



University of Tehran

Species diversity mapping in Zagros forests using PRISMA

Farshid Sotoreh Bavani¹ | Parviz Fatehi^{2*} | Vahid Etemad³ | Naseh Miri⁴

1. Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: farshid.sotoreh@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: parviz.fatehi@ut.ac.ir
3. Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: vetemad@ut.ac.ir
4. Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: naseh_miri@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:

Research Article

Article History:

Received: 05 June 2025

Revised: 30 July 2025

Accepted: 06 August 2025

Published online: 16 September 2025

Keywords:

*Partial least squares regression,
PRISMA satellite,
Random forest,
Species diversity,
Zagros forests.*

ABSTRACT

Effective biodiversity management is a critical component of maintaining ecosystem dynamics and functionality. In this context, the use of biodiversity indicators as reliable tools for assessment and monitoring is essential. This study evaluates tree and shrub species diversity in the Zagros forests using PRISMA hyperspectral satellite data. Seventy-nine field sample plots, each 45 m × 45 m, were selected through a systematic random sampling approach. Species composition and abundance were recorded in each plot, and Fisher's alpha diversity index was calculated. PRISMA satellite images acquired in June 2024 were downloaded, followed by geometric and radiometric corrections prior to analysis. A Savitzky–Golay filter was applied to reduce noise while preserving spectral information. Pearson correlation analysis was conducted to assess the relationship between field-measured species diversity and spectral reflectance. Species diversity modeling was carried out using two statistical methods: Random Forest (RF) and Partial Least Squares Regression (PLSR). Validation results showed that both models performed similarly; however, the PLSR model ($R^2 = 0.54$, $rRMSE = 6.13$) slightly outperformed the RF model ($R^2 = 0.53$, $rRMSE = 6.88$) in estimating Fisher's alpha diversity. These findings highlight the importance of selecting appropriate modeling approaches in ecological studies and demonstrate that PRISMA hyperspectral imagery is a valuable resource for estimating species diversity in the Zagros forests.

Cite this article: Sotoreh Bavani, F., Fatehi, P., Etemad, V., Miri, N. (2025). Species diversity mapping in Zagros forests Using PRISMA. *Journal of Forest and Wood Products*, 78 (2), 147-162.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2025.398023.1354>



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

DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2025.398023.1354>



دانشگاه تهران

نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۰۵۳۰

سایت نشریه: <https://jfwf.ut.ac.ir>

برآورد شاخص تنوع گونه‌ای در جنگل‌های زاگرس با استفاده از داده‌های ماهواره PRISMA

فرشید ستوره باوانی^۱ | پرویز فاتحی^{۲*} | وحید اعتماد^۳ | ناصح میری^۴

۱. گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. farshid.sotoreh@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. parviz.fatehi@ut.ac.ir
۳. گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. vetemad@ut.ac.ir
۴. گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. naseh_miri@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مدیریت مؤثر تنوع زیستی به‌عنوان یکی از عناصر کلیدی در حفظ پویایی و کارایی بوم‌سازگان‌ها، از اهمیت بالایی برخوردار است. در این راستا، استفاده از شاخص‌های تنوع زیستی به‌عنوان ابزارهایی علمی و معتبر برای مطالعه و سنجش این مشخصه، ضروری به‌نظر می‌رسد. در پژوهش حاضر، به‌منظور بررسی تنوع گونه‌ای درختی و درختچه‌ای در بخشی از جنگل‌های زاگرس از داده‌های ابرطیفی ماهواره PRISMA استفاده شد. با هدف توسعه مدل‌ها و اعتبارسنجی آنها ۷۹ قطعه نمونه زمینی با ابعاد مربعی شکل ۴۵×۴۵ متر به روش نمونه‌برداری تصادفی-منظم انتخاب و نوع و تعداد گونه‌ها در هر قطعه نمونه برداشت شدند. شاخص تنوع گونه‌ای فیشر-آلفا به‌دلیل استفاده گسترده در مطالعات اکولوژیک، انتخاب و میزان آن در هر قطعه نمونه محاسبه شد. تصاویر ماهواره‌ای PRISMA مربوط به خردادماه سال ۱۴۰۳، پس از انجام تصحیح‌های هندسی و رادیومتر، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. به‌منظور کاهش نویز و حفظ اطلاعات مفید، از فیلتر ساویتزکی-گولای استفاده شد. همبستگی بین شاخص تنوع گونه‌ای اندازه‌گیری شده زمینی و باندهای طیفی با استفاده از تحلیل همبستگی پیرسون بررسی شد. مدل‌سازی تنوع گونه‌ای با استفاده از دو روش آماری جنگل تصادفی (RF) و رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR) انجام شد. ارزیابی داده‌های اعتبارسنجی نشان داد که هر دو مدل PLSR با $R^2 = 0.54$ ، $rRMSE = 6/15$ و RF با $R^2 = 0.53$ ، $rRMSE = 6/88$ ، $rRMSE = 0.04$ عملکرد تقریباً یکسانی در برآورد شاخص تنوع گونه‌ای فیشر-آلفا داشتند و تفاوت بین آنها از نظر آماری معنی‌دار نیست. نتایج این مطالعه نشان داد که تصاویر ابرطیفی ماهواره PRISMA ابزاری نویدبخش برای برآورد تنوع گونه‌ای جنگل‌های زاگرس هستند.

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵

کلیدواژه‌ها:

جنگل تصادفی،

جنگل‌های زاگرس،

تنوع گونه‌ای،

رگرسیون حداقل مربعات جزئی،

ماهواره PRISMA.

استناد: ستوره باوانی؛ فرشید، فاتحی؛ پرویز، اعتماد؛ وحید، میری؛ نا ص (۱۴۰۴). برآورد شاخص تنوع گونه‌ای در جنگل‌های زاگرس با استفاده از داده‌های ماهواره PRISMA.

نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب، ۷۸ (۲)، ۱۶۲-۱۴۷. DOI: <https://10.22059/jfwf.2025.398023.1354>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

<https://doi.org/10.22059/jfwf.2025.398023.1354>



۱. مقدمه

بوم‌سازگان‌های جنگلی به‌عنوان یکی از منابع غنی تنوع زیستی در سطح جهانی شناخته می‌شوند [۱]. این بوم‌سازگان‌ها با ایجاد زیستگاه‌های متنوع برای گونه‌های مختلف گیاهی و جانوری، نقش مهمی در تأمین خدمات محیط‌زیستی، تنظیم چرخه آب و کاهش اثرات تغییرات اقلیمی ایفا می‌کنند [۲، ۳، ۴]. تنوع زیستی می‌تواند شامل تنوع ژنتیکی، تنوع گونه‌ای (شامل تعداد گونه‌ها)، تنوع اکوسیستمی (تنوع جوامع) و فرآیندهای بوم‌شناسی باشد [۵]. در این میان، تنوع گونه‌ای درختی و درختچه‌ای به دلیل اهمیت آن در حفظ بوم‌سازگان‌های جنگلی و پایداری آنها، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۶]. افزایش تنوع گونه‌ای می‌تواند به بهبود کارکردهای جنگل از جمله افزایش تولید چوب، ذخیره کربن و افزایش تاب‌آوری جنگل در برابر آشفته‌گی‌ها منجر شود [۷، ۸].

فعالیت‌های انسانی نظیر تخریب زیستگاه‌ها، انقراض جمعیت‌ها و گسترش گونه‌های مهاجم، تهدیدی جدی برای تنوع گونه‌ای محسوب می‌شوند [۹، ۱۰]. بنابراین، تعیین سریع و دقیق نقشه مکانی تنوع گونه‌های درختی جنگل و بررسی تأثیر آن بر خدمات بوم‌سازگان، برای درک و مقابله با چالش‌های تغییرات آب‌وهوایی و پاسخگویی به نیازهای پیشرفته مدیریت جنگل، امری ضروری است. اگرچه روش‌های اندازه‌گیری زمینی تنوع گونه‌ای دقیق هستند [۱۱، ۱۲]، اما این روش‌ها نیاز به زمان زیاد و هزینه بالایی دارند و در مقیاس‌های وسیع عملاً امکان‌پذیر نیستند [۱۳، ۱۴، ۱۵]. به این منظور، امروزه سنجش از دور با فراهم کردن داده‌های گسترده و با دقت مناسب، ابزاری کارآمد برای ارزیابی و برآورد تنوع گونه‌ای در مقیاس‌های مختلف به‌شمار می‌رود. این داده‌ها به پژوهشگران اجازه می‌دهد تا با هزینه و زمان کمتر، برآوردهای مناسبی از وضعیت تنوع گونه‌ای داشته باشند [۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹]. در این رویکرد فرض بر آن است که گونه‌های گیاهی دارای بازتاب منحصر به فردی هستند؛ بنابراین، تغییرات و تنوع بازتاب در طیف‌های مختلف ناشی از تاج‌پوشش گیاهی می‌تواند به‌عنوان معیاری برای برآورد تنوع گونه‌ای استفاده شود [۲۰]. با پیشرفت‌های چشمگیر در فناوری‌های سنجش از دور، قابلیت‌های داده‌های ماهواره‌ای نیز به‌طور قابل‌توجهی بهبود یافته است. یکی از مهم‌ترین این پیشرفت‌ها، تفاوت در تفکیک طیفی داده‌هاست که امکان دسترسی به انواع مختلفی از داده‌های سنجش از دور با توان تفکیک طیفی متفاوت را فراهم کرده است. در حال حاضر، داده‌های چندطیفی رایج‌ترین نوع داده‌ها به‌شمار می‌روند و به‌همین دلیل بیشتر مورد توجه پژوهشگران زمینه تنوع گونه‌ای قرار گرفته است. Ozkan و همکاران (۲۰۱۶)، با هدف ارزیابی کارایی تصاویر ماهواره‌های Landsat 8، ASTER VNIR و RapidEye برای برآورد تنوع گونه‌های چوبی در جنگل‌های ترکیه نشان دادند که تصاویر RapidEye با توان تفکیک مکانی بالاتر عملکرد بهتری در برآورد تنوع گونه‌ای دارد [۲۱]. Arekhi و همکاران (۲۰۱۷)، در پژوهشی کارایی داده‌های چندزمانه ماهواره Landsat 8 برای برآورد تنوع گونه‌ای درختی در جنگل‌های معتدله ترکیه ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که شاخص NDVI در ماه ژوئن بالاترین کارایی را در برآورد تنوع گونه‌ای داشت، در حالی که $R^2 = 0/36$ نشان‌دهنده محدودیت‌های موجود در قدرت تفکیک مکانی و طیفی ماهواره Landsat 8 بود [۲۲]. Mallinis و همکاران (۲۰۲۰)، نیز کارایی داده‌های Landsat 8، Sentinel-2، RapidEye و WorldView برای برآورد تنوع گونه‌ای در جنگل‌های یونان بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که تصاویر حاصل از ماهواره WorldView نتایج بهتری برای شاخص‌های تنوع شانون ($R^2 = 0/44$) و سیمپسون ($R^2 = 0/37$) در مقایسه با سایر تصاویر ارائه داد [۲۳]. Akbari و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی با هدف مدل‌سازی تنوع گونه‌های درختی را در جنگل‌های هیرکانی با داده‌های GeoEye نشان دادند که این داده‌ها دارای کارایی متوسطی ($R^2 = 0/37$) و $rRMSE = 46$ در برآورد تنوع گونه درختی دارند [۲۴]. Ghaisaryan و همکاران (۲۰۲۳)، در پژوهشی با هدف بررسی شاخص‌های تنوع گونه‌ای در جنگل‌های هیرکانی با استفاده از داده‌های ماهواره Sentinel-2 نشان دادند که این داده‌ها در برآورد تنوع گونه‌ای عملکرد متوسطی دارند [۲۵]. بررسی پژوهش‌های قبلی ارزیابی داده‌های چندطیفی تأییدی بر توانایی محدود این داده‌ها در تشخیص ویژگی‌های طیفی پیچیده‌تر دارند.

در مقایسه با سنجش از دور چندطیفی که به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد، سنجش از دور ابرطیفی قادر است تصاویر را با صدها باند طیفی بسیار باریک برداشت کند [۲۵]. توان تفکیک طیفی بسیار بالای این تصاویر تمایز بین‌گونه‌ای در بوم‌سازگان‌های جنگلی را می‌تواند بهبود ببخشد [۲۶]. به‌علاوه، این توانایی باعث می‌شود سنجش از دور ابرطیفی بتواند ویژگی‌های

ساختاری (زیست‌فیزیکی) و زیست‌شیمیایی مانند، شاخص سطح برگ^۱ (LAI)، ساختار برگ و مقدار کلروفیل را از طریق تفاوت‌های طیفی بین گونه‌ها ثبت کند. بنابراین، سنجش از دور ابرطیفی به‌عنوان روشی مناسب برای پایش تنوع گونه‌ای در مقیاس‌های مختلف استفاده شود [۲۷]. بوم‌سازگان جنگلی زاگرس با بیش از ۱۹۰ گونه درختی و درختچه‌ای، به‌عنوان یکی از مناطق رویشی بالارزش در ایران شناخته می‌شوند. بنابراین، ارزیابی تنوع گونه‌ای این جنگل‌ها برای حفاظت از پوشش گیاهی و ارائه راهکارهای مدیریتی مناسب، امری ضروری است [۲۸، ۲۹]. اگرچه مطالعات محدودی برای برآورد تنوع گونه‌ای در این جنگل‌ها انجام شده است، اما همین مطالعات اندک به استفاده از داده‌های چندطیفی محدود شده است. در این راستا، Saedmochesi و همکاران (۲۰۱۹)، در پژوهشی تنوع گونه‌ای چوبی را در بخشی از جنگل‌های زاگرس با استفاده از داده‌های Sentinel-2 و رگرسیون خطی چندمتغیره گام‌به‌گام^۲ (SMLR) برآورد کردند. نتایج نشان داد که داده‌های چندطیفی Sentinel-2 برآوردی متوسطی از تنوع گونه‌ای در جنگل‌های زاگرس ارائه دادند [۳۰]. در پژوهشی دیگر، Nazariany و همکاران (۲۰۲۲) قابلیت داده‌های چندطیفی Sentinel-2 را در برآورد شاخص‌های تنوع زیستی، غنا و یکنواختی در جنگل‌های زاگرس مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که داده‌های Sentinel-2 کارایی ضعیفی در برآورد شاخص‌های مورد استفاده داشته است [۳۱].

شاخص فیشر-آلفا، به‌دلیل حساسیت بالا به هر دو مؤلفه غنای گونه‌ای و یکنواختی توزیع گونه‌ها، کارایی بالایی در نشان دادن و برجسته کردن تفاوت‌های ظریف و کوچک در ترکیب گونه‌ای و ساختار جامعه گیاهی دارد و در مطالعات تنوع گونه‌ای توسط اکولوژیست‌ها به شکل گسترده‌ای استفاده می‌شود. با توجه به اهمیت بالای تنوع گونه‌ای در بوم‌سازگان زاگرس و کمبود مطالعات مبتنی بر داده‌های ابرطیفی، پژوهش حاضر با هدف بررسی کارایی تصاویر ابرطیفی ماهواره^۳ PRISMA در برآورد شاخص تنوع گونه‌ای فیشر-آلفا انجام شد. این مطالعه با بهره‌گیری از روش‌های آماری رگرسیون حداقل مربعات جزئی^۴ (PLSR) و جنگل تصادفی^۵ (RF) اجرا شد تا عملکرد مدل‌ها در برآورد دقیق تنوع گونه‌ای سنجیده شود.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. روند کلی برآورد شاخص تنوع گونه‌ای فیشر-آلفا

در این پژوهش، یک چارچوب روش‌شناسی جامع برای برآورد تنوع گونه‌ای با استفاده از داده‌های زمینی و تصاویر ماهواره‌ای PRISMA تدوین شده است. به‌منظور توسعه مدل‌ها و همچنین اعتبارسنجی و ارزیابی صحت نتایج مدل‌های مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های زمینی از منطقه مورد مطالعه برداشت شد. داده‌های زمینی با روش نمونه‌برداری تصادفی-منظم جمع‌آوری و شاخص فیشر-آلفا برای سنجش تنوع گونه‌ای محاسبه شد. تصاویر ماهواره‌ای پیش‌پردازش شده و ویژگی‌های طیفی مرتبط با هر قطعه نمونه استخراج شد. مدل‌سازی تنوع گونه‌ای با بهره‌گیری از روش‌های RF و PLSR انجام شد. هر مرحله از فرآیند به‌طور دقیق در شکل ۱ نشان داده شده و شرح مفصل مراحل مربوطه در بخش‌های مختلف مطالعه ارائه شده است.

۲-۲. منطقه مورد مطالعه

پژوهش حاضر در جنگل‌های بخش نمشیر دهستان کانی‌سور، واقع در فاصله ۳۰ کیلومتری بانه در شمال غرب استان کردستان به‌عنوان بخشی از جنگل‌های زاگرس شمالی انجام شد (شکل ۲). منطقه جنگلی مورد پژوهش با مساحت ۳۲۲ هکتار در گستره جغرافیایی ۴۵° ۱۴' ۴۵" تا ۴۵° ۴۳' ۱۹" طول شرقی و ۳۶° ۰' ۵۸" تا ۳۶° ۲۱' ۴" عرض شمالی قرار دارد. این منطقه دارای متوسط ارتفاع از سطح دریا ۱۵۶۰ متر و میانگین بارندگی سالانه آن ۷۶۰ میلی‌متر است که به‌صورت باران و برف، عمدتاً در فصل زمستان رخ می‌دهد [۳۲]. معیشت جوامع محلی عمدتاً بر پایه کشاورزی، جنگلداری سنتی و دامداری است و وابستگی زیادی به منابع

^۱ Leaf Area Index

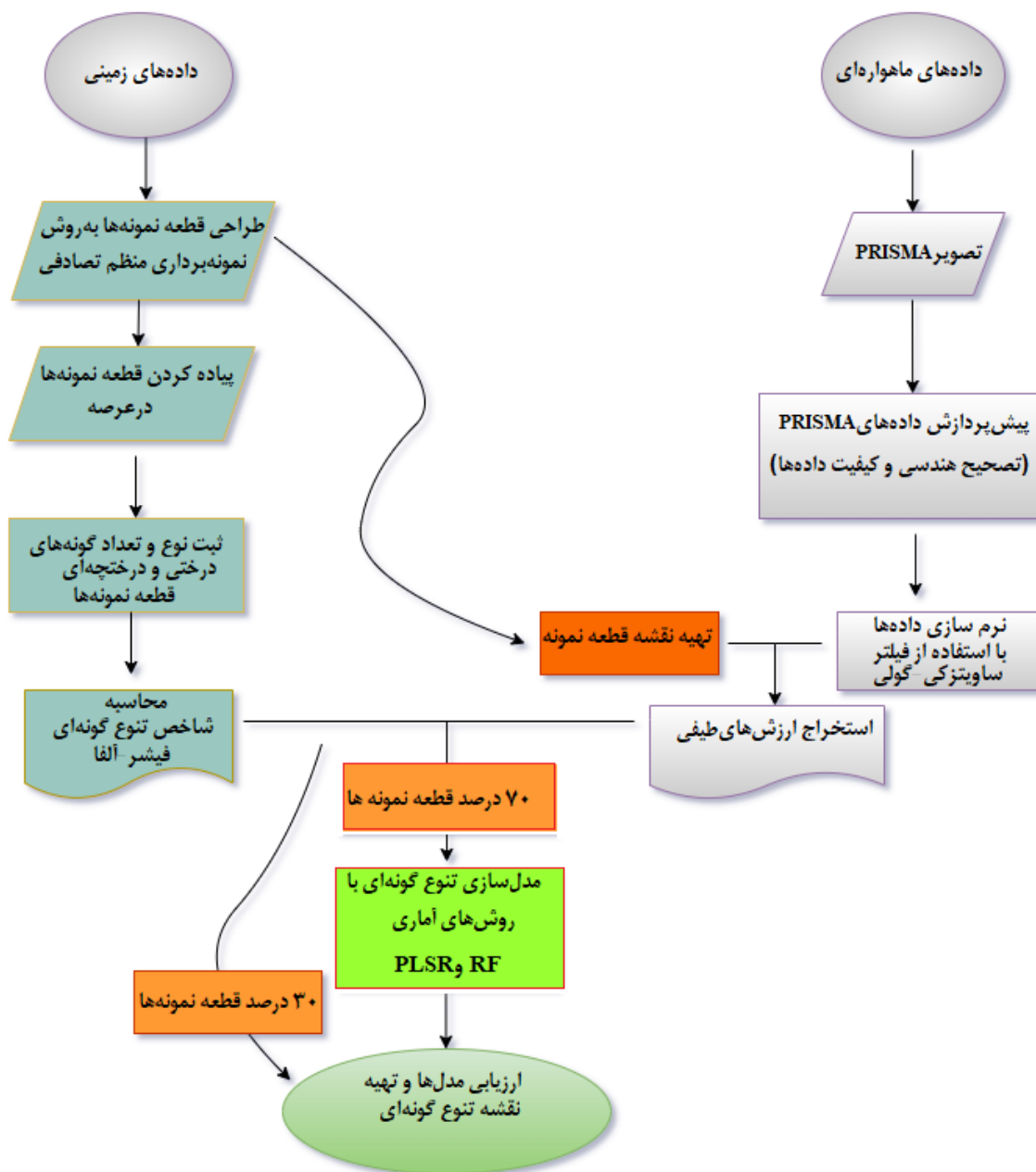
^۲ Stepwise Multiple Linear Regression

^۳ PRecursore IperSpettrale della Missione Applicativa

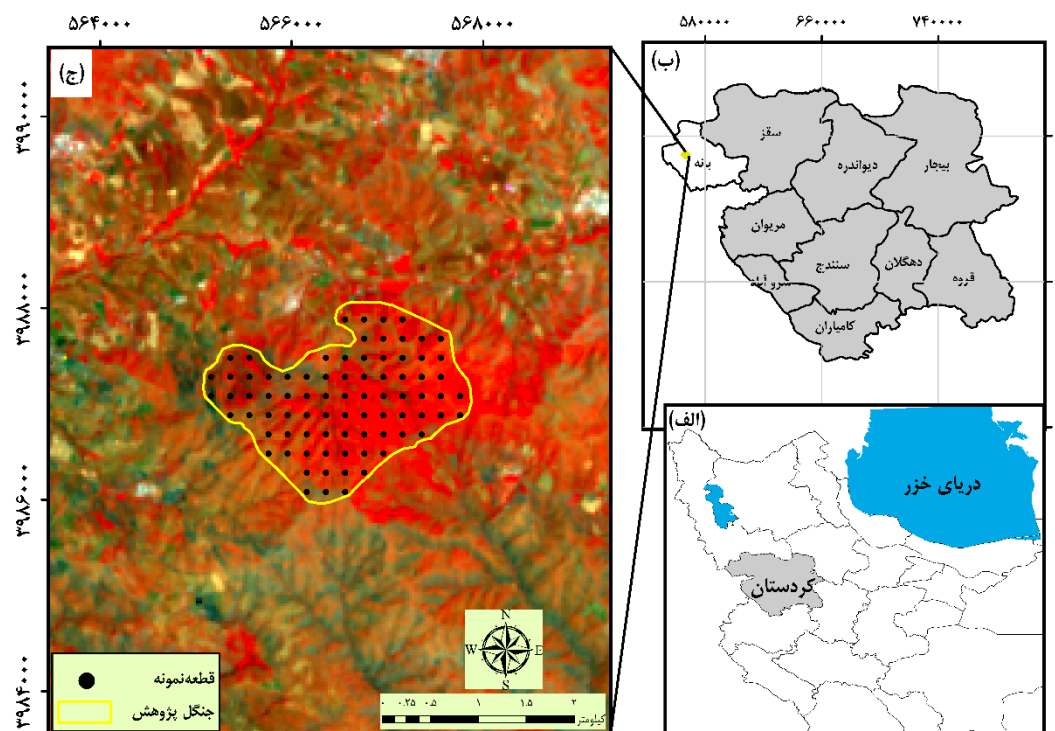
^۴ Partial Least Squares Regression

^۵ Random Forest

جنگلی دارند. در این منطقه، فرم غالب جنگل‌ها شاخه‌زاد است و فرم دانه‌زاد نیز به‌صورت پراکنده مشاهده می‌شوند و در نتیجه، هر دو فرم شاخه‌زاد و دانه‌زاد در پوشش جنگلی منطقه حضور دارند. مهم‌ترین کاربردهای این جنگل‌ها شامل تولید علوفه، چرا و تأمین چوب هیزمی و برداشت محصولات غیرچوبی است [۳۲]. گونه‌های درختی غالب جنگل مورد مطالعه وی‌ول (*Quercus libani* Oliv.)، مازودار (*Quercus infectoria* Olive.) و برودار (*Quercus brantii* Lindl.) هستند.



شکل ۱. روند کلی برآورد شاخص تنوع گونه‌ای فیشر-آلفا در پژوهش حاضر



شکل ۲. موقعیت جنگل مورد پژوهش در ایران (الف)، استان کردستان و شهرستان بانه (ب) و ترکیب رنگی کاذب (NIR, Red, Green) تصویر PRISMA همراه با موقعیت مرکز قطعه‌نمونه‌های زمینی (ج)

۲-۳. داده‌های زمینی

به منظور جمع‌آوری داده‌های زمینی از روش نمونه‌برداری تصادفی-منظم استفاده شد. بدین صورت که تعداد ۷۹ قطعه‌نمونه با شبکه‌آماربرداری 200×200 متر در محدوده جنگل مورد پژوهش طراحی و نقشه آنها به صورت نقطه‌ای تهیه شد (شکل ۲-ج). مختصات نقاط به گیرنده موقعیت‌یاب جهانی^۱ (GPS) مدل Garmin Map64s انتقال داده شد. موقعیت هر قطعه‌نمونه با استفاده از گیرنده GPS بر روی زمین بازاریابی و به عنوان گوشه شمال غرب قطعه‌نمونه در نظر گرفته شد. به منظور پیاده‌سازی هر قطعه‌نمونه با ابعاد مربعی شکل 45×45 متر در عرصه از متر نواری و قطب‌نمای سونتو استفاده شد. اضلاع قطعه‌نمونه‌ها، براساس موقعیت مکانی گوشه شمال غربی موجود، در عرصه برداشت شدند (شکل ۳). با توجه به اندازه تفکیک مکانی ۳۰ متر تصاویر ماهواره‌ای PRISMA و در نظر گرفتن خطای هندسی تصاویر، اندازه قطعه‌نمونه‌ها ۴۵ متر در نظر گرفته شد تا اثر خطای هندسی به حداقل برسد. در هر قطعه‌نمونه تعداد و نوع گونه‌های درختی و درختچه‌ای و اطلاعات تکمیلی دیگری مانند وضعیت فیزیوگرافی، میزان تاج‌پوشش و پوشش علفی کف در خرداد و تیرماه سال ۱۴۰۲ برداشت شدند.

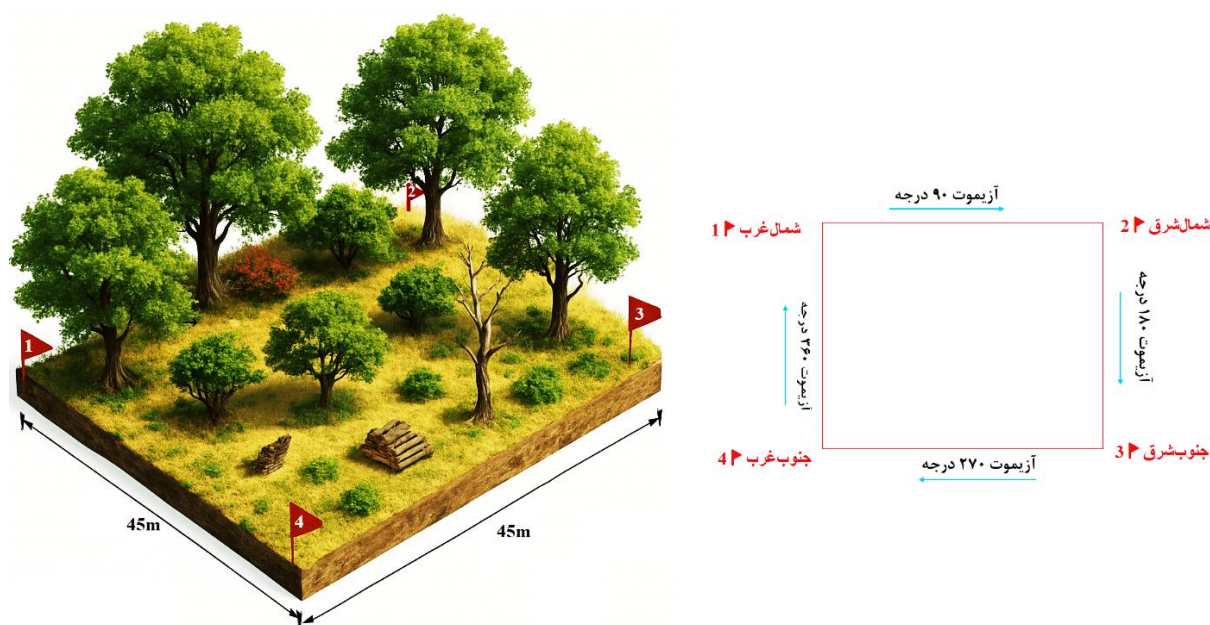
در پژوهش حاضر، برای بررسی تنوع گونه‌ای جنگل مورد مطالعه از شاخص تنوع فیشر-آلفا استفاده شد. این شاخص که اولین بار توسط Fisher و همکاران (۱۹۴۳)، توسعه داده شده است، برای سنجش ترکیب و تنوع گونه‌ها در جامعه‌ها استفاده می‌شود [۳۳]. با استفاده از این شاخص، می‌توان نسبت‌ها و فراوانی‌های مختلف گونه‌ها را در یک جامعه مورد بررسی و ارزیابی قرار داد. شاخص ذکر شده قادر است به عنوان یک آماره حساس به تغییرات در ترکیب جمعیت و تنوع زیستی، استفاده شود. به علاوه این شاخص می‌تواند ارتباط‌ها و الگوهای پیچیده‌تری در ترکیب گونه‌ها را شناسایی کند. شاخص فیشر-آلفا براساس توزیع لگاریتمی گونه‌ها در جامعه محاسبه می‌شود (رابطه ۱).

^۱Global Positioning System

$$S = \alpha \cdot \ln(1 + N/\alpha)$$

(رابطه ۱)

در این رابطه، S : تعداد گونه‌های مشاهده شده، N : تعداد کل افراد شمارش شده و α : مقدار شاخص فیشر-آلفا نشان می‌دهد. برای محاسبه آن از بسته *Vegan* در محیط نرم‌افزار R 4.3.2 استفاده شد.



شکل ۳. نحوه پیاده‌سازی هر قطعه نمونه در عرصه (منبع: نویسندگان).

۲-۴. داده‌های مورد استفاده

داده‌های ابرطیفی ماهواره PRISMA که دارای دو سنجنده VNIR (محدوده طیفی ۴۰۰ تا ۱۰۱۰ نانومتر با ۶۶ باند طیفی) و SWIR (محدوده طیفی ۹۲۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر با ۱۷۴ باند طیفی) است، در این پژوهش استفاده شد. این تصاویر از وبسایت آژانس فضایی ایتالیا^۱ (ASI) با آدرس <https://PRISMA.asi.it/> قابل دانلود هستند. ماهواره PRISMA دارای ۲۴۰ باند طیفی پیوسته در محدوده‌های طول موج مرئی^۲ (Visible)، مادون قرمز نزدیک^۳ (NIR) و مادون قرمز کوتاه^۴ (SWIR) با دامنه طیفی ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر است. این داده‌ها در سطوح تصحیح مختلف L0، L1 و L2 توسط سازمان مربوطه ارائه می‌شوند. سطح صفر (L0) شامل داده‌های خام است [۳۴]، سطح یک (L1) شامل اعمال تصحیحات هندسی و رادیومتری (بازتاب در بالای اتمسفر) است، در حالی که سطح دو (L2) تصحیحات اتمسفری را بر روی داده‌های L1 اعمال می‌کند و به زیرمجموعه‌های L2B، L2C و L2D تقسیم می‌شود [۳۵، ۳۶]. این ساختار به کاربران امکان می‌دهد تا داده‌های مناسب را براساس نیازهای خود انتخاب کنند. در پژوهش حاضر، تصویر مربوط به تاریخ ۲۸ خردادماه سال ۱۴۰۳، که متناسب با زمان برداشت داده‌های زمینی بود، در سطح تصحیح L2D با فرمت HE5 دریافت شد. ماهواره PRISMA داده‌های ابرطیفی را با اندازه تفکیک مکانی ۳۰ متر برداشت می‌کند و علاوه بر آن، یک باند پانکروماتیک با تفکیک مکانی ۵ متر (محدوده طیفی ۷۰۰-۴۰۰ نانومتر) نیز دارد. همچنین برای بررسی هندسه تصاویر، از دو برگ نقشه رقومی سه‌بعدی (3D) و دو بعدی (2D) در فرمت DGN با شماره‌های 51622SW و 51623SE و سیستم مبنای WGS84 به منظور بررسی هندسه تصاویر که توسط سازمان نقشه‌برداری کشور در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ تهیه شده‌اند، استفاده شد.

^۱Italian Space Agency

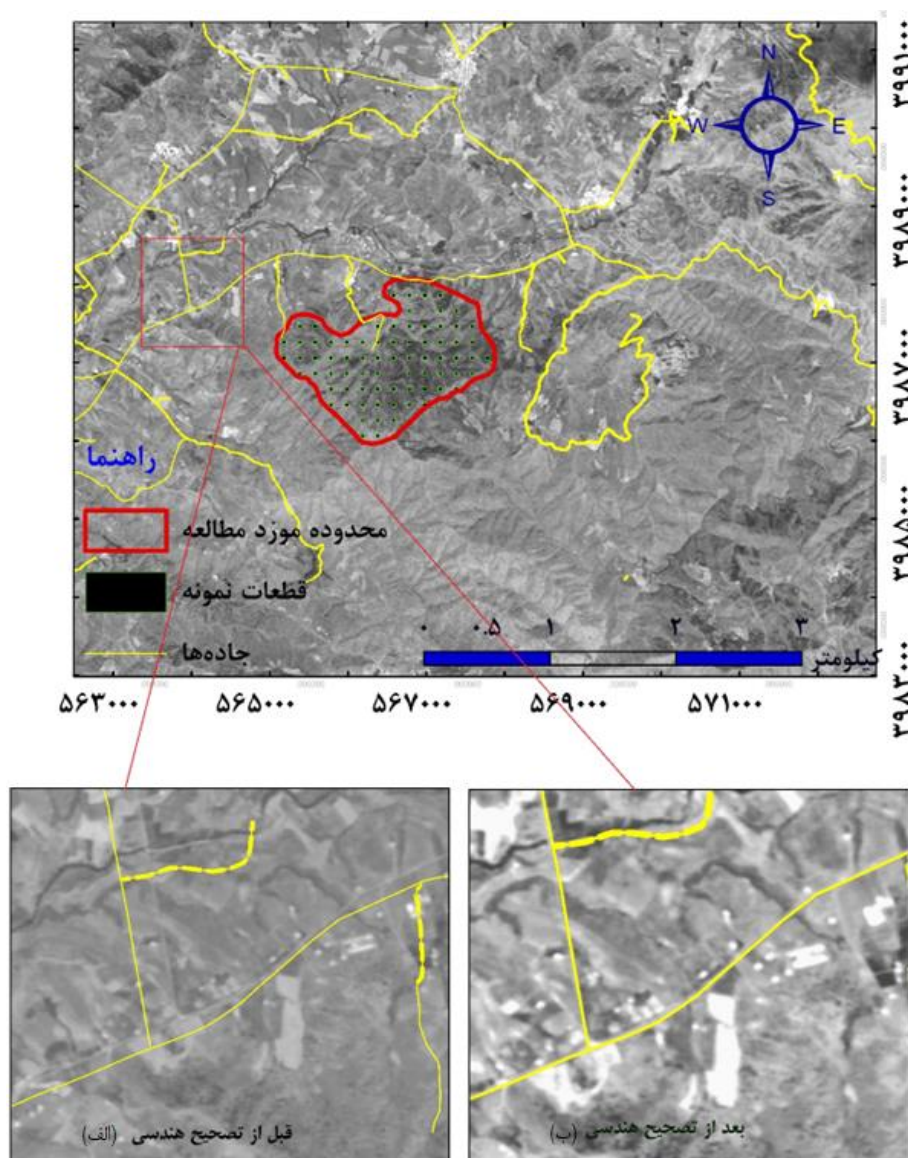
^۲Visible

^۳Near Infrared

^۴Short-Wave Infrared

۲-۵. پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای

قبل از به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای در تجزیه و تحلیل‌ها، لازم است ابتدا داده‌ها از نظر هندسی و رادیومتری ارزیابی شوند. به‌منظور بررسی هندسه تصاویر PRISMA، از لایه‌های وکتوری جاده‌ها و آبراهه‌های استخراج شده از نقشه‌های توپوگرافی استفاده شد. وجود خطاهای هندسی قابل توجه و عدم انطباق مکانی بین تصویر ماهواره‌ای مورد استفاده و لایه‌های وکتوری، ضرورت انجام تصحیح هندسی پیش از هر گونه استفاده را ایجاب کرد (شکل ۴-الف). جهت تصحیح هندسی تصویر، روش تطابق تصویر با نقشه به‌کار گرفته شد و ۳۶ نقطه کنترل زمینی^۱ (GCP) با پراکنش مناسب از تقاطع جاده‌ها و آبراهه‌ها انتخاب شد. در فرآیند تصحیح هندسی، از درون‌یابی چندجمله‌ای درجه یک و نمونه‌برداری مجدد نزدیک‌ترین همسایه استفاده شد. تطابق هندسی با ریشه میانگین مربعات خطا^۲ (RMSE) برابر با ۰/۳ پیکسل (حدود ۹ متر) انجام گرفت. این دقت مکانی در محدوده زیرپیکسل، نشان‌دهنده بهبود قابل توجه و صحت مطلوب فرآیند تصحیح هندسی است (شکل ۴-ب).



شکل ۴. تصاویر سنجنده PRISMA قبل (الف) و بعد از تصحیح هندسی (ب) در منطقه پژوهش

^۱Ground Control Points

^۲Root Mean Square Error

ماهواره PRISMA از سنجنده نوری خطی pushbroom بهره می‌برد؛ مانند سایر انواع سنجنده‌ها، تصاویر حاصل ممکن است دارای خطاهای رادیومتری باشند که بسته به نوع سنجنده و شرایط برداشت، ماهیت و مقدار این خطاها متفاوت است. بر همین اساس، بررسی و شناسایی باندهایی که دارای اختلال و نویز هستند، ضروری است [۳۷]. در پژوهش حاضر، در ابتدا کیفیت داده‌ها با بررسی دامنه ارزش‌های طیفی، منحنی طیفی پدیده‌ها و تشخیص الگوهای غیرطبیعی و تغییرات ناگهانی بازتاب بر روی تصاویر انجام شد. در مجموع ۴۰ باند طیفی که دارای کیفیت رادیومتری نامناسب بودند یا در محدوده جذب آب قرار داشتند، حذف و از ادامه فرآیند تجزیه و تحلیل‌ها کنار گذاشته شدند. باندهای باقی‌مانده که دارای نوسانات جزئی و نویز بودند، با استفاده از فیلتر ساویتزکی-گولای^۱ مورد نرم‌سازی^۲ و رفع نویز^۳ قرار گرفتند. نرم‌سازی داده‌ها، یک تکنیک کاربردی در پردازش تصویر است که برای حذف نویز و بهبود کیفیت سیگنال‌ها به کار می‌رود. این فرآیند با کاهش نوسانات شدید و حذف نویزهای با فرکانس بالا، موجب نرم‌سازی داده‌ها می‌شود [۳۸].

در سال ۱۹۶۴، آبراهام ساویتزکی^۴ و مارسل گولای^۵ روشی برای نرم‌سازی داده‌ها معرفی کردند که مبتنی بر برازش چندجمله‌ای محلی به روش کمترین مربعات است. این روش قادر است نویزهای با فرکانس بالا را با حفظ شکل کلی سیگنال کاهش و حذف کند [۳۹]. این فیلتر به عنوان یک فیلتر پایین‌گذر عمل می‌کند و عملکرد آن به دو متغیر کلیدی یعنی اندازه پنجره^۶ و درجه چندجمله‌ای^۷ وابسته است. در این پژوهش اندازه پنجره برابر با ۴ و درجه چندجمله‌ای برابر با ۲ در نظر گرفته شد [۴۰].

۲-۶. مدل سازی تنوع گونه‌ای

به منظور تجزیه و تحلیل‌های آماری در پژوهش حاضر، ابتدا تمام باندهای ماهواره PRISMA بررسی شدند. پس از حذف باندهای دارای نویز و محدوده جذب آب (طول موج‌های ۱۳۴۹ تا ۱۴۵۹ نانومتر و ۱۷۹۳ تا ۱۹۷۵ نانومتر)، در نهایت ۱۹۴ باند طیفی برای تجزیه و تحلیل آماری انتخاب شدند. در گام نخست، برای بررسی رابطه بین این باندهای طیفی و شاخص تنوع گونه‌ای فیشر-آلفا، تحلیل همبستگی پیرسون با استفاده از نرم‌افزار R 4.3.2 انجام شد. سطح معنی داری نتایج همبستگی نیز در سطوح ۹۹ و ۹۵ درصد مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین، به منظور بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها، از آزمون شاپیرو-ویلک استفاده شد. در ادامه، مدل سازی و برآورد شاخص تنوع گونه‌ای فیشر-آلفا با استفاده از دو روش رگرسیونی شامل رگرسیون کمترین مربعات جزیی (PLSR) و جنگل تصادفی (RF)، براساس ۷۰ درصد داده‌ها (۵۵ قطعه نمونه) انجام شد. PLSR یک روش پارامتری است که سازگاری بالایی با هم‌خطی زیاد بین متغیرهای مستقل (در اینجا باندهای طیفی) دارد و با کاهش ابعاد داده‌ها، به تبیین دقیق‌تر روابط بین متغیرهای مستقل و وابسته کمک می‌کند. این روش به‌ویژه در شرایطی که تعداد متغیرهای مستقل بیشتر از تعداد مشاهدات باشد، کاربردی و مؤثر است. PLSR با استفاده از بسته *pls* در محیط R 4.3.2 انجام شد. مدل RF به عنوان یک روش ناپارامتری یادگیری ماشین، با ایجاد مجموعه‌ای از درختان تصمیم و ترکیب پیش‌بینی‌های آنها، توانایی بالایی در تحلیل داده‌های پیچیده ارائه می‌دهد [۴۱]. مهمترین متغیرهای قابل تنظیم در این مدل، تعداد درخت‌ها (*ntree*) و تعداد ویژگی‌های انتخاب شده برای هر درخت (*mtry*) هستند؛ که برای *ntree* مقادیر مختلف شامل ۵۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ و برای *mtry* مقدار ۱۶۰ در نظر گرفته شدند. در این پژوهش، مدل RF براساس بسته *randomForest* در نرم‌افزار R 4.3.2 اجرا شد.

در این پژوهش، ابتدا از ضریب تبیین^۸ (R^2) برای ارزیابی کارایی مدل سازی استفاده شد؛ این معیار نشان‌دهنده نسبت تبیین متغیرهای برآوردکننده مدل نسبت به متغیرهای پاسخ است. علاوه بر این، به منظور در نظر گرفتن کامل‌تر تأثیر خطاها بر دقت مدل،

^۱Savitzky-Golay

^۲Smoothing

^۳Noise-filtering

^۴Abraham Savitzky

^۵Marcel Golay

^۶Filter Width

^۷Degree of smoothing Polynomial

^۸Coefficient of Determination

از RMSE و ریشه میانگین مربعات خطای نسبی^۱ (rRMSE) برای ارزیابی عملکرد مدل استفاده شد. RMSE اندازه بزرگی میانگین خطاها را توصیف می‌کند و معمولاً برای مقایسه عملکرد مجموعه‌های مختلف متغیرهای مورد استفاده در مدل‌سازی به کار می‌رود. rRMSE نیز RMSE را براساس میانگین مقادیر واقعی، نرمال‌سازی می‌کند. ارزیابی مدل‌ها با استفاده از معیارهای آماری ذکر شده براساس ۳۰ درصد قطعه‌نمونه‌های زمینی (۲۴ قطعه‌نمونه) که از ابتدا کنار گذاشته شده بودند، انجام شد.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

آماره‌های توصیفی حاصل از داده‌های زمینی شاخص فیشر-آلفا برای ارزیابی تنوع گونه‌ای در جنگل‌های منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که میانگین این شاخص برابر با ۰/۴۵ و دامنه آن بین ۰/۳۹ تا ۰/۵۲ بوده است. مقدار نسبتاً پایین انحراف معیار (۰/۳)، ثبات نسبی شاخص مورد بررسی را در جنگل مورد پژوهش نشان می‌دهد. این امر می‌تواند ناشی از تأثیر یکنواخت عوامل محیطی و اعمال مدیریت سنتی در سطح کل منطقه باشد که از بروز نوسانات شدید در الگوهای تنوع گونه‌ای درختی و درختچه‌ای جلوگیری کرده است. همچنین، مقادیر آماره‌های توصیفی حاکی از آن است که تنوع گونه‌ای در جنگل‌های زاگرس در سطح متوسط قرار دارد، اما وجود دامنه نسبتاً محدود در شاخص می‌تواند به عنوان فرصتی برای ارتقاء تنوع از طریق برنامه‌های احیای جنگل و حفاظت از گونه‌های بومی تعبیر شود. مقادیر شاخص فیشر-آلفا در جنگل‌های زاگرس نسبت به مقادیر گزارش شده در جنگل‌های هیرکانی توسط Ghaisaryan و همکاران (۲۰۲۳)، (میانگین ۱/۲۶) پایین‌تر بوده که می‌تواند ناشی از شرایط اکولوژیک سخت‌تر، خشکی اقلیم و دخالت‌های انسانی در جنگل‌های زاگرس باشد [۵].

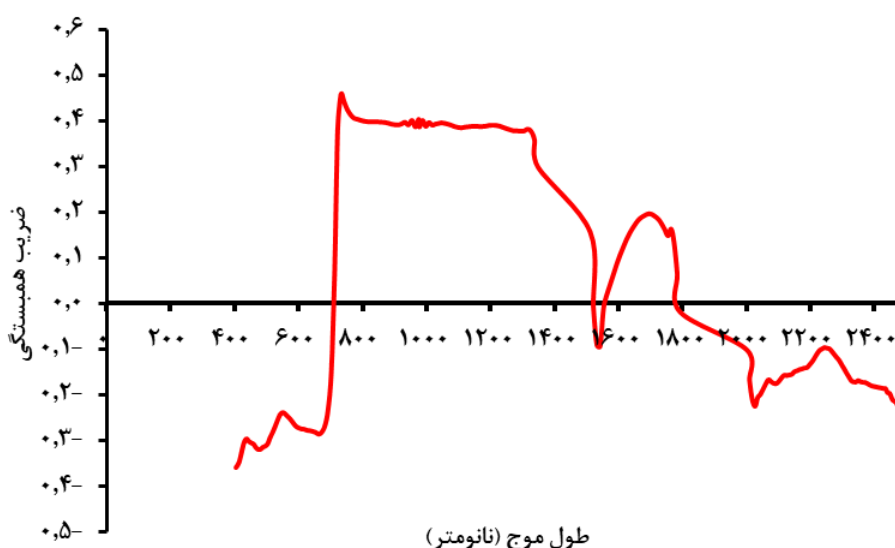
ارزیابی کیفیت هندسی تصاویر ماهواره‌ای PRISMA نشان می‌دهد که پس از انجام تصحیح هندسی، خطای هندسی تصاویر طیفی با اندازه تفکیک مکانی ۳۰ متر، کمتر از یک پیکسل به دست آمد. با این حال، به دلیل اهمیت بالای دقت مکانی در پژوهش‌های علمی، انجام تصحیحات هندسی دقیق ضروری است. نتایج پژوهش Santini و همکاران (۲۰۲۲)، نیز این موضوع را تأیید می‌کنند و بر لزوم اعمال تصحیحات هندسی در تصاویر PRISMA پیش از استفاده از آنها تأکید دارند [۴۲]. هم‌سویی این یافته‌ها، ضرورت تطابق مکانی دقیق را پیش از تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد. بنابراین، به کارگیری از روش‌های تصحیح هندسی تکمیلی نظیر استفاده از GCP و مدل‌های رقومی ارتفاع^۲ (DEM) برای کاهش خطاهای هندسی و افزایش دقت مکانی تصاویر، گامی مهم در جهت افزایش اعتبار نتایج پژوهش‌های آینده خواهد بود.

نتایج همبستگی پیرسون بین باندهای طیفی ماهواره‌ای PRISMA و شاخص تنوع گونه‌ای فیشر-آلفا اندازه‌گیری شده در جنگل‌های زاگرس نشان می‌دهد (شکل ۵) که در محدوده مرئی (۷۰۰-۴۰۰ نانومتر)، همبستگی‌های منفی و به نسبت ضعیف بین باندهای طیفی و شاخص فیشر-آلفا مشاهده می‌شود. این همبستگی منفی نشانه وجود رابطه معکوس بین تنوع گونه‌ای درختی و درختچه‌ای و بازتاب طیفی در این باندهاست؛ به عبارت دیگر، با افزایش تنوع گونه‌ای، میزان بازتاب در این محدوده کاهش می‌یابد. یکی از دلایل این کاهش بازتاب، جذب بیشتر نور توسط کلروفیل برگ‌ها در محدوده مرئی است. گونه‌های مختلف گیاهی دارای میزان و نوع متفاوتی از کلروفیل هستند، که این امر بر جذب نور تأثیر می‌گذارد. بنابراین، در مناطقی با تنوع گونه‌ای بالا، حضور گونه‌هایی با ویژگی‌های فتوسنتزی متفاوت موجب افزایش جذب نور و در نتیجه کاهش بازتاب می‌شود. این پدیده می‌تواند دلیلی برای مشاهده همبستگی منفی بین شاخص تنوع فیشر-آلفا و بازتاب در محدوده مرئی باشد. نتایج پژوهش‌های Miri و همکاران (۲۰۲۴) [۱۴] و Ahmadi و همکاران (۲۰۲۴) [۳۲] در جنگل‌های مشابه نیز حاکی از وجود رابطه منفی بین بازتاب پوشش گیاهی و طول موج‌های محدوده مرئی هستند، که مؤید یافته‌های این پژوهش است. محدوده مادون قرمز نزدیک (NIR: ۷۰۰-۱۰۰۰ نانومتر)، الگوی همبستگی بین شاخص تنوع گونه‌ای و بازتاب طیفی تغییر می‌کند و این همبستگی مثبت می‌شود. شاخص تنوع فیشر-آلفا در طول موج ۷۴۴ نانومتر بیشترین همبستگی مثبت را نشان می‌دهد. در این محدوده طیفی، بازتاب پوشش گیاهی افزایش می‌یابد. بازتاب در ناحیه NIR بیشتر متأثر از ساختار داخلی برگ، تراکم پوشش گیاهی و شاخص سطح برگ است تا از ویژگی‌های

^۱Relative Root Mean Square Error

^۲Digital Elevation Model

زیست‌شیمیایی. در جوامع متنوع‌تر، پوشش گیاهی معمولاً انبوه‌تر و ساختار تاج متراکم‌تر است، که بازتاب NIR را افزایش می‌دهد. افزایش همبستگی مثبت در محدوده NIR می‌تواند به حضور پوشش گیاهی انبوه‌تر و ساختار تاج پیچیده‌تر در جوامع گیاهی با تنوع بالاتر نسبت داده شود. در محدوده طیفی مادون قرمز کوتاه (SWIR: ۱۸۰۰-۲۵۰۰ نانومتر) همبستگی بین شاخص تنوع گونه‌ای و بازتاب طیفی منفی می‌شود. این محدوده به شدت تحت تأثیر محتوای آب گیاهان است. اگر افزایش تنوع گونه‌ای با افزایش گونه‌های با محتوای آب بالاتر همراه باشد (مثل گونه‌های سایه‌پسند یا درختچه‌های خاص)، بازتاب کاهش می‌یابد. این نشان می‌دهد که سنجش از دور قادر به درک تغییرات عملکردی^۱ (اندازه برگ، میزان کلروفیل، محتوای آب برگ و غیره) نیز هست. همبستگی منفی در ناحیه SWIR ممکن است نشان‌دهنده نقش عملکردی تنوع گونه‌ای در تعیین ویژگی‌های زیست‌فیزیکی مانند رطوبت برگ باشد. این یافته با نتایج مطالعه Miri و همکاران (۲۰۲۴) که در آن از داده‌های Sentinel-2 برای برآورد شاخص سطح برگ جنگل‌های زاگرس استفاده شده بود [۱۴]، همسو است و تأییدکننده تأثیر تنوع گونه‌ای بر ویژگی‌های زیست‌فیزیکی قابل سنجش از طریق داده‌های طیفی است.



شکل ۵. تغییرات ضریب همبستگی بین شاخص تنوع گونه‌ای فیشر-آلفا و باندهای طیفی ماهواره PRISMA

با این حال، به‌طور کلی نتایج بررسی همبستگی نشان می‌دهد که شاخص تنوع گونه‌ای فیشر-آلفا در تمامی باندهای طیفی ماهواره PRISMA، همبستگی قوی و منسجمی را نشان نمی‌دهد. این نتیجه با یافته‌های Ghaisaryan و همکاران (۲۰۲۳) در جنگل‌های هیرکانی که با استفاده از تصاویر Sentinel-2 نشان دادند، تنوع گونه‌ای گیاهان تنها همبستگی ضعیفی با داده‌های بازتاب طیفی دارد، نیز همخوانی دارد [۵]. چنین شباهتی در نتایج، بر این نکته تأکید دارد که اگرچه سنجش از دور ابزاری قدرتمند برای پایش پوشش گیاهی است، اما به‌تنهایی نمی‌تواند پیچیدگی‌های کامل تنوع زیستی را آشکار کند و برای دستیابی به درک دقیق‌تر، لازم است داده‌های طیفی با اطلاعات ساختاری (مانند ارتفاع برابر تاج و تراکم پوشش)، داده‌های بوم‌شناختی و برداشت‌های میدانی (مانند فهرست گونه‌ها و اندازه‌گیری شاخص‌های تنوع در محل) ترکیب شوند. تلفیق این اطلاعات با رویکردهای مدل‌سازی یا استفاده از الگوریتم‌های ترکیبی می‌تواند تصویری کامل‌تر و عملی‌تر از وضعیت تنوع زیستی منطقه ارائه دهد.

در این پژوهش، به‌منظور برآورد شاخص تنوع گونه‌ای فیشر-آلفا براساس داده‌های طیفی ماهواره PRISMA، از دو روش RF و PLSR استفاده شد. ارزیابی عملکرد این مدل‌ها براساس معیارهای آماری R^2 ، RMSE و rRMSE برای مدل‌سازی و اعتبارسنجی انجام شد (جدول ۱). نتایج نشان داد مدل RF در مرحله مدل‌سازی عملکرد بسیار مطلوبی داشت و $R^2 = 0.94$ را به‌دست آمد. مقادیر $RMSE = 0.01$ و $rRMSE = 0.97$ برای مدل‌سازی نشان‌دهنده دقت بالای مدل در برازش داده‌های آموزشی است. مدل

^۱Functional Diversity

PLSR نیز با $R^2 = ۰/۹۲$ و $rRMSE = ۳/۲۲$ عملکرد نسبتاً مشابهی با RF در مرحله آموزش داشت. این نتایج بیانگر آن است که هر دو مدل توانایی بالایی در شناسایی روابط میان بازتاب‌های طیفی و شاخص تنوع گونه‌ای دارند. با این حال، در مرحله اعتبارسنجی که معیار اصلی برای سنجش کارایی مدل‌هاست، هر دو الگوریتم RF و PLSR با کاهش محسوسی در R^2 به‌ترتیب برابر $۰/۵۳$ و $۰/۵۴$ مواجه شدند. این کاهش قابل توجه در عملکرد به‌ویژه در مدل RF می‌تواند به پدیدهٔ بیش‌برازش^۱ اشاره داشته باشد که در آن مدل در یادگیری جزئیات و نویزهای داده‌های آموزشی بیش از حد دقیق عمل می‌کند، اما توانایی تعمیم به داده‌های جدید را از دست می‌دهد. از سوی دیگر، مدل PLSR که مبتنی بر کاهش ابعاد و تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۲ (PCA) است، در مرحله اعتبارسنجی پایداری بیشتری از خود نشان داد. با وجود اینکه عملکرد آن در مرحله آموزش اندکی ضعیف‌تر از RF بود، اما در داده‌های اعتبارسنجی رفتار باثبات‌تری داشت. این تفاوت در عملکرد نشان می‌دهد که انتخاب نوع مدل در برآورد شاخص‌های تنوع گونه‌ای درختی و درختچه‌ای از داده‌های طیفی باید با توجه به تعادل میان دقت مدل و توان تعمیم‌دهی آن انجام شود.

جدول ۱. ارزیابی عملکرد مدل‌های RF و PLSR در برآورد شاخص تنوع گونه‌ای فیشر-آلفا با استفاده از داده‌های ابرطیفی PRISMA براساس داده‌های مدل‌سازی و اعتبارسنجی

مدل	معیار آماری	مقدار مدل‌سازی	مقدار اعتبارسنجی
RF	R^2	۰/۹۴	۰/۵۳
	RMSE	۰/۰۱	۰/۰۳
	rRMSE	۳/۲۷	۶/۸۸
PLSR	R^2	۰/۹۲	۰/۵۴
	RMSE	۰/۰۱	۰/۰۳
	rRMSE	۳/۲۲	۶/۱۳

نکتهٔ جالب توجه در نتایج این پژوهش، کاهش نسبی مقدار R^2 مدل در مرحله اعتبارسنجی نسبت به مرحله توسعهٔ مدل است، در حالی که خطای نسبی مدل (rRMSE) همچنان پایین باقی‌مانده، که این موضوع می‌تواند ناشی از محدود بودن دامنهٔ تغییرات شاخص تنوع گونه‌ای در داده‌های اعتبارسنجی باشد. به عبارت دیگر، وقتی تغییرات واقعی داده‌ها محدود و فشرده است، مدل ممکن است در برآورد مقادیر کلی عملکرد قابل قبولی داشته باشد و خطای مطلق کمی ایجاد کند، اما توانایی مدل در توضیح نوسانات ظریف و پراکندگی داده‌ها کاهش می‌یابد که این امر منجر به کاهش مقدار R^2 می‌شود. علاوه بر این، تعداد کم نمونه‌ها یا توزیع نامتوازن داده‌ها در مجموعه اعتبارسنجی می‌تواند همبستگی بین مقادیر برآورد شده و واقعی را کاهش دهد، بدون آنکه به‌طور محسوسی خطای برآورد افزایش یابد. این تفاوت ذاتی میان معیارهای ارزیابی مدل، مانند R^2 که میزان واریانس تبیین شده را نشان می‌دهد و RMSE که میانگین خطای مطلق را می‌سنجد، اهمیت استفادهٔ همزمان از چندین آمارهٔ ارزیابی را برجسته می‌سازد تا دید دقیق‌تر و همه‌جانبه‌تری از عملکرد مدل حاصل شود. همچنین، استفاده از تکنیک‌های پیش‌پردازش‌هایی مانند نرم‌سازی ساویتزگی-گولای در داده‌های طیفی، با کاهش نویزهای تصادفی و حفظ ویژگی‌های مهم طیفی، به بهبود کیفیت داده‌ها و در نتیجه افزایش پایداری و دقت مدل‌ها کمک می‌کند. این نرم‌سازی به‌ویژه در شرایطی که دامنهٔ تغییرات داده‌ها محدود و نوسانات ظریف مهم هستند، می‌تواند توانایی مدل‌ها را در تشخیص بهتر الگوهای طیفی و جلوگیری از افت بیش از حد مقدار R^2 تقویت کند. بنابراین، اگرچه مدل در برآورد شاخص تنوع گونه‌ای عملکرد رضایت‌بخشی از خود نشان داده، اما برای بهبود تشخیص تغییرات پیچیده‌تر و جزئی‌تر، نیاز به بهینه‌سازی‌های بیشتر در ساختار مدل وجود دارد. این موضوع می‌تواند مسیر روشنی برای پژوهش‌های آتی در زمینهٔ مدل‌سازی دقیق‌تر و جامع‌تر تنوع گونه‌ای فراهم آورد. نتایج این پژوهش با یافته‌های Chai همکاران (۲۰۱۴)، هم‌خوانی دارد، زیرا آنها نیز نشان داده‌اند که در شرایطی

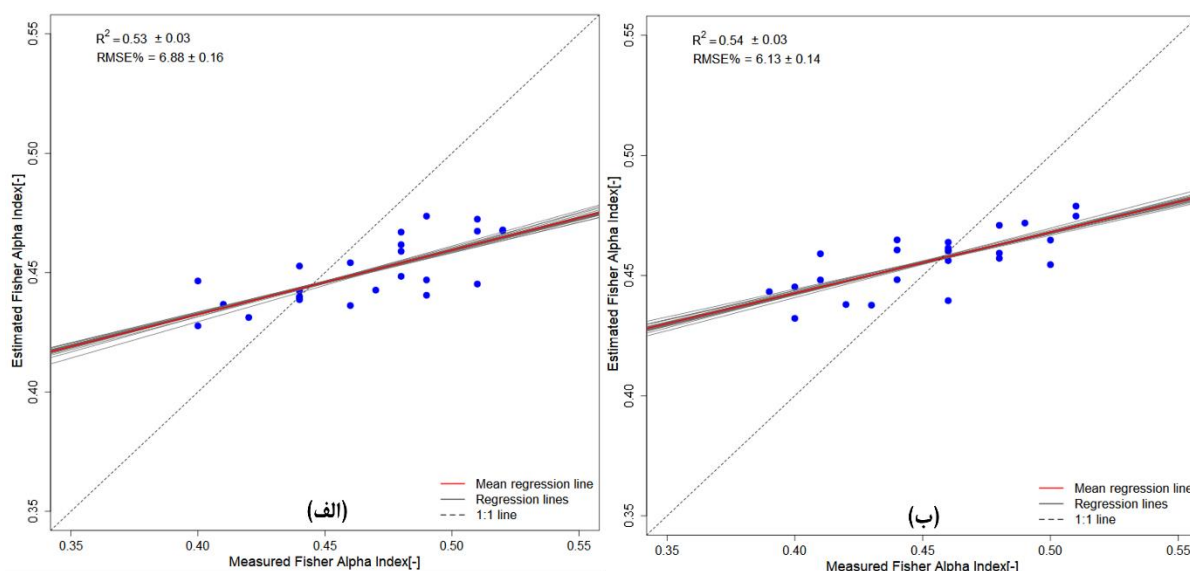
^۱Overfitting

^۲Principal Component Analysis

با دامنه محدود داده‌ها، مقدار R^2 ممکن است کاهش یابد بدون آنکه دقت کلی مدل به‌طور محسوسی افت کند؛ این امر بر ضرورت استفاده همزمان از چندین معیار ارزیابی برای درک دقیق‌تر عملکرد مدل تأکید دارد [۴۴].

در مجموع، نتایج مدل‌سازی نشان داد که داده‌های طیفی ابزار قدرتمندی برای برآورد تنوع گونه‌ای در جوامع جنگلی در مقیاس قطعه‌نمونه هستند. با این حال، پیشنهاد می‌شود اثربخشی این روش‌ها در سطوح و وسعت‌های مختلف (از پلات تا مقیاس منطقه‌ای) نیز بررسی شود تا میزان دقت و قابلیت تعمیم نتایج بهتر مشخص شود. همچنین، مقایسه عملکرد دو مدل نشان می‌دهد که الگوریتم‌های پیشرفته مانند RF اگرچه قدرت بالایی در یادگیری روابط غیرخطی دارند، اما مدل‌های ساده‌تر و تفسیرپذیرتر مانند PLSR می‌توانند در شرایطی که مجموعه داده‌های زمینی محدود باشد، عملکرد رقابتی و حتی پایدارتری ارائه دهند. بنابراین، استفاده ترکیبی از چند الگوریتم و تحلیل دقیق عملکرد آنها در مراحل مختلف مدل‌سازی، می‌تواند به انتخاب بهینه‌ترین روش برای برآورد تنوع گونه‌ای با استفاده از سنجش‌ازدور کمک کند. یافته‌های این پژوهش در مقایسه با مطالعه Saedmocheshi و همکاران (۲۰۱۹) که در جنگلی مشابه و با استفاده از داده‌های چندطیفی Sentinel-2 و روش آماری SMLR انجام شده است، بر قابلیت داده‌های ابرطیفی و روش‌های آماری پیشرفته در بهبود دقت برآورد تنوع گونه‌ای تأکید دارد [۳۰]. همچنین در پژوهشی دیگر، Cheng و همکاران (۲۰۲۴) با بهره‌گیری از داده‌های ابرطیفی ZY1-02D و روش‌های آماری، دقت مناسبی از برآورد تنوع گونه‌ای گزارش کردند، یافته‌ای که با نتایج پژوهش پیش‌رو همراستا بوده و بر نقش مؤثر داده‌های ابرطیفی در برآورد تنوع گونه‌ای تأکید می‌کند [۲۶]. این نتایج با پژوهش‌های Xi و همکاران (۲۰۲۳) [۴۵] و Ozkan و همکاران (۲۰۱۶) [۲۱] نیز همسو است، که به توانایی بالای داده‌های سنجش از دور در برآورد تنوع گونه‌ای اشاره داشته‌اند.

در شکل ۶، ابر نقاط مقادیر اندازه‌گیری شده در برابر مقادیر برآورد شده برای داده‌های اعتبارسنجی نشان می‌دهد که هر دو مدل RF و PLSR در برآورد شاخص تنوع گونه‌ای فیشر-آلفا در محدوده‌های کمتر از ۰/۴۵ تمایل به بیش‌برآوردی دارند و در محدوده‌های بالاتر از آن دچار کم‌برآوردی می‌شوند. این الگو بیانگر وجود خطای سیستماتیک در هر دو مدل است که باعث می‌شود برآوردها به سمت مقادیر میانگین متمایل شوند. با وجود این محدودیت، هر دو مدل توانسته‌اند روند کلی تغییرات شاخص را به خوبی بازتاب دهند، اما توجه به این نوع انحراف‌ها در تفسیر نتایج و توسعه مدل‌های آینده اهمیت دارد.



شکل ۶. نمودار ابر نقاط مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده تنوع گونه‌ای فیشر-آلفا براساس مدل‌های RF (الف) و PLSR (ب) با استفاده از تصویر PRISMA

۴. نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی کارایی داده‌های ابرطیفی ماهواره PRISMA برای برآورد شاخص تنوع گونه‌ای فیشر-آلفا در جنگل‌های زاگرس شمالی صورت گرفت. نتایج نشان داد داده‌های ابرطیفی PRISMA، به‌دلیل قدرت بالای تفکیک طیفی، عملکرد بسیار

بهتری نسبت به داده‌های چندطیفی رایج مانند Sentinel-2 و Landsat در شناسایی و برآورد تنوع گونه‌ای دارند. استفاده از روش‌های آماری پیشرفته مانند RF و PLSR، به همراه پیش‌پردازش ساویتزکی-گولای، موجب افزایش دقت مدل‌ها، کاهش نویز و استخراج بهتر ویژگی‌های طیفی شد. یافته‌ها بیانگر آن است که داده‌های ابرطیفی با تفکیک طیفی بالای خود، امکان تشخیص دقیق‌تر تفاوت‌های زیست‌فیزیکی و زیست‌شیمیایی گونه‌ها را فراهم می‌کنند و برای پایش و مدیریت منابع جنگلی بسیار مناسب‌اند. در حالی که پژوهش‌های پیشین عمدتاً مبتنی بر داده‌های چندطیفی با دقت پایین‌تر بوده‌اند، این تحقیق نشان داد ترکیب داده‌های ابرطیفی و مدل‌سازی آماری می‌تواند قابلیت کاربرد و اطمینان نتایج را افزایش دهد. به‌ویژه در جنگل‌های زاگرس که دارای تنوع گونه‌ای و حساسیت بالا هستند، این فناوری‌ها امکان رصد دقیق‌تر وضعیت تنوع زیستی و ارزیابی اثر تهدیدهای محیط‌زیستی را فراهم می‌آورد. همچنین، استفاده همزمان داده‌های میدانی و ماهواره‌ای در مدل‌سازی، می‌تواند نتایج را تقویت کند. در مجموع، بهره‌گیری از داده‌های ابرطیفی با پیش‌پردازش مناسب و مدل‌سازی پیشرفته، راهکاری نوین و کارآمد برای حفاظت و مدیریت پایدار جنگل‌های زاگرس به‌شمار می‌رود و توصیه می‌شود در مطالعات آینده نیز مورد توجه قرار گیرد. این نتایج می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و سیاست‌گذاری‌های منابع طبیعی اثرگذار باشد.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از حمایت‌های بی‌دریغ آقای دکتر کیومرث محمدی سمانی رئیس محترم مرکز پژوهش و توسعه جنگلداری زاگرس شمالی دکتر هدایت غضنفری دانشگاه کردستان، همکاری‌های ارزشمند آقای کمال احمدی و خانم سونیا احمدی در برداشت داده‌های زمینی و پیشنهادهای اصلاحی داوران گرامی کمال سپاس و قدردانی را ابراز می‌دارند.

۵. منابع

- [1] Díaz, S., Settele, J., Brondízio, E.S., Ngo, H.T., Agard, J., Arneth, A., Balvanera, P., Brauman, K.A., Butchart, S.H.M., Chan, K.M.A., Garibaldi, L.A., Ichii, K., Liu, J., Subramanian, S.M., Midgley, G.F., Miloslavich, P., Molnár, Z., Obura, D., Pfaff, A., Polasky, S., Purvis, A., Razzaque, J., Reyers, B., Chowdhury, R.R., Shin, Y.J., Visseren-Hamakers, I., Willis, K.J., & Zayas, C.N. (2019). Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science*, 366(6471), eaax3100.
- [2] Scherer-Lorenzen, M., Potvin, C., Koricheva, J., Schmid, B., Hector, A., Bornik, Z., Reynolds, G., & Schulze, E. D. (2005). The design of experimental tree plantations for functional biodiversity research. In *Forest Diversity and Function: Temperate and Boreal Systems* (pp. 347-376). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [3] Kuuluvainen, T., Lindberg, H., Vanha-Majamaa, I., Keto-Tokoi, P. & Punttila, P. (2019). Low-level retention forestry, certification, and biodiversity: case Finland. *Ecological Processes*, 8(1), 1-13.
- [4] Brander, L. M., de Groot, R., Schägner, J. P., Guisado-Goñi, V., van't Hoff, V. & Solomonides, S. (2023). The role of forest ecosystem services to support the green recovery. *FAO Forestry Working Paper No. 38*.
- [5] Ghaisaryan, A., Fatehi, P. & Etemad, V. (2023). Estimation of species diversity indices in Hyrcanian forests using Sentinel-2 satellite data]. *Journal of Forest and Wood Products*, 76(3), 229-243. (In Persian)
- [6] McNeely, J. A. (1989). Conserving the world's biological diversity.
- [7] Lu, S., Zhang, D., Wang, L., Dong, L., Liu, C., Hou, D., Chen, G., Qiao, X., Wang, Y. & Guo, K. (2023). Comparison of plant diversity-carbon storage relationships along altitudinal gradients in temperate forests and shrublands. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1120050.
- [8] Repo, A., Albrich, K., Jantunen, A., Aalto, J., Lehtonen, I. & Honkaniemi, J. (2024). Contrasting forest management strategies: Impacts on biodiversity and ecosystem services under changing climate and disturbance regimes. *Journal of Environmental Management*, 371, 123124.
- [9] Flombaum, P. & Sala, O. E. (2008). Higher effect of plant species diversity on productivity in natural than artificial ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(16), 6087-6090.

- [10] Mallick, P. H. & Chakraborty, S. K. (2018). Forest, wetland and biodiversity: Revealing multi-faceted ecological services from ecorestoration of a degraded tropical landscape. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 18(3), 278-296.
- [11] Rocchini, D., Boyd, D.S., Féret, J.B., Foody, G.M., He, K.S., Lausch, A., Nagendra, H., Wegmann, M. & Pettorelli, N. (2016). Satellite remote sensing to monitor species diversity: Potential and pitfalls. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2(1), 25-36.
- [12] Mallinis, G., Chrysafis, I., Korakis, G., Pana, E. & Kyriazopoulos, A.P. (2020). A random forest modelling procedure for a multi-sensor assessment of tree species diversity. *Remote Sensing*, 12(7), 1210.
- [13] Tagliabue, G., Panigada, C., Celesti, M., Cogliati, S., Colombo, R., Migliavacca, M. & Rossini, M. (2020). Sun-induced fluorescence heterogeneity as a measure of functional diversity. *Remote Sensing of Environment*, 247, 111934.
- [14] Miri, N., Fatehi, D.S., Darvishsefat, A.A., Pirbavaghar, H., Homolva, H. & Lutzeh, M. (2024). Modeling leaf area index in Zagros forests using Sentinel-2 imagery and Gaussian process regression. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 31(4), 323-337. (In Persian)
- [15] Bai, J., Ren, C., Shi, X., Xiang, H., Zhang, W., Jiang, H. & Mao, D. (2024). Tree species diversity impacts on ecosystem services of temperate forests. *Ecological Indicators*, 167, 112639.
- [16] 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.
- [17] Lechner, A. M., Foody, G.M. & Boyd, D.S. (2020). Applications in remote sensing to forest ecology and management. *One Earth*, 2(5), 405-412.
- [18] Ming, L., Liu, J., Quan, Y., Li, M., Wang, B. & Wei, G. (2024). Mapping tree species diversity in a typical natural secondary forest by combining multispectral and LiDAR data. *Ecological Indicators*, 159, 111711.
- [19] Torresani, M., Rossi, C., Perrone, M., Hauser, L.T., Feret, J.-B., Moudry, V., Simova, P., Ricotta, C., Foody, G.M., Kacic, P., Feilhauer, H., Malavasi, M., Tognetti, R. & Rocchini, D. (2024). Reviewing the spectral variation hypothesis: Twenty years in the tumultuous sea of biodiversity estimation by remote sensing. *Ecological Informatics*, 82, 1-49.
- [20] Silveira, E. M. O., Pidgeon, A.M., Persche, M. & Radeloff, V.C. (2024). Remotely-sensed phenoclusters of Wisconsin's forests, shrublands, and grasslands for biodiversity applications. *Forest Ecology and Management*, 561, 121878.
- [21] Ozkan, U.Y., Ozdemir, I., Saglam, S., Yesil, A. & Demirel, T. (2016). Evaluating the woody species diversity by means of remotely sensed spectral and texture measures in the urban forests. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 44(5), 687-697.
- [22] 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), 586.
- [23] Mallinis, G., Chrysafis, I., Korakis, G., Pana, E. & Kyriazopoulos, A. P. (2020). A random forest modelling procedure for a multi-sensor assessment of tree species diversity. *Remote Sensing*, 12(7), 1210.
- [24] Akbari, H. & Kalbi, S. (2019). Modeling tree species diversity in circular forest stands using GeoEye imagery (Case study: Circular forest stands of Sari). *Journal of Wood Science and Technology Research*, 26(2), 51-62. (In Persian)
- [25] Abbas, S., Peng, Q., Wong, M.S., Li, Z., Wang, J., Ng, K.T.K., & Hui, K.K.W. (2021). Characterizing and classifying urban tree species using bi-monthly terrestrial hyperspectral images in Hong Kong. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 177, 204-216.
- [26] Cheng, S., Yang, X., Yang, G., Chen, B., Chen, D., Wang, J. & Sun, W. (2024). Using ZY1-02D satellite hyperspectral remote sensing to monitor landscape diversity and its spatial scaling change in the Yellow River Estuary. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 128, 103716.
- [27] Wang, R., Gamon, J.A. & Cavender-Bares, J. (2022). Seasonal patterns of spectral diversity at leaf and canopy scales in the Cedar Creek prairie biodiversity experiment. *Remote Sensing of Environment*, 280, 113169.
- [28] Moravi Mahajer, M.R. (2011). *Forest Ecology and Silviculture* (3rd ed.). University of Tehran Press. 417 p. (In Persian)

- [29] Jazirei, M.H. & Ebrahimi Rastaqi, M. (2013). *Zagros Forest Ecology* (2nd ed.). University of Tehran Press. 560 p. (In Persian)
- [30] Saedmocheshi, A., Pirbavaghar, M., Shabaniyan, N. & Fatehi, P. (2019). Possibility of estimating woody species diversity using optical images of Sentinel satellite (Case study: Marivan forests). *Journal of Forest and Wood Products*, 72(2), 101-110. (In Persian)
- [31] Nazarian, N. & Fallah, A. (2022). Comparison of biodiversity indices using Sentinel-2 images in Zagros forests. In Proceedings of the Third National Conference on Natural Resources and Sustainable Development in Zagros (pp. [page numbers]). Shahrekord University, Shahrekord, Iran. (In Persian)
- [32] Ahmadi, S., Fatehi, P., Namiranian, M. & Mirri, N. (2024). Estimation of oak forest canopy cover using Landsat 9 satellite data in northern Zagros forests. *Iranian Journal of Forest*, 16(4), 471-488. (In Persian)
- [33] Fisher, R.A., Corbet, A.S. & Williams, C. B. (1943). The relation between the number of species and the number of individuals in a random sample of an animal population. *The Journal of Animal Ecology*, 42-58.
- [34] Loizzo, R., Daraio, M., Guarini, R., Longo, F., Lorusso, R., Dini, L. & Lopinto, E. (2019). PRISMA mission status and perspective. In *IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 4503-4506). IEEE.
- [35] Rast, M. (2019). PRISMA (Hyperspectral). In Satellite Missions Catalogue. European Space Agency. Retrieved from <https://www.eoportal.org/satellite-missions/PRISMA-hyperspectral>
- [36] ASI. (2020). PRISMA (PRecursore IperSpettrale della Missione Applicativa). Italian Space Agency. Retrieved from <https://www.eoportal.org/satellite-missions/PRISMA-hyperspectral>
- [37] Candela, L., Formaro, R., Guarini, R., Loizzo, R., Longo, F., and Varacalli, G. (2016, July). The PRISMA mission. In *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* (pp. 253-256). IEEE.
- [38] Beitollahi, M., and Hosseini, S. A. (2018, May). Using savitsky-golay smoothing filter in hyperspectral data compression by curve fitting. In electrical engineering (ICEE), Iranian conference on (pp. 452-457). IEEE.
- [39] Candes, E.J. & Donoho, D.L. (2005). Continuous curvelet transform: I. Resolution of the wavefront set. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 19(2), 162-197.
- [40] Člupek, M., Matějka, P., and Volka, K. (2007). Noise reduction in Raman spectra: Finite impulse response filtration versus Savitzky–Golay smoothing. *Journal of Raman Spectroscopy: An International Journal for Original Work in all Aspects of Raman Spectroscopy, Including Higher Order Processes, and also Brillouin and Rayleigh Scattering*, 38(9), 1174-1179.
- [41] Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5-32.
- [42] Santini, F. & Palombo, A. (2022). Impact of Topographic Correction on PRISMA Sentinel 2 and Landsat 8 Images. *Remote Sensing*, 14(16), 3903.
- [43] Chai, T. & Draxler, R.R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?—Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*, 7(3), 1247-1250.
- [44] Xi, Y., Zhang, W., Brandt, M., Tian, Q. & Fensholt, R. (2023). Mapping tree species diversity of temperate forests using multi-temporal Sentinel-1 and-2 imagery. *Science of Remote Sensing*, 8, 100094.