

# تلفیق داده‌های سنجش از دوری به منظور بهینه‌سازی مدل تراکم تاج پوشش جنگلی (مطالعه موردی: جنگل‌های هیرکانی، سنجنده لندست)

مسعود طائفی فیجانی<sup>۱\*</sup>، عباس علیمحمدی سراب<sup>۲</sup>، محمدجواد ولدان زوج<sup>۳</sup>

۱- پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

۲ و ۳- دانشکده ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

هدف از این پژوهش دستیابی به مدلی کارآ، ساده و با دقت مناسب برای پایش روند تغییرات تراکمی جنگل‌های هیرکانی است. مبنای نگارگر تاج پوشش جنگل تلفیق شاخص‌های طیفی است. در این پژوهش، به منظور بهبود نتایج، از تلفیق داده‌ها استفاده می‌شود. بدین منظور، با حفظ مشخصه‌های طیفی و رادیومتریک، از دو الگوریتم پاسخ طیفی و *smoothing filter based intensity modulation* به اختصار SFIM استفاده شد. حوزه آبخیز هراز به منظور پیاده‌سازی، و ارزیابی نتایج انتخاب گردید. نقشه مرجع به تفکیک کلاسهای تراکمی تنک، نیمه انبوه، انبوه و فاقد پوشش جنگل، مورد استفاده قرار گرفت. مدل در برآورد تاج‌پوشش‌های میانی تنک و نیمه‌انبوه ضعیف بوده و در تشخیص پوشش‌های متراکم و مناطق فاقد تاج‌پوشش دقت مطلوبی دارد. این نتیجه از تصاویر حاصل از هم‌فزایی باندها نیز احصاء شد. از این‌روی مدل مناسبی برای پایش جنگل‌های هیرکانی است. استفاده از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالاتر منجر به افزایش دقت مکان‌یابی مدل و بالطبع دقت طبقه‌بندی خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: پاسخ طیفی، تلفیق داده‌ها، دقت طبقه‌بندی، طبقات تراکمی جنگل، نگارگر تراکم تاج پوشش جنگل

## علائم و اختصارات

$L_{max}$  بیشینه رادیانس برگشتی در باند مادون قرمز حرارتی  
 $L_{min}$  کمینه رادیانس برگشتی در باند مادون قرمز حرارتی  
 $HYB_i$  باند هیبریدی محاسبه شده از ادغام داده‌ها

### مقدمه

کمی‌سازی مشخصه‌های بیوفیزیکی جنگل به عنوان پارامترهای اثر گذار در وضعیت آب و هوایی و مطالعه ذخیره کربن همواره مورد توجه پژوهشگران در عرصه مطالعات محیط زیست و آب و هوا بوده است. بررسی مستقیم و زمینی این شاخص‌ها در مقیاس ناحیه‌ای و جهانی مستلزم صرف زمان و هزینه زیادی است. این در حالی است که ابزار سنجش از دور به عنوان روشی برای مطالعه اهداف در سطح وسیع، این امکان را فراهم می‌کند که مطالعات در سطح وسیع و با سرعت و دقت مناسبی پی گرفته شود. به طور خلاصه، روش‌های اندازه‌گیری مستقیم

$FCD$	تراکم تاج پوشش جنگلی
$AVI$	شاخص گیاهی پیشرفته
$NDVI$	شاخص نرمال گیاهی
$SI$	شاخص سایه
$SSI$	شاخص سایه مقیاس شده
$BI$	شاخص خاک بایر
$SIL$	شاخص سایه لگاریتمی
$T$	شاخص حرارتی
$K_1$	ثابت کالیبراسیون سنجنده
$K_2$	ثابت کالیبراسیون سنجنده
$VD$	تراکم گیاهی

۱. مرئی (نویسنده مخاطب)

۲. استاد

۳. استاد

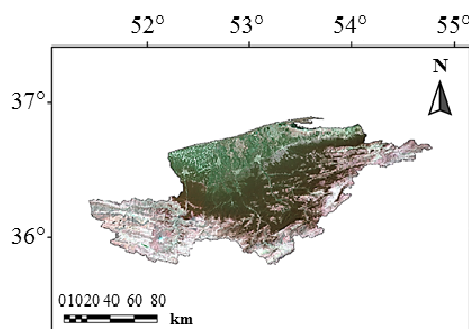
تاج پوشش جنگلی در جنگل‌های شمال ایران در سال ۱۳۷۹ و ۱۳۸۰ هدف مطالعه این مقاله قرار گرفته است. دلیل انتخاب این سال‌ها این بود که داده ارزیابی مورد استفاده متعلق به این سال‌ها بود. به دیگر بیان نقشه طبقه‌بندی که در ادامه کار به آن اشاره شده است بر اساس مشاهدات میدانی و اطلاعات تصویری مربوط به سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۸۰ تهیه شده است. این مقاله در شش بخش ارائه می‌شود. مرور مطالعات صورت گرفته و ضرورت انجام مطالعه در جنگل‌های ایران در قسمت مقدمه از نظر گذشت. در بخش دوم ضمن معرفی داده مورد استفاده، منطقه مطالعاتی معرفی می‌شود. بخش سوم به مبانی نظری در این پژوهش می‌پردازد. روش پیشنهادی و ارزیابی نتایج به ترتیب در بخش‌های چهارم و پنجم ارائه خواهد شد. در پایان بحث و نتیجه‌گیری کوتاهی در بخش ششم بیان خواهد شد.

## مواد و روش‌ها

در این بخش، منطقه مطالعاتی و داده‌های زمینی و ماهواره‌ای مورد استفاده در پژوهش معرفی می‌شود.

### منطقه مطالعاتی

همچنان که در مقدمه ذکر شد، مدل FCD دارای پتانسیل مناسبی در برآورد تراکم تاج جنگل در مناطق جنگلی با پوشش متراکم است [۷]. از این رو، بیشتر تحقیقات صورت گرفته با مدل FCD در مناطقی با پوشش جنگلی متراکم بوده است. با توجه به اهدافی که برای این پژوهش در نظر گرفته شده است، منطقه مطالعاتی هدف، حوضه آبخیز<sup>۱</sup> هراز انتخاب شده است که ترکیبی از پوشش‌های متنوع جنگلی با تاج پوشش مختلف، مناطق شهری و روستایی، عوارض آبی و مرتع است. در مطالعات اکولوژیکی معمولاً از یک حوضه آبخیز به عنوان یک واحد طبیعی مطالعاتی استفاده می‌شود. [۷] بدیهی است که مطالعه پارامترهای طبیعی نظیر تاج پوشش در قالب واحد مطالعاتی که طبیعت در اختیار ما می‌گذارد، دارای نتایج به مراتب قابل استنادتر خواهد بود.



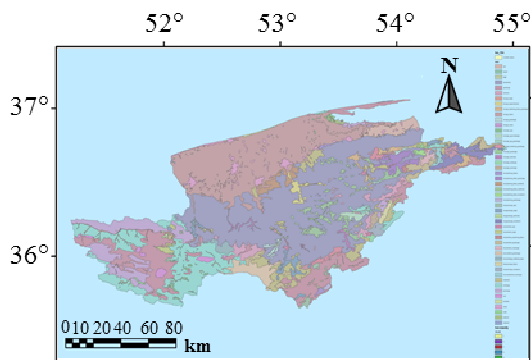
شکل ۱- حوضه آبخیز هراز به عنوان محدوده مورد مطالعه

زمینی<sup>۱</sup>، روش‌های غیر مستقیم نمونه‌برداری آماری و برآورد<sup>۲</sup> و در نهایت روش‌های سنجش از دوری<sup>۳-۵</sup> سه استراتژی عمده در تعیین پارامترها و مشخصه‌های بیوفیزیکی و هندسی در منطقه جنگلی هستند. امروزه روش‌های سنجش از دوری به دلیل تعدد سنجنده‌ها با توان تفکیکی بالا و پوشش وسیع گوی سبقت را از دو روش دیگر ربوده و عموماً تهیه داده‌های آموزشی و آزمایشی از طریق برداشت زمینی انجام می‌گیرد. روش‌های سنجش دوری نیز عموماً مبتنی بر دو روش طبقه‌بندی و استفاده از مدل‌های فیزیکی هستند. در این میان، اگر چه روش‌های طبقه‌بندی نظارت شده<sup>۶</sup> در مقایسه با روش‌های نظارت نشده<sup>۷</sup> از دقت مناسبی در طبقه‌بندی جنگل برخوردار هستند، اما به دلیل نیاز به برداشت داده‌های آموزشی در بسیاری از موارد به دلیل هزینه بالا و یا مناطق غیر قابل دسترس، کارایی خود را از دست می‌دهند. [۷]

یکی از مرسوم‌ترین مدل‌ها در این راستا، مدل چگالی تاج پوشش جنگل<sup>۸</sup> (FCD) است که به دلیل مزایای متعدد مانند سهولت اجرا، عدم نیاز به داده آموزشی و عدم تأثیرپذیری از گونه جنگل، مورد توجه پژوهشگران سنجش از دور و جنگل قرار گرفته است. طائفی و علی‌محمدیبا بهبود شاخص FCD با استفاده از باند پانکروماتیک، طبقه‌بندی حاصل از این مدل را در حوضه آبخیز خزر بهبود بخشیدند [۷]. ساعی جمال‌آباد و آبکار از مدل FCD برای بررسی تغییرات جنگل در سه دوره زمانی تصاویر لندست استفاده نموده‌اند [۸]. عزیزی و همکاران با حذف شاخص حرارتی، از این مدل برای طبقه‌بندی تراکم جنگل در بخشی از جنگل‌های هیرکانی شمال ایران با استفاده از تصاویر IRS استفاده نمودند [۹].

جنگل‌های شمال ایران موسوم به جنگل‌های هیرکانی، عمدتاً دارای پوشش متراکم هستند. در حال حاضر تهیه نقشه‌های طبقات تراکمی عرصه‌های جنگلی در بازه‌های زمانی ۵ یا ده ساله صورت می‌گیرد که به دلیل استفاده از روش‌های سنتی مبتنی بر تفسیر چشمی هزینه و زمان بالایی را طلب می‌کند. از این رو هدف اصلی این مقاله ارائه یک نقشه طبقه‌بندی تاج پوشش جنگل به عنوان اطلاعات مورد نیاز جهت مدیریت پایدار جنگل و برنامه‌های زیست محیطی در آینده است. توجه به این نکته که مدل FCD بدون نیاز به داده آموزشی قابلیت پیاده‌سازی در جنگل با گونه‌های مختلف و تراکم‌های متغیر را دارد، سبب اقبال پژوهشگران به آن شده است. به‌رغم مزایای غیرقابل انکار این مدل، دقت نتایج حاصل از آن در مناطق جنگلی با تراکم پایین قابل قبول نبوده و نیاز به بازنگری دارد. از این رو، ارزیابی و بهبود کارایی مدل مذکور در برآورد تراکم

4. Ground Measurement
5. Indirect Statistical Approach
6. Remote Sensing Approach
7. Supervised Classification
8. Unsupervised Classification
9. Forest Canopy Density



شکل ۲- نقشه کاربری حوضه آبخیز هراز، شامل ۴۹ کلاس پوشش مختلف

داده مبنای استفاده شده از سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور اخذ شد و در زمان انجام پژوهش تنها داده قابل اعتماد موجود در مقیاس مورد مطالعه بود.

این داده دارای ۴۹ کلاس کاربری و پوششی مختلف است. با کمک متخصصین و کارشناسان جنگل این ۴۹ کلاس در قالب ۴ کلاس مطابق جدول (۲) مجدداً طبقه‌بندی گردید. نحوه نگاشت طبقات کاربری ۴۹ گانه به ۴ کلاس تراکمی این پژوهش در مرجع شماره ۷ به تفصیل ذکر شده است و در شکل (۳) آمده است. نتیجه انتساب کلاس تراکم جنگلی به طبقات کاربری به عنوان نقشه مرجع FCD در شکل (۴) آمده است.

نقشه مبنا در چهار طبقه مطابق با جدول (۲) تهیه شد و برای ارزیابی نتایج به کار گرفته شد.

در این طبقه‌بندی به دلیل محدودیت داده‌های مبنا، طبقات جنگل انبوه (تاج‌پوشش ۵۰ تا ۷۵٪) با بسیار انبوه (تاج‌پوشش بیش از ۷۵٪) و نیز جنگل بسیار تنک (تاج‌پوشش ۱ تا ۵٪) با مناطق غیرجنگلی (تاج‌پوشش کمتر از ۱٪) ادغام شده‌اند.

حد آستانه‌های تعریف شده برای طرح نیز بر اساس استانداردهای داخلی سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور تعریف شده است که البته با استاندارد طبقه‌بندی سازمان فائو قدری مغایرت دارد. چراکه از نظر فائو تراکم کمتر از ۱۰٪ تاج پوشش اساساً جنگل نیست.

جدول ۲- طبقه‌بندی نقشه کاربری مرجع قالب ۴ کلاس FCD

توضیحات	معیار طبقه‌بندی	طبقه
فاقد تاج‌پوشش (مسکونی، آبی، کشاورزی و مرتع).	$0 < FCD < 5$	نواحی غیرجنگلی
جنگل‌های با تاج پوشش بین ۵ تا ۲۵٪	$5 < FCD < 25$	جنگل تنک
جنگل‌های با تاج پوشش بین ۲۵ تا ۵۰٪	$25 < FCD < 50$	جنگل نیمه انبوه
جنگل‌های با تاج پوشش بیش از ۵۰٪	$50 < FCD$	جنگل انبوه

در شکل (۱) محدوده حوضه آبخیز خزر را که شامل گونه‌های غالب راش، ممرز، بلوط، افرا و توسکا می‌باشد و از این منظر جنگل آمیخته و ناهمسال محسوب می‌شود، نمایش داده شده است.

### داده‌های سنجش از دوری

در این پژوهش از سه تصویر ماهواره لندست ۷ استفاده شده است که نام و تاریخ هریک از آنها در جدول (۱) آمده است.

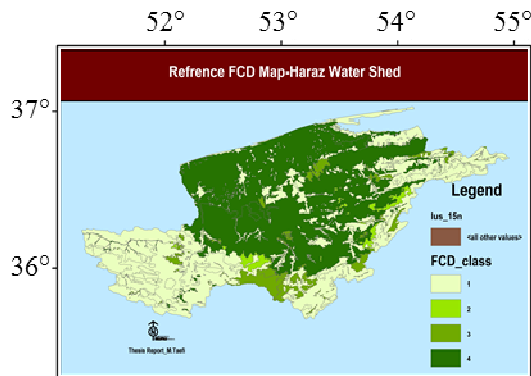
جدول ۱- فهرست داده استفاده شده برای منطقه

نوع داده	تصویر مورد استفاده	تاریخ میلادی	تاریخ شمسی
لندست ۷ سنجنده ETM+	P164-R035	2000-07-18	۲۷ تیر ماه ۱۳۷۹
	P163-R035	2001-07-30	۸ مرداد ماه ۱۳۸۰
	P163-R034	2001-07-30	۸ مرداد ماه ۱۳۸۰

با توجه به اینکه فاصله اخذ داده‌ها حداکثر ۱۲ روز است (۲۷ تیرماه تا ۸ مردادماه) و همچنین طی یک دوره یکساله، تغییرات تاج‌پوشش جنگلی زیاد نیست، بنابراین استفاده از داده‌های فوق توجیه‌پذیر است. به دیگر بیان در طی یکسال تغییرات تاج‌پوشش جنگل زیاد نبوده و از سوی دیگر از جنبه فنولوژی گیاهی و مدل رشد جنگل در یک بازه زمانی دوازده روزه تغییرات قابل ملاحظه‌ای در تاج پوشش رخ نمی‌دهد. دلیل اصلی استفاده از داده با تأخیر یکساله فقدان داده تصویری مناسب غیر ابری بود. به منظور دستیابی به تصویر یکپارچه حوضه سه تصویر موزاییک شده و سپس با استفاده از فایل برداری مرز حوضه که از نقشه کاربری حوزه آبخیز خزر بدست آمده بود، محدوده جغرافیایی حوضه آبخیز هراز استخراج گردید. دلیل اصلی اعمال مدل بر تصاویر این سال به زمان تهیه داده واقعیت زمینی برمی‌گردد.

### داده مرجع

به منظور ارزیابی نتایج از نقشه کاربری تهیه شده توسط مرکز تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور که در سال ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ تهیه شده است، استفاده شد. مشاهدات گسترده زمینی و برداشت محدوده کاربری‌های مختلف با استفاده از گیرنده موقعیت‌یاب ماهواره‌ای به همراه تجربیات و شواهد میدانی کارشناسان بومی ادارات کل منابع طبیعی منطقه قابلیت اطمینان مطلوبی به این نقشه بخشیده است. شکل (۲)، نقشه کاربری حوضه آبخیز هراز، شامل ۴۹ کلاس پوشش مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۴- نقشه زمینی در قالب نقشه طبقات تراکمی تاج پوشش جنگل

### روش شناسی

در این بخش، نگارگر انبوهی تاج پوشش گیاهی به همراه توضیحی کوتاه از شاخص‌های مورد استفاده در آن ارائه می‌شود.

#### نگارگر انبوهی تاج پوشش جنگلی<sup>۱۱</sup>

نخستین بار این روش توسط پرفسور ریکیمارو<sup>۱۲</sup> در سال ۱۹۹۶ به منظور برآورد میزان تراکم تاج پوشش جنگلی در جنگل‌های سوماترای اندونزی توسط سازمان بین‌المللی چوب مناطق استوایی<sup>۱۳</sup> به کار گرفته شد و دقت نتایج آن در کنار عدم نیاز مدل به داده‌های آموزشی، سبب توسعه روزافزون این مدل در دنیا گردید. به گونه‌ای که مرکز مشاوره جنگل‌های برون مرزی ژاپن<sup>۱۴</sup> در سال ۲۰۰۱ بر آن شد تا نرم‌افزار نیمه‌خبره‌ای را برای محاسبه تراکم تاج پوشش جنگلی<sup>۱۵</sup> ارائه دهد. یکی دیگر از نقاط قوت روش مذکور امکان پیاده‌سازی آن بر روی تصاویر رایگان نلدست است که سبب می‌شود با کاهش هزینه‌های اجرای پروژه، امکان استفاده از این روش در پایش تغییرات تراکم جنگل فراهم شود. مدل مورد استفاده در این روش بر اساس مقادیر چهار شاخص طیفی، قادر به طبقه‌بندی تراکم تاج پوشش گیاهی است. در ادامه ضمن معرفی شاخص‌های مذکور تعبیر فیزیکی هر یک ارائه می‌شود.

#### شاخص‌های طیفی مورد استفاده در مدل FCD

مدل تراکم تاج پوشش جنگل از ترکیب چهار شاخص طیفی به دست می‌آید. در واقع با استفاده از خصوصیات فیزیکی، سیمایی و فیزیوگنومیک که هر یک از این شاخص‌ها بیانگر آن هستند و در نهایت با ترکیب آن‌ها میزان انبوهی تاج پوشش جنگل بر حسب درصد بیان می‌شود.

ردیف	کلاس نقشه کاربری مرجع	نام و ویژگی عوارض موجود در طبقه	کلاس انتسابی FCD
۱	agri	کشاورزی	۱
۲	airport	فرودگاه	۱
۳	bagh	باغ	۴
۴	denseforest	جنگل با تاج پوشش بیش از ۷۵٪	۵
۵	goodrange	اراضی مرتعی خوب با تاج پوشش بیش از ۷۵٪	۱
۶	lowforest	جنگل با تاج پوشش کمتر از ۲۵٪	۳
۷	mix(agri bagh)	باغ - کشاورزی	۵
۸	mix(agri bagh-lowforest)	کشاورزی باغ جنگل تنک	۱
۹	mix(agri dryfarming follow goodrange)	کشاورزی دیمزار - اراضی تحت اینس - مرتع خوب	۱
۱۰	mix(agri follow)	کشاورزی - اینس	۵
۱۱	mix(agri goodrange)	کشاورزی مرتع خوب	۱
۱۲	mix(agri urban)	کشاورزی - مسکونی	۱
۱۳	mix(bagh agri)	باغ - کشاورزی	۵
۱۴	mix(bagh agri goodrange)	باغ - کشاورزی مرتع خوب	۱
۱۵	mix(bagh agri-modrange)	باغ - کشاورزی - مرتع متوسط	۱
۱۶	mix(bagh dryfarming goodrange)	باغ - دیمزار - مرتع خوب	۱
۱۷	mix(bagh goodrange)	باغ - مرتع خوب	۱
۱۸	mix(bagh lowforest)	باغ - جنگل تنک	۳
۱۹	mix(bagh modrange)	باغ - مرتع متوسط	۱
۲۰	mix(bagh poorange)	باغ - مرتع فقیر	۱
۲۱	mix(dryfarming follow)	دیمزار - اینس	۱
۲۲	mix(dryfarming follow goodrange)	دیمزار اینس - مرتع خوب	۱
۲۳	mix(dryfarming follow lowforest)	دیمزار اینس - جنگل تنک	۱
۲۴	mix(dryfarming follow modforest)	دیمزار اینس - جنگل نیمه انبوه	۱
۲۵	mix(dryfarming follow woodland1)	دیمزار اینس - اراضی منجر	۱
۲۶	mix(dryfarming goodrange)	دیمزار - مرتع خوب	۱
۲۷	mix(goodrange agri)	مرتع خوب - کشاورزی	۱
۲۸	mix(goodrange bagh)	مرتع خوب - باغ	۱
۲۹	mix(goodrange lowforest)	مرتع خوب - جنگل تنک	۳
۳۰	mix(goodrange woodland1)	مرتع خوب - اراضی منجر	۱
۳۱	mix(lowforest agri)	جنگل تنک - کشاورزی	۱
۳۲	mix(lowforest bagh)	جنگل تنک - باغ	۳
۳۳	mix(lowforest dryfarming follow)	جنگل تنک - دیمزار اینس	۱
۳۴	mix(lowforest goodrange)	جنگل تنک - مرتع خوب	۱
۳۵	mix(lowforest modrange)	جنگل تنک - مرتع متوسط	۱
۳۶	mix(modforest goodrange)	جنگل نیمه انبوه - مرتع خوب	۴
۳۷	mix(modrange modforest bagh)	مرتع متوسط - جنگل نیمه انبوه - باغ	۱
۳۸	mix(poorange follow)	مرتع ضعیف - اینس	۱
۳۹	mix(poorange woodland1)	مرتع ضعیف - اراضی منجر	۱
۴۰	mix(verylowforest modrange)	جنگل تخریب شده - مرتع متوسط	۱
۴۱	modforest	جنگل نیمه انبوه با تاج پوشش بین ۲۵ تا ۵۰٪	۴
۴۲	modrange	مرتع متوسط	۱
۴۳	poorange	مرتع فقیر	۱
۴۴	rock	مناطق سنگی	۱
۴۵	shoreline	خط ساحلی	۱
۴۶	urban	مناطق شهری	۱
۴۷	water	عوارض آبی	۱
۴۸	wetland1	زمینهای مواجه با گسترش سطح آبی ۱	۱
۴۹	wetland2	زمینهای مواجه با گسترش سطح آبی ۲	۱

شکل ۳- تخصیص طبقات FCD به طبقات کاربری نقشه مرجع

نحوه تخصیص کلاس تراکمی به نوع کاربری و توضیحات مربوط در شکل (۳) ارائه شده است. نتیجه بازطبقه‌بندی نقشه مرجع بر اساس کلاس‌های انتسابی در شکل (۴) ارائه شده است.

11. Forest Canopy Density Mapper  
12. Rikimaru  
13. ITTO:International tropical Timber Organization3  
14. JOFCA: Japan Overseas Forestry Consultants Association  
15. FCD Mapper

$$\begin{aligned} b1 &= 100 \times \log(b1 - b1_{\min} + 1) \\ b2 &= 100 \times \log(b2 - b2_{\min} + 1) \\ b3 &= 100 \times \log(b3 - b3_{\min} + 1) \\ SIL &= \sqrt[3]{(256 - b1)(256 - b2)(256 - b3)} \end{aligned} \quad (۴)$$

جایگزینی سریع پوشش گیاهی سطحی، در مناطقی که جنگل‌زدایی رخ داده با مراتع، بیشه‌زارها، علفزارها و سایر گونه‌های سریع‌الرشد جنگلی همواره مسئله اصلی الگوریتم‌های طبقه‌بندی جنگل است.

به این ترتیب، می‌توان شاخص SI را مهم‌ترین و تاثیرگذارترین شاخص در تعیین میزان انبوهی تاج‌پوشش جنگلی دانست. از این شاخص در تعیین منابع درختی خارج از جنگل<sup>۲۰</sup> نیز استفاده شده است [7].

آخرین شاخص مورد استفاده در مدل FCD، شاخص حرارت<sup>۲۱</sup> (TI) است که صرفنظر از میزان تراکم پوشش گیاهی و تاج پوشش جنگل و صرفاً با هدف متمایز ساختن دو پدیده خاک و گیاه تعریف شده‌است. شاخص حرارتی که منبع آن داده‌های حرارتی مندرج در باند ۶ سنجنده ETM+ می‌باشد، بر اساس رابطه زیر بدست می‌آید.

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L} + 1\right)} \quad (۵)$$

که مقادیر پارامترهای آن بر اساس روابط زیر بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} L &= L_{\min} + \left[ \frac{(L_{\max} - L_{\min})}{255} \times Q \right] \\ K_1 &= 666.09 \frac{\text{watts}}{m^2 \times \text{ster} \times \mu\text{m}} \\ K_2 &= 1282.71(\text{kelvin}) \end{aligned} \quad (۶)$$

$$L_{\min} = 0.1238 \frac{\text{watts}}{m^2 \times \text{ster} \times \mu\text{m}}$$

$$L_{\max} = 1.500 \frac{\text{watts}}{m^2 \times \text{ster} \times \mu\text{m}}$$

که در آن، L، مقدار رادیانس برگشتی در باند مادون قرمز حرارتی، Q مقدار عددی پیکسل در باند ۶،  $K_1$  و  $K_2$  ثابت‌های کالیبراسیون سیستم سنجنده و بالاخره T، دمای زمینی بر حسب کلونین است. شکل (۵) رفتار کلی و چگونگی تغییر هر یک از چهار شاخص مدل FCD نسبت به تغییرات انبوهی تاج‌پوشش را بصورت کیفی بیان می‌کند. نکته قابل تامل این‌که اندکس گیاهی پیشرفته نسبت به اندکس سایه سریعتر اشباع می‌شود. دلیل این امر آن است

شاخص گیاهی پیشرفته<sup>۱۶</sup> (AVI) به عنوان جایگزینی مناسب برای شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی<sup>۱۷</sup> (NDVI)، ضعف این شاخص را در عدم توانایی حذف اثرات بازتاب پس‌زمینه خاک رفع کرده، منجر به دقت بالاتری در تفکیک پوشش گیاهی از خاک می‌شود. شاخص NDVI از واکنش طیفی شدید گیاهان در بخش مادون قرمز برای تشخیص پوشش گیاهی استفاده می‌کند. در مقابل شاخص AVI بر اساس مقادیر بازتابندگی در باندهای ۳ و ۴ لندست به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$b4 - b3 < 0 \Rightarrow AVI = 0 \quad (۱)$$

$$b4 - b3 > 0 \Rightarrow AVI = \left[ \frac{(b4 + 1)(256 - b3)(b4 - b3)}{255} \right]^{\frac{1}{3}}$$

که در آن b3 بازتابندگی در باند سوم و b4 بازتابندگی در باند چهارم است. ملاحظه می‌شود که شاخص مذکور به ازای افزایش تراکم پوشش گیاهی، افزایش یابد.

دومین شاخصی که در مدل FCD مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد، شاخص خاک بایر<sup>۱۸</sup> (BI) است که از اطلاعات باند مادون قرمز میانی برای متمایز نمودن پوشش گیاهی از دیگر پوشش‌ها و در واقع نواحی فاقد پوشش گیاهی استفاده می‌کند. مبنای این شاخص بر تأثیر متقابل خاک بدون پوشش و خاک حاوی پوشش گیاهی استوار است و طبق رابطه<sup>(۲)</sup> به‌دست می‌آید.

$$BI = \frac{(b5 + b3) - (b4 + b1)}{(b5 + b3) + (b4 + b1)} \times 100 + 100 \quad (۲)$$

که در آن، b1، b3، b4 و b5 به ترتیب مقادیر بازتابندگی در باندهای یک، سه، چهار و پنج است. بدیهی است که انتظار می‌رود مقدار این شاخص بازای افزایش تراکم پوشش گیاهی، کاهش پیدا کند.

شاخص سایه گیاهان<sup>۱۹</sup> (SI)، پارامتر مهمی جهت تفکیک جنگل از پوشش‌هایی مانند بوته و مرتع است. بدیهی است که مقدار این شاخص در جنگل‌های جوان و تقریباً مسطح در مقایسه با جنگل‌های رشدیافته و قدیمی مقدار کمتری را داراست. شاخص مذکور بر اساس مقادیر بازتابندگی در باندهای ۱، ۲ و ۳ مطابق رابطه<sup>(۳)</sup> به‌دست می‌آید.

$$SI = \sqrt[3]{(256 - b1)(256 - b2)(256 - b3)} \quad (۳)$$

برای تقویت و نمایش بهتر این اندکس معمولاً آنرا به‌صورت یک رابطه لگاریتمی به صورت زیر ارائه می‌دهند.

16. Advanced Vegetation Index

17. Normalized Difference Vegetation Index

18. Bare soil Index

19. Shadow Index

20. TROF: Tree Resource Outside the Forest

21. Thermal Index



در مرحله اول پیش پردازش و آماده سازی تصاویر شامل حذف نویز، مناطق تحت پوشش سایه ابر و مناطق آبی نظیر دریاچه ها انجام می شود. همچنین در این مرحله کلیه ویژگی های مستخرج از تصویر، به استثنای شاخص حرارتی، مطابق رابطه ۷ نرمال سازی می شوند.

$$X_1 = M - 2S, X_2 = M + 2S, Y_1 = 20, Y_2 = \quad (7)$$

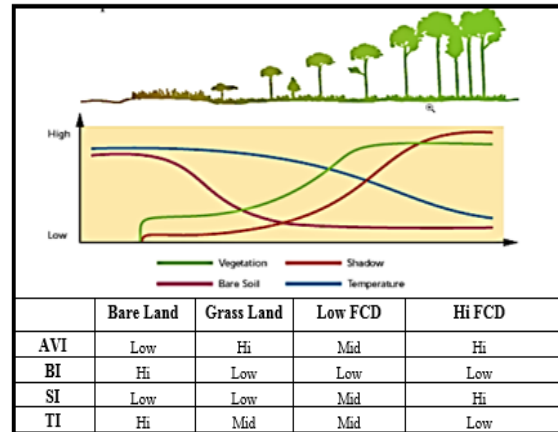
$$220A = \frac{Y_1 - Y_2}{X_1 - X_2} = \frac{20 - 220}{(M - 2S) - (M + 2S)} = \frac{50}{S} B = -AX_1 + Y_1 Y = AX + B$$

که در آن، M میانگین، S انحراف معیار داده ها، X مقادیر عددی تصویر اولیه در هر باند و بالاخره Y مقادیر عددی نرمال شده می باشند. در مرحله بعد مقادیر شاخص های خاک بایر<sup>۲۳</sup> و سایه نرمال شده<sup>۲۴</sup> (SSI) با استفاده از شاخص های اولیه محاسبه می شود. میزان بازتابندگی اندک مناطق خاکی ممکن است منجر به تلقی آن ها به عنوان سایه تاج پوشش در شاخص سایه شود. از طرفی دمای مناطق خاکی نسبت به محیط اطراف افزون تر است، در حالی که سایه سبب کاهش دمای مناطق تحت پوشش خود می شود. بروز این دو پدیده فلسفه استفاده از شاخص حرارتی را در تعیین مناطق خاک بایر روشن می سازد. با حد آستانه گذاری در شاخص حرارتی مناطق خاکی را که در شاخص سایه به اشتباه به عنوان سایه تاج پوشش تلقی شده اند استخراج می نماید. آنگاه با انجام برخی پردازش های مکانی و روش های حد آستانه گذاری شاخص سایه پیشرفته و سپس شاخص سایه نرمال شده بدست می آید.

انبوهی بالای تاج پوشش در برخی مناطق، کاهش توانایی داده های ماهواره ای در تشخیص میزان تراکم با استفاده از شاخص سایه را به دنبال دارد. چه بسا در نقاطی با تاج پوشش انبوه با مقادیر کوچکی در شاخص سایه مواجه شویم. به همین منظور با اعمال یک فیلتر بیشینه ۳×۳ روی تصویر شاخص سایه، مقدار بیشینه درون پنجره به پیکسل مرکزی منتقل می شود. از سوی دیگر با استفاده از شاخص VI و تعیین حد آستانه مناسب، برای مناطق جنگلی مقدار ASI=SI و برای مناطق غیرجنگلی مقدار ASI=0 در نظر گرفته می شود. و نیز با استفاده از شاخص TI و انتخاب حد آستانه مناسب، چنانچه مقدار یک پیکسل بزرگتر از حد آستانه باشد ASI=0 و برای مقادیر کوچکتر ASI=SI خواهد بود. در نهایت، به منظور مقایسه مقادیر نسبی شاخص سایه با دیگر پارامترها شاخص سایه مقیاس شده<sup>۲۵</sup> (SSI) را که تبدیل خطی شاخص سایه پیشرفته ASI بوده و مقادیر آن از صفر تا صد مرتب شده است را به دست می آوریم.

مطابق شکل (۷)، شاخص های VI و BI همبستگی منفی

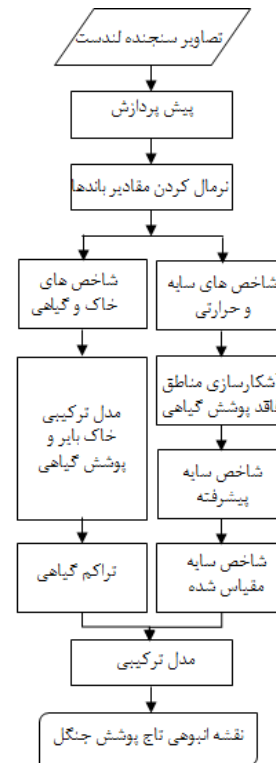
که مقدار شاخص گیاهی از همه داده های گیاهی اعم از جنگل، چمنزار و غیره، صرف نظر از میزان تراکم آن ها بدست می آید، در حالی که افزایش سایه اصولاً با افزایش تاج پوشش که موجب ایجاد سایه می شود همراه است.



شکل ۵- تغییر شاخص های مدل FCD نسبت به تغییر انبوهی تاج پوشش [۷]

## روندنمای نگارگر انبوهی تاج پوشش جنگلی<sup>۲۲</sup>

چگونگی اجرای مدل FCD مطابق روندنمای زیر می باشد که در ادامه مراحل آن توضیح داده شده است [۷].

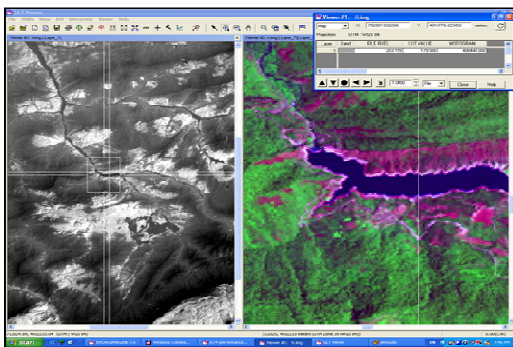


شکل ۶- روندنمای مراحل پیاده سازی مدل FCD

23. Bare Soil Detection  
24. Scaled Shadow Index  
25. Scaled Shadow Index

22. FCD Mapper

در آستانه‌گذاری شاخص حرارتی باید توجه داشت که مناطق آبی در آن تیره به نظر می‌رسند. همچنین مناطق خاکی که در سایه کوه‌ها قرار گرفته‌اند مقادیر عددی کمتری دارند و سایه، کاهش دمای این مناطق را موجب شده است. نکته دیگر در مورد مناطق جنگلی است که به صورت تکه‌تکه و پراکنده قرار دارند. دمای این مناطق بالاتر از دمای مناطق جنگلی گسترده است. به همین منظور باید توجه نمود که تعیین یک آستانه نامناسب برای شاخص حرارتی ممکن است به حذف توده‌های پراکنده جنگلی بیانجامد. وجود سایه در برخی مناطق، تعیین یک آستانه مناسب برای شاخص حرارتی را دشوارتر می‌سازد.



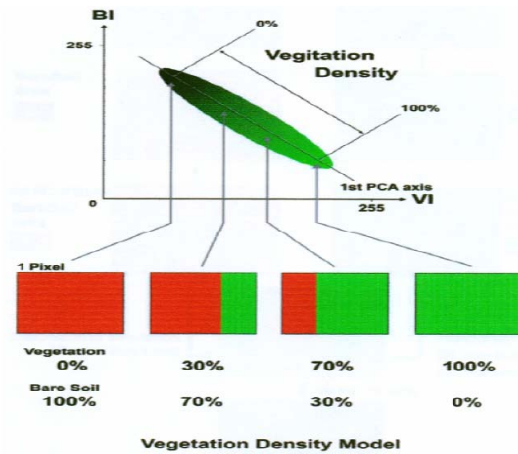
شکل ۸- مقایسه بصری مقادیر پیکسل‌های تصویررنگی و شاخص حرارتی به منظور تعیین بهینه آستانه

بررسی بصری شاخص‌ها به منظور انتخاب آستانه بهینه در شکل (۸) ارائه شده است.

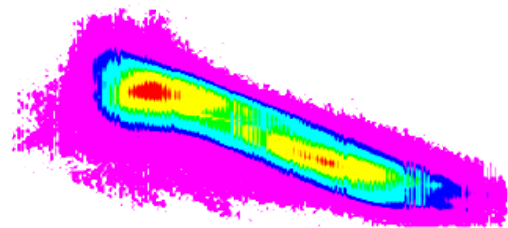
در این حالت با نواحی جنگلی‌ای که در خط‌القدرها و در سایه کوه‌ها قرار گرفته‌اند مشکلی نداریم، چراکه هرچند دمای این مناطق قدری کاهش می‌یابد ولیکن در طبقه‌بندی کلی ناشی از آستانه‌گذاری به عنوان مناطق جنگلی تلقی خواهند شد. مشکل اصلی با نواحی بدون پوششی است که در خط‌القدرها و نواحی که کمتر در معرض تابش نور خورشید است، قرار دارند. این مناطق که معمولاً در بیشتر ساعات روز در سایه قرار دارند دارای درجه حرارتی کمتر از نواحی مشابه تحت تابش خورشید، همین مسئله موجب می‌شود که این مناطق به غلط به عنوان نواحی دارای پوشش گیاهی تلقی شده و میزان خطای شمول آستانه‌گذاری را افزایش دهند.

نتیجه نهایی اینکه شاخص حرارتی TI در متمایز نمودن مناطق جنگلی در سایه و یا بیرون از آن خطای چندانی ندارد. عمده خطای شاخص TI در متمایز نمودن توده‌های جنگلی پراکنده و گسسته است. توانایی این شاخص برای تفکیک مناطق خاکی‌ای که در سایه قرار دارند به ویژه آنهایی که در مدت زیادی از طول روز در سایه هستند محدود است و در بسیاری از موارد اینگونه نواحی را به عنوان مناطق پوشش‌دار تلقی می‌کند. مناطق خاکی‌ای که در نواحی دره‌مانند و تحت سایه دائمی کوه‌های بلند می‌باشند با

بالایی دارند. با ترکیب آن‌ها و استفاده از مؤلفه اول روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی<sup>۲۶</sup> (PCA)، شاخص تراکم گیاهی<sup>۲۷</sup> (VD) را بدست آورده و مقادیر آن از ۰ تا ۱۰۰ مرتب می‌شوند.



(الف)



(ب)

شکل ۷- تراکم گیاهی به دست آمده از شاخص‌های VI و BI (الف) مدل مفهومی. (ب) پراکنش نگار به دست آمده از پردازش داده.

در پایان از ترکیب شاخص تراکم گیاهی و شاخص سایه نرمال شده مطابق رابطه (۸) به مهم‌ترین تبدیل برای انبوهی تاج‌پوشش گیاهی دست می‌یازیم. هردو متغیر دارای واحد درصد می‌باشند.

$$FCD = \sqrt{VD \times SSI + 1} - 1 \quad (۸)$$

### آستانه‌گذاری Thresholding

دقت طبقه‌بندی وابستگی زیادی به تعیین درست مقادیر آستانه دارد. تعیین حدآستانه مناسب نیاز به دانش مفسر داشته و همین نکته به عنوان مهم‌ترین ضعف مدل FCD در مقایسه با دیگر مدل‌های موجود قلمداد شده است. استفاده از پارامترهای آماری مشخص نظیر میانه، مد و میانگین به منظور تعیین مقادیر آستانه نتایج مطلوبی ارائه نمی‌دهد، از همین روی، بررسی هیستوگرام تصویر حاصله به منظور تعیین مقدار آستانه مناسب اجتناب ناپذیر می‌باشد.

26. Principal Component Analysis  
27. Vegetation Density

شاخص سایه مهمترین شاخص در مدل FCD می‌باشد و یکی از پارامترهای مهم در تعیین تاج- پوشش است. این شاخص عهده‌دار تمایز بین توده‌های جنگلی و سایر گیاهان نظیر بوته‌هاست که دارای تاج- پوشش بوده و در سایر شاخص‌ها با پوشش جنگلی آمیخته می‌شوند.

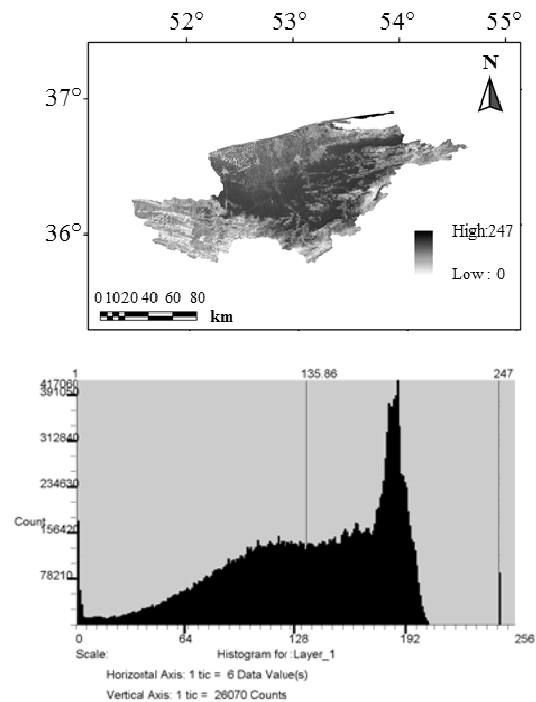
### روش پیشنهادی

استفاده از روش‌های تلفیق داده‌ها با حفظ محتویات طیفی و رادیومتریکی باندها منجر به افزایش قدرت تفکیک مکانی باندها شده و بالتبع حصول نتایج بهتر طبقه‌بندی را در پی خواهد داشت [۷]. از آنجایی که در سنجنده لندست علاوه بر باندهای طیفی، یک باند سیاه سفید<sup>۲۸</sup> نیز برداشت می‌شود، جهت بهبود حد تفکیک مکانی باندهای طیفی می‌توان از این باند سیاه سفید که دارای حدتفکیک مکانی دوبرابر باندهای طیفی است، استفاده نمود. به این ترتیب، در این پژوهش به منظور ادغام باندهای چندطیفی سنجنده ETM+ با باند Pan از دو روش پاسخ طیفی [۱۰] و<sup>۲۹</sup> (SFIM) [۱۱] استفاده شده‌است. در هر دو روش تلاش بر این است که با حفظ اطلاعات رادیومتریکی در هر باند، حدتفکیک مکانی بهبود یابد.

### بهینه‌سازی مدل FCD مبتنی بر تلفیق داده‌ها به روش پاسخ طیفی [۱۱]

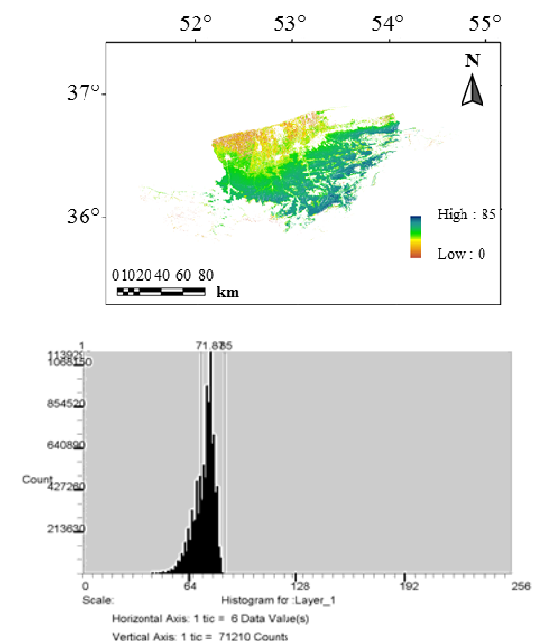
در این روش باندهایی تلفیق می‌شوند که منحنی پاسخ طیفی آن‌ها از هم‌پوشانی مناسبی برخوردار باشد. در سنجنده ETM+ باندهای ۲، ۳ و ۴ از هم‌پوشانی مطلوبی با باند Pan این سنجنده برخوردارند. بنابراین، این روش تلفیق تغییری در شاخص حرارتی TII ایجاد نمی‌کند و در مقابل با توجه به این که شاخص گیاهی VI بر اساس مقادیر بازتابندگی در دو باند ۳ و ۴ تولید می‌شود، لذا بیشترین بهبود مکانی متوجه این شاخص خواهد بود. در محاسبه شاخص BI باندهای ۳ و ۴ و در شاخص SI باندهای ۲ و ۳ تحت فرآیند تلفیق به روش پاسخ طیفی از قدرت تفکیک مکانی معادل با باند Pan برخوردار خواهند شد و سایر باندها تنها با اندازه قدرت تفکیک مکانی باند Pan مطابقت داده می‌شوند. به عبارت دیگر در نهایت اندازه زمینی پیکسل در کلیه باندها به ۱۵ متر می‌رسد که این ارتقا در باندهای ۲، ۳ و ۴ کاملاً مدل می‌شود و در سایر باندها فقط به صورت ظاهری و صرفاً برای همسان‌سازی ابعاد تصویر صورت می‌گیرد. نکته قابل تامل این که یکی از مهم‌ترین پارامترها در تلفیق داده‌ها دقت هم مرجع‌سازی<sup>۳۰</sup> باندهاست که در این تحقیق چون باندهای طیفی و پانکروماتیک یک فریم تصویری استفاده

استفاده از این شاخص به عنوان نواحی پوشش‌دار تلقی خواهند شد چراکه ارزش - عددی آنها کمتر از مقدار آستانه می‌شود. (شکل ۹)



شکل ۹- تصویر شاخص سایه SI منطقه و هیستوگرام مربوط به آن.

پس از تهیه شاخص سایه نوبت به تهیه شاخص سایه پیشرفته و پس از آن شاخص سایه تغییر مقیاس داده شده می‌رسد که در واقع همان شاخص سایه پیشرفته است که مقادیر آن برحسب درصد مرتب شده‌اند.



شکل ۱۰- تصویر شاخص سایه تغییر مقیاس داده شده SSI منطقه و هیستوگرام مربوط به آن.

28. Pacchromatic Band

29. Smoothing Filter-Based Intensity Modulation

30. Coregistration



$$SYN_{M-PAN} = \sum_{i=1}^n W_i \times M_i \quad (12)$$

پیش‌فرض استفاده از روش پاسخ طیفی همپوشانی باندهای چندطیفی با باند پانکروماتیک می‌باشد. این مسئله از روابط محاسباتی و مدل ریاضی این روش نیز به خوبی بر می‌آید چراکه عدم وجود همپوشانی بین باندهای فوق منجر به صفر شدن ضریب وزن‌دهی شده و در نتیجه سهم باند مصنوعی از باند چندطیفی موردنظر صفر خواهد بود.

### بهینه‌سازی مدل FCD مبتنی بر تلفیق داده‌ها به روش SFIM [۱۰]

به منظور دستیابی به روشی که قابلیت اطمینان بالایی در حفظ اطلاعات طیفی باندهای اولیه و اصلی داشته باشد تکنیک Smoothing Filter-Based Intensity Modulation (SFIM) در سال ۲۰۰۰ توسط Liu ارائه شد. برخلاف روش پاسخ طیفی، تلفیق به روش SFIM سبب بهبود حد تفکیک مکانی در کلیه باندهای چندطیفی می‌شود.

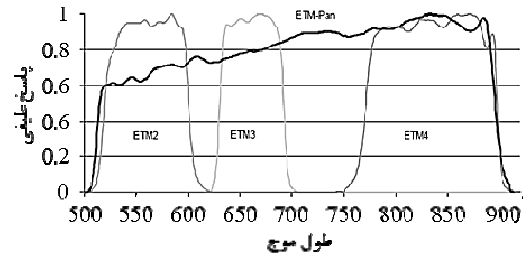
از این رو این روش تلفیق با بهینه کردن قدرت تفکیک مکانی تمامی باندها مکانیابی سبب بهینه‌سازی نتایج در تمامی شاخص‌های چهارگانه بکارگرفته شده در مدل خواهد شد. در حالیکه در روش پاسخ طیفی تنها شاخص VI بصورت کامل از باندهای با قدرت تفکیک مکانی بهینه‌تر ۱۵ متری استفاده می‌کند.

در سنجنده ETM+ باند Pan بطور همزمان با سایر باندهای چندطیفی سنجنده و با سیستم تصویربرداری همسان با آنها تصویربرداری می‌کند. در نتیجه این دو مجموعه داده با دقت بسیار خوبی با یکدیگر هم مختصات ۳۱ شده و از نظر روشنایی خورشید و دیگر شرایط محیطی در وضعیت یکسانی قرار دارند. این قابلیت‌ها سبب می‌شود که باند Pan سنجنده ETM+ نسبت به همین باند در سنجنده SPOT (و نیز سنجنده IRS) شرایط بسیار مطلوب‌تری برای ترکیب و ادغام با سایر باندهای چندطیفی دارا باشد.

چنانچه خطای هم‌ثباتی کمینه باشد، روش ادغام داده‌ای SFIM، که یک تکنیک ادغام داده‌ها بر اساس حفظ و در امان ماندن خصوصیات طیفی است، می‌تواند یک روش بهینه ادغام داده‌ای باشد که در آن ویژگی‌های طیفی باندهای اولیه شرکت‌کننده در ادغام بدون تغییر باقی بمانند.

از آنجا که روش فوق حساسیت بسیار بالایی به دقت و صحت هم‌ثباتی و تغییرات زمانی لبه‌ها دارد، پیاده‌سازی این روش برای داده‌های SPOT/PAN و ETM+ و TM/MultiSpectral و ادغام آن‌ها به ویژه در لبه‌ها نتایج خوبی در پی نخواهد داشت. در حالی که این مسئله بطور خودکار برای داده‌های پانکروماتیک و چندطیفی ETM+ حل شده است و

شده است از بالاترین میزان دقت برخوردار است. شکل ۱۱ همپوشانی منحنی پاسخ طیفی باند PAN را با باندهای ۲، ۳ و ۴ نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- منحنی‌های پاسخ طیفی باندهای PAN، ۳، ۴ و ۳ سنجنده لندست میزان حساسیت و پاسخ طیفی در طول محدوده طیفی نیز یکسان نیست. همپوشانی کامل و یا نسبی محدوده طول موج برخی از باندها منجر به همپوشانی در منحنی پاسخ طیفی آنها می‌شود. هرچه میزان این همپوشانی بیشتر باشد، همبستگی بین داده‌ها قوی‌تر خواهد بود.

بر این اساس Wornick و همکاران روشی را برای ادغام تصاویر ماهواره‌ای ارائه دادند و نتایج خوبی نیز کسب گردید. ادغام در این روش تنها بین باندهایی که دارای همپوشانی حساسیت طیفی می‌باشند و متناسب با میزان آن، بر اساس رابطه ۹ صورت می‌گیرد:

$$HYB_i = M_i \times \frac{PAN}{SYN_{M-PAN}} \quad (9)$$

که در آن  $HYB_i$  باند هیبرید محاسبه شده از ادغام و  $M_i$  باند چندطیفی  $i$  از سنجنده چندطیفی است. همچنین باند SYN یک باند مصنوعی محاسباتی است که بیانگر ویژگی طیفی باند Pan برای تمامی باندهای چندطیفی است که در فرآیند ادغام شرکت جسته‌اند.

برای ایجاد باند SYN تمامی باندهای چندطیفی ادغام شونده متناسب با میزان همپوشانی منحنی پاسخ طیفی‌شان با باند Pan وزن یافته و با هم جمع می‌شوند. ضریب وزن‌دهی که از نسبت دو سطح همپوشانی بدست می‌آید عبارت است از نسبت سطح همپوشانی منحنی پاسخ طیفی باند ادغام شونده با باند Pan به سطح کل زیر منحنی پاسخ طیفی باند مربوط و طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$W'_i = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \min(M_{RSR,i}(\lambda) \times PAN_{RSR}(\lambda)) d(\lambda)}{\int_{-\infty}^{+\infty} M_{RSR,i}(\lambda) d(\lambda)} \quad (10)$$

به طوری که،  $M_{RSR,i}(\lambda)$  حساسیت طیفی باند  $d(\lambda)$  دیفرانسیل تغییرات دامنه طول موج باندها،  $PAN_{RSR}(\lambda)$  حساسیت طیفی باند PAN، و  $W'_i$  ضریب وزن‌دهی باند  $i$  است. مواقعی که باندهای ادغام شونده بیش از یک باند باشند می‌توان ضرایب را به شرح ذیل نرمال نمود:

$$W_i = \frac{W'_i}{\sum_{i=1}^n W'_i} \quad (11)$$

سپس باند مصنوعی را با استفاده از ضرایب وزن‌دهی نرمال شده به صورت زیر محاسبه می‌کنیم:

نقشه مرجع Reference Map						
طبقه بندی طبقه بندی شده طبقه بندی شده	کلاس ۱	کلاس ۲	کلاس ۳	کلاس ۴	Σ	دقت کاربر User's Accuracy
	0-FCD -5 %	5-FCD +25 %	25-FCD -50 %	50%-FCD		
کلاس ۱	38638028	1135359	2079028	9282406	51134821	0/24 0/76
کلاس ۲	225	0	0	52185	52410	1/00 0/00
کلاس ۳	3189	3	3	125429	128604	1/00 0/00
کلاس ۴	2915439	387326	1161891	34852350	38718806	0/10 0/90
Σ	41156861	1522688	3240722	44112370	90032641	
خطای حذف Omission Error	0/06	1/00	1/00	0/21	Overall کلی Accuracy	81/40%
دقت تولید کننده Producer's Accuracy	0/94	0/00	0/00	0/79	ضریب کاپا Kappa Factor	64/89%

شکل ۱۳ - ماتریس خطای مدل FCD پس از اعمال روش هم‌افزایی پاسخ طیفی

بررسی دو ماتریس خطا حاکی از افزایش نسبی دقت طبقه‌بندی هر چند به میزان اندک می‌باشد.

نقشه مرجع Reference Map						
طبقه بندی طبقه بندی شده طبقه بندی شده	کلاس ۱	کلاس ۲	کلاس ۳	کلاس ۴	Σ	دقت کاربر User's Accuracy
	0-FCD -5 %	5-FCD +25 %	25-FCD -50 %	50%-FCD		
کلاس ۱	38638028	1135359	2079028	9282406	51134821	0/24 0/76
کلاس ۲	210	0	0	50541	50751	1/00 0/00
کلاس ۳	2057	3	21	99460	101541	1/00 0/00
کلاس ۴	2518566	387326	1161705	34879863	38745560	0/10 0/90
Σ	41156861	1522688	3240764	44112370	90032673	
خطای حذف Omission Error	0/06	1/00	1/00	0/21	Overall کلی Accuracy	81/43%
دقت تولید کننده Producer's Accuracy	0/94	0/00	0/00	0/79	ضریب کاپا Kappa Factor	84/94%

شکل ۱۴ - ماتریس خطای مدل FCD پس از اعمال روش هم‌افزایی SFIM

همانگونه که از ضرایب صحت کلی و آماره کاپا دو ماتریس مشهود است دقت طبقه‌بندی افزایش چشمگیری نداشته است. یکی از دلایل اصلی این مسئله دقت نقشه مرجع است. مقیاس نسبتاً بزرگ نقشه مرجع ناشی از تهیه آن بر اساس تفسیر چشمی تصاویر لندست توسط کارشناسان خبره است. حدود دقت آن نیز با قدرت تفکیک ۳۰ متری همخوانی و مطابقت بیشتری دارد. بر همین اساس ارتقای قدرت تفکیک مکانی از حد معینی هر چند بهبود طبقه‌بندی را در پی خواهد داشت ولیکن اثرات این بهبود در پارامترهای صحت‌سنجی و راستی‌آزمایی نتایج آنگونه که باید مشهود و برجسته نیست.

نکته دیگری که باید به آن توجه داشت و می‌تواندی یکی از دلایل رشد اندک دقت طبقه‌بندی مبتنی بر تصاویر تلفیقی باشد ماهیت عملکردی مدل FCD در تخمین تاج‌پوشش جنگلی در سطح یک پیکسل است. با این اوصاف این مدل تنها برای مناطقی با انبوهی تاج‌پوشش بالا (که تاج‌پوشش سطح عمده‌ای از پیکسل را در بر گرفته باشد) مطلوب است و برای مناطقی که انبوهی تاج پوشش اندکی در سطح یک پیکسل دارند، مدل عملکرد ایده‌آلی ندارد. برای تشریح این مسئله فرض می‌کنیم که مطابق شکل (۱۴) مقادیر تاج‌پوشش به صورت منظم به گونه‌ای در سطح منطقه توزیع شده‌اند که هر درخت در مرکز هر پیکسل واقع شده است.

این داده‌ها بر اساس سیستم تصویربرداری فرضا فاقد هر گونه خطای coregistration خواهند بود. و در نتیجه تصاویر ترکیبی با کیفیت بالا خواهیم داشت. این مدل به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$IMAGE_{SFIM} = \frac{IMAGE_{low-res} \times IMAGE_{high-res}}{IMAGE_{mean}} \quad (14)$$

که در آن،  $IMAGE_{low-res}$  تصویر اولیه است که پیکسل‌های آن از نظر هندسی با اندازه پیکسل‌های تصویر با قدرت تفکیک بالا مطابقت داده شده‌اند،  $IMAGE_{high-res}$  تصویر با قدرت تفکیک بالا که به منظور افزایش قابلیت مکانی باندهای ادغام شونده انتخاب شده است و  $IMAGE_{mean}$  یک باند محاسباتی است که از تصویر با قدرت تفکیک مکانی بالا بدست می‌آید.

بدین صورت که با اعمال یک فیلتر میانگین بر روی تصویر با قدرت تفکیک مکانی بالا و متوسط‌گیری همسایگی تصویری تهیه می‌کنیم که اندازه پیکسل‌های آن مساوی با پیکسل‌های تصویر با قدرت تفکیک مکانی پایین گردد.

این روش همچنین می‌تواند به عنوان روشی برای مدلاسیون مستقیم تصاویر با قدرت تفکیک پایین با مؤلفه‌های بافتی تصاویر با قدرت تفکیک بالا استفاده شود، ضمن اینکه نتایج آن مستقل از ویژگی‌های طیفی و مغایرتی تصویر با قدرت تفکیک بالا است. این روش حساسیت بالایی به دقت هم‌ثباتی تصاویر چند طیفی و Pan از خود نشان می‌دهد.

## تحلیل و ارزیابی نتایج

بازه‌های ۰-۵٪، ۵-۲۵٪، ۲۵-۵۰٪ و بیشتر از ۵۰٪ به ترتیب به عنوان مناطق فاقد جنگل، جنگل تنک، جنگل نیمه انبوه و جنگل انبوه انتخاب گردید. جهت ارزیابی نتایج از داده زمین مرجع در قالب همین ۴ کلاس استفاده شد که منجر به دقت کلی ۸۱/۵۹٪ و ضریب کاپای ۶۵/۲۹٪ شد. در ادامه ماتریس خطای ناشی از اعمال دو روش هم‌افزایی و تلفیق داده‌ها محاسبه شد که نتایج آن در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) آمده است.

ماتریس خطای شماره ۱						
نقشه مرجع Reference Map						
طبقه بندی طبقه بندی شده طبقه بندی شده	کلاس ۱	کلاس ۲	کلاس ۳	کلاس ۴	Σ	دقت کاربر User's Accuracy
	0-FCD -5 %	5-FCD +25 %	25-FCD -50 %	50%-FCD		
کلاس ۱	8903886	289592	913075	2059520	12164243	0/27 0/73
کلاس ۲	984	0	229	13250	14463	1/00 0/00
کلاس ۳	43163	5115	22321	48906	119586	0/81 0/19
کلاس ۴	758700	98362	342337	9010490	10209889	0/12 0/88
Σ	9705933	392039	1277962	11133246	22508180	
خطای حذف Omission Error	0/08	1/00	0/98	0/19	Overall کلی Accuracy	79/69%
دقت تولید کننده Producer's Accuracy	0/92	0/00	0/02	0/81	ضریب کاپا Kappa Factor	62/54%
میانگین وزنی FCD	6%	19%	21%	61%		
فاصله از نماینده طبقه (۲)		22%	67%	28%		

شکل ۱۲ - ماتریس خطای مدل FCD

## نتیجه‌گیری

هرچند عدم نیاز به داده آموزش زمینی از مزایای اصلی مدل FCD عنوان می‌شود ولیکن نقش کلیدی مفسر در تعیین مقادیر آستانه شاخص‌های مدل را می‌توان نوعی تزریق داده آموزشی به فرآیند اجرای مدل قلمداد کرد. از سوی دیگر یکی از مزایای عمده این مدل در مطالعه اهداف گیاهی، متمایز ساختن پوشش سطحی گیاهان از گیاهانی که دارای تاج‌پوشش هستند، می‌باشد. میانگین وزنی نسبتاً مناسبی که برای طبقات ۱ و ۴ بدست آمده‌است، ناشی از دقت مدل در تشخیص تاج پوشش‌های بسیار تنک و انبوه و فراوانی آن‌ها در منطقه می‌باشد. اگرچه توانایی مدل FCD در تشخیص و متمایز نمودن تداخل طیفی خاک زمینه و پوشش جنگلی در کلاس‌های تراکمی تنک و نیمه‌انبوه (تاج‌پوشش بین ۵ تا ۵۰٪) در سطح پیکسل محدود است، ولیکن در آشکارسازی مناطق غیرجنگلی و جنگل‌های بسیار تنک و نیز جنگل‌های بسیار انبوه دارای مقادیر دقت مطلوب و بالایی است.

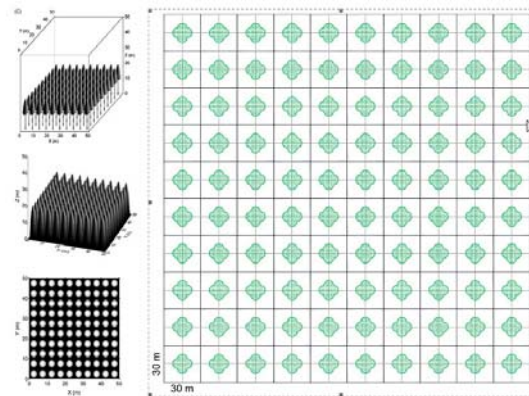
آشکارسازی و طبقه‌بندی توده‌های درختی متراکم جزیره‌ای و عموماً خارج از جنگل<sup>۳۳</sup> (TROF) با استفاده از این مدل بسیار خوب صورت می‌گیرد.

باید توجه داشت که این توده‌ها در نقشه مرجع تحت تاثیر کلاس غالب قرار گرفته و درون آن حذف شده‌اند.

پیاپی‌سازی مدل در مناطق متراکم جنگلی منجر به افزایش ضریب کاپا و دقت کلی شد چراکه در چنین مناطقی کلاس‌های تراکمی تنک و نیمه‌انبوه بسیار کمتر بوده و ضعف مدل در ارائه این کلاس‌ها مشهود نخواهد بود.

## مراجع

- [1] Korhonen, L. and et al., "Estimation of Forest Canopy Cover: a Comparison of Field Measurement Techniques," 2006.
- [2] Wani, A.A., Joshi, P.K., and Singh, O., "Estimating Biomass and Carbon Mitigation of Temperate Coniferous Forests Using Spectral Modeling and Field Inventory Data," *Ecological informatics*, Vol.25, 2015, pp. 63-70.
- [3] Mette, T., K. Papathanassiou, and I. Hajnsek, "Biomass Estimation from Polarimetric SAR Interferometry Over Heterogeneous Forest Terrain". in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, Proceedings IEEE International*, 2004.
- [4] Simard, M., et al., "A systematic Method for 3D Mapping of Mangrove Forests Based On Shuttle Radar Topography Mission Elevation Data", *ICESat/GLAS waveforms and field data: Application to Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. Remote Sensing of Environment*, Vol.112, No.5, 2008, pp. 2131-2144.



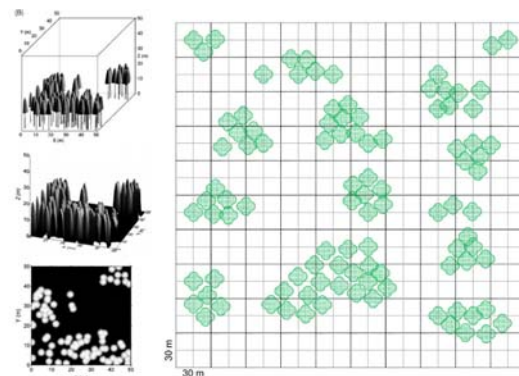
شکل ۱۵- پراکندگی منظم تاج پوشش در صحنه تصویر

چنانچه درصد تاج‌پوشش در سطح پیکسل بین ۵ تا ۴۵٪ باشد (که برای تصویر شماتیک شکل فوق ۲۵٪ است)، مدل FCD توانایی شناسایی و متمایز ساختن آنرا در سطح پیکسل نخواهد داشت و نتیجه طبقه‌بندی برای این تصویر  $FCD \approx 0$  می‌شود، در حالیکه تاج پوشش واقعی منطقه ۲۵٪ است.

اما اگر توزیع درختان در سطح منطقه به‌صورت نامنظم و شبیه شکل (۱۶) باشد، آنگاه مدل FCD نتایج بهتری ارائه خواهد داد و تقریباً میزان ۲۵٪ تراکم تاج‌پوشش را ارائه خواهد کرد.

در شرایط واقعی عمدتاً با توزیع تصادفی درختان مانند شکل (۱۶) مواجهیم. به ویژه اینکه در این شکل عمدتاً توده‌های جنگلی پراکنده و یکپارچه داریم که مدل FCD توانایی مطلوبی در شناسایی آنها دارد.

از سوی دیگر در محدوده مطالعاتی این طرح نرخ تغییرات انبوهی تاج‌پوشش ملایم نبوده و دارای نوسانات شدیدی است به نحوی که مناطق اندکی با تاج‌پوشش متوسط و کم وجود دارد. دلیل آن این است که اکثر جنگل‌زدایی‌های واقع در این منطقه ناشی از تصرفات انسانی است، بنابراین وجود تغییرات شدید تراکمی چندان دور از انتظار نمی‌باشد. به دیگر بیان در منطقه مورد مطالعه با تغییرات تدریجی تاج پوشش مواجه نیستیم و تغییرات فرکانس بالایی دارد.



شکل ۱۶- پراکندگی نامنظم و تجمعی تاج پوشش در صحنه تصویر

- [9] Azizi, Z., "Forest Canopy Density Estimating Using Satellite Images", *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2008.
- [10] Wald, L., Ranchin, T. Comment, Liu, "Smoothing Filter Based Intensity Modulation: A Spectral Preserve Image Fusion Technique for Improving Spatial Details," *International Journal of Remote Sensing*, Taylor Francis, 2002, 23 (3), pp.593-597.
- [11] Jian Guo Liu- "Evaluation of Landsat-7 ETM+ Panchromatic Band for Image Fusion with Multispectral Bands," *Natural Resources Research*, Vol. 9, No. 4, 2000.
- [12] Farzin Naseri. "Forest type classification and estimated of quantitative characteristics in arid and semi arid areas using satellite data", (PhD Thesis), Tehran University, Faculty of Natural Resources, 2003 (in persian).
- [13] M.Saei Jamalabad "Detection of Forest Canopy and area by remote sensing technology", (MSc Thesis), K.N.Toosi University of Technology Geomatic Engineering Faculty, 2003 (in persian).
- [5] Managhebi, T., Maghsoudi, Y. and Valadan Zoej, M.J. "An Improved Three-Stage Inversion Algorithm in Forest Height Estimation Using Single-Baseline Polarimetric SAR Interferometry Data", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 15, No. 6, 2018, pp. 887-891.
- [6] Roy, P., S. Miyatake, and A. Rikimaru. "Biophysical Spectral Response Modeling Approach for Forest Density Stratification", in *Proc. The 18<sup>th</sup> Asian Conference on Remote Sensing*, 1997.
- [7] M.Taeji Feijani, Abbas Alimohammadi, M.j Valadan Zouj. "Evaluation and Optimization of FCD Model In Estimating Forest Canopy Density Classes Using Data Fusion Methods and Image Indices Substitution", (MSc Thesis), K.N.Toosi University of Technology Geomatic Engineering Faculty, 2006 (in persian).
- [8] Jamalabad, M. "Forest Canopy Density Monitoring Using Satellite Images," in *Geo-Imagery Bridging Continents XXth ISPRS Congress*, Istanbul, Turkey, 2004.