

Relationship between Plant Indices of Sentinel 2A Image with Percentage of Cover and Production in Rangeland Habitats of Mountainous Region Adjacent to Choghakhor Wetland, Chaharmahal and Bakhtiari

Jamal Imany¹ , Ataollah Ebrahimi² , Bahram Gholinejad^{3*} , Pejman Tahmasebi⁴ 

1. Department of Natural Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.
Email: Imani.J.1986@gmail.com
2. Department of Natural Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.
Email: Ataollah.Ebrahimi@sku.ac.ir
3. Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.
(Corresponding author).
Email: B.Gholinejad@uok.ac.ir
3. Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.
Email: Pejman.Tahmasebi@sku.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article Type: Research Article Article History: Received: 18 February 2026 Revised: 09 May 2026 Accepted: 06 April 2026 Published: 05 June 2026 Use Your Device to Scan and Read the Article Online  Keywords: Rangeland Assessment, Remote Sensing, Spectral Resolution, Ground Resolution, Plant Indices.	This study aimed to compare the spectral resolution of Sentinel-2A imagery at 10 and 60 m and ground quadrat sizes of 1×1, 1×2, 2×2, and 3×3 m for estimating vegetation production and cover in mountainous rangeland habitats surrounding Choghakhor Wetland, Chaharmahal and Bakhtiari Province, Iran. Field sampling was conducted in 30 units measuring 30×30 m along three transects using two sampling methods involving three and six quadrats. Different quadrat sizes were arranged in grids to estimate vegetation cover and production. The density of dominant species was determined by counting bases, vegetation cover was estimated using a gridded frame, and production was measured using the double-sampling method based on its relationship with canopy cover. The distribution patterns of dominant species were determined using statistical tests. After correcting the Sentinel-2A imagery and calculating vegetation indices, the relationships between the indices and vegetation cover and production were evaluated. The results showed that, at the 10 m resolution, NDVI, CTVI, MSAVI2, Ratio, RVI, SAVI, and TVI were significantly related to vegetation cover and production. The 1×1 m quadrat showed insufficient correlation, whereas the six-quadrat sampling method produced stronger relationships and more reliable models than the three-quadrat method for the other quadrat sizes. At the 60 m resolution, only MSAVI2 and RVI showed significant relationships with vegetation cover and production, and the correlations under both sampling methods were weaker than those at 10 m resolution. Overall, the use of 10 m resolution bands, 1×2 m quadrats, and six-quadrat sampling is recommended as a suitable combination for estimating rangeland vegetation cover and production. This combination improves estimation accuracy and is feasible for field application.

Cite this article: Imany, J., Ebrahimi, A., Gholinejad, B., & Tahmasebi, P. (2026). Relationship between Plant Indices of Sentinel 2A Image with Percentage of Cover and Production in Rangeland Habitats of Mountainous Region Adjacent to Choghakhor Wetland, Chaharmahal and Bakhtiari. *Environmental Research in Mountainous Regions*, 2(2), 101-117. <https://doi.org/10.22034/ermr.2026.145525.1042>



© The Author(s) retain the copyright

Publisher: University of Kurdistan

Extended Abstract

Introduction

Recognition and evaluation of rangeland ecosystems constitute the first and most essential steps in the sustainable management of these valuable resources. Effective management requires comprehensive and accurate knowledge of rangeland conditions, while such information should ideally be obtained with minimum time and cost. However, the vast spatial extent of rangelands, particularly in Iran, poses a major challenge to direct field-based assessment. The considerable area of the country's rangelands, combined with limited financial and human resources, makes comprehensive field evaluation difficult, even at a relatively coarse scale. Therefore, the development and application of rapid, accurate, and cost-effective methods for rangeland assessment are of considerable importance. Remote sensing and satellite data provide an effective approach for addressing these challenges by enabling the assessment of extensive areas at relatively low cost. The ability to provide a broad and synoptic view of vegetation communities, repeated observations, consistent spatial coverage, and timely information are among the major advantages of satellite-based data for vegetation assessment. Accordingly, numerous studies have employed remote sensing techniques to evaluate vegetation cover and rangeland characteristics, demonstrating their considerable potential for such applications. Against this background, the present study was conducted under the semiarid conditions of Iran to determine appropriate models for different sampling patterns and dimensions, evaluate the effectiveness of Sentinel-2A satellite data at spatial resolutions of 10 and 60 m, and identify suitable vegetation indices for estimating vegetation cover and aboveground production in rangelands dominated by broadleaf plant species.

Methodology

The study area is located 40 km southwest of Shahrekord, near Choghakhor Wetland in Chaharmahal and Bakhtiari Province, Iran. The dominant broadleaf plant community was identified through surveys and patrols. Within this community, 30 sampling units measuring 30×30 m were established along three 900-m transects, with 60 m between adjacent units.

Ground sampling used quadrats of four sizes (1×1 , 1×2 , 2×2 , and 3×3 m) to assess vegetation cover and production. Dominant species density was determined by counting individuals within 2×2 m quadrats, while vegetation cover was estimated and aboveground production was measured using a double-sampling method based on cover percentage. Statistical tests were applied to determine spatial distribution patterns of dominant species. Sentinel-2A imagery at 10- and 60-m resolutions was preprocessed and corrected. Vegetation indices were calculated, and their relationships with field-measured vegetation cover and production were evaluated. The study compared satellite and ground sampling scales to identify suitable spatial resolutions and sampling dimensions for rangeland vegetation assessment.

Results and Discussion

The results indicated that most relationships between the NDVI, CTVI, MSAVI2, Ratio, RVI, SAVI, and TVI vegetation indices and vegetation cover and aboveground production were statistically significant, demonstrating the potential of these indices for assessing broadleaf-dominated rangelands. However, correlation strength and model performance varied according to sampling method, quadrat size, and Sentinel-2A spatial resolution. The six-quadrat sampling method generally produced stronger correlations and more reliable models than the three-quadrat method. At the 10-m spatial resolution, this difference was mainly attributed to better spatial correspondence between field quadrats and the 10×10 m satellite pixels. In contrast, the three-quadrat design provided less representative ground information within each pixel, reducing correlation strength and model reliability. Quadrat size also had a substantial influence on the results. The 1×1 m quadrat generally yielded weak and mostly nonsignificant relationships with both vegetation cover and production, accompanied by relatively high RMSE values and poor model validity. Therefore, this quadrat size was considered unsuitable for representing the spatial characteristics of the studied plant community. Increasing quadrat dimensions generally improved the relationships between field measurements and vegetation indices, although differences among larger quadrats were not

always statistically significant. A similar pattern was observed for aboveground production, with stronger correlations and more reliable regression models obtained using six quadrats. For the 60-m bands, increasing quadrat size generally improved correlation strength and significance; nevertheless, the relationships remained weaker than those obtained from the 10-m bands. This reduction was mainly associated with the larger 60×60 m pixel size, which increased spatial heterogeneity and weakened the correspondence between field observations and satellite-derived indices. The effect was particularly evident in the three-quadrat sampling method. Overall, the findings demonstrate that sampling configuration, quadrat size, and satellite spatial resolution are critical factors in rangeland vegetation assessment, with the six-quadrat method and appropriately sized quadrats providing more reliable estimates of vegetation cover and aboveground production.

Conclusion

By examining the validity of the models, it can be seen that in most of the indices, the models obtained in the 1×1 m quadrats in both methods and in the 1×2 quadrats in the 3 quadrats sampling method are not sufficiently valid. Because the difference between the grounds

harvested factor and the result of the model is significant and their RMSE is significantly high. For this reason, the 1×1 quadrat was not suitable for the 10 m Sentinel bands. It was the same way. In the 1×2 quadrat and 3 square sampling methods, the validity of this image (60 m separation) is reduced and is not statistically valid. Therefore, considering this issue, when using 60 m separation bands, it is not recommended to use 1×2 quadrat and 2×2 quadrat with 6 sampling units can be used. The correlation and significance of regression relationships in most indices is low compared to the coverage percentage. So that the models obtained from sampling method 1 in quadrats 1×2 and 2×2 have sufficient validity. In the use of bands with a resolution of 60 m, the relationships obtained in both sampling methods (3 and 6 plates) have a weaker correlation than bands with a resolution of 10 m. In general, it is suggested that bands with a separation of 10 m and a quadrat of 1×2 with a 6 square sampling method should be used to obtain acceptable results and be feasible in terms of sampling. The procedure of increasing and decreasing the correlation and validity of the models is the same as the coverage percentage. Due to the high cost of sampling in the field and other research operations, providing financial resources will help advance the goals of such studies.

Ethical Considerations

Funding

According to the corresponding authors, this article received no financial support or funding.

Author Contributions

The first author: Data collection, field visits and field analysis, data analysis, and manuscript writing.

The second author: Contribution to data analysis and supervision of the study implementation.

The third author: Contribution to the research methodology, contribution to writing the Results section, and final revision of the manuscript.

The fourth author: Contribution to the research methodology and collaboration in writing the Conclusion section.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

The authors declare that no artificial intelligence (AI) tools were used in the writing of this article.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

Data Availability Statement

The data are available from the author upon reasonable request.

Acknowledgments

The authors sincerely appreciate and acknowledge all individuals who collaborated with them in the collection of field data.



ارتباط شاخص‌های گیاهی تصویر سنتینل 2A با درصد پوشش و تولید رویشگاه‌های مرتعی مناطق کوهستانی همجوار با تالاب چغاخور، چهارمحال و بختیاری

جمال ایمانی^۱، عطاالله ابراهیمی^۲، بهرام قلی نژاد^{۳*}، پژمان طهماسبی^۴

۱. گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: Imani.J.1986@gmail.com
۲. گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: Ataollah.Ebrahimi@sku.ac.ir
۳. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران (نویسنده مسئول). رایانامه: B.Gholinejad@uok.ac.ir
۴. گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: Pejman.Tahmasebi@sku.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخچه مقاله:	
دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۹	
بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۹	
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۵	
انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۹	
از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید	
	
واژه‌های کلیدی: ارزیابی مراتع، سنجش از دور، قدرت تفکیک طیفی، قدرت تفکیک زمینی، شاخص‌های گیاهی.	تحقیق حاضر با هدف مقایسه تفکیک طیفی تصاویر Sentinel-2A با قدرت تفکیک ۱۰ و ۶۰ متر و تفکیک زمینی کوادرات‌های ۱×۱، ۲×۲، ۳×۳ متر، به‌منظور برآورد تولید و پوشش گیاهی در رویشگاه‌های مرتعی کوهستانی پیرامون تالاب چغاخور در استان چهارمحال و بختیاری انجام شد. نمونه‌برداری زمینی در ۳۰ واحد ۳۰×۳۰ متری، در امتداد سه خط و با استفاده از دو روش شامل ۳ و ۶ کوادرات انجام گرفت. برای برآورد درصد پوشش و تولید، ابعاد مختلف کوادرات به‌صورت شبکه‌ای به‌کار گرفته شد. تراکم گونه‌های غالب با شمارش پایه‌ها، درصد پوشش با قاب‌های مشبک و تولید به روش نمونه‌گیری مضاعف و بر اساس ارتباط آن با درصد پوشش تاجی اندازه‌گیری شد. همچنین نوع پراکنش گونه‌های غالب با استفاده از آزمون‌های آماری تعیین گردید. پس از تصحیح تصاویر Sentinel-2A و محاسبه شاخص‌های گیاهی، رابطه شاخص‌ها با درصد پوشش و تولید بررسی شد. نتایج نشان داد در تفکیک ۱۰ متری، شاخص‌های CTVI، NDVI، SAVI، RVI، Ratio، MSAVI2 و TVI با درصد پوشش و تولید رابطه معنی‌دار دارند. در کوادرات ۱×۱ متر، همبستگی کافی مشاهده نشد، در حالی که روش نمونه‌برداری ۶ کوادراتی در سایر ابعاد، نسبت به روش ۳ کوادراتی روابط قوی‌تر و مدل‌های معتبرتری ایجاد کرد. در تفکیک ۶۰ متری، تنها شاخص‌های MSAVI2 و RVI روابط معنی‌داری با پوشش و تولید نشان دادند و قدرت همبستگی در هر دو روش نمونه‌برداری کمتر از تفکیک ۱۰ متری بود. در نهایت، استفاده از باندهای با تفکیک ۱۰ متر، کوادرات ۲×۱ متر و روش نمونه‌برداری ۶ کوادراتی به‌عنوان ترکیبی مناسب و اجرایی برای برآورد پوشش و تولید مرتعی پیشنهاد شد. این ترکیب ضمن افزایش دقت برآوردها، از نظر اجرای عملیات میدانی نیز قابلیت مناسبی دارد.

استناد: ایمانی، جمال؛ ابراهیمی، عطاالله؛ قلی‌نژاد، بهرام و طهماسبی، پژمان. (۱۴۰۵). ارتباط شاخص‌های گیاهی تصویر سنتینل 2A با درصد پوشش و تولید رویشگاه‌های مرتعی مناطق کوهستانی همجوار با تالاب چغاخور، چهارمحال و بختیاری. پژوهش‌های محیطی در قلمروهای کوهستانی، ۲ (۲)، ۱۱۷-۱۰۱. <https://doi.org/10.22034/ermr.2026.145525.1042>



مقدمه

شناخت و ارزیابی اکوسیستم مرتعی به عنوان اولین گام در مدیریت این منابع به شمار می‌آید. شناخت منابع مذکور، اولین و ملزوم‌ترین عامل جهت مدیریت این اکوسیستم‌ها است. این شناخت و آگاهی باید جامع و کامل باشد و در این حال با کمترین هزینه و زمان فراهم گردد. لیکن گستردگی این منابع بخصوص اراضی مرتعی عامل محدودکننده‌ای در اندازه‌گیری مستقیم و صحرایی به شمار می‌آید. وسعت زیاد مراتع کشور و کمبود منابع مالی و جهت ارزیابی این عرصه وسیع، ارزیابی آن را حتی در مقیاس اجمالی با مشکل روبرو ساخته است. شناخت روش‌های سریع و دقیق با کمترین هزینه جهت آنالیز و ارزیابی مراتع حائز اهمیت می‌باشد. این نکته‌ای است که تقریباً تمامی دانشمندان مرتبط با علوم اندازه‌گیری و آنالیز گیاهان بر آن تأکید دارند. استفاده از داده‌های ماهواره‌ای یکی از روش‌های مناسبی است که مطالعه اکوسیستم‌ها را با هزینه‌ای کمتر ممکن می‌سازد. کمپبل^۱ و همکاران (۲۰۱۱) بیان می‌کنند که خصوصیات نظیر فراهم ساختن دید وسیع و یکپارچه از یک جامعه، قابلیت تکرارپذیری، سهولت وصول بودن اطلاعات و دقت بالای اطلاعات حاصله و صرفه‌جویی در زمان از ویژگی‌هایی است که استفاده از این گونه اطلاعات را برای بررسی پوشش گیاهی نسبتاً ارجحیت می‌بخشد. بر همین اساس محققین زیادی از جمله موسوی و همکاران (۱۳۸۵) و ارزانی و همکاران (۱۳۸۷) به منظور بررسی پوشش گیاهی از داده‌های سنجش از دوری استفاده نموده و این تکنیک را مناسب این گونه مطالعات دانسته‌اند. شاخص‌های گیاهی زیادی وجود دارند که هر کدام در شرایط خاصی دارای همبستگی با داده‌های زمینی می‌باشند که لازم است در مورد هر کدام از آنها بررسی صورت بگیرد و تناسب هر شاخص جهت فرم روشی خاصی تعیین شود. آندرسن و هانسون^۲ (۲۰۰۱) اظهار داشتند که شاخص‌های گیاهی نسبت به پوشش گیاهی عکس‌العمل متفاوتی را نشان می‌دهند که بیان کمی این روابط مشکل می‌باشد زیرا این روابط تحت تأثیر عواملی چون زاویه تابش خورشید، جذب اتمسفری، بازتاب پدیده‌های سایه، مراحل رشد گیاهی قرار گرفته و تغییرپذیر می‌باشند. بر این اساس نتایج تحقیقات محققین تاکنون در ۳ گروه قابل ذکر است:

با توجه به اکوسیستم پیچیده مراتع، جامعه گیاهی خشک و نیمه‌خشک و ناهمگنی موجود نظیر تنوع پوشش گیاهی، توپوگرافی، تغییرات مکانی زیاد در مقیاسی کوچکتر از قدرت تفکیک مکانی داده‌های ماهواره‌ای (دانکن^۳ و همکاران، ۱۹۹۳) پایین بودن میزان پوشش و تولید و مهم‌تر از همه ترکیب عواملی چون سنگ و سنگریزه، خاک، لاشبرگ و .. در بازتاب طیفی ثبت شده توسط سنجنده‌های ماهواره‌ای، حصول نتایج متفاوت دور از انتظار نمی‌باشد (مولیله^۴ و همکاران، ۲۰۰۱).

نبود امکانات و سرمایه کافی اجازه بررسی کل سطح مراتع را به صورت برداشت زمینی نمی‌دهد. همچنین استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، نیازمند نمونه‌برداری زمینی می‌باشد. بنابراین یافتن روش‌های مناسب برای نمونه‌گیری و استفاده از تعداد و ابعاد مناسب نمونه جهت بررسی‌های سنجش از دوری برای ارزیابی خصوصیات پوشش گیاهی (تولید و تاج پوشش) یکی از الزامات اولیه است. تلفیق برداشت‌های زمینی از پوشش گیاهی و داده‌های ماهواره‌ای دارای قابلیت بهتری بوده و می‌تواند قابل تعمیم به سطح گسترده‌تری باشد. پراکنش و نوع نمونه‌گیری، تعداد و ابعاد نمونه‌ها داخل واحدهای نمونه‌برداری زمینی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند.

برای شناخت اکوسیستم‌های مرتعی متغیرهای زیادی وجود دارد که بسته به هدف از کار می‌توان هر کدام از این متغیرها را اندازه‌گیری کرد. از جمله این متغیرها، تولید و درصد پوشش گیاهان می‌باشد. یکی از الزامات مدیریت صحیح مرتع، داشتن اطلاع دقیق و به هنگام از این فاکتورها می‌باشد. برای اطلاع از ظرفیت چرایی مرتع، باید مقدار تولید گیاهان اندازه‌گیری شود و درصد پوشش گیاهان جهت اطلاع از میزان حفاظت خاک دارای اهمیت است. همچنین در ارزیابی وضعیت مراتع، یکی از فاکتورهای مورد اندازه‌گیری تولید و پوشش می‌باشد (مقدم، ۱۳۹۳).

برای اندازه‌گیری درصد تاج پوشش و تولید گیاهان، روش‌های زیادی ابداع شده که هر روش در جامعه گیاهی خاص و با توجه به هدف مطالعه و همچنین امکانات موجود، نتیجه متفاوتی ارائه می‌دهد (مقدم، ۱۳۸۰). در این راستا بررسی و تعیین مناسب‌ترین روش در هر جامعه یا رویشگاه که از سرعت و دقت کافی برخوردار باشد از اهمیت بسزایی برخوردار است. یکی از روش‌های قابل اعتماد اندازه‌گیری، استفاده از قاب یا کوادرات می‌باشد. که باید به درستی از نظر روش نمونه‌برداری، تعداد و ابعاد انجام شود (ارزانی و عابدی، ۱۳۹۴). مزیت کوادرات نسبت به سایر واحدهای نمونه‌برداری در این است که به وسیله آن می‌توان کلیه پارامترهای کمی از جمله فراوانی، تراکم، پوشش و وزن را برآورد نمود. در انتخاب اندازه و تعداد قاب بایستی دقت کافی شود. سطح واحد نمونه‌برداری باید به اندازه‌ای بزرگ باشد که شامل تعداد قابل ملاحظه‌ای از گیاهان شود ولی در عین حال بایستی آنقدر بزرگ نباشد که تفکیک و اندازه‌گیری گیاهان سخت شود (ارزانی و همکاران، ۱۳۸۷).

1. Campbell
2. Anderson & Hanson
3. Duncan
4. Moleele

با توجه به مباحث ذکر شده، روش‌های معمول اندازه‌گیری و بررسی پوشش گیاهی به تعداد نمونه‌های زیادی از جامعه جهت ارزیابی نیاز دارد در حالی که روش مورد استفاده در این تحقیق، علاوه بر سرعت اندازه‌گیری بالا، با حجم نمونه کمتر از دقت اندازه‌گیری بیشتری برخوردار است که به انجام این تحقیق ضرورت می‌بخشد. بنابراین، هدف از انجام این تحقیق، تعیین مدل مناسب در الگوها و ابعاد نمونه‌برداری متفاوت، کارایی داده‌های رقومی ماهواره سنتینل 2A (با قدرت تفکیک ۱۰ و ۶۰ متری) و همچنین معرفی شاخص‌های گیاهی مناسب جهت برآورد پوشش و تولید در مراتع با گیاهان غالب پهن برگ فراهم شد.

مرور ادبیات و سوابق پژوهش

پایش وضعیت پوشش گیاهی یکی از مهم‌ترین موضوعات در مطالعات منابع طبیعی و مدیریت سرزمین محسوب می‌شود. روش‌های سنتی اندازه‌گیری ویژگی‌هایی نظیر درصد پوشش گیاهی، تولید علوفه و زی‌توده، اگرچه از دقت مناسبی در مقیاس نمونه برخوردارند، اما اجرای آنها در مناطق وسیع و به‌ویژه مناطق کوهستانی به دلیل ناهمواری، دشواری دسترسی، هزینه زیاد و نیاز به نیروی انسانی قابل توجه با محدودیت‌هایی مواجه است. از این رو، استفاده از داده‌های سنجنش‌ازدور به‌عنوان ابزاری برای پایش مکانی و زمانی پوشش گیاهی مورد توجه گسترده قرار گرفته است.

در میان داده‌های ماهواره‌ای موجود، Sentinel-2 به دلیل تفکیک مکانی نسبتاً بالا، تکرارپذیری مناسب و وجود باندهای مرئی، مادون‌قرمز نزدیک، لبه قرمز و مادون‌قرمز کوتاه‌موج، ظرفیت مناسبی برای مطالعات پوشش گیاهی و مراتع دارد. Sentinel-2 برای پایش پوشش زمین و تغییرات پوشش گیاهی طراحی شده است (دراچ^۱ و همکاران، ۲۰۱۲). این ویژگی‌ها به‌خصوص برای مراتع کوهستانی اهمیت دارد؛ زیرا در چنین مناطقی تغییرات ارتفاع، شیب، جهت دامنه، رطوبت خاک و شرایط اقلیمی می‌تواند موجب تغییرات قابل توجه در تراکم و تولید پوشش گیاهی در فاصله‌های کوتاه شود. بنابراین، تفکیک مکانی ۱۰ متر در باندهای اصلی Sentinel-2 می‌تواند نسبت به سنجنده‌های با قدرت تفکیک مکانی پایین‌تر، اطلاعات مناسب‌تری درباره ناهمگنی پوشش گیاهی فراهم کند.

یکی از نخستین و پرکاربردترین شاخص‌ها، شاخص تفاضلی نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) است که از ترکیب باند قرمز و مادون‌قرمز نزدیک به دست می‌آید. NDVI به‌طور گسترده برای ارزیابی سبزی‌نگی، تراکم نسبی پوشش گیاهی، رشد گیاه و تغییرات زمانی پوشش استفاده شده است. در مطالعات مرتعی نیز این شاخص به‌عنوان یکی از متداول‌ترین شاخص‌های سنجنش وضعیت و تولید پوشش گیاهی مورد استفاده قرار گرفته است (مونیا^۲، ۲۰۲۲). با این حال، NDVI در پوشش‌های کم‌تراکم ممکن است تحت تأثیر بازتاب خاک قرار گیرد و در پوشش‌های بسیار متراکم نیز با پدیده اشباع مواجه شود. به همین دلیل شاخص‌های دیگری از جمله SAVI، MSAVI، EVI و غیره توسعه یافته‌اند که هر کدام برای شرایط خاصی می‌توانند اطلاعات مکملی ارائه دهند.

آندرتا^۳ و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای با مقایسه Sentinel-2 با Landsat-8 و PlanetScope برای برآورد پوشش گیاهی علفزارها، نشان دادند که شاخص‌های گیاهی می‌توانند تفکیک طیفی بین خاک روشن و پوشش گیاهی را افزایش دهند و برای تخمین Fractional Vegetation Cover به کار روند. در این مطالعه، استفاده از باندهای NIR و قرمز برای Sentinel-2 اهمیت ویژه‌ای داشت. مطالعه داشپورو^۴ و همکاران (۲۰۲۳) نیز ارتباط میان داده‌های زمینی و داده‌های Sentinel-2 را برای تخمین درصد پوشش گیاهی و زی‌توده هوایی در استپ‌های مغولستان بررسی کرد. در این پژوهش، داده‌های میدانی مربوط به AGB و FVC همراه با باندهای طیفی و شاخص‌های گیاهی Sentinel-2 وارد مدل‌های سنجنش‌ازدور و یادگیری ماشین شدند. همچنین در پژوهش هربی^۵ و همکاران (۲۰۲۵) در مناطق کوهستانی کارپات جنوبی رومانی، شاخص‌های NDVI، SAVI، MSAVI و LAI حاصل از Sentinel-2 برای بررسی تغییرات زی‌توده پوشش گیاهی در یک منطقه حفاظت‌شده مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان‌دهنده قابلیت این شاخص‌ها برای پایش تغییرات زمانی زی‌توده در اکوسیستم‌های کوهستانی بود.

تعدادی از محققین مانند آندرسن و هانسون (۲۰۰۱) و مولیله^۶ و همکاران (۲۰۰۱) ارتباط روشن و مشخصی را بین مشخصه‌های گیاهی و باندهای طیفی یا شاخص‌های گیاهی نیافته و یا این ارتباط را ضعیف گزارش نموده‌اند. گروهی هم از جمله هاردیسکی^۷ (۱۹۸۴)، ژولین^۸

1. Drusch
2. Munyati
3. Andreatta
4. Dashpurev
5. Herbei
6. Moleele
7. Hardisky
8. Xulin

(۲۰۰۱)، تاکر^۱ (۱۹۸۶) و ارزانی (۱۳۷۷) ارتباط معنی‌داری را بین باندهای طیفی یا شاخص‌های گیاهی و مشخصه‌های گیاهی گزارش نموده‌اند. گروه سوم چون پیکاپ^۲ (۱۹۹۳) و کی^۳ (۱۹۹۴) معتقدند که ارتباط فوق بستگی به شرایط محیطی داشته و ممکن است این ارتباط در برخی از نقاط معنی‌دار و در نقاط مجاور به علت تاثیر عواملی چون ناهمگن بودن پوشش گیاهی، پایین بودن درصد تاج پوشش گیاهی و بیوماس و ترکیب گیاهی، اثرات خاک و ... این ارتباط ضعیف یا بی‌معنی باشد. ناطقی و همکاران (۱۳۹۶) در بررسی تغییرات پوشش گیاهی جزیره قشم با استفاده از ۴ شاخص گیاهی NDVI، SAVI، RVI و WAVI نشان دادند شاخص SAVI بهترین عملکرد را دارد. بنابراین، تحقیقات انجام‌شده نشان می‌دهد که استفاده از Sentinel-2 برای بررسی وضعیت پوشش گیاهی، تولید و تغییرات زی‌توده در اکوسیستم‌های کوهستانی از نظر علمی امکان‌پذیر است؛ با این حال، رابطه بین شاخص‌های گیاهی و اندازه‌گیری‌های میدانی درصد پوشش و تولید در رویشگاه‌های مرتعی کوهستانی ایران همچنان نیازمند بررسی منطقه‌ای و میدانی است. بیشتر مطالعات موجود یا بر آورد زی‌توده، یا بر آورد درصد پوشش، یا پایش روند سبزی‌نگی متمرکز بوده‌اند. بنابراین، بررسی همزمان رابطه مجموعه‌ای از شاخص‌های گیاهی-Sentinel-2A با دو متغیر میدانی درصد پوشش و تولید مرتعی، آن هم در شرایط پیچیده توپوگرافی رویشگاه‌های کوهستانی، می‌تواند از لحاظ علمی و اجرایی موثر باشد. همچنین در این تحقیق، بررسی همزمان تطابق مقیاس داده زمینی و ماهواره‌ای از طریق مقایسه ۱۰ و ۶۰ متری، چهار اندازه کوادرات، دو الگوی نمونه‌برداری و ارزیابی همزمان R^2 ، RMSE و آزمون اعتبار مدل در این رویشگاه مرتعی کوهستانی به عنوان نوآوری پژوهش در نظر گرفته شده است. در نتیجه، پژوهش حاضر می‌تواند با برداشت همزمان داده‌های میدانی درصد پوشش و تولید در پلات‌های مرتعی و استخراج شاخص‌های گیاهی از تصاویر Sentinel-2A، رابطه آماری میان این متغیرها را تعیین کرده و مشخص کند که کدام شاخص یا ترکیب شاخص‌ها توانایی بیشتری برای بر آورد درصد پوشش و تولید رویشگاه‌های مرتعی مناطق کوهستانی دارد و این موضوع می‌تواند مبنایی برای توسعه روش‌های سریع‌تر، کم‌هزینه‌تر و غیرمخرب پایش مراتع باشد.

روش‌شناسی پژوهش

محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در فاصله حدود ۴۰ کیلومتری جنوب‌غربی شهرکرد، در محدوده‌ای کوهستانی و در نزدیکی تالاب چغاخور در استان چهارمحال و بختیاری قرار دارد. از نظر تقسیمات اقلیمی، این منطقه در محدوده اقلیم ایران و تورانی و ناحیه نیمه‌استپی واقع شده است. محدوده جغرافیایی منطقه بین عرض‌های جغرافیایی ۳۱ درجه و ۹۴ دقیقه و ۹۴ ثانیه تا ۳۲ درجه و ۰۰ دقیقه و ۹۸ ثانیه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۵۰ درجه و ۸۵ دقیقه و ۵۰ ثانیه تا ۵۰ درجه و ۸۷ دقیقه و ۲۰ ثانیه شرقی قرار دارد. متوسط بارندگی سالانه در ایستگاه آورگان، واقع در فاصله حدود ۱۰ کیلومتری از منطقه مورد مطالعه، حدود ۴۵۰ میلی‌متر گزارش شده است (اداره هواشناسی استان چهارمحال و بختیاری، ۱۳۹۶). جامعه گیاهی مورد مطالعه در محدوده ارتفاعی ۲۲۵۰ تا ۲۵۶۰ متر از سطح دریا، با دامنه شیب ۸ تا ۵۴ درصد و جهت غالب شیب غربی قرار دارد. پوشش گیاهی غالب این جامعه را فورب‌ها تشکیل می‌دهند. با توجه به مجاورت منطقه با روستا و شدت بالای چرای دام، ترکیب پوشش گیاهی تحت تاثیر فشار چرا قرار گرفته است؛ به گونه‌ای که بخش عمده پوشش موجود را گونه‌های کم‌ارزش و خاردار تشکیل می‌دهند. بافت خاک منطقه نسبتاً سبک است. گونه‌های همراه این جامعه گیاهی، که از درصد ترکیب پایینی برخوردارند، شامل گل گندم بوته‌ای^۴، کلاه میرحسن^۵، جو وحشی^۶ و گون سفید^۷ هستند.

1. Tucker
2. Pickup
3. Qi
4. Centurea virgata
5. Acantholimon olivieri
6. Hordeum bulbosum
7. Astragalus gossypinus



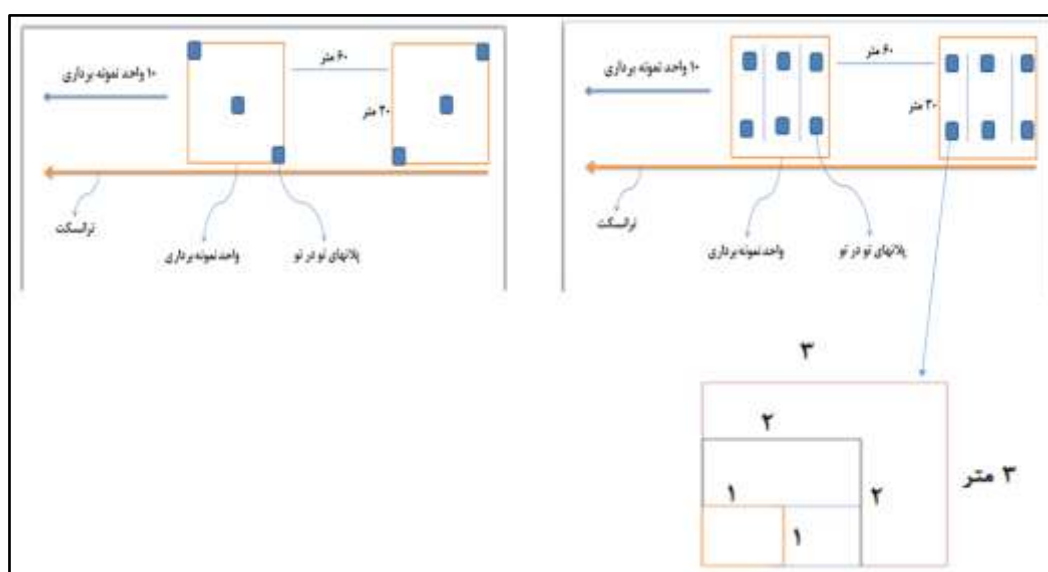
شکل ۱. تصویر جامعه نمونه‌برداری با گونه‌های غالب علفی و نحوه کوادرات‌گذاری
منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴

روش تحقیق

در این مطالعه روش تحقیق را می‌توان در دو بخش اصلی تقسیم‌بندی نمود که به شرح زیر هستند:
الف) جمع‌آوری و پردازش داده‌های زمینی:

ابتدا با استفاده از بررسی میدانی و گشت و بازدید صحرایی در منطقه کوهستانی مورد مطالعه، جامعه گیاهی با گیاهان غالب پهن برگ انتخاب شد. در این جامعه در فصل بهار، محدوده‌ای برای نمونه‌برداری مشخص شد. سپس داخل این محدوده و در جهت افقی (شیب نسبتاً ثابت)، ۳۰ واحد نمونه‌برداری به ابعاد ۳۰×۳۰ متر و با فاصله ۶۰ متر از هم در امتداد ۳ خط ۹۰۰ متری انتخاب شد. به طوری که در امتداد هر ترانسکت ۱۰ واحد نمونه‌برداری به صورت سیستماتیک مستقر گردید.

در داخل هر واحد نمونه‌برداری ۳۰ در ۳۰ متری، دو الگوی نمونه‌برداری متفاوت از نظر تعداد و آرایش کوادرات در نظر گرفته شد. به صورتی که الگوی یک دارای ۶ و الگوی دو دارای ۳ کوادرات بود. الگوی ۶ کوادراتی به صورت دو ردیف ۳ کوادراتی موازی که فاصله ردیف‌ها ده متر از هم بود و الگوی ۳ کوادراتی به صورت یک ردیف مورب در وسط واحد نمونه‌برداری مستقر گردید (شکل ۲).



شکل ۲: نحوه آرایش کوادرات‌های تودرتو داخل واحدهای نمونه‌برداری در دو روش نمونه‌برداری

منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴

در داخل هر کوادرات تو در تو با استفاده از GPS مدل 60CSx GARMIN موقعیت نقطه ثبت شد. در داخل هر اندازه کوادرات مستقر شده، درصد تاج پوشش گونه‌های گیاهی با استفاده از قاب مشبک اندازه‌گیری شد. در گیاهان بوته‌ای رشد سال جاری و در گیاهان علفی یکساله و چند ساله از ۱ سانتی‌متری بالای خاک با قیچی قطع شد. از آنجا که قطع و توزین تولید گونه‌ها در تمامی کوادرات‌ها مستلزم صرف وقت و هزینه زیاد می‌باشد، برای اندازه‌گیری تولید از روش قطع و توزین توام با نمونه‌گیری مضاعف استفاده گردید. بدین ترتیب که تاج پوشش گونه‌های گیاهی در تمامی کوادرات‌ها اندازه‌گیری شده ولی تولید گونه‌های گیاهی در روش ۱، در دو کوادرات از ۶ کوادرات و در روش ۲، در یک کوادرات از ۳ کوادرات قطع و سپس توزین شد سپس با استفاده از معادله رگرسیونی بین تاج پوشش گیاهی و تولید کوادرات‌های قطع و توزین شده، تولید گونه‌های گیاهی در تمام کوادرات‌ها برآورد گردید (ارزانی و همکاران، ۱۳۹۰). همچنین داخل کوادرات‌های 2×2 متر تراکم گونه غالب به صورت شمارش ثبت گردید که جهت آگاهی از الگوی پراکنش استفاده شد.

(ب) جمع‌آوری و پردازش داده‌های ماهواره‌ای:

۱. اخذ تصاویر مورد استفاده

سنتینل 2A مربوط به زمان نمونه‌برداری (خرداد ۱۳۹۴) از جامعه USGS دانلود شد و مورد استفاده قرار گرفت (تصویر سنتینل (S2A_OPER_MSI_L1C_TL_MTI): ۱۵ خرداد ۱۳۹۵) (June 16, 2015).

۲. انجام تصحیحات

الف) روش‌های تصحیح اتمسفری: در تحقیق حاضر از روش Dark subtract که یک روش جزء به جزء است در نرم افزار ENVI استفاده شد. به این صورت که عمل Subtraction بر اساس Band Minimum انجام شد.

ب) روش‌های تصحیح هندسی: در تحقیق حاضر از روش Image to Image استفاده شد. به این صورت که از یک تصویر ژئو رفرنس شده که قبلاً تهیه شده بود به عنوان مرجع استفاده شد. ابتدا RGB دو تا تصویر ساخته شد. ۱۵ نقطه به عنوان نقاط کنترل در دو تصویر (مبنا و تصویر مورد نظر یا Base و Warp) انتخاب گردید و میزان شاخص RMSE، $0/95$ بود.

۳. نسبت‌گیری طیفی (شاخص‌های گیاهی سنجش از دوری): در تحقیق حاضر شاخص‌های مختلفی بر مبنای ترکیب باندهای طیفی ایجاد و در تجزیه و تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. از جمله شاخص‌های معروف NDVI، SAVI، TSAVI هستند که در کل ۱۱ شاخص محاسبه گردید و رابطه رگرسیونی و ضریب همبستگی هر کدام از آنها با درصد تاج پوشش و تولید کل در هر کوادرات بدست آمد. به این صورت که فاکتورهای گیاهی (درصد تاج پوشش و تولید) به عنوان متغیر وابسته و شاخص‌های گیاهی به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شدند. برای محاسبه شاخص‌ها در پردازش تصویر سنتینل ۲ باند $(0/665)$ به عنوان قرمز و باند $(0/845 - 0/885)$ باندهای ۸، ۸A، ۷ و ۶ به عنوان باند مادون قرمز (به دلیل قرابت) در نظر گرفته شد. جهت محاسبه برخی از شاخص‌ها معادله خط خاک تعیین شد. به این صورت که بین باند قرمز و مادون قرمز رگرسیون گرفته شده و شیب و عرض از مبدا خط رگرسیونی بدست آمده در محاسبه شاخص مورد نظر مورد استفاده قرار گرفت. نکته دیگر اینکه برای برخی از شاخص‌ها از جمله PVI، WDVI، MSAVI و DVI باند مادون قرمز به عنوان متغیر مستقل و برای شاخص TSAVI باند قرمز به عنوان متغیر مستقل وارد رگرسیون شد. همچنین در محاسبه این شاخص‌ها باید ضریب خط خاک محاسبه شود و این کار با استفاده از ساخت یک تصویر RGB و انتخاب پلی‌گون‌های خاک در جامعه مورد مطالعه انجام گردید. در محاسبه شاخص‌های SAVI، MSAVI2 و TSAVI بجای باند قرمز و مادون قرمز بر اساس نظر نویسندگان، از Real و Real Red و Infrared استفاده شد. به این صورت که حداقل را همان صفر و حداکثر بجای 255 ، 1 در نظر گرفته شد. در تحقیق حاضر (باندهای با قدرت تفکیک 10 و 60 متری) مورد پردازش قرار گرفت و شاخص‌های گیاهی از باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک (باندهای 4 و 8 سنتینل با تفکیک 10 متری و باند 4 با تفکیک 10 متری (ضریب 6) و باند 9 با تفکیک 60 متری) استخراج گردید.

۴. استخراج مقادیر شاخص‌های گیاهی در محل‌های نمونه‌برداری: بعد از محاسبه شاخص‌های گیاهی در نرم افزار Terrset، نقشه هر کدام از شاخص‌ها به نرم افزار Arc Gis انتقال داده شد و در نقطه GPS زمینی (نقاط نمونه‌برداری زمینی) به صورت جدولی در Excel استخراج شدند.

۵. بررسی روابط آماری بین مشخصه‌های کمی گیاهی (پوشش و تولید) و شاخص‌های استخراج شده در محل نمونه‌ها: ارزش‌های طیفی استخراج شده (مقادیر شاخص) به همراه داده‌های زمینی مربوط به پوشش و تولید گیاهی به نرم افزار SPSS منتقل گردید و رابطه رگرسیونی بین مشخصه‌های گیاهی اندازه‌گیری شده در کوادرات‌ها و ارزش‌دهی طیفی متناظر آنها (شاخص‌ها) بدست آمد. به صورتی که در مدل‌های رگرسیونی، درصد تاج پوشش و تولید به عنوان متغیر وابسته و شاخص‌های گیاهی به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شدند.

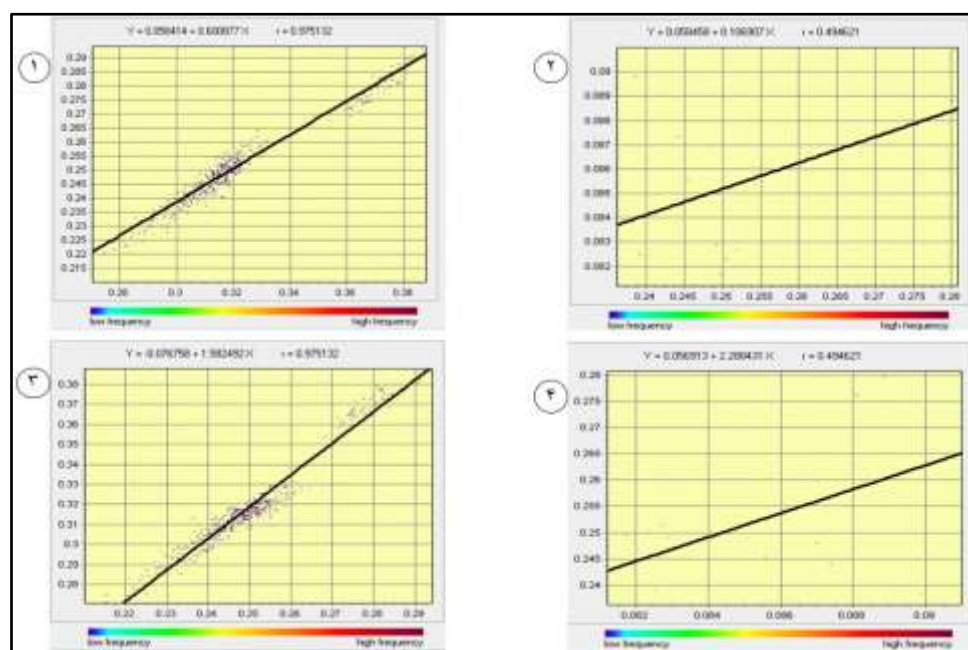
۶. تست و اعتبار سنجی مدل‌های رگرسیونی جهت انتخاب مدل و شاخص مناسب: به منظور تست و اعتبار سنجی مدل‌های رگرسیونی بدست آمده بر اساس نظر محققین، ۶۵ درصد از داده‌ها را برای ساخت مدل و ۳۵ درصد باقیمانده برای تست مدل استفاده شد. بدین صورت که در مدل بدست آمده اعداد شاخص مورد نظر جایگذاری شده و معنی‌داری اختلاف اعداد متناظر بدست آمده همراه اعداد فاکتورهای گیاهی تخمین زده شده زمینی با آزمون t جفتی بررسی شد و اگر بین دو گروه اختلاف معنی‌داری وجود داشت به معنای مناسب نبودن مدل مورد نظر است و برعکس. همچنین شاخص RMSE برای هر مدل محاسبه گردید و از این طریق نیز مدل‌های مختلف مقایسه شدند.

۷. جهت استخراج برخی از شاخص‌های گیاهی از جمله PVI, TSAVI, DVI و WDI ابتدا باید رگرسیون بین باند قرمز و مادون قرمز نزدیک حساب شود و عرض از مبدأ و شیب خط رگرسیون جهت استخراج شاخص‌های مذکور استفاده گردد به صورتی که جهت شاخص‌های PVI و WDI باند قرمز متغیر وابسته و مادون قرمز نزدیک متغیر مستقل و جهت دو شاخص DVI و TSAVI برعکس. در تصویر سنتینل ۲ باند ۴ و ۸ با تفکیک ۱۰ متری به عنوان باند قرمز و مادون قرمز نزدیک و باند ۴ با تفکیک ۱۰ متری ضربدر ۶ و باند ۹ با تفکیک ۶۰ متری به ترتیب قرمز و مادون قرمز نزدیک در نظر گرفته شد. نمودارهای خط رگرسیون در تصاویر مورد استفاده در شکل ۳ آمده است.

یافته‌ها و بحث

نتایج رگرسیون خط خاک: نتایج رگرسیون خط خاک بین باند قرمز و مادون قرمز نزدیک

نتایج تحلیل رگرسیون شاخص‌های گیاهی حاصل در رابطه با درصد پوشش و تولید گیاهان و تست مدل حاصل از آنها: الف) باندهای با تفکیک ۱۰ متری: میزان همبستگی در روش نمونه‌برداری ۱ (۶ کوادراتی) بسیار بیشتر از میزان همبستگی روش نمونه‌برداری ۲ (۳ کوادراتی) می‌باشد. با افزایش سطح کوادرات، در اکثر موارد میزان همبستگی زیاد شده و معنی‌داری آنها نیز بیشتر می‌شود. معنی‌داری روابط شاخص RVI بیشتر و SAVI کمتر از بقیه می‌باشد.



شکل ۳. رگرسیون خط خاک:

۱. تصویر سنتینل ۲ با تفکیک ۱۰ متری - باند قرمز متغیر وابسته و مادون قرمز نزدیک متغیر مستقل. ۲. تصویر سنتینل ۲ با تفکیک ۱۰ متری - باند قرمز متغیر مستقل و مادون قرمز نزدیک متغیر وابسته. ۳. تصویر سنتینل ۲ با تفکیک ۶۰ متری - باند قرمز متغیر مستقل و مادون قرمز نزدیک متغیر وابسته. ۴. تصویر سنتینل ۲ با تفکیک ۶۰ متری - باند قرمز متغیر وابسته و مادون قرمز نزدیک متغیر مستقل
- منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

سنجش اعتبار مدل‌ها

نتایج سنجش اعتبار مدل‌ها (شاخص RMSE و t تست جفتی) نیز در جدول (۱) آورده شده است. هرچه شاخص RMSE بزرگتر باشد نشان از اعتبار کمتر مدل است و در عددهای بالاتر، اختلاف فاکتور برداشت شده روی زمین و حاصل از مدل زیاد شده و معنی‌دار می‌باشد و در

نتیجه مدل اعتبار کافی نخواهد داشت. در این جامعه در اکثر شاخص‌ها مدل‌های حاصل در کوادرات‌های 1×1 متری در هر دو روش نمونه‌برداری از اعتبار کافی برخوردار نیست. زیرا اختلاف بین فاکتور برداشت شده زمینی و حاصل از مدل معنی‌دار بوده و RMSE آنها نیز بطور قابل ملاحظه‌ای بالاست.

همبستگی و روابط تولید گیاهان با شاخص‌های گیاهی نیز در جدول (۱) آمده است. همانطور که مشاهده می‌گردد میزان همبستگی روابط رگرسیونی در اکثر شاخص‌ها در کوادرات‌های 1×1 معنی‌دار نشده است و مدل حاصل نیز اعتبار کافی ندارد. در کوادرات‌های 2×1 نیز روابط حاصل در روش نمونه‌برداری ۲ (۳ کوادراتی) معنی‌دار نشده‌اند و مدل حاصل از آنها نیز از اعتبار کافی برخوردار نیست. در کل همبستگی‌های روابط تولید نسبت به درصد پوشش کمتر است.

نتایج حاصل از تحلیل رگرسیون نشان داد که در تصاویر Sentinel-2A با تفکیک مکانی ۱۰ متر، بیشتر شاخص‌های مورد بررسی شامل NDVI، CTVI، MSAVI2، Ratio، RVI، SAVI و TVI توانایی مناسبی در تبیین تغییرات درصد پوشش گیاهی جامعه مورد مطالعه دارند. با این حال، شدت این رابطه به اندازه کوادرات و همچنین الگوی استقرار کوادراتها وابسته بود. در روش نمونه‌برداری شش کوادراتی، ضریب تعیین شاخص NDVI از 0.53 در کوادرات 1×1 متر به حدود 0.65 در کوادرات 1×2 و 2×2 متر افزایش یافت. برای MSAVI2 نیز این مقدار از 0.51 به حدود 0.69 افزایش پیدا کرد. در شاخص‌های Ratio، RVI و TVI نیز الگوی مشابهی مشاهده شد. بنابراین، افزایش سطح کوادرات از 1×1 به ابعاد بزرگ‌تر، عموماً موجب افزایش قدرت تبیین مدل شد. با توجه به اینکه جامعه گیاهی از گیاهان غالب پهن‌برگ تشکیل شده و در محدوده مورد مطالعه، شدت چرا نیز نسبتاً زیاد گزارش شده است. چنین شرایطی می‌تواند موجب ایجاد لکه‌های گیاهی با اندازه و تراکم متفاوت شود. در نتیجه، یک کوادرات بسیار کوچک ممکن است به‌طور تصادفی در بخش متراکم یا کم‌تراکم یک پیکسل قرار گیرد و مقدار پوشش آن با مقدار بازتاب طیفی کل پیکسل تفاوت زیادی داشته باشد.

در شاخص NDVI و کوادرات 1×1 متر، اگرچه رابطه آماری معنی‌داری در درصد پوشش گزارش شده است، RMSE حدود $4/8$ در روش شش کوادراتی و حدود $6/45$ در روش سه کوادراتی بوده و آزمون اعتبارسنجی نیز اختلاف معنی‌دار را نشان داده است. در مقابل، در کوادرات 1×2 متر، RMSE به حدود 0.57 در روش شش کوادراتی کاهش یافته است. این کاهش قابل توجه خطا نشان می‌دهد که افزایش اندازه کوادرات تا یک حد مشخص می‌تواند موجب بهبود محسوس قابلیت پیش‌بینی مدل شود. در مورد MSAVI2 نیز وضعیت مشابهی مشاهده شد؛ به‌طوری که RMSE در کوادرات 1×1 متر در روش شش کوادراتی حدود $7/43$ بود، در حالی که در کوادرات 1×2 متر به حدود $25/1$ کاهش یافت. بنابراین، انتخاب اندازه کوادرات مناسب می‌تواند تاثیر زیادی داشته باشد. بر این اساس، در ارزیابی مدل‌های سنجش از دوری باید سه معیار به صورت همزمان در نظر گرفته شوند: میزان رابطه آماری، مقدار خطای پیش‌بینی و نتیجه اعتبارسنجی مستقل مدل. استفاده صرف از R^2 ممکن است به انتخاب مدلی منجر شود که از نظر آماری معنی‌دار است اما از نظر کاربردی دقت کافی ندارد.

در مقایسه با درصد پوشش، رابطه شاخص‌های گیاهی با تولید ضعیف‌تر بود و این می‌تواند به دلیل پیچیده بودن شرایط تولید در مقایسه با درصد پوشش باشد. نتایج نشان داد که در تفکیک ۱۰ متری، بسیاری از شاخص‌ها همچنان رابطه معنی‌داری با تولید داشتند. در شاخص MSAVI2، ضریب تعیین در روش شش کوادراتی از حدود 0.48 در کوادرات 1×1 به 0.65 در کوادرات 1×2 و 0.68 در کوادرات 2×2 افزایش یافت. همچنین برای NDVI، ضریب تعیین از حدود 0.49 در کوادرات 1×1 به حدود 0.63 در کوادرات 2×2 رسید. این روند بیانگر آن است که افزایش سطح نمونه‌برداری زمینی، علاوه بر بهبود رابطه با پوشش، می‌تواند رابطه با تولید را نیز تقویت کند (جدول ۱).

جدول ۱. نتایج تحلیل رگرسیون شاخص‌های گیاهی حاصل از تصویر Sentinel (تفکیک ۱۰ متری)

شاخص گیاهی	اندازه کوادرات	روش نمونه‌برداری	R^2	خطای استاندارد	Sig	نتایج تست مدل رگرسیونی		
						پوشش برداشت شده	پوشش حاصل از مدل	مدل رگرسیونی (درصد پوشش = Y، X =)
NDVI	1×1	روش اول	0.53	$4/81$	***		$39/09$	$Y = 454/88x - 34/1$
		روش دوم	0.35	$5/76$	*		$38/56$	$Y = 441/18x - 41/4$
	1×2	روش اول	0.65	$4/9$	***		$47/72$	$Y = 552/88x - 41/926$
		روش دوم	0.4	$5/59$	***		$44/73$	$Y = 482/42x - 37/5$
	2×2	روش اول	0.65	$4/31$	***		$45/19$	$Y = 511/72x - 38/63$
		روش دوم	0.41	$5/44$	***		$47/95$	$Y = 485/4x - 38/68$
	3×3	روش اول	0.64	$4/68$	***		$48/89$	$Y = 544/4x - 32/10$
		روش دوم	0.42	$5/70$	***		$49/07$	$Y = 514/3x - 37/165$
	4×4	روش اول	0.64	$4/68$	***		$48/89$	$Y = 544/4x - 32/10$
		روش دوم	0.42	$5/70$	***		$49/07$	$Y = 514/3x - 37/165$

شاخص گیاهی	اندازه کوادرات	روش نمونه‌برداری	R^2	خطای استاندارد	Sig	مدل رگرسیونی (درصد پوشش = Y ، شاخص X)	نتایج تست مدل رگرسیونی		
							پوشش برداشت شده	پوشش حاصل از مدل	Sig RMSE
CTVI	۱×۱	روش اول	۰/۵۱	۴/۸۴	***	$Y=715/76x-550/01$	۳۹/۰۹	۴۳/۵۶	* ۴/۱۳
		روش دوم	۰/۳۷	۵/۸	*	$Y=734/7x-555/3$	۳۸/۵۶	۴۵/۳۶	** ۸/۷۹
	۱×۲	روش اول	۰/۶۳	۴/۹۰	***	$Y=873/59x-668/29$	۴۷/۷۲	۴۸/۴۱	- ۰/۸
		روش دوم	۰/۴۰	۵/۴۵	***	$Y=736/4x-547/48$	۳۴/۷۳	۴۷/۴۴	- ۱/۷۶
	۲×۲	روش اول	۰/۶۵	۴/۳۱	***	$Y=817/4x-636/9$	۴۵/۱۹	۴۶/۷۴	- ۱/۵۳
		روش دوم	۰/۴۲	۴/۳۲	***	$Y=747/4x-535/68$	۴۷/۹۵	۴۵/۱۴	- ۲/۱۰
	۳×۳	روش اول	۰/۶۵	۴/۶۸	***	$Y=866/2x-599/8$	۴۸/۸۹	۴۹/۰۴	- ۰/۴۶
		روش دوم	۰/۴۲	۵/۷۰	***	$Y=885/4x-638/68$	۴۹/۰۷	۴۹/۸۹	- ۱/۳۴
MSAVI2	۱×۱	روش اول	۰/۵۱	۴/۸۹	***	$Y=462/59x-20/51$	۳۹/۰۹	۴۶/۰۹	* ۷/۴۳
		روش دوم	۰/۳۴	۵/۸۸	*	$Y=441/9x-27/36$	۳۸/۵۶	۴۸/۶۷	** ۹/۵۱
	۱×۲	روش اول	۰/۶۹	۴/۵۸	***	$Y=636/81x-38/79$	۴۷/۷۲	۴۶/۵۲	- ۱/۲۵
		روش دوم	۰/۴۵	۵/۷۷	***	$Y=455/4x-23/9$	۳۴/۷۳	۴۷/۱۹	- ۲/۴۴
	۲×۲	روش اول	۰/۶۹	۴/۳	***	$Y=572/4x-29/336$	۴۵/۱۹	۴۷/۱۴	- ۲/۰۸
		روش دوم	۰/۴۵	۵/۶۳	***	$Y=540/8x-26/528$	۴۷/۹۵	۴۹/۹۵	- ۱/۱۰
	۳×۳	روش اول	۰/۶۹	۴/۵۷	***	$Y=574/5x-26/47$	۴۸/۸۹	۴۸/۲۱	- ۱/۳۳
		روش دوم	۰/۴۶	۵/۷۸	***	$Y=572/8x-24/075$	۴۹/۰۷	۵۰/۱۶	- ۱/۱۷
Ratio	۱×۱	روش اول	۰/۵۴	۴/۸۵	***	$Y=185/85x-20/19$	۳۹/۰۹	۴۲/۶۰	* ۴/۸۵
		روش دوم	۰/۳۷	۵/۸۹	*	$Y=177/4x-22/31$	۳۸/۵۶	۴۷/۸۸	** ۷/۹۳
	۱×۲	روش اول	۰/۶۳	۴/۸۸	***	$Y=162/45x-188/61$	۴۷/۷۲	۴۸/۱۱	- ۰/۵۳
		روش دوم	۰/۴	۵/۵۹	***	$Y=213/7x-248/68$	۴۴/۷۳	۴۷/۰۴	- ۲/۲۷
	۲×۲	روش اول	۰/۶۶	۴/۳۱	***	$Y=185/4x-220/68$	۴۵/۱۹	۴۶/۸۶	- ۱/۸۹
		روش دوم	۰/۴۲	۵/۷۴	***	$Y=185/08x-222/26$	۴۷/۹۵	۴۶/۰۱	- ۱/۱۴
	۳×۳	روش اول	۰/۶۶	۴/۶۹	***	$Y=182/7x-211/4$	۴۸/۸۹	۴۹/۳۴	- ۰/۴۹
		روش دوم	۰/۴۱	۵/۷۱	***	$Y=211/13x-242/17$	۴۹/۰۷	۵۱/۷۴	- ۲/۰۸
RVI	۱×۱	روش اول	۰/۵۵	۴/۷۹	***	$Y=288/32x+212/82$	۳۹/۰۹	۴۳/۶۵	* ۵/۱۶
		روش دوم	۰/۳۴	۵/۷۶	*	$Y=-275/4x+233/82$	۳۸/۵۶	۴۸/۷۳	** ۹/۸۵
	۱×۲	روش اول	۰/۶۳	۴/۹۰	***	$Y=361/5x+312/55$	۴۷/۷۲	۴۸/۸۰	- ۱/۱۰
		روش دوم	۰/۴	۵/۵۸	***	$Y=-314/7x+263/6$	۴۴/۷۳	۴۷/۳۴	- ۲/۷۴
	۲×۲	روش اول	۰/۶۵	۴/۳۰	***	$Y=-328/40x+282/19$	۴۵/۱۹	۴۶/۴۰	- ۱/۲۶
		روش دوم	۰/۴۲	۵/۳۲	***	$Y=316/73x+266/27$	۴۷/۹۵	۴۹/۹۷	- ۱/۵۴
	۳×۳	روش اول	۰/۶۵	۴/۶۷	***	$Y=-359/67x+365/11$	۴۸/۸۹	۴۸/۵۲	- ۰/۵۳
		روش دوم	۰/۴۲	۵/۷۰	***	$Y=358/17x+371/81$	۴۹/۰۷	۵۱/۵۸	- ۱/۷۵
SAVI	۱×۱	روش اول	۰/۴۲	۵/۳۷	***	$Y=365/2x+71/34$	۳۹/۰۹	۴۶/۶۱	* ۷/۱۲
		روش دوم	۰/۳۳	۵/۸۶	*	$Y=455/4x-28/74$	۳۸/۵۶	۴۷/۷۰	** ۱۰/۸۹
	۱×۲	روش اول	۰/۴۷	۵/۹۱	***	$Y=457/4x+81/43$	۴۷/۷۲	۵۳/۶۶	* ۶/۰۲
		روش دوم	۰/۴۷	۵/۶۲	***	$Y=485/4x-24/62$	۴۴/۷۳	۴۸/۱۵	* ۶/۷۱
	۲×۲	روش اول	۰/۴۱	۵/۹۴	***	$Y=-278/7x+77/66$	۴۵/۱۹	۵۴/۵۲	** ۹/۵۶
		روش دوم	۰/۵۵	۴/۵۶	***	$Y=555/4x-30/74$	۴۷/۹۵	۴۹/۹۱	- ۱/۶۳
	۳×۳	روش اول	۰/۴۴	۵/۴۱	***	$Y=-188/21x+55/87$	۴۸/۸۹	۵۳/۷۷	* ۶/۳۰
		روش دوم	۰/۵۵	۴/۸۷	***	$Y=577/4x-33/12$	۴۹/۰۷	۵۲/۳۵	- ۱/۱۲
TVI	۱×۱	روش اول	۰/۵۲	۴/۷۹	***	$Y=765/54x-555/1$	۳۹/۰۹	۴۳/۰۵	* ۳/۶۶
		روش دوم	۰/۳۴	۵/۹۶	***	$Y=717/4x-566/3$	۳۸/۵۶	۴۷/۹۲	** ۹/۱۴
	۱×۲	روش اول	۰/۶۳	۴/۵۸	***	$Y=863/74x-677/5$	۴۷/۷۲	۴۸/۱۱	- ۰/۵۴
		روش دوم	۰/۴۰	۵/۵۸	***	$Y=781/41x-577/68$	۴۴/۷۳	۴۶/۸۷	- ۲/۳۵
	۲×۲	روش اول	۰/۶۴	۴/۵۲	***	$Y=822/02x-623/21$	۴۵/۱۹	۴۷/۱۳	- ۱/۲۵
		روش دوم	۰/۴۴	۵/۳۲	***	$Y=750/2x-567/9$	۴۷/۹۵	۴۸/۷۸	- ۱/۸۷
	۳×۳	روش اول	۰/۶۵	۴/۶۸	***	$Y=877/18x-661/7$	۴۸/۸۹	۴۹/۰۵	- ۰/۶۲

نتایج تحلیل رگرسیون شاخص‌های گیاهی حاصل از تصویر سنتینل ۲ (تفکیک ۱۰ در ۱۰ متر) با درصد پوشش											
شاخص گیاهی	اندازه کوادرات	روش نمونه‌برداری	R ²	خطای استاندارد	Sig	مدل رگرسونی (درصد پوشش = Y، شاخص X=)	نتایج تست مدل رگرسیونی				
							پوشش برداشت شده	پوشش حاصل از مدل	RMSE		
		روش دوم	۰/۴۴	۵/۷۰	**	Y=۸۲۵/۴x-۶۲۰/۵۵	۴۹/۰۷	۵۱/۹۶	۲/۲۳		
نتایج تحلیل رگرسیون شاخص‌های گیاهی حاصل از تصویر سنتینل ۲ (تفکیک ۱۰ در ۱۰ متر) با تولید											
شاخص گیاهی	اندازه کوادرات	روش نمونه‌برداری	R ²	خطای استاندارد	Sig	مدل رگرسونی (تولید = Y، شاخص X=)	تست مدل رگرسیونی				
							تولید برداشت‌شده (مترمربع)	تولید حاصل از مدل	RMSE		
NDVI	۱×۱	روش اول	۰/۴۹	۹/۸۳	*	Y=۷۱۴/۱x-۳۰/۵	۲۷۰/۶	۳۲۴/۷	۷۵/۳۴		
		روش دوم	۰/۳۰	۱۰/۲۵	*	Y=۴۹۹/۴x-۵۲/۷۱	۲۸۰	۳۵۲/۱	۸۳/۷۸		
	۱×۲	روش اول	۰/۶	۷/۲۰	**	Y=۷۲۳/۱۱x-۸۲/۰۵۲	۲۶۰/۱	۳۷۸	۴۲/۶۶		
		روش دوم	۰/۴۲	۸/۱۱	**	Y=۶۷۴/۶۸x-۵۲/۳۱	۲۷۰	۳۴۱/۰۷	۷۸/۱۳		
	۲×۲	روش اول	۰/۶	۵/۰۴	**	Y=۶۴۱/۷۸x-۴۰/۲	۳۰۰/۳	۳۱۵/۹۴	۴۰/۳۳		
		روش دوم	۰/۴۵	۶/۴۹	**	Y=۵۸۸/۴۱x-۵۴/۴	۳۰۰/۹	۳۴۹/۱۴	۵۸/۱۰		
	۳×۳	روش اول	۰/۶۳	۵/۵۶	**	Y=۷۷۰/۰x-۷۷/۲۲	۳۰۰/۱	۳۰۹/۰۳	۴۰/۱۵		
		روش دوم	۰/۴۵	۶/۷۵	**	Y=۷۱۱/۳x-۳/۴۱۲	۳۰۵/۱۱	۳۲۸/۷۹	۴۹/۷۰		
CTVI	۱×۱	روش اول	۰/۵	۶/۸۲	*	Y=۱۲۲۰/۴x-۳۶۵/۷	۲۷۰/۶	۳۰۹/۵	۶۲/۲۲		
		روش دوم	۰/۳۱	۸/۲۵	*	Y=۷۲۶/۱۱x-۶۱۱/۳	۲۸۰	۳۶۹	۹۳/۳۶		
	۱×۲	روش اول	۰/۵۷	۵/۲۰	**	Y=۱۱۸۲x-۸۸۷/۳۱	۲۶۰/۱	۲۷۲	۴۳/۰۸		
		روش دوم	۰/۴۳	۷/۱۱	**	Y=۹۹۸/۹x-۸۱۱/۰۳	۲۷۰	۳۵۳/۳	۹۳/۲۵		
	۲×۲	روش اول	۰/۵۸	۵/۰۳	**	Y=۱۰۰۳/۴x-۷۷۴/۹	۳۰۰/۳	۳۱۸/۴	۴۲/۱۰		
		روش دوم	۰/۴۶	۶/۴۹	**	Y=۹۰۳/۶۶x-۶۶۷/۷	۳۰۰/۹	۳۴۶/۵	۶۴/۱۶		
	۳×۳	روش اول	۰/۵۸	۴/۵۶	**	Y=۱۲۱۱/۶x-۹۰۵/۶۱	۳۰۰/۱	۳۱۳/۴۷	۴۱/۳۴		
		روش دوم	۰/۴۵	۵/۷۴	**	Y=۱۱۰۴/۸x-۸۶۷/۸	۳۰۵/۱۱	۳۳۲/۰۲	۴۶/۸۸		
MSAVI2	۱×۱	روش اول	۰/۴۸	۸/۰۲	*	Y=۶۴۲/۱۸x-۱۷/۴۸	۲۷۰/۶	۳۲۸/۴	۷۳/۶۳		
		روش دوم	۰/۲۸	۸/۳۲	*	Y=۴۳۸/۲۸x-۷/۳۲۲	۲۸۰	۳۷۰	۹۳/۷۲		
	۱×۲	روش اول	۰/۶۵	۵/۶۳	**	Y=۸۲۹/۸۳x-۳۳/۰۸۲	۲۶۰/۱	۲۷۴	۴۲/۳۳		
		روش دوم	۰/۴۳	۶/۲۷	**	Y=۶۳۶/۳۲x-۱۳/۰۲۲	۲۷۰	۳۴۶/۹	۸۵/۷۱		
	۲×۲	روش اول	۰/۶۶	۴/۷۶	**	Y=۷۲۱/۲۷x-۱۹/۵۶۷	۳۰۰/۳	۳۲۱/۷	۴۵/۰۳		
		روش دوم	۰/۴۶	۶/۲۴	**	Y=۶۴۵/۵۳x-۱۹/۵۴	۳۰۰/۹	۳۳۷/۳	۵۵/۱۱		
	۳×۳	روش اول	۰/۶۸	۴/۵۰	**	Y=۸۱۸/۳x-۳۱/۵۶۴	۳۰۰/۱	۳۱۸/۷	۴۳/۳۶		
		روش دوم	۰/۴۶	۶/۶۳	**	Y=۷۴۸/۲۸x-۲۶/۴۹۸	۳۰۵/۱۱	۳۳۵/۲	۵۱/۴۴		
Ratio	۱×۱	روش اول	۰/۵۱	۷/۸۳	*	Y=۲۴۲/۸۹x-۳۱۶/۴۱	۲۷۰/۶	۳۱۰	۶۲/۳۶		
		روش دوم	۰/۳	۱۰/۲۵	*	Y=۱۴۳/۶۲x-۲۳۵/۰۹	۲۸۰	۳۴۷	۷۰/۴۹		
	۱×۲	روش اول	۰/۶	۵/۲۱	**	Y=۲۴۵/۶۳x-۲۲۵/۴۱	۲۶۰/۱	۲۷۲	۴۲/۱۰		
		روش دوم	۰/۴۱	۷/۱۲	**	Y=۲۳۵/۶۲x-۲۵۵/۱۱	۲۷۰	۳۱۶/۷	۶۸/۱۶		
	۲×۲	روش اول	۰/۶۴	۵/۰۴	**	Y=۲۳۲/۴۱x-۲۵۲/۰۷	۳۰۰/۳	۳۲۱/۲	۴۲/۰۲		
		روش دوم	۰/۴۳	۶/۵۰	**	Y=۲۱۶/۲۷x-۲۳۰/۰۶	۳۰۰/۹	۳۳۶/۷	۵۴/۳۰		
	۳×۳	روش اول	۰/۶۴	۵/۵۸	**	Y=۲۵۳/۸۷x-۲۲۳/۴۲	۳۰۰/۱	۳۱۳	۴۱/۷۱		
		روش دوم	۰/۴۹	۶/۷۶	**	Y=۲۴۴/۲۷x-۳۱۴/۰۶	۳۰۵/۱۱	۳۳۴/۲۲	۵۱/۴۲		
SAVI	۱×۱	روش اول	۰/۴۴	۹/۹۳	*	Y=۷۱۵/۲۸x-۴۷/۶	۲۷۰/۶	۳۲۵/۰۱	۷۴/۱۰		
		روش دوم	۰/۳۱	۱۰/۲۸	*	Y=۵۱۵/۴۲x-۴۲/۱۷۷	۲۸۰	۳۴۸/۷۵	۷۷/۳۱		
	۱×۲	روش اول	۰/۶۳	۶/۹۱	**	Y=۸۵۴/۳x-۵۱/۳۴۳	۲۶۰/۱	۲۶۸/۷۵	۴۰/۲۴		
		روش دوم	۰/۵۰	۸/۱۸	**	Y=۷۴۴/۵۵x-۳۱/۸	۲۷۰	۳۲۷/۰۶	۷۴/۸۷		
	۲×۲	روش اول	۰/۶۶	۵/۷۴	**	Y=۷۲۵/۰۶x-۳۶/۱۶۹	۳۰۰/۳	۳۱۷/۱۶	۴۱/۱۹		
		روش دوم	۰/۵۹	۶/۲۴	**	Y=۶۵۵/۰۹x-۳۵/۲۵۶	۳۰۰/۹	۳۳۱/۴۷	۴۸/۶۳		
	۳×۳	روش اول	۰/۶۶	۶/۴۳	**	Y=۷۹۰/۱۱x-۴۷/۷۴۱	۳۰۰/۱	۳۱۵/۱۴	۴۱/۰۷		
		روش دوم	۰/۶۳	۶/۵۸	**	Y=۷۷۱/۴۷x-۴۲/۲	۳۰۵/۱۱	۳۳۸/۶۱	۴۸/۶۶		
	روش اول	۰/۵۳	۹/۸۲	**	Y=۱۲۳۱/۵x-۷۴۰/۰۶	۲۷۰/۶	۲۸۵/۴۲	۴۴/۲۹			
		روش دوم	۰/۲۹	۱۰/۲۵	*	Y=۸۰۱/۲۵x-۵۷۶/۰۵	۲۸۰	۳۳۷/۶	۷۳/۱۷		

شاخص گیاهی	اندازه کوادرات	روش نمونه‌برداری	R ²	خطای استاندارد	Sig	مدل رگرسیونی (درصد پوشش = Y، شاخص = X)	نتایج تست مدل رگرسیونی		
							پوشش برداشت شده	پوشش حاصل از مدل	Sig RMSE
TVI	۱×۲	روش اول	۰/۶۲	۷/۲۰	***	$Y = 1223x - 892/18$	۲۶۰/۱	۲۸۱	۴۳/۵
		روش دوم	۰/۴۹	۸/۱۱	***	$Y = 1114/8x - 621/43$	۲۷۰	۳۲۷/۱	۶۸/۰۲
	۲×۲	روش اول	۰/۶۳	۶/۰۳	***	$Y = 1115/2x - 547/9$	۳۰۰/۳	۳۱۲/۱۳	۴۱/۴۰
		روش دوم	۰/۵۲	۶/۴۹	***	$Y = 963/87x - 667/82$	۳۰۰/۹	۳۳۹/۴۱	۵۵/۸۵
	۳×۳	روش اول	۰/۶۱	۶/۵۶	***	$Y = 1231/5x - 947/71$	۳۰۰/۱	۳۲۰	۴۱/۰۱
		روش دوم	۰/۵۸	۶/۷۴	***	$Y = 1190/8x - 841/8$	۳۰۵/۱۱	۳۳۹/۱۱	۴۷/۳۹
RVI	۱×۱	روش اول	۰/۵۴	۷/۳۲	*	$Y = -470/2x - 353/8$	۲۷۰/۶	۳۱۹/۶۷	۶۵/۳۴
		روش دوم	۰/۲۸	۱۰/۱۳	-	$Y = -343/18x + 372/63$	۲۸۰	۳۶۲/۸۱	۸۳/۳۴
	۱×۲	روش اول	۰/۶۲	۶/۲۰	***	$Y = -465/47x - 382/86$	۲۶۰/۱	۲۸۱/۳۹	۴۴/۸۷
		روش دوم	۰/۴۸	۸/۱	***	$Y = -436/67x + 374/72$	۲۷۰	۳۱۶/۶۳	۵۲/۶
	۲×۲	روش اول	۰/۶۳	۵/۰۳	***	$Y = -437/33x + 335/89$	۳۰۰/۳	۳۱۷/۳۳	۴۲/۱
		روش دوم	۰/۵۱	۶/۴۹	***	$Y = -395/22x + 347/94$	۳۰۰/۹	۳۳۹/۴	۵۱/۲۸
	۳×۳	روش اول	۰/۶۵	۵/۸۵	***	$Y = -487/13x + 425/42$	۳۰۰/۱	۳۲۹/۲۴	۴۱/۴۷
		روش دوم	۰/۵۱	۶/۴۱	***	$Y = -457/89x + 398/57$	۳۰۵/۱۱	۳۳۱/۱۳	۵۱/۰۸

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

ب) باندهای با تفکیک ۶۰ متری: در جدول ۲ نتایج بررسی همبستگی فاکتورهای مورد بررسی گیاهی و شاخص‌ها نشان داده شده است. اکثر روابط شاخص‌های MS-AVI2 و RVI در رابطه با درصد پوشش و تولید گیاهان معنی‌دار شده‌اند. با افزایش سطح کوادرات، در اکثر موارد میزان همبستگی زیاد شده و معنی‌داری آنها نیز بیشتر می‌شود. در کل میزان همبستگی‌ها بالا نیست. همبستگی روش نمونه‌برداری ۳ کوادراتی کمتر از روش نمونه‌برداری ۶ کوادراتی است. در جدول ۲ مدل رگرسیونی هر شاخص و نتایج تست اعتبارسنجی آنها نیز آورده شده است. در اکثر شاخص‌ها مدل‌های حاصل در کوادرات‌های ۱×۱ در هر دو روش نمونه‌برداری و در کوادرات‌های ۲×۲ در روش ۳ کوادراتی از اعتبار کافی برخوردار نیست. زیرا اختلاف بین فاکتور برداشت شده زمینی و حاصل از مدل معنی‌دار بوده و RMSE آنها نیز بطور قابل ملاحظه‌ای بالاست. همانطور که مشاهده می‌گردد میزان همبستگی و معنی‌داری روابط رگرسیونی تولید گیاهان در اکثر شاخص‌ها نسبت به درصد پوشش پایین است. به طوریکه مدل‌های حاصل از روش نمونه‌برداری ۶ کوادراتی در کوادرات‌های ۲×۱ و ۲×۲ از اعتبار کافی برخوردارند.

در تصاویر ۶۰ متری، MS-AVI2 و RVI نسبت به سایر شاخص‌ها عملکرد نسبتاً مناسب‌تری نشان دادند. در MS-AVI2 ضریب تعیین رابطه با درصد پوشش در روش شش کوادراتی از حدود ۰/۳۰ در کوادرات ۱×۱ به ۰/۴۲ در کوادرات ۲×۲ افزایش یافت. برای RVI نیز این مقدار از حدود ۰/۲۷ در کوادرات ۱×۱ به حدود ۰/۴۵ در کوادرات ۳×۳ رسید. برتری نسبی MS-AVI2 را می‌توان با حساسیت آن به پوشش گیاهی و در عین حال تعدیل اثر زمینه خاک ارتباط داد. این ویژگی در پیکسل‌های بزرگ که احتمال حضور خاک و سایر اجزای غیرگیاهی بیشتر است، اهمیت دارد. RVI نیز به دلیل استفاده مستقیم از نسبت بازتاب در ناحیه مادون قرمز نزدیک به قرمز، می‌تواند تغییرات ساختاری پوشش گیاهی را تا حدی منعکس کند. با این حال، حتی در این دو شاخص نیز ضرایب تعیین در تفکیک ۶۰ متر نسبت به بسیاری از مدل‌های ۱۰ متری پایین‌تر بود. بنابراین، نتایج نشان می‌دهد که انتخاب شاخص مناسب می‌تواند بخشی از مشکل ناشی از کاهش تفکیک مکانی را کاهش دهد، اما نمی‌تواند به طور کامل اثر اختلاط طیفی ناشی از پیکسل‌های بزرگ را حذف کند.

جدول ۲. نتایج تحلیل رگرسیون شاخص‌های گیاهی حاصل از تصویر سنتینل ۲ (تفکیک ۶۰ متری)

شاخص گیاهی	اندازه کوادرات	روش نمونه‌برداری	R ²	خطای استاندارد	Sig	مدل رگرسیونی (درصد پوشش = Y، شاخص = X)	نتایج تست مدل رگرسیونی		
							پوشش برداشت شده	پوشش حاصل از مدل	Sig RMSE
MS-AVI2	۱×۱	روش اول	۰/۳۰	۸/۰۸	-	$Y = 461/5x - 36/112$	۳۹/۰۹	۵۳/۲۶	۱۰/۹
		روش دوم	۰/۲۷	۸/۲۲	-	$Y = 447/28x - 37/378$	۳۸/۵۶	۵۵/۵۲	۱۰/۹۴
	۱×۲	روش اول	۰/۴۰	۶/۸۱	***	$Y = 551/99x - 44/926$	۴۷/۷۲	۴۵/۶۳	۲/۴۱
		روش دوم	۰/۳۸	۶/۹۶	*	$Y = 484/54x - 37/075$	۴۴/۷۳	۴۷/۰۱	۲/۲۲
	۲×۲	روش اول	۰/۴۲	۶/۰۳	***	$Y = 507/75x - 37/621$	۴۵/۱۹	۴۸/۱۳	۲/۵۵

شاخص گیاهی	اندازه کوادرات	روش نمونه‌برداری	R ²	خطای استاندارد	Sig	مدل رگرسیونی (درصد پوشش = Y، شاخص = X)	نتایج تست مدل رگرسیونی			
							پوشش برداشت شده	پوشش حاصل از مدل	نتایج تست مدل رگرسیونی	
									RMSE	Sig
RVI	۳×۳	روش دوم	۰/۴۰	۶/۲۱	***	$Y=475/5X-33/783$	۴۷/۹۵	۴۹/۵۵	۲/۶۳	-
		روش اول	۰/۴۱	۶/۳	***	$Y=554/5X-42/205$	۴۸/۸۹	۴۹/۹۵	۲/۹۲	-
		روش دوم	۰/۳۹	۶/۵	***	$Y=509/6X-36/065$	۴۹/۰۷	۵۱/۷۲	۲/۴۷	-
	۱×۱	روش اول	۰/۲۷	۸/۷۰	-	$Y=-288/21X-264/5$	۳۹/۰۹	۴۸/۳۸	۷/۸۸	***
		روش دوم	۰/۲۵	۸/۷۷	-	$Y=-280/47X-241/77$	۳۸/۵۶	۵۲/۰۸	۱۰/۰۴	***
		روش اول	۰/۴۱	۵/۹۱	***	$Y=-347/2X-300/35$	۴۷/۷۲	۵۰/۹۶	۲/۳۹	-
	۱×۲	روش دوم	۰/۳۵	۶/۶۰	*	$Y=-317/38X+266/48$	۴۴/۷۳	۵۱/۸۴	۶/۰۵	*
		روش اول	۰/۴۰	۵/۸۱	***	$Y=-329/15X+280/2$	۴۵/۱۹	۴۸/۵۷	۲/۳۴	-
		روش دوم	۰/۳۷	۵/۸۵	*	$Y=-309/78X+264/55$	۴۷/۹۵	۵۱/۷۵	۶/۱	*
۳×۳	روش اول	۰/۴۵	۴/۶۹	***	$Y=-361/55X+305/6$	۴۸/۸۹	۵۱/۵۶	۱/۸	-	
	روش دوم	۰/۴۱	۴/۷۱	***	$Y=-354/1X+305/11$	۴۹/۰۷	۵۲/۱۹	۲/۵	-	
نتایج تحلیل رگرسیون شاخص‌های گیاهی حاصل از تصویر با تفکیک ۶۰ در ۶۰ متر سستینل ۲ با تولید										
شاخص گیاهی	اندازه کوادرات	روش نمونه‌برداری	R ²	خطای استاندارد	Sig	مدل رگرسیونی (تولید = Y، شاخص = X)	نتایج تست مدل رگرسیونی			
							تولید برداشت‌شده (مترمربع)	تولید حاصل از مدل	RMSE	Sig
MSAVI2	۱×۱	روش اول	۰/۲۶	۱۰/۶۶	-	$Y=664/89x-312/41$	۲۷۰/۶	۳۵۳/۲۹	۸۳/۸	***
		روش دوم	۰/۱۶	۱۰/۷۷	-	$Y=483/62x-207/09$	۲۸۰	۳۷۰	۹۲/۷	***
	۱×۲	روش اول	۰/۴۰	۷/۱۸	*	$Y=775/62x-330/41$	۲۶۰/۱	۲۷۷	۴۸/۴	-
		روش دوم	۰/۳۳	۸/۲۲	*	$Y=456/62x-294/21$	۲۷۰	۳۵۵/۷۸	۸۱/۹	*
	۲×۲	روش اول	۰/۴۲	۵/۴۴	***	$Y=645/41x-284/07$	۳۰۰/۳	۳۴۰/۶۱	۴۷/۵۹	-
		روش دوم	۰/۳۷	۶/۳۳	*	$Y=522/27x-252/6$	۳۰۰/۹	۳۵۵/۳	۵۵/۶	*
	۳×۳	روش اول	۰/۳۹	۶/۱۱	*	$Y=786/87x-336/42$	۳۰۰/۱	۳۵۰/۱۱	۴۶/۰۸	*
		روش دوم	۰/۳۸	۶/۶۱	*	$Y=568/87x-310/06$	۳۰۵/۱۱	۳۶۰/۱۳	۴۷/۹	*
	RVI	۱×۱	روش اول	۰/۲۵	۱۰/۱۹	-	$Y=-400/8x+300/24$	۲۷۰/۶	۳۴۲/۱۸	۷۵/۳۳
روش دوم			۰/۲۱	۱۰/۴۰	-	$Y=-492/78x+393/39$	۲۸۰	۳۵۷/۲۱	۸۲/۳	***
۱×۲		روش اول	۰/۳۷	۷/۰۵	*	$Y=-432/61x+326/52$	۲۶۰/۱	۲۹۶/۳۰	۵۴/۱۹	-
		روش دوم	۰/۳۳	۸/۴۴	-	$Y=-428/87x+321/73$	۲۷۰	۳۰۷/۱۳	۶۰/۵۵	*
۲×۲		روش اول	۰/۴۱	۶/۰۳	***	$Y=-412/17x+384/83$	۳۰۰/۳	۳۲۵/۲۲	۴۷/۳۷	-
		روش دوم	۰/۳۷	۶/۴۹	*	$Y=-485/18x+363/57$	۳۰۰/۹	۳۳۳/۶۰	۵۰/۲۵	-
۳×۳		روش اول	۰/۴۰	۵/۵۶	***	$Y=-431/69x+301/94$	۳۰۰/۱	۳۱۹/۱۷	۴۶/۹	-
		روش دوم	۰/۴۰	۵/۷۴	***	$Y=-408/87x+384/7$	۳۰۵/۱۱	۳۲۸/۶۳	۴۶/۷	-

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

نتیجه‌گیری

همان‌طور که در بخش نتایج گفته شد اکثر روابط شاخص‌های TVI، SAVI، RVI، Ratio، MSAVI2، CTVI، NDVI در رابطه با درصد پوشش و تولید گیاهان معنی‌دار شده‌اند یعنی این شاخص‌ها توانسته‌اند با درصد تاج پوشش و تولید گیاهان که بیشتر پهن برگ هستند رابطه خوبی داشته باشند. با این وجود کلیه روابط این شاخص‌ها معنی‌دار نشده است و میزان همبستگی در روش نمونه‌برداری ۱ (۶ کوادراتی) بیشتر و در روش نمونه‌برداری ۲ (۳ کوادراتی) بسیار کمتر می‌باشد. دلیل بالا رفتن همبستگی شاخص‌های حاصل از باندهای ۱۰ متری تصویر ستینل در روش نمونه‌برداری ۱ و کاهش آن در روش نمونه‌برداری ۲، احتمالاً به خاطر نوع نمونه‌برداری و پراکنش کوادرات‌ها جهت برداشت زمینی است چرا که در پراکنش ۶ کوادراتی، سطح بیشتری از کوادرات‌ها در داخل پیکسل ۱۰ در ۱۰ متر قرار گرفته و دقت نمونه‌برداری بالا می‌رود در حالیکه در روش نمونه‌برداری ۳ کوادراتی، در داخل پیکسل فقط یک کوادرات قرار گرفته و دقت نمونه‌برداری پایین می‌آید و همبستگی حاصل نیز بسیار پایین خواهد بود. با افزایش سطح کوادرات به دلیل بیشتر شدن سطح نمونه‌برداری نسبت به سطح کل، در اکثر موارد میزان همبستگی زیاد شده و معنی‌داری آنها نیز بیشتر می‌شود. همبستگی شاخص‌های مذکور در کوادرات ۱×۱ بسیار کم و اکثراً غیر معنی‌دار است ولی اختلاف همبستگی سایر کوادرات‌ها قابل ملاحظه نیست و این بدین معناست که کوادرات ۱×۱ متر جهت این جامعه مناسب

نیست. معنی‌داری روابط شاخص RVI بیشتر و SAVI کمتر می‌باشد که نتایج ژانگیان^۱ و همکاران (۲۰۰۷) نیز مبنی بر چنین ایده‌ای بود. همچنین نتایج تحقیق توبی^۲ و همکاران (۱۹۹۷) موید همبستگی بالای شاخص RVI با درصد پوشش بود. همبستگی بقیه شاخص‌ها (DVI, NDVI, SAVI, WVDI) معنی‌دار نشده است. همچنین نتایج آندرتا (۲۰۲۲) نشان داد که در مقایسه تصاویر Landsat-8 و Sentinel-2 و Planet Scope برای برآورد پوشش نسبی علفزارها، شاخص‌های گیاهی مبتنی بر ناحیه قرمز و مادون قرمز نزدیک، قابلیت بالایی برای برآورد پوشش دارند.

در تحقیق حاضر، در اکثر شاخص‌ها مدل‌های حاصل در کوادرات‌های ۱×۱ متر در هر دو روش نمونه‌برداری از اعتبار کافی برخوردار نیست. زیرا اختلاف بین فاکتور برداشت شده زمینی و حاصل از مدل معنی‌دار بوده و RMSE آنها نیز بطور قابل ملاحظه‌ای بالاست. همانند میزان همبستگی در روش نمونه‌برداری ۶ کوادراتی، اعتبار مدل‌ها بالا و در روش ۳ کوادراتی اعتبار آنها کم است. در این جامعه با گیاهان غالب پهن برگ و پراکنش تصادفی، کوادرات ۲×۱ توانسته نتایج خوبی داشته باشد و استفاده از آن به نسبت کوادرات ۲×۲ و ۳×۳ راحت‌تر بوده و استفاده از آن در شرایط مشابه توصیه می‌شود. نتایج تحقیق زارع‌چاهوکی و همکاران (۱۳۹۲) و جباری و همکاران (۱۳۹۳) مشابه و موید این مطلب است که در جوامع با گیاهان با اندازه کوچک، کوادرات با اندازه زیاد از حد بزرگ مناسب نخواهد بود که با این بخش از نتایج تحقیق حاضر مشابهت دارد.

یکی از مهم‌ترین یافته‌های پژوهش حاضر، تأثیر اندازه کوادرات بر میزان ارتباط داده‌های زمینی و ماهواره‌ای است. در اغلب شاخص‌ها با افزایش ابعاد کوادرات از ۱×۱ به ۱×۲، ۲×۲ و ۳×۳ متر، میزان R² افزایش یافته و خطای برآورد کاهش پیدا کرده است. این مسئله از نظر مقیاس‌پذیری داده‌ها قابل تبیین است؛ زیرا مقدار یک پیکسل Sentinel-2 در واقع بیانگر میانگین یا ترکیبی از ویژگی‌های سطح نسبتاً وسیعی از زمین است، در حالی که اندازه‌گیری در کوادرات ۱×۱ متر تنها بخش کوچکی از این سطح را پوشش می‌دهد. در نتیجه، یک کوادرات کوچک ممکن است به‌طور اتفاقی روی لکه متراکم، خاک، سنگ، بوته یا یک گونه خاص قرار گیرد و نتواند وضعیت متوسط پیکسل را نشان دهد. با افزایش سطح کوادرات، اثر این ناهمگنی کاهش یافته و مقدار زمینی به مقدار طیفی پیکسل نزدیک‌تر می‌شود. این تفسیر با یافته‌های آندرتا و همکاران (۲۰۲۲) درباره اهمیت تفکیک مکانی در برآورد پوشش علفزارها سازگار است.

بررسی رابطه بین شاخص‌ها و تولید گیاهان نیز نشان می‌دهد که میزان همبستگی روابط رگرسیونی در اکثر شاخص‌ها در کوادرات‌های ۱×۱ معنی‌دار نشده است و مدل حاصل نیز اعتبار کافی ندارد. در کوادرات‌های ۲×۱ نیز روابط حاصل در روش نمونه‌برداری ۲ (۳ کوادراتی) معنی‌دار نشده‌اند و مدل حاصل از آنها نیز از اعتبار کافی برخوردار نیست. جهت تولید نیز، همبستگی در روش ۶ کوادراتی بیشتر و در روش ۳ کوادراتی کمتر می‌باشد و بالتبع اعتبار مدل‌ها نیز چنین شرایطی خواهند داشت.

در باندهای با تفکیک ۶۰ متری، با افزایش سطح کوادرات، در اکثر موارد میزان همبستگی زیاد شده و معنی‌داری آنها نیز بیشتر می‌شود. در کل میزان همبستگی‌ها بالا نیست. همبستگی روش نمونه‌برداری ۳ کوادراتی کمتر از روش نمونه‌برداری ۶ کوادراتی است. معنی‌داری و میزان همبستگی این دو شاخص در مقایسه با تصویر باندهای ۱۰ متری سنتینل، پایین است چرا که اندازه پیکسل باندهای مورد استفاده، ۶۰ در ۶۰ متر بوده و نمونه‌برداری داخل این پیکسل‌ها بخصوص در روش ۳ کوادراتی باعث پایین آمدن دقت شده است.

مقایسه نتایج درصد پوشش با تولید نشان می‌دهد که رابطه شاخص‌های گیاهی با تولید در بسیاری از موارد ضعیف‌تر از رابطه آنها با درصد پوشش بوده است. این موضوع از نظر بوم‌شناختی قابل انتظار است؛ زیرا درصد پوشش تاجی عمدتاً به میزان سطح اشغال‌شده توسط پوشش گیاهی مربوط است، در حالی که تولید تابع مجموعه پیچیده‌تری از ویژگی‌ها شامل ارتفاع گیاه، تراکم، ساختار عمودی، ترکیب گونه‌ای، زیست‌توده، مرحله فنولوژیک و میزان آب موجود در بافت گیاهی است. بنابراین، یک رویشگاه ممکن است درصد پوشش نسبتاً مشابهی با رویشگاه دیگر داشته باشد، اما به دلیل تفاوت ارتفاع یا تراکم اندام هوایی، تولید متفاوتی ایجاد کند. نتایج مونیاتی (۲۰۲۲) نیز این پیچیدگی را نشان می‌دهد. وی با استفاده از Sentinel-2 و شاخص‌های گیاهی برای برآورد زیست‌توده علفی در مرتع، رابطه معنی‌داری بین برخی شاخص‌ها و زیست‌توده مشاهده کرد، اما بیان نمود که ساختار ناپایسته تاج‌پوشش و حضور گونه‌های بلند علفی می‌تواند ارتباط بین شاخص طیفی و زیست‌توده را تضعیف کند. در آن مطالعه، EVI بهترین عملکرد را در میان شاخص‌های بررسی‌شده داشت و رابطه بین زیست‌توده واقعی و برآوردشده معنی‌دار بود. این نتیجه با یافته پژوهش حاضر درباره ضعیف‌تر بودن روابط تولید نسبت به درصد پوشش سازگار است و نشان می‌دهد که برآورد تولید از تصاویر ماهواره‌ای، به اطلاعات بیشتری فراتر از یک شاخص طیفی منفرد نیاز دارد. همچنین نتایج داشپورو و همکاران (۲۰۲۳) نیز در این راستا نشان می‌دهند که ترکیب باندهای طیفی و شاخص‌های گیاهی می‌تواند برای برآورد همزمان پوشش و زیست‌توده در استپ شرقی مغولستان مفید باشد. کرنی^۳ و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از داده‌های سری زمانی Landsat و Sentinel برای

1. Zhangyan
2. Toby
3. Kearney

برآورد زیست‌توده علفی در مراتع نیمه‌خشک نشان دادند که برای دستیابی به مدلی پایدار در شرایط مکانی و زمانی مختلف، استفاده از داده‌های چندساله و اطلاعات مربوط به ترکیب جامعه گیاهی اهمیت دارد. آنان همچنین نشان دادند که ترکیب اطلاعات طیفی با اطلاعات مربوط به جوامع گیاهی می‌تواند عملکرد مدل را بهبود دهد.

از نظر اعتبار مدل نیز نتایج نشان می‌دهد که صرفاً معنی‌دار بودن رابطه رگرسیونی برای پذیرش یک مدل کافی نیست. برای مثال، در بسیاری از مدل‌های مربوط به کوادرات 1×1 متر، اگرچه برخی روابط آماری معنی‌دار بودند، اختلاف بین مقدار برداشت زمینی و مقدار برآوردشده از مدل و همچنین RMSE نسبتاً زیاد بود. در تفکیک ۶۰ متر نیز برای بسیاری از مدل‌های کوادرات 1×1 و برخی مدل‌های کوادرات 2×2 در روش سه‌کوادرانی، اختلاف بین مقادیر مشاهده‌شده و برآوردشده معنی‌دار گزارش شده است. همچنین کوادرات 1×1 مناسب نبوده است که در باندهای ۱۰ متری سنتینل نیز به همین صورت بود. در کوادرات 2×1 و روش نمونه‌برداری ۳ کوادراتی نیز میزان اعتبار این تصویر (تفکیک ۶۰ متر)، اعتبار مدل پایین آمده و از نظر آماری معتبر نمی‌باشد. بنابراین با در نظر گرفتن این مسئله، در زمان استفاده از باندهای با تفکیک ۶۰ متری، استفاده از کوادرات 2×1 توصیه نمی‌شود و می‌توان کوادرات 2×2 با تعداد ۶ عدد در واحد نمونه‌برداری مورد استفاده قرار داد. بنابراین، در ارزیابی کاربردپذیری مدل‌ها باید R^2 ، RMSE و آزمون مقایسه مقدار مشاهده‌شده و برآوردشده به‌صورت همزمان در نظر گرفته شوند.

یکی از تفاوت‌های مهم پژوهش حاضر با مطالعات جدید این است که هدف آن صرفاً دستیابی به بالاترین دقت پیش‌بینی نبوده، بلکه به‌طور همزمان اثر سه عامل «شاخص گیاهی، اندازه کوادرات و روش نمونه‌برداری» و همچنین اثر «تفکیک مکانی ۱۰ و ۶۰ متری» را بررسی کرده است. بنابراین، یافته اصلی پژوهش را می‌توان در قالب یک رابطه مقیاس‌محور تفسیر کرد: هرچه اندازه و پراکنش نمونه‌های زمینی بهتر بتواند سطح متناظر با پیکسل ماهواره‌ای را نشان دهد، رابطه بین داده زمینی و شاخص گیاهی افزایش می‌یابد؛ اما با افزایش اندازه پیکسل، ناهمگنی سطح افزایش یافته و استفاده از نمونه‌های محدود زمینی برای نمایندگی کل پیکسل دشوارتر می‌شود. در مطالعات جدید، حرکت از مدل‌های رگرسیون خطی تک‌متغیره به سمت روش‌های چندمتغیره و یادگیری ماشین نیز مورد توجه قرار گرفته است. مطالعه نتایج و مهانگارا (۲۰۲۵) برای برآورد زیست‌توده علفزار با استفاده از Sentinel-2، شاخص‌های گیاهی و داده‌های محیطی نشان داد که مدل‌های یادگیری ماشین مانند Gradient Boosting و Random Forest می‌توانند روابط پیچیده میان متغیرهای طیفی و زیست‌توده را بهتر از یک رابطه خطی ساده نمایش دهند. در جمع‌بندی نتایج این تحقیق می‌توان ابراز کرد شاخص‌های ارزیابی پوشش گیاهی در برآورد تولید جامعه گیاهی پهن‌برگ از توانایی بالایی برخوردار است و می‌توان از این نتایج در تصمیمات و برنامه‌ریزی‌های مدیریتی در جهت مدیریت مراتع مناطق کوهستانی بهره گرفت. از لحاظ محدودیت‌های انجام این گونه تحقیقات می‌توان ابراز کرد که با توجه به هزینه بالای نمونه‌برداری در عرصه و سایر عملیات‌های تحقیق، تامین منابع مالی به پیشبرد اهداف این گونه مطالعات کمک خواهد کرد.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

بنا به اظهار نویسندگان مسئول، این مقاله حامی مالی نداشته است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: جمع‌آوری داده‌ها، بازدید و تحلیل میدانی، تجزیه و تحلیل داده‌ها و نگارش مقاله.
نویسنده دوم: مشارکت در تجزیه و تحلیل داده‌ها و نظارت بر اجرای مطالعه.
نویسنده سوم: مشارکت در بخش روش‌شناسی تحقیق، مشارکت در نگارش یافته‌ها و اصلاح نهایی مقاله.
نویسنده چهارم: مشارکت در بخش روش‌شناسی تحقیق و همکاری در نگارش نتیجه‌گیری.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

نویسندگان اعلام می‌کنند که از ابزار هوش مصنوعی (AI) برای نگارش این مقاله استفاده نکرده‌اند.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ تضاد منافی ندارند.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌ها بنا به درخواست نویسندگان در دسترس هستند.

سپاسگزاری

نویسندگان از تمامی افرادی که در گردآوری داده‌های میدانی با آن‌ها همکاری کرده‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

- ارزانی، حسین و عابدی، مهدی. (۱۳۹۴). ارزیابی مرتع: ممیزی و پایش. انتشارات دانشگاه تهران.
- ارزانی، حسین؛ دهداری، سمیه و گردون کینگ. (۱۳۹۰). مدل‌های تخمین تولید مراتع از طریق اندازه‌گیری پوشش گیاهی. *فصلنامه تحقیقات مرتع و بیابان ایران*، ۱۸(۱)، ۱-۱۶. <https://doi.org/10.22092/ijdr.2011.101992>
- ارزانی، حسین؛ کابلی، سید حسن؛ میرداوودی، حمید رضا و فرحپور، مهدی. (۱۳۸۷). بررسی قابلیت داده‌های سنجنده‌های TM و ETM+ در برآورد پوشش گیاهی مراتع مناطق خشک مطالعه موردی استان مرکزی. *تحقیقات مرتع و بیابان ایران*، ۱۵(۳)، ۳۲۰-۳۴۷. https://ijdr.areeo.ac.ir/article_103990.html
- جباری، سمیه؛ خواجه‌الدین، سیدجمال‌الدین؛ جعفری، رضا و سلطانی سعید. (۱۳۹۳). بررسی تغییرات درصد پوشش گیاهی مراتع با استفاده از تصاویر ماهواره ای در منطقه سمیرم اصفهان. *بوم‌شناسی کاربردی*، ۳(۱۰)، ۲۷-۳۸. <http://ijae.iut.ac.ir/article-1-590-fa.html>
- زارع چاهوکی، محمدعلی، خجسته، فرزانه، یوسفی، مسعود، فرسودن، علی، و شفیع زاده نصرآبادی، مرجان. (۱۳۹۲). تعیین تعداد، سطح و شکل مناسب پلات برای نمونه برداری از پوشش گیاهی در مراتع طالقان میانی. *پژوهش‌های آب‌خیزداری (پژوهش و سازندگی)*، ۲۶(۹۹)، ۱۳۳-۱۳۹. <https://sid.ir/paper/409077/fa>
- مقدم، محمدرضا (۱۳۸۰). *اکولوژی توصیفی و آماری پوشش گیاهی*. انتشارات دانشگاه تهران. <https://search.isc.ac/dl/search/defaultta.aspx?DTC=6&DC=11635>
- مقدم، محمدرضا (۱۳۹۳). مرتع و مرتعداری در ایران، انتشارات دانشگاه تهران، ۴۸۴ صفحه.
- موسوی، سیدعلیرضا؛ فرح‌پور، مهدی؛ شکری، مریم؛ سلیمانی، کریم و گودرزی، محمود. (۱۳۸۵). بررسی روند تغییرات انبوهی پوشش گیاهی در قسمتی از حوضه سد لار در یک دوره ۲۵ ساله با استفاده تلفیقی از GIS و RS. *تحقیقات مرتع و بیابان ایران*، ۱۳(۳)، ۱۸۶-۲۰۰. https://ijdr.areeo.ac.ir/article_105848.html?lang=fa
- ناطق، سعیده؛ نوحه‌گر، احمد؛ احسانی، امیرحوشنگ و بذرافشان، ام‌البنین. (۱۳۹۶). بررسی تغییرات پوشش گیاهی بر اساس شاخص‌های گیاهی با استفاده از سنجش از دور، *تحقیقات مرتع و بیابان ایران*، ۲۴(۴)، ۷۷۸-۷۹۰. <https://doi.org/10.22092/ijdr.2017.114889>
- Anderson, G. L., & Hanson, J. D. (2001). Evaluating hand-held radiometer-derived vegetation indices for estimating aboveground biomass on semiarid rangelands. *Remote Sensing of Environment*, 45, 165-175. <https://doi.org/10.1080/10106049209354354>
- Andreatta, D., Gianelle, D., Scotton, M., & Dalponte, M. (2022). Estimating grassland vegetation cover with remote sensing: A comparison between Landsat-8, Sentinel-2 and PlanetScope imagery. *Ecological Indicators*, 141, 109102. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109102>
- Barati, S., Rayegani, B., Saati, M., Sharifi, A., & Nasri, M. (2011). Comparison of the accuracies of different spectral indices for estimation of vegetation cover in sparse vegetated areas. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 14, 49-56. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2011.06.001>
- Brinkman, K., Dickhoefer, U., Schlecht, E., & Buerkert, A. (2011). Quantification of aboveground rangeland productivity and anthropogenic degradation on the Arabian Peninsula using Landsat imagery and field inventory data. *Remote Sensing of Environment*, 115, 465-474. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.09.016>
- Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to remote sensing* (5th ed.). Guilford Press.
- Dashpurev, B., Dorj, M., Phan, T. N., Bendix, J., & Lehnert, L. W. (2023). Estimating fractional vegetation cover and aboveground biomass for land degradation assessment in eastern Mongolia steppe: Combining ground vegetation data and remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 44(2), 452-468. <https://doi.org/10.1080/01431161.2023.2165421>
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25-36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- Hardisky, M. A., Daiber, F. C., Roman, C. T., & Klemas, V. (1984). Remote sensing of biomass and annual net aerial primary productivity of a salt marsh. *Remote Sensing of Environment*, 16, 91-106. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(84\)90055-5](https://doi.org/10.1016/0034-4257(84)90055-5)
- Herbei, M. V., Loruș, C., Copăcean, L., Herbei, R. C., Radu, S. M., Cojocariu, L. L., & Sala, F. (2025). Integration of remote sensing vegetation indices into a structural model for sustainable biomass monitoring in protected mountain areas: A case study in the Southern Carpathians (Romania). *Sustainability*, 18(1), 213. <https://doi.org/10.3390/su18010213>

- Jasinski, M. F., & Eagleson, P. S. (1989). The structure of red-infrared scattergrams of semivegetated landscapes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 27(1), 46–56. <https://doi.org/10.1109/36.29564>
- Kearney, S. P., Porensky, L. M., Augustine, D. J., Gaffney, R., & Derner, J. D. (2022). Monitoring standing herbaceous biomass and thresholds in semiarid rangelands from harmonized Landsat 8 and Sentinel-2 imagery to support within-season adaptive management. *Remote Sensing of Environment*, 271, 112907. <https://doi.org/10.15482/USDA.ADC/1526411>
- Kusuma, P., Hively, W. D., & McCarty, G. W. (2015). Evaluating the relationship between biomass, percent ground cover and remote sensing indices across six winter cover crop fields in Maryland, United States. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 39, 88–102. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.03.002>
- Moleele, N., Ring Rose, S., Arenberg, W., Lunden, B., & Vanderpost, C. (2001). Assessment of vegetation indexes useful for browse production in semiarid rangelands. *International Journal of Remote Sensing*, 22(5), 41–56. <https://doi.org/10.1080/01431160051060147>
- Munyati, C. (2022). Detecting the distribution of grass aboveground biomass on a rangeland using Sentinel-2 MSI vegetation indices. *Advances in Space Research*, 69(2), 1130–1145. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.10.048>
- Netsianda, A., & Mhangara, P. (2025). Aboveground biomass estimation in a grassland ecosystem using Sentinel-2 satellite imagery and machine learning algorithms. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(2), 138. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13610-1>
- Pickup, G., Chewings, V. H., & Nelson, O. J. (1993). Estimating changes in vegetation cover over time in arid rangelands using Landsat MSS data. *Remote Sensing of Environment*, 243–263. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90069-A](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90069-A)
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H., & Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 48, 119–126. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90134-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90134-1)
- Toby, N. C., & David, A. R. (1997). Relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62, 241–252. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00104-1)
- Zhangyan, J., Huete, A. R., Kamel, D., & Tomoaki, M. (2008). Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment*, 112, 338–3385. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.006>

References

- Anderson, G. L., & Hanson, J. D. (2001). Evaluating hand-held radiometer-derived vegetation indices for estimating aboveground biomass on semiarid rangelands. *Remote Sensing of Environment*, 45, 165–175. <https://doi.org/10.1080/10106049209354354>
- Andreatta, D., Gianelle, D., Scotton, M., & Dalponte, M. (2022). Estimating grassland vegetation cover with remote sensing: A comparison between Landsat-8, Sentinel-2 and PlanetScope imagery. *Ecological Indicators*, 141, 109102. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109102>
- Arzani, H., & Abedi, M. (2015). *Rangeland assessment: Survey and monitoring* (Vol. 1). University of Tehran Press. (In Persian)
- Arzani, H., Dehdari, S., & King, G. (2011). Models for estimating range production by cover measurement. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 18(1), 1–16. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2011.101992> (In Persian)
- Arzani, H., Kaboli, H., Mirdavoodi, H. R., & Farahpoor, M. (2008). Reliability of ETM+ and TM data for estimating vegetation cover of arid areas rangelands (case study: Markazi Province of Iran). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 15(3), 320–347. https://ijrdr.areeo.ac.ir/article_103990.html (In Persian)
- Barati, S., Rayegani, B., Saati, M., Sharifi, A., & Nasri, M. (2011). Comparison of the accuracies of different spectral indices for estimation of vegetation cover in sparse vegetated areas. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 14, 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2011.06.001>
- Brinkman, K., Dickhoefer, U., Schlecht, E., & Buerkert, A. (2011). Quantification of aboveground rangeland productivity and anthropogenic degradation on the Arabian Peninsula using Landsat imagery and field inventory data. *Remote Sensing of Environment*, 115, 465–474. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.09.016>
- Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to remote sensing*. Guilford Press.
- Dashpurev, B., Dorj, M., Phan, T. N., Bendix, J., & Lehnert, L. W. (2023). Estimating fractional vegetation cover and aboveground biomass for land degradation assessment in eastern Mongolia steppe: Combining ground vegetation data and remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 44(2), 452–468. <https://doi.org/10.1080/01431161.2023.2165421>
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>

- Hardisky, M. A., Daiber, F. C., Roman, C. T., & Klemas, V. (1984). Remote sensing of biomass and annual net aerial primary productivity of a salt marsh. *Remote Sensing of Environment*, 16, 91–106. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(84\)90055-5](https://doi.org/10.1016/0034-4257(84)90055-5)
- Herbei, M. V., Lorinț, C., Copăcean, L., Herbei, R. C., Radu, S. M., Cojocariu, L. L., & Sala, F. (2025). Integration of remote sensing vegetation indices into a structural model for sustainable biomass monitoring in protected mountain areas: A case study in the Southern Carpathians (Romania). *Sustainability*, 18(1), 213. <https://doi.org/10.3390/su18010213>
- Jabbari, S., Khajeddin, S. J., Jafari, R., & Soltani, S. (2014). Investigation of the pasture vegetation changes using satellite data in Semirom, Isfahan. *Iranian Journal of Applied Ecology*, 3(10), 27–39. <http://ijae.iut.ac.ir/article-1-590-fa.html> (In Persian)
- Jasinski, M. F., & Eagleson, P. S. (1989). The structure of red-infrared scattergrams of semivegetated landscapes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 27(1), 46–56. <https://doi.org/10.1109/36.29564>
- Kearney, S. P., Porensky, L. M., Augustine, D. J., Gaffney, R., & Derner, J. D. (2022). Monitoring standing herbaceous biomass and thresholds in semiarid rangelands from harmonized Landsat 8 and Sentinel-2 imagery to support within-season adaptive management. *Remote Sensing of Environment*, 271, 112907. <https://doi.org/10.15482/USDA.ADC/1526411>
- Kusuma, P., Hively, W. D., & McCarty, G. W. (2015). Evaluating the relationship between biomass, percent ground cover and remote sensing indices across six winter cover crop fields in Maryland, United States. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 39, 88–102. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.03.002>
- Moghadam, M. R. (2001). *Quantitative plant ecology*. University of Tehran Press. (In Persian)
- Moghadam, M. R. (2014). *Range and rangeland management in Iran*. University of Tehran Press. (In Persian)
- Moleele, N., Ring Rose, S., Arenberg, W., Lunden, B., & Vanderpost, C. (2001). Assessment of vegetation indexes useful for browse production in semiarid rangelands. *International Journal of Remote Sensing*, 22(5), 41–56. <https://doi.org/10.1080/01431160051060147>
- Mousavi, S. A., Farahpour, M., Shokri, M., Solaimani, K., & Godarzi, M. (2006). Vegetation cover change during 25 years: Case of Lar Dam Basin. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 13(3), 186–200. https://ijrdr.areeo.ac.ir/article_105848.html?lang=en (In Persian)
- Munyati, C. (2022). Detecting the distribution of grass aboveground biomass on a rangeland using Sentinel-2 MSI vegetation indices. *Advances in Space Research*, 69(2), 1130–1145. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.10.048>
- Nateghi, S., Nohegar, A., Ehsani, A. H., & Bazrafshan, O. (2017). Evaluating the vegetation changes upon vegetation index by using remote sensing. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 24(4), 778–790. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2017.114889> (In Persian)
- Netsianda, A., & Mhangara, P. (2025). Aboveground biomass estimation in a grassland ecosystem using Sentinel-2 satellite imagery and machine learning algorithms. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(2), 138. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13610-1>
- Pickup, G., Chewings, V. H., & Nelson, O. J. (1993). Estimating changes in vegetation cover over time in arid rangelands using Landsat MSS data. *Remote Sensing of Environment*, 243–263. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90069-A](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90069-A)
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H., & Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 48, 119–126. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90134-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90134-1)
- Toby, N. C., & David, A. R. (1997). Relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62, 241–252. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00104-1)
- Zare Chahouki, M. A., Khojasteh, F., Yousefi, M., Farsoudan, A., & Shafizadeh, M. (2013). Evaluation of different plot shape, size, and number for sampling in middle Taleghan rangelands. *Watershed Management Research (Pajouhesh & Sazandegi)*, 99, 133–139. <https://sid.ir/paper/409077/fa> (In Persian)
- Zhangyan, J., Huete, A. R., Kamel, D., & Tomoaki, M. (2008). Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment*, 112, 338–3385. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.006>