



University of Tehran

## Estimation of species diversity in the Hyrcanian forests using Sentinel-2 Data (Case study: Kheyroud forest, Mazandaran)

Seyede Azar Ghaisaryan<sup>1</sup> | Parviz Fatehi<sup>2\*</sup> | Vahid Etemad<sup>3</sup>

1. Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: [azar.ghaisaryan2021@gmail.com](mailto:azar.ghaisaryan2021@gmail.com)

2. Corresponding author, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: [parviz.fatehi@ut.ac.ir](mailto:parviz.fatehi@ut.ac.ir)

3. Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: [vetemad@ut.ac.ir](mailto:vetemad@ut.ac.ir)

### ARTICLE INFO

#### Article type:

Research Article

#### Article History:

Received: 23 July 2023

Revised: 03 September 2023

Accepted: 17 October 2023

Published online: 20 December 2023

#### Keywords:

*Beta species diversity,*  
*Hyrcanian forests,*  
*Multiple linear regression,*  
*Random forest,*  
*Sentinel-2.*

### ABSTRACT

As a sustainable forest indicator, biodiversity plays a crucial role in understanding the effects of climate change on forest ecosystems. Measuring the diversity of trees and shrubs in forests is essential for monitoring and evaluating changes in biodiversity. Remote sensing (RS) is an effective tool for collecting such data. To estimate tree and shrub species diversity, we used Sentinel-2 data from August 10 and October 13, 2021. We measured 75 field plots with dimensions of 20 m × 20 m in the Patom, Namkhaneh, and Gorazban districts. In each field plot, the tree species and diameter at breast height of all trees with a diameter greater than 7.5 cm were recorded. We used the Jaccard and Sorensen indices in R software to calculate the beta diversity indices for each sample plot. Preprocessing steps were applied to the Sentinel2 data, and we then performed several spectral transformation approaches, that is, vegetation indices (VIs), principal component analysis (PCA), and Tasseled Cap, and generated texture variables. A vector map was used to extract the spectral and textural values corresponding to each field plot. Correlation analysis between the measured species diversity and spectral and textural variables was conducted at a 95% probability level. Multiple Linear Regression (MLR) analysis was performed using stepwise and Random Forest (RF) methods for modeling. Our regression analysis revealed that texture variables with a window size of 5×5 and spatial resolution of 10 m in Sentinel-2 summer images had the best performance in estimating the Sorensen diversity index ( $R^2=0.383$  and  $RMSE\%=36.57$ ). However, based on our results, we can conclude that the Sentinel-2 data has a moderate performance in estimating diversity in the Patom, Namkhaneh, and Gorazban districts.

**Cite this article:** Ghaisaryan, S. A., Fatehi, P., Etemad, V. (2023). Estimation of species diversity in the Hyrcanian forests using Sentinel-2 Data (Case study: Kheyroud forest, Mazandaran). *Journal of Forest and Wood Products*, 76 (3), 229-243. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwpp.2023.362198.1261>



© The Author(s) **Publisher:** The University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwpp.2023.362198.1261>



دانشگاه تهران

## نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب

شاپا الکترونیکی: ۰۵۳۰-۲۳۸۳

سایت نشریه: <https://jfwf.ut.ac.ir>

### برآورد شاخص‌های تنوع گونه‌ای در جنگل‌های هیرکانی با استفاده از

### داده‌های ماهواره سنتینل-۲ (مطالعه موردی: جنگل خیرود، استان مازندران)

سیده آذر قیصریان<sup>۱</sup> | پرویز فاتحی<sup>۲\*</sup> | وحید اعتماد<sup>۳</sup>

۱. گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: [azar.ghaisaryan2021@gmail.com](mailto:azar.ghaisaryan2021@gmail.com)
۲. نویسنده مسئول، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: [parviz.fatehi@ut.ac.ir](mailto:parviz.fatehi@ut.ac.ir)
۳. گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: [vetemad@ut.ac.ir](mailto:vetemad@ut.ac.ir)

#### اطلاعات مقاله

#### چکیده

#### نوع مقاله:

پژوهشی

#### تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۹/۲۹

#### کلیدواژه:

تنوع گونه‌ای بتا،  
جنگل تصادفی،  
جنگل‌های هیرکانی،  
رگرسیون خطی چندمتغیره،  
سنتینل-۲.

تنوع زیستی به‌عنوان یکی از نمایه‌های مهم پایداری جنگل، نقش مهمی در بررسی اثرات تغییرات اقلیمی بر بوم‌سازگان‌های جنگلی ایفا می‌کند. اندازه‌گیری تنوع درختان و درختچه‌ها در سطح جنگل، پیش‌نیازی برای نظارت و ارزیابی تغییرات تنوع زیستی است. سنجش از دور از جمله ابزارهای مناسب جهت جمع‌آوری داده‌ها برای برآورد تنوع گونه‌ای است. بدین منظور در پژوهش حاضر توانایی داده‌های سنجنده MSI ماهواره سنتینل-۲ مورد آزمون قرار گرفت. ابتدا در بخش‌های پاتم، نم‌خانه، و گرازین جنگل خیرود تعداد ۷۵ قطعه نمونه با ابعاد ۲۰×۲۰ متر پیاده‌سازی و مشخصات نوع، تعداد گونه‌ها در هر قطعه نمونه برداشت شدند. سپس شاخص‌های تنوع گونه‌ای بتا (جاکارد و سورنسن) برای هر یک از قطعه‌های نمونه در نرم‌افزار R محاسبه شدند. تصاویر سنتینل-۲ مربوط به تاریخ‌های ۱۹ مرداد ماه (فصل تابستان) و ۲۲ مهر ماه (فصل پاییز) سال ۱۴۰۰ دریافت شدند. پس از انجام پیش‌پردازش‌ها و اطمینان از کیفیت داده‌های ماهواره‌ای، پردازش‌های شامل تهیه شاخص‌های پوشش گیاهی، اعمال تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA)، تبدیل تسلدکپ و محاسبه متغیرهای بافتی انجام شدند. همبستگی بین شاخص‌های تنوع گونه‌ای اندازه‌گیری شده زمینی و متغیرهای طیفی و بافتی در سطح احتمال ۹۵ درصد بررسی شد. به‌منظور مدل‌سازی از رگرسیون خطی چندمتغیره به روش گام‌به‌گام و جنگل تصادفی استفاده شد. نتایج تحلیل رگرسیون نشان دادند متغیرهای بافتی حاصل از تصویر فصل پاییز با ضریب تبیین برابر ۰/۳۸۳ و درصد خطای جذر میانگین مربعات معادل ۳۶/۵۷ مطلوب‌ترین عملکرد را در برآورد شاخص تنوع گونه‌ای سورنسن داشته است. به‌طور کلی، نتایج پژوهش حاضر بیان کرد تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ عملکرد متوسطی در برآورد شاخص‌های تنوع گونه‌ای در سه بخش مورد مطالعه جنگل خیرود دارد.

**استناد:** قیصریان، سیده آذر؛ فاتحی، پرویز؛ اعتماد، وحید (۱۴۰۲). برآورد شاخص‌های تنوع گونه‌ای در جنگل‌های هیرکانی با استفاده از داده‌های ماهواره سنتینل-۲ (مطالعه موردی: جنگل خیرود، استان مازندران). *نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب*، ۷۶ (۳)، ۲۳۹-۲۴۳. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2023.362198.1261>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسنده‌گان.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2023.362198.1261>



## ۱. مقدمه

جنگل‌ها از اصلی‌ترین مخازن تنوع زیستی<sup>۱</sup> هستند که بشر برای رفاه اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی خود به آن‌ها وابسته است [۱]. بوم‌سازگان‌ها با تنوع زیستی بالا، پایداری اکولوژیک و تولید بیشتری دارند، بنابراین تنوع زیستی یکی از نمایه‌های مهم برای نشان دادن فرم‌های متنوع ساختاری، عملکردی و فرآیندهای اکولوژیک جنگل است [۲] و در دراز مدت برای حفظ عملکردهای متعدد بوم‌سازگان جنگلی یک پیش‌نیاز ضروری می‌باشد [۳]. تنوع زیستی جنگل شامل چهار دسته کلی تنوع ژنتیکی<sup>۲</sup>، گونه‌ای<sup>۳</sup>، بوم‌سازگان<sup>۴</sup> و فرآیندهای اکولوژیک<sup>۵</sup> است. در این بین، تنوع گونه‌ای درختان بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۴]. افزایش تنوع گونه‌ای می‌تواند باعث بهبود کارکردهای جنگل از جمله افزایش تولید چوب، افزایش ذخیره کربن [۵] و بهبود تاب‌آوری بوم‌سازگان جنگلی در برابر آشفستگی‌ها، آفات و بیماری‌ها شود [۶]. بنابراین شناخت تنوع گونه‌ای چوبی و حفظ انواع گونه‌های درختی و درختچه‌ای در یک جنگل برای اطمینان از خدمات متعدد بوم‌سازگان بسیار مهم است [۷]. از معیارهای کمی اندازه‌گیری تنوع می‌توان به شاخص تنوع گونه‌ای بتا<sup>۶</sup> ( $\beta$ ) اشاره کرد که به بررسی تغییرات در ترکیب گونه‌ها و تنوع بین جامعه‌ها می‌پردازد [۸].

جنگل‌های شمال ایران یکی از مهمترین و غنی‌ترین منابع جنگلی از لحاظ تنوع گونه‌های درختی و درختچه‌ای محسوب می‌شود. بنابراین دستیابی به اطلاعات دقیق و به‌موقع از تنوع گونه‌ای چوبی این جنگل‌ها می‌تواند از اهداف مهم مدیران و برنامه‌ریزان کشور باشد. از گذشته‌های دور پژوهشگران برای اندازه‌گیری تنوع گونه‌های درختی و درختچه‌ای در جنگل از روش‌های زمینی استفاده می‌کنند. اگرچه اندازه‌گیری زمینی روشی دقیق و دارای نتایج قابل اطمینانی است، اما این روش پرهزینه، نیاز به حجم کار زیاد، زمان‌بر و همچنین محدودیت‌های دسترسی به رویشگاه‌های دور افتاده یا مناطقی با شرایط خاص جغرافیایی، اقلیمی و اقتصادی-اجتماعی را دارد [۹، ۱۰]. در مقابل سنجش از دور به‌ویژه با پیشرفت‌هایی که طی دهه‌های گذشته در ویژگی‌های مکانی، طیفی، زمانی و رادیومتری سنجنده‌ها صورت گرفته است می‌تواند به‌عنوان روشی برای برآورد مشخصه تنوع گونه‌ای چوبی جنگل مطرح باشد [۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲]. به‌منظور استفاده از داده‌های سنجش از دوری جهت برآورد تنوع گونه‌ای چوبی، ابتدا نیاز است که قابلیت و توانایی این داده‌ها مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد.

تاکنون پژوهش‌های متعددی در رابطه با تهیه نقشه تنوع گونه‌ای چوبی با استفاده از روش‌های مختلف طبقه‌بندی و همچنین مدل‌سازی (استفاده از روش‌های آماری پارامتری و ناپارامتری) در جنگل‌ها صورت گرفته است. به‌عنوان مثال Saedmochshi و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی با بررسی توانایی تصاویر نوری ماهواره سنتینل-۲ در برآورد تنوع گونه‌های چوبی در بخشی از جنگل‌های زاگرس نشان دادند شاخص‌های تنوع گونه‌ای سیمپسون (با ضریب تبیین ۰/۵۷ و درصد خطای جذر میانگین مربعات ۲۱/۳۹)، با دقت بیشتری نسبت به سایر شاخص‌های قابل برآورد بود [۱۳]. Akbari و همکاران (۲۰۱۹) در مدل‌سازی تنوع گونه‌های درختی با بکارگیری تصاویر ماهواره GeoEye نشان دادند باند مادون قرمز نزدیک و متغیرهای بافتی بهترین متغیرها در برآورد تنوع گونه‌ای است. به‌صورتی که هسته RBF حاصل از رگرسیون ماشین بردار پشتیبان، با ضریب تبیین برابر ۰/۵۸ و درصد خطای جذر میانگین مربعات معادل ۴۶ درصد بالاترین میزان دقت را در برآورد شاخص سیمپسون در مقایسه با سایر مدل‌های رگرسیونی داشته است [۱۴]. همچنین Akbari و همکاران (۲۰۱۶) عنوان کردند داده‌های با توان تفکیک مکانی بالای ماهواره‌ی Pleiades (با ضریب تبیین برابر ۰/۷۴۳ و درصد خطای جذر میانگین مربعات معادل ۱۸/۶) به سهولت قادر به برآورد تنوع گونه‌های درختان پهن‌برگ جنگل‌های هیرکانی می‌باشد [۱۵]. Ampadu و همکاران (۲۰۲۱) در ارزیابی توانایی ماهواره‌های PlanetScope، Sentinel-2، RapidEye و Landsat 8 در برآورد تنوع گونه‌های درختی بیان کردند که سنتینل-۲ بهترین کارایی

<sup>1</sup> Biodiversity

<sup>2</sup> Genetic Diversity

<sup>3</sup> Species Diversity

<sup>4</sup> Ecosystem Diversity

<sup>5</sup> Ecological Diversity

<sup>6</sup> Beta Diversity

را در برآورد دو شاخص شانون و غنای گونه‌ای با ضریب تبیین‌های معادل ۰/۹۲ داشته است [۱۶]. Marzioletti و همکاران (۲۰۲۱) در برآورد تنوع آلفا و بتا با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای PlanetScope عنوان نمودند شاخص تنوع بتا رابطه مثبت و معنی‌داری با داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده دارد [۱۷]. Fundisi و همکاران (۲۰۲۰) در برآورد تنوع گونه‌های چوبی با استفاده از تصاویر WorldView-2 نشان دادند شاخص بافت آن‌تروپی GLCM<sup>۱</sup> بالاترین دقت و کمترین میزان خطا را در برآورد تنوع گونه‌ای داشته است [۱۸]. Persson و همکاران (۲۰۱۸) در بررسی گونه‌های درختی با استفاده از داده‌های چندزمانه سنتینل-۲ نشان دادند باندهای لبه قرمز و SWIR ماهواره سنتینل-۲ از اهمیت بالایی در تفکیک گونه‌ها برخوردار هستند [۱۹].

به‌طور کلی پژوهش‌های کمی در رابطه با برآورد تنوع گونه‌های چوبی با استفاده از روش‌های آماری پارامتری و ناپارامتری در جنگل‌های ایران (برخلاف خارج از کشور) صورت گرفته است. به‌عنوان مثال Akbari و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهشی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای با توان تفکیک مکانی بالای Pleiades، تنوع گونه‌ای چوبی را در بخشی از جنگل‌های شمال ایران برآورد کرده‌اند [۱۵]، اما هزینه به نسبت بالای این تصاویر، محدودیت اصلی در بکارگیری آن‌ها در سطوح وسیع است. در مقابل داده‌های ماهواره سنتینل-۲ با توجه به رایگان بودن آن‌ها، از مزیت‌های دیگری همچون تعداد باند طیفی بیشتر و نیز برخورداری از قدرت تفکیک زمانی پنج روزه، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در پژوهش Saedmochshi و همکاران (۲۰۱۹) [۱۳] نیز، تنوع گونه‌ای درختی با استفاده از داده‌های ماهواره سنتینل-۲ و روش‌های آماری پارامتری در جنگل‌های زاگرس مدل‌سازی شد. بنابراین پژوهش حاضر با در نظر گرفتن پژوهش‌های اخیر، در نظر دارد در جنگل‌های ناهمسال و آمیخته هیرکانی، شاخص‌های تنوع گونه‌ای بتا (جاکارد و سورنسن) را با استفاده از داده‌های ماهواره سنتینل-۲ ارزیابی کند. در کنار استفاده از تصاویر چندزمانه یکی از اهداف فرعی این پژوهش، مقایسه روش‌های آماری پارامتری (رگرسیون خطی چند متغیره) و ناپارامتری (جنگل تصادفی) در برآورد تنوع گونه‌ای درختی در جنگل‌های هیرکانی است.

## ۲. روش‌شناسی پژوهش

### ۲-۱. منطقه پژوهش

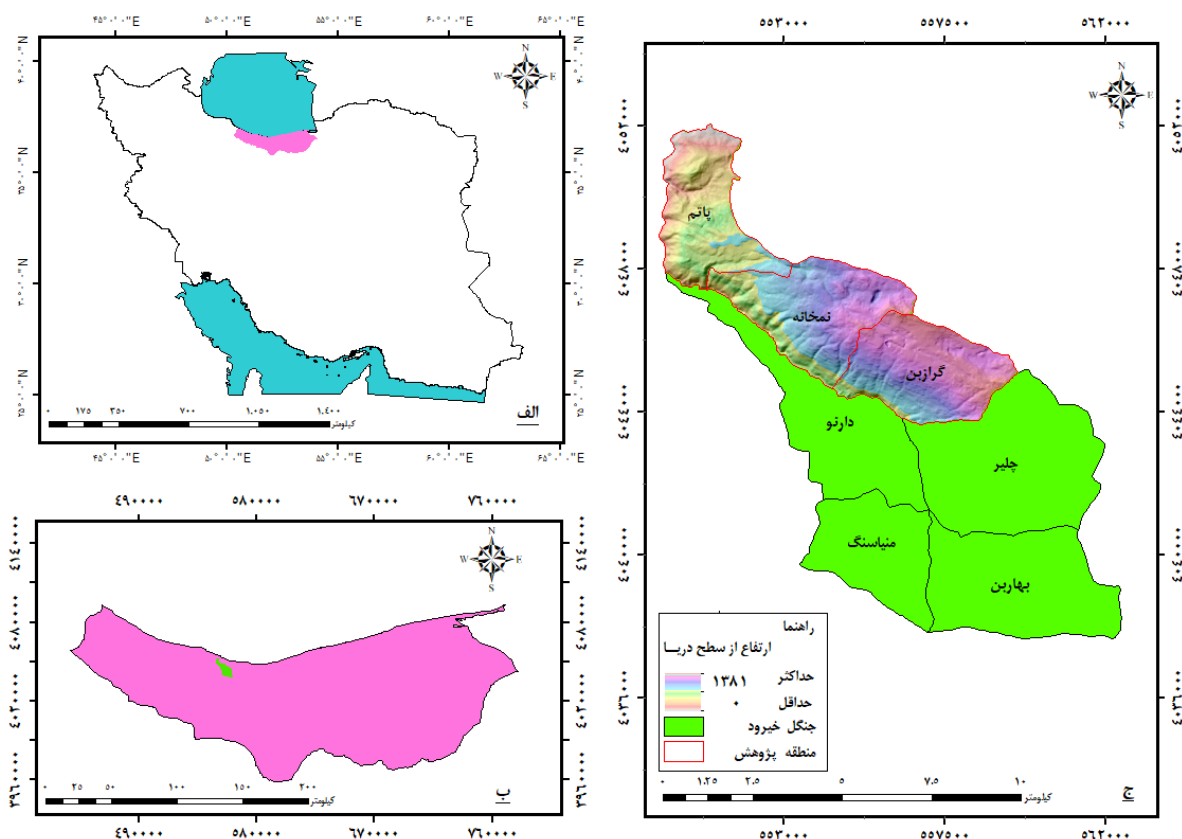
پژوهش حاضر در جنگل آموزشی-پژوهشی دانشگاه تهران واقع در خیروکندار نوشهر با مساحتی حدود ۸۰۰۰ هکتار در حوزه آبخیز ۴۵ جنگل‌های شمال کشور، در هفت کیلومتری شرق شهرستان نوشهر و در استان مازندران بین ۵۱°۳۲' تا ۵۱°۴۳' طول شرقی و ۳۶°۲۷' تا ۳۶°۴۰' عرض شمالی قرار گرفته است و از شمال به جلگه مازندران، نوار ساحلی و روستای نجارده، از شرق به دره بندی، از جنوب به بیلاقات و روستای کلیک و از غرب به رودخانه خیرود محدود می‌شود. جنگل خیرود در دامنه ارتفاعی ۵۰ تا ۲۲۰۰ متری از سطح دریا گسترش دارد و دارای پستی و بلندی نسبتاً ملایمی می‌باشد (شکل ۱). گونه‌های غالب منطقه شامل گونه‌های راش (*Fagus orientalis*)، ممرز (*Carpinus betulus*) و بلندمازو (*Quercus castaneifolia*) است [۲۰]. این پژوهش در بخش‌های پاتم، نم‌خانه و گرازبن جنگل خیرود که مساحت آن‌ها به ترتیب ۹۰۸، ۱۰۸۴ و ۱۰۲۰ هکتار هستند، انجام شد.

### ۲-۲. داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش، دو فریم تصویر از داده‌های سنجنده MSI ماهواره سنتینل ۲ مربوط به تاریخ‌های ۱۹ مرداد ماه (فصل تابستان) و ۲۲ مهر ماه سال ۱۴۰۰ هجری شمسی (فصل پاییز) مورد استفاده قرار گرفت. هدف از انتخاب و دریافت تصاویر در دو فصل مورد نظر، بررسی بازتاب گونه‌های مختلف در دوره‌های رویش متفاوت است، با این دیدگاه که در این دوره‌های رویش، دو گونه‌ای که از نظر بازتاب به هم شبیه هستند در فصول مختلف رویش، متمایز شوند. بنابراین تصاویر ۱۳ باند طیفی در محدوده طول موج‌های مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز میانی از سایت سازمان اتحادیه فضایی اروپا با فرمت JPEG2000 و مبنای WGS84 دریافت شدند. دو برگ نقشه رقومی به شماره‌های 63633SE و 63633SW از منطقه مورد مطالعه به‌صورت دوبعدی

<sup>1</sup> Grey-Level Co-occurrence Matrix

(2D) و سه بعدی (3D) با خطوط تراز ۱۰ متری که توسط سازمان نقشه‌برداری کشور با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ تهیه شده‌اند نیز مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعه در ایران (الف)، استان مازندران (ب) و جنگل آموزشی پژوهشی خیرود و سه بخش مورد مطالعه (ج)

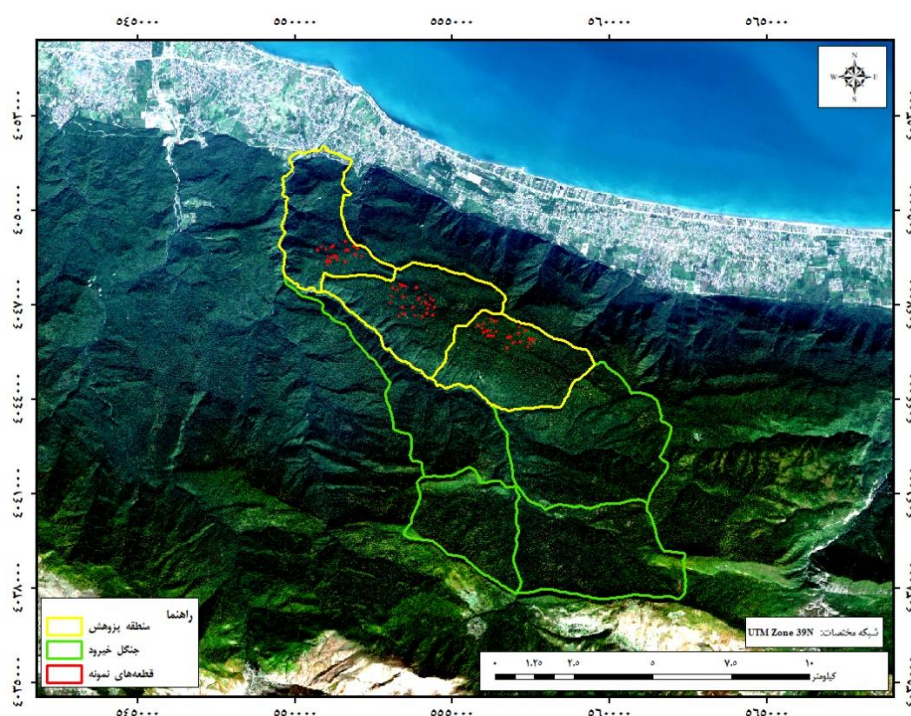
## ۲-۳. اندازه‌گیری‌های زمینی

در تیرماه سال ۱۴۰۰، تعداد ۷۵ قطعه نمونه مربعی شکل با ابعاد  $20 \times 20$  متر به صورت تصادفی در بخش‌های پاتم، نمخانه، و گرازین برداشت شدند (شکل ۲). ابعاد قطعه نمونه‌ها براساس اندازه پیکسل داده‌های ماهواره سنتینل و همچنین در نظر داشتن رابطه منحنی سطح-گونه که در مطالعات جامعه‌شناسی گیاهی حائز اهمیت است، تعیین شد. در خصوص پراکنش قطعه‌های نمونه، الگوی نمونه‌برداری تصادفی استفاده شد. همچنین به منظور جلوگیری از نزدیکی بیش از حد قطعه‌نمونه‌ها، حداقل فاصله برابر با ۸۰ متر (معادل ۴ پیکسل تصویر سنتینل) در نظر گرفته شده است. در هر قطعه نمونه نوع و تعداد مربوط به گونه‌های درختی و درختچه‌ای با قطر بزرگ‌تر از  $7/5$  سانتی‌متر مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. سپس به منظور اندازه‌گیری تنوع گونه‌ای در هر قطعه نمونه زمینی، شاخص‌های تنوع گونه‌ای بتا (جاکارد و سورنسن) با استفاده از بسته‌های "Vegan" و "Adespatial" در نرم‌افزار R 4.3.1 محاسبه شدند (جدول ۱).

## ۲-۴. پیش‌پردازش داده‌های ماهواره‌ای

پیش از بکارگیری داده‌های ماهواره‌ای لزوم بازیابی و اطمینان از صحت هندسی، رادیومتری و اتمسفری داده‌های مورد استفاده بسیار حائز اهمیت است. کیفیت هندسی تصاویر مورد استفاده در پژوهش، با روی هم‌گذاری لایه وکتوری جاده‌های منطقه استخراج شده از نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفتند. در این پژوهش تصاویر سنجنده MSI ماهواره سنتینل-۲ در سطح تصحیحات L1C که تصحیحات استاندارد رادیومتری و هندسی بر روی آن‌ها انجام شده است، دریافت شدند. به منظور تصحیح

اثرات اتمسفر از افزونه الحاقی Sen2Cor در نرم‌افزار SNAP 8 که توسط آژانس فضایی اروپا برای انجام این‌گونه تصحیحات بر روی تصاویر سنتینل توسعه داده شده است، استفاده شد.



شکل ۲. موقعیت قطعه‌های نمونه برداشت شده بر روی ترکیب رنگی واقعی (432) RGB تصویر سنجنده MSI ماهواره سنتینل-۲

#### جدول ۱. شاخص‌های تنوع گونه‌ای مورد استفاده در پژوهش

منبع	فرمول	شاخص
[۲۱]	$S_j = \frac{a}{(a + b + c)}$	جاکارد
[۲۲]	$S_s = \frac{2a}{(2a + b + c)}$	سورنسن

$S$ : تعداد کل گونه‌ها، تعداد گونه‌های مشترک موجود در هر دو منطقه A و B، b تعداد گونه‌های موجود در منطقه A که در منطقه B حضور ندارند، c: تعداد گونه‌های موجود در منطقه B که در منطقه A حضور ندارند. (منطقه A و B بیانگر وضعیت تنوع گونه‌ای بین قطعه‌نمونه‌های مورد بررسی می‌باشد).

#### ۲-۵. پردازش داده‌های ماهواره‌ای

پردازش تصاویر شامل مجموعه عملیاتی است که منجر به بارزسازی تصاویر و افزایش تفاوت بین درجات خاکستری پیکسل‌ها می‌شود. هدف اصلی از انجام پردازش تصویر افزایش امکان شناسایی بهتر پدیده‌ها و استخراج هر چه کامل‌تر اطلاعات است. همچنین به موجب آن اثر سایه‌ها تعدیل و کنتراست افزایش می‌یابد [۲۳]. پردازش‌ها اغلب متنوع بوده و بسته به نوع هدف، جنبه آماده‌سازی برای ورود به مرحله تجزیه و تحلیل داده‌ها است [۲۴، ۲۵]. تکنیک‌های بارزسازی در پژوهش حاضر شامل محاسبه ۴۲ شاخص پوشش گیاهی، دو مؤلفه اول تجزیه مؤلفه‌های اصلی<sup>۱</sup> (PCA)، انجام تبدیل تسلدکپ<sup>۲</sup> با استفاده از ضرایب

<sup>۱</sup> Principal Component Analysis (PCA)

<sup>۲</sup> Tasseled Cap Transformation

توسعه یافته برای مجموعه کامل ۱۳ باند طیفی و نیز ۶ باند طیفی از جمله آبی، سبز، قرمز، مادون قرمز نزدیک، مادون قرمز موج کوتاه ۱ و ۲ (جدول ۲) و همچنین محاسبه متغیرهای بافتی<sup>۱</sup> در سه ابعاد پنجره ۳×۳، ۵×۵، ۷×۷ در دو اندازه تفکیک مکانی ۱۰ و ۲۰ متر انجام گرفت (جدول ۳).

جدول ۲. ضرایب تبدیل تسلدکپ برای داده‌های ماهواره سنتینل-۲ سنجنده MSI

ضرایب باندها			مؤلفه‌های تسلدکپ										
MIR-2	MIR-1	Cirrus	WV	NIR-2	NIR-1	RE3	RE2	RE1	Red	Green	Blue	Coastal	TCT
-۰/۰۷۸۰	-۰/۰۸۹۶	-۰/۰۰۲۰	-۰/۰۱۰۳	-۰/۳۸۳۴	-۰/۳۵۸۰	-۰/۴۱۸۰	-۰/۳۷۴۰	-۰/۳۰۹۹	-۰/۳۰۲۰	-۰/۲۹۳۴	-۰/۲۵۶۹	-۰/۲۲۸۱	روشنایی
-۰/۲۵۳۸	-۰/۱۳۴۱	-۰/۰۰۱۷	-۰/۱۴۴۵	-۰/۴۲۶۱	-۰/۳۱۳۸	-۰/۳۱۲۷	-۰/۱۶۰۲	-۰/۲۹۵۹	-۰/۴۲۸۳	-۰/۳۰۲۰	-۰/۲۵۸۱	-۰/۲۲۶۶	سبزینگی
-۰/۵۲۹۳	-۰/۷۷۰۱	-۰/۰۰۰۳	-۰/۱۳۶۹	-۰/۰۰۹۱۰	-۰/۰۷۵۵	-۰/۰۲۱۹	-۰/۰۲۲۳	-۰/۰۱۷۰	-۰/۰۴۸۶	-۰/۱۶۱۵	-۰/۱۷۶۳	-۰/۱۸۲۵	نمناکی
-۰/۱۹۴۹	-۰/۲۳۹۶			-۰/۷۱۹۶					-۰/۳۴۳۷	-۰/۳۸۱۳	-۰/۳۵۱۰		روشنایی
-۰/۲۸۵۶	-۰/۰۰۸۷			-۰/۶۶۳۳					-۰/۴۷۳۴	-۰/۳۵۳۳	-۰/۳۵۹۹		سبزینگی
-۰/۵۳۰۸	-۰/۷۶۱۱			-۰/۱۰۷۱					-۰/۰۸۸۳	-۰/۲۳۰۵	-۰/۲۵۷۸		نمناکی

جدول ۳. متغیرهای بافتی حاصل از محاسبه ماتریس هم وقوع درجات خاکستری (GLCM)

منبع	فرمول	متغیرهای بافتی
	$\text{Mean (MEA)} = \sum_{i,j=0}^{N-1} ipi.j$	میانگین
	$\text{Variance (VAR)} = \sum_{i,j=0}^{N-1} (1 - \mu_i)$	واریانس
	$\text{Homogeneity (HOM)} = \sum_{i,j=0}^{N-1} (ipi.j)/(1 + (i - j)^2)$	همگنی
	$\text{Contrast (CON)} = \sum_{i,j=0}^{N-1} ipi.j(i - j)$	کنتراست
[۲۶]	$\text{Dissimilarity (DIS)} = \sum_{i,j=0}^{N-1} ipi.j  i - j $	عدم تشابه
	$\text{Entropy (ENT)} = \sum_{i,j=0}^{N-1} \ln pi.j$	آنتروپی
	$\text{Angular Second Moment (ASM)} = \sum_{i,j=0}^{N-1} ipi.j^2$	گشتاور زاویه‌ای دوم
	$\text{Correlation (COR)} = \sum_{i,j=0}^{N-1} (i \sum_{l,j=0}^{N-1} ijpi.j - \mu_i \mu_j) / \sigma^2 \sigma^2$	همبستگی

$N$ : تعداد درجات خاکستری موجود در تصویر و  $P_{ij}$ : فرکانس نسبی رخداد زوج پیکسل‌های با درجات خاکستری  $i$  و  $j$  در سطح تصویر

## ۲-۶. تجزیه و تحلیل‌های آماری

به منظور بررسی همبستگی بین داده‌های ماهواره‌ای و شاخص‌های تنوع گونه‌ای، ارزش‌های طیفی و بافتی متناظر با قطعه‌های نمونه زمینی استخراج شدند. در همین راستا، معنی‌داری متغیرها در سطوح احتمال ۹۵ درصد مورد ارزیابی قرار گرفت. مدل‌سازی شاخص‌های تنوع گونه‌ای با بکارگیری روش‌های آماری رگرسیون چند متغیره گام‌به‌گام و جنگل تصادفی انجام شد. بر این اساس، مدل‌سازی با ۷۰ درصد از قطعه‌های نمونه زمینی در نرم‌افزار R 4.3.1 و با استفاده از بسته‌های "caret" و "randForest" صورت

<sup>۱</sup> Texture Variable

پذیرفت. اعتبارسنجی مدل‌های رگرسیونی توسعه داده شده با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل<sup>۱</sup> مورد آزمون قرار گرفت. آماره‌های ضریب تبیین ( $R^2$ )، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطا نسبی (RMSE%)، برای انتخاب بهترین مدل استفاده شدند (جدول ۴).

جدول ۴. آماره‌های ارزیابی مدل

منبع	فرمول	آماره‌ها
	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$	ضریب تبیین
[۲۷]	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{N}}$	جذر میانگین مربعات خطا
	$RMSE(\%) = \frac{RMSE}{\bar{y}} \times 100$	درصد جذر میانگین مربعات خطا

### ۳. یافته‌های پژوهش و بحث

آماره‌های توصیفی حداقل، حداکثر، میانگین و انحراف معیار برای مشخصه‌های تنوع گونه‌ای بتا در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج نشان داد حداقل و حداکثر مقادیر شاخص‌های تنوع گونه‌ای برآورد شده به ترتیب مربوط به شاخص سورنسن با مقادیر ۰/۰۰۳ و ۰/۰۳۱ می‌باشد. مقادیر عددی شاخص‌های تنوع بتا در دامنه صفر تا یک قرار دارند که به ترتیب نمایانگر عدم تشابه کامل (عدم وجود هیچ گونه مشترک در دو جامعه) و کاملاً مشابه وضعیت تنوع گونه‌ای بین قطعه نمونه‌های مورد بررسی است [۲۸]. با توجه به مطلب مذکور و مطابق جدول ۴ شاخص‌های تنوع بتا (جاکارد و سورنسن) با متوسط ۰/۰۱۲ عدم تشابه را بین قطعه نمونه‌ها نشان می‌دهند که این می‌تواند تأییدی به تنوع نسبتاً بالای جنگل مورد پژوهش باشد. Noorian و همکاران (۱۹۹۶) در بررسی وضعیت تنوع گونه‌های درختی و درختچه‌ای در جنگل‌های شمال که دارای مدیریت‌های متفاوت بودند نشان دادند شاخص‌های تنوع گونه‌ای در جنگل‌های مدیریت شده از وضعیت مطلوبی برخوردار است [۲۹]. Heydari و Bayat (۲۰۲۱) نیز در ارزیابی شاخص‌های تنوع گونه‌های درختی در جنگل‌های شمال ایران (جنگل‌های خیرود، رامسر و نکا) گزارش کردند شاخص‌های تنوع گونه‌ای بیشترین میزان تنوع را در جنگل خیرود داشته‌اند [۳۰].

جدول ۵. آماره توصیفی شاخص‌های تنوع گونه‌ای

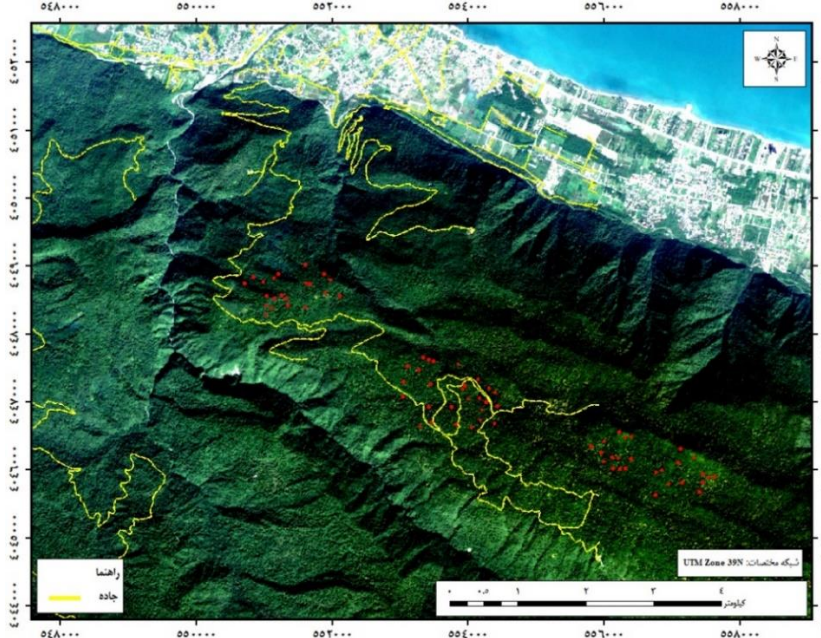
شاخص	حداقل (MIN)	حداکثر (MAX)	میانگین (Mean)	انحراف معیار (Std.Deviation)
جاکارد	۰/۰۰۵	۰/۰۲۴	۰/۰۱۲	۰/۰۰۴
سورنسن	۰/۰۰۳	۰/۰۳۱	۰/۰۱۲	۰/۰۰۵

بررسی کیفیت هندسی تصاویر مورد استفاده در پژوهش، با روی هم‌گذاری لایه وکتوری جاده بر روی تصویر منطقه، حاکی از همخوانی لایه‌های مذکور با هر دو تصویر مورد استفاده در پژوهش بود و تصاویر از دقت هندسی مطلوبی برخوردار بودند (شکل ۳). نتایج بررسی همبستگی در تصویر حاصل از فصل تابستان نشان داد، شاخص تنوع گونه‌ای جاکارد با باندهای آبی (باند ۲)، سبز (باند ۳) و قرمز (باند ۴) و همچنین شاخص تنوع گونه‌ای سورنسن با مؤلفه نمناکی حاصل از تبدیل تسلدکپ (با استفاده از ضرایب ۶ باند) دارای رابطه معنی‌داری در سطح احتمال ۹۵ درصد است. در تصویر فصل پاییز (مهر ماه) نیز نتایج حاکی از رابطه معنی‌دار شاخص تنوع گونه‌ای جاکارد با سه شاخص پوشش گیاهی REIP1، REIP2 و REIP3 در سطح احتمال ۹۵ درصد است (جدول ۶). نتایج حاصل از مدل‌سازی رگرسیون خطی چندمتغیره به روش گام‌به‌گام برای برآورد شاخص‌های تنوع گونه‌ای و با استفاده از متغیرهای مستقل (متغیرهای طیفی و بافتی) نشان داد در فصل تابستان شاخص‌های پوشش گیاهی بالاترین میزان ضریب تبیین

<sup>۱</sup> K-fold Cross Validation



معادل  $0/805$  را داشته است (جدول ۷). نتایج حاصل از مدل‌سازی رگرسیون جنگل تصادفی نشان داد متغیرهای بافتی با ابعاد پنجره  $5 \times 5$  و با اندازه تفکیک ۲۰ متر با میزان ضریب تبیین برابر  $0/948$  مطلوب‌ترین عملکرد را در برآورد شاخص تنوع گونه‌ای سورنسن در فصل پاییز داشته است (جدول ۸). در شکل ۴ اهمیت نسبی متغیرهای وارد شده به مدل در برآورد شاخص تنوع گونه‌ای سورنسن آورده شده است. به‌طور کلی نتایج مدل‌سازی نمایانگر عملکرد بهتر روش جنگل تصادفی در برآورد تنوع گونه‌ای می‌باشد.



شکل ۳. همخوانی مکانی لایه وکتوری جاده با تصویر سنجنده MSI ماهواره سنتینل-۲

جدول ۶. نتایج بررسی همبستگی بین مشخصه‌های تنوع گونه‌ای با متغیرهای طیفی و بافتی

معنی‌داری	متغیرها	شاخص تنوع گونه‌ای	فصل
$0/232^*$	باندهای مرئی	جاکارد	تابستان
$0/258^*$	مؤلفه نمناکی (حاصل از ضرایب ۶ باند)	سورنسن	
$0/212^*$	REIP3, REIP2, REIP1	جاکارد	پاییز

جدول ۷. مقادیر ضریب تبیین ( $R^2$ ) حاصل از مدل‌سازی رگرسیون گام‌به‌گام براساس متغیرهای طیفی و بافتی مربوط به سنجنده MSI در فصول تابستان و پاییز

مقادیر ضریب تبیین ( $R^2$ )				متغیرهای ورودی مدل
تصویر فصل پاییز		تصویر فصل تابستان		
سورنسن	جاکارد	سورنسن	جاکارد	
$0/264$	$0/099$	$0/06$	$0/304$	باندهای اصلی
$0/523$	$0/668$	$0/804$	$0/805$	شاخص‌های پوشش گیاهی
$0/087$	$0/108$	$0/171$	$0/079$	تجزیه مؤلفه‌های اصلی
$0/059$	$0/112$	$0/057$	$0/063$	تسلدکپ برای ۶ باند
$0/051$	$0/052$	$0/048$	$0/093$	تسلدکپ برای ۱۳ باند
$0/2$	$0/054$	$0/125$	$0/121$	ابعاد پنجره $3 \times 3$
$0/25$	$0/097$	$0/192$	$0/106$	ابعاد پنجره $5 \times 5$
$0/265$	$0/136$	$0/081$	$0/145$	ابعاد پنجره $7 \times 7$
$0/07$	$0/206$	$0/065$	$0/051$	ابعاد پنجره $3 \times 3$
$0/347$	$0/095$	$0/155$	$0/322$	ابعاد پنجره $5 \times 5$
$0/155$	$0/065$	$0/038$	$0/054$	ابعاد پنجره $7 \times 7$

جدول ۸. مقادیر ضریب تبیین ( $R^2$ ) حاصل از مدل‌سازی رگرسیون جنگل تصادفی برای متغیرهای طیفی و بافتی مربوط به سنجنده MSI در فصول تابستان و پاییز

مقادیر ضریب تبیین ( $R^2$ )				متغیرهای ورودی مدل
تصویر فصل پاییز		تصویر فصل تابستان		
سورنسن	جاکارد	سورنسن	جاکارد	
۰/۹۰۱	۰/۸۹	۰/۰۸۷	۰/۸۸۸	باندهای اصلی
۰/۸۹۵	۰/۹۱۱	۰/۹۰۴	۰/۹۱۸	شاخص‌های پوشش گیاهی
۰/۷۵۲	۰/۷۳۲	۰/۸۲۰	۰/۸۰۶	تجزیه مؤلفه‌های اصلی
۰/۸۱۶	۰/۸۴۸	۰/۸۶۶	۰/۸۸۳	تسلدکپ برای ۶ باند
۰/۷۸۸	۰/۸۵۸	۰/۸۷۳	۰/۸۶۱	تسلدکپ برای ۱۳ باند
۰/۸۹۲	۰/۸۷۸	۰/۹۰۷	۰/۸۸۹	ابعاد پنجره ۳×۳
۰/۸۶۶	۰/۹۱۷	۰/۹۰۸	۰/۹۱۱	ابعاد پنجره ۵×۵
۰/۸۹۰	۰/۹۱۱	۰/۸۸۸	۰/۸۷۸	ابعاد پنجره ۷×۷
۰/۹۰۴	۰/۸۸۱	۰/۹۰۳	۰/۸۶۸	ابعاد پنجره ۳×۳
۰/۹۴۸	۰/۹۳۸	۰/۸۸۴	۰/۸۹۳	ابعاد پنجره ۵×۵
۰/۹۱۳	۰/۹۰۴	۰/۹۲۰	۰/۹۰۷	ابعاد پنجره ۷×۷

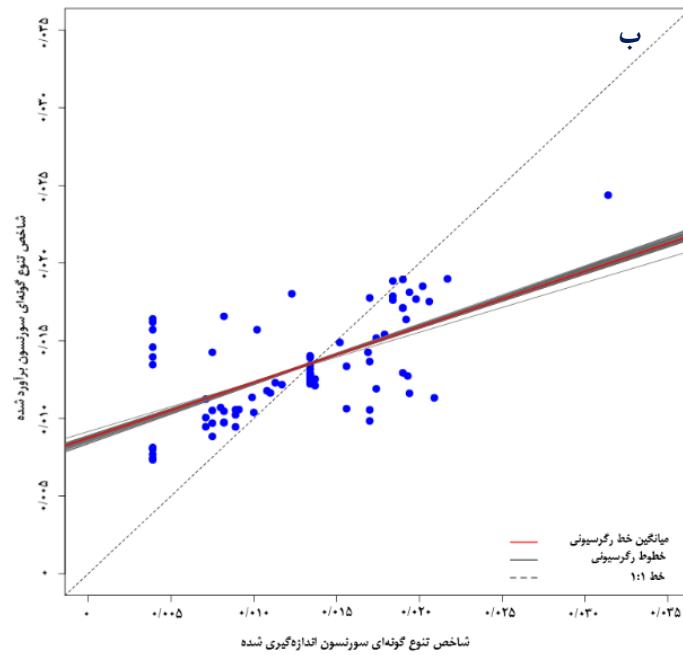
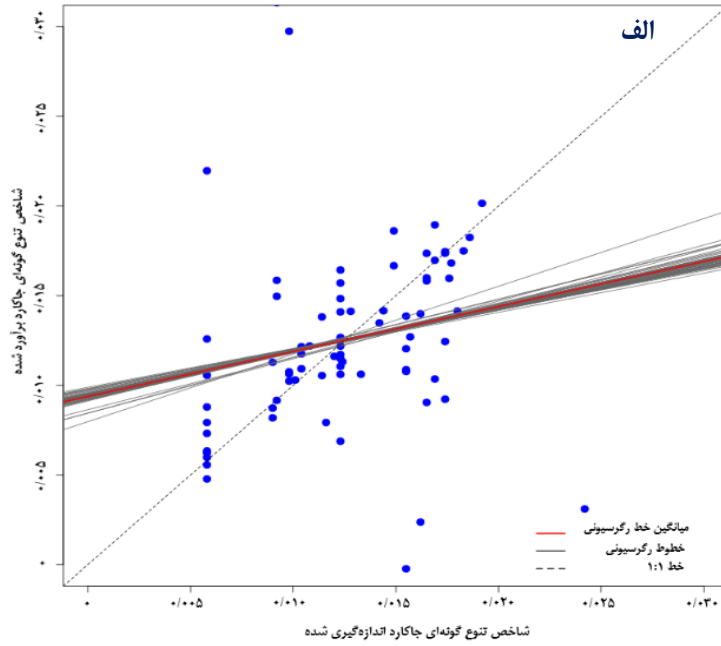


شکل ۴. نتایج میزان اهمیت متغیرها در برآورد شاخص تنوع گونه‌ای سورنسن حاصل از مدل‌سازی جنگل تصادفی برای تصویر فصل پاییز سنتینل-۲

اعتبارسنجی مدل‌های رگرسیونی توسعه داده شده با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل مورد آزمون قرار گرفت. اعتبارسنجی مدل‌های حاصل از رگرسیون گام‌به‌گام نشان داد مدل توسعه داده شده از مجموعه شاخص‌های پوشش گیاهی به‌دست آمده از تصاویر فصل تابستان با ضریب تبیین معادل ۰/۰۴۱ و درصد جذر میانگین مربعات خطا برابر ۴۷/۰۱۳ کارایی ضعیفی را در برآورد شاخص تنوع گونه‌ای جاکارد داشته است (جدول ۸). همچنین نتایج اعتبارسنجی مدل‌های انتخاب حاصل از روش جنگل تصادفی برای داده‌های سنجنده MSI برای دو فصل تابستان و پاییز نشان دادند مدل حاصل از متغیرهای بافتی با ابعاد پنجره ۵×۵، با ضریب تبیین ۰/۳۸۳ و درصد جذر میانگین مربعات خطا ۳۶/۵۷ مطلوب‌ترین عملکرد را در برآورد شاخص تنوع گونه‌ای سورنسن در فصل پاییز (مهر ماه) داشته است (جدول ۹). در شکل ۵، نمودار ابرنقاط حاصل از اعتبارسنجی متقابل بین شاخص‌های تنوع گونه‌ای اندازه‌گیری شده و برآورد شده برای دو روش رگرسیون گام‌به‌گام و جنگل تصادفی ارائه شده است.

جدول ۹. نتایج ارزیابی مدل‌های انتخاب شده حاصل از رگرسیون گام‌به‌گام و جنگل تصادفی (RF) با استفاده از داده‌های سنجنده MSI

مدل‌سازی رگرسیونی	فصول	مجموعه متغیرها	شاخص تنوع گونه‌ای	ضریب تبیین (R <sup>2</sup> )	جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)	درصد جذر میانگین مربعات خطا (RRMSE%)
گام‌به‌گام	تابستان	شاخص‌های پوشش گیاهی	جاکارد	۰/۰۴۱	۰/۰۰۵	۴۷/۰۱۳
جنگل تصادفی	پاییز	ابعاد پنجره ۵×۵ با تفکیک ۲۰ متر	سورنسن	۰/۳۸۳	۰/۰۰۴	۳۶/۵۷



شکل ۵. مقادیر اندازه‌گیری شده در برابر برآورد شده قطعه‌نمونه‌های اعتبارسنجی شاخص تنوع گونه‌ای جاکارد و سورنسن به ترتیب براساس روش‌های رگرسیونی گام‌به‌گام و جنگل تصادفی (RF) با استفاده از داده‌های سنجنده MSI در فصول تابستان (الف) و پاییز (ب)

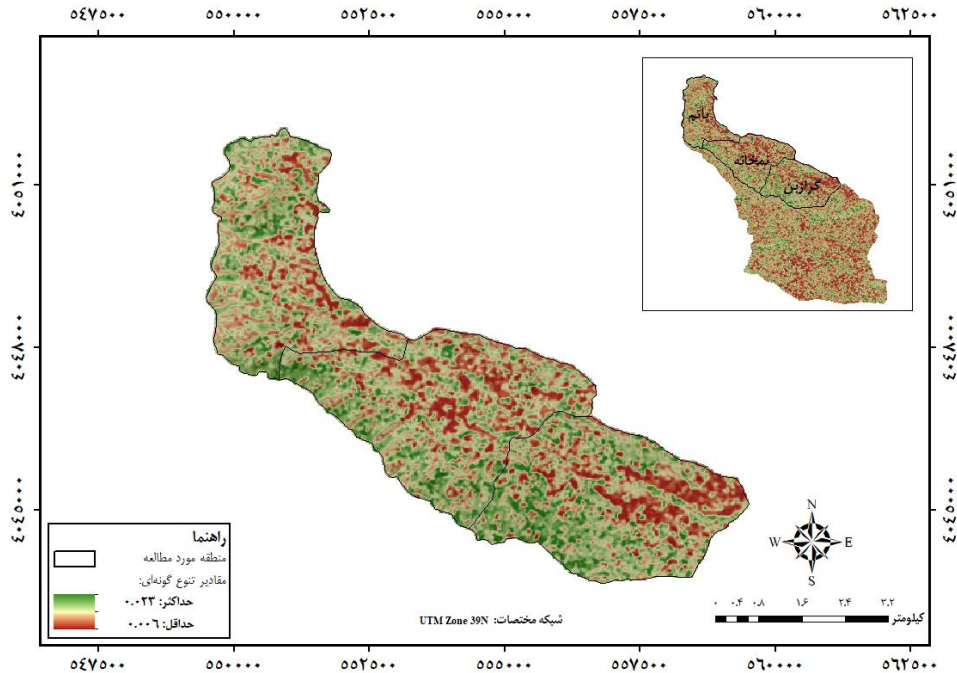
براساس تحلیل رگرسیون گام‌به‌گام، شاخص تنوع گونه‌ای جاکارد حاصل از شاخص‌های پوشش گیاهی، بالاترین میزان دقت را در برآورد تنوع گونه‌ها داشته است. به‌صورتی که نتایج ما همسو با نتایج مطالعه Khare و همکاران (۲۰۱۹) [۳۱] است که در پژوهش آن‌ها نیز شاخص تنوع بتا با استفاده از شاخص پوشش گیاهی NDVI عملکرد مناسبی در برآورد تنوع داشته است. در پژوهش Saedmochshi و همکاران (۲۰۱۹) نتایج نشان داد مدل‌سازی با رگرسیون گام‌به‌گام شاخص‌های تنوع گونه‌ای سیمپسون، شانون-وینر و شاخص غالبیت دومیننس با دقت نسبتاً مطلوب ضریب تبیین معادل ۰/۵۷ و درصد جذر میانگین مربعات خطا برابر ۲۱/۳۹ برآورد شده‌اند [۱۳].

بررسی نتایج رگرسیون جنگل تصادفی نشان داد تصویر مربوط به فصل پاییز نسبت به تصویر برداشت شده در فصل تابستان از عملکرد مطلوبی در برآورد شاخص تنوع گونه‌ای سورنسن برخوردار بوده است. این نتایج همسو با نتایج پژوهش Arekhi و همکاران (۲۰۱۷) است که نشان دادند در بررسی تنوع گونه‌ای در جنگل‌های معتدل ترکیه با استفاده از تصاویر تابستان و پاییز، کمترین دقت را تصویر فصل تابستان داشته است [۶]. به‌طور کلی استفاده از داده‌هایی که مربوط به ابتدا یا انتهای فصل رویش هستند سبب بهبود دقت پیش‌بینی در برآورد تنوع گونه‌ای می‌شود [۳۲]. از دلایل ارائه دقت بیشتر تصویر فصل پاییز در برآورد تنوع گونه‌ای در منطقه پژوهش، می‌توان به تغییرات میزان بازتاب تاج که به دلیل تغییر رنگدانه‌های برگ که در فصل خزان است، همچنین همبستگی پایین بین باندهای طیفی تصویر ماهواره سنتینل-۲ حاصل از فصل پاییز، که نشان‌دهنده تکراری نبودن اطلاعات بین باندها است، اشاره نمود. همچنین نتایج مطالعه مذکور با پژوهش Chrysafis و همکاران (۲۰۲۰) در تضاد می‌باشد، چرا که نتایج آن‌ها نشان داد تصویر تابستان (جولای) نسبت به تصویر پاییز (اکتبر) دقت بالاتری در برآورد شاخص‌های تنوع گونه‌ای داشته است [۳۲]. به‌طور کلی استفاده از داده‌های چند زمانه سبب بهبود عملکرد مدل‌ها در برآورد تنوع گونه‌ای می‌شوند، بدین‌صورت که تصاویر چند زمانه، اختلاف طیفی بیشتری را ثبت می‌کنند و سبب افزایش تفاوت و تفکیک طیفی بین گونه‌ها می‌شوند. در این راستا در پژوهش Kampouri و همکاران (۲۰۱۸) استفاده از داده‌های چند زمانه سنتینل-۲ در فصول تابستان و زمستان، سبب بهبود دقت مدل در برآورد تنوع گونه‌ای شده است [۳۳].

مدل‌های حاصل از متغیرهای بافتی در مقابل سایر مدل‌های به‌دست آمده از متغیرهای طیفی، عملکرد بهتری در برآورد تنوع گونه‌ای داشتند. به‌صورتی که متغیر بافتی در ابعاد پنجره ۵×۵ و اندازه تفکیک مکانی ۲۰ متر با ضریب تبیین (R<sup>2</sup>) معادل ۰/۳۸۳ و درصد مجذور میانگین مربعات خطا برابر ۳۶/۵۷ بیشترین دقت را در برآورد شاخص تنوع گونه‌ای سورنسن داشت. نتایج مذکور همسو با نتایج مطالعه Fundisi و همکاران (۲۰۲۰) است [۱۸]. عملکرد بهتر متغیرهای بافتی در برآورد تنوع گونه‌ای را می‌توان به نقش آن‌ها در بررسی مقادیر سطوح خاکستری پیکسل‌ها نسبت داد [۳۴].

به‌طور کلی در این پژوهش مدل‌های حاصل از متغیرهای بافتی با ابعاد پنجره ۵×۵ و ۷×۷ دقت بهتری در برآورد تنوع گونه‌های درختی داشتند. زیرا در ابعاد پنجره بزرگتر تأثیر نویزها تقریباً کاهش می‌یابد، که نتایج مذکور با نتایج مطالعه Silver و همکاران (۲۰۱۹) [۳۵] و Fundisi و همکاران (۲۰۲۰) [۱۸] همسویی نشان می‌دهد. در نهایت، نقشه تنوع گونه‌ای با استفاده از مناسب‌ترین مدل که بالاترین دقت را در برآورد تنوع گونه‌ها داشت (متغیر بافتی با ابعاد پنجره ۵×۵ و اندازه تفکیک ۲۰ متر) تهیه شد (شکل ۶).

به‌صورت کلی داده‌های ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی‌های بالا و متوسط، قابلیت برآورد تنوع گونه‌ای را در محیط‌های ناهمگن دارا می‌باشد [۳۲]. با استنباط از نتایج این پژوهش، استفاده از سنجش از دور در برآورد تنوع گونه‌های درختی برای درک وضعیت تنوع گونه‌های درختی و درختچه‌ای در حفاظت از تنوع زیستی نقش مهمی در مدیریت جنگل‌ها دارد. همچنین نتایج حاکی از آن است که سنجش از دور تغییرات در تنوع گونه‌ها را به‌صورت واضح‌تر نشان می‌دهد.



شکل ۶. نقشه شاخص تنوع گونه‌ای سورنسن حاصل از رگرسیون جنگل تصادفی برای تصویر فصل پاییز

#### ۴. نتیجه‌گیری

برای حفظ و مدیریت پایدار جنگل‌ها، ضروری است که تنوع گونه‌های درختی در منطقه به‌طور مداوم نظارت و ارزیابی شود. از این‌رو، درک دقیق از وضعیت تنوع گونه‌های درختی در اقدامات حفاظتی بسیار حیاتی است. در این پژوهش از تصویر سنتینل-۲ مربوط به فصل‌های تابستان و پاییز (مهرماه) استفاده شد و براساس متغیرهای طیفی و بافتی و اعمال روش‌های رگرسیون جنگل تصادفی و رگرسیون خطی چندمتغیره، امکان برآورد تنوع گونه‌ای جنگل خیرود مورد آزمون قرار گرفت. نتایج حاصل از آماره‌های ارزیابی در این پژوهش نشان داد تصویر سنتینل-۲ نتایج نسبتاً متوسطی در برآورد تنوع گونه‌ای بتا ارائه داده است. وضعیت پستی و بلندی رویشگاه و ساختار ناهمسال جنگل منطقه پژوهش می‌تواند در ارائه این نتیجه تعیین‌کننده باشد. همچنین نتایج مربوط به مدل‌سازی‌ها نشان داد که مدل مربوط به متغیرهای بافتی در برآورد شاخص سورنسن برای فصل پاییز (مهرماه) عملکرد مناسب‌تری داشت.

#### ۵. منابع

- [1] Shang, C., Treitz, P., Caspersen, J., & Jones, T. (2019). Estimation of forest structural and compositional variables using ALS data and multi-seasonal satellite imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 78, 360-371.
- [2] Tripathi, K.S., Roy, A., Kushwaha, D., Lalnunmawia, F., & Lalraminghlova, H. (2016). Perspectives of Forest Biodiversity Conservation in Northeast India. *Journal of Biodiversity, Bioprospecting and Development*, 3(2), 1-9.
- [3] Meng, J., Li, S., Wang, W., Liu, Q., Xie, S., & Ma, W. (2016). Estimation of forest structural diversity using the spectral and textural information derived from SPOT-5 satellite images. *Remote Sensing*, 8(2), 125.
- [4] Nouri, Z., Fakhi, J., Zahedi, A., Qawamuddin Zubeiri, M., & Rahmani, R. (1389). Evaluating the diversity of tree and shrub species and its effect on sustainable forest management (case study: Patom section of Khairudkanar forest). *Journal of Forest and Wood Products*, 63(2), 201-214. (In Persian)

- [5] Cardoso, P., & Riga, F. (2015). BAT – Biodiversity Assessment Tools, an R package for the measurement and estimation of alpha and beta taxon, phylogenetic and functional diversity. *Article in Methods in Ecology and Evolution*, 6(2), 232-236.
- [6] Arekhi, M., Yilmaz, O. Y., Yilmaz, H., & Akyüz, Y. F. (2017). Can tree species diversity be assessed with Landsat data in a temperate forest?. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(11), 1-14.
- [7] Gamfeldt, L., Sanal, T., Bagchi, R., & Jonsson, M. (2013). Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species. *Article in Nature Communications*, 4(1), 1-8.
- [8] Rossi, C., Kneubühler, M., Schütz, M., Schaepman, M. E., Haller, R. M., & Risch, A. C. (2021). Remote sensing of spectral diversity: A new methodological approach to account for spatio-temporal dissimilarities between plant communities. *Ecological Indicators*, 130, 108106.
- [9] Mallinis, G., Chrysafis, I., Korakis, G., Eleanna P., & Apostolos, P.K. (2020). A Random Forest Modelling Procedure for a Multi-Sensor Assessment of Tree Species Diversity. *Journal of Remote Sensing*, 12(7), 1-16.
- [10] Rocchin, D., Boyd, D., & Baptiste Feret, J., (2015). Satellite remote sensing to monitor species diversity: potential and pitfalls. *Remote Sensing in Ecology Conservation*, 2(1), 25-36.
- [11] Anderson, C. (2018). Biodiversity monitoring, earth observations and the ecology of scale. *Ecology Letters*, 21(10), 1572-1585.
- [12] Wang, R., Gamon, J.A., Montgomery, R.A., Townsend, P.A., Zygielbaum, A.I., Bitan, K., Tilman, D., & Cavender-Bares, J. (2016). Seasonal variation in the NDVI—species richness relationship in a prairie grassland experiment (Cedar Creek). *Remote Sensing*, 8, 128.
- [13] Saedmochshi, A., Pir Bavaghar, M., Shabaniyan, N., Fatehi, P. (2019). The possibility of estimating species diversity using Sentinel satellite optical images (case study: Marivan forests). *Forest and wood products. Iranian Natural Resources Journal*, 72(2), 101-110. (In Persian)
- [14] Akbari, H., & Kalbi, S. (2019). Modeling the diversity of tree species in circular forest forests using GeoEye images (Case study: Sari Gardeshi Series). *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 26(2): 51-62. (In Persian)
- [15] Akbari, H., & Kalbi, S. (2016). Determining Pleiades satellite data capability for tree diversity modeling. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 10(1), 348.
- [16] Gyamfi-Ampadu, E., Gebreslasie, M., & Mendoza-Ponce, A. (2021). Evaluating Multi-Sensors Spectral and Spatial Resolutions for Tree Species Diversity Prediction. *Remote Sensing*, 13(5), 1033.
- [17] Marzialetti, F., Cascone, S., Frate, L., Di Febbraro, M., Acosta, A.T.R., & Carranza, M.L. (2021). Measuring Alpha and Beta Diversity by Field and Remote-Sensing Data: A Challenge for Coastal Dunes Biodiversity Monitoring. *Remote Sensing*, 13(10), 1928.
- [18] Fundisi, E., Musakwa W., Ahmed, F.B., & Tesfamichael, S.G. (2020). Estimation of woody plant species diversity during a dry season in a savanna environment using the spectral and textural information derived from WorldView-2 imagery. *PLoS ONE*, 15(6), 1-19.
- [19] Persson, M., Lindberg, E., & Reese, H. (2018). Tree Species Classification with Multi-Temporal Sentinel-2 Data. *Journal of Remote Sensing*, 10(11), 1-17.
- [20] Professors of the Department of Forestry and Forest Economics, (1392). The second revision plan of Nemkhaneh series, University of Tehran Educational and Research Forest (Kheyroud Forest), *Faculty of Natural Resources*, 500 p.
- [21] Krebs, C. J. (1999). *Ecological Methodology*, Benjamin/Cummings Publication, The University of California, 620 p.
- [22] Sorensen, T.A. (1948). A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species content and its application to analyses of the vegetation on Danish commons. *Biologiske Skrifter*, 5, 1-34.
- [23] Zobeiri, M., Majd, A. (1392). Familiarity with remote sensing technology and its application in natural resources. Tehran University Press, 317 p.
- [24] Fatemi, Seyyed Baqer, Rezaei, Youssef. (2016). *Basics of Remote Sensing*. Azadeh Publications, 327 p.

- [25] Hadjimitsis, D.G., Papadavid, G., Agapiou, A., Themistocleous, K., Hadjimitsis, M.G., Retalis, A., Michaelides, S., Chrysoulakis, N., Toullos, L., & Clayton, C.R.I. (2010). Atmospheric correction for satellite remotely sensed data intended for agricultural applications: impact on vegetation indices. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(1), 89-95.
- [26] Li, C., Zhou, L., & Xu, W. (2021). Estimating aboveground biomass using Sentinel-2 MSI data and ensemble algorithms for grassland in the Shengjin Lake Wetland, China. *Remote Sensing*, 13(8), 1595.
- [27] Li, L., Zhou, B., Liu, Y., Wu, Y., Tang, J., Xu, W., Wang, L., & Ou, G. (2023). Reduction in Uncertainty in Forest Aboveground Biomass Estimation Using Sentinel-2 Images: A Case Study of *Pinus densata* Forests in Shangri-La City, China. *Remote Sensing*, 15(3), 559.
- [28] Moghadam, M. (2008). Descriptive and statistical ecology of vegetation. Tehran University Press, 274 p.
- [29] Noorian, N., Shataei Joibari, Sh., & Mohammadi, J. (1996). Investigating the status of diversity of tree and shrub species in forests with different forestry management plans. *Journal of Applied Ecology*, 6(3), 54-43.
- [30] Bayat, M., & Heydari Mustali, S. (2021). Evaluation and comparison of biodiversity indices of tree species in Hyrkan forests (case study: Khairud, Ramsar and Neka forests). *Plant Research Journal (Iranian Biology Journal)*, 34(2), 315-326. (In Persian)
- [31] Khare, S., Latifi, H., & Rossi, S. (2019). Forest beta-diversity analysis by remote sensing: How scale and sensors affect the Rao's Q index. *Ecological Indicators*, 106, 105520.
- [32] Chrysafis, I., Korakis, G., Kyriazopoulos, A.P., & Mallinis, G. (2020). Predicting tree species diversity using geodiversity and Sentinel-2 multi-seasonal spectral information. *Sustainability*, 12(21), 9250.
- [33] Kampouri, M., Kolokoussis, P., Demetre, A., & Vassilia, K. (2018). Mapping of Forest Tree Distribution and Estimation of Forest Biodiversity using Sentinel-2 Imagery in the University Research Forest Taxiarchis in Chalkidiki, Greece. *Geocarto International*, 34(12), 1273-1285.
- [34] Hall-Beyer, M. (2017). Practical guidelines for choosing GLCM textures to use in landscape classification tasks over a range of moderate spatial scales. *International Journal of Remote Sensing*, 38(5), 1312-1338.
- [35] Silver, M., Tiwari, A., & Karnieli, A. (2019). Identifying vegetation in arid regions using object-based image analysis with RGB-only aerial imagery. *Remote Sensing*, 11(19), 2308.