1 می باشد که توسط پلازا و همکارانش تهیه شده و شامل ۹ طیف می باشد. طیف این ۹ ماده به صورت تصادفی از کتابخانه طیفی USGS انتخاب شده اند. در شکل های ۸ و ۹، طیف مواد تشکیل دهنده داده و نقشه فراوانی آن ها مشاهده می شود. در شکل ۹ ناحیه های سیاه رنگ، فراوانی صفر درصد و ناحیه های سفید رنگ، فراوانی ۱۰۰ درصد را نشان می دهند. ابعاد این داده 100×100 پیکسل و تعداد باندهای آن ۲۲۱ می باشد. طیف مواد موجود در هر پیکسل به صورت خطی با یکدیگر ترکیب شده اند. همه پیکسل ها به صورت مخلوط می باشند و هیچ کدام از آن ها خالص نیستند. بعد از ساخته شدن داده ها، نویز گوسی با میانگین صفر و نسبت سیگنال به نویزهای متفاوت به داده ها اعمال شده است.



شکل ۸- طیف مواد سازنده fractal_1[21]



شکل ۹- نقشه فراوانی طیف مواد تشکیل دهنده داده fractal_1 [۲۱]



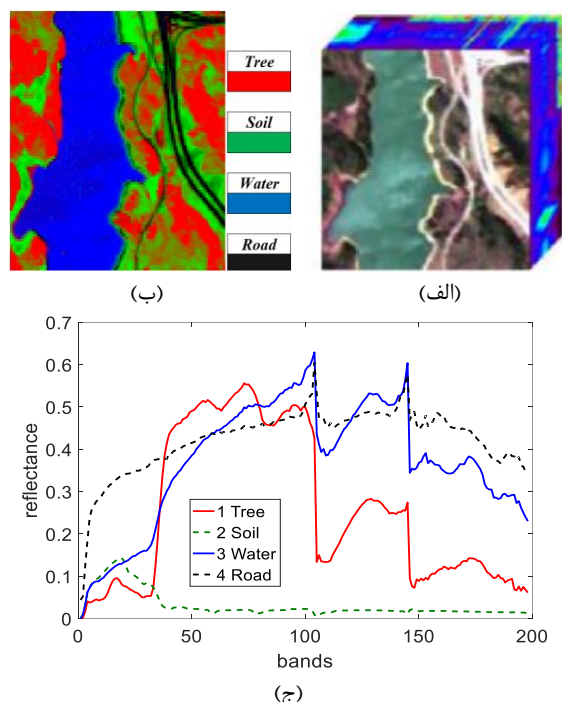
شکل ۱۰- اطلاعات مربوط به ماده هدف داده Cuprite (الف) باند چهارم (بدون نویز) داده Cuprite (ب) داده مرجع زمینی کانی buddingtonite (ج) طیف ماده هدف (طیف کانی buddingtonite) تهیه شده از کتابخانه طیفی USGS

سومین داده مورد مطالعه در این تحقیق San Diego است که با استفاده از سنجنده AVIRIS برداشت شده و منطقه تصویربرداری شده، فرودگاهی واقع در شهر San

داده دوم Cuprite است که در سال ۱۹۹۷ توسط سنجنده هوایی AVIRIS از کوه‌های نوادا آمریکا تهیه شده است. و به علت تنوع و پراکندگی مواد موجود، مورد اقبال بسیاری از محققان کشف هدف در داده‌های فراطیفی قرار گرفته و از معروف‌ترین داده‌های این حوزه می‌باشد. درون منطقه تصویربرداری شده، حدود ۱۴ کانی وجود دارد. این داده، شامل ۲۲۴ باند در محدوده طیفی ۰/۴ تا ۲/۵ میکرومتر و ابعاد پیکسل زمینی ۱۵ متر می‌باشد. در این پژوهش، یک منطقه ۲۰۰×۲۰۰ پیکسلی از این تصویر استفاده شده که تقریباً همان منطقه مورد تحقیق Yang و همکاران، در سال ۲۰۱۵ است [۲۲]. در شکل ۱۰- (الف)، این منطقه با استفاده از باند چهارم (باند بدون نویز) داده قابل مشاهده می‌باشد.

در این تحقیق، جهت کشف هدف و ارزیابی دقت، کانی buddingtonite استفاده شد. طیف این کانی از کتابخانه طیفی USGS تهیه شده است. در شکل ۱۰- (ب) و ۱۰- (ج) داده مرجع زمینی کانی buddingtonite و طیف آن مشخص می‌باشند.

آن قابل مشاهده است. شکل ۱۲- (ج) نیز مربوط به طیف مواد تشکیل دهنده تصویر می باشد [۲۴، ۲۵].



شکل ۱۲- مشخصات مربوط به داده Jasper Ridge (الف) مکعب تصویر Jasper Ridge (ب) نقشه واقعیت زمینی طیف مواد تشکیل دهنده تصویر (ج) طیف مواد تشکیل دهنده داده Jasper Ridge^۱

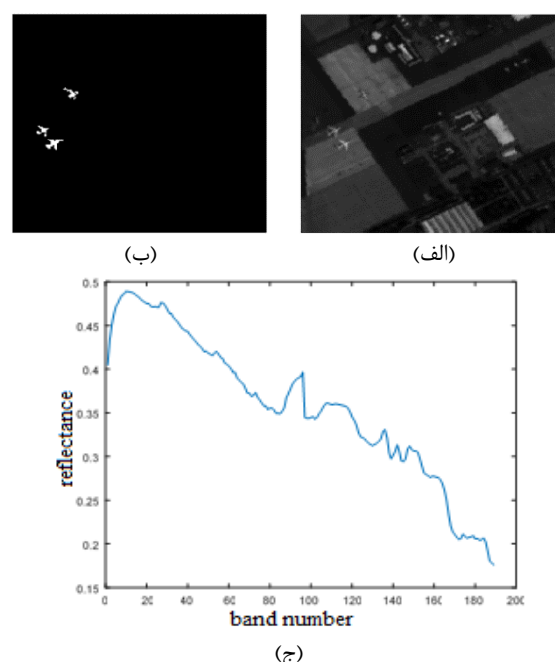
۵- نتایج و بحث و بررسی

همان گونه که در بالا بیان شد، از چالش های اصلی روش های کشف هدف، مقابله با تغییرپذیری طیفی می باشد. یکی از عمده ترین روش های کشف هدف، روش های آماری بوده که با مدل سازی آماری زمینه، با تغییرپذیری طیفی مقابله می نماید. نمایش تنک روش دیگری برای کشف هدف بوده و با ایجاد زیرفضاهایی به صورت ماتریس و با نام واژه نامه، تغییرپذیری طیفی را مدل می نماید.

دو روش ساخت واژه نامه که تاکنون ارائه شده، جفت پنجره و آموزش واژه نامه می باشد و چالش اصلی آن ها، اختلاط طیفی در هنگام ساخت واژه نامه می باشد. از این رو، در این تحقیق، ایده ای جهت ساخت واژه نامه با کمترین میزان اختلاط طیفی پیشنهاد شد.

در این بخش، به منظور مقایسه نتایج روش پیشنهادی در این مقاله با روش های موجود، روش های ACE، CEM و یکی از روش های پایه کشف هدف به نام SAM و همچنین

diego آمریکا با محدوده تقریبی به طول جغرافیایی ۱۱۷/۲۰۶- و عرض جغرافیایی ۳۲/۷۰۷ می باشد [۲۳]. ابعاد این داده ۲۰۰×۲۰۰ پیکسل و اندازه زمینی هر پیکسل آن ۳/۵ متر است و دارای ۲۲۴ باند در محدوده ۳۷۰ تا ۲۵۱۰ نانومتر می باشد. از بین کل باندهای این داده، باندهای در محدوده جذب بخار آب حذف شده و تنها ۱۸۹ باند آن استفاده شده است. ماده هدف در این داده، مربوط به چند هواپیما می باشد. شکل های ۱۱- (الف)، ۱۱- (ب) به ترتیب، مربوط به داده مرجع زمینی هواپیماها و باند اول داده Sandiego می باشند و شکل ۱۱- (ج)، طیف مربوط به شیء هدف (هواپیما) است.



شکل ۱۱- اطلاعات مربوط به ماده هدف داده Sandiego (الف) باند اول داده Sandiego (ب) داده مرجع زمینی داده Sandiego (ج) طیف شیء هدف (هواپیما)

چهارمین داده مورد استفاده در این مقاله Jasper Ridge است که به وسیله سنجنده AVIRIS از منطقه ای در کالیفرنیا برداشت شده و ابعاد آن ۱۰۰×۱۰۰ پیکسل می باشد. این داده دارای ۲۲۴ باند با قدرت تفکیک طیفی ۹/۴۶ نانومتر می باشد. از بین باندهای این داده، باندهای ۱ تا ۳، ۱۰۸ تا ۱۱۲، ۱۵۴ تا ۱۶۶ و ۲۲۰ تا ۲۲۴، به دلیل جذب بخار آب و اثرات جوی حذف شده اند و ۱۹۸ باند آن استفاده شده است. این داده شامل ۴ طیف آب، خاک، درخت و جاده می باشد. در شکل ۱۲- (الف) و ۱۲- (ب) (مکعب تصویر این داده به همراه نقشه واقعیت زمینی

^۱ http://www.escience.cn/people/feiyunZHU/Dataset_GT.html

پیشنهادهای با این روش‌ها مقایسه شده است. این روش‌ها و همچنین روش پیشنهادی، به عنوان یکی از روش‌های ساخت واژه‌نامه، دارای پارامترهایی می‌باشد. در ادامه، ابتدا به توضیح روش‌های جفت پنجره و آموزش واژه‌نامه و پارامترهای آن‌ها و سپس روش پیشنهادی خواهیم پرداخت. چالش اصلی روش‌های جفت پنجره، تعیین ابعاد مناسب آن می‌باشد. در تحقیقات اخیر، انتخاب ابعاد پنجره درونی، به گونه‌ای ارائه شده که ماده هدف، محصور به آن باشد. ابعاد پنجره بیرونی نیز به گونه‌ای انتخاب می‌شود که نماینده‌ای از طیف‌های زمینه در آن وجود داشته باشد [۲۷].

با توجه به شکل ۱۲، ۹ ماده هدف درون این داده، پراکندگی زیاد و ابعاد نامشخصی دارند، باین حال با توجه به این که ماده هدف Halloysite بیشترین وسعت، نسبت به بقیه مواد هدف را دارد، به منظور محصور شدن همه مواد هدف، به وسیله پنجره درونی، ابعاد تقریباً بزرگ 19×19 ، متناسب با پهنای این هدف درون تصویر، در نظر گرفته شد. با مقایسه روی تحقیقات قبلی، مشاهده شد که، تعداد پیکسل‌های پنجره بیرونی بین ۱۵۰ تا ۳۵۰ انتخاب شده است؛ بنابراین برای رسیدن به این مقدار تقریبی، ابعاد پنجره بیرونی 25×25 در نظر گرفته شد و تعداد اتم‌های واژه‌نامه زمینه ۲۶۴ به دست آمد.

یکی دیگر از روش‌های ساخت واژه‌نامه، آموزش آن با استفاده از روش گرادیان می‌باشد که در سال ۲۰۱۵ توسط Niu و همکارانش، پیشنهاد شد. آن‌ها از ۷۰ اتم، جهت آموزش واژه‌نامه استفاده نموده و همچنین روش بهینه‌سازی نقطه داخلی را جهت ساخت واژه‌نامه و محاسبه بردارهای تنک به کار بردند.

در روش پیشنهادی چند پارامتر اولیه از جمله تعداد اتم‌های واژه‌نامه (k)، فاصله بین حد آستانه‌ها (step) و تعداد پیکسل‌های تست (M)، باید تنظیم شوند. همان‌طور که در بخش ۳ بیان شد، کوچک بودن فاصله حد آستانه-ها، باعث طولانی شدن اجرای الگوریتم شده و مقدار بزرگ آن نیز، تعیین حد آستانه دقیق و در نتیجه کشف هدف را دچار اختلال می‌کند. در صورت انتخاب مقادیر کوچک برای k و M ، زمان اجرای الگوریتم طولانی‌تر شده و در صورت انتخاب مقادیر بزرگ برای آن‌ها، ممکن است زیرفضای کامل در همه ابعاد ساخته نشده و درواقع واژه‌نامه فراکامل تولید نشود. در این تحقیق، مقدار تقریباً کوچک 0.01 به عنوان فاصله حد آستانه‌ها استفاده شده و

روش‌های نمایش تنک DW+SRBBH، DW+STD و Gradient+SRBBH روی چند داده پیاده‌سازی شده است، در این روش‌ها، منظور از امان DW و Gradient ساخت واژه‌نامه با استفاده از جفت پنجره و گرادیان (آموزش واژه‌نامه) می‌باشد. SRBBH و STD نیز دو مدل نمایش تنک پرکاربرد می‌باشند. در این تحقیق روش پیشنهادی ساخت واژه‌نامه به همراه مدل نمایش تنک SRBBH مورد استفاده قرار گرفته و به عنوان یک روش نمایش تنک، به نام proposed+SRBBH ارائه شده است.

به منظور بررسی نحوه عملکرد روش‌های کشف هدف، باید مقادیر پیش‌بینی شده آن‌ها، و مقادیر داده واقعی با یکدیگر مقایسه شوند. از این رو جهت ارزیابی دقت داده‌هایی که مرجع زمینی آن‌ها به صورت دو کلاس و با اعداد صفر و یک ارائه شدند از روش ROC^۱ و AUC^۲ استفاده شد [۲۶]. همچنین مرجع زمینی برخی از داده‌ها، اعدادی بین صفر و یک داشته و به صورت فازی ارائه شده‌اند. به منظور ارزیابی دقت این نوع داده‌ها، همبستگی تنک تک پیکسل‌های داده مرجع زمینی و مقدار برآورد شده از روش کشف هدف، محاسبه شدند. در این تحقیق، جهت محاسبه همبستگی، از رابطه (۲۰) استفاده شده است.

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{(\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})^2)(\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2)}} \quad (20)$$

در رابطه فوق، A مربوط به داده مرجع زمینی و B ، داده حاصل از روش کشف هدف و m و n مربوط به ابعاد داده بوده، $\bar{A}$ و $\bar{B}$ نیز به ترتیب میانگین پیکسل‌های داده مرجع زمینی و داده حاصل از روش کشف هدف می‌باشند. هرچه میزان همبستگی دو داده بیشتر باشد کشف هدف با دقت بیشتری انجام می‌گردد. در ادامه نتایج روش‌های کشف هدف بر روی داده‌های فراطیفی، بررسی شده و مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

۵-۱- آزمایش روی داده fractal_1 با نسبت سیگنال به نویز ۷۰ و ۳۰

در این تحقیق، از روش‌هایی چون جفت پنجره و آموزش، جهت ساخت واژه‌نامه زمینه استفاده شده و روش

^۱ Receiver operating characteristic
^۲ Area Under the Curve

تعداد اتم‌های واژه‌نامه در هر مرحله به اندازه ۱۰ درصد کل پیکسل‌های تصویر، در نظر گرفته شد. برای پیکسل‌های تست نیز، ابتدا همبستگی طیف هدف و پیکسل‌های تصویر محاسبه شده و به ترتیب میزان همبستگی پیکسل‌ها، از ۲۰ درصد آن‌ها استفاده شده است. یعنی برای این داده با ۱۰۰۰۰ پیکسل، به ترتیب میزان همبستگی، از هر ۵۰ پیکسل یکی از آن‌ها، به عنوان تست انتخاب گردید. در پژوهش‌های حوزه نمایش تنک، جهت ساخت واژه‌نامه هدف، تعدادی از پیکسل‌های هدف تصویر انتخاب شده و واژه‌نامه را تشکیل می‌دهند. در تحقیقات مختلف تعداد اتم‌های این واژه‌نامه‌ها، بین ۴ تا ۱۶ ارائه شده است. در این تحقیق بیشترین تعداد؛ یعنی ۱۶، برای همه روش‌های نمایش تنک بکار رفته است. با توجه به فازی بودن داده مرجع زمینی، ۱۶ پیکسل از تصویر، که داده مرجع زمینی آن‌ها، عددی بیش‌تر از ۰/۹ داشت، به عنوان اتم‌های واژه‌نامه هدف انتخاب شد.

سطح تنک، یکی از پارامترهای روش‌های بهینه‌سازی حریص، از جمله OMP می‌باشد. تغییر این پارامتر باعث تغییر در دقت نتایج کشف هدف خواهد شد. تحقیقات ارائه شده برای تعیین سطح تنک مناسب، به این صورت می‌باشد که سطح تنک‌های مختلف، برای روش‌های نمایش تنک تست شده و ارزیابی دقت به ازای تک‌تک مقادیر صورت گرفته و سطح تنکی که بهترین دقت را ارائه دهد، به عنوان مناسب‌ترین مقدار انتخاب می‌شود. در سال ۲۰۱۵، Li و همکارانش، مقادیر سطح تنک را وابسته به بعد ذاتی داده می‌دانند [۲۸]. در این تحقیق نیز ابتدا بعد ذاتی داده محاسبه شد و سطح تنک، حول بعد ذاتی داده تست شدند.

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، در روش پیشنهادی الگوریتم بهینه‌سازی OMP به کار رفته است. با توجه به وابسته بودن سطح تنک به مقدار بعد ذاتی داده، ابتدا بعد ذاتی داده با روش پیشنهادی Chang و همکارانش تحت عنوان ^۱NWHFC [۲۹] محاسبه شد. مقدار بعد ذاتی داده به ازای سطح معنادار روش NWHFC ۰/۱ و ۰/۰۱ به ترتیب ۹ و ۵ به دست آمد، از طرفی به این دلیل که داده شامل ۹ طیف بوده، از سطح تنک ۹ جهت بهینه‌سازی استفاده شد. نمودار دو بعدی به ازای این مقدار سطح تنک و برای ۹ طیف هدف مطابق شکل ۱۳، به دست آمد. محور افقی این نمودارها، تعداد تکرار و محور قائم آن‌ها بیشینه خطای بازسازی در هر تکرار می‌باشد.

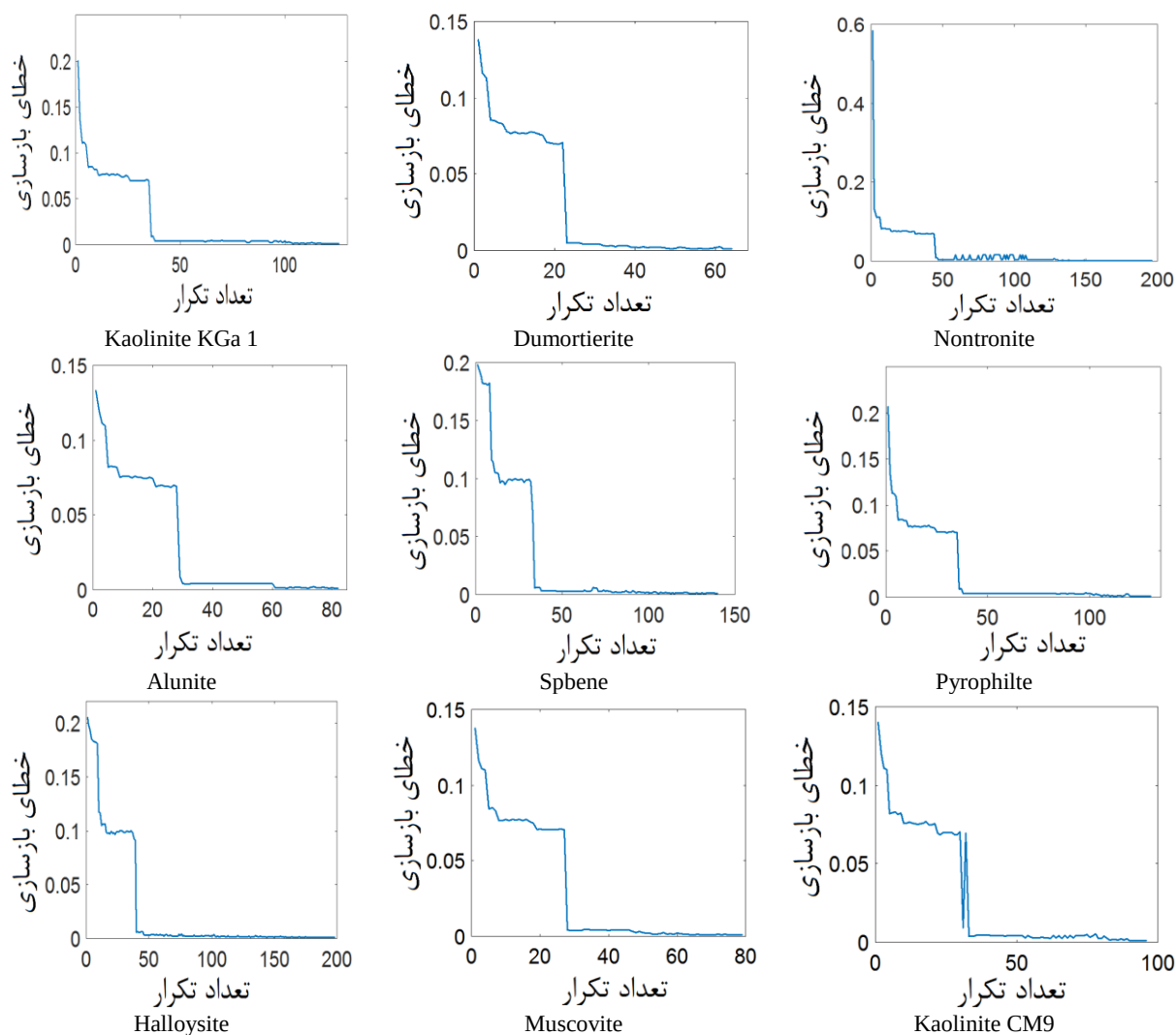
همان‌گونه که در بخش ۳-۲-۲ توضیح داده شد، در هر تکرار از کمترین میزان همبستگی تا مقدار حدآستانه آن تکرار، به k قسمت تقسیم شده و از هر k قسمت واقع در این ناحیه، یک پیکسل به عنوان اتم واژه‌نامه زمینه معرفی شده و پیکسل‌های تست، با استفاده از آن‌ها بازسازی می‌شوند، بیشینه خطای بازسازی در تکرارهای مختلف، برای ۹ ماده هدف موجود در داده fractal_1 با نسبت سیگنال به نویز ۷۰ مطابق شکل ۱۳ می‌باشد. روش پیشنهادی بر روی داده fractal_1 با نسبت سیگنال به نویز ۳۰ نیز اجرا شد و نمودارهایی مشابه نمودارهای شکل ۱۳ به دست آمد، به دلیل حجم زیاد مطالب، از آوردن نمودارهای مربوط به این داده صرف نظر شد.

همان‌طور که در بخش‌های قبل ذکر شد با توجه به دو مقصود ایجاد زیر فضای کامل و کمینه اختلاط طیفی، ابتدا مقادیر محور قائم (خطای بازسازی) در بازه مقادیر محور افقی قرار گرفته، سپس فاصله مرکز نمودار تا هر یک از نقاط محاسبه شده، نزدیک‌ترین نقطه به مرکز نمودار، به عنوان نقطه بهینه انتخاب شده و اتم‌های واژه‌نامه حاصل از این تکرار، به عنوان بهینه‌ترین اتم‌ها، معرفی گردیدند.

با توجه به این که ماده هدف، نسبت به زمینه، بخش کمتری از تصویر را شامل می‌شود، از طرفی تعداد تکرار، نشان‌دهنده میزان اختلاط طیفی اتم‌ها با طیف هدف می‌باشد؛ بنابراین به کمینه اختلاط پیکسل‌ها و طیف هدف (محور افقی) وزن کمتری نسبت داده شد و مقادیر خطای بازسازی در یک عدد به عنوان وزن، ضرب شده و فاصله‌ها به صورت وزن‌دار، از مبدأ نمودار محاسبه شدند. نتایج نهایی کشف هدف، به ازای وزن‌های ۱ تا ۵ و برای ۹ طیف هدف، محاسبه شدند و از بین این وزن‌ها، جهت اطمینان از انتخاب نقطه‌ای با کمترین میزان خطای بازسازی وزن بزرگ ۴ استفاده شد که منجر به بالاترین دقت در بین وزن‌های مختلف شد. به دلیل فازی بودن داده مرجع زمینی، ارزیابی دقت کشف هدف با استفاده از همبستگی داده مرجع زمینی و داده به دست آمده، انجام گردید.

همان‌طور که قبلاً گفته شد، با توجه به وابسته بودن سطح تنک به مقدار بعد ذاتی داده، روش‌های کشف هدف، به ازای مقادیر سطح تنک ۵، ۹ و چند عدد نزدیک به این مقادیر، ارزیابی دقت شد. ارزیابی دقت نهایی روش‌های مختلف برای داده fractal_1 با نسبت سیگنال به نویز ۷۰ و ۳۰ مطابق جدول های ۱ و ۲ می‌باشد، که نتایج روش‌های نمایش تنک به ازای بهترین مقدار سطح تنک ارائه شده است.

^۱ noise-whitened Harsanyi-Farrand-Chang



شکل ۱۳- نمودار دو بعدی روش پیشنهادی، جهت تعیین واژه‌نامه خالص برای ۹ طیف داده fractal_1 با نسبت سیگنال به نویز ۷۰

جدول ۱- ارزیابی دقت نهایی (با استفاده از همبستگی) روش‌های کشف هدف برای تمام طیف‌های داده fractal_1 با نسبت سیگنال به نویز ۷۰

	Proposed +SRBBH	DW +STD	DW+ SRBBH	Gradient +SRBBH	SAM	ACE	CEM
Kaolinite CM9	۰/۹۶۸	۰/۴۲۳	۰/۳۸۳	۰/۴۸۳	۰/۳۲۷	۰/۸۹۲	۰/۹۴۶
Muscovite	۰/۸۶۳	۰/۷۹۱	۰/۲۵۵	۰/۳۷۲	۰/۵۴۲	۰/۸۶۸	۰/۹۳۴
Halloysite	۰/۹۶۸	۰/۴۶۵	۰/۲۷۶	۰/۶۷۰	۰/۷۷۳	۰/۸۲۰	۰/۹۶۹
Pyrophyllite	۰/۹۶۵	۰/۷۹۶	۰/۲۱۹	۰/۲۵۴	۰/۴۲۵	۰/۸۸۴	۰/۹۷۴
Spene	۰/۷۸۸	۰/۴۶۷	۰/۱۷۸	۰/۱۲۴	۰/۵۵۲	۰/۸۳۵	۰/۹۷۱
Alunite	۰/۹۴۶	۰/۳۷۱	۰/۱۶۲	۰/۲۹۰	۰/۳۴۶	۰/۸۶۹	۰/۹۶۳
Nontronite	۰/۹۸۲	۰/۵۰۲	۰/۰۹۰	۰/۴۱۱	۰/۵۶۶	۰/۸۳۱	۰/۹۵۳
Dumortierie	۰/۹۰۱	۰/۳۶۳	۰/۱۸۲	۰/۳۲۷	۰/۳۴۵	۰/۸۲۵	۰/۹۲۵
Kaolinite KGa 1	۰/۹۲۳	۰/۳۹۲	۰/۱۵۴	۰/۳۱۴	۰/۳۶۸	۰/۸۸۰	۰/۹۲۴

جدول ۲- ارزیابی دقت نهایی (با استفاده از همبستگی) روش های کشف هدف برای تمام طیف های داده fractal_1 با نسبت سیگنال به نویز ۳۰

	Proposed +SRBBH	DW +STD	DW+ SRBBH	Gradient +SRBBH	SAM	ACE	CEM
Kaolinite CM9	۰/۵۸۷	۰/۳۷۱	۰/۳۲۵	۰/۴۷۷	۰/۳۲۱	۰/۸۶۷	۰/۷۹۶
Muscovite	۰/۹۶۵	۰/۶۹۵	۰/۲۹۲	۰/۳۵۵	۰/۵۲۳	۰/۸۶۷	۰/۹۴۲
Halloysite	۰/۹۳۵	۰/۷۰۴	۰/۲۷۰	۰/۶۵۵	۰/۷۷۰	۰/۸۱۴	۰/۹۶۱
Pyrophyllite	۰/۹۲۹	۰/۵۹۸	۰/۲۴۵	۰/۲۴۲	۰/۴۰۸	۰/۸۸۲	۰/۹۷۹
Sphene	۰/۷۳۷	۰/۶۵۹	۰/۲۴۱	۰/۱۱۵	۰/۵۳۱	۰/۸۲۶	۰/۹۳۷
Alunite	۰/۸۳۶	۰/۳۹۶	۰/۳۶۹	۰/۲۷۸	۰/۳۳۰	۰/۸۶۲	۰/۹۳۸
Nontronite	۰/۹۱۹	۰/۷۷۷	۰/۳۱۸	۰/۳۹۹	۰/۵۵۶	۰/۸۳۰	۰/۹۴۹
Dumortierite	۰/۷۴۳	۰/۴۴۶	۰/۴۰۶	۰/۳۰۱	۰/۳۴۲	۰/۸۰۷	۰/۸۸۴
Kaolinite KGa 1	۰/۶۲۶	۰/۵۳۸	۰/۳۲۸	۰/۲۹۱	۰/۳۵۵	۰/۸۶۹	۰/۸۰۷

دارد. مقاوم بودن ACE نسبت به نویز، به این علت است که با توجه به فرمول های ACE، این روش نویز را در مدل سازی در نظر می گیرد و نویز تصویر به همراه زمینه با یک پارامتر آماری بیان می شود. این در حالیست که در روش های نمایش تنک، هیچ فرضی در مورد نویز وجود ندارد و این پارامتر مدل سازی نمی شود. عامل دیگر توانایی ACE برای کشف هدف درون داده fractal، به این علت است که با توجه به تغییرات حداقلی طیف هدف درون پیکسل های شامل این طیف، این روش مانند CEM تنها با یک طیف، مدلسازی و کشف هدف را به خوبی انجام می دهد. با توجه به این که عوامل محیطی چون اتمسفر، اثر پیکسل های همسایه و نقص سنجنده برای این دیتا وجود ندارد؛ بنابراین پیکسل های زمینه نیز تغییرات حداقلی داشته و پارامترهای آماری آن، دقیق تر مدلسازی می شوند.

۵-۲- آزمایش روی داده Jasper Ridge

با توجه به این که این داده شامل چهار ماده با طیف های متفاوت می باشد و از طرفی برای هر کدام از آن ها چهار داده مرجع زمینی وجود دارد. بنابراین چهار آزمایش بر روی این داده انجام شد و در هر آزمایش یک ماده به عنوان هدف و مابقی به عنوان زمینه در نظر گرفته شدند. از آنجایی که هر یک از این مواد وسعت های متفاوتی از تصویر را شامل شده اند، بنابراین متناسب با ابعاد هر یک از آن ها ابعاد پنجره درونی و بیرونی لحاظ شد.

ابعاد پنجره درونی آب ۶۵×۶۵ پیکسل و ابعاد پنجره بیرونی ۶۷×۶۷ در نظر گرفته شد. ابعاد پنجره درونی جاده ۷×۷ پیکسل و ابعاد پنجره بیرونی ۱۷×۱۷ در نظر گرفته

همان گونه که در جدول های ۱ و ۲ مشخص است، روش پیشنهادی نسبت به سایر روش های نمایش تنک، عملکرد بهتری از خود نشان داده است. همچنین جدول فوق، نشان می دهد روش CEM نسبت به سایر روش ها، کشف هدف را دقیق تر انجام داده است.

توانمندی بالای CEM در کشف هدف، به این علت است که با توجه به شبیه سازی بودن داده fractal، تغییرات طیف های شامل پیکسل های هدف، تنها تحت تاثیر اختلاط طیف هدف و سایر طیف ها است و متاثر از عوامل محیطی نمی باشد به این علت، پیکسل های هدف، با کمترین میزان تغییرات طیفی همراه است. از آنجایی که روش CEM، تنها از یک طیف برای مدل سازی تغییرات طیفی پیکسل های شامل هدف، استفاده می نماید و با توجه به تغییرات حداقلی پیکسل های هدف، این پیکسل ها شبیه طیف هدف بوده و بنابراین همان یک طیف برای مدل سازی تغییرپذیری طیفی و کشف هدف کارساز می باشد. همچنین عامل دیگر توانایی بالای CEM، به این علت است که در آن یک فیلتر طراحی شده و این فیلتر دارای مقادیر وزنی است که اثر پیکسل های هدف را بیشینه و پیکسل های غیر هدف را کمینه می نماید. بنابراین با توجه به شباهت طیف هدف و پیکسل های شامل آن، این پیکسل ها مقادیر عددی بزرگی به خود می گیرند.

جدول های ۱ و ۲، مقادیر عددی بالایی را برای روش ACE نشان می دهد. با توجه به نویزی بودن داده، این مقادیر نشان دهنده مقاوم بودن این روش در برابر نویز می باشد. همان گونه که در جداول مشخص است این روش برای برخی از طیف ها عملکرد بهتری نسبت به روش پیشنهادی

جهت تعیین نقطه بهینه در این نمودارها، همانند نمودارهای داده fractal_1، ابتدا مقادیر محور قائم در بازه مقادیر محور افقی قرارگرفت و به مقادیر محور قائم وزنی ۴ برابر مقادیر محور افقی نسبت داده شد و نزدیک ترین نقطه به مرکز نمودار به عنوان نقطه بهینه انتخاب شد.

از آنجایی که مقادیر عددی پیکسل های مرجع زمینی این داده، به صورت فازی ارائه شده اند؛ بنابراین به منظور ارزیابی دقت، همبستگی پیکسل های داده مرجع زمینی و مقادیر برآورد شده روش های کشف هدف، محاسبه شده اند. با توجه به وابسته بودن بعد ذاتی داده به مقادیر سطح تنک، روش های مختلف به ازای سطح تنک برابر با بعد ذاتی داده و مقادیر اطراف آن تست شده است.

ارزیابی دقت نهایی برای روش های مختلف، برای ۴ طیف تصویر در قالب جدول به صورت زیر بوده، که نتایج روش های نمایش تنک به ازای بهترین مقدار سطح تنک ارائه شده است.

جدول ۳- ارزیابی دقت نهایی (با استفاده از همبستگی) روش های کشف هدف، برای ۴ طیف هدف موجود در داده Jasper Rigid

	Road	Soil	Water	Tree
Proposed +SRBBH	۰/۶۸۴	۰/۸۹۱	۰/۹۶۶	۰/۹۶۷
DW +STD	۰/۴۱۵	۰/۶۰۵	۰/۹۴۱	۰/۷۷۰
DW+ SRBBH	۰/۱۶۷	۰/۱۸۶	۰/۰۷۹	۰/۱۶۶
Gradient +SRBBH	۰/۴۹۰	۰/۸۱۳	۰/۹۵۰	۰/۷۷۴
SAM	۰/۵۵۳	۰/۷۵۵	۰/۹۸۹	۰/۸۳۰
ACE	۰/۱۸۶	۰/۰۴۷	۰/۳۰۳	۰/۰۳۸
CEM	۰/۲۶۶	۰/۱۵۸	۰/۵۳۶	۰/۱۰۵

۵-۳- آزمایش روی داده های Sandiego و Cuprite

ماده هدف، درون داده Sandiego مربوط به ۳ هواپیما می باشد، داده Cuprite نیز تقریباً شامل ۱۴ کانی است که از بین آن ها، طیف کانی buddingtonite به همراه داده مرجع زمینی آن در اختیار می باشد. با توجه به این که برخی از باندهای داده Cuprite دارای نویز زیادی می باشند، برای حذف این باندها روش پیشنهادی Cai و همکاران، مورد استفاده قرار گرفت. این روش، با برنامه نویسی پیاده سازی شد و باندهای ۱۰۸_۱۱۲، ۱۵۴_۱۶۶ و ۲۲۲ به عنوان باندهای نویزی شناخته شدند.

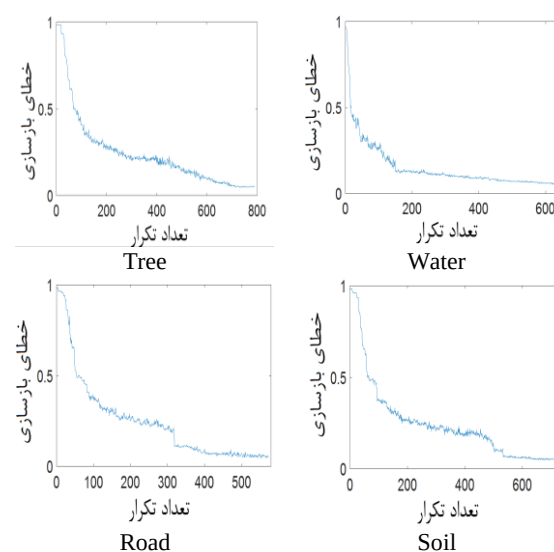
شد. با توجه به داده مرجع زمینی خاک، ابعاد پنجره درونی آن ۲۹×۲۹ و ابعاد پنجره بیرونی ۳۳×۳۳ آن انتخاب شدند.

داده مرجع زمینی درخت، رفتاری به شدت نوسانی برای این هدف را نشان می دهد. با توجه به ابعاد هدف در شکل (۱۲-ب)، به منظور اطمینان از محیط شدن آن، توسط پنجره درونی، ابعاد پنجره درونی ۲۵×۲۵ و ابعاد پنجره بیرونی ۳۱×۳۱ انتخاب شد.

مرجع زمینی این داده، اعدادی بین صفر و یک دارد؛ بنابراین جهت ساخت واژه نامه هدف، ۱۶ پیکسل از تصویر که داده مرجع زمینی آن ها عددی بیشتر از ۰/۹ داشتند، انتخاب شد.

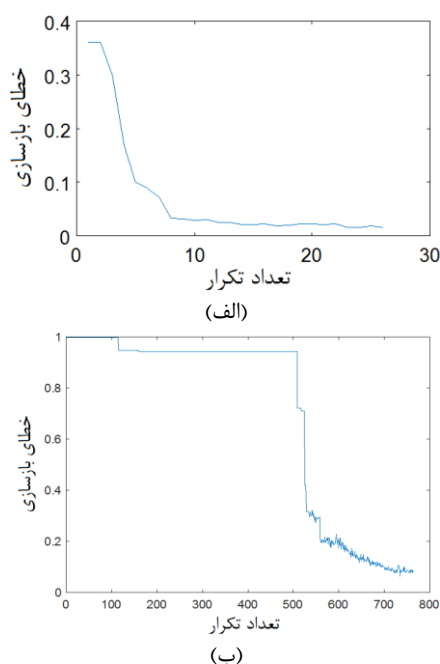
پارامترهای اولیه روش پیشنهادی، دقیقاً همانند داده قبلی تنظیم شده، به این صورت که فاصله بین حد آستانه ها برابر ۰/۰۰۱، تعداد پیکسل های تست برابر ۲۰ درصد پیکسل های تصویر و تعداد اتم های واژه نامه برابر ۱۰ درصد کل پیکسل های تصویر، در نظر گرفته شد.

در روش پیشنهادی، الگوریتم بهینه سازی OMP به کاررفته است. با توجه به وابسته بودن سطح تنک به بعد ذاتی داده، ابتدا بعد ذاتی داده با روش NWHFC محاسبه شد و مقدار آن به ازای سطح معنادار ۰/۱ و ۰/۰۱ به ترتیب ۱۴ و ۹ به دست آمد. نمودار دو بعدی روش پیشنهادی برای ۴ هدف خاک، آب، جاده و درخت به ازای سطح تنک ۱۴، به صورت زیر می باشد.



شکل ۱۴- نمودارهای دو بعدی روش پیشنهادی، جهت تعیین واژه نامه خالص، برای ۴ طیف هدف داده Jasper Rigid

۰/۱ و ۰/۰۱ به ترتیب ۱۳ و ۷ به دست آمد. همچنین بعد ذاتی برای داده Cuprite به ازای سطح معنادار ۰/۱ و ۰/۰۱ به ترتیب ۶ و ۴ برآورد شدند. نمودار دوبعدی روش پیشنهادی، برای داده‌های Cuprite و Sandiego، به ترتیب به ازای سطح تنگ ۶ و ۱۳، مطابق شکل‌های ۱۵- (الف) و ۱۵- (ب) می‌باشد.



شکل ۱۵- نمودار دو بعدی روش پیشنهادی، جهت تعیین واژه‌نامه خاص، برای داده‌های (الف) Cuprite و (ب) Sandiego

واژه‌نامه بهینه، با استفاده از نزدیک‌ترین نقطه به مبدا نمودار و همانند آنچه که برای داده‌های قبلی توضیح آن رفت، انجام می‌شود.

برای ارزیابی دقت روش‌های نمایش تنگ، مساحت زیر نمودار ROC یا به عبارتی AUC محاسبه شده است. با توجه به وابسته بودن بعد ذاتی داده به مقادیر سطح تنگ، روش‌های مختلف به ازای سطح تنگ برابر با بعد ذاتی داده و مقادیر اطراف آن تست شده است.

در هر روش، بیشترین مقدار AUC به ازای مقادیر مختلف سطح تنگ، به عنوان مقدار نهایی آن روش در نظر گرفته شده و برای ارزیابی دقت بین روش‌های مختلف، بهترین مقدار AUC آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. ارزیابی دقت به ازای بهترین مقادیر، در قالب AUC و نمودار ROC به صورت زیر می‌باشند.

جهت کشف کانی buddingtonite درون داده Cuprite و هواپیماهای درون داده Sandiego، روش‌های مختلف کشف هدف، از جمله ACE، CEM و SAM و چند روش نمایش تنگ از جمله DW+SRBBH، DW+STD، gradient+SRBBH و روش پیشنهادی به همراه مدل SRBBH (proposed+SRBBH) روی این داده آزمایش شده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

همان‌طور که قبلاً بیان شد ابعاد پنجره درونی باید به گونه‌ای باشد که هدف به آن محصور شود. همچنین ابعاد پنجره بیرونی باید به گونه‌ای باشد که نماینده‌ای از طیف‌های زمینه در آن وجود داشته باشد. با توجه به داده مرجع زمینی کانی buddingtonite، مطابق شکل ۴-۶ (ب)، برای محصور شدن هدف با پنجره درونی، ابعاد آن 9×31 انتخاب شد. برای یافتن بهترین ابعاد پنجره بیرونی، چند بُعد پنجره بیرونی با استفاده از مدل STD و سطح تنگ ۶ تست گردید. پنجره بیرونی با ابعاد 15×37 منجر به بالاترین دقت شد. این ابعاد پنجره بیرونی و درونی برای روش DW+SRBBH نیز مورد استفاده قرار گرفت.

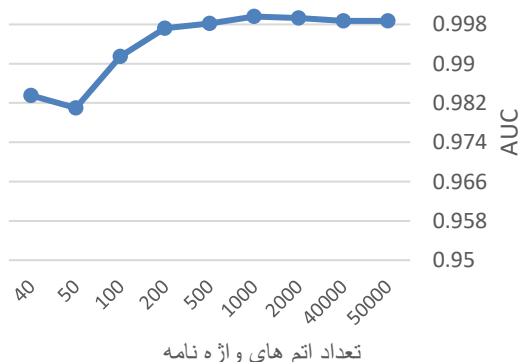
طبق مقاله Huang و همکارانش، جهت محصور شدن عارضه هواپیما توسط پنجره درونی، ابعاد آن 15×15 و ابعاد پنجره بیرونی 25×25 در نظر گرفته شد [۳۰].

یکی دیگر از روش‌های ساخت واژه‌نامه، آموزش آن با استفاده از روش گرادین می‌باشد که در سال ۲۰۱۵ توسط Niu و همکارانش، پیشنهاد شد. آن‌ها برای داده Sandiego، از ۷۰ اتم جهت آموزش واژه‌نامه در روش gradient+SRBBH استفاده نمودند [۸]. در این تحقیق نیز برای هر دو این داده‌ها از همین تعداد اتم استفاده شده است. جهت ساخت واژه‌نامه هدف، در تحقیقات انجام شده مربوط به این داده، ۶ پیکسل نمونه از تصویر، به عنوان واژه‌نامه هدف انتخاب می‌شود. ساخت واژه‌نامه هدف برای هر دو داده، به همان نحو تحقیقات پیشین انجام گرفت.

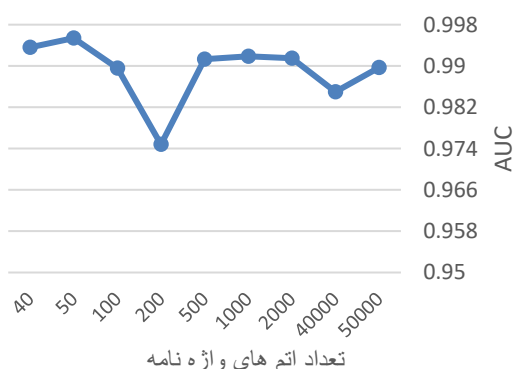
پارامترهای اولیه روش پیشنهادی، دقیقاً همانند داده‌های قبلی تنظیم شده، به این صورت که فاصله بین حد آستانه‌ها برابر ۰/۰۰۱، تعداد پیکسل‌های تست برابر ۲۰ درصد پیکسل‌های تصویر و تعداد اتم‌های واژه‌نامه برابر ۱۰ درصد کل پیکسل‌های تصویر، در نظر گرفته شد. در روش پیشنهادی، الگوریتم بهینه‌سازی OMP به کار رفته است؛ بنابراین ابتدا بعد ذاتی داده با روش NWHFC محاسبه شد و مقدار آن برای داده Sandiego به ازای سطح معنادار

با مقایسه بین مقادیر AUC مشخص می‌شود که روش پیشنهادی نسبت به روش‌های جفت پنجره و آموزش واژه‌نامه و سایر روش‌های کشف هدف، عملکرد بهتری داشته است.

یکی از پارامترهای موجود در روش پیشنهادی، تعداد اتم‌های واژه‌نامه می‌باشد که با پارامتر k معرفی شده است. به‌منظور بررسی تاثیر این پارامتر بر عملکرد کلی روش، مقادیر مختلف این پارامتر بر روی دو داده Sandiego و Cuprite آزمایش شد. در این آزمایش سطح تنک الگوریتم بهینه‌سازی واقع در روش پیشنهادی برای هر داده برابر با بعد ذاتی آن تنظیم شده است (برای Sandiego بعد ذاتی برابر عدد ۱۳ و برای Cuprite بعد ذاتی برابر عدد ۴). نتایج این آزمایش مطابق شکل‌های ۲۰ و ۲۱ می‌باشد.

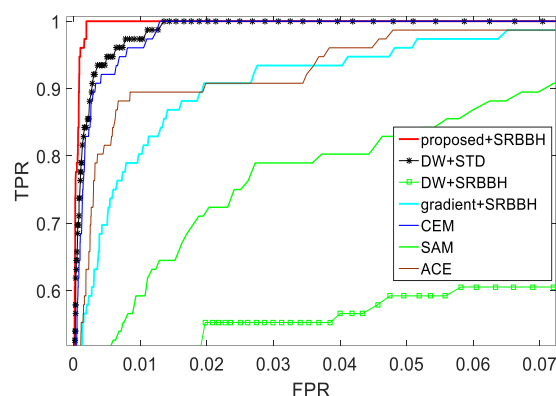


شکل ۲۰- نمودار نتایج کشف هدف روش پیشنهادی حاصل از مقادیر مختلف k ، آزمایش شده بر روی داده Cuprite

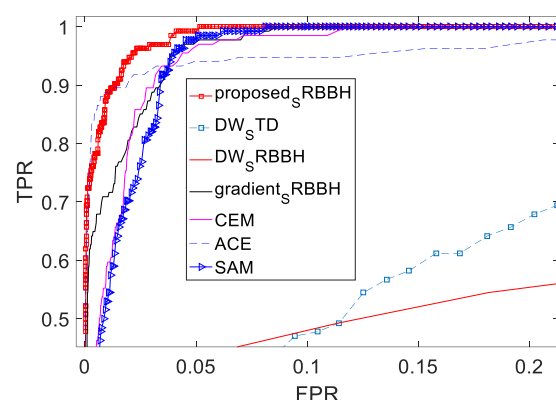


شکل ۲۱- نمودار نتایج کشف هدف روش پیشنهادی حاصل از مقادیر مختلف k ، آزمایش شده بر روی داده Sandiego

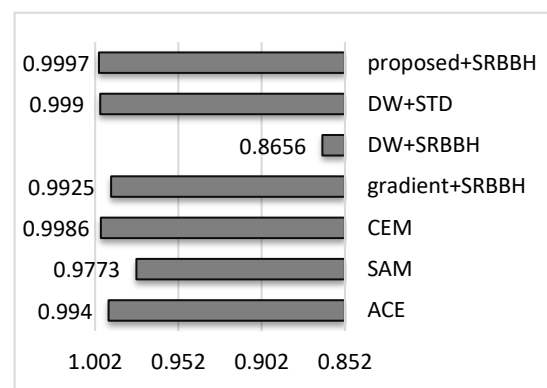
همانطور که در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ قابل مشاهده است، مقادیر مختلف پارامتر k اختلاف زیادی در نتایج کشف هدف ایجاد نمی‌نماید. اما قطعاً انتخاب مقادیر بالا برای k ، احتمال ایجاد زیرفضای کامل را بیشتر خواهد کرد.



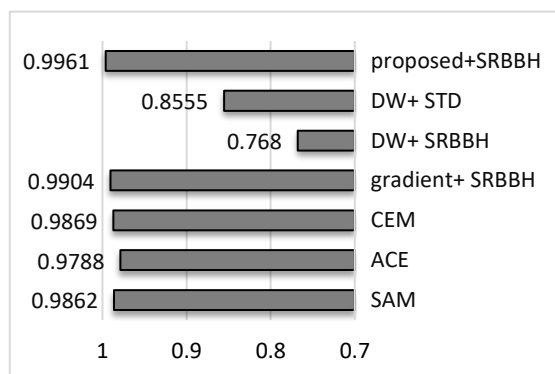
شکل ۱۶- نمودار ROC روش‌های مختلف کشف هدف برای داده Cuprite



شکل ۱۷- نمودار ROC روش‌های مختلف کشف هدف برای داده Sandiego



شکل ۱۸- مقادیر AUC، برای روش‌های کشف هدف در داده Cuprite



شکل ۱۹- مقادیر AUC، برای روش‌های کشف هدف در داده Sandiego

به منظور مقایسه خالص بودن واژه نامه های حاصل از روش های مختلف، همبستگی بین اتم های واژه نامه های تولید شده و طیف ماده هدف محاسبه شدند و بیشترین مقادیر همبستگی هر واژه نامه و طیف هدف، با یکدیگر مقایسه شدند. در روش پیشنهادی ساخت واژه نامه، الگوریتم OMP استفاده شد و واژه نامه ساخته شده و نتایج حاصل از آن، به ازای سطح تنک برابر با بعد ذاتی داده می باشد. بیشترین مقدار همبستگی واژه نامه حاصل از روش پیشنهادی و طیف ماده هدف، برای داده Cuprite و Sandiego به ترتیب برابر 0.75 و 0.58 و بیشترین مقدار همبستگی برای واژه نامه حاصل از روش گرادیان به ترتیب فوق برابر 0.82 و 0.96 می باشد. مقایسه مقادیر، نشان از کمتر بودن میزان اختلاط طیفی واژه نامه حاصل از روش پیشنهادی نسبت به گرادیان می باشد.

یکی از موارد نشان دهنده کارایی روش ها، زمان اجرای آن ها می باشد. از این رو در این مقاله، زمان اجرای الگوریتم ها با یکدیگر مقایسه شد. از آنجایی که در روش های نمایش تنک، سطح تنک بر زمان اجرا تاثیر گذار است. به منظور یکسان سازی شرایط آزمایش روش های نمایش تنک، روش های شامل الگوریتم بهینه سازی OMP، برای تمام داده ها، به ازای سطح ۱۰ تنک اجرا شدند. پارامترهای روش proposed+SRBBH نیز مطابق همان موارد بیان شده در صفحات قبل تنظیم شد. تمامی آزمایش ها نیز در سامانه ای با مشخصات Intel Core i5 2.67 GHz و 4 GB RAM با نرم افزار MATLAB (R2016a) انجام شده است. با توجه به شرایط بیان شده، اجرای الگوریتم های SAM، ACE و CEM برای کل مواد هدف، به طور میانگین و به ترتیب در زمان های 0.4 ، 1 و 0.3 ثانیه به طول انجامیدند. میانگین زمانی اجرای الگوریتم های DW+SRBBH و DW+STD برای کل مواد هدف، به ترتیب ۷۹ و ۷۶ ثانیه به دست آمد.

داده های Cuprite و Sandiego با استفاده از روش proposed+SRBBH به ترتیب در زمان های ۲۶۸ و ۱۲۱۴ ثانیه اجرا شدند. میانگین زمان اجرای این الگوریتم برای ۹ ماده هدف داده fractal در دو حالت نسبت سیگنال به نویز ۳۰ و ۷۰ به ترتیب ۱۳۰ و ۹۰ ثانیه، به دست آمد. همچنین ۴ ماده هدف داده Jasper Ridge با استفاده از الگوریتم proposed+SRBBH به طور میانگین در ۴۹۹ ثانیه محاسبه شدند. طولانی تر شدن زمان اجرای این روش

نسبت به روش های SAM، ACE و CEM به دلیل تعداد تکرارهایی است که در فرآیند تولید واژه نامه انجام می شود. اجرای روش gradient+SRBBH برای هر یک از داده های Cuprite و Sandiego تقریباً سه روز به طول انجامید و داده های fractal و Jasper Ridge با توجه به کوچک بودنشان نسبت به داده های Cuprite و Sandiego، یک روز اجرا شدند. با توجه به این که، در این روش به منظور آموزش واژه نامه از تعداد تکرارهای زیاد استفاده می شود. سرعت اجرای این روش نسبت به سایر روش ها طولانی تر است. از طرف دیگر در این روش از جعبه ابزار CVX استفاده شده که پیچیدگی محاسباتی بسیار بالایی دارد.

۶- نتیجه گیری

همان طور که در بخش های قبل ذکر شد، ایراد اساسی روش های آماری این است که از یک طیف برای مدل سازی کل مواد هدف واقع در تصویر استفاده می نمایند؛ از این رو برای داده Jasper Rigid که ماده هدف، منطقه وسیعی از داده را پوشش داده و در این وسعت دستخوش عوامل مختلف قرار گرفته؛ مدل سازی ماده هدف با مشکل مواجه شده و همین وسعت ماده هدف نیز، محاسبه پارامترهای آماری زمینه و کشف هدف را با خطا همراه می نماید. همچنین نتایج آزمایش روی همه داده ها نشان داد که ساخت واژه نامه زمینه خالص بسیار اهمیت داشته و باعث بهبود روش های نمایش تنک شده است.

این درحالی است که در هیچ یک از روش های ساخت واژه نامه، خالص بودن واژه نامه مورد توجه قرار نگرفته است. طبق نتایج حاصل از روش های مختلف، مشخص شد که روش های نمایش تنک، ماده هدف موجود درون این داده را با دقت بالا استخراج نمودند و روش پیشنهادی (proposed+SRBBH) نیز نسبت به سایر روش ها، عملکرد بهتری در کشف هدف داشت. روش های آماری نیز عملکرد بسیار ضعیفی را در کشف مواد هدف این داده داشتند. نتایج روش های کشف هدف روی داده fractal_1 با نسبت سیگنال به نویز ۳۰، نشان داد که روش های نمایش تنک، نسبت به نویز مقاوم نبوده و روش های آماری، کشف هدف را با دقت بهتری نسبت به روش های نمایش تنک انجام داده اند. همان طور که در بخش ۵-۲ مطرح شد علت توانمند بودن CEM را می توان به این صورت بیان نمود

مقادیر عددی بزرگی به خود می گیرند. مقاوم بودن ACE در برابر نویز، به این علت است که روش ACE، نویز را مدل سازی نموده، به این صورت که، نویز تصویر به همراه زمینه، با پارامتر آماری کواریانس بیان می شود. این در حالی است که در روش های نمایش تنک، هیچ فرضی در مورد نویز وجود ندارد و این پارامتر مدل سازی نمی شود.

که با توجه به شبیه سازی بودن داده fractal_1، و تغییرات حداقلی طیف های شامل پیکسل های هدف، همان یک طیف برای مدل سازی تغییرپذیری طیفی و کشف هدف کارساز می باشد. همچنین با توجه به فیلتر طراحی شده در روش CEM که اثر پیکسل های هدف را بیشینه و پیکسل های غیر هدف را کمینه می نماید؛ از این رو به دلیل شباهت طیف هدف و پیکسل های شامل آن، این پیکسل ها

مراجع

- [1] Zhang, L., B. Du, and Y. Zhong, Hybrid Detectors Based on Selective Endmembers. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010. 48(6): p. 2633-2646.
- [2] Chein, I.C., Target signature-constrained mixed pixel classification for hyperspectral imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002. 40(5): p. 1065-1081.
- [3] Manolakis, D., D. Marden, and G.A. Shaw, Hyperspectral image processing for automatic target detection applications. Lincoln laboratory journal, 2003. 14(1): p. 79-116.
- [4] Kraut, S. and L.L. Scharf, The CFAR adaptive subspace detector is a scale-invariant GLRT. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999. 47(9): p. 2538-2541.
- [5] Farrand, W.H. and J.C. Harsanyi, 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, 1997. 59(1): p. 64-76.
- [6] Chen, Y., N.M. Nasrabadi, and T.D. Tran, Sparse Representation for Target Detection in Hyperspectral Imagery. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2011. 5(3): p. 629-640.
- [7] Berk, A., L.S. Bernstein, and D.C. Robertson, MODTRAN: A moderate resolution model for LOWTRAN. 1987, SPECTRAL SCIENCES INC BURLINGTON MA.
- [8] Niu, Y. and B. Wang, Hyperspectral Target Detection Using Learned Dictionary. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015. 12(7): p. 1531-1535.
- [9] Aharon, M., M. Elad, and A. Bruckstein, K-SVD: An Algorithm for Designing Overcomplete Dictionaries for Sparse Representation. Vol. 54. 2006. 4311-4322.
- [10] Zhang, Y., et al., Joint Sparse Representation and Multitask Learning for Hyperspectral Target Detection. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017. 55(2): p. 894-906.
- [11] Zhu, D., B. Du, and L. Zhang, Target Dictionary Construction-Based Sparse Representation Hyperspectral Target Detection Methods. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019. 12(4): p. 1254-1264.
- [12] Chen, Y., N.M. Nasrabadi, and T.D. Tran. Kernel sparse representation for hyperspectral target detection. in SPIE Defense, Security, and Sensing. 2012. International Society for Optics and Photonics.
- [13] Chen, Y., N.M. Nasrabadi, and T.D. Tran, Hyperspectral image classification via kernel sparse representation. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013. 51(1): p. 217-231.
- [14] Tropp, J.A. and A.C. Gilbert, Signal Recovery From Random Measurements Via Orthogonal Matching Pursuit. IEEE Transactions on Information Theory, 2007. 53(12): p. 4655-4666.
- [15] Tropp, J.A., A.C. Gilbert, and M.J. Strauss, Algorithms for simultaneous sparse approximation. Part I: Greedy pursuit. Signal Processing, 2006. 86(3): p. 572-588.
- [16] Zhang, Y., et al., A Nonlinear Sparse Representation-Based Binary Hypothesis Model for Hyperspectral Target Detection. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015. 8(6): p. 2513-2522.
- [17] Dai, W. and O. Milenkovic, Subspace Pursuit for Compressive Sensing Signal Reconstruction. IEEE Transactions on Information Theory, 2009. 55(5): p. 2230-2249.
- [18] Zhang, Y., B. Du, and L. Zhang, A Sparse Representation-Based Binary Hypothesis Model for Target Detection in Hyperspectral Images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015. 53(3): p. 1346-1354.

- [19] Du, B., et al., Beyond the Sparsity-Based Target Detector: A Hybrid Sparsity and Statistics-Based Detector for Hyperspectral Images. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016. 25(11): p. 5345-5357.
- [20] Chang, S., et al., IBRS: An Iterative Background Reconstruction and Suppression Framework for Hyperspectral Target Detection. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017. 10(7): p. 3406-3417.
- [21] Plaza, J., et al., On endmember identification in hyperspectral images without pure pixels: A comparison of algorithms. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2012. 42(2): p. 163-175.
- [22] Yang, S., Z. Shi, and W. Tang, Robust hyperspectral image target detection using an inequality constraint. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015. 53(6): p. 3389-3404.
- [23] Zhang, X., A. De Juan, and R. Tauler, Local rank-based spatial information for improvement of remote sensing hyperspectral imaging resolution. *Talanta*, 2015. 146: p. TALD1501532.
- [24] Rodarmel, C. and J. Shan, Principal Component Analysis for Hyperspectral Image Classification. *Surv Land inf Syst*, 2002. 62.
- [25] Zhu, F., et al., Effective spectral unmixing via robust representation and learning-based sparsity. *arXiv preprint arXiv:1409.0685*, 2014.
- [26] Chang, C., Multiparameter Receiver Operating Characteristic Analysis for Signal Detection and Classification. *IEEE Sensors Journal*, 2010. 10(3): p. 423-442.
- [27] Banerjee, A., P. Burlina, and C. Diehl, A support vector method for anomaly detection in hyperspectral imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006. 44(8): p. 2282-2291.
- [28] Li, J., et al., Hyperspectral anomaly detection by the use of background joint sparse representation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015. 8(6): p. 2523-2533.
- [29] Chang, C.-I. and Q. Du, Estimation of number of spectrally distinct signal sources in hyperspectral imagery. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 2004. 42(3): (p. 608-619.
- [30] Huang, Z., Z. Shi, and Z. Qin, Convex relaxation based sparse algorithm for hyperspectral target detection. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013. 124(24): p. 6594-6598.