



۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی نقشه برداری (ژئودزی و ژئوماتیک)
گروه سنجش از دور و فتوگرامتری

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد گرایش فتوگرامتری

بهبود الگوریتم تجزیه طیفی با استفاده از طبقه بندی کننده های نرم

دانشجو:

راضیه رامک

اساتید راهنما:

دکتر محمدجواد ولدان زوج

دکتر برات مجردی

تابستان ۱۳۹۰

اللهم صل على محمد وآل محمد

این نوشته را تقدیم می‌کنم به

دستان پر مهر پدرم

که نخستین بار نوشتن را به من آموختند

و

بهترین آموزگار زندگی ام

مادرم

مشکر و قدردانی

حد و سپاس پروردگاری را که از ابتدا تا کنون هدایت فرمود و روشنگر راهم بود و با مشکر فراوان از اساتید محترم، جناب آقای دکتر محمد جواد اوله ران زوج و جناب آقای دکتر برات مجرودی که بارها سمینارهای علمی شان مراد انجام این پایان نامه یاری فرمودند؛ صمیمانه از زحماتشان سپاسگزارم.

پنجمین از اساتید گرامی آقایان دکتر یوسف رضایی و دکتر مهدی مختارزاده که قبول زحمت فرموده و داوری این تحقیق را پذیرفتند، کمال مشکر و قدردانی را دارم.

در پایان از کلیه عزیزانی که طی انجام این تحقیق، بخوبی یاری ام کردند خصوصاً آقایان دکتر شهروز فقیه روحی و مهندس معین زهری و سرکار خانم مهندس سمیرا دانشگرا اصل صمیمانه سپاسگزارم.

چکیده

بدلیل حضور پیکسل‌های مختلط در تصاویر ابرطیفی روشهای مختلف پردازش در سطح زیرپیکسل استفاده می‌شوند، نظیر تجزیه طیفی خطی که اطلاعاتی از مقدار فراوانی هر کلاس را در یک پیکسل بدست می‌دهد. فرض اولیه این مدل، این است که هر پیکسل ترکیب خطی از کل کلاسهای سطح تصویر است. در عمل این فرض صحیح نیست چرا که هر پیکسل تنها می‌تواند ترکیبی از چند کلاس همسایه باشد. علاوه بر این از آنجاییکه فرآیند تجزیه طیفی توسط یک مدل کاملاً ریاضی صورت می‌پذیرد، با فرض حضور کل کلاسها در هر پیکسل، خروجی این مدل منطبق با واقعیت فیزیکی زمین نخواهد بود. از اینرو در این پژوهش روش تجزیه طیفی خطی به صورت محلی^۱ و به دو روش نظارت شده و نظارت نشده مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در روش نظارت شده ابتدا با استفاده از طبقه‌بندی‌کننده بیشترین شباهت برچسب مربوط به کلاسها استخراج می‌گردد. سپس سطح کل تصویر توسط پنجره‌ای با ابعاد فرد جاروب می‌شود. برای پیکسل مرکزی پنجره، ماتریس اعضای خالص تنها بر اساس کلاسهای غالب بدست آمده از خروجی طبقه‌بندی در این پنجره، تشکیل می‌گردد. در ادامه با اجرای مرحله معکوس‌سازی، سهم هر یک از این کلاسها در پیکسل مورد نظر محاسبه می‌گردد. در روش نظارت نشده نیز بر هر پیکسل پنجره‌ای اعمال می‌شود سپس طیف‌های اعضای خالص موجود در این پنجره توسط الگوریتم استخراج اعضای خالص تخمین زده می‌شوند و بر اساس آنها پیکسل به اجزای تشکیل دهنده‌اش تقسیم می‌شود.

تصویر ابرطیفی مورد استفاده در این پژوهش تصویر سنجنده AVIRIS مربوط به منطقه جنگلی/کشاورزی در شمال ایالت ایندیانا در امریکا است. پس از پیاده‌سازی، روش تجزیه طیفی متداول در بهترین حالت به دقت طبقه‌بندی کلی ۶۴/۷۹ درصد و طبقه‌بندی‌کننده بیشترین شباهت به دقت ۸۳/۵۲ درصد دست یافت. روش‌های نظارت شده و نظارت نشده پیشنهادی به ترتیب دقت طبقه‌بندی کلی ۸۶/۴۰ و ۸۰/۵۶ درصد را نتیجه دادند. شایان ذکر است در روش مذکور به دلیل کوچک شدن ابعاد ماتریس اعضای خالص، زمان انجام محاسبات بسته به کلاسهای موجود در هر پنجره، از سه تا هشت برابر کاهش یافت. بنابراین با توجه به بهبود میزان دقت نسبت به روش متداول تجزیه طیفی و طبقه‌بندی‌کننده بیشترین شباهت، همچنین کاهش حجم محاسبات، روش نظارت شده پیشنهادی در این پژوهش، از عملکرد بهتری برخوردار می‌باشد. علاوه بر این نتایج نشان دادند که برای طبقه‌بندی تصاویر فراطیفی، نقشه کاربری حاصل از روش تجزیه طیفی از دقت کلی بالاتری نسبت به خروجی دیگر طبقه‌بندی‌کننده‌ها برخوردار می‌باشد.

کلید واژه: تصویر ابرطیفی، تجزیه طیفی خطی، اطلاعات همسایگی.

¹ Local Linear Spectral Unmixing (LLSU)

فهرست مطالب

عنوان	صفحه	
فهرست جدول‌ها.....	ج	
فهرست شکل‌ها.....	د	
فهرست علائم و اختصارات.....	ه	
فصل ۱- مقدمه		
۱-۱- پیشگفتار.....	۶	
۱-۱-۱- مدل‌های فیزیکی برای توصیف ترکیب طیفی.....	۱۰	
۱-۱-۱-۱- مدل ترکیب خطی.....	۱۱	
۱-۱-۱-۲- مدل ترکیب غیر خطی.....	۱۲	
۱-۱-۲- جایگاه جداسازی طیفی در میان الگوریتم‌های پردازش طیفی.....	۱۲	
۱-۲- مروری بر تحقیقات انجام شده.....	۱۴	
۱-۳- طرح و ضرورت مسئله.....	۱۸	
۱-۴- اهداف تحقیق و روش انجام کار.....	۱۹	
۱-۵- ساختار پایان‌نامه.....	۲۲	
فصل ۲- مروری بر تجزیه طیفی به روش مدل اختلاط خطی.....		۲۳
۲-۱- مقدمه‌ای بر تجزیه طیفی.....	۲۳	
۲-۲- برآورد ابعاد زیرفضای سیگنال در تصاویر فراطیفی.....	۲۵	
۱-۲-۲- روش‌های HFC و NWHFC.....	۲۵	
۲-۲-۲- روش Hysime.....	۳۰	
۲-۳- استخراج مشخصه‌های طیفی اعضای خالص از تصاویر فراطیفی.....	۳۱	
۱-۳-۲- مقدمه‌ای بر روش‌های استخراج اعضای خالص از تصاویر فراطیفی.....	۳۲	
۲-۳-۲- مدل ترکیب خطی برای تصاویر فراطیفی.....	۳۲	
۳-۳-۲- روش VCA.....	۳۴	
۴-۲- برآورد مقادیر فراوانی اعضای خالص در پیکسل‌های تصاویر فراطیفی.....	۳۷	
۱-۴-۲- روش NCLS.....	۳۸	
۲-۴-۲- روش FCLS.....	۳۹	
۵-۲- روش پیشنهادی با استفاده از اطلاعات همسایگی.....	۴۱	

۴۱	.....	۲-۵-۱	روش نظارت شده
۴۳	.....	۲-۵-۲	روش نظارت نشده
فصل ۳ - معیارهای ارزیابی.....			
۴۵	.....	۳-۱	روش ارزیابی دقت در طبقه‌بندی کننده‌های سخت
۴۷	.....	۳-۲	معیارهای تشابه طیفی
فصل ۴ - پیاده‌سازی و ارزیابی الگوریتمها.....			
۵۰	.....	۴-۱	مقدمه
۵۱	.....	۴-۲	پیاده‌سازی الگوریتم نظارت شده به صورت محلی به منظور بهبود نتایج تجزیه طیفی
۵۳	.....	۴-۲-۱	آزمایش‌ها
۵۹	.....	۴-۳	پیاده‌سازی الگوریتم نظارت نشده به صورت محلی به منظور بهبود نتایج تجزیه طیفی
۵۹	.....	۴-۳-۱	پیاده‌سازی الگوریتم‌های برآورد ابعاد زیرفضای سیگنال
۵۹	.....	۴-۳-۲	برآورد نویز با استفاده از تئوری رگرسیون چندگانه
۶۴	.....	۴-۴	نتایج
فصل ۵ - نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....			
۶۶	.....	۵-۱	نتیجه‌گیری
۶۸	.....	۵-۲	پیشنهادات

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۱: نمونه‌هایی از سنجنده‌های فراطیفی و مشخصات آنها.....	۷
جدول ۱-۴: شماره، نام و تعداد پیکسل اختصاص یافته به هر کلاس.....	۵۲
جدول ۲-۴: دقت طبقه‌بندی کلاس‌های مختلف با استفاده از طبقه‌بندی کننده بیشترین شباهت.....	۵۴
جدول ۳-۴: دقت کلی حاصل از آزمایش‌های ۳ و ۲ در چهار حالت مختلف.....	۵۸
جدول ۴-۴: عملکرد الگوریتم‌های Hysime، HFC و NWHFC بر داده ابرطیفی.....	۶۲
جدول ۵-۴: نتایج حاصل از آزمایش ۴ در چهار حالت مختلف برای ۱۲ کلاس.....	۶۳
جدول ۶-۴: نتایج حاصل از اعمال روش‌های مختلف برای ۹ کلاس با ۱۸۵ باند.....	۶۴

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: نحوه تفکیک و ثبت رادیانس دریافتی در باندهای مجزا.....	۸
شکل ۱-۲: مکعب داده فراطیفی و بازتابندگی مربوط به یک پیکسل از این مکعب.....	۸
شکل ۱-۳: اصول بنیادی طیف‌نمایی تصویری.....	۹
شکل ۱-۴: نمایش مدل‌های ترکیب طیفی.....	۱۱
شکل ۱-۵: دسته‌بندی الگوریتم‌های پردازش داده‌های فراطیفی.....	۱۳
شکل ۱-۶: روند طی شده در روش نظارت شده جهت بهبود نتایج تجزیه طیفی خطی.....	۲۰
شکل ۱-۷: روند طی شده در روش نظارت نشده جهت بهبود نتایج تجزیه طیفی خطی.....	۲۱
شکل ۱-۲: مراحل انجام جداسازی طیفی در تصاویر ابرطیفی.....	۲۴
شکل ۲-۲: موقعیت پیکسل‌های مختلط در یک simplex با توجه به مقادیر فراوانی آنها.....	۳۳
شکل ۲-۳: نمایشی از توزیع ترکیبات سه عنصر خالص.....	۳۵
شکل ۲-۴: نمایشی از عملکرد الگوریتم VCA.....	۳۵
شکل ۲-۵: روش پیشنهادی نظارت شده.....	۴۲
شکل ۲-۶: اعمال پنجره بر تصویر به صورت شماتیک.....	۴۳
شکل ۲-۷: روش پیشنهادی نظارت نشده.....	۴۴
شکل ۳-۱: آرایش ماتریس ابهام و محاسبه دقت طبقه‌بندی کننده و کاربر.....	۴۶
شکل ۱-۴: تصویر باند ۱۲ داده مورد استفاده.....	۵۲
شکل ۲-۴: نقشه طبقه‌بندی حاصل از روش بیشترین شباهت با استفاده از ۲۴ ویژگی.....	۵۴
شکل ۳-۴: تصاویر باینری ۱۶ کلاس تصویر مورد مطالعه با استفاده از نقشه کاربری مرجع.....	۵۶
شکل ۴-۴: استفاده از اطلاعات مکانی در اطراف هر پیکسل.....	۵۷
شکل ۵-۴: نقشه کاربری حاصل از روش نظارت شده برای ۱۳ کلاس با ۱۸۵ ویژگی.....	۵۸
شکل ۶-۴: روند همگرایی الگوریتم Hysime به ابعاد زیرفضای سیگنال.....	۶۱
شکل ۷-۴: تعیین طیف‌های موجود در اطراف هر پیکسل.....	۶۳
شکل ۸-۴: نقشه کاربری حاصل از روش نظارت نشده برای ۱۲ کلاس با ۱۸۵ ویژگی.....	۶۳

فهرست علايم و اختصارات

علامت اختصاری

عنوان

AVIRIS: Airborn Visible/Infrared Imaging Spectrometer,
FCLS: Fully Constrained Least Squares method
GSD: Ground Sampling Distance,
HFC: Harsanyi-Farrand-Chang,
HYDICE: HYperspectral Digital Imagery Collection Experiment,
ID: Intrinsic Dimensionality,
LSU: Linear Spectral Unmixing,
LLSU: Local Linear Spectral Unmixing,
MLC: Maximum Likelihood Classifier,
NCLS: Non-negativity Constrained Least Squares method,
NWHFC: Noise-Whitened Harsanyi-Farrand-Chang,
OA: Overall Accuracy,
PCA: Principal Component Analysis,
SAM: Spectral Angle Mapper,
SID: Spectral Information Divergence,
VCA: Vertex Component Analysis,
VD: Virtual Dimensionality,

فصل ۱ - مقدمه

۱-۱- پیشگفتار

بهره‌گیری از فناوری سنجش از دور و انواع تصاویر ماهواره‌ای در طی سال‌های اخیر به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع جمع‌آوری اطلاعات به منظور مطالعه و پایش منابع زیرزمینی و بهره‌برداری بهینه از آنها توجه بسیاری از کارشناسان و متخصصان علوم مختلف از جمله زمین‌شناسی، محیط زیست، هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژی و غیره را به خود جلب نموده است. بر همین اساس، نیز متناسب با ویژگی‌ها و نیازهای هر یک از علوم مذکور، سنجنده‌هایی با قابلیت‌های متفاوت طراحی و ساخته شده‌اند. اما با توجه به محدودیت‌هایی که در بعد سخت‌افزاری ساخت و تولید سنجنده‌ها وجود داشت، توان تفکیک مکانی و یا طیفی آنها در برخی موارد پاسخگوی نیاز کارشناسان نبوده و موجب کاهش قابلیت اطمینان و دقت نتایج حاصله می‌گردید؛ امروزه با پیشرفت سریع و شایان توجه صنایع الکترونیک و الکترواپتیک، فناوری ساخت قطعات الکترونیکی با ابعاد بسیار کوچک و سیستم‌های نوری پراکنش طیفی دقیق، امکان طراحی و ساخت سنجنده‌هایی با توان تفکیک مکانی و طیفی مناسب فراهم شده و این امر دستیابی متخصصان به داده‌هایی دقیق‌تر و با ارزش اطلاعاتی بیشتر را فراهم نموده است. یکی از انواع این داده‌ها که از قابلیت تفکیک طیفی بسیار بالایی برخوردار است، تصاویر فراطیفی می‌باشند. تصویربرداری فراطیفی برای اولین بار به منظور جمع‌آوری داده‌های مناسب برای تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی و اکتشاف معادن در اواخر دهه هفتاد میلادی در ایالات متحده آمریکا صورت گرفت و به سرعت توسعه و گسترش یافت. مهم‌ترین مرحله پیشرفت و تحول این فن‌آوری در سال ۱۹۸۷ و همزمان با ساخت سنجنده هوابرد^۱ AVIRIS توسط مرکز JPL، ناسا شکل گرفت. پس از آن انواع سنجنده‌های فراطیفی هوابرد و فضابرد^۲ دیگر نیز طراحی و ساخته شده‌اند که در جدول ۱-۱ مروری بر چندین سنجنده فراطیفی صورت گرفته و خصوصیات عمده آنها ارائه شده است. سنجنده‌های فراطیفی مجموعه‌ای از تصاویر مکانی را در باندهای متعدد، با قدرت تفکیک طیفی بالا از یک منطقه جمع‌آوری می‌نمایند. این سنجنده‌ها محدوده‌های طیفی مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز موج کوتاه^۳ را پوشش می‌دهند [۱].

¹ Air-borne

² Space-borne

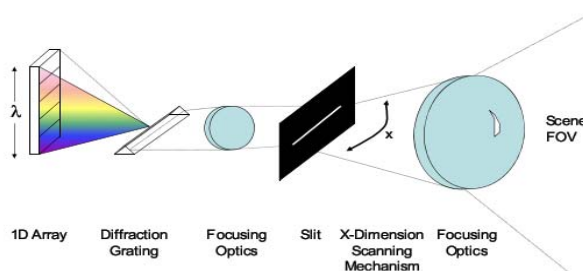
³ Shortwave Infrared

جدول ۱-۱: نمونه‌هایی از سنجنده‌های فراطیفی و مشخصات آنها [۳-۲]

Sensor	AVIRIS	HyDICE	Hymap	Probe-1	Hyperion
	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]
Introduction	1987	1995	1996	1997	2000
Platform	Air-borne	Air-borne	Air-borne	Air-borne	Space-borne
Nominal Altitude (Km)	20	6	2	2.5	705
Spatial Resolution (m)	20	3	5	5	30
Spectral Resolution (nm)	9.4-16	7.6-14.9	15-20	10	10
Spectral Coverage (μm)	0.4-2.5	0.4-2.5	0.4-2.5	0.4-2.5	0.4-2.5
Number of Channels	224	210	126	128	200
Swath Width (km)	11	1	2.3	3	7.5

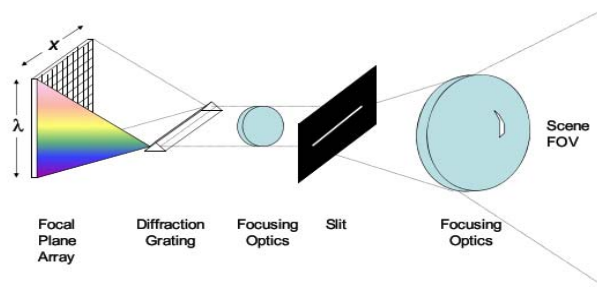
در سنجنده‌های AVIRIS [۴]، Probe-1 [۵] و HyMap [۶] جمع‌آوری داده‌ها، بر اساس تکنولوژی Whisk-broom پایه‌گذاری شده که در این فن‌آوری اسکن منطقه در راستای عمود بر جهت حرکت سنجنده با استفاده از ابزار مکانیکی صورت می‌گیرد. اما سنجنده‌های Hyperion [۷] و HyDICE [۸] از تکنولوژی Push-broom برای پوشش منطقه تحت تصویربرداری استفاده می‌کنند که به طبع عمل اسکن در راستای عمود بر جهت حرکت بدون ابزار مکانیکی و با استفاده از آرایه‌ای خطی از دیتکتورها صورت می‌گیرد [۱-۳].

در این سنجنده‌ها رادیانس دریافتی از سطح زمین معمولاً با استفاده از یک ابزار متفرق کننده نوری^۱، از قبیل grating یا prism، به باندهای مجزا تفکیک شده و به کمک چندین آرایه خطی از دیتکتورها این سیگنال‌ها ثبت می‌گردند. این اطلاعات دیجیتالی با استفاده از یک مبدل آنالوگ به دیجیتال تولید می‌شوند که رادیانس اندازه‌گیری شده در هر باند طیفی را با توجه به قدرت تفکیک رادیومتریک سنجنده نمونه‌برداری می‌کند [۳].



(الف)

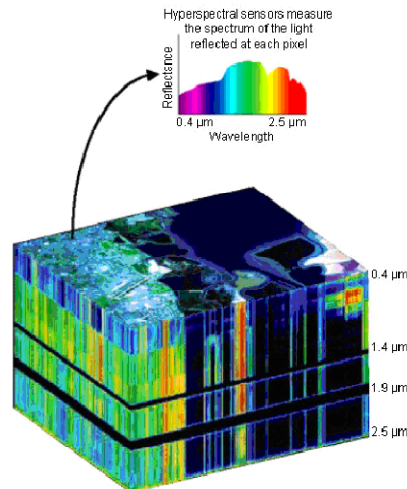
^۱ . Optical dispersing element



(ب)

شکل ۱-۱: نحوه تفکیک و ثبت رادینانس دریافتی در باندهای مجزا

الف) با توجه به تکنولوژی Whisk-broom (ب) با توجه تکنولوژی push-broom [۹] بدین ترتیب اطلاعات جمع‌آوری شده مکانی و طیفی از سطح زمین را می‌توان در غالب یک ساختار سه بعدی تشریح نمود که تحت عنوان مکعب داده^۱ مطرح می‌گردد. شکل ۱ - ۲ نمونه‌ای از یک مکعب داده و بازتابندگی^۲ مربوط به یک پیکسل از این مکعب را نمایش می‌دهد.



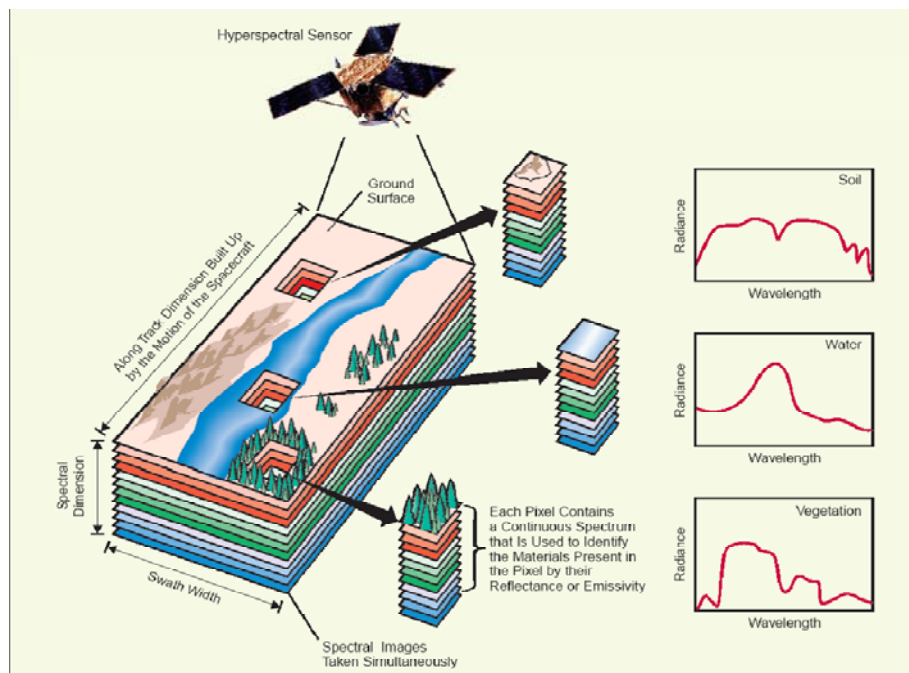
شکل ۱-۲: مکعب داده فراطیفی و بازتابندگی مربوط به یک پیکسل از این مکعب

در نتیجه، تصاویر فراطیفی به پشتوانه اطلاعات صدها باند طیفی، شرایط شناسایی مواد را با استفاده از مشخصه‌های طیفی‌شان فراهم نموده‌اند. این عمل با بهره‌برداری از این حقیقت حاصل می‌شود که هر یک از مواد تشکیل دهنده صحنه تصویربرداری انرژی تابشی را به گونه‌ای بازتاب، جذب و گسیل می‌نمایند که انرژی دریافت شده توسط سنجنده معرف شکل و ساختار مولکولی آن مواد می‌باشد [۱۰]. حال چنانچه انرژی رسیده به سنجنده در طول موج‌های نزدیک به هم و بر روی محدوده نسبتاً وسیعی از باندهای طیفی اندازه‌گیری شود، از هر ماده که در صحنه تصویربرداری حضور دارد منحنی طیفی حاصل می‌گردد که با مقایسه آن با مشخصه‌های طیفی موجود در کتابخانه طیفی می‌توان به طور منحصر به

^۱ Data cube

^۲ Reflectance

فردی هر ماده را تعیین هویت و شناسایی نمود. در همین راستا فرآیندی تحت عنوان طیف‌نمایی^۱ معرفی می‌گردد که حیطة کاری آن در زمینه اندازه‌گیری، آنالیز و تفسیر منحنی‌های طیفی مواد مختلف می‌باشد. ترکیب طیف‌نمایی با روش‌هایی برای اخذ اطلاعات طیفی از یک منطقه وسیع تحت عنوان طیف‌نمایی تصویری^۲ شناخته شده است. اصول بنیادی مرتبط با طیف‌نمایی تصویری در تصاویر ماهواره‌ای در شکل ۳-۱ نشان داده شده است [۱۰].



شکل ۳-۱: اصول بنیادی طیف‌نمایی تصویری [۱۰]

سنجنده‌های فراطیفی دسته‌ای از سنجنده‌های طیف‌نمایی تصویری هستند که محدوده طیفی مورد نظر را به صدها باند باریک پیوسته به منظور آنالیز مشخصه‌های طیفی تقسیم نموده‌اند. با توجه به قدرت تفکیک مکانی این سنجنده‌ها (به طور متوسط ۱۰ متر)، غالباً سهم مکانی اشغال شده توسط یک ماده، از اندازه پیکسل زمینی آن کوچکتر بوده و در نتیجه انرژی دریافت شده در سنجنده ترکیبی از اجزاء مختلف تشکیل دهنده آن پیکسل می‌باشد. به چنین پیکسل‌هایی که بیش از یک شی منفرد در تشکیل آنها حضور داشته باشد، پیکسل مختلط^۳ گفته می‌شود [۱۰-۱۲]. عمدتاً رخداد چنین پیکسل‌هایی یا در اثر قدرت تفکیک مکانی ضعیف سنجنده است، که خود ناشی از ارتفاع زیاد سنجنده یا وسیع در نظر گرفتن^۴ GIFOV می‌باشد و یا در اثر ترکیبات همگن مواد بوده و با قدرت تفکیک مکانی رابطه ای ندارد (به طور

¹ Spectroscopy / Spectrometry

² Imaging Spectroscopy

³ Mixed Pixel

⁴ Ground Instantaneous Field of view

مثال مناطقی که بافتی شبیه به مناطق ساحلی دارند) [۱۱-۱۲]. بنابراین برای به دست آوردن اطلاعات موجود در این پیکسل‌ها نیاز به روشهایی است که این پیکسل‌ها را به اجزاء تشکیل دهنده‌شان تجزیه کنند.

طبقه‌بندی یکی از متداولترین و مهمترین روش‌ها، برای استخراج اطلاعات موضوعی از تصاویر سنجش از راه دور می‌باشد. در روشهای متعارف طبقه‌بندی، با خالص در نظر گرفتن پیکسل‌های تصویر، هر پیکسل به کلاسی خاص تعلق داده شده و وضعیت تمام پیکسل‌های تصویر مشخص می‌شود که در واقع حاصل، همان نقشه‌های موضوعی می‌باشد. اما چنین شیوه‌هایی برای طبقه‌بندی پیکسل‌های مختلط مناسب نیست [۱۳]. طبقه‌بندی پیکسل‌های مختلط فرآیندی است که سعی دارد نوع و سهم هر یک از مؤلفه‌های خاص موجود در پیکسل‌ها را به دست آورد. جداسازی طیفی^۱ شیوه‌ای است که به کاربر امکان استخراج اطلاعات را در سطح زیر پیکسل^۲ داده و روشی مناسب برای جداسازی اعضای تشکیل دهنده پیکسل‌های مختلط می‌باشد [۱۰-۱۲].

۱-۱-۱- مدلهای فیزیکی برای توصیف ترکیب طیفی^۳

هر شیوه‌ای، برای اینکه بتواند به طور مؤثری داده‌های فراطیفی را تفکیک کند، در ابتدا می‌بایست با یک مدل نحوه شکل‌گیری طیف متناظر با پیکسل مختلط را تشریح کند. در واقع مدلهای ترکیب طیفی تلاش می‌کنند تا بنیاد فیزیکی مسئله را بازسازی نمایند. فرض پایه در مدلهای ترکیب طیفی این است که منطقه مورد مطالعه از تعداد محدودی ماده متمایز، که مشخصات طیفی نسبتاً ثابتی دارند، تشکیل شده است. به این مواد متمایز (آب، مواد معدنی، گیاه و ...) اعضای خالص^۴، و سهم هر یک از این مواد در پیکسل مختلط را مقادیر فراوانی^۵ گویند [۳]، [۱۰-۱۲]. پس از شکل‌گیری چنین مدلهایی، الگوریتم‌های جداسازی طیفی تلاش می‌نمایند با طی مسیر معکوس اعضای خالص، مقادیر فراوانی متناظر با آنها را در هر پیکسل استخراج کنند. شکل ۱-۴ این مدلها را در دو دسته کلی طبقه‌بندی کرده است.

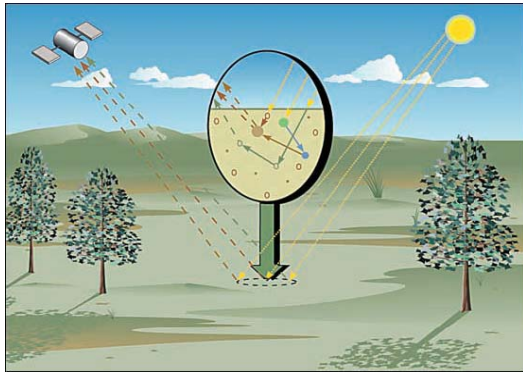
¹ Spectral Unmixing

² Sub-pixel

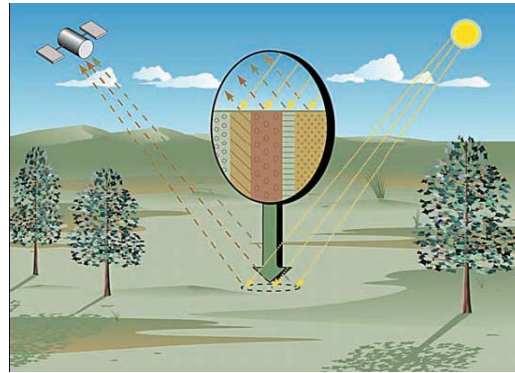
³ Spectral Mixing

⁴ Endmembers

⁵ Abundance fractions



ب) مدل ترکیب غیر خطی



الف) مدل ترکیب خطی

شکل ۴-۱: نمایش مدل‌های ترکیب طیفی [۱۱-۱۲]

۱-۱-۱-۱ مدل ترکیب خطی^۱

همانطور که در شکل ۴-۱ (الف) مشاهده می‌شود، چنانچه اعضای خالص در یک ناحیه به صورت پترنهای مکانی مجزا ظاهر شوند، شبیه به مربع‌های صفحه شطرنج، اختلاط صورت گرفته در منطقه از نوع ماکروسکوپی^۲ می‌باشد. در این حالت بازتابش ناشی از هر بخش تنها ناشی از همان بخش بوده و تأثیر فعل و انفعالات داخلی میان اعضای خالص ناچیز می‌باشد. بنابراین طیف مرتبط با یک پیکسل مختلط را می‌توان به صورت ترکیبی خطی از اعضای خالص تشکیل دهنده آن پیکسل دانست، که با توجه به نسبت سطح اشغال شده، توسط اعضای خالص وزن دار شده‌اند. به همین دلیل به این گونه از مدل‌ها، مدل ترکیب خطی گفته می‌شود. در نتیجه طیف مشاهده شده (r) هر پیکسل در منطقه را می‌توان به صورت معادله (۱-۱) بیان نمود.

$$\begin{aligned} r &= m_1 \alpha_1 + m_2 \alpha_2 + \dots + m_p \alpha_p + n \\ &= \sum_{i=1}^p m_i \alpha_i + n = M \alpha + n \end{aligned} \quad (1-1)$$

که p تعداد اعضای خالص، M ماتریس حاوی مشخصه‌های طیفی اعضای خالص، α مقادیر فراوانی اشغال شده توسط هر عضو خالص در یک پیکسل تصویر می‌باشد و n نیز ترم مربوط به خطای مدل (که شامل نویز سنجنده، تغییر پذیری اعضای خالص و سایر موارد مربوط به عدم تطابق مدل با واقعیت) می‌باشد.

^۱ Liner Mixing Model

^۲ Macroscopic

۱-۱-۱-۲- مدل ترکیب غیر خطی^۱

شکل ۱-۴ (ب) صورت مسئله پیچیده‌تری را به تصویر کشیده است، این حالت مربوط به زمانی است که اختلاط صورت گرفته در سطح منطقه از نوع میکروسکوپی^۲ باشد. در نتیجه به علت فعل و انفعالات داخلی عناصر و پراکنش چند گانه^۳، طیف بازتابی از سطح، نظم موجود در حالت قبلی را از دست داده و دیگر نمی‌توان این طیف را به صورت خطی با عناصر خالص مرتبط دانست. به همین دلیل از شیوه‌های غیر خطی برای مدل کردن منطقه استفاده می‌گردد.

با اینکه مزایای استفاده از مدل‌های غیر خطی به دلیل اختلالات درونی عناصر در مناطق همگون کاملاً واضح است، اما عمدتاً از این مدل‌ها در سطح گسترده‌ای استفاده نشده است، که می‌توان آن را ناشی از موارد زیر دانست. این مدل‌ها برای انجام محاسبات طیف سنجی نیازمند اطلاعات کامل در مورد خصوصیات اعضای خالص و بازتابش سطح می‌باشند. علاوه بر آن به منظور بهبود پارامترهای مدل، به زوایای جهت‌گیری سنجنده و اعضای خالص نسبت به یکدیگر نیاز می‌باشد. اما مهمترین عاملی که اجرای مدل‌های غیرخطی را به مخاطره می‌اندازد به دست آوردن اندازه ذرات، ترکیبات آنها و شرایط دگرگونی و تغییرات اعضای خالص می‌باشد [۱۱-۱۲].

با توجه به اینکه غالباً اثرات پراکنش چندگانه در منطقه جزئی در نظر گرفته می‌شود و مدل‌های خطی نیز تا حد قابل قبولی واقعیت را تقریب می‌کنند [۲-۳] [۱۰-۱۲]، در ادامه ترکیب خطی به منظور شکل‌دهی آزمایش‌های این تحقیق استفاده شده است.

۱-۱-۲- جایگاه جداسازی طیفی در میان الگوریتم‌های پردازش طیفی

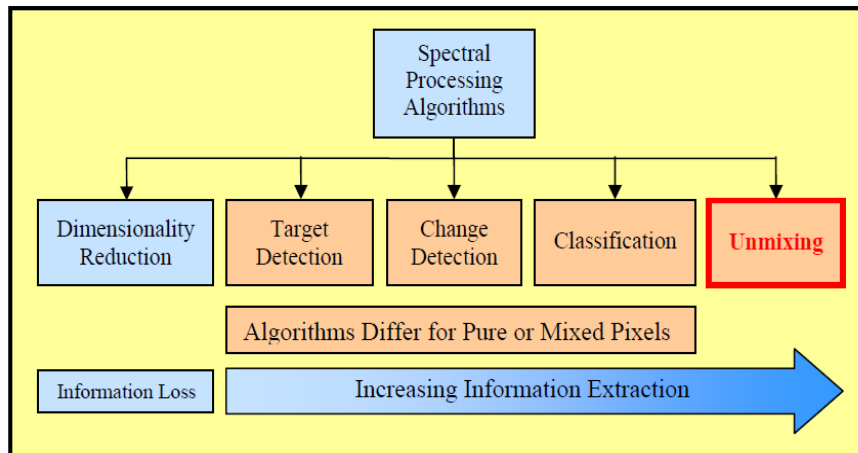
حجم بالای اطلاعات طیفی در تصاویر فراطیفی، تعداد و تنوع کاربردهای این تصاویر را در زمینه‌های مختلف به طور چشمگیری افزایش داده است؛ از کاربردهای این داده‌ها می‌توان به مواردی چون شناسایی و پاک‌سازی مناطق جنگلی آلوده، عملیات جستجو و نجات، شناسایی ادوات نظامی پنهان و استتار شده، برآورد دقیق محصولات کشاورزی، مطالعه گونه‌های مختلف پوشش گیاهی، آفات و استرس‌های گیاهی، زمین شناسی و اکتشاف معادن به صورت دقیق، مطالعات منابع آب و آشکارسازی آلودگی‌ها، پایش‌های زیست محیطی، مطالعات شهری، آشکارسازی اتوماتیک اهداف، تصویربرداری پزشکی و تشخیص غدد سرطانی و ... اشاره نمود. اما اکثریت الگوریتم‌های به کار گرفته شده در زمینه‌های مختلف را می‌توان بر

¹ Non-linear Mixing Model

² Microscopic

³ Multiple Scattering

اساس کاربردهای خاص اولیه مطابق شکل ۵-۱ دسته‌بندی نمود [۱۰] [۱۴]؛ که در ادامه هر یک از این الگوریتم‌ها به طور مختصر معرفی شده‌اند.



شکل ۵-۱: دسته‌بندی الگوریتم‌های پردازش داده‌های فراطیفی [۱۴]

کاهش ابعاد^۱، یکی از توابع مهم در پردازش تصاویر فراطیفی است که با حذف افزونگی طیفی موجود در این تصاویر ویژگی‌های مورد نیاز را با کیفیت بالا در اختیار الگوریتم‌های آشکارسازی^۲، طبقه‌بندی^۳ و جداسازی طیفی گذارده و بازده این الگوریتم‌ها نیز، با وجود از دست دادن بخشی از اطلاعات کاهش قابل توجهی نخواهد داشت، که همین امر موجب کاهش چشمگیر حجم محاسبات در مراحل بعدی می‌گردد. اما به کارگیری این توابع جنبه اختیاری داشته و می‌تواند با توجه به نوع و هدف الگوریتم‌های پردازش طیفی به عنوان پیش پردازش و یا قسمتی از الگوریتم اصلی به کارگرفته شود [۱۰] [۱۴]. پس از پیش پردازش‌های مورد نیاز بر روی داده‌های فراطیفی، الگوریتم‌های پردازش طیفی را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی نمود:

(الف) جستجوی پیکسل‌های تصاویر فراطیفی برای مشخصه‌های طیفی نادر و کمیاب (Target Detection & Anomaly Detection)

(ب) تعیین تغییرات عمده (تغییراتی که برای کاربر دارای اهمیت هستند) بین دو تصویر فراطیفی که از یک منطقه جغرافیایی و با اختلاف زمانی گرفته شده است (Change Detection)

(ج) تعیین برچسب یا نوع کلاس هر پیکسل در تصاویر فراطیفی (Classification)

(د) برآورد نسبت ناحیه اشغال شده توسط هر عنصر موجود در پیکسل (unmixing)

¹ Dimensionality Reduction

² Detection

³ Classification

با توجه به شباهت این الگوریتم‌ها در نگاه اولیه و همچنین تبیین جایگاه و اهداف الگوریتم‌های جداسازی طیفی، در ادامه به طور اجمالی مقایسه‌ای بر این الگوریتم‌ها صورت گرفته است. به طور معمول طبقه‌بندی فرآیندی است که برچسبی را به هر پیکسل تعلق می‌دهد در حالی که آشکارسازی فرآیند تشخیص حضور یا رخداد یک شرط می‌باشد. از این جهت آشکارسازی را می‌توان به عنوان یک مسئله طبقه‌بندی دو کلاسه در نظر گرفت، حضور تارگت و عدم حضور تارگت. طبقه‌بندی کننده‌های متعارف یک و تنها یک برچسب^۱ را به هر پیکسل اختصاصی می‌دهند و محصول آنها به عنوان نقشه موضوعی شناخته می‌شود. این نوع طبقه‌بندی که تحت عنوان طبقه‌بندی سخت^۲ شناخته می‌شود نمی‌تواند به طور مؤثری در مورد پیکسل‌هایی که از ترکیب چند ماده مختلف تشکیل شده‌اند تصمیم‌گیری کند، به همین علت طبقه بندی کننده‌های نرم^۳ ظهور یافتند. یک طبقه بندی کننده نرم می‌تواند به هر پیکسل چندین برچسب را تخصیص دهد که هر برچسب همراه با عددی است که آن را می‌توان به عنوان احتمال صحیح بودن آن برچسب و یا به طور کلی‌تر نسبت مواد داخل آن پیکسل دانست [۱۰] [۱۴].

برخلاف آشکارسازی و طبقه‌بندی، جداسازی طیفی یک مسئله برآورد^۴ می‌باشد [۱۰] [۱۴] که پردازش‌های بیشتری را در برداشته و اطلاعات بیشتری را نیز از داده‌ها استخراج می‌کند. یکی از مهمترین ویژگی‌های جداسازی طیفی، برخلاف طبقه‌بندی، دقیق و قابل اطمینان بودن نتایج به دست آمده از آنها می‌باشد [۱۵].

۱-۲- مروری بر تحقیقات انجام شده

در این بخش به اختصار به برخی فعالیت‌های انجام شده در زمینه جداسازی طیفی و استفاده از اطلاعات مکانی جهت بهبود نتایج تجزیه طیفی و طبقه‌بندی، پرداخته شده است.

رضایی در [۱] به ارائه یک روش خودکار جهت استخراج اعضای خالص از تصاویر ابرطیفی و جداسازی طیفی پرداخته است. جداسازی طیفی شیوه‌ای است که به کاربر امکان استخراج اطلاعات را در سطح زیر پیکسل داده و یکی از روش‌های متداول برای طبقه‌بندی پیکسل‌های مختلط در تصاویر فراطیفی می‌باشد. این شیوه شامل سه مرحله است که ابتدا می‌بایست تعداد اعضای تشکیل دهنده صحنه تصویربرداری مشخص گردد سپس مشخصه‌های طیفی این اعضا که به عنوان اعضای خالص منطقه تصویربرداری معروف می‌باشند به دست آیند و در پایان هر پیکسل به عنوان ترکیب خطی از اعضای

¹ Label

² Hard classification

³ Soft classification

⁴ Estimation problem

خالص به دست آمده بازسازی گردد. در این پایان نامه، ابتدا یک مدل تخمین نویز با استفاده از پدیده‌های جذبی موجود در طیف بازتابندگی هر پیکسل، بنام ¹NETAL ارائه شده است که با دقتی در حد رگرسیون چندگانه توانایی تخمین نویز را دارا می‌باشد. سپس با استفاده از ویژگی‌های هندسی طیف و الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ²GOP جهت استخراج اعضای خالص، پیشنهاد شده است که به صورت کاملاً خودکار بوده و نیازمند هیچگونه پیش فرضی در خصوص داده‌ها نمی‌باشد. در ادامه معیار ³AFHD بمنظور تعیین میزان شباهت بین هر پیکسل و طیف مرجع که از پدیده‌های جذبی موجود در طیف مواد بمنظور شناسایی آنها بهره می‌گیرد، برای طبقه‌بندی استفاده شده است.

غفاری در [۲] به ارائه یک الگوریتم مناسب جهت طبقه‌بندی پیکسل‌های مختلف در تصاویر فراطیفی را مدنظر قرار داده است. در این پایان نامه تأکید بر روش‌های نظارت نشده بوده است. در این تحقیق بررسی و مقایسه‌ای بر روی الگوریتم‌های موجود در سه بخش مختلف فرآیند جداسازی طیفی صورت گرفته است و در پایان الگوریتم‌های بهینه در هر بخش معرفی شده‌اند. لازم به ذکر است که تأکید این پایان نامه بر دو مرحله نخست از فرآیند جداسازی طیفی بوده و الگوریتم‌هایی مورد توجه می‌باشند که به صورت نظارت نشده و بدون دانش اولیه از صحنه تصویربرداری این عمل را انجام می‌دهند. نحوه ارزیابی الگوریتم‌های مختلف در این تحقیق بر این مبناست که ابتدا با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده عملکرد الگوریتم‌ها در سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت الگوریتم‌ها بر روی داده واقعی پیاده‌سازی شده‌اند. به این ترتیب، در مرحله نخست از فرآیند جداسازی طیفی الگوریتم‌های HFC, NWHFC و Hysime برای برآورد تعداد اعضای تشکیل دهنده تصویر پیاده‌سازی شده‌اند که با توجه به آزمایش‌های انجام شده الگوریتم NWHFC دارای بهترین نتایج بوده و به عنوان الگوریتم بهینه در این زمینه معرفی شده است. در مرحله بعدی از فرآیند جداسازی طیفی الگوریتم‌های ⁴ATGP، ⁵UFCLS، ⁶VCA، ⁵SGA و ICA برای استخراج اعضای خالص تصویر به صورت نظارت نشده و الگوریتم FCLS به منظور برآورد سهم هر یک از اعضای خالص در پیکسل‌های تصویر، پیاده سازی شده‌اند که در این میان الگوریتم‌هایی که با استفاده از منطق هندسی اعضای تشکیل دهنده تصویر را استخراج می‌نمایند دارای بهترین نتایج بوده و الگوریتم‌های VCA و N-FINDR به عنوان الگوریتم‌های بهینه معرفی شده‌اند. الگوریتم ⁶FCLS نیز با اعمال همزمان قیود ASC و ANC به عنوان بهترین الگوریتم برآورد سهم هر عضو خالص در پیکسل‌های تصویر پذیرفته شده است.

¹ Noise Estimation Through Absorbion Lines

² Genetic Orthogonal Projection

³ Absorbion Feature Hamming Distance

⁴ Automatic Target Generation Process

⁵ Simplex Growing Algorithm

⁶ Fully Constrained Least-Squares