

معرفی مدل بهینه‌شده تراکم تاج پوشش جنگل (FCD) به منظور ارزیابی و پایش مستمر جنگل‌های هیرکانی

مسعود طایفی فیجانی^{*}، سعید آزادنژاد^۲

۱- مربی گروه سیستم‌های فضایی، پژوهشکده سامانه‌های فضانوردی، پژوهشگاه هوافضا

۲- پژوهشگر گروه سیستم‌های فضایی، پژوهشکده سامانه‌های فضانوردی، پژوهشگاه هوافضا

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۸/۲۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۲۷

چکیده

نقشه‌برداری از مساحت جنگل یک پیش نیاز برای به دست آوردن اطلاعات کمی و کیفی در مورد جنگل‌ها و تدوین استراتژی‌های مدیریتی و حفاظتی است. مدل بهبود یافته تراکم تاج-پوشش جنگل (FCD) یکی از روش‌های پرکاربرد برای نقشه‌برداری از جنگل‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای است. یکی از جدی‌ترین چالش‌های مدل FCD ضعف در محاسبه تراکم تاج-پوشش در جنگل‌های کم تراکم و همچنین جنگل‌های جلگه‌ای است. با توجه به کلروفیل موجود در مزارع زراعی، بوته‌ها، مراتع و غیره، مدل FCD در تعیین مناطق جنگلی از سایر پوشش اراضی ذکر شده مشکل دارد. از این رو، هدف اصلی این مقاله بر بهبود عملکرد مدل FCD برای غلبه بر این محدودیت متمرکز شده است. این عملکرد بهبودی با اضافه کردن یک شاخص جدید به نام ترکیب رنگی پوشش جنگل و از بین بردن پوشش گیاهی غیر جنگلی با استفاده از کرنل میانگین و مدل رقومی ارتفاع با توجه به تعریف استاندارد جنگل حاصل شد. در این مطالعه از تصاویر سری زمانی ماهواره لندست به منظور برآورد تراکم در جنگل‌های هیرکانی استفاده شد. بررسی و ارزیابی نتایج حاکی از افزایش صحت کلی و ضریب کاپای مدل FCD بهبود یافته نسبت به مدل FCD اولیه است که افزایش مقادیر آن به ترتیب حدود ۱۰٪ و ۲۴٪ می‌باشد. همچنین در راستای این هدف و به عنوان ارزیابی و مقایسه کارایی این مدل نسبت به مدل اولیه، تغییرات سطح جنگل‌های هیرکانی نیز به عنوان هدف ثانویه مورد بررسی قرار گرفت. به طور کلی نتایج این بررسی نشان داد مساحت کل جنگل‌های هیرکانی از سال ۱۳۶۶ تا سال ۱۳۸۸ حدود ۱۵۴ هزار و ۲۷۲ هکتار افزایش داشته است. سهم سه استان مازندران، گیلان و گلستان در این افزایش به ترتیب حدود ۷۵۰۷۰، ۴۷۶۱۵ و ۳۱۵۶۷ هکتار بوده است. علاوه بر این، نتایج نشان داد مساحت جنگل‌های هیرکانی در بین بازه سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶ حدود ۱۷ هزار ۶۳۱ هکتار کاهش داشته است. دستاورد کلی این تحقیق حاکی از آن است که برای برآورد مساحت دقیق جنگل‌ها با استفاده از مدل FCD نیاز به تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا می‌باشد.

کلید واژه‌ها: جنگل‌های هیرکانی، مدل تراکم تاج پوشش جنگلی، داده‌های سری زمانی لندست، جنگل‌های جلگه‌ای.

* نویسنده مکاتبه کننده: تهران- شهرک قدس، خیابان مهستان، بن بست هوافضا، پژوهشگاه هوافضا.

۱- مقدمه

جنگل‌های هیرکانی با ۱/۹ میلیون هکتار وسعت، از آستارا در شمال استان گیلان تا گلی‌داغ در شرق استان گلستان، در گستره‌ای به طول تقریبی ۸۰۰ کیلومتر و عرض ۲۰ تا ۷۰ کیلومتر پراکنش دارد. قدمت آن‌ها به دوران سوم زمین‌شناسی باز می‌گردد [۱]. مدیریت پایدار و برنامه‌ریزی صحیح منابع جنگلی به اطلاعات دقیق و با کیفیت بالا از وضعیت گذشته، حال و آینده جنگل نیازمند است [۱]. جنگل‌های شمال ایران در دهه‌های اخیر به دلایل متعدد دستخوش تغییرات شدیدی شده که حفظ، دوام و بقاء آن‌ها با تهدید مواجهه ساخته است. از سوی دیگر بخش‌هایی از این جنگل‌ها که در پنج استان قرار گرفته است در چهل و سومین اجلاس کمیته میراث جهانی یونسکو ۱۰ جولای ۲۰۱۹ (۱۹ تیر ماه ۱۳۹۸) به عنوان ذخیره‌گاه طبیعی زیست-کره ثبت جهانی شد. آماربرداری زمینی و میدانی عرصه‌های جنگل که پیش از این مرسوم بوده است، به صورت جامع و بهنگام، به‌ویژه برای مناطق وسیع و دور از دسترس پرهزینه و زمان‌بر است [۲، ۳ و ۴]. فناوری سنجش از دور امکان مطالعه پدیده‌ها و اهداف مکانی را در سطح وسیع با صرف زمان، هزینه و دقت مناسب فراهم ساخته است.

سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور نیز بصورت مداوم از افزایش سطح جنگل‌ها و توسعه کمی و کیفی آن‌ها خبر می‌دهد و در نقطه مقابل فعالان محیط‌زیست و مراکز دانشگاهی و پژوهشی از کاهش کمی و فروافت کیفی عرصه‌های جنگلی می‌گویند. پایش جنگل‌های هیرکانی توسط سازمان جنگل‌ها عمدتاً بر روش‌های تفسیر بصری استوار بوده و در بازه‌های زمانی ۱۰ ساله انجام می‌پذیرد. هرچند برخی محققان تلاش داشته‌اند که بررسی‌هایی را در خصوص تغییرات این عرصه‌ها و برآورد زیتوده انجام دهند ولیکن این مطالعات عمدتاً مقطعی بوده و روند منظم و مستمری نداشته است [۵، ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰]. عمده‌ترین دلیل این سازمان به عنوان متولی اصلی

حفظ و حراست و نگهداشت و پایش منابع جنگلی برای اتکاء و استفاده از این روش کمبود منابع و اعتبارات لازم است.

در این پژوهش روشی کارآ، عملیاتی و در مقیاس خود دقیق و قابل اتکاء برای بررسی میزان تغییرات جنگل‌های هیرکانی در بازه زمانی پنج ساله انتخاب شد. رویکرد محوری این مطالعه دستیابی به راهکاری فناورانه برای پایش منظم و مستمر عرصه‌های جنگلی با صرف هزینه‌های اندک است. تحقق این هدف راه را برای پایش منظم و سالانه عرصه‌های جنگلی هموار خواهد ساخت. قطعاً روش‌ها و مدل‌های دقیق‌تری وجود دارد ولیکن به لحاظ توان محاسباتی، داده موجود، اعم از تصویری یا واقعیت زمینی و سایر المان‌های تأثیرگذار امکان بسط و توسعه در سطح ملی را ندارند. از این روی هدف اصلی این پژوهش پایش منظم جنگل‌های هیرکانی طی سه دهه اخیر (از سال ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۶) با داده ماهواره‌ای رایگان و مدل بهبود یافته تراکم تاج-پوشش جنگل^۱ (FCD) است.

مدل FCD یک روش مقرون به صرفه از لحاظ هزینه و زمان برای تشخیص و تخمین تراکم تاج پوشش در مقیاس ناحیه‌ای و جهانی است. این مدل 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 [۱۵]. این مسأله همچنان ادامه دارد و محققین مختلف همچنان نتایج کاربست آن‌ها در محدوده‌های جنگلی در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای در قالب مقالات علمی معتبر و گزارشات فنی منتشر می‌کنند. برای نمونه: پال و همکاران از این مدل و داده‌های قدرت تفکیک مکانی بالا سنجنده LISS-4 برای محاسبه تاج-پوشش جنگل حوضه رودخانه سلی، منطقه بانکورا، بنگال غربی استفاده کردند [۱۱]. نتایج آن‌ها نشان داد ۷/۴۸ درصد از جنگل این ناحیه دارای تراکم بسیار کم، ۲/۶۳ درصد

¹ Forest Canopy Density

گلستان مشخص شد.

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش منطقه مطالعاتی، داده‌های مورد استفاده و روش تحقیق تشریح می‌شود. از آنجاییکه هدف اصلی این تحقیق بهبود مدل FCD می‌باشد، ابتدا توضیحاتی در مورد این مدل و سابقه کاربرد آن داده شده است و در ادامه بهبود ایجاد شده برای این مدل بیان می‌شود.

۲-۱- منطقه مطالعاتی

منطقه مطالعاتی جنگل‌های هیرکانی مناطق شمال ایران می‌باشد (شکل (۱)). کشیدگی شرقی-غربی این جنگل‌ها شرایط متفاوت دمایی و اتمسفری را باعث می‌شود. این شرایط تنوع گونه‌ای و به تبع آن تیپولوژیک جنگل‌های هیرکانی را سبب شده است که خود چالشی جدید برای مدل FCD است.

درختان این جنگل‌ها از نوع مختلط پهن برگ حاشیه جنوب دریای خزر است که با آب و هوای نیمه مدیترانه‌ای و مرطوب سازگارند. معروف‌ترین گونه‌ها در دامنه‌های ارتفاعی مختلف جنگل‌های هیرکانی عبارتند از: جلگه و ارتفاعات پایین (عمدتاً بلوط شمشادستان، توسکاستان، توسکا لرگستان، جامعه انجیلی)، دامنه‌های متوسط (عمدتاً انجیلی ممرزستان، بلوط ممرزستان)، دامنه‌های مرتفع (راشستان و راش - ممرزستان)، ارتفاعات فوقانی و مرز جنگل (شامل گونه‌های غالب اوری، لور، سرو سابینا و کامونیس).

۲-۲- داده مورد استفاده

دشواری دسترسی به داده و هزینه آن همواره یکی از دلایل رویکرد سطحی نهادهای اجرایی و متولی در کشور بوده است. همانگونه که ذکر شد داده‌های ماهواره‌ای همچون لندست، سنتینل، مادیس و دیگر سنجنده‌های رایگان کاربرد زیادی در حوزه‌های مختلف سنجش‌ازدور دارند. به همین دلیل نیز از تصاویر ماهواره‌ای رایگانی استفاده شد که بصورت سری‌های منظم زمانی قابل دسترس باشد. از این روی تصاویر لندست ۵، ۷ و ۸ در یک بازه زمانی ۳۰ ساله از سال

از تراکم کم، ۲۴/۸۴ درصد از تراکم متوسط، ۲۳/۹۲ درصد از تراکم بالا و ۳۱/۱۳ درصد از تراکم خیلی بالا است. شرما و همکاران [۱۲] از داده‌های سنجنده LISS-4 برای ارزیابی تراکم جنگل‌های منطقه یامونانagar^۱ در ناحیه شمالی ایالت هاریانا با مدل FCD استفاده نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد بیشتر سطح این منطقه از جنگل‌های با تراکم متوسط با مساحت ۲۳۹۴۸/۰۸ تشکیل شده است. همچنین حدود ۲۴/۲ درصد از مساحت این منطقه شامل جنگل‌های باز است که نیاز به برنامه‌ریزی برای افزایش تراکم و احیاء جنگل دارد. فیتزینتو و همکاران با کمک مدل FCD و تصاویر ماهواره لندست ۸ تراکم جنگل‌های دو منطقه کیمولانگ^۲ و کیکاسونگکا^۳ را برآورد کردند [۱۳]. شاهولی کوهشور و همکاران از مدل تراکم تاج-پوشش جنگل برای محاسبه تراکم جنگل‌های زاگرس استفاده کردند [۱۴]. در مطالعه آن‌ها طبقه‌بندی تراکم تاج‌پوشش در سه حالت ۶، ۴ و ۳ (طبقه ۳: کم تراکم، طبقه ۴: تراکم متوسط و طبقه ۶: با تراکم زیاد) طبقه صورت گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد این مدل از دقت کافی برای پایش جنگل‌های زاگرس برخوردار است.

یکی از چالش‌های اصلی مدل FCD ضعف در محاسبه تراکم تاج‌پوشش در تراکم‌های پایین و جنگل‌های جلگه‌ای است. حضور سبزی‌نگی ناشی از مناطق کشاورزی، بیشه‌زارها، مراتع و ... در این مناطق سبب می‌شود تا مدل FCD برای تفکیک جنگل از پوشش‌های گیاهی مناطق کشاورزی با یک چالش جدی مواجه شود. به منظور کاهش اثرات این چالش دو مرحله به مدل FCD اولیه اضافه شد. پیاده‌سازی مدل FCD بهبودیافته برای سری زمانی تصاویر لندست ۵، ۷ و ۸ از سال ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۶ انجام گرفت و میزان تغییرات به تفکیک سه استان گیلان، مازندران و

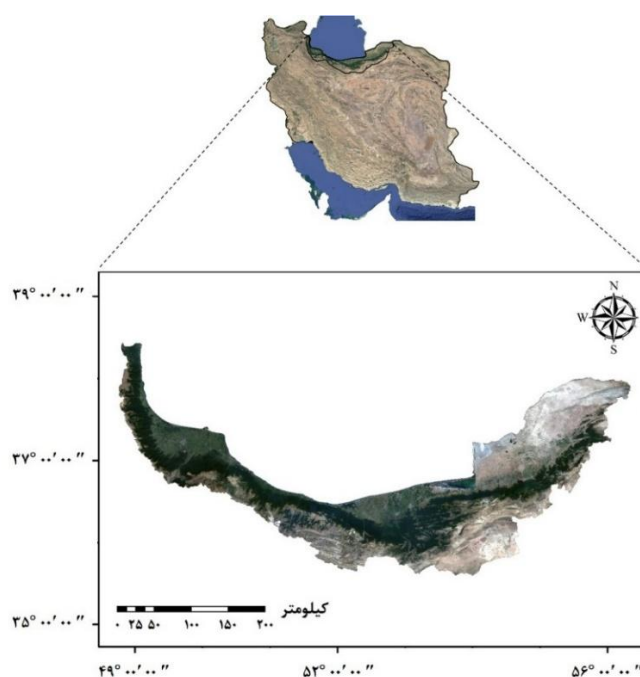
¹ Yamunanagar

² Cimulang

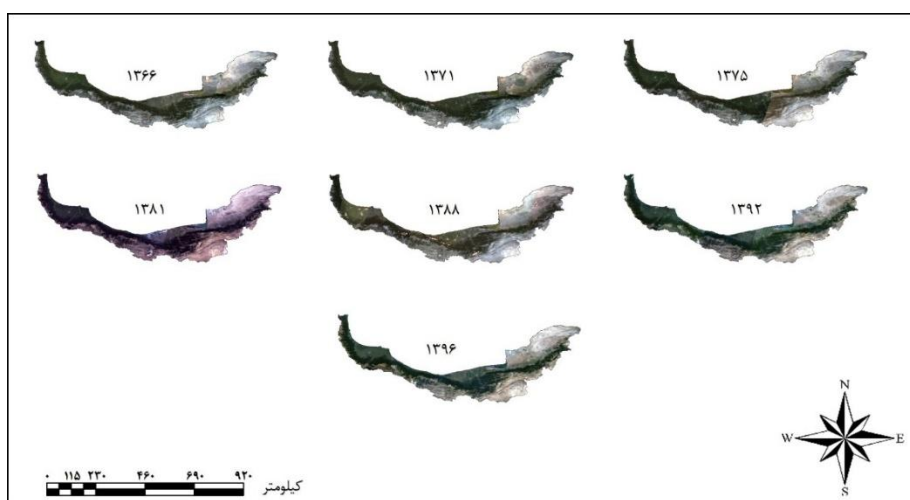
³ Cikasangka

در نهایت پس از جستجوی بسیار و بررسی صدها فریم تصویری، تصاویر مندرج در جدول (۱) استفاده شد. بطور متوسط برای هر زمان ۹ تصویر انتخاب شد که مجموعاً ۶۳ فریم تصویری شد. تصاویر مزبور تماماً پیش پردازش شده و موزاییک زمانی آن‌ها تهیه شد (شکل (۲))

۱۳۶۶ تا ۱۳۹۶ استفاده شد. الزامات و محدودیت‌های مربوط به انتخاب داده عبارت بود از:
همزمانی نسبی: تصاویر باید بین تیر ماه تا مهر ماه (ژون تا اکتبر) انتخاب می‌شدند.
- سبزینگی حداکثر
- پوشش ابری کمتر از ۵٪



شکل ۱: جنگل‌های ناحیه رویشی هیرکانی به عنوان محدوده مورد مطالعه



شکل ۲: تصاویر پیش پردازش شده از جنگل‌های هیرکانی در بازه‌های زمانی مختلف

جدول ۱: تصاویر ماهواره‌ای بازه زمانی سی ساله بررسی تغییرات تراکمی جنگل‌های هیرکانی

بازه زمانی	مسیر	ردیف	تاریخ میلادی تصویر	ماهواره	بازه زمانی	مسیر	ردیف	تاریخ میلادی تصویر	ماهواره
اول	۱۶۲	۳۴	۱۰-۰۸-۱۹۸۷	لندست ۵	پنجم	۱۶۲	۳۴	۰۹-۱۰-۲۰۰۹	لندست ۵
	۱۶۲	۳۵	۱۰-۰۸-۱۹۸۷	لندست ۵		۱۶۲	۳۵	۲۲-۰۸-۲۰۰۹	لندست ۵
	۱۶۳	۳۴	۱۶-۰۷-۱۹۸۷	لندست ۵		۱۶۳	۳۴	۲۶-۰۶-۲۰۰۹	لندست ۵
	۱۶۳	۳۵	۱۴-۰۸-۱۹۸۷	لندست ۵		۱۶۳	۳۵	۲۸-۰۷-۲۰۰۹	لندست ۵
	۱۶۴	۳۵	۲۳-۰۷-۱۹۸۷	لندست ۵		۱۶۴	۳۵	۱۹-۰۷-۲۰۰۹	لندست ۵
	۱۶۵	۳۴	۱۶-۰۹-۱۹۸۷	لندست ۵		۱۶۵	۳۴	۱۲-۰۹-۲۰۰۹	لندست ۵
	۱۶۵	۳۵	۱۶-۰۹-۱۹۸۷	لندست ۵		۱۶۵	۳۵	۱۲-۰۹-۲۰۰۹	لندست ۵
	۱۶۶	۳۴	۰۵-۰۷-۱۹۸۷	لندست ۵		۱۶۶	۳۴	۰۱-۰۷-۲۰۰۹	لندست ۵
	۱۶۷	۳۳	۲۸-۰۷-۱۹۸۷	لندست ۵		۱۶۷	۳۳	۲۶-۰۹-۲۰۰۹	لندست ۵
دوم	۱۶۲	۳۴	۰۸-۰۹-۱۹۹۲	لندست ۵	ششم	۱۶۲	۳۴	۱۶-۰۷-۲۰۱۳	لندست ۵
	۱۶۲	۳۵	۰۸-۰۹-۱۹۹۲	لندست ۵		۱۶۲	۳۵	۱۷-۰۸-۲۰۱۳	لندست ۵
	۱۶۳	۳۴	۱۴-۰۸-۱۹۹۲	لندست ۵		۱۶۳	۳۴	۲۴-۰۸-۲۰۱۳	لندست ۵
	۱۶۳	۳۵	۰۷-۰۹-۱۹۹۲	لندست ۵		۱۶۳	۳۵	۰۷-۰۷-۲۰۱۳	لندست ۵
	۱۶۴	۳۵	۰۶-۰۹-۱۹۹۲	لندست ۵		۱۶۴	۳۵	۱۸-۱۰-۲۰۱۳	لندست ۵
	۱۶۵	۳۴	۲۳-۰۶-۱۹۹۲	لندست ۵		۱۶۵	۳۴	۱۹-۰۶-۲۰۱۳	لندست ۵
	۱۶۵	۳۵	۲۸-۰۶-۱۹۹۲	لندست ۵		۱۶۵	۳۵	۱۹-۰۶-۲۰۱۳	لندست ۵
	۱۶۶	۳۴	۱۹-۰۸-۱۹۹۲	لندست ۵		۱۶۶	۳۴	۱۶-۱۰-۲۰۱۳	لندست ۵
	۱۶۷	۳۳	۲۶-۰۸-۱۹۹۲	لندست ۵		۱۶۷	۳۳	۱۷-۰۶-۲۰۱۳	لندست ۵
سوم	۱۶۲	۳۴	۰۳-۰۹-۱۹۹۶	لندست ۵	هفتم	۱۶۲	۳۴	۲۸-۰۸-۲۰۱۷	لندست ۸
	۱۶۲	۳۵	۰۳-۰۹-۱۹۹۶	لندست ۵		۱۶۲	۳۵	۲۵-۰۶-۲۰۱۷	لندست ۸
	۱۶۳	۳۴	۲۵-۰۸-۱۹۹۶	لندست ۵		۱۶۳	۳۴	۱۸-۰۷-۲۰۱۷	لندست ۸
	۱۶۳	۳۵	۲۵-۰۸-۱۹۹۶	لندست ۵		۱۶۳	۳۵	۱۸-۰۷-۲۰۱۷	لندست ۸
	۱۶۴	۳۵	۰۱-۰۹-۱۹۹۶	لندست ۵		۱۶۴	۳۵	۱۰-۰۸-۲۰۱۷	لندست ۸
	۱۶۵	۳۴	۲۳-۰۸-۱۹۹۶	لندست ۵		۱۶۵	۳۴	۰۲-۰۹-۲۰۱۷	لندست ۸
	۱۶۵	۳۵	۰۸-۰۹-۱۹۹۶	لندست ۵		۱۶۵	۳۵	۳۰-۰۶-۲۰۱۷	لندست ۸
	۱۶۶	۳۴	۲۹-۰۷-۱۹۹۶	لندست ۵		۱۶۶	۳۴	۰۸-۰۸-۲۰۱۷	لندست ۸
	۱۶۷	۳۳	۰۵-۰۸-۱۹۹۶	لندست ۵		۱۶۷	۳۳	۱۵-۰۸-۲۰۱۷	لندست ۸
چهارم	۱۶۲	۳۴	۱۰-۰۷-۲۰۰۲	لندست ۷					
	۱۶۲	۳۵	۱۰-۰۷-۲۰۰۲	لندست ۷					
	۱۶۳	۳۴	۱۷-۰۷-۲۰۰۲	لندست ۷					
	۱۶۳	۳۵	۱۷-۰۷-۲۰۰۲	لندست ۷					
	۱۶۴	۳۵	۰۹-۰۸-۲۰۰۲	لندست ۷					
	۱۶۵	۳۴	۳۱-۰۷-۲۰۰۲	لندست ۷					
	۱۶۵	۳۵	۳۱-۰۷-۲۰۰۲	لندست ۷					
	۱۶۶	۳۴	۰۷-۰۸-۲۰۰۲	لندست ۷					
	۱۶۷	۳۳	۲۹-۰۷-۲۰۰۲	لندست ۷					

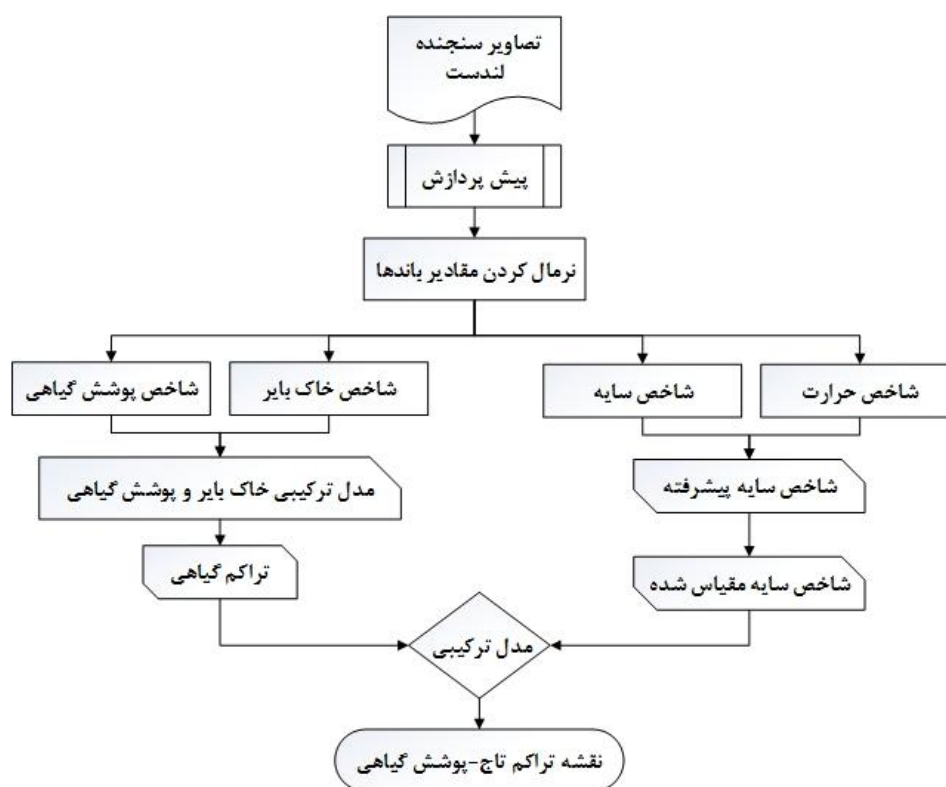
۲-۳- مدل FCD و سابقه کاربرد آن

مدل FCD روشی مرسوم در ارزیابی تراکم تاج پوشش جنگل است که در سال ۱۹۹۶ از سوی پروفسور ریکیمارو معرفی شد [۱۵]. به دلیل برخی مزایای عمده نظیر سهولت اجرا، عدم نیاز به داده آموزشی و عدم وابستگی به الگوی تاج پوشش مورد اقبال متخصصین سنجش از دور جنگل قرار گرفت [۱۵]، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۰]. نکته قابل توجه در پیاده سازی مدل حساسیت برخی شاخص های آن به شرایط محیطی و پراکنش تیپ های جنگلی و همچنین میزان

آمیختگی آن ها با سایر گونه های گیاهی است. این حساسیت وجه تمایز تحقیقات محققان در مناطق مختلف جهان قرار گرفته است. در این پژوهش سعی شد با تمرکز روی این نکات مدلی با بهترین عملکرد برای مناطق جنگلی هیرکانی توسعه و بهبود داده شود.

۲-۴- معرفی مدل FCD اولیه

مراحل پیاده سازی مدل FCD اولیه که در بخش قبلی به آن اشاره شد، مطابق شکل (۳) می باشد. در ادامه این مراحل شرح داده شده است.



شکل ۳: روندنمای مدل FCD اولیه

است. بنابراین، تمامی تصاویر قبل از وارد شدن به این مدل باید از لحاظ هندسی و رادیومتریکی تصحیح شده باشند. برای این منظور کلیه تصاویر در سطح ۲، که تصحیحات لازم بر روی آن انجام گرفته است، از پایگاه <https://earthexplorer.usgs.gov> دریافت شد. تصحیحات

در مرحله اول پیش پردازش و آماده سازی تصاویر شامل تصحیحات هندسی، تصحیحات رادیومتریکی و عملیات موزائیک سازی انجام می شود. کالیبراسیون رادیومتری تصاویر دوره های مختلف از مهمترین موضوعات در تحلیل سری زمانی تصاویر ماهواره ای

در مرحله بعد شاخص سایه پیشرفته^۴ (ASI) محاسبه می‌شود. در مدل FCD معمولی شاخص سایه پیشرفته با آستانه‌گذاری و ترکیب سه شاخص سایه، گیاهی و حرارت انجام می‌گیرد. این سه شاخص به تنهایی برای تفکیک پوشش درختی از دیگر پوشش‌های گیاهی کافی نمی‌باشند. از طرفی انتخاب حد آستانه مناسب بسیار حساس می‌باشد، به طوریکه انتخاب نادرست حد آستانه منجر به شناسایی اشتباه پوشش گیاهی می‌شود [۱۵]. لازم به ذکر است اجرای مدل و این روابط در محیط نرم افزار ارداس ایمجین^۵ انجام گرفت.

۲-۵- مدل بهینه شده FCD برای جنگل‌های پهن برگ مختلط هیرکانی

در مناطق پایین دست و جلگه‌ای، لکه‌های اندکی از جنگل‌های هیرکانی باقی مانده‌اند. چراکه به دلیل تخریب عمده عرصه‌ها در پایین دست بخش‌های جنگلی موجود با شالیزارها، بیشه‌زارها و سایر توده‌های گیاهی تاج پوشش‌دار آمیخته شده‌اند. از این‌روی مدل FCD توانایی اندکی در متمایز کردن این لکه‌های محدود با توده‌های گیاهی پیرامونی دارد. در واقع این مدل توانایی لازم جهت تفکیک کامل لکه‌های کوچک جنگلی از مناطق کشاورزی، بوته‌زارها، بیشه‌زارها و مناطق با پوشش گیاهی متراکم غیرجنگلی را ندارد. به منظور رفع این چالش، طی دو مرحله زیر عملکرد مدل در این مناطق بهبود یافت:

- ۱- تقویت شاخص سایه با استفاده از شاخص ترکیب رنگی پوشش جنگلی و هم‌افزایی شاخص خاک بایر به آن
- ۲- استفاده از کرنل میانگین

هندسی و رادیومتریک در تصاویر لندست سطح ۲ به صورت سیستماتیک انجام می‌گیرد.

همچنین در این مرحله کلیه ویژگی‌های مستخرج از تصویر، به استثنای شاخص حرارتی، مطابق رابطه (۱) برای لندست ۸ و مطابق رابطه (۲) برای لندست ۵ و ۷ نرمال‌سازی می‌شوند که در آن، M میانگین، S انحراف معیار داده‌ها، X مقادیر عددی تصویر اولیه در هر باند و بالاخره Y مقادیر عددی نرمال شده می‌باشند. در مرحله بعد مقادیر شاخص‌های خاک بایر، سایه، حرارت، گیاهی پیشرفته و یک شاخص جدید، که به منظور بهبود مدل FCD به این مدل اضافه شد، محاسبه می‌شود [۱۵].

شاخص گیاهی پیشرفته^۱ (AVI) بر اساس مقادیر بازتابندگی در باندهای ۳ و ۴ لندست ۵ و ۷ طبق رابطه (۳) و باندهای ۴ و ۵ لندست ۸ به صورت رابطه (۴) محاسبه می‌شود [۱۵].

همچنین شاخص خاک بایر^۲ (BI) برای لندست ۵ و ۷ طبق رابطه (۵) و لندست ۸ طبق رابطه (۶) به دست می‌آید [۱۵].

شاخص حرارت^۳ (TI) شاخص حرارتی که منبع آن داده‌های حرارتی مندرج در باند ۶ ماهواره لندست ۵ و ۷ و باند ۱۰ لندست ۸ می‌باشد، برای لندست ۵ و ۷ بر اساس رابطه (۹) به دست می‌آید. که مقادیر پارامترهای آن برای لندست ۵ و ۷ به ترتیب بر اساس رابطه (۱۰) و رابطه (۱۱) به دست می‌آید [۱۵].

این شاخص برای داده‌های لندست ۸ نیز از رابطه (۱۲) و رابطه (۱۳) قابل حصول می‌باشد [۱۵].

در رابطه (۹) و رابطه (۱۲)، L مقدار رادیانس برگشتی در باند مادون قرمز حرارتی، Q مقدار عددی پیکسل در باند حرارتی، K_1 و K_2 ثابت‌های کالیبراسیون سیستم سنجنده و بالاخره T دمای زمینی بر حسب کلوین است [۱۵].

¹ Advanced Vegetation Index

² Bare soil Index

³ Thermal Index

⁴ Advanced Shadow Index

⁵ ERDAS IMAGINE

$$X_1 = M - 2S, X_2 = M + 2S$$

$$Y_1 = 20, Y_2 = 65520$$

$$A = \frac{Y_1 - Y_2}{X_1 - X_2} = \frac{20 - 65520}{(M - 2S)(M + 2S)} = \frac{16375}{S} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$B = -AX_1 + Y_1$$

$$Y = AX + B$$

$$X_1 = M - 2S, X_2 = M + 2S$$

$$Y_1 = 20, Y_2 = 220$$

$$A = \frac{Y_1 - Y_2}{X_1 - X_2} = \frac{20 - 220}{(M - 2S)(M + 2S)} = \frac{50}{S} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$B = -AX_1 + Y_1$$

$$Y = AX + B$$

$$B4 - B3 < 0 \Rightarrow AVI = 0$$

$$B4 - B3 > 0 \Rightarrow AVI = [(B4 + 1)(256 - B3)(B4 - B3)]^{(1/3)} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$B5 - B4 < 0 \Rightarrow AVI = 0$$

$$B5 - B4 > 0 \Rightarrow AVI = [(B5 + 1)(65536 - B4)(B5 - B4)]^{(1/3)} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$BI = \frac{(B5 + B3) - (B4 + B1)}{(B5 + B3) + (B4 + B1)} \times 100 + 100 \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$BI = \frac{(B6 + B4) - (B5 + B2)}{(B6 + B4) + (B5 + B2)} \times 100 + 100 \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$SI = [(256 - B1)(256 - B2)(256 - B3)]^{(1/3)} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$SI = [(65536 - B2)(65536 - B3)(65536 - B4)]^{(1/3)} \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$L = L_{\min} + \left(\frac{L_{\max} - L_{\min}}{255} \right) \times Q, \quad T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L} + 1\right)} \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$K_1 = 607.76 \frac{\text{watts}}{(\text{m}^2 \times \text{ster} \times \mu\text{m})}$$

$$K_2 = 1260.56 \text{ (kelvin)}$$

$$L_{\min} = 1.238 \frac{\text{watts}}{(\text{m}^2 \times \text{ster} \times \mu\text{m})} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$L_{\max} = 15.303 \frac{\text{watts}}{(\text{m}^2 \times \text{ster} \times \mu\text{m})}$$

$$K_1 = 666.09 \frac{\text{watts}}{(\text{m}^2 \times \text{ster} \times \mu\text{m})}$$

$$K_2 = 1282.71 \text{ (kelvin)}$$

$$L_{\min} = 0.000 \frac{\text{watts}}{(\text{m}^2 \times \text{ster} \times \mu\text{m})} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$L_{\max} = 17.040 \frac{\text{watts}}{(\text{m}^2 \times \text{ster} \times \mu\text{m})}$$

$$L = L_{\min} + \left(\frac{L_{\max} - L_{\min}}{65536} \right) \times Q, \quad T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L} + 1\right)} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$K_1 = 774.8853 \frac{\text{watts}}{(\text{m}^2 \times \text{ster} \times \mu\text{m})}$$

$$K_2 = 1321.0789 \text{ (kelvin)}$$

$$L_{\min} = 0.10033 \frac{\text{watts}}{(\text{m}^2 \times \text{ster} \times \mu\text{m})} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$L_{\max} = 22.00180 \frac{\text{watts}}{(\text{m}^2 \times \text{ster} \times \mu\text{m})}$$

سایه پیشرفته بوده و مقادیر آن از صفر تا صد مرتب شده است به دست می آید. در مرحله بعد شاخص تراکم گیاهی^۳ (VD) محاسبه می شود. این شاخص مؤلفه اول روش تجزیه مؤلفه های اصلی^۴ (PCA) است مبتنی بر شاخص های VI و BI بوده و مقادیر آن از ۰ تا ۱۰۰ محدود می شوند. گام آتی محاسبه FCD نهایی طبق رابطه (۱۵) است [۱۵].

۲-۵-۱- تقویت شاخص سایه

با تقویت شاخص سایه پیشرفته، دقت آن در تفکیک پوشش درختی از پوشش گیاهی غیر درختی ارتقاء داده شد. این امر با اضافه کردن شاخصی جدید به نام ترکیب رنگی پوشش جنگل و همچنین شاخص خاک بایر صورت گرفت.

شاخص جدید ترکیب رنگی جنگل^۱ (FCCI) است و از رابطه (۱۴) بدست می آید [۲۱].

پس از محاسبه شاخص سایه پیشرفته، شاخص سایه مقیاس شده^۲ (SSI) را که تبدیل خطی شاخص

³ Vegetation Density

⁴ Principal Component Analysis

¹ Forest Color Composite Index

² Scaled Shadow Index

$$\begin{cases} \text{Red (R)} = \text{SWIR} \\ \text{Green (G)} = \text{NDVI} \Rightarrow \text{FCCI} = \frac{\text{SWIR} + \text{NDVI} + \text{Green}}{3} \\ \text{Blue (B)} = \text{Green} \end{cases} \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$\text{FCD} = \sqrt{\text{VD} \times \text{SSI} + 1} - 1 \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

۲-۵-۲- اعمال کرنل میانگین

این مرحله به منظور حذف پوشش‌های گیاهی غیرجنگلی است که در مناطق هموار و در ارتفاعات پایین وجود دارند و به اشتباه به عنوان پوشش جنگلی طبقه‌بندی شده‌اند. اعمال کرنل میانگین بر اساس شواهد تجربی و مطالعات میدانی از منطقه صورت گرفت. با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی با دقت ۳۰ متری جنگل‌های جلگه‌ای از جنگل‌های کوهپایه‌ای و کوهستانی تفکیک شد. مبنای این تفکیک تراز ارتفاعی ۵۰ متر بود به این نحو که عرصه‌های جنگلی پایین‌تر از این تراز مورد پایش قرار گرفتند و مرحله اعمال کرنل تنها بر روی این مناطق انجام شد.

ابعاد این کرنل، مطابق شکل (۵)، ۷ در ۷ پیکسل انتخاب شد که با توجه به ابعاد ۳۰ متری پیکسل‌های ماهواره لندست ۸، جنگل‌های با مساحت بیشتر از ۴/۴۴۱ هکتار اجازه عبور از این کرنل را خواهند داشت و جنگل‌های با مساحت کمتر از این مقدار به عنوان پوشش گیاهی غیرجنگلی حذف می‌شود. البته این مساحت عبوری برای فیلتر حداکثر می‌باشد و اگر از این فیلتر استفاده شود مساحت جنگل‌های عبور داده شده با مساحت جنگل‌های تعریف شده بر مبنای تعریف استاندارد فائو^۱ (FAO) که اساساً کمترین مساحت قابل قبول برای جنگل را نیم هکتار می‌داند [۱]، مغایرت خواهد داشت. به منظور جلوگیری از این خطا از فیلتر میانگین و حد آستانه‌گذاری بر روی مقدار میانگین پیکسل‌ها استفاده شد. دلیل استفاده از فیلتر میانگین این بود که با اعمال یک حد آستانه بر روی

میانگین مقادیر پیکسل‌های قرار گرفته در کرنل مساحت جنگل فیلتر شده قابل کنترل باشد. در واقع اگر از فیلتر حداکثر بجای فیلتر میانگین استفاده شود با توجه به ابعاد کرنل و اندازه زمینی پیکسل تصاویر لندست فقط جنگل‌های با مساحت بیش از ۴ هکتار اجازه عبور از این کرنل را خواهند داشت و برخی از جنگل‌های با مساحت کمتر از ۴ هکتار به اشتباه حذف می‌شوند. اما در این تحقیق میانگین طوری تعیین شد که شامل میانگین مقادیر پیکسلی شامل یک جنگل حداکثر نیم هکتاری و پیکسل‌های واقع در سبزی‌نگی غیر درختی باشد. به عنوان مثال مقدار میانگین ارزش پیکسلی نقشه تراکم تاج-پوشش یک مجموعه ۴۹ پیکسلی قرار گرفته در یک کرنل که حداقل شامل یک جنگل نیم هکتاری و زمین‌های کشاورزی باشد حدود ۶۵ می‌شود، در حالیکه این مقدار برای یک مجموعه پیکسل که همگی شامل زمین کشاورزی باشند برابر ۶۰ می‌شود؛ زیرا با توجه به شاخص‌های انتخاب شده در این مدل سبزی‌نگی جنگل مقادیر پیکسلی بیشتری از سبزی‌نگی زمین‌های کشاورزی دارد. بدین ترتیب مساحت جنگل‌های عبوری با حد آستانه کنترل شد و جنگل‌های حذف شده مغایرتی با تعریف جهانی جنگل ایجاد نکرد.

همچنین دلیل اینکه ابعاد کرنل کمتر از ۷ در ۷ پیکسل (۵ در ۵ یا ۳ در ۳) انتخاب نشد این است که ابعاد کمتر از این مقدار ضمن افزایش زمان محاسبات، فقط مناطق کشاورزی با مساحت بسیار کوچک را حذف می‌کرد و هیچگونه حساسیتی نسبت به مناطق کشاورزی با مساحت بزرگ نشان نمی‌داد. به همین منظور ابعاد کرنل ۷ در ۷ پیکسل انتخاب شد تا با

¹ Food and Agriculture Organization

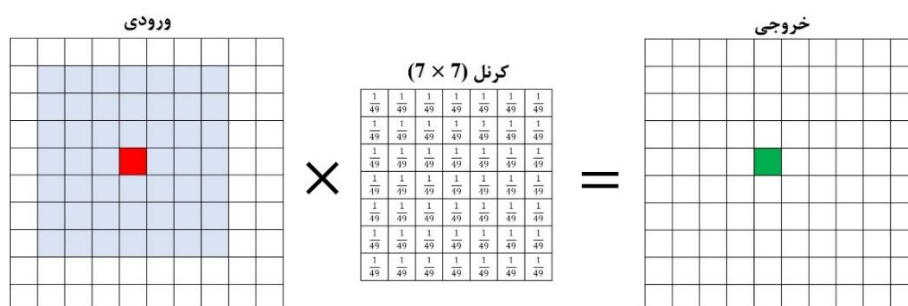
که میانگین آن‌ها از یک حد آستانه بیشتر باشد به عنوان پیکسل پوشش درختی از کرنل عبور خواهند کرد و در غیر اینصورت از نتایج مدل حذف خواهند شد (شکل (۴)).

شکل (۵) فرآیند نهایی مدل بهینه شده FCD با متمایز ساختن اجزا و رویه‌های جدید آن در مقایسه با مدل ساده قدیمی را نشان می‌دهد.

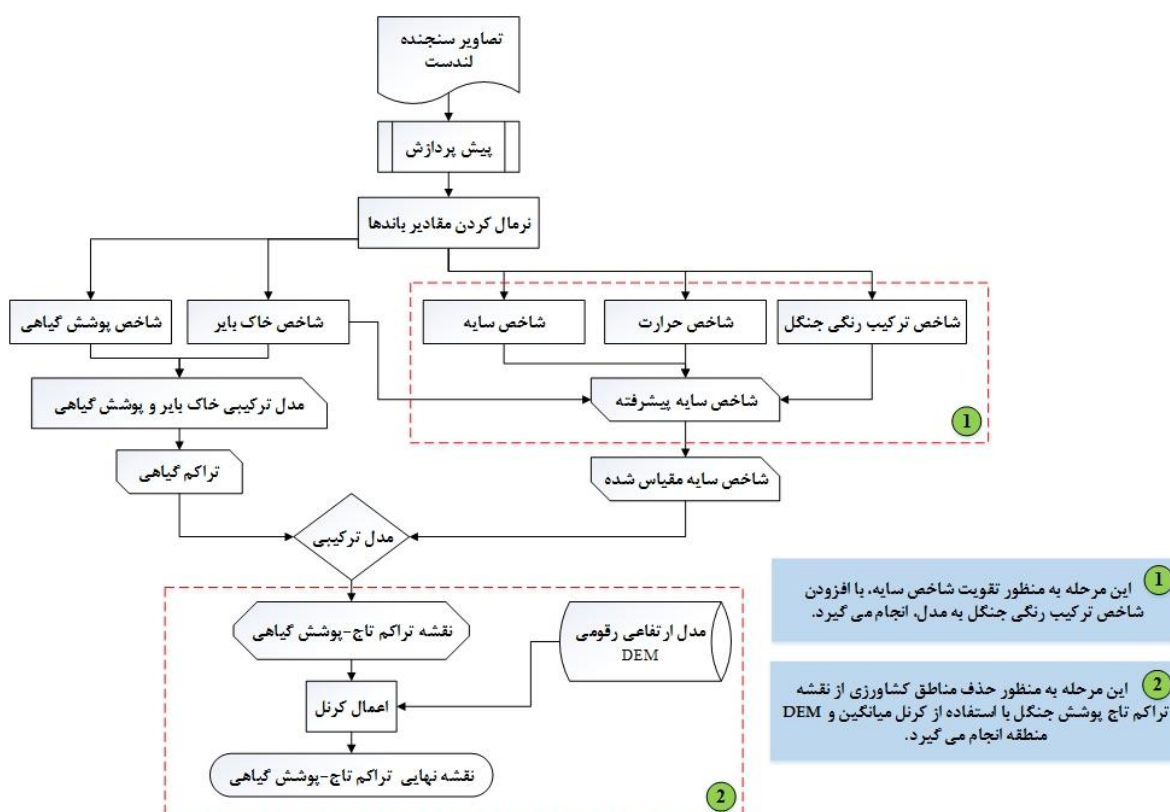
تعریف حد آستانه مناسب زمین‌های کشاورزی با مساحت زیاد را نیز از نقشه تراکم تاج-پوشش جنگل‌ها حذف کند. فرمول کرنل ۷ در ۷ در رابطه (۱۶) ارائه شده است.

$$I(r, c) = \frac{1}{49} \sum_{j=-3}^3 \sum_{i=-3}^3 I(r+i, c+j) \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

که در آن r شماره سطر پیکسل و c شماره ستون پیکسل مرکزی کرنل است. بدین ترتیب پیکسل‌هایی



شکل ۴: نحوه اعمال کرنل میانگین روی تصاویر



شکل ۵: روندنمای مراحل پیاده‌سازی مدل بهینه شده FCD

۳- نتایج

قبل از ارایه نتایج مطالعه، ضروری است به تفاوتی که در استانداردهای جهانی فائو و سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور در خصوص آماربرداری مناطق جنگلی وجود دارد اشاره شود. همانگونه که ذکر شد بر مبنای تعریف استاندارد فائو کمترین مساحت جنگل را نیم هکتار با حداقل تاج پوشش کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد و اگر مساحت پوششی تاج درختان کمتر از ۱۰ درصد باشد به آن «بیشه» گفته می‌شود. با این حال به دلیل نوع خاص پوشش گیاهی کشور ما، مساحت عظیمی از جنگل‌های تنک و اراضی جنگلی نادیده گرفته می‌شود و این مقدار را ۵ درصد در نظر می‌گیرند تا مناطق بیشتری تحت عنوان جنگل محافظت شود. بر اساس این مغایرت در تعریف و طبق

آمارهای اعلامی سازمان جنگل‌ها مساحت جنگل‌های ایران از ۱۱/۱ میلیون هکتار (بر مبنای ۱۰ درصد تاج پوشش) به ۱۴/۳ میلیون هکتار (بر مبنای ۵ درصد) افزایش یافت [۲۲].

۳-۱- بررسی نتایج تغییرات مساحت جنگل‌های هیرکانی

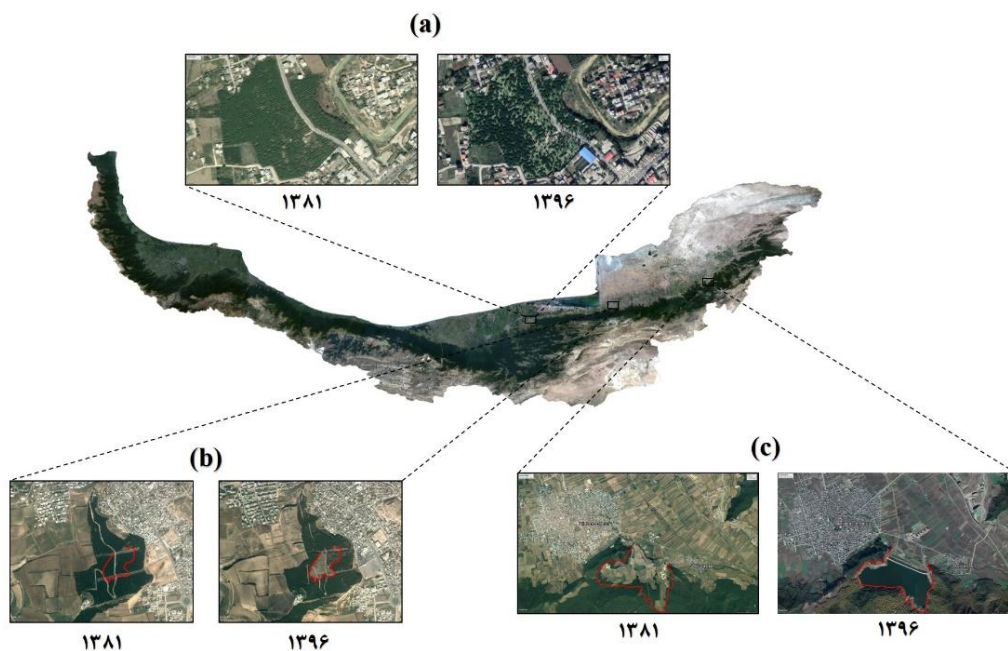
در این بخش بررسی نتایج حاصل از روند تغییر مساحت کل جنگل‌های هیرکانی و همچنین بررسی این تغییرات به تفکیک استانی انجام گرفت. جدول (۲) مساحت کل جنگل‌های هیرکانی و مساحت به تفکیک استان‌های گیلان، مازندران و گلستان را برای سال‌های مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۲: مساحت جنگل‌های هیرکانی به تفکیک استان‌های گیلان، مازندران و گلستان

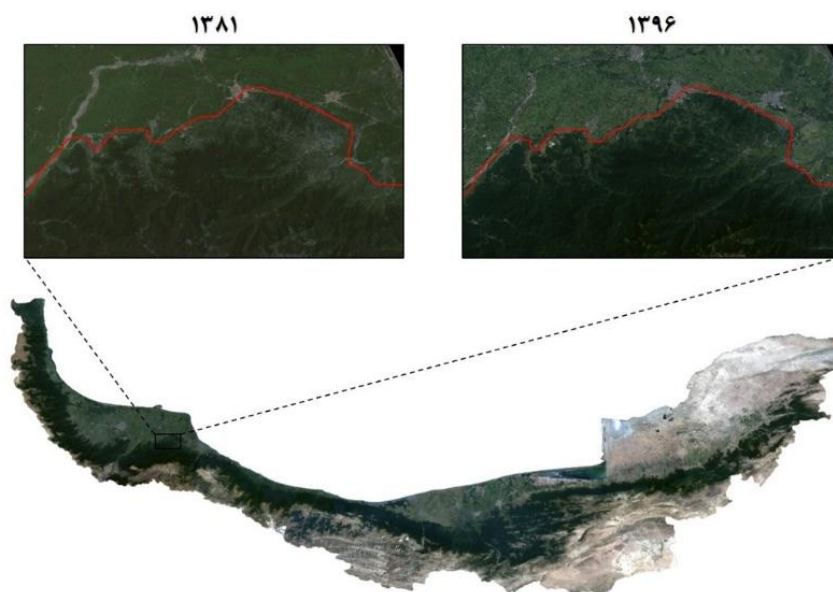
سال	مساحت کل (هکتار)	گیلان	مازندران	گلستان
۱۳۶۶	۲/۲۳,۵۴۲,۱۸۱	۸۰۸/۱۹,۵۴۸	۴۷۴/۴۱,۸۹۰	۱۵۹/۶۳,۳۷۶
۱۳۷۱	۴/۲۱,۹۳۱,۱۸۰	۹۵۵/۶۹,۵۴۶	۴۸۶/۶۱,۸۸۷	۸۸۹/۹۰,۳۷۴
۱۳۷۵	۵/۶۹,۶۳۲,۱۷۹	۰۲۹/۲۶,۵۴۳	۰۹۷/۷۵,۸۸۱	۱۹۸/۶۸,۳۷۲
۱۳۸۱	۵/۵۵,۴۳۶,۱۹۸	۰۶۴/۳۲,۶۰۱	۵۳۷/۵۶,۹۷۲	۷۶۳/۶۸,۴۱۰
۱۳۸۸	۵/۴۱,۷۳۲,۱۹۸	۷۶۲/۱۴,۶۰۱	۱۸۶/۹۲,۹۷۴	۳۷۶/۳۷,۴۱۱
۱۳۹۲	۵/۳۳,۵۴۱,۱۹۷	۱۵۵/۷۶,۵۹۸	۳۴۸/۶۰,۹۶۸	۹۱۰/۹۷,۴۰۸
۱۳۹۶	۴/۲۳,۹۶۹,۱۹۶	۴۲۳/۴۱,۵۹۶	۵۴۴/۱۱,۹۶۵	۷۲۶/۷۱,۴۰۷

مطابق جدول (۲)، مساحت کل جنگل‌های هیرکانی از سال ۱۳۶۶ تا سال ۱۳۹۶ حدود ۱۵۴ هزار و ۲۷۲ هکتار افزایش سطح داشته است. مساحت در حوضه آبخیز مازندران افزایشی حدود ۷۵ هزار و ۷۰ هکتاری و در حوضه آبخیز گیلان افزایشی حدود ۴۷ هزار و ۶۱۵ هکتاری داشته است. همچنین در مورد حوضه آبخیز

گلستان، مساحت جنگل‌ها در سال ۱۳۹۶ نسبت به سال ۱۳۶۶ افزایشی حدود ۳۱ هزار و ۵۶۷ هکتاری داشته است. جدول (۲) نشان می‌دهد فرآیند تخریب و احیاء جنگل‌ها در بازه‌های زمانی متفاوت می‌باشد. شکل (۶) و شکل (۷) به ترتیب دو نمونه از فرایند تخریب و احیاء جنگل‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۶: نمونه‌ای از تخریب جنگل در (a) استان مازندران و (b, c) استان گلستان



شکل ۷: نمونه‌ای از احیاء جنگل در استان گیلان

گرفته است نشان می‌دهد این مطالعات عمده‌تاً مقطعی بوده است و پایش منظم و مستمری از روند تغییر سطح کل جنگل‌های هیرکانی وجود ندارد. در حالیکه در این تحقیق میزان تغییرات جنگل‌های هیرکانی در بازه زمانی ۵ ساله از سال ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۶ مورد بررسی

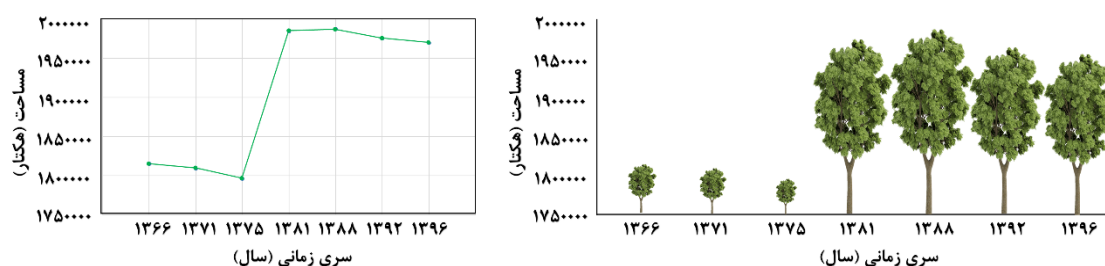
در ادامه به مقایسه یافته‌های این تحقیق با مطالعات پیشین پرداخته شده است. جدول (۳) نتایج تحقیقات پیشین در زمینه پایش تغییر سطح جنگل-های هیرکانی را نشان می‌دهد. نگاهی به مطالعاتی که تاکنون در مطالعه و پایش جنگل‌های هیرکانی انجام

قرار گرفت. بنابراین نتایج این تحقیق نمی‌تواند بصورت کامل با مطالعات گذشته مورد بررسی قرار گیرد؛ اما با این وجود نتایج این تحقیق با مطالعات FAO همخوانی نسبتاً بیشتری نسبت به سایر مطالعات دارد.

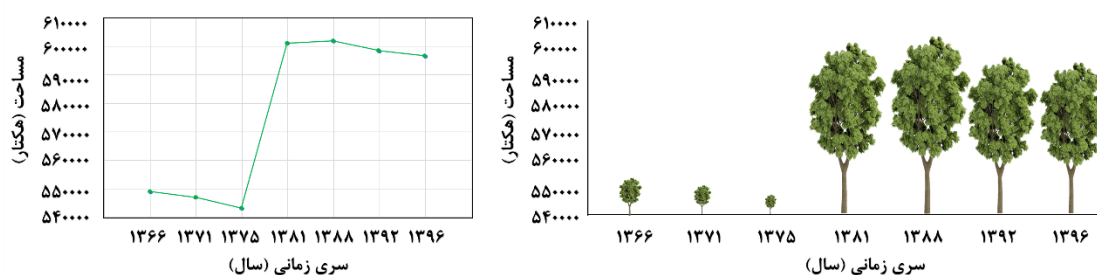
جدول ۳: مساحت جنگل‌های هیرکانی در سال‌های مختلف براساس منابع رسمی [۱]

ردیف	منبع	سال	مساحت (هکتار)	توضیح
۱	استاندارد فائو	۱۳۶۹	۱۷۷۱۰۰۰	تاج-پوشش بیش از ۵ درصد
۲	سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور	۱۳۷۳	۱۸۴۷۸۸۶	تاج-پوشش بیش از ۵ درصد
۳	مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور	۱۳۸۲	۱۸۱۱۷۸۸	تاج-پوشش بیش از ۵ درصد
۴	استاندارد فائو	۱۳۸۴	۱۸۴۷۸۸۶	تاج-پوشش بیش از ۵ درصد
۵	استاندارد فائو	۱۳۸۹	۱۸۴۷۸۸۶	تاج-پوشش بیش از ۵ درصد
۶	سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور	۱۳۹۴	۲۰۷۳۳۶۸	تاج-پوشش بیش از ۵ درصد
۷	استاندارد فائو	۱۳۹۴	۱۹۳۹۴۹۴	تاج-پوشش بیش از ۵ درصد
۸	مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور	۱۳۹۵	۱۶۵۰۴۹۸	تاج-پوشش بیش از ۵ درصد

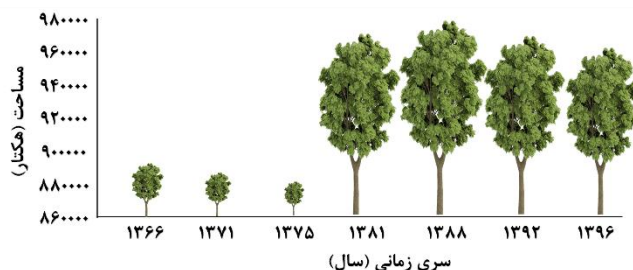
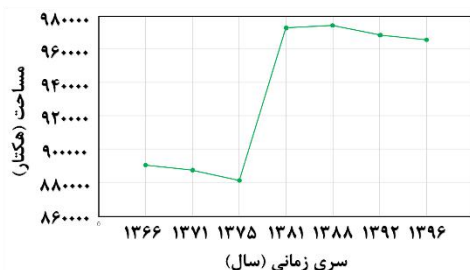
به منظور درک بهتر و بررسی دقیق‌تر از روند تغییرات سطح جنگل‌های هیرکانی، نمودار تغییرات مساحت برای کل جنگل‌های هیرکانی به تفکیک سه استان گیلان، مازندران و گلستان ترسیم شد (شکل-های ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱).



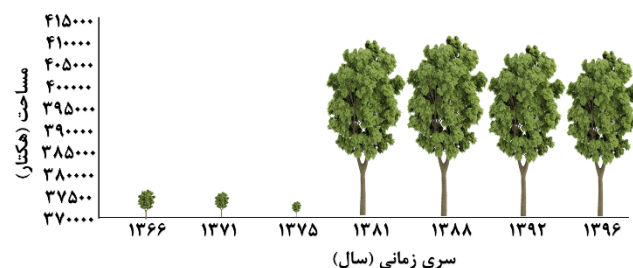
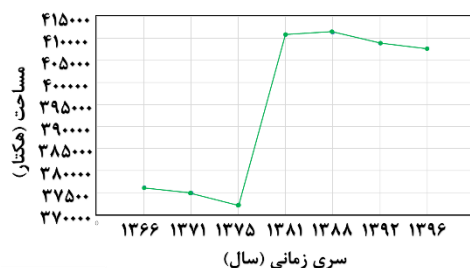
شکل ۸: روند تغییرات سطح کل جنگل‌های هیرکانی



شکل ۹: روند تغییرات سطح جنگل‌های هیرکانی در حوضه آبخیز استان گیلان



شکل ۱۰: روند تغییرات سطح جنگل‌های هیرکانی در حوضه آبخیز استان مازندران



شکل ۱۱: روند تغییرات سطح جنگل‌های هیرکانی در حوضه آبخیز استان گلستان

هکتار بوده است.

۳-۲- ارزیابی و تحلیل نتایج

در این بخش نتایج حاصل از مدل FCD اولیه و بهبودیافته به تفکیک بازه‌های زمانی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. تفکیک طبقات جنگل بر اساس استاندارد فائو و سازمان جنگل‌ها مطابق جدول (۴) می‌باشد.

نتایج حاکی از افزایش سطح جنگل‌ها بین سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۸۱ در هر سه استان می‌باشد. بنابراین می‌توان این بازه را به نوعی تحول جدی در جلوگیری از جنگل‌زدایی و شروع احیا و بازسازی جنگل‌های از دست رفته قلمداد کرد. همچنین این نمودارها نشان می‌دهد جنگل‌های هیرکانی از سال ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶ روند تخریبی را طی می‌کند؛ به طوریکه میزان تخریب جنگل‌های هیرکانی در این ۸ سال حدود ۱۸ هزار

جدول ۴: طبقه‌بندی و تفکیک کلاس‌های جنگل بر اساس استاندارد فائو و سازمان جنگل‌ها

استاندارد طبقه‌بندی فائو			استاندارد طبقه‌بندی سازمان جنگل‌ها		
ردیف	نام طبقه	درصد تاج-پوشش	ردیف	نام طبقه	درصد تاج-پوشش
۱	بدون جنگل	۰ - ۱۰٪	۱	بدون جنگل	۰ - ۵٪
۲	تنک	۱۰ - ۴۰٪	۲	بسیار تنک	۵ - ۱۰٪
۳	نیمه انبوه	۴۰ - ۷۰٪	۳	تنک	۱۰ - ۴۰٪
۴	انبوه	۷۰ - ۱۰۰٪	۴	نیمه انبوه	۴۰ - ۷۰٪
			۵	انبوه	۷۰ - ۱۰۰٪

حالیکه سازمان جنگل‌ها با افزودن طبقه بسیار تنک این طبقه‌بندی را به ۵ طبقه افزایش داد. پس از اجرای مدل FCD و در نظر گرفتن حد آستانه ۵، ۲۵ و ۵۰

مطابق جدول (۴)، تفکیک کلاس‌های جنگل بر اساس استاندارد فائو بصورت کلاس‌های جنگل انبوه، جنگل نیمه انبوه، جنگل تنک و فاقد جنگل است، در

نقشه تاج-پوشش و داده‌های تست در طبقه یکسانی قرار گرفته بودند به عنوان پیکسل‌های طبقه‌بندی شده صحیح و در غیر اینصورت به عنوان پیکسل‌های خطای طبقه‌بندی مدل شناسایی و شمارش شدند و ماتریس خطاها تشکیل شد.

تحلیل آماری نتایج به‌دست آمده مبتنی بر تشکیل ماتریس خطای هر طبقه‌بندی در جدول (۵) ارایه شده است. بررسی ماتریس‌های خطا نشان از بهبود دقت نتایج در مدل *FCD* بهبودیافته دارد. صحت کلی و ضریب کاپای حاصل از مدل *FCD* اولیه به ترتیب ۰.۸۶۰۲% و ۰.۶۷ برای مدل *FCD* بهبودیافته ۰.۹۶۰۹% و ۰.۹۱ بدست آمد که مؤید بهبود عملکرد مدل از منظر آماری است. نکته قابل توجه افزایش دقت طبقه‌بندی کلاس‌های جنگلی متراکم و فاقد جنگل است که حاکی از ارتقای عملکرد مدل بهبود یافته است.

درصد جهت تفکیک طبقه‌های جنگل انبوه، جنگل نیمه انبوه، جنگل تنک و فاقد جنگل (مطابق استاندارد فائو)، نتایج به‌دست آمده مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت ارزیابی نتایج از داده زمین مرجع و داده‌های آزمون بدست آمده از گوگل ارث در قالب همین چهار طبقه استفاده شد. نمونه‌های آزمون مورد استفاده برای ارزیابی مدل که از طریق گوگل ارث جمع آوری شد شامل نمونه‌های آزمون در چهار طبقه بدون جنگل، جنگل تنک، نیمه انبوه و انبوه جمع آوری شد. این نمونه‌ها در هر طبقه و هر استان شامل ۴۰ پلیگون (حدوداً ۵۰۰ پلیگون در کل محدوده مطالعاتی) با تعداد حداقل ۵ و حداکثر ۲۰ پیکسل بود. پس از تهیه این داده‌ها، مقایسه نقشه تاج-پوشش جنگل حاصل از مدل با نمونه‌های آزمون در نرم افزار آرک جی آی اس انجام گرفت. مقایسه به این صورت بود که پیکسل‌هایی که در

جدول ۵: دقت نتایج پیاده‌سازی مدل *FCD* اولیه، *FCD* بهبودیافته مرحله اول و *FCD* بهبودیافته نهایی

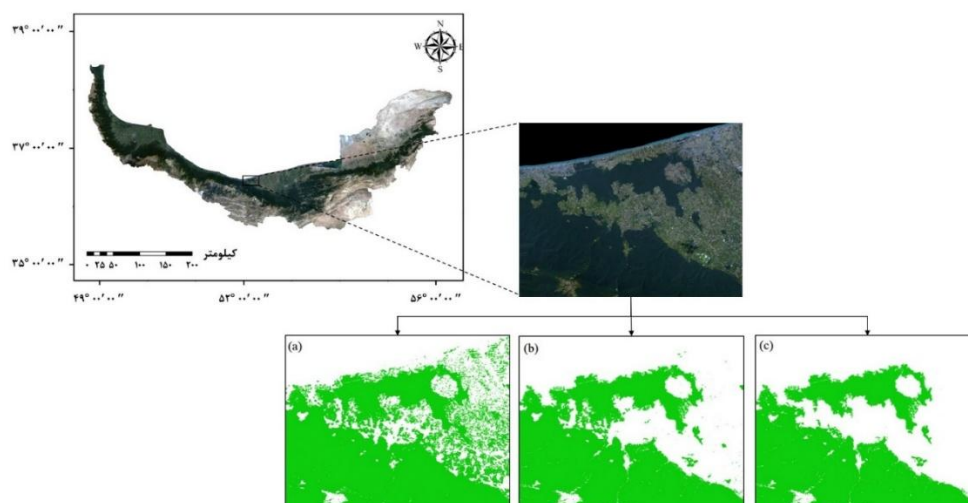
مدل	صحت کلی (%)	ضریب کاپا
<i>FCD</i> اولیه	۸۶.۰۲	۰.۶۸
<i>FCD</i> بهبودیافته مرحله اول	۹۴.۶۲	۰.۸۸
<i>FCD</i> بهبودیافته نهایی	۹۶.۰۹	۰.۹۱

FCD بهبودیافته در بازه‌های زمانی مختلف را نشان می‌دهد. مطابق این جدول، صحت کلی و ضریب کاپا در تمامی این بازه‌ها حدوداً یکسان و از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشد. این نتایج صحت نتایج بدست آمده را تضمین می‌کند. اعلام ۱۰% از مناطق جنگلی هیرکانی به عنوان مناطق حفاظتی طی آن سال‌ها و واگذاری مسئولیت حفاظتی آن‌ها به سازمان حفاظت محیط زیست امری است که سبب خوداحیایی جنگل‌های واقع در مناطق حفاظت شده گردید. این مسأله را طرح پژوهشی "ارزیابی و طبقه‌بندی تغییرات تاج‌پوشش جنگل‌های هیرکانی مناطق حفاظت شده با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای طی سه دوره زمانی (۱۹۷۸، ۱۹۹۸ و ۲۰۰۲)" تأیید می‌کند.

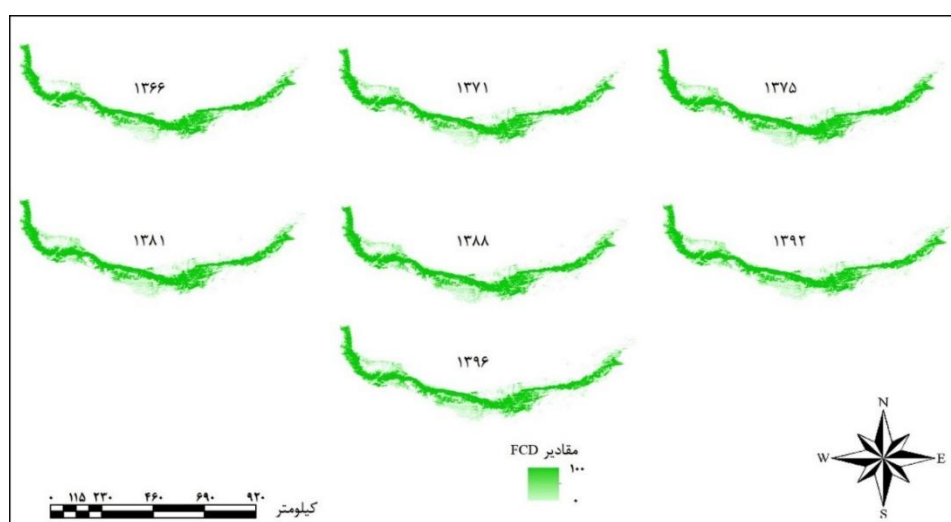
مطابق جدول (۵)، مدل *FCD* اولیه عملکرد مناسبی در تفکیک تاج-پوشش جنگل از مناطق کشاورزی و سبزی‌نگی غیرجنگلی نداشته است. این چالش را مدل بهبود یافته نهایی تا حدود زیادی جبران کرده است. شکل (۱۲) نمای نزدیک تر نقشه تاج-پوشش بدست آمده از دو مدل را در بخشی از یک جنگل جلگه‌ای در منطقه نشان می‌دهد.

در ادامه ارزیابی مربوط به نتایج حاصل از مدل *FCD* بهبودیافته در هر یک از بازه‌های زمانی انجام گرفته است. شکل (۱۳) نقشه تاج-پوشش بدست آمده از مدل *FCD* بهبودیافته در هر یک از این هفت بازه زمانی را نشان می‌دهد.

جدول (۶) صحت کلی و ضریب کاپای حاصل از مدل



شکل ۱۲: نمای نزدیک نقشه تاج-پوشش مدل (a) FCD اولیه، (b) بهبودیافته مرحله اول و (c) FCD بهبودیافته نهایی



شکل ۱۳: نقشه تاج-پوشش بدست آمده از مدل FCD بهبودیافته از جنگل های هیرکانی در بازه های زمانی مختلف

جدول ۶: دقت نتایج پیاده سازی مدل FCD بهبودیافته در بازه های زمانی مختلف

بازه زمانی	صحت کلی (%)	ضریب کاپا
اول	۹۵٫۴۴	۰٫۹۱
دوم	۹۵٫۶۱	۰٫۹۱
سوم	۹۵٫۸۹	۰٫۹۰
چهارم	۹۵٫۲۱	۰٫۹۱
پنجم	۹۵٫۷۹	۰٫۹۱
ششم	۹۵٫۹۱	۰٫۹۰
هفتم	۹۶٫۰۹	۰٫۹۱

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله دو مرحله بهبود به مدل FCD ، به منظور کاهش ضعف این مدل در تفکیک پوشش‌های گیاهی غیرجنگلی از جنگلی، اضافه شد. به منظور بررسی عملکرد مدل بهینه شده و همچنین مقایسه آن از نظر افزایش دقت با مدل اولیه و مقایسه آن‌ها تغییرات سطح جنگل‌های هیرکانی مورد بررسی قرار گرفت.

مقایسه دقت بدست آمده از نتایج نشان داد صحت کلی و ضریب کاپای مدل FCD بهبودیافته نسبت به مدل FCD اولیه به ترتیب حدود ۱۰٪ و ۲۴٪ افزایش داشت. این افزایش دقت به این دلیل است که با افزودن دو مرحله بهبود به مدل FCD برخی از مناطق غیرجنگلی مانند زمین‌های کشاورزی و بوته زارها به خوبی شناسایی و از نقشه نهایی تراکم تاج-پوشش جنگل حذف شده‌اند.

همچنین نتایج حاصل از تغییرات سطح جنگل‌های در ۳۰ سال گذشته نشان داد، مساحت کل جنگل‌های هیرکانی از سال ۱۳۶۶ تا سال ۱۳۸۸ در حدود ۱۷۱ هزار و ۸۸۳ هکتار افزایش داشته است و بین سال ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶ در حدود ۱۷ هزار و ۶۳۱ هکتار کاهش داشته است. به دیگر بیان طی یک دهه اخیر با تخریب

مراجع

- [1] Kh. Mirakhorlou and R. Akhavan "Area changes of Hyrcanian Forests during 2004 to 2016", *Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO)*, 69, 121-133, 2016.
- [2] O.W. Tsui, N.C. Coops, M.A. Wulder, P.L. Marshall, and A. Cardle, "Using multi-frequency radar and discrete-return LiDAR measurements to estimate aboveground biomass and biomass components in a coastal temperate forest", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 69, 121-133, 2012.
- [3] D. LU, "A Review-The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation", *International Journal of Remote Sensing*, 27(7), 1297-1328, 2006.
- [4] O.W. Tsui, N.C. Coops, M.A. Wulder and P.L. Marshall, "Integrating airborne LiDAR and spaceborne radar via multivariate kriging to estimate above-ground biomass", *Remote Sensing of Environment*, 139, 340-352, 2013.
- [5] B. Mosavi, "Comparison of high resolution (Quickbird) and medium resolution (Landsat8-OLI) satellite images capability in estimation of trees aboveground biomass", *A thesis of Master student, Gorgan University of Agriculture and Natural Resources*, 2015.
- [6] Gh. Ronoud, "Estimating aboveground

و کاهش سطح جنگل‌ها در عرصه‌های بالاتر از تراز ۵۰ متر مواجه هستیم و این می‌تواند حاکی از تغییر رویکرد تخریب کنندگان عرصه‌های جنگلی از مناطق پایین‌دست به سمت مناطق و عرصه‌های بالادست باشد. روند تخریب یا احیاء این جنگل‌ها در تحقیقات و گزارش‌هایی که قبلاً ارائه شده است کاملاً متفاوت است. نتایج به‌دست آمده از برخی از این طرح‌های تحقیقاتی روند کاهش سطح جنگل‌های هیرکانی را در ۳۰ سال گذشته نشان می‌دهد. در حالیکه در برخی دیگر از این طرح‌ها این روند افزایشی بیان شده است. اما نتایج تحقیق حاضر نشان داد از سال ۱۳۶۶ تا ۱۳۸۸ روند تغییرات سطح جنگل‌های هیرکانی افزایشی و از سال ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶ کاهش بوده است. این تناقض بین نتایج گزارش‌های مختلف به این دلیل است که برای ارزیابی سطح جنگل‌هایی با مساحت بسیار زیاد و گونه‌ها و تیپ‌ها جنگلی مختلف نیاز به تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا و انجام عملیات میدانی کافی می‌باشد و تصاویر ماهواره‌ای با دسترسی رایگان و قدرت تفکیک مکانی پایین که در تحقیقات قبلی و تحقیق حاضر مورد استفاده قرار گرفت به هیچ عنوان نمی‌تواند منبع موثقی برای ارزیابی تخریب یا احیاء جنگل‌ها باشد.

- woody biomass of *Fagus orientalis* stands in Hyrcanian forest of Iran using Landsat 8 satellite data (Case study: Khyroud forest)", A thesis of Master student, University of Tehran, 2016.
- [7] S. Attarchi, "Complex land cover classification and physical properties retrieval of the Hyrcanian forest: A Multi-Source Remote Sensing approach", A thesis of PhD student, University of TU Bergakademie Freiberg, 2014.
- [8] S. Attarchi and R. Gloaguen, "Improving the Estimation of Above Ground Biomass Using Dual Polarimetric PALSAR and ETM+ Data in the Hyrcanian Mountain Forest (Iran)", *Remote Sensing of Environment*, 6(5), 3693-3715, 2014.
- [9] J. Mohammadi, S. Shataee, M. Namiranian, and E. Næsset, "Modeling biophysical properties of broad-leaved stands in the Hyrcanian forests of Iran using fused airborne laser scanner data and ultraCam-D images", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 61, 32-45, 2017.
- [10] A. Raei, P. Pahlavani and M. Hasanlou, "Determining effective factors on forest fire using the compound of geographically weighted regression and genetic algorithm, a case study: Golestan, Iran", *Journal of Geospatial Information Technology*, 61, 32-45, 2016.
- [11] S.C. Pal, R. Chakraborty, S. Malik, and B. Das, "Application of forest canopy density model for forest cover mapping using LISS-IV satellite data: a case study of Sali watershed, West Bengal", *Modeling Earth Systems and Environment*, 4(2), 853-865, 2018.
- [12] R.S. Sharma and T.P. Singh, "Forest Canopy Density Assessment Using High Resolution LISS-4 Data in Yamunanagar District, Haryana", *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 5-11, 2018.
- [13] A.C. Fitrianto, A. Darmawan, K. Tokimatsu, and K. Yoshikawa, "Spatial distribution of empty fruit bunch production as potential electric resource using remote sensing technique", *Energy Procedia*, 158, 3565-3571, 2019.
- [14] A. Shaholi, M. Pirbavaghar and P. Fatehi, "Forest Canopy Density Assessment Using FCD model: a case study of Marivan forests", *Journal of RS and GIS in Natural Resources*, 6, 21-28, 2014.
- [15] A. Rikimaru, "TM Data Processing Guide for forest Canopy Density Mapping and Monitoring Model", presented at Utilization of Remote Sensing in Site Assessment and Planning for Rehabilitation of Logged-over Forest, Bangkok, Thailand, 1996.
- [16] M.S. Jamalabad, "Forest canopy density monitoring using satellite images", presented at ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, 2004.
- [17] Z. Azizi et al, "Forest canopy density estimating using satellite images", *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 8, 5-11, 2008.
- [18] C. Huang, L. Yang, B. K. Wylie, and C. Homer, "A strategy for estimating tree canopy density using Landsat 7 ETM+ and high-resolution images over large areas", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 61, 32-45, 2001.
- [19] SZ. Hosseini, M. Kappas, and P. Propastin, "Estimating Relationship between Vegetation Dynamic and Precipitation in Central Iran", presented at Toledo conference, Spain, 2011.
- [20] G. Yin, Z. Hu, X. Chen and T. Tiyyip, "Vegetation dynamics and its response to climate change in Central Asia", *Journal of Arid Land*, 8(3), 375-388, 2016.
- [21] R. Sharma, K. Hara and R. Tateishi, "Developing forest cover composites through a combination of Landsat-8 optical and Sentinel-1 SAR data for the

visualization and extraction of forested areas", *Journal of Imaging*, 4(9), 105, 2018.

[22] FAO (Food and Agriculture Organization), 2005. *Global Forest Resources Assessment 2005, (Iran report)*. Rome, 2005, P41.



Introducing the improved Forest Canopy density (FCD) model for frequent assessment of Hyrcanian forest

Masoud Taefi Feijani ^{1*}, Saeed Azadnejad ²

1- Instructor, Research Scientist, Aerospace Research Institute Space Systems Research Group.

2- Researcher, Research Scientist, Aerospace Research Institute Space Systems Research Group.

Abstract

Mapping of forest extent is a prerequisite to acquire quantitative and qualitative information about forests and to formulate management and conservation strategies. forest canopy density (FCD) model is one of the useful RS methods for forest mapping using satellite images. One of the most serious challenges in FCD model is the weakness in the calculation of canopy density in low density forests as well as plain forests. Due to the existence of chlorophyll in croplands, shrubs, pastures, etc., FCD model has difficulty to determinate the forests areas from the other mentioned land cover. Hence, this paper is focused on improving the performance of FCD model to overcome this limitation. This improvement yield by adding a new forest color composite index (FCCI) and removing non-forest vegetation using the average kernel and DEM regard to standard forest definition. In this study, in order to implement and evaluate the performance of the improved model, time series of Landsat images acquired from USGS Landsat standard level-2 products archive. In this study, Landsat time series images acquired from USGS Landsat standard level-2 products were used to estimate forest canopy density in Hyrcanian forests of northern Iran. The results indicated the higher accuracy of the proposed model. Moreover, overall accuracy and kappa index of the model were 10% and 24% superior to initial model, respectively. As a second objective, in order to implement and evaluate the performance of the improved model, canopy changes of the Hyrcanian forests were also examined. In general, the results of this study showed that the total area of Hyrcanian forest increased from 154,272 hectares from 1987 to 2009. Mazandaran, Gilan and Golestan provinces contributed 75,070, 47,615 and 31,567 hectares respectively. In addition, the results showed that the area of Hyrcanian forests decreased by 17,631 hectares between 2009 and 2017.

Key words: Hyrcanian forest, Forest canopy density model, Landsat time series data, plain forests.