

## ارزیابی مدل FCD برای برآورد تراکم تاج پوشش جنگل های زاگرس با استفاده از تصاویر لندست ۸ و سنتینل ۲

احمد عباسی وند<sup>۱</sup>

هرمز سهرابی<sup>۲\*</sup>

[hsohrabi@modares.ac.ir](mailto:hsohrabi@modares.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۷/۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۲

### چکیده

**زمینه و هدف:** تاج پوشش یکی از معیارهای مهم برای بررسی تغییرات و پایش جنگل ها است. با توجه به نقش جنگل های زاگرس در حفاظت از آب و خاک، تهیه نقشه به روز و پایش تغییرات تاج پوشش در این جنگل ها از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

**روش بررسی:** این تحقیق در ۲۷ محدوده در ناحیه رویشی زاگرس اجرا و در ۲۶۳۷ قطعه نمونه ۴۰۰ متر مربعی درصد تاج پوشش استخراج شد. به منظور برآورد میزان تاج پوشش با استفاده از ماهواره های لندست ۸ و سنتینل ۲ داده های حاصل از محاسبه چهار شاخص باهم ادغام و نقشه تراکم تاج پوشش (FCD) محاسبه و ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از معیارهای آماری خطا انجام شد. رابطه تاج پوشش اندازه گیری شده و شاخص های تشکیل دهنده مدل FCD با استفاده از تصاویر دو ماهواره لندست ۸ و سنتینل ۲، با همبستگی پیرسون بررسی شد.

**یافته ها:** نتایج نشان داد دو شاخص AVI و SI رابطه مستقیم و دو شاخص BI و TI رابطه غیرمستقیمی در تمام نواحی رویشی مورد مطالعه با میزان واقعی تاج پوشش داشتند. همچنین بیشترین مقدار ضریب تبیین در بین کل نواحی برای ماهواره سنتینل ۲ (۶۴/۸۶ درصد) در منطقه با تاج پوشش انبوه در زاگرس شمالی بدست آمد. کمترین مقادیر آماری خطا از جمله RMSE (۱۷/۴۱ درصد)، RMSE% (۳۱/۵۷ درصد)، Bias (۱/۵۷ درصد)، Bias% (۲/۷۰ درصد)، MAE (۱۲/۶۰ درصد) و MAE% (۲۴/۲۸ درصد) محاسبه گردید که همگی متعلق به ماهواره سنتینل ۲ و مناطقی با تاج پوشش انبوه بود. معیارهای آماری خطا در زاگرس شمالی مقدار کمتری نسبت به زاگرس میانی و جنوبی نشان داد که نشان دهنده کارایی مدل برای مناطق انبوه است.

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار، گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس. \* (مسئول مکاتبات)

**بحث و نتیجه‌گیری:** دستیابی به نتایج با دقت بالا توسط مدل FCD میسر نیست. همچنین محاسبه تاج پوشش با تصاویر سنتینل ۲ نتایج بهتری نسبت به لندست ۸ داشت. در مجموع این مدل برای برآورد تاج پوشش جنگل در مناطق تنک و نیمه انبوه ناحیه رویشی زاگرس مناسب نیست.

**واژه‌های کلیدی:** تاج پوشش جنگل، جنگل‌های زاگرس، سنتینل ۲، لندست ۸.

## **Assessment of the FCD model for estimating canopy density in Zagros forests using Landsat 8 and Sentinel 2 images**

**Ahmad Abbasiwand<sup>1</sup>**

**Hormoz Sohrabi<sup>2\*</sup>**

[hsohrabi@modares.ac.ir](mailto:hsohrabi@modares.ac.ir)

Admission Date: September 24, 2024

Date Received: February 11, 2024

### **Abstract**

**Background and Objective:** One of the important criteria for studying, assessing changes, and monitoring forests is the canopy cover. Considering the role of Zagros forests in water and soil conservation and the significance of canopy cover in these forests, timely mapping canopy cover and cover changes are of special importance.

**Material and Methodology:** this research selected a total of 27 study areas throughout the Zagros growth region. A total of 2637 plots of 400 meters were examined, and the actual percentage of canopy cover was extracted. To estimate the canopy cover for Landsat 8 and Sentinel-2 satellites, data from the calculation of four integrated indices were combined, and the Forest Canopy Density (FCD) map was calculated. The model's performance was evaluated using statistical error metrics. Pearson correlation was used to assess the correlation between Landsat 8 and Sentinel 2 derived FCD indices and measures canopy cover.

**Findings:** The results showed that AVI and SI, had a direct relationship, while BI and TI had an inverse relationship with the canopy cover in all regions. Moreover, the highest coefficient of determination among all regions was obtained for the Sentinel-2 satellite (86.64%) in the densely forested area of northern Zagros. The lowest statistical error values, including RMSE (17.41%), RMSE% (31.57%), Bias (1.57%), Bias% (2.70%), MAE (12.60%), and MAE% (24.28%), were all obtained for the Sentinel-2 satellite and areas with dense canopy cover. Additionally, the statistical error metrics in northern Zagros showed lower values compared to central and southern Zagros, indicating the model's efficiency in densely forested areas.

**Discussion and Conclusion:** In general, it was not possible to achieve canopy estimation with high accuracy by the FCD model. The results obtained from the Sentinel-2 satellite performed better than the Landsat 8 satellite. Overall, this model is not suitable for the estimation of canopy covers of sparser semi-dense forests in Zagros.

**Keywords:** Forest Canopy Density, Zagros Forests, Sentinel 2, Landsat 8.

---

1- MSc. Graduated, Forest Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2- Associate Professor, Forest Science and Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

\*(Corresponding Author)

## مقدمه

امروزه بررسی ساختار جنگل از مباحث موردتوجه و ضروری به‌ویژه در راستای اهداف جنگل‌شناسی نزدیک به طبیعت است (۱). در راستای مدیریت جنگل‌ها، استخراج اطلاعات از این عرصه‌ها ضروری است. در عرصه جنگل مشخصه‌های کمی جنگل همچون تعداد در هکتار و تاج‌پوشش از موارد اساسی است که باید موردتوجه قرار گیرد (۲). جنگل‌های زاگرس با مساحتی حدود پنج میلیون هکتار از مهمترین اکوسیستم‌های جنگلی کشور محسوب می‌شوند، که از نظر حفاظت منابع آبی، خاک، تعدیل آب و هوا و تنوع زیستی، اهمیت زیادی دارند (۳ و ۴). این جنگل‌ها از نظر تولید چوب ارزش اقتصادی کمی دارند، اما از نظر تامین آب، حفاظت خاک، تعدیل آب و هوا و تعادل اقتصادی و اجتماعی بسیار مهم‌اند (۵). باتوجه‌به ساختار جنگل‌های زاگرس که اغلب شاخه‌زاد هستند و قادر به تولید چوب صنعتی نیستند، حجم سرپا و سطح مقطع در ارتفاع برابرسینه، شاخص‌های مناسبی از توده برای مطالعه و پژوهش به حساب نمی‌آیند (۶). به‌دلیل اهمیت این جنگل‌ها تهیه و تنظیم یک برنامه منسجم و کامل مدیریتی ضروری است (۷). بنابراین برای مطالعه، بررسی و مدیریت این جنگل‌های تاج‌پوشش معیار مهمی محسوب می‌شود (۸ و ۹). از طرفی آماربرداری زمینی و استفاده از روش‌های معمول میدانی به‌منظور تهیه نقشه‌های مربوط به تاج‌پوشش جنگل، پرهزینه بوده و انجام دوره‌ای آن، بسیار زمانبر است. بنابراین دستیابی به روش‌هایی برای خودکار نمودن فرآیند تهیه نقشه از مناطق بزرگ جنگلی و کسب اطلاعات بهنگام برای انجام عملیات جنگلداری، که با دقتی معمول، هزینه مالی و زمانی کمتری داشته باشد، همواره مورد توجه بوده است (۱۰). فناوری سنجش از دور امکان پایش علمی و مستند از میزان تغییرات مناطق جنگلی چه در سطح، چه در حجم و تراکم جنگل در اختیار قرار می‌دهد (۱۱).

روش‌های سنجش از دوری در تهیه نقشه تاج‌پوشش جنگل‌ها عموماً مبتنی بر دو روش طبقه‌بندی و استفاده از مدل‌های فیزیکی هستند (شاهولی کوه‌شور و همکاران، ۱۳۹۳). در این میان، اگر چه روش‌های طبقه‌بندی نظارت شده در مقایسه با روش‌های نظارت نشده از دقت مناسبی در طبقه‌بندی جنگل

برخوردارند، اما به دلیل نیاز به برداشت داده‌های آموزشی در بسیاری از موارد به دلیل هزینه بالا و عدم دسترسی به برخی مناطق، کارایی خود را از دست می‌دهند. به‌ویژه این‌که به‌طور کلی آگاهی از روند تغییرات مستلزم بررسی سال‌هایی است که داده آموزشی از آن‌ها وجود ندارد (۱۲).

یکی از روش‌های مرسوم سنجش‌ازدوری در ارزیابی تراکم جنگل استفاده از مدل نگارگر انبوهی تاج‌پوشش جنگلی (FCD) است. این مدل نخستین بار توسط ریکیمارو در سال ۱۹۹۶ معرفی شد. FCD (Forest Canopy Density) یک روش مقرون به صرفه از لحاظ هزینه و زمان برای تشخیص و تخمین تراکم تاج‌پوشش در مقیاس ناحیه‌ای و جهانی بشمار می‌رود (۱۳). این مدل به دلیل مزایا متعددی مانند سهولت اجرا، عدم نیاز به داده آموزشی و عدم تأثیرپذیری از گونه جنگلی، مورد توجه پژوهشگران سنجش از دور و جنگل قرار گرفته است (۱۱).

در تحقیقی، تغییرات پویایی پوشش جنگلی و تراکم آن در منطقه ساحلی سوریه بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ با استفاده از تصاویر ماهواره لندست بررسی شده است که نتایج نشان دهنده کاهش معنی‌داری در سطح تاج‌پوشش اراضی جنگلی با ۲۴/۳۰ درصد که سهم جنگل‌های متراکم ۹/۲۰ درصد بوده است (۱۴). تاکنون در داخل کشور تحقیقات مختلفی برای ارزیابی کارایی مدل FCD برای تهیه نقشه تاج‌پوشش جنگل در مناطق رویشی مختلف شامل ناحیه رویشی هیرکانی و زاگرس صورت گرفته است.

طایفی فیجانی و همکاران (۱۵)، در تحقیقی با هدف گسترش و بهبود مدل FCD، شاخص حرارتی مورد استفاده در این مدل را با دو شاخص NLI و GNDVI، براساس یک آزمون آماری مناسب انتخاب و جایگزین کردند. بدین ترتیب اجرای مدل FCD برای سنجنده‌های فاقد باند حرارتی را فراهم کردند. به منظور غلبه بر چالش متغیر بودن شرایط جوی و دمایی یک منطقه با وسعت بزرگ، یک مرحله حد آستانه‌گذاری محلی به این مدل را افزودند تا دقت مدل برای مطالعات بزرگ مقیاس بهبود یابد. به منظور بررسی عملکرد مدل پیشنهادی، از داده‌های لندست ۵ مربوط به سال ۱۳۶۶ و داده‌های لندست ۸ مربوط به

در مجموع نتایج حاصل شده برای جنگل های زاگرس برخلاف جنگل های هیرکانی، امیدبخش نبوده است. در تحقیقات قبلی در جنگل های زاگرس پتانسیل مدل اصلی FCD برای برآورد تاج پوشش جنگل بررسی شده است. اما صحت نتایج مدل بطور معمول با شک و تردید همراه بوده است. یکی دیگر از خلاءهای تحقیقات صورت گرفته در خصوص مدل FCD در زاگرس، محدود بودن وسعت مناطق مورد مطالعه و اندک بودن تعداد مشاهدات است. هدف این تحقیق ارزیابی مدل FCD در جنگل های زاگرس با استفاده از تصاویر ماهواره های لندست ۸ و سنتینل ۲ است.

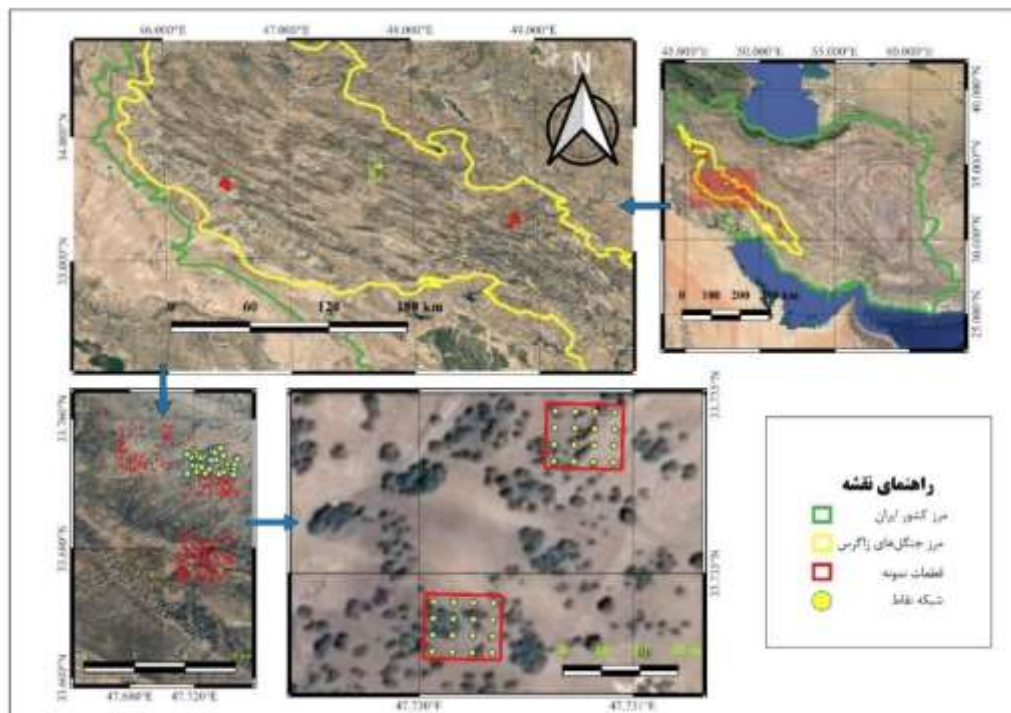
### روش بررسی

#### منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه این پژوهش (شکل ۱)، منطقه ی رویشی زاگرس در رشته کوه زاگرس به طول تقریبی ۱۳۰۰ کیلومتر و عرض متوسط ۲۰۰ کیلومتر، از روستای قبرحسین در استان آذربایجان غربی شروع و تا حوالی شهرستان فیروزآباد در استان فارس ادامه و با مساحت حدود ۵ میلیون هکتار، ۱۱ استان کشور آذربایجان غربی، کردستان، کرمانشاه، همدان، لرستان، ایلام، چهارمحال و بختیاری، اصفهان، کهگیلویه و بویر احمد، خوزستان و فارس را تحت پوشش قرار می دهد (۳).

سال ۱۳۹۶ برای محاسبه تراکم تاج پوشش جنگل های هیرکانی شمال کشور استفاده کردند. انتخاب این منطقه و این داده ها ضمن روبرو کردن مدل پیشنهادی با یک منطقه مطالعاتی وسیع، امکان بررسی تغییرات مساحت تاج پوشش جنگل های هیرکانی در طی ۳۰ سال گذشته (از سال ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۶) را فراهم کرد. نتایج نشان داد دقت کلی و ضریب کاپای مدل FCD بهبود یافته نسبت به مدل FCD اولیه به ترتیب حدود ۱۰ و ۱۴ درصد افزایش پیدا کرد. همچنین نتایج این بررسی نشان داد مساحت جنگل های هیرکانی از سال ۱۳۶۶ تا سال ۱۳۹۶ در ارتفاعات پایین دست کاهش چشمگیری داشته است.

میرزایی زاده و همکاران (۱۶) در جنگل های بیوره استان ایلام این مدل را بر مبنای داده های ماهواره لندست ۸ بررسی نمودند. آنان تاج پوشش به دست آمده را در طبقات ارائه شده شورای عالی سازمان منابع طبیعی کشور تهیه و صحت آن را بررسی نمودند. نتایج آن ها به صحت و ضریب کاپای ۶۱/۳۴ و ۰/۴۲ برای ۵ طبقه تاج پوشش و نتایج ضعیف تری برای ۷ طبقه تاج پوشش ارائه نمود. شاهولی کوه شور و همکاران (۱۷) با استفاده از تصاویر لندست ۷ تراکم تاج پوشش را برای جنگل های نیمه انبوه و تنک مریوان برآورد و در طبقات ۶، ۴ و ۳ کلاسه طبقه بندی نمود. نتایج آنان صحت ۵۲ و ۵۳ درصد و کاپای ۰/۲۹ و ۰/۳۹ برای طبقات به ترتیب ۶ و ۴ کلاسه به دست داد.



شکل ۱- نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

Figure 1. Location map of the study area

### اندازه‌گیری تاج‌پوشش جنگل

در این تحقیق ۹ محدوده مختلف انتخاب (زاگرس شمالی، میانی و جنوبی، هر کدام سه محدوده) و در هر یک از این محدوده‌ها سه رویشگاه شامل انبوه، نیمه انبوه و پراکنده از نظر تاج‌پوشش درختی انتخاب شد. در مجموع ۲۷ محدوده انتخاب و شبکه نقاط تصادفی برای محاسبه تاج‌پوشش طراحی گردید. برای ارزیابی و بررسی میزان صحت نقشه تراکم تاج‌پوشش جنگل حاصل از انجام مدل FCD، تهیه نقشه دقیق تراکم تاج‌پوشش منطقه مورد مطالعه امری ضروری است. به این منظور در هر یک از رویشگاه‌های مورد بررسی تعداد حدوداً ۷۰ تا ۱۰۰ نقطه تصادفی بر حسب مساحت منطقه طراحی گردید. در هر یک از این نقاط تصادفی یک قطعه نمونه مربعی شکل با مساحت ۴۰۰ متری (۲۰×۲۰ متر) انتخاب گردید و در این قطعه نمونه شبکه نقاط چین ۴×۴ نقطه پیاده شد. برای محاسبه درصد تاج‌پوشش در نرم‌افزار Google Earth Pro، تعداد نقاط واقع شده بر روی تاج درختان به کل نقاط تقسیم گردید. در مجموع تعداد ۲۶۳۷ پلات بررسی و درصد تاج‌پوشش استخراج شد (شکل ۱). تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در این تحقیق، تصاویر ماهواره‌های

لندست ۸ (سنجنده‌های OLI و TIRS) و سنتینل ۲ از تاریخ ۱۴۰۱/۰۵/۱۵ تا ۱۴۰۲/۰۶/۱۵ بود. مدل FCD، شامل مدل‌سازی بازتابش پدیده‌های زیست - فیزیکی و تحلیل داده‌های بدست آمده از اعمال چهار شاخص پوشش گیاهی پیشرفته (AVI)، خاک بدون پوشش (BI)، سایه (SI) و حرارتی (TI) است که با بکارگیری این شاخص‌ها تراکم تاج‌پوشش به‌دست می‌آید. این مدل نیازی به بازدید زمینی و تهیه اطلاعات حاصل از نمونه‌های تعلیمی جهت محاسبه درصد تاج‌پوشش ندارد و تهیه واقعیت زمینی تنها به منظور ارزیابی صحت نتایج حاصل، مورد نیاز است. مدل تراکم تاج‌پوشش، داده‌های حاصل از محاسبه چهار شاخص را باهم ادغام می‌کند (۱۸).

### شاخص‌های طیفی مورد استفاده در مدل اصلی FCD

#### شاخص پوشش گیاهی پیشرفته یا AVI

شاخص AVI به فعالیت شاخ‌وبرگ تاج‌پوشش حساس است و تفاوت‌های ظریف را می‌توان با استفاده از درجه توان پاسخ باند مادون قرمز بهبود بخشید. همچنین این شاخص در مقایسه با

## شاخص خاک لخت (بدون پوشش) یا BI

شاخص BI یک شاخص نرمال شده از تفاوت مجموع دو باند بازتابی NIR و Blue و جذب (SWIR و Red) است. این شاخص به تفکیک پوشش گیاهی با زمینه های مختلف یعنی پوشش گیاهی متراکم تا خاک لخت کمک می کند. شاخص BI از طریق رابطه ۲ (۱۸) محاسبه شد:

$$BI = \frac{(BSWIR + B_{Red}) - (BNIR + B_{Blue})}{(BSWIR + B_{Red}) + (BNIR + B_{Blue})} \times 100 + 100 \quad (2)$$

در رابطه بالا،  $K_1$  ثابت کالیبراسیون اول،  $K_2$  ثابت کالیبراسیون دوم و  $T_B$  دمای سطح زمین است.

## ادغام و سنتز شاخص ها

به عنوان مرحله میانی محاسبه تراکم تاج پوشش، شاخص های AVI و BI با استفاده از تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) به مقدار تراکم گیاهی یا (Density Vegetation) VD و شاخص های SI و TI به شاخص سایه مقیاس شده یا (Shadow Scaled Index) SSI با تبدیل خطی SI سنتز شدند. مقادیر این شاخص نسبی بوده و مقدار نرمال شده آن را می توان برای محاسبه دیگر عامل ها مورد استفاده قرار داد. از آن جایی که پوشش گیاهی و خاک لخت همبستگی بسیار منفی دارند، مقیاس بندی صفر و ۱۰۰ درصد تعیین شد (۱۸). اراضی جنگلی که کمترین و بیشترین مقدار سایه را داشته باشند به ترتیب دارای مقادیر SSI صفر و ۱۰۰ درصد هستند. پوشش گیاهی در تاج و روی زمین را می توان به راحتی توسط شاخص SSI متمایز کرد. جزئیات بیشتر در پژوهش Rikimaru و همکاران (۱۸) در دسترس است.

دیگر شاخص های پوشش گیاهی متداول مانند شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی یا NDVI، به کلاس های مختلف تراکم جنگل و نمود ظاهری (فیزیونومی) آن حساس تر است (۱۹). شاخص AVI از رابطه ۱ (۱۸) محاسبه گردید:

$$AVI = \{(B_{NIR} + 1)(256 - B_{Red})(B_{NIR} - B_{Red})\}^{1/3} \quad (1)$$

## شاخص سایه یا SI

نوع آرایش تاج در توده های جنگلی منجر به الگوی سایه ای می شود که بر پاسخ های طیفی تأثیر می گذارد. توده های جنگلی بالغ در مقایسه با منطقه باز محور طیفی نسبتاً مسطح و کم را نشان می دهند؛ بنابراین، توده های جنگلی جوان در مقایسه با توده های جنگلی بالغ، دارای شاخص سایه تاج پایینی هستند. شاخص SI از طریق رابطه ۳ (۱۸) محاسبه گردید.

(۳)

$$SI = \{(256 - B_{Blue})(256 - B_{Green})(256 - B_{Red})\}^{1/3}$$

## شاخص حرارت یا TI

باتوجه به اینکه تاج پوشش گیاهی در خنک شدن نسبی محیط، جذب انرژی خورشید و تبخیر از سطح برگ مؤثر است، می تواند در تفکیک مناطق با خاک لخت و سایه مؤثر باشد. برای تهیه شاخص حرارتی از داده های ماهواره ای لندست ۸ از روش تابش طیفی استفاده شد. تابش (رادیانس) طیفی با استفاده از رابطه ۴ (۱۸) محاسبه شد:

$$L = L_{min} + (L_{max} - L_{min}) \times \frac{DN}{255} \quad (4)$$

سپس با استفاده از رابطه ۵ تبدیل به درجه حرارت صورت گرفت:

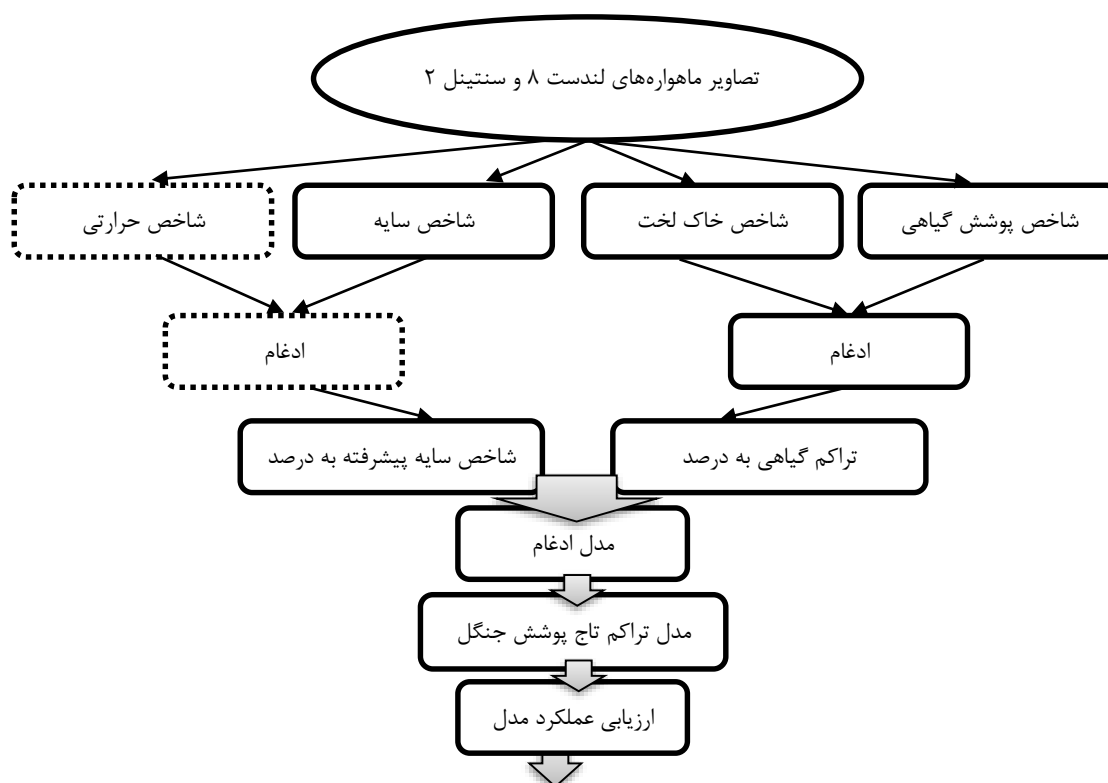
$$T_B = \frac{k_2}{\ln\left(\frac{k_1}{L} + 1\right)} \quad (5)$$

## تراکم تاج پوشش جنگل (FCD)

یک نقشه رستری است که مقدار عددی هر سلول نشان دهنده درصد تراکم تاج پوشش در آن محدوده است.

VD و SSI با استفاده از رابطه زیر برای برآورد مدل FCD در مقیاس درصد تراکم تاج پوشش ادغام شدند رابطه ۶ (۱۸). FCD

$$FCD = \sqrt{(VD \times SSI) + 1} - 1 \quad (۶)$$



شکل ۲- فلوچارت مراحل انجام پژوهش

Figure 2. Flowchart of research steps

## ارزیابی عملکرد مدل

برای مقایسه کمی برآوردهای مقادیر مختلف تاج پوشش در مناطق مختلف، مستخرج از هر دو ماهواره با مقدار واقعی تاج پوشش زمینی، معیارهای آماری خطای مختلف از فرمول‌های زیر محاسبه شد.

تنها تفاوت در تهیه نقشه تراکم تاج پوشش بین دو ماهواره لندست ۸ و سنتینل ۲ در باند حرارتی بود که ماهواره سنتینل ۲ سنجنده حرارتی نداشت و تهیه شاخص سایه پیشرفته به درصد، به تنهایی از شاخص سایه بدست آمد.

جدول ۱- معیارهای ارزیابی درصد تاج پوشش به دست آمده از مدل FCD

Table 1. Assessment criterias for FCD derived canopy cover

| شماره | نام فارسی                      | نام انگلیسی                     | اختصار | فرمول                                                         |
|-------|--------------------------------|---------------------------------|--------|---------------------------------------------------------------|
| ۱     | ضریب تبیین                     | Coefficient of Determination    | $R^2$  | $R^2 = \frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$ |
| ۲     | جذر میانگین مربعات خطا         | Square Error-Root-Mean          | RMSE   | $RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}$    |
| ۳     | جذر میانگین مربعات خطا به درصد | Root Mean Squared Percent Error | RMSPE  | $RMSE\% = \frac{(RMS)}{\bar{y}} \times 100$                   |
| ۴     | اریبی                          | Bias                            | Bias   | $Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)}{n}$             |
| ۵     | اریبی به درصد                  | Percent Bias                    | PBias  | $Bias\% = \frac{(Bias)}{\bar{y}} \times 100$                  |
| ۶     | میانگین خطای مطلق              | Mean Absolute Error             | MAE    | $MAE = \frac{\sum_{i=1}^n  \hat{y}_i - y_i }{n}$              |
| ۷     | میانگین خطای مطلق به درصد      | Mean Absolute Percentage Error  | MAPE   | $MAE\% = \frac{(MAE)}{\bar{y}} \times 100$                    |

یافته ها

رابطه تاج پوشش با شاخص های به دست آمده از تصاویر

## ماهواره ای

به منظور بررسی رابطه تاج پوشش اندازه گیری شده و شاخص های تشکیل دهنده مدل FCD با استفاده از تصاویر دو ماهواره لندست ۸ و سنتینل ۲، همبستگی پیرسون محاسبه گردید. با توجه به نتایج جدول ۲، ماتریس همبستگی پیرسون برای ماهواره لندست ۸، شاخص AVI در سه ناحیه رویشی زاگرس شمالی، زاگرس میانی و زاگرس جنوبی در هر سه طبقه تاج پوشش انبوه، نیمه انبوه و پراکنده، رابطه مستقیم و مثبتی با مقدار واقعی تاج پوشش داشت که بیشترین مقدار همبستگی مربوط طبقه نیمه انبوه در زاگرس شمالی با مقدار ۰/۶۴ و کمترین مقدار آن مربوط به طبقه انبوه در زاگرس میانی با ۰/۲۶ بود. نتایج نشان داد که شاخص SI همانند شاخص AVI، در هر سه ناحیه رویشی و هر سه طبقه تاج پوشش رابطه مستقیم و مثبت با مقدار واقعی تاج پوشش داشت که بیشترین مقدار همبستگی مربوط به طبقه انبوه در زاگرس شمالی با مقدار ۰/۷۸ و کمترین مقدار آن

مربوط به طبقه پراکنده در زاگرس میانی با مقدار ۰/۳۳ بود (جدول ۲).

نتایج شاخص BI رابطه غیرمستقیم را در تمام نواحی رویشی و طبقات تاج پوشش با مقدار اندازه گیری شده نشان داد به این صورت که بیشترین مقدار آن مربوط به طبقه انبوه در زاگرس شمالی با مقدار ۰/۷۸- و کمترین مقدار آن مربوط به طبقه انبوه در زاگرس میانی با مقدار ۰/۴۵- بدست آمد (جدول ۲). همچنین نتایج برای شاخص TI نشان داد در اکثر موارد رابطه منفی با مقدار واقعی تاج پوشش داشت بجز طبقه انبوه در زاگرس شمالی، طبقه نیمه انبوه در زاگرس جنوبی و طبقه پراکنده در زاگرس جنوبی، همچنین بیشترین مقدار همبستگی منفی شاخص حرارتی با طبقه پراکنده در زاگرس شمالی با مقدار ۰/۳۳- و بیشترین مقدار همبستگی مثبت، در طبقه نیمه انبوه زاگرس جنوبی با ۰/۱۷ بود (جدول ۲).

باتوجه به نتایج جدول ۲، ماتریس همبستگی پیرسون برای ماهواره سنتینل ۲، شاخص AVI در سه ناحیه رویشی زاگرس شمالی، زاگرس میانی و زاگرس جنوبی در هر سه طبقه

مقدار آن مربوط به طبقه پراکنده در زاگرس جنوبی با مقدار ۰/۴۵ بود (جدول ۲). همچنین با توجه به نتایج شاخص BI همبستگی منفی و رابطه غیرمستقیم را در تمام نواحی رویشی و طبقات تاج‌پوشش با مقدار واقعی اندازه‌گیری شده آن داشت به این صورت که بیشترین مقدار آن مربوط به طبقه انبوه در زاگرس شمالی با مقدار ۰/۸۰- و کمترین مقدار آن مربوط به طبقه پراکنده در زاگرس جنوبی با مقدار ۰/۳۳- بود (جدول ۲).

تاج پوشش انبوه، نیمه انبوه و پراکنده، رابطه مستقیم و مثبتی را با مقدار واقعی تاج پوشش داشت که بیشترین مقدار همبستگی مربوط طبقه نیمه انبوه در زاگرس جنوبی با مقدار  $0/80$  و کمترین مقدار آن مربوط به طبقه انبوه در زاگرس میانی با  $0/46$  بود. نتایج نشان داد شاخص SI همانند شاخص AVI، در هر سه ناحیه رویشی و هر سه طبقه تاج پوشش رابطه مستقیم و مثبت را با مقدار واقعی تاج پوشش داشت که بیشترین مقدار همبستگی مربوط به طبقه انبوه در زاگرس شمالی با مقدار  $0/83$  و کمترین

جدول ۲- ماتریس همبستگی پیرسون متغیرهای تشکیل دهنده مدل فیزیکی تاج پوشش مستخرج از تصاویر ماهواره

لندست ۸ و سنتینل ۲ یا درصد تاج پوشش

Table 2. Pearson's correlation matrix of the variables that make up the physical canopy model extracted from satellite images with the CC Landsat 8 and Sentinel 2

| ماهواره لندست ۸  | زاگرس شمالی | انبوه |       |       |       | نیمه انبوه |       |       |       | پراکنده |       |       |       |       |
|------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|------------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|
|                  |             |       | AVI   | SI    | BI    | TI         | AVI   | SI    | BI    | TI      | AVI   | SI    | BI    | TI    |
|                  |             | SI    | ۰/۲۹  |       |       |            | ۰/۲۵  |       |       |         | ۰/۳۰  |       |       |       |
|                  |             | BI    | ۰/۴۲  | -۰/۸۸ |       |            | -۰/۴۲ | -۰/۸۳ |       |         | -۰/۴۴ | -۰/۹۳ |       |       |
|                  |             | TI    | -۰/۰۹ | -۰/۲۷ | ۰/۲۲  |            | -۰/۱۳ | -۰/۰۲ | -۰/۰۱ |         | ۰/۰۵  | ۰/۱۳  | -۰/۱۲ |       |
|                  |             | CC    | ۰/۶۱  | ۰/۶۹  | -۰/۶۹ | -۰/۳۳      | ۰/۶۴  | ۰/۶۱  | -۰/۶۳ | -۰/۰۸   | ۰/۵۵  | ۰/۷۸  | -۰/۷۸ | ۰/۰۹  |
|                  | زاگرس میانی | SI    | -۰/۰۳ |       |       |            | ۰/۰۲  |       |       |         | ۰/۰۸  |       |       |       |
|                  |             | BI    | -۰/۵۳ | -۰/۶۳ |       |            | -۰/۵۳ | -۰/۷۲ |       |         | -۰/۵۵ | -۰/۷۴ |       |       |
|                  |             | TI    | -۰/۱۲ | ۰/۱۷  | ۰/۱۳  |            | -۰/۱۶ | ۰/۰۵  | ۰/۱۱  |         | -۰/۳۰ | -۰/۰۴ | ۰/۲۹  |       |
|                  |             | CC    | ۰/۳۹  | ۰/۳۳  | -۰/۵۴ | -۰/۱۷      | ۰/۴۱  | ۰/۴۰  | -۰/۵۱ | -۰/۰۵   | ۰/۲۶  | ۰/۵۰  | -۰/۴۵ | -۰/۱۱ |
| زاگرس جنوبی      | SI          | -۰/۰۹ |       |       |       | ۰/۰۶       |       |       |       | ۰/۰۲    |       |       |       |       |
|                  | BI          | -۰/۳۶ | -۰/۶۹ |       |       | -۰/۵۴      | -۰/۷۱ |       |       | -۰/۳۴   | -۰/۸۶ |       |       |       |
|                  | TI          | ۰/۰۶  | ۰/۲۰  | -۰/۱۷ |       | ۰/۱۵       | ۰/۲۱  | -۰/۲۳ |       | -۰/۰۳   | -۰/۱۶ | ۰/۱۳  |       |       |
|                  | CC          | ۰/۵۲  | ۰/۳۸  | -۰/۶۳ | ۰/۰۷  | ۰/۵۹       | ۰/۵۰  | -۰/۷۰ | ۰/۱۷  | ۰/۳۸    | ۰/۵۸  | -۰/۶۰ | -۰/۱۲ |       |
| ماهواره سنتینل ۲ | زاگرس شمالی | SI    | ۰/۶۳  |       |       |            | ۰/۵۳  |       |       |         | ۰/۷۰  |       |       |       |
|                  |             | BI    | -۰/۷۳ | -۰/۷۸ |       |            | -۰/۷۹ | -۰/۶۷ |       |         | -۰/۸۷ | -۰/۸۵ |       |       |
|                  |             | CC    | ۰/۷۶  | ۰/۷۹  | -۰/۷۰ |            | ۰/۷۵  | ۰/۷۲  | -۰/۷۱ |         | ۰/۷۷  | ۰/۸۳  | -۰/۸۰ |       |
|                  | زاگرس میانی | SI    | ۰/۴۸  |       |       |            | ۰/۴۷  |       |       |         | ۰/۴۵  |       |       |       |
|                  |             | BI    | -۰/۵۰ | -۰/۲۱ |       |            | -۰/۳۵ | -۰/۳۹ |       |         | -۰/۳۰ | -۰/۴۷ |       |       |
|                  |             | CC    | ۰/۵۶  | ۰/۴۶  | -۰/۵۵ |            | ۰/۵۲  | ۰/۴۸  | -۰/۷۲ |         | ۰/۴۶  | ۰/۶۳  | -۰/۶۵ |       |
|                  | زاگرس جنوبی | SI    | ۰/۳۱  |       |       |            | ۰/۵۱  |       |       |         | ۰/۶۱  |       |       |       |
|                  |             | BI    | -۰/۳۳ | -۰/۳۸ |       |            | -۰/۴۴ | -۰/۵۱ |       |         | -۰/۵۴ | -۰/۴۷ |       |       |
|                  |             | CC    | ۰/۷۱  | ۰/۴۵  | -۰/۳۳ |            | ۰/۸۰  | ۰/۵۸  | -۰/۴۴ |         | ۰/۶۹  | ۰/۶۰  | -۰/۶۳ |       |

مربوط به ماهواره لندست ۸ در ناحیه زاگرس میانی با ۲۶/۳۱ درصد گزارش شد (جدول ۳).

نتایج نشان داد که کمترین میزان RMSE در کل مناطق مورد مطالعه با ۱۷/۴۱ درصد مربوط به تراکم تاج پوشش انبوه مستخرج از ماهواره سنتینل ۲ در زاگرس میانی بود. همچنین کمترین مقدار RMSE% (۳۱/۵۷ درصد) به برآورد تاج پوشش انبوه مستخرج از ماهواره سنتینل ۲ در زاگرس شمالی تعلق گرفت (جدول ۳). نتایج به دست آمده برای Bias نشان داد که کمترین میزان آن (۱/۵۷ درصد) در کل مناطق مورد مطالعه، به تاج پوشش انبوه در زاگرس شمالی و مستخرج از ماهواره سنتینل ۲ بود و با توجه به این مقدار بدست آمده، طبیعی است کمترین میزان Bias% نیز به این ناحیه ریشی اختصاص یافت. با توجه به نتایج، کمترین میزان MAE در تمامی نواحی مورد مطالعه این تحقیق به تراکم تاج پوشش انبوه در زاگرس میانی با ۱۲/۶۰ درصد مستخرج از ماهواره سنتینل ۲ حاصل گردید همانطور که انتظار می رفت کمترین مقدار MAE% با مقدار ۲۴/۲۸ درصد به همین طبقه و ناحیه ریشی که کمترین مقدار MAE را داشت تعلق گرفت.

AVI شاخص پوشش گیاهی پیشرفته، SI شاخص سایه، BI شاخص خاک لخت و CC درصد تاج پوشش واقعی

### بررسی معیارهای آماری خطا در برآورد تراکم تاج پوشش

#### جنگل های زاگرس

بیشترین مقدار ضریب تبیین برای تاج پوشش انبوه در سه ناحیه مورد مطالعه (زاگرس شمالی، میانی و جنوبی) برای ماهواره سنتینل ۲ در زاگرس شمالی با ۶۴/۸۶ درصد و کمترین مقدار ضریب تبیین با ۲۰/۴۵ درصد برای ماهواره لندست ۸ در زاگرس میانی گزارش شد. همچنین نتایج نشان داد که بیشترین ضریب تبیین (۶۴/۴۹ درصد) برای تاج پوشش نیمه انبوه در سه ناحیه مورد مطالعه (زاگرس شمالی، میانی و جنوبی)، برای ماهواره سنتینل ۲ در زاگرس جنوبی بود و کمترین مقدار ضریب تبیین در تاج پوشش نیمه انبوه به ماهواره لندست ۸ در زاگرس میانی با ۲۲/۵۲ درصد اختصاص یافت. اما نتایج برای تاج پوشش پراکنده در سه ناحیه مورد مطالعه (زاگرس شمالی، میانی و جنوبی)، بیشترین ضریب تبیین را برای ماهواره سنتینل ۲ در زاگرس شمالی با ۶۱/۹۹ درصد بیان کرد که در مقابل کمترین مقدار آن

جدول ۳- معیارهای آماری خطا برای برآورد تاج پوشش جنگل با استفاده از مدل FCD

Table 3. Statistical criteria error for the estimation of forest canopy cover using the FCD model

|         | زاگرس جنوبی    |          |         | زاگرس میانی |         | زاگرس شمالی |         |
|---------|----------------|----------|---------|-------------|---------|-------------|---------|
|         |                | سنتینل ۲ | لندست ۸ | سنتینل ۲    | لندست ۸ | سنتینل ۲    | لندست ۸ |
| انبوه   | R <sup>2</sup> | ۰/۵      | ۰/۲۵    | ۰/۲۷        | ۰/۲۰    | ۰/۶۴        | ۰/۴۵    |
|         | RMSE           | ۱۸/۸۴    | ۲۲/۳۷   | ۱۷/۴۱       | ۱۹/۸۱   | ۱۸/۴۰       | ۲۰/۸۶   |
|         | RMSE%          | ۴۰/۷۶    | ۴۸/۴۰   | ۳۳/۵۵       | ۳۸/۱۶   | ۳۱/۵۷       | ۳۵/۷۹   |
|         | Bias           | ۹/۱۹     | ۱۳/۸۲   | ۴/۳۲        | ۹/۵۰    | ۱/۵۷        | ۷/۰۷    |
|         | Bias%          | ۱۹/۸۸    | ۲۹/۹۱   | ۸/۱۵        | ۱۸/۳۱   | ۲/۷۰        | ۱۲/۱۴   |
|         | MAE            | ۱۳/۷۶    | ۱۶/۰۶   | ۱۲/۶۰       | ۱۳/۱۹   | ۱۴/۷۸       | ۱۵/۹۰   |
|         | MAE%           | ۲۹/۷۷    | ۳۴/۷۵   | ۲۴/۲۸       | ۲۵/۴۲   | ۲۵/۳۶       | ۲۷/۲۹   |
|         |                |          |         |             |         |             |         |
| پراکنده | R <sup>2</sup> | ۰/۶۴     | ۰/۴۰    | ۰/۳۰        | ۰/۲۲    | ۰/۶۰        | ۰/۴۸    |
|         | RMSE           | ۲۵/۹۱    | ۲۹/۳۹   | ۲۶/۲۰       | ۳۰/۷۱   | ۲۵/۱۱       | ۲۹/۲۸   |
|         | RMSE%          | ۷۲/۱۲    | ۸۱/۸۰   | ۷۵/۴۷       | ۸۸/۴۷   | ۶۳/۶۹       | ۷۴/۲۷   |

|          |                |       |       |        |        |       |       |
|----------|----------------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|
|          | Bias           | ۱۷/۵۹ | ۲۱/۲۹ | ۱۸/۰۲  | ۲۳/۸۶  | ۱۵/۷۳ | ۲۱/۰۰ |
|          | Bias%          | ۴۸/۹۶ | ۵۹/۲۴ | ۵۱/۹۰  | ۶۸/۷۵  | ۳۹/۸۰ | ۲۳/۲۷ |
|          | MAE            | ۱۹/۹۳ | ۲۲/۷۹ | ۲۱/۱۵  | ۲۴/۷۰  | ۲۰/۲۰ | ۲۳/۴۲ |
|          | MAE%           | ۵۵/۴۷ | ۶۳/۴۲ | ۶۰/۹۴  | ۷۱/۱۴  | ۵۱/۲۴ | ۵۹/۴۰ |
| پراکندگی | R <sup>2</sup> | ۰/۵۴  | ۰/۳۴  | ۰/۳۲   | ۰/۲۱   | ۰/۶۱  | ۰/۴۵  |
|          | RMSE           | ۲۶/۶۲ | ۲۹/۵۴ | ۲۹/۸۵  | ۳۸/۹۸  | ۲۲/۶۲ | ۲۶/۲۶ |
|          | RMSE%          | ۷۷/۳۷ | ۸۵/۸۷ | ۱۰۳/۵۳ | ۱۲۱/۳۴ | ۵۰/۵۲ | ۵۸/۶۵ |
|          | Bias           | ۱۸/۵۸ | ۲۲/۰۵ | ۲۳/۷۷  | ۲۹/۶۴  | ۱۱/۳۳ | ۱۶/۰۱ |
|          | Bias%          | ۵۴/۰۲ | ۶۴/۱۰ | ۸۲/۴۵  | ۱۰۲/۸۱ | ۲۵/۳۲ | ۷۷/۳۵ |
|          | MAE            | ۲۱/۳۶ | ۲۳/۹۹ | ۲۵/۲۵  | ۳۰/۰۳  | ۱۸/۴۰ | ۲۱/۰۸ |
|          | MAE%           | ۶۲/۰۹ | ۶۹/۷۲ | ۸۷/۶۰  | ۱۰۴/۱۶ | ۴۱/۱۰ | ۴۷/۰۹ |

### بحث و نتیجه‌گیری

تاج‌پوشش جنگل یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های جنگل است که به عنوان معیار مهمی برای پایش و ارزیابی روند تغییرات جنگل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. اهمیت این متغیر تا آنجاست که به عنوان معیار تعریف جنگل در تعاریف فائو به کار رفته است (۲۰). برآورد و تهیه نقشه این ویژگی همواره یکی از دغدغه‌های مهم پژوهشگران حوزه سنجش از دور گیاهی بوده است. تاکنون روش‌ها و فنون متعددی توسط پژوهشگران مختلف برای برآورد این متغیر گسترش داده شده است. از بین این روش‌ها، مدل FCD به دلیل سهولت در محاسبات و نیز عدم نیاز به داده‌های آموزشی بسیار در کشورهای در حال توسعه که با محدودیت‌های مختلفی از نظر داده و امکانات مواجه هستند مورد توجه قرار گرفته است (۲۱). در بخش‌های مختلف دنیا و در جنگل‌های مختلف با تیپ و تراکم‌های متنوع تا کنون این روش مورد ارزیابی واقع شده است که نتایج ارزیابی در برخی جنگل‌ها (عموما جنگل‌های خیلی متراکم) مورد تایید واقع گردیده است.

Aguswan و همکاران (۲۲) با بررسی انبوهی سطح تاج‌پوشش مناطق جنگل کاری شده بعد از آتش‌سوزی در اندونزی، مناطقی را که نیازمند درختکاری یا بذرکاری مجدد بود را با صحت کلی ۸۹/۷۰ درصد شناسایی کردند. این محققان بیان کردند استفاده از مدل FCD نتایج قابل قبولی در رابطه با بررسی انبوهی تاج‌پوشش جنگل برای مدیریت مناسب آن ارائه می‌دهد.

پاک‌خصال و بنیاد (۲۳) با طبقه‌بندی سطح تاج‌پوشش در جنگل‌های شفارود خزری با چهار طبقه انبوهی تاج‌پوشش و یک طبقه بایر، بالاترین میزان صحت کلی را ۷۱ درصد و ضریب کاپا ۰/۶۱ را به‌دست آوردند. Mondal و همکاران (۲۴) با بررسی طبقات تاج‌پوشش جنگل با استفاده از مدل FCD در جنگل‌های مانگرو در هندوستان در چهار طبقه، مقدار صحت کل و ضریب کاپا را ۸۶/۱۳ درصد و ۰/۸۰ به‌دست آوردند. مقایسه نتایج این تحقیقات با تحقیق جاری نشان می‌دهد دقت FCD در این مناطق بیشتر از جنگل‌های زاگرس بوده است که عمدتاً می‌تواند به دلیل تراکم تاج‌پوشش درختان باشد.

در مناطق کم‌تراکم مانند جنگل‌های زاگرس، در چند پژوهش مستقل، کارایی این مدل ارزیابی و نتایج ارزیابی منتشر شده است. شاهولی کوه‌شور و همکاران (۱۷) با تهیه نقشه تراکم تاج‌پوشش جنگل در جنگل‌های نیمه انبوه تا تنک مریوان با استفاده از مدل FCD و مقایسه نتایج با واقعیت زمینی حاصل از عکس‌های هوایی، میزان صحت کلی و ضریب کاپا در شش کلاسه‌بندی را به‌ترتیب ۵۲ درصد و ۰/۲۹ به‌دست آوردند. بیگی‌حیدرلو و همکاران (۷) تهیه نقشه تراکم تاج‌پوشش جنگل‌های زاگرس با استفاده از تصاویر لندست ۹ و عکس‌برداری نیم‌کره‌ای مقدار صحت کلی و ضریب کاپای طبقه‌بندی درصد

قدرت تفکیک مکانی پایین و با توجه به ابعاد معمول تاج پوشش درختان باشد به این صورت که ابعاد تاج پوشش یک درخت در بسیاری از موارد کمتر از حدی است که بتواند یک پیکسل با ابعاد ۳۰ متر را تحت تأثیر قرار دهد، گرچه به مقدار کم تر، اما این امر برای باندهای با ابعاد ۱۰ متر نیز صادق است. یکی از مهمترین مشکلات در برآورد انبوهی تاج پوشش تداخل طیفی خاک زمینه و پوشش جنگلی است. این مشکل به ویژه در طبقه های تنک و نیمه انبوه که بازتاب خاک زمینه زیاد است نمود بیشتری دارد (۲۳).

دلفان و همکاران (۲۵) در نتایج خود بیان داشتند که تصاویر ماهواره سنتینل ۲ عملکرد نسبی بهتری نسبت به تصاویر ماهواره لندست ۸، در تهیه نقشه کاربری اراضی و پوشش زمین در منطقه مطالعه شان داشت. در پژوهش حاضر نیز بطور کلی ضرایب تبیین و همچنین معیارهای آماری خطا، در نتایج مستخرج از ماهواره سنتینل ۲ نسبت به ماهواره لندست ۸ عملکرد بهتری داشت. یافته های این پژوهش نشان داد بیشترین میزان ضریب تبیین در کل زاگرس مختص به منطقه با تراکم تاج پوشش انبوه و مستخرج از ماهواره سنتینل ۲ بود همچنین معیارهای آماری خطا در زاگرس شمالی مقدار کمتری را نسبت به زاگرس میانی و جنوبی نشان دادند که نشان دهنده کارایی مدل برای مناطق انبوه است.

## References

1. Aghabarati, A.; Marvie Mohajer, MR.; Etemad, V.; Sefidi, K. (2018) Structural characteristics of coppice forest stands in Fandoghloo Forest, Ardebil Province. Forest Research and Development, 4(2), 223-239. (In Persian)
2. Nazariani, N., Fallah, A.; Hamidi, S. K.; Varamesh, S. (2022). Estimation of quantitative characteristics of Zagros forests using data mining nonparametric algorithms (case study: Olad Ghobad Watershed, Koohdasht, Lorestan). Forest Research and

تاج پوشش در جنگل های زاگرس با چهار طبقه سطح تاج پوشش و یک طبقه غیر جنگل به ترتیب ۷۶ درصد و ۰/۶۹ به دست آوردند. پژوهش اخیر نیز برای ارزیابی توان این مدل برای تهیه نقشه تراکم تاج پوشش در جنگل های زاگرس ارزیابی شد. در این پژوهش برای تهیه نقشه تراکم تاج پوشش جنگل های زاگرس، همبستگی چهار شاخص اصلی مدل FCD بررسی شد و از آنجایی که دو شاخص AVI با BI همبستگی منفی زیادی باهم داشتند باهم ترکیب شدند و همچنین پس از ترکیب شاخص SI با TI (در تهیه مدل FCD مستخرج از ماهواره سنتینل ۲ فقط از شاخص سایه به تنهایی استفاده شد) مدل نهایی تهیه گردید. میرزایی زاده و همکاران (۱۶) در نتایج خود عنوان داشتند که همبستگی منفی بالایی بین دو شاخص AVI و BI دیده شد، بنابراین با توجه به روند پیشنهادی مدل، شاخص تراکم گیاهی (VD) از ادغام دو شاخص AVI و BI به روش تحلیل مؤلفه های اصلی به دست آمد. در تحقیق حاضر دو شاخص AVI و BI در تمام نواحی مورد مطالعه و هر دو ماهواره لندست ۸ و سنتینل ۲، دارای همبستگی منفی بالایی بودند که با پژوهش ذکر شده در یک راستا قرار دارند.

باتوجه به یافته های این پژوهش و بیان این مسئله که مدل FCD در مناطقی که تراکم تاج پوشش بیشتری دارد، نتایج بهتری را ارائه می کند، معیارهای آماری خطا بر حسب تراکم تاج پوشش مورد بررسی قرار گرفت که نشان داد مقدار بهترین تمامی معیارهای آماری خطا (جذر میانگین مربعات خطا، جذر میانگین مربعات خطا به درصد، اریبی، اریبی به درصد، میانگین خطای مطلق، میانگین خطای مطلق به درصد) بجز مقدار ضریب تبیین، برای هر دو ماهواره لندست ۸ و سنتینل ۲، در مناطق با تراکم تاج پوشش انبوه به دست آمد. شاین ذکر است که این مدل در کلیه نواحی و کلیه تراکم ها اریب و بیش برآورد بود و میزان اریبی برآورد تراکم تاج پوشش با کاهش تراکم جنگل افزایش می یافت. همچنین در مقایسه دو ماهواره از نظر این معیار، اریبی نتایج لندست ۸ بیش از اریبی نتایج سنتینل ۲ بود.

به نظر می رسد دلیل اصلی ضعف مدل FCD در ارائه طبقات جنگلی پراکنده و نیمه انبوه در استفاده از تصاویر ماهواره ای با

9. Azizi, Z.; Khalili, Z.; Soltani, A. (2018) The effect of physiographic factors on sudden oak trees death, case study area: barz and Shvrs Watershed, Geospatial Eng. J.; 9 (3): 19-25. (In Persian)
10. Phan, T.N.; Kuch, V.; Lehnert, L.W. (2020) Land Cover Classification using Google Earth Engine and Random Forest Classifier the Role of Image Composition. Remote Sensing 12 (15), 2411.
11. Taefi Feijani, M.; Azadnejad, S.; Moradi, M. (2021). Improvement of the forest canopy density model based on the addition of the FCC index and the average kernel implementation. Journal of Space Science and Technology, 14(2), 27-36. (In Persian)
12. Witharana, C.; Lynch, H.J. (2016) An object-based image analysis approach for detecting penguin guano in very high spatial resolution satellite images. Remote Sensing 8 (5), 375.
13. Taefi Feijani, M.; Alomphamadi, A. (2016) The authors of the article evaluate the FCD model in order to estimate density classes of crown - forest cover, Geomatics Conference, Tehtan, Iran. (In Persian)
14. Mohamed, M.A. (2021) An Assessment of Forest Cover Change and Its Driving Forces in the Syrian Coastal Region during a Period of Conflict, 2010 to 2020. Land, 10 (2), 191.
15. Taefi Feijani, M.; Azadnejad, S. (2020) Introducing a new local FCD model based on local adaptive thresholding with the aim of estimating forest canopy density over large areas. Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR), 29(114), 37-49. (In Persian)
- Development, 8(3), 249-263. (In Persian)
3. Ghanbari Motlagh, M.; Kiadaliri, M.; Halimi, M. (2023) Investigating spatiotemporal changes in greenness of Zagros Oak forests in response to drought, Journal of Renewable Natural Resources Research, 13(2), 131-143. (In Persian)
4. Azizi, A.; Montazeri, Z. (2018) Effects of microtopography on the spatial pattern of woody species in West Iran, Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11-24.
5. Sohrabi, H.; Taheri Sarteshnizi, M.J. (2013) Fitting probability distribution functions for modeling diameter distribution of oak species in pollarded northern Zagros forests (Case study: Armardeh-Baneh). Iranian Journal of Forest, 4(4), 333-343. (In Persian)
6. Erfani Fard, S. Y.; Zobeiri, M.; Fegghi, J.; & Namiranian, M. (2007). Estimation of crown cover on aerial photographs using shadow index (case study: Zagros Forests, Iran). Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 15(3), 288-278. (In Persian)
7. Beygiheidarlou, H.; Karamat Mirshekarlou, A.; Sasanifar, S.; & Khezryan, B. (2023). Forest cover density mapping of Zagros forests using Landsat-9 imagery and hemispherical photographs. Forest Research and Development, 9(1), 47-65. (In Persian)
8. Anand, A.; Singh, S.K.; Kanga, S. (2018) Estimating the change in forest cover density and predicting NDVI for west Singhbhum using linear regression. International Journal for Environmental Rehabilitation and Conservation 9, 193-203.

- High Resolution LISS-4 Data in Yamunanagar District, Haryana. International Archives of the Photogrammetry, Remote sensing and spatial Information Sciences, 42, 5.
22. Aguswan, Y.; Gumiri, S.; Sukarna, R. M.; Permana, I. (2022) Mapping Degraded Area for Tropical Peatland Revegetation Using Forest Canopy Density Model Landsat 8 OLI-TIRS in Central Kalimantan, Indonesia. Environment and Natural Resources Journal, 20 (4), 426-437.
  23. Pakkhesal, E.; Bonyad, A. E. (2013). Classification and delineating natural forest canopy density using FCD model (Case study: Shafarud area of Guilan). Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 21(1), 99-114. (In Persian)
  24. Mondal, I.; Thakur, S.; Juliev, M.; Kumar De, T. (2021) Comparative analysis of forest canopy mapping methods for the Sundarban biosphere reserve, West Bengal, India. Environment, Development and Sustainability, 2021, 1-26.
  25. Delfan, E., Naghavi, H., Maleknia, R., & Nouredini, A. (2022). Comparing the Capability of Sentinel 2 and Landsat 8 Satellite Imagery in Land Use and Land Cover Mapping Using Pixel-based and Object-based Classification Methods. Desert Ecosystem Engineering, 8(25), 1-12. (In Persian)
  16. Mirzaeizadeh, V.; niknezhad, M; hojati, S.M. (2015). Estimation of forest canopy density using FCD. Ecology of Iranian Forest. 3(5), 63-75. (In Persian)
  17. Shahvali Kouhshour, A.; Pir Bavaghar, M.; Fatehi, P. (2012). Forest cover density mapping in sparse and semi dense forests using forest canopy density model (Case Study: Marivan forests). Journal of RS and GIS for Natural Resources, 3(3), 73-83. (In Persian)
  18. Rikimaru, A.; Roy, P.S.; Miyatake, S. (2002) Tropical Forest cover density mapping. International Society for Tropical Ecology 43(1): 39- 47.
  19. Danoedoro, P.; and Gupita, D.D. (2022). Combining Pan-Sharpening and Forest Cover Density Transformation Methods for Vegetation Mapping using Landsat-8 Satellite Imagery. International Journal on Advanced Science, Engineering, and Information Technology, 12, (3): 881-891
  20. Vafaei, S.; Maleknia, R.; Naghavi, H.; Fathizadeh, O. (2022) Estimation of Forest Canopy Using Remote Sensing and Geostatistics (Case Study: Marivan Baghan Forests), Journal of Environment and Sciences Technology, 24(1): 71-82. (In Persian)
  21. Sharma, R.; Singh, T. (2018) Forest Canopy Density Assessment Using