



Assessment of Sentinel-2 Satellite Data Capability for Estimating Vegetation Diversity Indices in Semi-Steppe Rangelands of Chaharmahal and Bakhtiari Province

Leila Mahmoudzadeh¹ | Pejman Tahmasebi | Ataollah Ebrahimi | Samaneh Sadat Mahzooni Kachapi*¹

Department of Nature engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Shahrekord, Shahrekord, Iran

Correspond E-mail: samanehsadat.mahzooni@stu.sku.ac.ir

Article Info

Abstract

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 01 Aug. 2024
Revised: 13 Nov. 2024
Accepted: 18 Nov. 2024
Published online: 01 April. 2025

Keywords:
Biodiversity,
Enhanced Vegetation Index (EVI),
Linear Regression,
Remote sensing,
Semi-Steppe Rangelands.

Considering the widespread changes in biodiversity and its vital importance in maintaining ecosystem stability and functionality, precise and continuous assessment of plant diversity indices is essential. Due to temporal, spatial, and economic constraints, field sampling is often difficult and costly in many regions. Therefore, remote sensing data have increasingly gained attention as a reliable, efficient, and cost-effective source for biodiversity assessment and monitoring. This study aims to evaluate the capability of Sentinel-2 satellite data in estimating plant biodiversity indices in semi-steppe rangelands. To this end, eight sampling sites were selected based on management conditions, vegetation cover, and ecological characteristics, and three 30×30 m² macroplots were established at each site. Vegetation cover sampling was performed using a systematic-random method with 2×2 m² plots along three transects. After calculating plant diversity indices including alpha diversity, beta diversity, and functional diversity, the relationships between these indices and vegetation indices derived from Sentinel-2 data were examined and statistically analyzed. Data analysis was conducted using linear regression and correlation tests in the R software environment. The results clearly demonstrate that vegetation indices derived from Sentinel-2 satellite imagery are capable of predicting different components of biodiversity in semi-steppe rangelands. Among the indices, EVI showed the strongest correlation with alpha diversity ($R^2=0.20$, $P\text{-value}=0.02$) and functional diversity (functional richness) ($R^2=0.34$, $P\text{-value}=0.001$), whereas NDVI exhibited the highest correlation with beta diversity (Bray-Curtis Similarity and distance indices index) ($R^2=0.21$, $P\text{-value}=0.01$). Other indices such as MSAVI2, AVI, and SAVI also revealed positive and significant correlations with various biodiversity components, although their correlation coefficients were lower than those of the primary indices. These findings suggest that Sentinel-2 data, in addition to providing general information on vegetation cover, offer the potential for accurate estimation of species and functional diversity indices at the macroplot scale. Therefore, this study highlights the practical value of satellite-based data as a reliable, efficient, and cost-effective tool for monitoring and managing biodiversity in semi-steppe rangelands.

Cite this article: Mahmoudzadeh, L., Tahmasebi, P., Ebrahimi, A., Mahzooni Kachapi, S.S. (2025). Assessment of Sentinel-2 Satellite Data Capability for Estimating Vegetation Diversity Indices in Semi-Steppe Rangelands of Chaharmahal and Bakhtiari Province. *Journal of Range & Watershed Management*, 79 (1), 41-58. DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2025.399863.1846>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Extensive changes in biodiversity and its vital importance for maintaining ecosystem stability and functioning underscore the need for precise and continuous assessment of vegetation diversity indicators. As a key ecological component, vegetation influences fundamental ecosystem processes and sustainability, while exerting direct and wide-ranging impacts on environmental security, sustainable economic development, and human well-being. Biodiversity indices offer an effective framework for analyzing plant community dynamics and evaluating their responses to environmental gradients. Given the temporal, spatial, and financial constraints of field sampling, remote sensing technologies particularly Sentinel-2 satellite data with its high spectral and spatial resolution have gained prominence as efficient and cost-effective tools for monitoring and modeling vegetation diversity. Vegetation indices derived from these images capture a broad spectrum of spectral and spatial properties of plant cover, enabling the interpretation of ecological heterogeneity and diversity patterns across multiple scales. The integrated use of such information supports systematic and scalable assessments of ecological change and provides a foundation for developing evidence-based strategies for sustainable ecosystem management and conservation. This study aims to evaluate the capability of Sentinel-2 satellite data to estimate plant biodiversity indices in semi-steppe rangelands.

Materials and Methods: The study area is located in semi-steppe rangelands with well-developed vegetation and diversity, covering an area of 5118.1 hectares in Chaharmahal and Bakhtiari Province, Iran. Eight sampling sites were selected based on management practices, vegetation cover, and ecological characteristics, and at each site, three 30*30 m² macroplots were established. Vegetation sampling was conducted during the peak growth period using a random-systematic design, with 2*2 m² plots laid out along three transects. Multispectral images acquired from the Sentinel-2 MSI sensor, with a spatial resolution of 20 m, were used for data processing. Various vegetation indices were calculated, grouped into slope-based and distance-based categories. To quantitatively assess biodiversity indices, multiple dimensions of diversity including alpha, beta, and functional diversity were evaluated. Subsequently, to examine the relationships between ground-measured plant species diversity and vegetation indices derived from Sentinel-2 imagery, linear regression and correlation analyses were performed using R software version 4.2.2. Following the regression analyses, the coefficient of determination (R^2) for each model was calculated to assess the strength of correlation.

Results and Discussion: The results clearly indicate that the vegetation indices EVI ($R^2=0.20$, P-value=0.02), MSAVI2 ($R^2=0.19$, P-value=0.02), AVI ($R^2=0.18$, P-value=0.02), and NDVI ($R^2=0.17$, P-value=0.03) exhibited significant positive relationships with alpha diversity. Regarding the relationships between vegetation indices and beta diversity, significant correlations were also observed between the independent and dependent variables. Specifically, NDVI ($R^2=0.21$, P-value=0.01), SAVI ($R^2=0.20$, P-value=0.01), RATIO ($R^2=0.21$, P-value=0.01), and EVI ($R^2=0.19$, P-value=0.01) were positively and significantly associated with the Bray–Curtis index. Concerning functional diversity, EVI ($R^2=0.34$, P-value=0.001) and NDVI ($R^2=0.31$, P-value=0.003) showed significant positive relationships with functional richness (FRic); AVI ($R^2=0.31$, P-value=0.003) was positively correlated with the community-weighted mean of annual forb traits (CWM-AF); and MSAVI1 ($R^2=0.19$, P-value=0.02) exhibited a significant positive association with the community-weighted mean of annual grass traits (CWM-AG). Overall, considering the regression coefficients and significance levels across alpha, beta, and functional diversity components, EVI was the most effective index for estimating alpha and functional diversity, whereas NDVI was the most effective for assessing beta diversity in the study area.

Conclusion: These results indicate that spectral vegetation indices derived from Sentinel-2 satellite data, such as NDVI and EVI, not only provide general information on vegetation cover but also have high potential for explaining and modeling various components of biodiversity, including alpha, beta, and functional diversity. Therefore, the integration of vegetation indices with an understanding of the ecological characteristics of each area, along with the optimization of spatial scales, plays a critical role in enhancing the accuracy of biodiversity assessments. Accordingly, in the development of future models, simultaneous consideration of the type of vegetation indices, spatial scale, and ecological conditions is essential. Moreover, combining satellite data with more precise field sampling and employing advanced spectral analysis algorithms can significantly improve the accuracy and reliability of results at finer spatial scales.

Article Type: Research Article

Conflicts of interest: Conflict of interest the authors declare no conflict of interest.



ارزیابی قابلیت داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۲ در برآورد شاخص‌های تنوع گیاهی مراتع نیمه‌استپی استان چهارمحال و بختیاری

لیلا محمودزاده | پژمان طهماسبی | عطاالله ابراهیمی | سمانه سادات محزونی کچی*

گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
رایانامه نویسنده مسئول: samanehsadat.mahzooni@stu.sku.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

با توجه به تغییرات گسترده در تنوع زیستی و اهمیت حیاتی آن در حفظ پایداری و عملکرد اکوسیستم‌ها، ارزیابی دقیق و مستمر شاخص‌های تنوع گیاهی امری ضروری است. از آنجا که نمونه‌برداری‌های میدانی به دلیل محدودیت‌های زمانی، مکانی و اقتصادی در بسیاری از مناطق دشوار و پرهزینه است، استفاده از داده‌های سنجنش از دور به‌عنوان منبعی قابل اتکا، کارآمد و مقرون به‌صرفه برای بررسی و پایش تنوع زیستی مورد توجه فزاینده‌ای قرار گرفته است. هدف این پژوهش، ارزیابی قابلیت داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۲ در برآورد شاخص‌های تنوع زیستی گیاهی در مراتع نیمه‌استپی است. برای این منظور، ۸ سایت نمونه‌برداری با در نظر گرفتن شرایط مدیریتی، پوشش گیاهی و ویژگی‌های اکولوژیکی انتخاب شد و در هر سایت سه ماکروپلات به ابعاد ۳۰×۳۰ مترمربعی مستقر گردید. نمونه‌برداری از پوشش گیاهی به روش تصادفی-سیستماتیک و با استفاده از پلات‌های ۲×۲ مترمربعی در امتداد سه ترانسکت انجام گرفت. پس از محاسبه شاخص‌های تنوع گیاهی شامل تنوع آلفا، بتا و عملکرد، رابطه میان آن‌ها و شاخص‌های پوشش گیاهی حاصل از داده‌های سنتینل-۲ مورد بررسی و تحلیل آماری قرار گرفت. تحلیل داده‌ها با استفاده از روش‌های رگرسیون خطی و آزمون همبستگی در محیط نرم‌افزار R انجام شد. نتایج به‌طور مشخص نشان می‌دهد که شاخص‌های پوشش گیاهی مشتق از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ قادر به پیش‌بینی مؤلفه‌های مختلف تنوع زیستی مراتع نیمه‌استپی هستند. شاخص EVI بیشترین همبستگی را با تنوع آلفا ($R^2=0.20$, $P\text{-value}=0.02$) و تنوع عملکردی (غناهی عملکردی) ($R^2=0.34$, $P\text{-value}=0.001$) نشان داد، درحالی‌که شاخص NDVI بیشترین همبستگی را با تنوع بتا (شاخص شباهت و فاصله Bray-curtis) ($R^2=0.21$, $P\text{-value}=0.01$) داشت. شاخص‌های دیگر مانند MS-AVI2، AVI و SAVI نیز همبستگی مثبت و معنی‌دار با مؤلفه‌های مختلف تنوع نشان دادند، هرچند ضریب همبستگی آنها نسبت به شاخص‌های اصلی کمتر بود. این نتایج بیانگر آن است که داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۲ علاوه بر اینکه اطلاعات کلی پوشش گیاهی را فراهم می‌کنند، قابلیت برآورد دقیق شاخص‌های تنوع گونه‌ای و عملکردی را نیز در مقیاس ماکروپلات دارند. بنابراین، یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از داده‌های ماهواره‌ای به‌عنوان ابزاری قابل اعتماد، کارآمد و مقرون به‌صرفه برای پایش و مدیریت تنوع زیستی مراتع نیمه‌استپی عملیاتی و مؤثر است.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۱۲

کلیدواژه‌ها:

تنوع زیستی،

شاخص پوشش گیاهی بارز شده،

رگرسیون خطی،

سنجنش از دور،

مراتع نیمه‌استپی.

استناد: محمودزاده؛ لیلا، طهماسبی؛ پژمان، ابراهیمی؛ عطاالله، محزونی کچی؛ سمانه سادات (۱۴۰۵). ارزیابی قابلیت داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۲ در برآورد شاخص‌های تنوع گیاهی مراتع

نیمه‌استپی استان چهارمحال و بختیاری. نشریه مرتع و آبخیزداری، ۷۹ (۱)، ۵۸-۴۱.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2025.399863.1846>



© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

پوشش گیاهی به عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی اکولوژیکی، نقش مهمی در عملکرد اکوسیستم و تغییرات ترکیب گونه‌ای جوامع گیاهی ایفا می‌کند (Wookey et al., 2009). تغییرات پوشش گیاهی می‌تواند منجر به تخریب اکوسیستم‌ها و کاهش خدمات اکوسیستمی شود (Fulford et al., 2022) که این موضوع به طور مستقیم امنیت زیست‌محیطی، توسعه پایدار اقتصادی، ثبات اجتماعی و رفاه انسان را تهدید می‌کند (Huang et al., 2021). با توجه به اهمیت پایش مستمر اکوسیستم‌های طبیعی (Verrelst et al., 2015)، نظارت و بررسی تغییرات زمانی و مکانی کیفیت جوامع گیاهی و تحلیل عوامل محرک آن از ضرورت بالایی برخوردار است (Zhang et al., 2022). بنابراین، تهیه اطلاعات کمی و کیفی دقیق و به‌روزرسانی آن در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت، برای مدیریت بهینه اکوسیستم‌ها حیاتی است (Koomen & Stillwell, 2007).

تنوع زیستی یکی از مفاهیم بنیادین در مدیریت پوشش گیاهی است که در تمامی اکوسیستم‌ها، به‌ویژه در مراتع، نقشی اساسی در پایداری و کارکرد صحیح آن‌ها دارد (Meadagh, 2005) و تأثیر قابل توجهی بر جامعه انسانی و سلامت آن بر جای می‌گذارد (Balvanera et al., 2006; Cardinale et al., 2012). بررسی ساختار فضایی الگوهای تنوع زیستی رویکردی کلیدی برای درک عمیق‌تر و مدیریت مؤثر آن به‌شمار می‌رود (Overcast et al., 2021). مطالعات اکولوژیکی اهمیت این تنوع و ویژگی‌های عملکردی آن را در شکل‌دهی فرآیندها و کارکرد اکوسیستم‌ها برجسته کرده‌اند (Craven et al., 2018). دستیابی به اطلاعات دقیق درباره پراکنش گونه‌ها و تغییرات زمانی آن‌ها، همراه با تحلیل مؤلفه‌های مختلف تنوع گیاهی، شرط اساسی حفاظت و ارزیابی این تنوع است. در این میان، تنوع گونه‌ای به‌عنوان بارزترین نمود تنوع زیستی، دو جنبه مهم آلفا و بتا را شامل می‌شود (Wang et al., 2022).

تنوع آلفا که نشان‌دهنده تعداد گونه‌های مختلف در یک جامعه اکولوژیکی یا سطح نمونه‌برداری شده است (Cooper, 2023) و تفاوت موقعیت گونه‌ها را بررسی می‌کند (MacArthur, 1965; Whittaker, 1977). تنوع بتا که به‌عنوان میزان شباهت یا تفاوت جوامع گیاهی از نظر ترکیب گونه‌ای در مکان‌ها و زمان‌های مختلف تعریف می‌شود (Vellend, 2010; Magurran, 2016)، از دیگر مؤلفه‌های مهم به‌شمار می‌آید. تنوع عملکردی که تنوع در صفات عملکردی گونه‌ها را شامل می‌شود، پیش‌بینی‌کننده‌ای حیاتی برای پاسخ جوامع زیستی به تغییرات محیطی و ثبات اکوسیستم است (Kang et al., 2020). از این رو، پایش و بررسی تنوع عملکردی از اهمیت به‌سزایی برخوردار است و فهم عمیق از الگوهای توزیع و تغییرات آن، در تدوین استراتژی‌های حفاظت از تنوع زیستی و حفظ سلامت اکوسیستم اهمیت ویژه‌ای دارد (Qian et al., 2020; Zhang et al., 2024).

مطالعه تنوع زیستی اغلب با چالش‌هایی مواجه است که ناشی از دشواری‌های نمونه‌برداری میدانی و دسترسی به مناطق دور افتاده است؛ در این زمینه، سنجش از دور می‌تواند با ارائه مداوم اطلاعات مکانی در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف کمک شایانی به مطالعه پوشش گیاهی و ارزیابی تنوع زیستی نماید (Rocchini et al., 2015; Correjón et al., 2021). پیشرفت‌های سریع فناوری‌های سنجش از دور، دسترسی به داده‌های ماهواره‌ای با وضوح طیفی و فضایی بالا و قابلیت‌های فنی جهت پایش محیط زیست (Garcia et al., 2024)، امکان استخراج اطلاعات دقیق در سطح گونه‌های گیاهی را فراهم کرده است (Lass & Prather, 2004). بنابراین، سنجش از دور می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های میدانی در مناطق وسیع و غیرقابل دسترس باشد (Loarie et al., 2007).

تصاویر ماهواره‌ای دارای پتانسیل بالایی به‌عنوان منابع اطلاعاتی برای نظارت بر تنوع زیستی در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای هستند (Adam et al., 2012). شاخص‌های پوشش گیاهی از مهم‌ترین معیارهای سنجش از دور به‌شمار می‌روند که روشی مقرون به‌صرفه، غیرمخرب و پایدار برای ارزیابی و پایش تنوع زیستی ارائه می‌دهند و طی سال‌های اخیر به‌طور گسترده‌ای برای پایش پوشش گیاهی استفاده شده‌اند (Tsouros et al., 2019; Ahmad et al., 2020). بسته به نوع شاخص پوشش گیاهی، اطلاعاتی درباره ویژگی‌های گیاه مانند ساختار تاج پوشش، سطح برگ، مقدار کلروفیل و... ارائه می‌شود (Cui et al., 2019). توسعه حسگرهای ماهواره‌ای در باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک، امکان بهره‌گیری از شاخص‌های متنوع و پیشرفته پوشش گیاهی را فراهم کرده است (Singh et al., 2020).

بنابراین، شاخص‌های پوشش گیاهی می‌توانند به‌عنوان معیار ارتباط بین تنوع گونه‌ای و بازتاب طیفی مورد استفاده قرار گیرند. ماهواره سنتینل-۲ به‌عنوان بهترین منبع داده، با وضوح طیفی و فضایی بالا، پتانسیل مناسبی در تخمین تنوع گونه‌ای دارد (Gyamfi-Ampadu et al., 2021; Liu et al., 2023). این ماهواره به‌دلیل داشتن سه باند قرمز نسبت به سایر ماهواره‌ها برتری دارد (Mutowo et al., 2018). تحقیقات نشان داده‌اند که افزایش تعداد بلندهای طیفی، دقت پیش‌بینی تنوع زیستی را افزایش می‌دهد و استفاده از داده‌های چندباندی نسبت به داده‌های محدود، اولویت دارد (Rocchini et al., 2007; Wang et al., 2018). همچنین، قابلیت‌های ذاتی سنتینل-۲ امکان تشخیص بهتر ویژگی‌های پوشش گیاهی را فراهم می‌کند (Immitzer et al., 2019; Chrysafis et al., 2020; Martin-Gallego et al., 2020).

مطالعات مختلفی ارتباط بین شاخص‌های تنوع زیستی و تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ را بررسی کرده‌اند. به‌عنوان مثال، کیشور^۱ و همکاران (۲۰۲۴) ارتباط مثبت بین شاخص‌های تنوع با تصاویر فراطیفی سنتینل-۲ را در جنگل‌های استوایی هند گزارش کرده‌اند. ژائو^۲ و همکاران (۲۰۲۲) نیز تنوع عملکرد را با استفاده از داده‌های میدانی و تصاویر سنتینل-۲ در نی‌مونگل چین برآورد کرده و شاخص زیتوده بالای زمین غنای عملکرد را بهترین شاخص معرفی نموده‌اند. همچنین، ما^۳ و همکاران (۲۰۱۹) نشان داده‌اند که تصاویر ماهواره‌ای چندطیفی با وضوح بالا قادر به نمایش حدود ۵۵ درصد از تنوع عملکرد در جنگل‌های اروپا هستند. مطالعه لرن^۴ و همکاران (۲۰۲۲) نیز همبستگی معنی‌دار بین شاخص‌های پوشش گیاهی و تنوع آلفا در جنگل‌های استوایی مونتانا در اکوادور را تأیید کرده است. نظارت مؤثر بر تغییرات زمانی و مکانی در کیفیت مراتع و تحلیل عوامل محرک این تغییرات، به یکی از اولویت‌های راهبردی در مسیر تحقق توسعه پایدار تبدیل شده است (Zhang et al., 2022). در این پژوهش، ارتباط بین داده‌های میدانی و اطلاعات استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ با وضوح طیفی و مکانی بالا، به‌منظور تخمین شاخص‌های تنوع زیستی در مقیاس درون منطقه‌ای و بین منطقه‌ای و همچنین ارزیابی عملکرد زیستی پوشش گیاهی مورد بررسی قرار گرفته است. افزون بر آن، این مطالعه به بررسی قابلیت و نقش مکمل داده‌های طیفی در پایش و تحلیل جنبه‌ها و شاخص‌های مختلف تنوع زیستی در مراتع نیمه‌استپی می‌پردازد.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه از مراتع نیمه‌استپی با پوشش گیاهی و تنوع مناسب با مساحتی معادل ۵۱۱۸/۱ هکتار در استان چهارمحال و بختیاری واقع شده است. محدوده منطقه بین مدارهای ۵۹° ۵۰' تا ۵۱° ۱۰' طول شرقی و ۳۲° ۳' تا ۳۲° ۱۷' عرض شمالی با متوسط ارتفاع ۲۷۲۰ متر از سطح دریا قرار گرفته است (شکل ۱). میانگین دمای سالانه منطقه ۶/۸ تا ۶/۱۰ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی سالانه نیز ۴۲۴ میلی‌متر است. طبق تقسیم‌بندی دومارتن و آمبرژه، این منطقه دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک می‌باشد. منطقه مورد مطالعه به‌صورت دو بخش مدیریت چرای شامل: چرای مفراط و قرق است که متشکل از گونه‌هایی نظیر *Stipa*، *Scariola orientalis*، *Bromus*، *Acanthophyllum bracteatum*، *Astragalus microphysa*، *Cousinia bachtiarica*، *Astragalus verus hohenackeriana* و *tomentellus* *Camphorosma monspeliaca* می‌باشد.

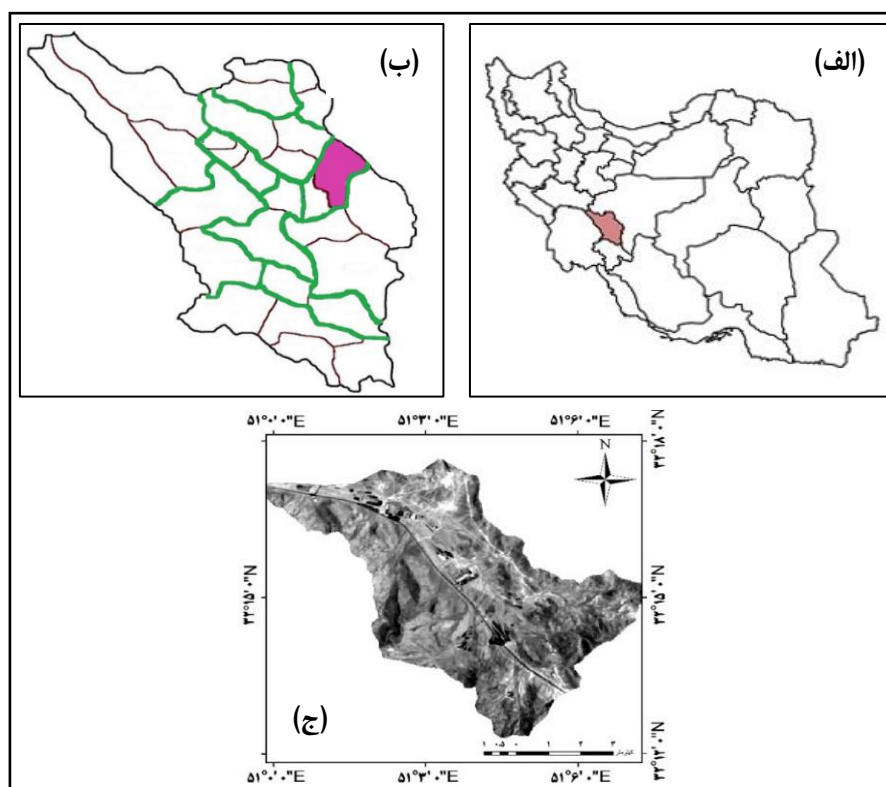
۲-۲. تهیه تصاویر ماهواره‌ای

تصاویر چندطیفی حاصل از سنجنده MSI ماهواره سنتینل-۲، از وبسایت رسمی آژانس فضایی اروپا (ESA) با کمترین میزان پوشش ابر دریافت شدند. این تصاویر شامل ۱۳ باند طیفی در محدوده طول موج‌های مرئی، مادون قرمز نزدیک (NIR) و مادون قرمز با طول موج

1. Kishore
2. Zhao

3. Ma
4. Llerena

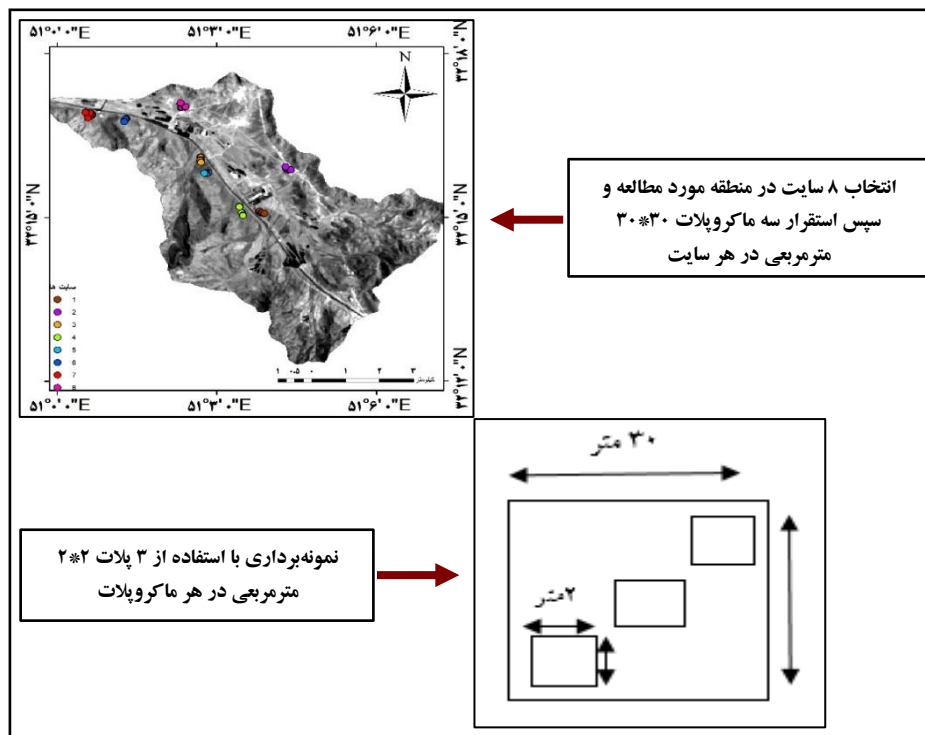
کوتاه (SWIR) بوده و دارای تفکیک مکانی متغیر شامل ۱۰، ۲۰ و ۶۰ متر (شامل ۴ باند با تفکیک ۱۰ متر، ۶ باند با تفکیک ۲۰ متر و ۳ باند با تفکیک ۶۰ متر) هستند (Lima et al., 2019). با توجه به اینکه باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک، به دلیل حداکثر اختلاف در نمودار امضای طیفی از اهمیت بالایی در مطالعات پوشش گیاهی برخوردارند و همچنین با در نظر گرفتن ابعاد ماکروپلات‌های ۳۰×۳۰ مترمربعی در نمونه‌برداری میدانی، قدرت تفکیک مکانی ۲۰ متری برای پردازش داده‌ها انتخاب شد. برای این منظور، باندهای مورد نیاز با تفکیک ۱۰ متری جهت محاسبه شاخص‌های پوشش گیاهی، از طریق فرآیند افزایش وضوح مکانی (Pansharping)، به ابعاد ۲۰ متری تبدیل شدند تا با سایر داده‌ها هم‌تراز شوند.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران، استان چهارمحال و بختیاری و مرز منطقه

۲-۳. نمونه‌برداری میدانی

پس از تعیین محدوده مورد مطالعه، نمونه‌برداری از پوشش گیاهی در طول یک دوره رویشی (از اواخر اردیبهشت تا اوایل خرداد) و در زمان اوج رشد گونه‌های گیاهی انجام گرفت. در این راستا، ابتدا با انجام پیمایش میدانی و ارزیابی شرایط اکولوژیکی منطقه، تعداد ۸ سایت واجد شرایط جهت نمونه‌برداری انتخاب شد. در هر سایت، سه ماکروپلات به ابعاد ۳۰×۳۰ مترمربعی مستقر گردید. نمونه‌برداری از فاکتورهای پوشش گیاهی با استفاده از روش تصادفی-سیستماتیک (امکان توزیع یکنواخت نمونه‌ها را در منطقه مورد مطالعه فراهم می‌کند) و به کارگیری سه پلات ۲×۲ مترمربعی در امتداد سه ترانسکت (برای سازگاری با تصاویر ماهواره‌ای، فاصله بین ترانسکت‌ها ۵۰ متر در نظر گرفته شد) صورت گرفت (Tahmasebi et al., 2017) (شکل ۲). داده‌های حاصل از این مرحله، به‌منظور برآورد در تاریخ‌هایی که نمونه‌برداری انجام نشده بود، تعمیم داده شد. در فرآیند نمونه‌برداری، علاوه بر ثبت اطلاعات مربوط به پوشش کل، پوشش هر یک از گونه‌ها نیز به تفکیک فرم رویشی آن‌ها ثبت و طبقه‌بندی گردید.



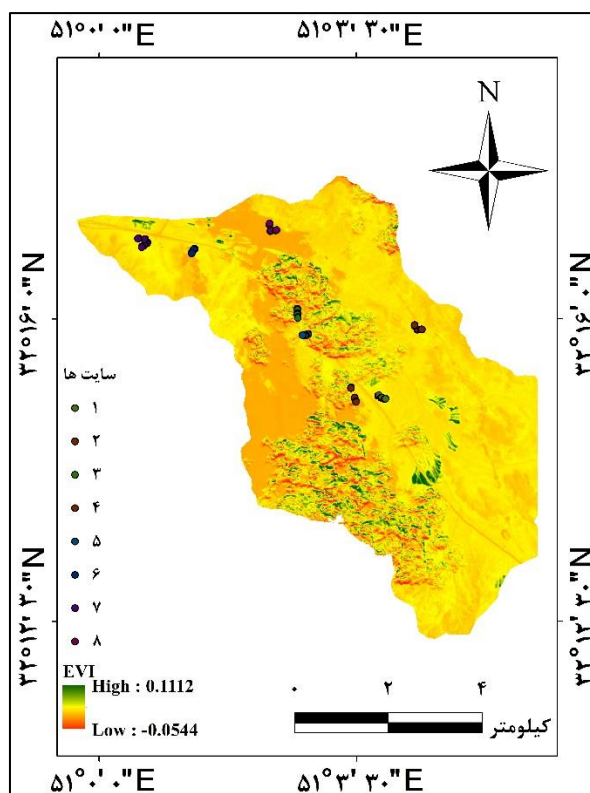
شکل ۲. نمای شماتیک استقرار سایت، ماکروپلات و پلات

۲-۴. محاسبه شاخص‌های پوشش گیاهی

برای پردازش و محاسبه شاخص‌های پوشش گیاهی، ابتدا باندهای مورد نیاز تصاویر ماهواره‌ای در نرم‌افزار Idrisi TerrSet فراخوانی شدند و سپس شاخص‌ها با استفاده از نسبت باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک محاسبه گردیدند. شاخص‌ها به دو گروه اصلی تقسیم می‌شوند: شاخص‌های شیب‌محور که حساسیت آن‌ها به تراکم و سبزیگی پوشش گیاهی بر اساس تغییرات بازتاب بین باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک است (مانند NDVI، RATIO، RVI، TVI، CTVI، TTVI، EVI و SAVI) و شاخص‌های فاصله‌محور که بر اساس فاصله طیفی نسبت به خط خاک یا نقاط فاقد پوشش گیاهی، بازتاب پوشش گیاهی را از پس‌زمینه خاک تفکیک می‌کنند (مانند PVI1، PVI2، PVI3، PVI1، TPAVI1، TPAVI2، DVI، WDVI، MSAVI1، MSAVI2 و AVI) هستند (شکل ۳). در این روش، شاخص‌های فاصله‌محور با استفاده از مدل رگرسیونی بین باند قرمز (به‌عنوان متغیر مستقل) و باند مادون قرمز نزدیک (به‌عنوان متغیر وابسته) و با کمک خط خاک محاسبه شدند. پس از آن، مقادیر عددی شاخص‌ها با ابزار Extract در نرم‌افزار ArcMap 10.6.1 استخراج شده و برای تحلیل‌های بعدی آماده گردیدند. این دسته‌بندی و فرآیند محاسباتی باعث شفافیت بیشتر تحلیل‌ها و امکان مقایسه دقیق عملکرد شاخص‌ها در ارزیابی پوشش گیاهی می‌شود.

۲-۵. محاسبه شاخص‌های تنوع زیستی

به‌منظور تعیین کمی شاخص‌های تنوع زیستی، ابعاد مختلف تنوع شامل تنوع آلفا، بتا و عملکردی در مقیاس ماکروپلات مورد ارزیابی قرار گرفتند. تنوع آلفا که بیانگر غنای گونه‌ای (تعداد گونه‌ها) و یکنواختی (توزیع فراوانی گونه‌ها) است، به‌صورت میانگین تنوع در سطح هر ماکروپلات محاسبه شد. بدین منظور در امتداد هر ترانسکت، گونه‌های گیاهی موجود شمارش و ثبت شده و مقادیر تنوع آلفا بر اساس حضور گونه‌ها در هر پلات استخراج گردید.



شکل ۳. نمونه‌ای از نقشه شاخص پوشش گیاهی (EVI) و توزیع سایت‌های نمونه‌برداری

جهت محاسبه تنوع بتا، از مجموعه‌ای از شاخص‌های تنوع بین مکانی^۱ و شاخص‌های شباهت و فاصله^۲ که بر مبنای حضور و عدم حضور گونه‌ها عمل می‌کنند، استفاده شد (جدول ۱). سپس تنوع بتا از طریق محاسبه اختلافات تنوع بین ترانسکت‌ها مورد محاسبه قرار گرفت. بدین منظور، ابتدا ماتریسی از میانگین درصد پوشش گونه‌های گیاهی در سطح هر ماکروپلات تهیه شد و سپس این ماتریس‌ها در نرم‌افزار PAST جهت استخراج شاخص‌های مدنظر پردازش شدند.

جدول ۱. شاخص‌های تنوع بتا مورد استفاده در مطالعه (Harrison et al., 2011; Schroeder et al., 2018)

شاخص‌های تنوع بتا (Beta diversity)	شاخص‌های شباهت و فاصله (Similarity and distance indices)
Wittaker	Euclidean
Harrison	Chord
Wilson and Shmida	Bray-curtis
Mourell	Morisita
Routledge	Rho
Williams	Correlation
Cody	Cosine
Harrison2	Manhattan
	Gower

محاسبه تنوع عملکردی نیز با استفاده از مجموعه‌ای از شاخص‌های استاندارد شامل: میانگین وزنی جامعه (CWM)^۱، مربع آنتروپی راتو (RaoQ)^۲، غنای عملکرد (FRic)^۳، یکنواختی عملکرد (FEve)^۴ و واگرایی عملکرد (FDiv)^۵ مورد بررسی قرار گرفت. محاسبه این شاخص‌ها در سطح هر ماکروپلات با استفاده از دو ماتریس شامل: ماتریس گونه در پیکسل و ماتریس ویژگی در گونه، با بهره‌گیری از بسته آماری "FD" در محیط نرم‌افزار R 4.2.2 (Team, 2020) انجام شد.

۲-۶. محاسبه ارزش رقومی شاخص‌های پوشش گیاهی متناسب با شاخص‌های تنوع زیستی

با توجه به اینکه مقادیر تنوع زیستی در سطح ماکروپلات محاسبه شده‌اند، ارزش رقومی (DN)^۶ شاخص‌های پوشش گیاهی نیز به‌گونه‌ای تنظیم شد که با همان مقیاس مکانی و سطح نمونه‌برداری مطابقت داشته باشد. به این منظور، مقادیر DN شاخص‌های پوشش گیاهی برای تنوع آلفا و تنوع عملکرد به‌صورت میانگین در محدوده هر ماکروپلات محاسبه گردید تا نماینده مناسبی از وضعیت پوشش گیاهی مرتبط با هر واحد نمونه‌برداری باشد. از سوی دیگر، برای ارزیابی تنوع بتا که ماهیتی مقایسه‌ای و بین مکانی دارد، به‌دلیل وجود ۲۴ ترانسکت نمونه‌برداری شده، اختلاف مقادیر DN شاخص‌های پوشش گیاهی بین هر دو ترانسکت غیر مشابه بر اساس شاخص‌های تنوع بتا و شاخص‌های شباهت و فاصله به‌صورت زوجی محاسبه شد. این روش، این امکان را می‌دهد تا تغییرات مکانی و میزان تفاوت پوشش گیاهی در بازه‌های مختلف نمونه‌برداری، به‌صورت کمی و دقیق تحلیل شود و ارتباط آن با شاخص‌های تنوع زیستی به شکلی منسجم بررسی گردد.

۲-۷. تجزیه و تحلیل آماری

به‌منظور بررسی ارتباط بین مقادیر زمینی تنوع گونه‌های گیاهی و داده‌های حاصل از شاخص‌های گیاهی تصاویر ماهواره‌ای، تحلیل رگرسیون خطی در نرم‌افزار R 4.2.2 انجام گرفت. در این راستا، ابتدا شاخص‌های تنوع زیستی شامل تنوع آلفا، تنوع بتا و تنوع عملکردی به‌عنوان متغیرهای وابسته و میانگین مقادیر ارزش رقومی (DN) استخراج شده از شاخص‌های گیاهی به‌عنوان متغیرهای مستقل وارد مدل شدند. سپس تجزیه و تحلیل رگرسیونی به‌منظور تعیین میزان همبستگی بین متغیرها انجام گرفت. پس از اجرای رگرسیون‌ها، ضریب تعیین (R^2) هر مدل برای سنجش میزان همبستگی محاسبه گردید. شاخص‌هایی که بیشترین همبستگی و سطح معنی‌داری را با جنبه‌های مختلف تنوع زیستی نشان دادند، به‌عنوان شاخص‌های مناسب برای برآورد تنوع گیاهی در منطقه مورد مطالعه انتخاب شدند. شایان ذکر است که به‌دلیل حجم بالای نتایج آماری به‌دست آمده، تنها مهم‌ترین و دارای بالاترین ارزش‌های آماری روابط، همراه با نمودارهای مربوطه در بخش نتایج ارائه شده‌اند.

۳. یافته‌های پژوهش

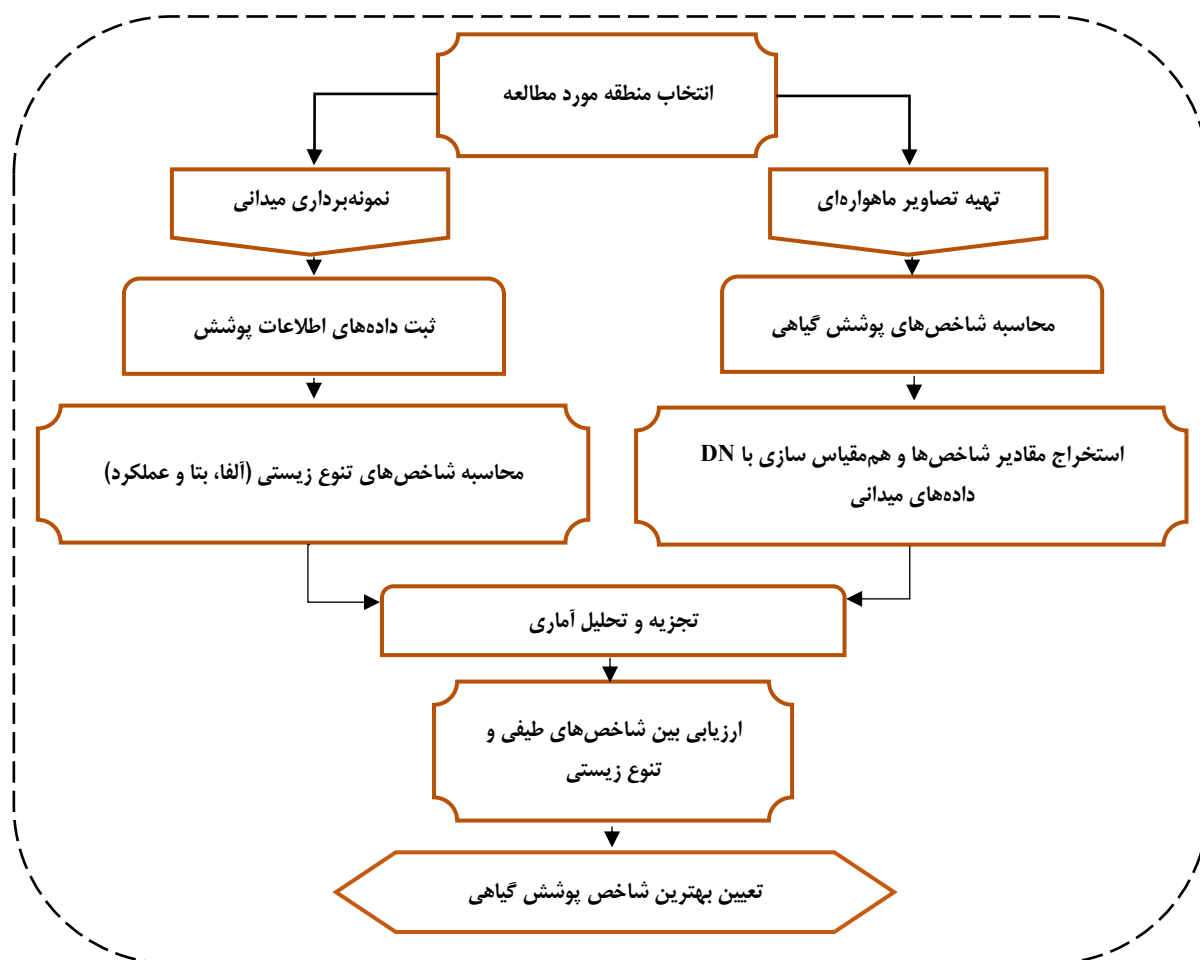
بر اساس نتایج به‌دست آمده از تحلیل رگرسیون، همبستگی معنی‌داری بین متغیر مستقل (شاخص‌های پوشش گیاهی) و متغیر وابسته (تنوع آلفا) مشاهده شد. همان‌طوری که از نتایج بر می‌آید شاخص‌های گیاهی EVI ($R^2=0.20$, P-value=0.02)، MSAVI2 ($R^2=0.19$)، AVI ($R^2=0.18$, P-value=0.02) و NDVI ($R^2=0.17$, P-value=0.03) رابطه مثبت و معنی‌داری با تنوع آلفا دارند. به عبارتی، هرچه میزان این شاخص‌ها بیشتر شود، تنوع آلفا نیز افزایش می‌یابد. به نحوی که بالاترین ضریب همبستگی مربوط به شاخص EVI و کمترین آن مربوط به شاخص AVI بوده است (شکل ۵).

نتایج به‌دست آمده از بررسی ارتباط بین شاخص‌های پوشش گیاهی و تنوع بتا نشان داد شاخص NDVI ($R^2=0.21$, P-value=0.01)،

1. Community Weighted Mean (CWM)
2. Rao's Quadratic entropy (RaoQ)
3. Functional Richness index (FRic)

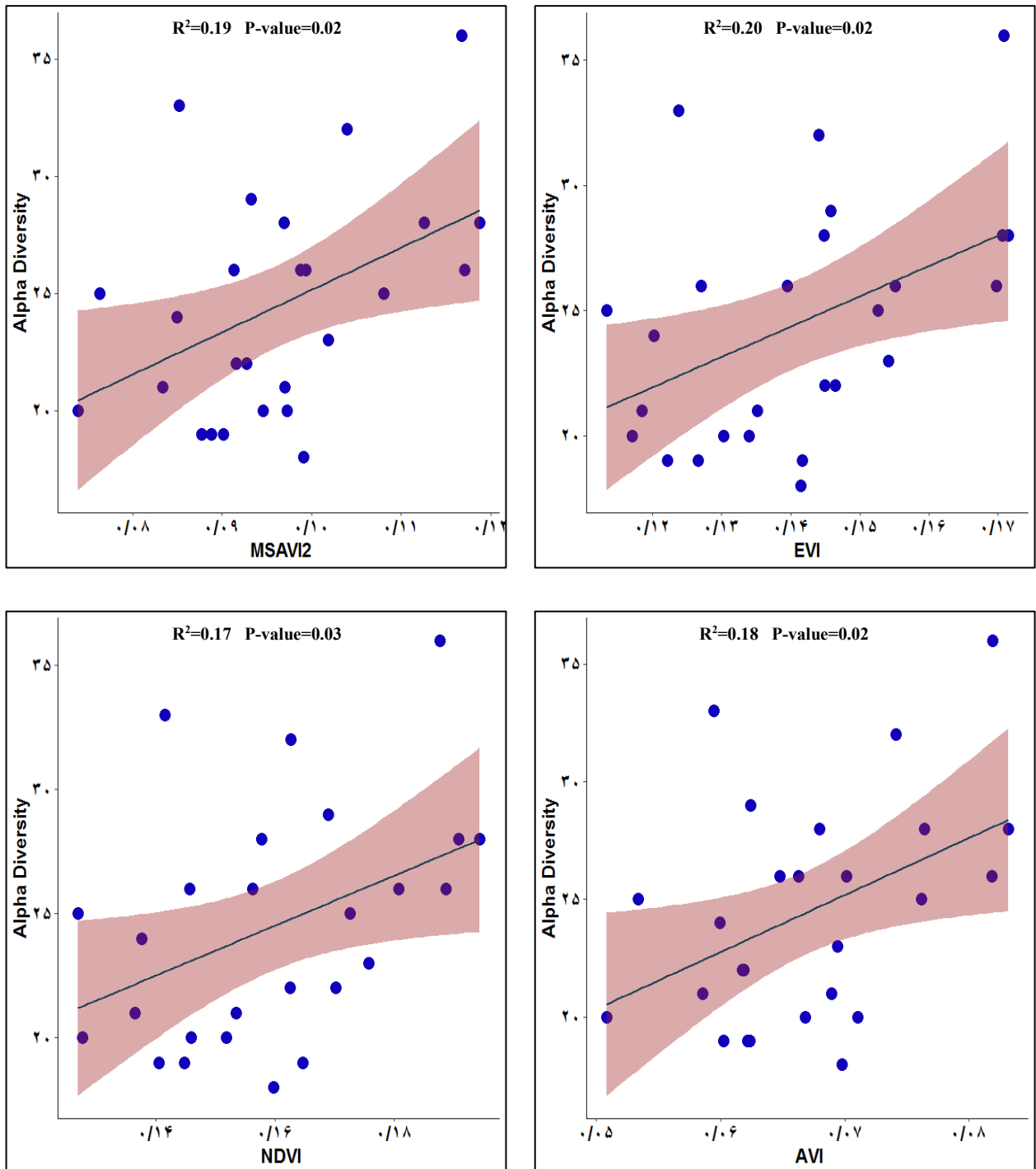
4. Functional Evenness index (FEve)
5. Functional Divergence index (FDiv)
6. Digital Number

با شاخص Bray-curtis تنوع بتا داشتند. به طوری که شاخص NDVI حدود ۲۱ درصد می تواند شاخص فاصله ای Bray-curtis را توجیه کند و با توجه به معنی داری ۰/۰۱، مدل رگرسیونی قادر به نشان دادن تغییرات ترکیب گونه ای به شکل قابل قبولی در منطقه مورد مطالعه است (شکل ۶).

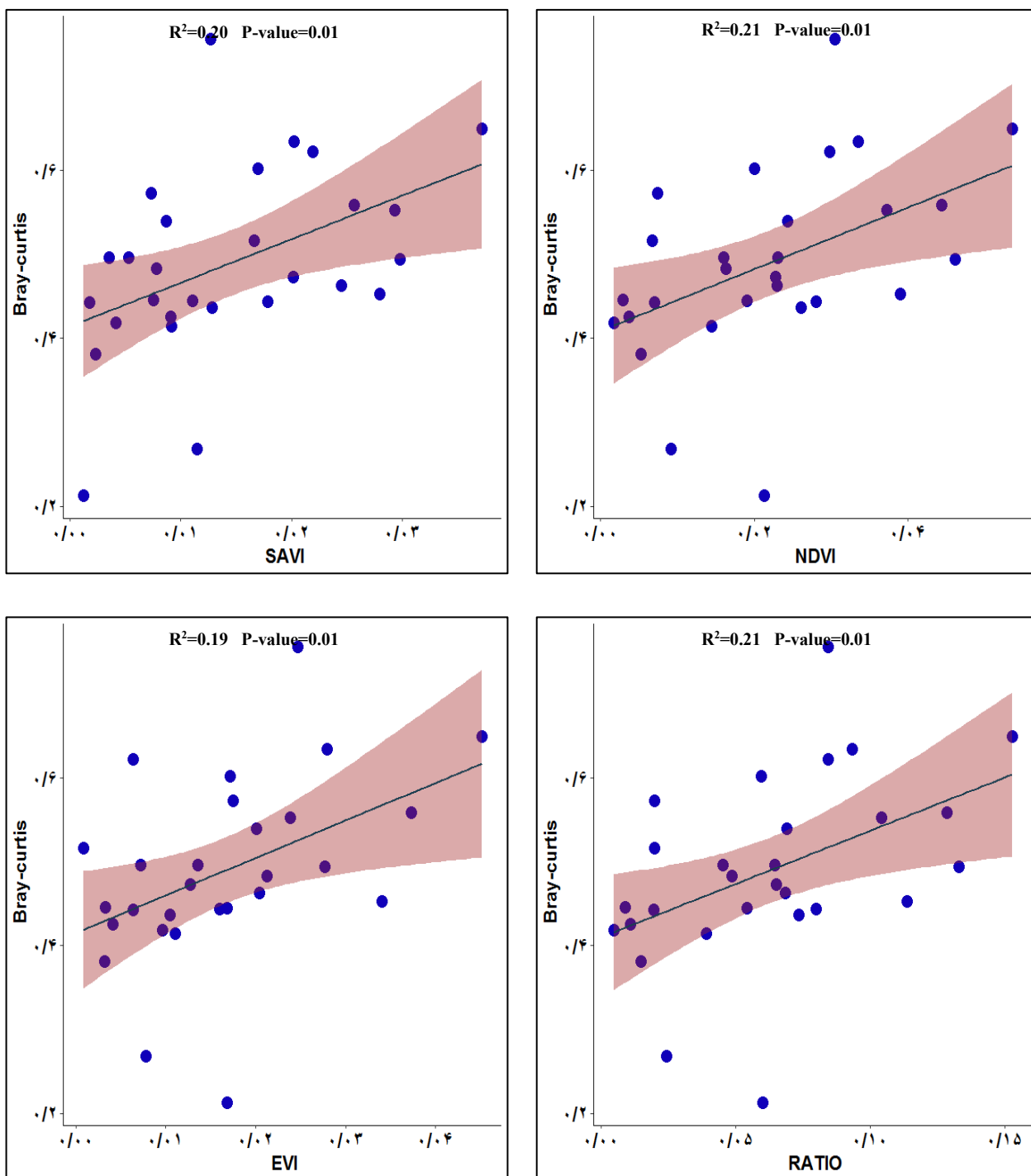


شکل ۴. الگوی کلی مراحل انجام کار

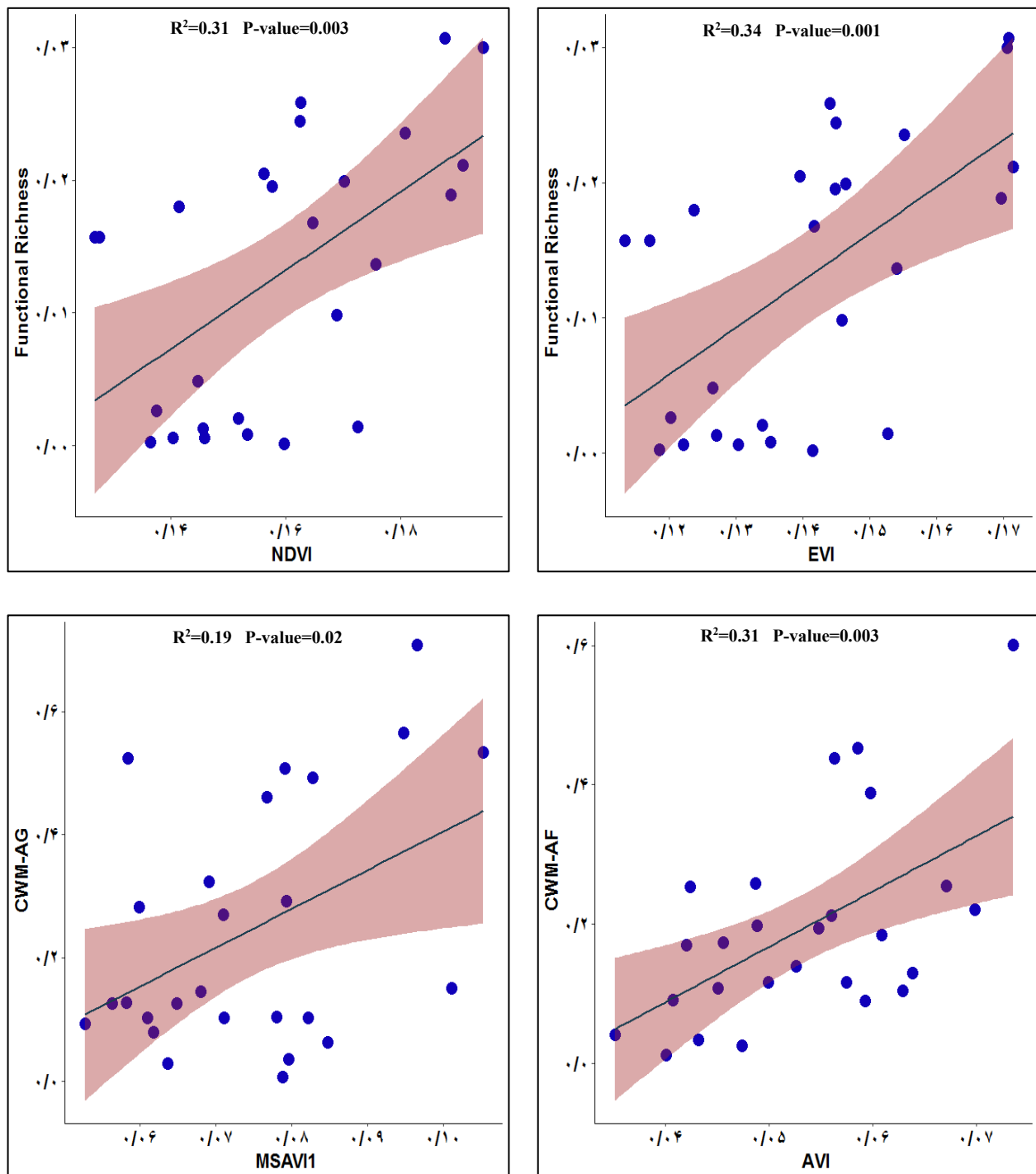
در ارتباط با شاخص های پوشش گیاهی و تنوع عملکرد نیز همبستگی معنی داری بین متغیرهای مستقل و وابسته مشاهده گردید. به طوری که شاخص های EVI ($R^2=0.34$, $P\text{-value}=0.001$) و NDVI ($R^2=0.31$, $P\text{-value}=0.003$) با شاخص غنای عملکرد (FRic), AVI ($R^2=0.31$, $P\text{-value}=0.003$) با شاخص میانگین وزنی فرم رویشی فورب های یک ساله (CWM-AF) و MSAVI1 ($R^2=0.19$, $P\text{-value}=0.02$) با شاخص میانگین وزنی فرم رویشی گراس های یک ساله (CWM-AG) ارتباط مثبت و معنی داری نشان دادند. به طور کلی با توجه به ضرایب رگرسیونی و سطح معنی داری محاسبه شده در روابط رگرسیونی مؤلفه های تنوع (آلفا، بتا و تنوع عملکرد)، شاخص EVI در برآورد تنوع آلفا و تنوع عملکرد و شاخص NDVI در ارزیابی تنوع بتا منطقه مورد مطالعه با بالاترین ضریب همبستگی مؤثر می باشند (شکل ۷).



شکل ۵. نتایج تحلیل رگرسیون خطی بین ارزش‌های رقومی شاخص‌های پوشش گیاهی ماهواره سنتینل-۲ با شاخص تنوع آلفا



شکل ۶. نتایج تحلیل رگرسیون خطی بین ارزش‌های رقومی شاخص‌های پوشش گیاهی ماهواره سنتینل-۲ با شاخص‌های تنوع بتا



شکل ۷. نتایج تحلیل رگرسیون خطی بین ارزش‌های رقمی شاخص‌های پوشش گیاهی ماهواره سنتینل-۲ با مقادیر شاخص‌های تنوع عملکرد

۴. بحث و نتیجه‌گیری

یکی از چالش‌های اساسی در تخمین شاخص‌های تنوع زیستی با استفاده از داده‌های سنجش از دور، انتخاب حسگری است که قادر باشد ترکیب و ساختار پوشش گیاهی را با دقت مناسبی شناسایی کند. در این راستا، ویژگی‌هایی همچون قدرت تفکیک مکانی و وضوح طیفی از اهمیت بالایی برخوردار هستند. همان‌طور که پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند (Gyamfi-Ampadu et al., 2021)، حسگر MSI ماهواره سنتینل-۲ به دلیل وضوح طیفی مناسب و تفکیک مکانی متوسط، نقش مهمی در دقت پیش‌بینی‌ها و ارزیابی‌های زیستی داشته و توانایی بالاتری در برآورد شاخص‌های مختلف تنوع در اکوسیستم‌های مرتعی نسبت به سایر سامانه‌ها از خود نشان می‌دهد. برای ارائه یک نمونه عینی از قابلیت این سنجنده، یک نقشه فضایی از تنوع عملکردی با استفاده از شاخص EVI نشان می‌دهد که مناطق با مقادیر بالای این شاخص، که نمایانگر تراکم و سلامت بالای پوشش گیاهی هستند، با افزایش غنای عملکردی گونه‌ها هم‌راستا بوده و مناطقی با EVI پایین‌تر، تنوع عملکردی کمتری دارند. این مشاهده تأیید می‌کند که داده‌های سنتینل-۲ قادر به شناسایی ناهمگنی‌های مکانی گونه‌ها هستند و می‌توانند به صورت عملی برای پایش، مدیریت و تصمیم‌گیری‌های حفاظتی در اکوسیستم‌های مرتعی مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین، به کارگیری شاخص‌های پوشش گیاهی مانند EVI نه تنها امکان برآورد و مدل‌سازی توزیع تنوع زیستی را در مقیاس‌های متوسط و وسیع فراهم می‌آورد، بلکه قابلیت سنجش تغییرات فضایی و عملکردی اکوسیستم را به صورت کم‌هزینه و مؤثر نشان می‌دهد. در این پژوهش، ارتباط بین شاخص‌های پوشش گیاهی و مؤلفه‌های تنوع با استفاده از روابط رگرسیونی مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که مطالعه حاضر نشان می‌دهد، قدرت تفکیک متوسط ماهواره سنتینل-۲ (با تفکیک مکانی ۲۰ متر) امکان سنجش قابل قبولی از تنوع گونه‌ای مراتع نیمه‌استپی را فراهم می‌آورد. وضوح مکانی و طیفی این تصاویر تأثیر مستقیمی بر میزان دقت برآورد شاخص‌های تنوع گونه‌ای و عملکردی دارد و انتخاب مناسب این پارامترها، به‌ویژه در هماهنگی با مقیاس نمونه‌برداری زمینی، نقشی کلیدی در بهبود همبستگی بین داده‌های میدانی و شاخص‌های استخراج شده از تصاویر دارد. ارتباط مثبت و معنی‌دار میان شاخص‌های پوشش گیاهی و تنوع آلفا تأییدی بر این موضوع است که شاخص‌های طیفی می‌توانند به‌عنوان شاخص‌های جایگزین مناسبی برای ارزیابی غنای گونه‌ای به کار روند. این موضوع با یافته‌های جلیسپی^۱ (۲۰۰۵)، گونزالس-مگیاس^۲ و همکاران (۲۰۰۷) و لرنه و همکاران (۲۰۲۲) که غنای گونه‌ای را معیاری کلیدی در سنجش یکنواختی اکوسیستم‌ها معرفی کرده‌اند، همسو است. این امر حاکی از آن است که افزایش سبزی‌نگی و زیتوده سبز در منطقه مورد مطالعه با افزایش غنای گونه‌ای همراه است. با این حال، همبستگی ضعیف‌تر ($R^2=0.20$) بین شاخص‌های پوشش گیاهی و تنوع آلفا، احتمالاً به دلیل عدم تطابق مقیاس مکانی بین تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ (۲۰ متر) و نمونه‌برداری زمینی (۳۰ متر) در تبیین دقیق‌تر روابط می‌باشد. این موضوع بر اهمیت انتخاب دقیق مقیاس در تحلیل‌های اکولوژیکی مبتنی بر سنجش از دور تأکید دارد و نشان می‌دهد که تفاوت‌های مقیاسی می‌تواند باعث کاهش دقت همبستگی‌ها شود، به‌ویژه زمانی که ترکیب گونه‌ای دارای بازتاب‌های طیفی مشابه یا هم‌پوشانی فضایی بالا باشند.

از سوی دیگر، تحلیل ارتباط بین شاخص‌های پوشش گیاهی و تنوع بتا نتایج مثبتی را نشان داد. تنوع بتا که در مقیاس‌های وسیع‌تری شکل می‌گیرد نشان‌دهنده تغییر ترکیب گونه‌ای در بین واحدهای مختلف مکانی است و تحت تأثیر ناهمگنی فضایی اکوسیستم قرار دارد، به‌طوری‌که استفاده از داده‌های سنجش از دور امکان شناسایی این ناهمگنی را به صورت مؤثری فراهم نموده و تفاوت‌ها را به خوبی نمایان می‌سازند. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که شاخص‌های پوشش گیاهی نظیر NDVI همبستگی نسبتاً بالاتری ($R^2=0.21$) را با تنوع بتا نشان داد و توانست حدود ۲۱ درصد از تغییرات ترکیب گونه‌ای و زیتوده سبز را توضیح دهد. این ارتباط را می‌توان به تأثیر مستقیم ناهمگنی محیطی، تفاوت‌های مدیریتی در مراتع (مانند شدت چرای دام یا قرق بودن سایت‌ها) و تفاوت‌های بازتاب طیفی ناشی از ترکیب گونه‌ای و پوشش گیاهی نسبت داد. همچنین، اختلافات طیفی میان گونه‌های خاص منطقه، عامل مهمی در تشخیص بهتر تغییرات

ترکیب گونه‌ای و در نتیجه افزایش قدرت تفکیک تنوع بتا بوده است. بلندهای مادون قرمز نزدیک و بلند قرمز ماهواره سنتینل-۲ بیشترین تاثیر را در برآورد تنوع بتا داشته‌اند که نقش مهمی در تعیین کمیت و کیفیت پوشش گیاهی ایفا می‌کند. این موضوع با مطالعات روکینی^۱ (۲۰۰۶)، ژانگ^۲ و همکاران (۲۰۱۳)، گامون^۳ و همکاران (۲۰۲۰) و کیشور و همکاران (۲۰۲۴) هم‌راستا است که نقش کلیدی داده‌های سنتینل-۲ را در آشکارسازی تفاوت‌های فضایی گونه‌ای در مقیاس وسیع تأیید نموده‌اند. با این وجود، در مقیاس‌های کوچک‌تر، حضور گونه‌هایی خاص با بازتاب مشابه نظیر *Stipa hohenackeriana* و *Bromus tomentellus* و همچنین وجود خاک لخت با طیف همگن، موجب شد تا قدرت تبیین روابط بین داده‌های طیفی و تنوع میدانی و ضریب همبستگی به حداقل برسد.

در بررسی ارتباط شاخص‌های پوشش گیاهی با تنوع عملکردی نیز، نتایج قابل توجهی به دست آمد. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که شاخص پوشش گیاهی EVI می‌تواند با ضریب همبستگی معنی‌دار ($R^2=0.34$) شاخص غنای عملکردی (FRic) را که نمایانگر میزان پراکنش صفات عملکردی گونه‌ها در جامعه است و با ساختار اکوسیستم و عملکرد آن ارتباط مستقیم دارد، پیش‌بینی کند. این موضوع، اهمیت شاخص‌های پوشش گیاهی را در ارزیابی و تحلیل عملکرد اکوسیستم و تنوع عملکردی برجسته می‌سازد. این شاخص با بهره‌گیری از اطلاعات باندهای قرمز، آبی و مادون قرمز نزدیک، سیگنال‌های مرتبط با زیتوده سبز و سلامت گیاه را با دقت بیشتری بازتاب می‌دهد. در نتیجه، با کاهش اثرات جوی و پس‌زمینه خاک، سیگنال بازتابی پوشش گیاهی را تقویت می‌کند (Huete et al., 2002) و این مزیت منجر به استخراج دقیق‌تر اطلاعات از وضعیت سبزیگی پوشش گیاهی و دقت بیشتر در پایش عملکرد اکوسیستم می‌شود. از این‌رو، EVI را می‌توان به‌عنوان شاخصی کلیدی برای پیوند بین داده‌های طیفی و ویژگی‌های عملکردی گونه‌ها معرفی کرد که قابلیت بالقوه بالایی برای نظارت بر عملکرد اکوسیستم‌های مرتعی دارد. این موضوع با نتایج ما و همکاران (۲۰۱۹) و ژائو و همکاران (۲۰۲۲) هم‌راستا است و نشان می‌دهد که داده‌های طیفی می‌توانند به‌عنوان جایگزین مناسبی برای پایش تنوع عملکردی در مطالعات بزرگ مقیاس عمل کنند و به درک بهتری از عملکرد زیتوده، وضعیت اکولوژیکی و پویایی عملکردی اکوسیستم‌های مرتعی کمک نمایند.

یافته‌های این پژوهش بیانگر ظرفیت چشمگیر فناوری سنجش از دور در تحلیل و مدیریت اکوسیستم‌های مرتعی نیمه‌استپی است. نتایج نشان می‌دهد شاخص‌های طیفی پوشش گیاهی همچون NDVI و EVI، قابلیت بالایی در تبیین و مدل‌سازی مؤلفه‌های گوناگون تنوع زیستی از جمله تنوع آلفا، بتا و عملکرد اکولوژیکی دارند. بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای با تفکیک مکانی و طیفی مناسب، مانند تصاویر سنتینل-۲، می‌تواند رویکردی کارآمد، دقیق و مقرون به صرفه برای پایش و تصمیم‌سازی‌های محیط‌زیستی فراهم آورد. هم‌افزایی میان شاخص‌های گیاهی و شناخت ویژگی‌های اکولوژیکی هر منطقه، ضمن تنظیم بهینه مقیاس‌های فضایی، نقش مؤثری در ارتقای دقت برآورد تنوع زیستی خواهد داشت. بر این اساس، در توسعه مدل‌های آینده، توجه هم‌زمان به نوع شاخص‌های گیاهی، مقیاس مکانی و شرایط اکولوژیکی ضروری است. افزون بر این، ترکیب داده‌های ماهواره‌ای با نمونه‌برداری‌های میدانی دقیق‌تر و بهره‌گیری از الگوریتم‌های پیشرفته تحلیل طیفی، می‌تواند دقت و اعتبار نتایج را در مقیاس‌های خرد به‌طور معنی‌داری افزایش دهد.

References

- Adam, E. M., Mutanga, O., Rugege, D., & Ismail, R. (2012). Discriminating the papyrus vegetation (*Cyperus papyrus* L.) and its co-existent species using random forest and hyperspectral data resampled to HYMAP. *International Journal of Remote Sensing*, 33(2), 552-569.
- Ahmad, A., Ordoñez, J., Cartujo, P., & Martos, V. (2020). Remotely piloted aircraft (RPA) in agriculture: A pursuit of sustainability. *Agronomy*, 11(1), 7.
- Balvanera, P., Pfisterer, A. B., Buchmann, N., He, J. S., Nakashizuka, T., Raffaelli, D., & Schmid, B. (2006). Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services. *Ecology letters*, 9(10), 1146-1156.

- Cardinale, B. J., Duffy, J. E., Gonzalez, A., Hooper, D. U., Perrings, C., Venail, P., Narwani, A., Mace, G. M., Tilman, D., Wardle, D. A., Kinzig, A. P., Daily, G. C., Loreau, M., Grace, J. B., Larigauderie, A., Srivastava, D. S., & Naeem, S. (2012). Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 486(7401), 59-67.
- Cerrejón, C., Valeria, O., Marchand, P., Caners, R. T., & Fenton, N. J. (2021). No place to hide: Rare plant detection through remote sensing. *Diversity and Distributions*, 27(6), 948-961.
- 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.
- Cooper, M. (2023). An inverse latitudinal gradient in species richness of forest red millipedes chersastus attems, 1926 and centrobolus cook, 1897. *International Journal of Engineering Science Invention Research & Development*, 10(2), 5-23.
- Craven, D., Eisenhauer, N., Pearse, W. D., Hautier, Y., Isbell, F., Roscher, C., Bahn, M., Beierkuhnlein, C., Bönisch, G., Buchmann, N., Byun, C., Catford, J. A., Cerabolini, B. E. L., Cornelissen, J. H. C., Craine, J. M., Luca, E. D., Ebeling, A., Griffin, J. N., Hector, A., Hines, J., Jentsch, A., Kattge, J., Kreyling, J., Lanta, V., Lemoine, N., Meyer, S. T., Minden, V., Onipchenko, V., Polley, H. W., Reich, P. B., Ruijven, J. V., Schamp, B., Smith, M. D., Soudzilovskaia, N. A., Tilman, D., Weigelt, A., Wilsey, B., & Manning, P. (2018). Multiple facets of biodiversity drive the diversity- stability relationship. *Nature ecology & evolution*, 2(10), 1579-1587.
- Cui, B., Zhao, Q., Huang, W., Song, X., Ye, H., & Zhou, X. (2019). A new integrated vegetation index for the estimation of winter wheat leaf chlorophyll content. *Remote Sensing*, 11(8), 974.
- Fulford, R. S., Russell, M., Myers, M., Malish, M., & Delmaine, A. (2022). Models help set ecosystem service baselines for restoration assessment. *Journal of Environmental Management*, 317, 115411.
- Garcia, N., Campos, J. C., Silva, D., Alírio, J., Duarte, L. B., Arenas-Castro, S., Pôças, I., Loureiro, A., Teodoro, A. C., Sillero, N. (2024). Biodiversity dataset and atlas of the special area of conservation Montesinho/Nogueira, Portugal. *Biodiversity Data Journal*, 8, 12: e118854.
- Gillespie, T. W. (2005). Predicting woody-plant species richness in tropical dry forests: a case study from south Florida, USA. *Ecological Applications*, 15(1), 27-37.
- González-Megías, A., María Gómez, J., & Sánchez-Piñero, F. (2007). Diversity-habitat heterogeneity relationship at different spatial and temporal scales. *Ecography*, 30(1), 31-41.
- 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.
- Harrison, S., Vellend, M., & Damschen, E. I. (2011). 'Structured' beta diversity increases with climatic productivity in a classic dataset. *Ecosphere*, 2(1), 1-13.
- Hooper, D. U., Adair, E. C., Cardinale, B. J., Byrnes, J. E. K., Hungate, B. A., Matulich, K. L., Gonzalez, A., Duffy, J. E., Gamfeldt, L., & O'Connor, M.L. (2012). A global synthesis reveals biodiversity loss as a major driver of ecosystem change. *Nature*, 486, 105-108.
- Huang, L., Wang, J., Fang, Y., Zhai, T., & Cheng, H. (2021). An integrated approach towards spatial identification of restored and conserved priority areas of ecological network for implementation planning in metropolitan region. *Sustainable Cities and Society*, 69, 102865.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), 195-213.
- Immitzer, M., Neuwirth, M., Böck, S., Brenner, H., Vuolo, F., & Atzberger, C. (2019). Optimal input features for tree species classification in Central Europe based on multi-temporal Sentinel-2 data. *Remote Sensing*, 11(22), 2599.
- Kang, S., Niu, J., Zhang, Q., Zhang, X., Han, G., & Zhao, M. (2020). Niche differentiation is the underlying mechanism maintaining the relationship between community diversity and stability under grazing pressure. *Global Ecology and Conservation*, 24, e01246.
- Kishore, B. S. P. C., Kumar, A., Saikia, P., & Khan, M. L. (2024). Alpha and beta diversity mapping in Indian tropical deciduous forests using high-fidelity imaging spectroscopy. *Advances in Space Research*, 73(2), 1413-1426.
- Koomen, E., & Stillwell, J. (2007). Modelling land-use change: theories and methods. *Modelling land-use change: Progress and applications*, 90, 1-22.
- Lass, L. W., & Prather, T. S. (2004). Detecting the locations of Brazilian pepper trees in the Everglades with a hyperspectral sensor. *Weed Technology*, 18(2), 437-442.

- Lima, T. A., Beuchle, R., Langner, A., Grecchi, R. C., Griess, V. C., & Achard, F. (2019). Comparing Sentinel 2 MSI and Landsat 8 OLI Imagery for Monitoring Selective Logging in the Brazilian Amazon. *Remote sensing*, 961(11), 1-21.
- Liu, X., Frey, J., Munteanu, C., Still, N., & Koch, B. (2023). Mapping tree species diversity in temperate montane forests using Sentinel-1 and Sentinel-2 imagery and topography data. *Remote Sensing of Environment*, 292, 113576.
- Llerena Gordillo, S. A., & Kurbatova, A. (2022). NDVI-alpha diversity relationship in tropical montane cloud forest of Ecuador. 10.25750/1995-4301-2022-3-058-067.
- Loarie, S. R., Joppa, L. N., & Pimm, S. L. (2007). Satellites miss environmental priorities. *Trends in Ecology & Evolution*, 22(12), 630-632.
- Ma, X., Mahecha, M. D., Migliavacca, M., van der Plas, F., Benavides, R., Ratcliffe, S., Kattge, J., Richter, R., Musavi, T., Baeten, L., Barnoiaica, I., Bohn, F. J., Bouriaud, O., Bussotti, F., Ioppi, A., Domisch, T., Huth, A., Jaroszewicz, B., Joswig, J., Pabon-Moreno, D. E., Papale, D., Selvi, F., Vaglio Laurin, G., Valladares, F., Reichstein, M., & Wirth, C. (2019). Inferring plant functional diversity from space: the potential of Sentinel-2. *Remote Sensing of Environment*, 233, 111368.
- MacArthur, R. H. (1965). Pattern in species diversity. *Biol. Rev.* 40, 510-533.
- Magurran, A. E. (2016). How ecosystems change. *Science*, 351(6272), 448-449.
- Martin-Gallego, P., Aplin, P., Marston, C., Altamirano, A., & Pauchard, A. (2020). Detecting and modelling alien tree presence using Sentinel-2 satellite imagery in Chile's temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 474, 118353.
- Mesdaghi, M. (2005). Ecology. *Jihad Daneshgahi Publications*, Mashhad, 1, 187. (In Persian)
- Mutowo, G., Mutanga, O., & Masocha, M. (2018). Evaluating the applications of the near-infrared region in mapping foliar N in the miombo woodlands. *Remote Sensing*, 10(4), 505.
- Overcast, I., Ruffley, M., Rosindell, J., Harmon, L., Borges, P. A. V., Emerson, B. C., Etienne, R. S., Gillespie, R., Krehenwinkel, H., Mahler, D. L., Massol, F., Parent, C. E., Patiño, J., Peter, B., Week, B., Wagner, C., Hickerson, M. J., & Rominger, A. (2021). A unified model of species abundance, genetic diversity, and functional diversity reveals the mechanisms structuring ecological communities. *Molecular Ecology Resources*, 21(8), 2782-2800.
- Qian, L. S., Chen, J. H., Deng, T., & Sun, H. (2020). Plant diversity in Yunnan: Current status and future directions. *Plant diversity*, 42(4), 281-291.
- Rocchini, D., Perry, G. L., Salerno, M., Maccherini, S., & Chiarucci, A. (2006). Landscape change and the dynamics of open formations in a natural reserve. *Landscape and urban planning*, 77(1-2), 167-177.
- Rocchini, D., Ricotta, C., & Chiarucci, A. (2007). Using satellite imagery to assess plant species richness: The role of multispectral systems. *Applied Vegetation Science*, 10(3), 325-331.
- Rocchini, D., Hernández-Stefanoni, J. L., & He, K. S. (2015). Advancing species diversity estimate by remotely sensed proxies: a conceptual review. *Ecological informatics*, 25, 22-28.
- Schroeder, P. J., & Jenkins, D. G. (2018). How robust are popular beta diversity indices to sampling error? *Ecosphere*, 9(2), e02100.
- Singh, P., Pandey, P. C., Petropoulos, G. P., Pavlides, A., Srivastava, P. K., Koutsias, N., Kwai Deng, K. A., & Bao, Y. (2020). Hyperspectral remote sensing in precision agriculture: Present status, challenges, and future trends. In *Hyperspectral remote sensing*, Elsevier, 121-146.
- Tahmasebi, P., Moradi, M., & Omidipour, R. (2017). Plant Functional Identity as the Predictor of Carbon Storage in Semi-Arid Ecosystems. *Plant Ecology & Diversity*, 10(2-3), 139-151.
- Team, R. C. (2020). R: A Language and Environment for Statistical Computing. *Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria. 1-12.
- Tsouros, D. C., Bibi, S., & Sarigiannidis, P. G. (2019). A review on UAV-based applications for precision agriculture. *Information*, 10(11), 349.
- Vellend, M. (2010). Conceptual synthesis in community ecology. *The Quarterly review of biology*, 85(2), 183-206.
- Verrelst, J. C. V., Gustau, M. M., Jordi, P. R., Juan, V., Frank, Jan, G. P. W. C., & José, M. (2015). How essential biodiversity variables and remote sensing can help national biodiversity monitoring. *Global Ecology and Conservation*, 10, 43-59.
- Wang, R., Gamon, J. A., Schweiger, A. K., Cavender-Bares, J., Townsend, P. A., Zyguelbaum, A. I., & Kothari, S. (2018). Influence of species richness, evenness, and composition on optical diversity: A simulation study. *Remote Sensing of Environment*, 211, 218-228.

Wang, D., Qiu, P., Wan, B., Cao, Z., & Zhang, Q. (2022). Mapping α - and β -diversity of mangrove forests with multispectral and hyperspectral images. *Remote Sensing of Environment*, 275, 113021.

Whittaker, R. H., & Levin, S. A. (1977). The role of mosaic phenomena in natural communities. *Theor. Pop. Biol.* 12, 117-139.

Wookey, P. A., Aerts, R., Bardgett, R. D., Baptist, F., Bråthen, K. A., Cornelissen, J. H. C., Gough, L., Hartley, I. P., Hopkins, D. W., Lavorel, S., & Shaver, G. R. (2009). Ecosystem feedbacks and cascade processes: understanding their role in the responses of Arctic and alpine ecosystems to environmental change. *Global Change Biology*, 15(5), 1153-1172.

Zhang, X., Liao, C., Li, J., & Sun, Q. (2013). Fractional vegetation cover estimation in arid and semi-arid environments using HJ-1 satellite hyperspectral data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 506-512.

Zhang, Y., She, J., Long, X., & Zhang, M. (2022). Spatio-temporal evolution and driving factors of eco-environmental quality based on RSEI in Chang-Zhu-Tan metropolitan circle, central China. *Ecological Indicators*, 144, 109436.

Zhang, Y., Wang, Y., & Liu, X. (2024). Late Holocene vegetation diversity change and potential response to climate variations on the northern Qinghai-Tibetan Plateau. *Quaternary International*, 695, 45-54.

Zhao, Y. P., Wang, Z. W., WENDU, R., Zhao, Y. J., & Bai, Y. F. (2022). Remotely sensed monitoring method of grassland plant functional diversity and its relationship with productivity based on Sentinel-2 satellite data. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 46(10), 1234.