

Biomass estimation of wheat fields using remote sensing plant indices in Bandar-e-Turkmen county

**Maral Niazmoradi¹, Hossein Kazemi^{*2}, Javid Gherekhloo³,
Afshin Soltani⁴, Behnam Kamkar⁵**

1. Ph.D. Graduate of Agronomy, Dept. of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: niazmoradimaral@gmail.com
2. Corresponding Author, Professor, Dept. of Horticulture, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: hkazemi@gau.ac.ir
3. Professor, Dept. of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: gherekhloo@gau.ac.ir
4. Professor, Dept. of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: afshin.soltani@gmail.com
5. Professor, Dept. of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: kamkar@um.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Full Length Research Paper	Background and Objectives: Estimating the area under cultivation and crop yield at the global level is one of the most vital issues for policymakers and decision-makers to assess the annual productivity of agricultural products and food supply. Nowadays, remote sensing (RS) satellite and geographic information system (GIS) can estimate and continuously monitor these production parameters in large geographical areas and thus also examine the health of fields. The aim of this study is to estimate the amount of wheat biomass using remote sensing and the efficiency of plant indices in estimating the amount of plant biomass in non-destructive sampling methods.
Article history: Received: 09.21.2023 Revised: 10.21.2023 Accepted: 12.02.2023	
Keywords: Biomass, Plant indices, Sentinel 2, Wheat	
	Materials and Methods: In order to estimate the biomass of wheat fields using remote sensing plant indices, 59 wheat fields covering an area of 292 hectares were randomly and uniformly selected in the agricultural lands of Bandar-e-Turkmen county in the 2019-2020 agronomy year. Plant samples were collected on April 25, 2019, coinciding with the peak growth stage of wheat, using 0.25 square meter quadrats from the fields and their dry weight was measured. In this study, Sentinel-2 satellite images from the nearest date to the sampling date, which was April 31, were used to calculate the NDVI, SAVI, DVI, and RVI plant indices. Furthermore, the regression relationship between the measured biomass values and the index values was examined and analyzed using SPSS software and statistical parameters such as coefficient of determination (R^2), coefficient of variation (CV%), correlation coefficient (r), and root mean square error (RMSE).
	Results: Based on the comparison of the examined plant indices, the RVI index was recognized as the superior plant index. This index had the highest coefficient of determination (0.885) and correlation coefficient (0.941), as well as the lowest values of RMSE (21.32) and coefficient of variation (1.5) compared to other indices. Therefore, the RVI index was used to establish a regression relationship with the measured wheat

biomass. Establishing a regression relationship between measured biomass and estimated biomass indicates the high efficiency of the satellite imagery used and the remote sensing indices in estimating plant biomass. The RVI map in the studied agricultural lands showed the lowest value of this index (0.44) in the western and northwestern parts of the county. Higher soil salinity and a higher level of stagnant water in these areas could be the reasons for less vegetation cover and consequently lower values of the RVI index in these points. This map displayed higher values of this index in the central, eastern, and southeastern parts of the county. The high values of this index indicate dense vegetation cover in these areas, which can be attributed to higher carbon and organic matter content in the soil, sufficient and well-distributed rainfall, proper farm management, lower soil salinity, adequate soil nutrition, and other factors.

Conclusion: In general, the higher values of the RVI plant index and consequently the higher production of biomass can indicate the desirable health and growth status of wheat in the fields of Bandar-e-Turkmen county. The results of this study can be used in precision agriculture planning and optimal agricultural management, such as predicting plant growth stages, estimating the area under cultivation, estimating yield and yield gap, and assessing the health status of agricultural plants.

Cite this article: Niazmoradi, Maral, Kazemi, Hossein, Gherekhloo, Javid, Soltani, Afshin, Kamkar, Behnam. 2025. Biomass estimation of wheat fields using remote sensing plant indices in Bandar-e-Turkmen county. *Journal of Plant Production Research*, 32 (1), 1-16.



© The Author(s).

DOI: -----

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

برآورد زیست توده مزارع گندم با استفاده از شاخص های گیاهی دورسنجی در شهرستان بندر ترکمن

مارال نیازمردی^۱، حسین کاظمی^{۲*}، جاوید قرخلو^۳، افشین سلطانی^۴، بهنام کامکار^۵

۱. دانش‌آموخته دکتری زراعت، گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
رایانامه: niazmoradimaral@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، استاد گروه علوم باغبانی، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
رایانامه: hkazemi@gau.ac.ir
۳. استاد گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
رایانامه: gherekhloo@gau.ac.ir
۴. استاد گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
رایانامه: afshin.soltani@gmail.com
۵. استاد گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: kamkar@um.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
سابقه و هدف: برآورد سطح زیر کشت و عملکرد محصول در سطح جهانی، یکی از حیاتی ترین مسائلی است که سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیرندگان برای ارزیابی بهره‌وری سالانه محصولات کشاورزی و عرضه مواد غذایی به آن نیاز دارند. امروزه سنجش‌ازدور (RS) ماهواره‌ای و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) می‌تواند تخمین و پایش مستمر این شاخص‌های تولید محصول را در مناطق جغرافیایی بزرگ امکان‌پذیر کند و از این طریق سلامت مزارع را نیز مورد بررسی قرار دهد. هدف از این مطالعه تخمین میزان زیست‌توده گیاهی گندم با استفاده از روش سنجش‌ازدور و کارایی شاخص‌های گیاهی در برآورد میزان زیست‌توده گیاهی در روش نمونه‌برداری غیر تخریبی می‌باشد.	نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۳۰ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۱
مواد و روش‌ها: به‌منظور برآورد زیست‌توده مزارع گندم با استفاده از شاخص‌های گیاهی دورسنجی، تعداد ۵۹ مزرعه گندم در سطح ۲۹۲ هکتار در سال زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۹ با پراکنش تصادفی و یکنواخت در سطح اراضی کشاورزی شهرستان بندر ترکمن انتخاب شدند. نمونه‌های گیاهی در تاریخ ۲۵ فروردین ماه ۱۳۹۹ مصادف با اوج مرحله رشد رویشی گندم با استفاده از کوادرات ۰/۲۵ مترمربعی به‌صورت کف‌بر از مزارع جمع‌آوری شده و وزن خشک آن‌ها توزین گردید. در این پژوهش تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲-مربوط به نزدیک‌ترین زمان نمونه‌برداری	واژه‌های کلیدی: زیست‌توده، سنتینل ۲، شاخص‌های گیاهی، گندم

برابر با ۳۱ فروردین ماه جهت محاسبه شاخص‌های گیاهی SAVI، NDVI و DVI و RVI مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه ارتباط رگرسیونی بین مقادیر زیست‌توده اندازه‌گیری شده و مقادیر شاخص‌های با استفاده از نرم‌افزار SPSS و آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، ضریب تغییرات ($CV\%$)، ضریب همبستگی (r) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) بررسی و تحلیل گردید.

یافته‌ها: بر اساس نتایج مقایسه شاخص‌های گیاهی مورد بررسی، شاخص RVI به عنوان شاخص گیاهی برتر شناخته شد. این شاخص دارای بالاترین میزان ضریب تبیین ($0/885$) و ضریب همبستگی ($0/941$) و کمترین مقادیر RMSE ($32/21$) و ضریب تغییرات ($5/1$) نسبت به سایر شاخص‌های دیگر بود؛ بنابراین از شاخص RVI جهت برقراری رابطه رگرسیونی با میزان زیست‌توده اندازه‌گیری شده گندم استفاده شد. برقراری ارتباط رگرسیونی بین زیست‌توده اندازه‌گیری و زیست‌توده تخمین زده شده، نشان‌دهنده کارایی بالای تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده و شاخص‌های دورسنجی در برآورد زیست‌توده گیاهی می‌باشد. نقشه RVI در اراضی کشاورزی مورد مطالعه، کمترین میزان این شاخص را در غرب و شمال غربی شهرستان برابر با $0/44$ نشان داد. شوری زیاد خاک و بالا بودن سطح ایستابی آب در این مناطق می‌تواند دلیلی بر پوشش گیاهی کم‌تر در این اراضی و در نتیجه مقدار پایین شاخص RVI در این نقاط باشد. این نقشه مقادیر بالاتر این شاخص را در مناطق مرکزی، شرق و جنوب شرقی شهرستان نشان داد. مقادیر بالای این شاخص گویای پوشش گیاهی متراکم در این مناطق می‌باشد که می‌توان ناشی از مقادیر بالای درصد کربن و ماده آلی خاک، وفور و توزیع مناسب بارش، مدیریت مطلوب مزرعه، شوری پایین تر خاک، تغذیه مناسب خاک و سایر عوامل دیگر برشمرد.

نتیجه‌گیری: درمجموع می‌توان نتیجه گرفت که میزان شاخص گیاهی RVI بالاتر و پیرو آن تولید زیست‌توده بیش‌تر می‌تواند نشان‌دهنده وضعیت مطلوب سلامت و رشد محصول گندم در مزارع شهرستان بندر ترکمن باشد. از نتایج این پژوهش می‌توان در برنامه‌ریزی کشاورزی دقیق و مدیریت بهینه مزارع مانند پیش‌بینی مراحل رشدی گیاهان، برآورد سطح زیرکشت محصولات، تخمین عملکرد و وضعیت سلامت گیاهان زراعی، دستیابی عملکرد واقعی و کاهش خلاء عملکرد استفاده کرد.

استناد: نیازمادی، مارال، کاظمی، حسین، قرخلو، جاوید، سلطانی، افشین، کامکار، بهنام (۱۴۰۴). برآورد زیست‌توده مزارع گندم با استفاده از شاخص‌های گیاهی دورسنجی در شهرستان بندر ترکمن. نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی، ۳۲ (۱)، ۱۶-۱.

DOI: -----



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

پوشش گیاهی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اجزای هر بوم‌سازگان به شمار می‌رود. تعیین زیست‌توده هر گیاه به‌منظور ارتباط آن با اقلیم، فرسایش خاک، سلامت، عملکرد و مدیریت منابع طبیعی بسیار ضروری است. روش‌های اندازه‌گیری مستقیم زیست‌توده علی‌رغم دقیق بودن، معمولاً با تخریب بخشی از پوشش گیاهی همراه می‌باشد که این عمل با توجه به تعداد موردنیاز برای مدل‌سازی ماهواره‌ای، علاوه بر ضرر رساندن به محصول، نیازمند تجهیزات خاص می‌باشد. از این‌رو استفاده از فناوری سنجنش‌ازدور به‌منظور ایجاد اطلاعات مناسب از مناطق وسیع و مشاهدات تکراری با صرف وقت و هزینه کمتر، امری ضروری می‌باشد (۱، ۲، ۳، ۴، ۵). توسعه دانش فناوری اطلاعات و علوم رایانه در سال‌های اخیر، همراه با دسترس بودن داده‌های سنجنش‌ازدور با وضوح بالا، منجر به توسعه روش‌های برآورد داده‌های زمینی با قدرت تفکیک مکانی، دقت و سرعت مناسب در پیش‌بینی ویژگی‌های پوشش گیاهی شده است (۶، ۷، ۸). از کاربرد شاخص‌های گیاهی برای اهداف مختلف چند دهه می‌گذرد و هنوز هم در سطح وسیعی استفاده می‌شود (۹). بیش‌تر این شاخص‌ها برای ارزیابی یک یا چند متغیر خاص و بر مبنای ویژگی‌ها و رفتار طیفی پدیده‌ها توسعه داده می‌شوند. بسیاری از این شاخص‌ها بر مبنای بازتاب در محدوده طول‌موج‌های قرمز و مادون‌قرمز نزدیک قرار داشته و ترکیب جبری از این دو باند هستند (۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵).

گیاهان در مراحل مختلف فنولوژیکی به‌دلیل تغییر در میزان آب بافت‌ها و کلروفیل، بازتاب‌های متفاوتی از خود نشان می‌دهند؛ بنابراین بهترین زمان برای اندازه‌گیری پوشش گیاهی، زمانی است که گیاهان به حداکثر میزان رشدشان رسیده باشند. در همین راستا نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که در مناطقی با

پوشش گیاهی متراکم و زیاد، شاخص‌های ساده گیاهی مانند $^{1}NDVI$ برای ارزیابی پوشش گیاهی مناسبند (۱۶). در مطالعه ارزیابی مدلی جهت تخمین عملکرد محصول گندم با کمک داده‌های $NDVI$ حاصل از تصاویر $^{2}MODIS$ ، ارتباط بین شاخص $NDVI$ و میزان تولید زیست‌توده محاسبه شد (۱۷). مقایسه روش زمین‌آمار و استفاده از داده‌های سنجنش‌ازدور به‌منظور پیش‌بینی عملکرد گندم در برخی از مراحل رشد در استان گلستان نشان داد که با توجه به‌دقت مناسب فناوری سنجنش‌ازدور نسبت به روش زمین‌آمار و علاوه بر آن آسان و کم‌هزینه بودن، این روش می‌تواند تحول جدیدی در برآورد عملکرد در مقیاس منطقه‌ای به وجود آورد (۱۸). هم‌چنین به‌منظور بررسی تغییرات پوشش گیاهی نخلستانی با خاک شور در عربستان سعودی، ۱۳ شاخص مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج این پژوهش نشان داد که از بین شاخص‌های مطالعه شده، سه شاخص $^{3}SAVI$ ، شاخص پوشش برف ($^{4}NDSI$) و شاخص شوری ($^{5}SI-T$)^۵ نتایج بهتری نشان داده و برای این منطقه مناسب‌تر بوده‌اند (۱۹). بخش‌ده لاریمی و همکاران (۲۰۲۲) در برآورد پتانسیل انباشت کربن در مزارع سویا با استفاده از شاخص‌های گیاهی سنجنش‌ازدور در شهرستان گرگان، از شاخص‌های $NDVI$ ، ^{6}DVI ، ^{7}RVI و $SAVI$ استفاده کرده و دریافتند که شاخص DVI توانست برآورد بهتری از پتانسیل کربن در مزارع سویا نشان داد (۲۰). در تخمین عملکرد گندم دوروم با استفاده از تصاویر سنتینل-۲ و لندست ۸ در حومه فوجیا (جنوب ایتالیا)

- 1- Normalized difference vegetation index
- 2- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
- 3- Soil Adjusted Vegetation Index
- 4- Normalized Difference Snow Index
- 5- Salinity Index
- 6- Deference Vegetation Index
- 7- Ratio Vegetation Index

در فصول زراعی ۲۰۱۷-۲۰۱۳، مقایسه شاخص گیاهی NDVI با داده‌های پایش عملکرد میدانی، رابطه خطی قوی و بسیار مثبت (ضریب همبستگی از ۰/۵۴ تا ۰/۷۴) را نشان داد که بیش‌ترین تنوع درون مزرعه‌ای را برای همه تصاویر بین ماه‌های مارس و آوریل توضیح می‌دهد (۲۱).

زیست‌توده بالای سطح خاک، یک معیار زیستی- فیزیکی کلیدی برای نظارت بر وضعیت رشد، شرایط سلامتی و همچنین پیش‌بینی عملکرد محصول است. اطلاعات مکانی پیوسته زیست‌توده گیاهی نقش برجسته‌ای در مدیریت تغذیه کودی، کنترل بیماری‌ها، پیش‌بینی عملکرد و انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا می‌کند (۲۲). امروزه پژوهش‌ها در زمینه استفاده از روش سنجش‌ازدور جهت بررسی سلامت پوشش گیاهی در حال پیشرفت می‌باشد. ازجمله، در موضوع ارزیابی وضعیت امنیت غذایی آفریقا از سنجش‌ازدور برای تعیین سلامت محصول، تعیین پتانسیل‌ها و محدودیت‌ها و تخمین آلودگی آفات و بیماری‌ها استفاده شده است (۲۳). باثو و همکاران (۲۰۲۲) ویژگی‌های زمانی و مکانی (پوشش گیاهی) سلامت بوم‌سازگان منطقه فوژو در چین را با استفاده از مدل (VOR)^۱ و سنجش‌ازدور مورد ارزیابی و تجزیه و تحلیل قرار داده و نشان دادند که ارزش سلامت بوم‌سازگان در این منطقه به ترتیب با مقادیر ۰/۳۵۲۱ (۱۹۹۶)، ۰/۳۴۴۵ (۲۰۰۸) و ۰/۳۳۴۵ (۲۰۲۱) به تدریج کاهش یافت. استفاده از سنجش‌ازدور بر پایه روش مورد استفاده در این پژوهش، یک چارچوب جامع برای حل مشکلات اندازه‌گیری فرایند تکامل پویا و ویژگی‌های سلامت بوم‌سازگان را فراهم نمود (۲۴). نقشه‌برداری عملکرد گندم با وضوح بالا با استفاده از ماهواره سنتینل ۲ در مزارع گندم بریتانیا نشان داد هنگامی که تصاویر ماهواره‌ای با داده‌های

محیطی ترکیب می‌شوند، بهبود بیش‌تری در دقت نتایج حاصل می‌شود. به کارگیری داده‌های حاصل از ماهواره طیفی از عملکرد محصول در سراسر چشم‌انداز از ۴/۰۹ تا ۱۲/۲۲ تن در هکتار را پیش‌بینی کرده و تولید کل محصول در این منطقه را ۲۸۹۰۰۰ تن تخمین زد (۲۵).

زیست‌توده یکی از مفیدترین شاخص‌های رشد و سلامت محصولات زراعی است که با عملکرد و کیفیت دانه و تولید ناخالص اولیه مرتبط می‌باشد؛ بنابراین برآورد صحیح زیست‌توده اندام هوایی گیاه برای نظارت دقیق رشد و سلامت محصول و بهبود کارایی مدیریت زراعی و پیش‌بینی عملکرد محصول با استفاده از روش سنجش‌ازدور ضروری است. استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های گیاهی در برآورد زیست‌توده گیاهی به عنوان روش نمونه‌برداری غیرتخریبی، می‌تواند کمک زیادی به پژوهش‌گران در زمینه صرفه‌جویی در وقت، هزینه و انرژی نماید. بدین‌منظور مطالعه حاضر جهت تخمین زیست‌توده اندام هوایی گندم به عنوان شاخصی از سلامت گیاهی با استفاده از شاخص‌های گیاهی سنجش‌ازدور در اراضی کشاورزی شهرستان بندرتکمن انجام شد.

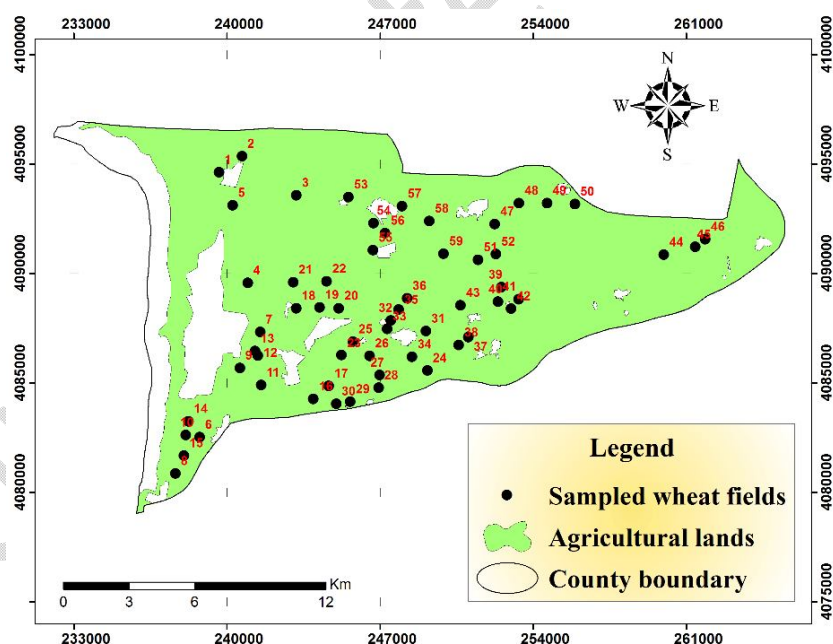
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: شهرستان بندرتکمن به عنوان یکی از شهرستان‌های شمالی استان گلستان، با وسعتی برابر ۸۵۴/۱۸ کیلومترمربع، در مختصات جغرافیایی بین ۵۳ درجه و ۵۴ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۲۸ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۴۹ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۲۴ دقیقه عرض شمالی و در ارتفاع ۲۰- از سطح دریا واقع شده است. این شهرستان از شمال به شهرستان گمیسان، از غرب به دریای خزر، از شرق به شهرستان آق‌قلا و از جنوب به شهرستان‌های کردکوی و گرگان منتهی می‌شود. از مجموع ۲۴۰۰۰ هکتار سطح زیر کشت

سانتی‌گراد در خردادماه ۱۳۹۹ گزارش شده است. آماده‌سازی زمین زراعی و کشت گندم در این شهرستان از اواسط مهرماه تا اواسط آذرماه صورت گرفت. هم‌چنین مرحله اوج سبزی‌گی گندم ۲۰ تا ۳۰ فروردین‌ماه و در اواخر خردادماه تا اواسط تیرماه نیز برداشت محصول انجام شد. ارقام مورد کشت در این مزارع شامل قابوس، مروارید، لاین‌های N91-17 و N87-20 بودند. جهت اندازه‌گیری زیست‌توده گیاهی مزارع گندم منتخب، در تاریخ ۲۵ فروردین‌ماه مطابق با الگوی W درون مزارع حرکت کرده و با استفاده از کوادرات 0.5×0.5 مترمربعی نمونه‌های گیاهی کف‌بر و جمع‌آوری شدند. سپس نمونه‌های گیاهی در آن خشک و توزین گردیدند. هم‌چنین موقعیت جغرافیایی مزارع با استفاده از دستگاه GPS مدل گاردمین لمسی ثبت گردید.

شهرستان در سال ۹۹-۱۳۹۸، معادل ۱۳۰۰۰ هکتار به کشت گندم اختصاص یافت که ۲۵۰۰ هکتار آن گندم آبی و ۱۰۵۰۰ هکتار گندم دیم بود. هم‌چنین عملکرد گندم آبی ۳۹۲۰ و گندم دیم ۲۸۴۰ کیلوگرم در هکتار گزارش شده است. محصولات عمده این شهرستان شامل: گندم، جو، کلزا و پنبه است که از طریق کشت آبی و دیم به‌دست می‌آید (۲۶).

این پژوهش در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۳۹۸ در ۲۹۲ هکتار از اراضی گندم شهرستان معادل ۵۹ مزرعه، انجام شد. این مزارع به‌صورت تصادفی و با پراکنش یکنواخت در سطح اراضی کشاورزی شهرستان انتخاب شدند (شکل ۱). مجموع بارندگی منطقه در این سال زراعی حدود ۳۰۹ میلی‌متر و میانگین دمای سردترین و گرم‌ترین ماه سال به‌ترتیب ۴ درجه سانتی‌گراد در بهمن‌ماه ۱۳۹۸ و ۳۰/۵۰ درجه



شکل ۱- موقعیت مزارع گندم نمونه‌برداری شده در اراضی کشاورزی شهرستان بندرترکمن، استان گلستان.

Fig. 1. The location of sampled wheat fields in the agricultural lands of Bandar-e-Turkmen county, Golestan province.

NDVI بین ۱- که بیانگر سطوح پوشیده از آب و برف و ۱+ که نشان‌دهنده مناطق دارای بیش‌ترین پوشش گیاهی است، متفاوت می‌باشد (۲۸). این شاخص‌ها بر اساس روابط زیر برآورد گردید:

$$NDVI = \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED)} \quad (۱)$$

$$DVI = IR - R \quad (۲)$$

$$RVI = IR/R \quad (۳)$$

$$SAVI = \left[\frac{(IR-R)}{(IR+R+L)} \right] \times (1 + L) \quad (۴)$$

که در آن، IR مادون‌قرمز نزدیک، R قرمز و L ضریب تصحیح برای تراکم‌های مختلف پوشش گیاهی که برابر با ۰/۵ (۲۹) است.

تجزیه و تحلیل آماری و انتخاب شاخص برتر: پس از جمع‌آوری داده‌های مزرعه‌ای و محاسبه شاخص‌های گیاهی، تجزیه‌های آماری و رگرسیون با استفاده از نرم‌افزار SPSS و آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، ضریب تغییرات ($CV\%$) و ضریب همبستگی (r) بر طبق روابط ۵ تا ۸ انجام شد (۲۰) تا شاخص گیاهی برتر جهت محاسبه زیست‌توده انتخاب گردد. در نهایت نقشه شاخص گیاهی برتر از طریق نرم‌افزار ArcGIS تهیه و نمایش داده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (۵)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}) \times (O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (۶)$$

$$CV = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100 \quad (۷)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \hat{P}_L)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (۸)$$

روش تحقیق: در این مطالعه از تصاویر ماهواره سنتینل ۲ با درجه پردازش L2A جهت تعیین میزان زیست‌توده گیاهی گندم استفاده شد. این تصاویر از سایت مرکز دسترسی رایگان برنامه کوپرنیکوس^۱ وابسته به سازمان فضایی اروپا اخذ شد. زمان دریافت این تصاویر در محدوده حداکثر رشد رویشی گندم انتخاب شد، به‌طوری‌که پوشش ابری وجود نداشت. بر این اساس، تصویر مربوط به تاریخ ۱۳۹۹/۱/۳۱ (برابر با ۱۹ آوریل ۲۰۲۰) با سیزده باند طیفی متمایز از سایت <http://scihub.copernicus.eu/> اخذ شد که از این بین دو باند قرمز (B4 با طول‌موج ۶۶۵ نانومتر) و مادون‌قرمز نزدیک (B8 با طول‌موج ۸۴۲ نانومتر) و توان تفکیک ۱۰ متر، جهت محاسبه شاخص‌های گیاهی در محیط نرم‌افزار SNAP^۲ مورد استفاده قرار گرفتند. تصاویر L2A تصویر قائمی است که تصحیح اتمسفری و رادیومتریکی بر آن انجام‌شده و نیازی به پردازش تصویر ندارد.

شاخص‌های گیاهی: برای محاسبه زیست‌توده گیاهی از شاخص نرمال‌شده اختلاف پوشش گیاهی (NDVI)، شاخص گیاهی تفاضلی (DVI)، نسبت شاخص گیاهی (RVI) و شاخص پوشش گیاهی با اصلاح انعکاس خاک (SAVI) استفاده شدند. شاخص NDVI یکی از روش‌های معمول برای استخراج پوشش گیاهی می‌باشد که به‌صورت نسبت بین انعکاس اندازه‌گیری‌شده در باند قرمز^۳ و مادون‌قرمز نزدیک^۴ تعریف می‌گردد. این شاخص به‌دلیل این‌که بیش‌تر تحت‌تأثیر جذب کلروفیل در پوشش‌های سبز برگ‌دار و تراکم پوشش گیاهی بوده و همچنین در باندهای قرمز و مادون‌قرمز نزدیک، تناقض بین پوشش گیاهی و خاک در بیش‌ترین سطح خود می‌باشد انتخاب گردید (۲۷). مقادیر شاخص

- 1- The Copernicus Open Access Hub
- 2- Sentinel Application Platform
- 3- Visible Red Radiation
- 4- Near Infrared Refleance

در این روابط، P_i و $\bar{P}$ به ترتیب مقادیر پیش‌بینی شده و میانگین مقادیر پیش‌بینی شده، O_i و $\bar{O}$ معادل مقادیر مشاهده شده و میانگین مقادیر مشاهده شده و n تعداد نمونه‌ها می‌باشند (۲۲، ۲۰).

نتایج و بحث

برآورد میزان زیست توده گیاهی: نتایج مربوط به معادلات رگرسیونی و آماره‌های بین زیست توده اندازه‌گیری شده و شاخص‌های گیاهی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای در جدول ۱ نشان داده شده است. مطابق این جدول شاخص گیاهی RVI به دلیل برخورداری از بالاترین میزان ضریب تبیین (۰/۸۸۵) و ضریب همبستگی (۰/۹۴۱) و کم‌ترین مقادیر RMSE (۳۲/۲۱) و ضریب تغییرات (۵/۱) نسبت به سایر شاخص‌های دیگر، به عنوان شاخص گیاهی برتر جهت برقراری رابطه رگرسیونی با میزان زیست توده گیاهی گندم انتخاب شد. پراکندگی مطلوب نقاط زیست توده اندازه‌گیری شده در اطراف خط رگرسیون در شکل ۲ ارتباط قوی‌تر زیست توده گیاهی با شاخص RVI را در مقایسه با سایر شاخص‌ها در شکل‌های ۳ تا ۵ نشان می‌دهد.

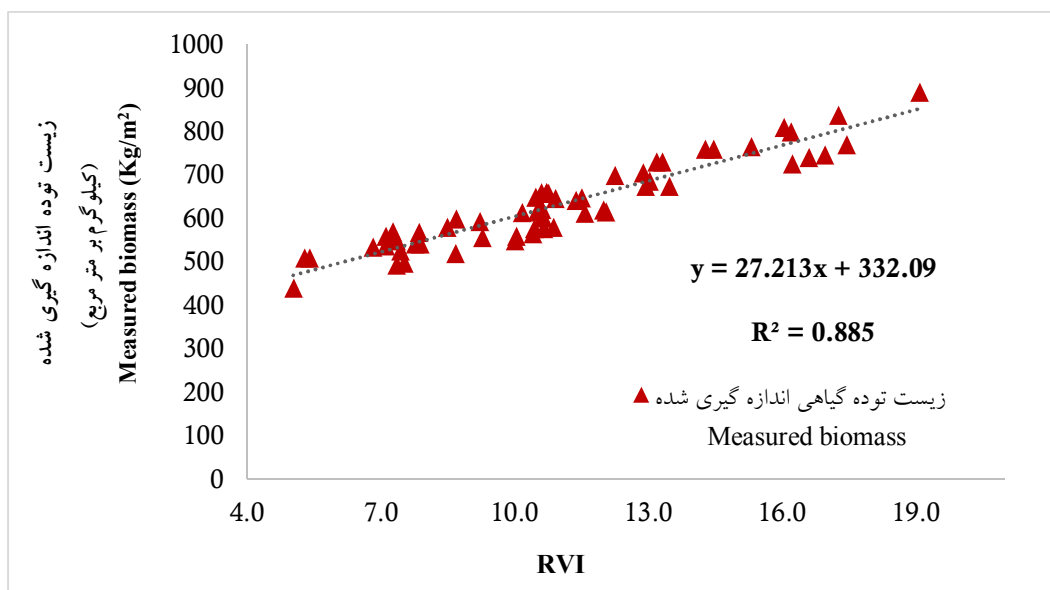
در مطالعه‌ای شاخص‌های پوشش گیاهی و داده‌های عملکرد نخل روغنی در مالزی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و به دنبال آن مدل‌سازی رگرسیون و اعتبار مدل با استفاده از معیارهای استاندارد انجام شد. نتایج نشان داد که بین

شاخص‌های پوشش گیاهی و عملکرد نخل روغنی، همبستگی مثبت قوی در سراسر جهان وجود دارد. دوره‌های کاشت در بین شاخص‌های پوشش گیاهی، RVI را دارای بهترین همبستگی با عملکرد نخل روغنی معرفی کرد (۳۰). پاناو و ساخارووا (۲۰۲۲) برای پیش‌بینی عملکرد دانه گیاهان زراعی در منطقه نوواسیبیرسک از داده راداری و شاخص RVI استفاده شد. این شاخص به وضوح نشان‌دهنده پویایی توسعه محصولات زراعی مانند گندم بهاره، جو دوسر و جو است. همبستگی و تحلیل رگرسیون رابطه بین شاخص گیاهی NDVI و RVI وجود یک رابطه معنی‌دار بین شاخص‌ها را نشان داد. نتایج محاسبات دقت پیش‌بینی عملکرد دانه را با استفاده از شاخص NRVI (نرمال شده) ۹۰ درصد برای فصل‌های رشد ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ نشان داد (۳۱).

همچنین در بین شاخص‌های مورد بررسی در این مطالعه، شاخص DVI با برخورداری از ضریب تبیین (۰/۸۳) و ضریب همبستگی (۰/۹۱) کم‌تر و ضریب تغییرات (۶/۱۵) بیش‌تر نسبت به شاخص RVI، دومین شاخص دارای ارتباط قوی با زیست توده اندازه‌گیری در نظر گرفته شد. در مطالعه ارزیابی ترسیب کربن در شهرستان گرگان با استفاده از سنجش‌ازدور و شاخص‌های گیاهی، شاخص DVI به عنوان شاخص گیاهی برتر شناخته شد (۲۰).

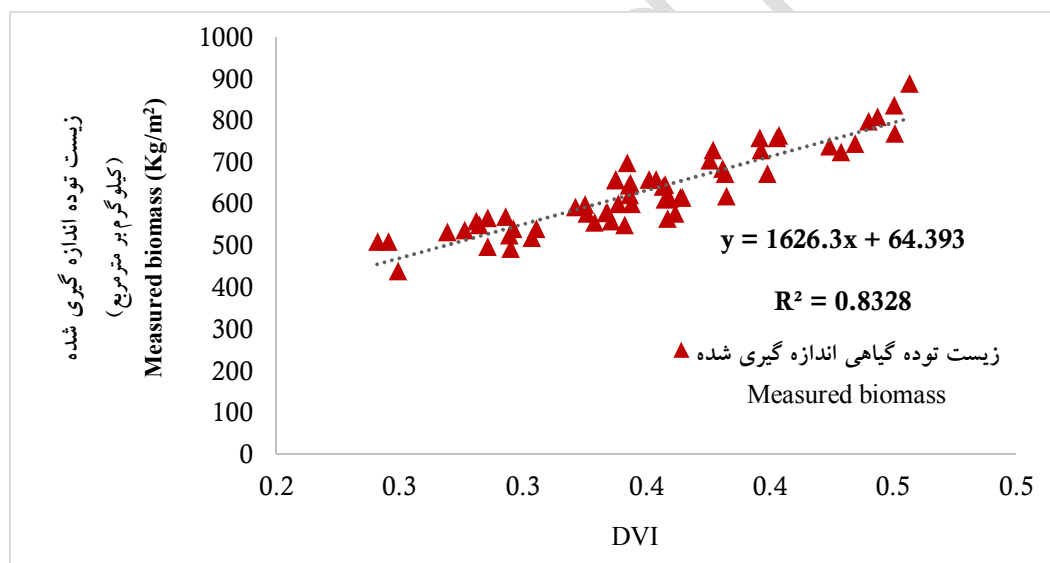
جدول ۱- معادلات رگرسیونی و آماره‌ها بین شاخص‌های گیاهی و زیست توده اندازه‌گیری شده در مزارع گندم شهرستان بندر ترکمن.
Table 1. Regression equations and statistics between plant indicators and biomass measured in wheat fields of Bandar-e-Turkmen county.

شاخص گیاهی Plant index	معادله Equation	ضریب تبیین (R^2) Coefficient of determination	مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) Root Mean Square Error	ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of Variation (CV%)	ضریب همبستگی (r) Correlation coefficient
RVI	$Y = 27.213x + 332.09$	0.88	32.21	5.1	0.94
DVI	$Y = 1626.3x + 64.393$	0.83	38.86	6.15	0.91
SAVI	$Y = 1347.3x - 124.02$	0.82	39.50	6.25	0.91
NDVI	$Y = 1418.4x - 518.24$	0.75	46.73	7.4	0.87



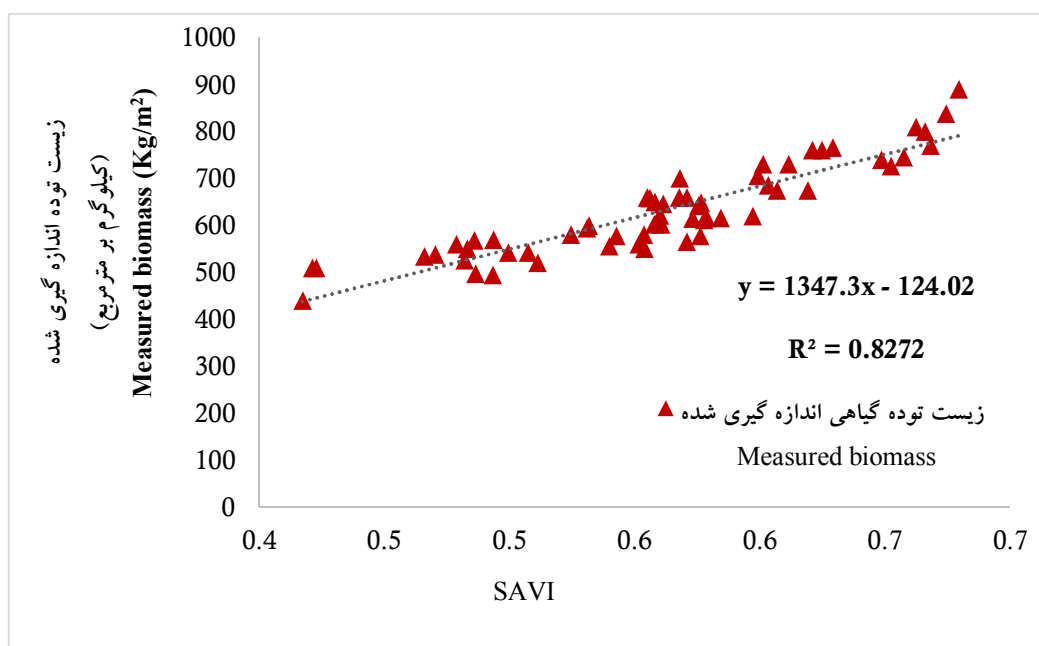
شکل ۲- رابطه رگرسیونی زیست توده اندازه گیری شده گندم و شاخص گیاهی RVI.

Fig. 2. The regression relationship between the measured wheat biomass and RVI plant index.



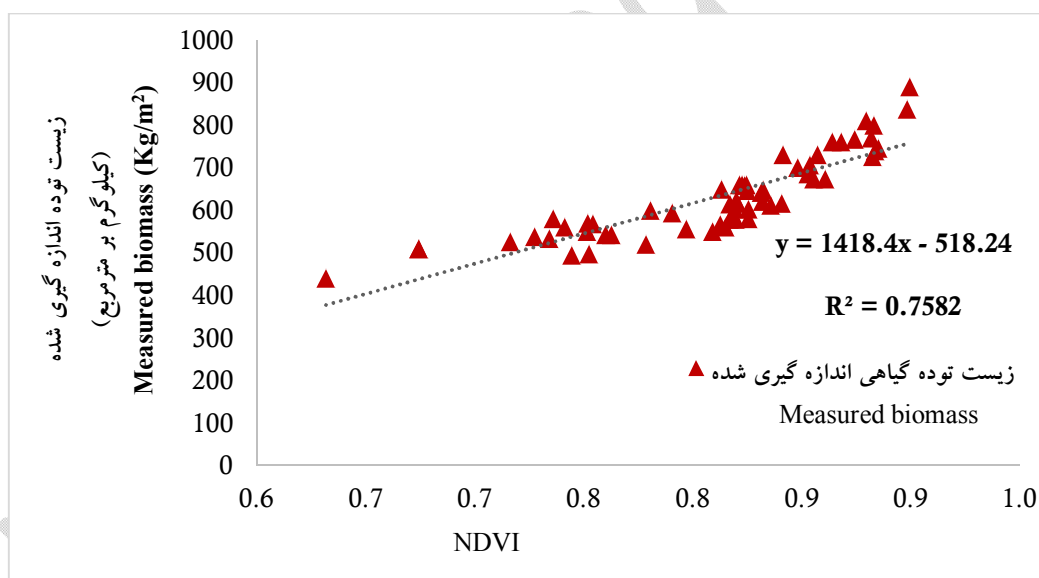
شکل ۳- رابطه رگرسیونی زیست توده اندازه گیری شده گندم و شاخص گیاهی DVI.

Fig. 3. The regression relationship between the measured wheat biomass and DVI plant index.



شکل ۴- رابطه رگرسیونی زیست توده اندازه گیری شده گندم و شاخص گیاهی SAVI.

Fig. 4. The regression relationship between the measured wheat biomass and SAVI plant index.



شکل ۵- زیست توده اندازه گیری شده گندم و شاخص گیاهی NDVI.

Fig. 5. The regression relationship between the measured wheat biomass and NDVI plant index.

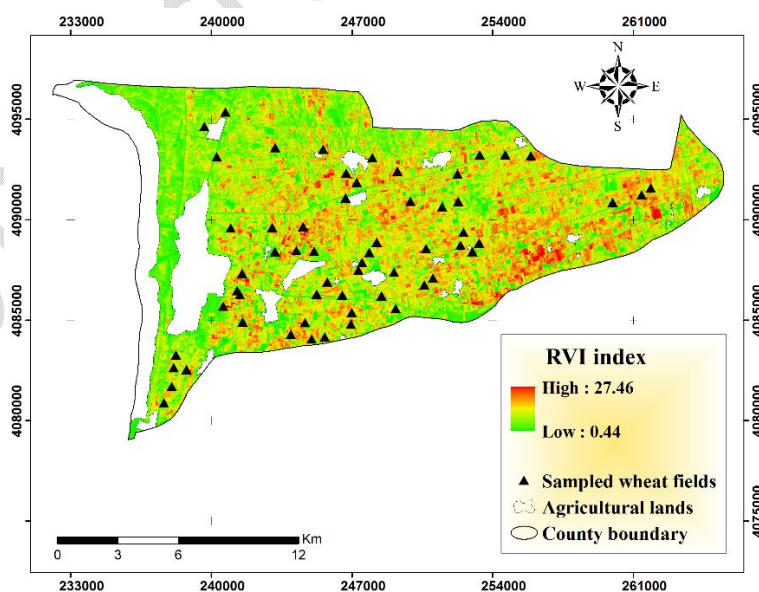
این مناطق می تواند دلیلی بر پوشش گیاهی کم تر در این اراضی و در نتیجه مقدار پایین شاخص RVI در این نقاط باشد (۳۲). این نقشه مقادیر بالاتر این شاخص را در مناطق مرکزی، شرق و جنوب شرقی شهرستان نشان داد. مقادیر بالای این شاخص گویای

نقشه شاخص RVI حاصل از تصاویر ماهواره ای در شکل ۶ نشان داده شده است. بر اساس این شکل، کم ترین میزان این شاخص در اراضی کشاورزی غرب و شمال غربی شهرستان برابر با ۰/۴۴ مشاهده شد. شوری زیاد خاک و بالا بودن سطح ایستابی آب در

آن‌ها، می‌تواند در برآورد زیست‌توده در مزارعی با سطوح بزرگ که نمونه‌برداری‌های زمینی در آن نقاط سخت، زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد، به راحتی مورد استفاده قرار گیرد. در همین راستا سلطانیان و همکاران (۲۰۲۱) در برآورد زیست‌توده گندم زمستانه از مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه، شبکه عصبی مصنوعی و داده‌های سنجنش‌ازدور استفاده کردند. در این آزمایش رابطه رگرسیونی زیست‌توده برآورد شده و اندازه‌گیری شده گندم، با ضریب تبیین 0.78 کیفیت مناسب مدل مبتنی بر دورسنجی را نشان داد (۳۴). در ارزیابی عملکرد گندم با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین مبتنی بر سنجنش‌ازدور ماهواره‌ای و مدل‌های شبیه‌سازی در ماهاراجگانج و اوتار پرادش هند، راستی آزمایی مبتنی بر مزرعه توسط مراج و همکاران (۲۰۲۲) نشان می‌دهد که عملکرد تخمین زده‌شده به‌خوبی با عملکرد مشاهده‌شده همبستگی دارد و چنین دقتی می‌تواند یکی از روش‌های امیدوارکننده برای محاسبه عملکرد کشاورزی کل منطقه باشد (۳۵).

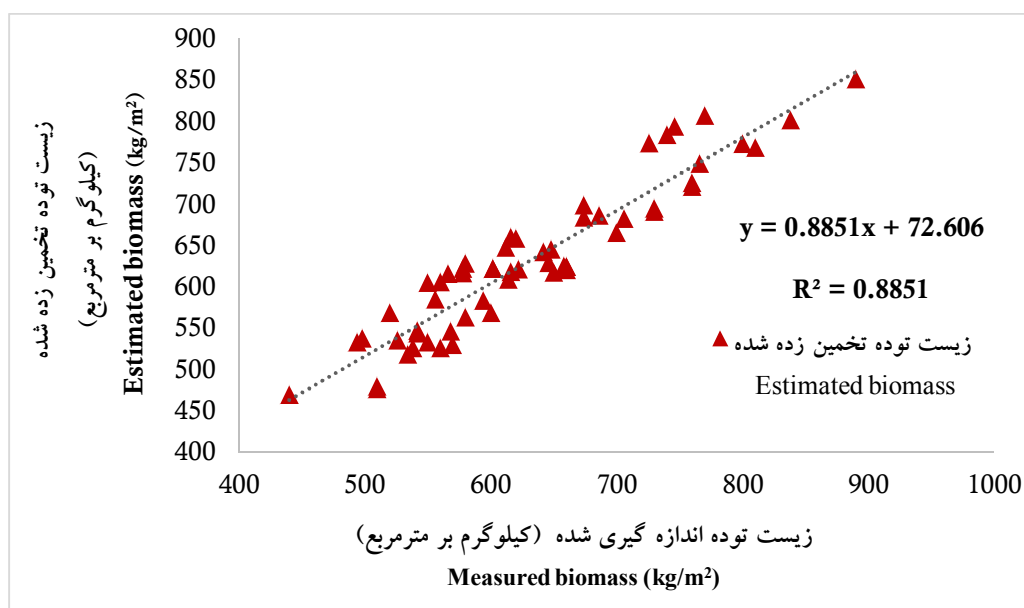
پوشش گیاهی متراکم در این مناطق می‌باشد که می‌توان ناشی از مقادیر بالای درصد کربن و ماده آلی خاک، وفور و توزیع مناسب بارش، مدیریت مطلوب مزرعه، شوری پایین‌تر خاک، تغذیه مناسب خاک و سایر عوامل دیگر برشمرد (۳۲). هم‌چنان که ووآرن و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که شاخص نسبت پوشش گیاهی با زیست‌توده بالا ارتباط بیش‌تری دارد (۳۳).

در ادامه با استفاده از معادله رگرسیون به‌دست آمده از شاخص برتر، میزان زیست‌توده تخمین زده توسط تصاویر ماهواره‌ای برای اراضی موردبررسی، برآورد و محاسبه شد. بررسی ارتباط بین زیست‌توده اندازه‌گیری شده و زیست‌توده تخمین زده‌شده در شکل ۷ نشان داده‌شده است. ضریب تبیین 0.88 در این شکل گویای این واقعیت است که متغیرهای مستقل (زیست‌توده اندازه‌گیری شده) تا حد زیادی توانسته تغییرات متغیر وابسته (زیست‌توده تخمین زده شده) را تبیین کند. این نتایج نشان می‌دهد که از تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های گیاهی حاصل از



شکل ۶- شاخص RVI در کل اراضی کشاورزی شهرستان بندر ترکمن، استان گلستان.

Fig. 6. RVI index in all agricultural lands of Bandar-e-Turkmen county, Golestan province.



شکل ۷- میزان زیست توده اندازه گیری شده و تخمین زده شده در مزارع گندم به وسیله شاخص RVI.

Fig. 7. Measured and estimated biomass in wheat fields by RVI index.

نتیجه گیری

(۰/۸۸۵) و ضریب همبستگی (۰/۹۴۱) نسبت به سایر شاخص‌های دیگر، به عنوان شاخص گیاهی برتر انتخاب شد. با توجه به نتایج این مطالعه، دقت مناسب برآوردها، سهولت روش‌های مورد استفاده و امکان دسترسی به تصاویر ماهواره‌ای به صورت توالی زمانی و مکانی و همچنین هزینه بر بودن و زمان بر بودن کارهای میدانی و آزمایشگاهی که در نهایت به داده‌های گسسته از منطقه منجر می‌شود، پیشنهاد می‌گردد برای مطالعه زیست توده گیاهی و بررسی عملکرد محصولات کشاورزی از روش‌های دورسنجی بهره گرفته شود. جهت یافتن نتایج دقیق‌تر، بهتر است از شاخص‌های گیاهی متنوع و در مراحل مختلف رشدی گیاهان استفاده شود زیرا نتایج مطالعات انجام شده گویای تفاوت شاخص‌های گیاهی برتر در مراحل رشدی گیاهان بوده است. از نتایج این پژوهش می‌توان در برنامه‌ریزی کشاورزی دقیق و مدیریت بهینه کشاورزی مانند پیش‌بینی مراحل رشدی گیاهان، برآورد سطح زیر کشت محصولات، تخمین عملکرد، کمک به افزایش عملکرد واقعی و کاهش خلاء

بررسی سلامت پوشش گیاهی مزارع با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و از طریق شاخص‌های گیاهی، نشان داد که ارزیابی انواع شاخص‌های گیاهی می‌تواند شاخص گیاهی برتری را معرفی نمود که بیشترین همبستگی را با زیست توده اندازه گیری شده از مزارع داشته باشد و از این طریق بتوان میزان زیست توده را در منطقه وسیعی با صرف کمترین وقت و هزینه تخمین و برآورد کرد. این زیست توده تخمین زده شده می‌تواند تا حدود زیادی در بررسی سلامت پوشش گیاهی نقاط مورد بررسی کمک نماید. به این صورت که نقاطی با شرایط بهینه محیطی، خاک و مدیریت می‌تواند مقادیر زیست توده بالایی را تولید نماید و بنابراین مزارع با شاخص گیاهی بالاتر را می‌توان به عنوان نقاط سالم تر معرفی نمود. همچنین با استفاده از فناوری سنجش از دور می‌توان روند رشد گیاهان را بررسی نموده و با رفع به موقع تنش‌ها باعث افزایش عملکرد شد. در این آزمایش شاخص گیاهی RVI به دلیل برخورداری از بالاترین میزان ضریب تبیین

دقت بالایی مورد تأیید قرار گیرد. با مشخص شدن نواحی با محدودیت‌های زراعی و بازدهی کم در مزرعه، به‌منظور مدیریت و اصلاح شرایط محدودکننده رشد، این اطلاعات می‌تواند در اختیار ناظران، کارشناسان و کشاورزان قرار گرفته و متناسب با تجربیات و دانش آن‌ها، مدیریت مزرعه با صرف هزینه و نیروی انسانی کمتر، جهت افزایش محصول تغییر یابد.

عملکرد محصولات و همچنین وضعیت سلامت گیاهان زراعی استفاده کرد. بی‌شک نهادینه کردن این روش‌ها در مقیاس‌های کلان کمک شایانی به برنامه‌ریزان برای تنظیم بازار و واردات احتمالی محصولات می‌کند. از دیگر قابلیت‌های استفاده از این شاخص‌ها، شناسایی نقاطی با محدودیت‌های رشد یا نقاطی با عملکرد پایین به دلایل مختلف محیطی و یا مدیریتی است که با بررسی‌های زمینی می‌تواند با

منابع

1. Baret, F., Guyot, G., & Major, D. J. (1989). TSAVI: a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. Pp: 1355-1358, *The International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (IGARSS). Canada.
2. Cho, M. A. (2007). Hyper-spectral remote sensing of biochemical and biophysical parameters: the derivate red-edge" double-peak feature", a nuisance or an opportunity? PhD Thesis, Wageningen University, the Netherlands, 241p.
3. Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., & Muys, B. (2004). Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *International journal of remote sensing*. 25 (9), 1565-1596. DOI:10.1080/0143116031000101675.
4. Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2014). Remote sensing and image interpretation. John Wiley and Sons. 167p.
5. Rondeaux, G., Steven, M., & Baret, F. (1996). Optimization of soil- adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*. 55 (2), 95-107. DOI:10.1016/0034-4257(95)00186-7.
6. Pordel, F., Ebrahimi, A., & Azizi, Z. (2018). Modeling of green canopy cover of marjan rangelands, Boroujen during growing season using spectral indices of OLI sensor. *Journal of Geomatics Science and Technology*. 7 (4), 191-203. [In Persian with English abstract]
7. Chao, ZH., Liu, N., Zhang, P., Ying, T., & Song, K. (2019). Estimation methods developing with remote sensing information for energy biomass: A comparative review. *Biomass Bioenergy*. 122, 414-425.
8. Zheng, G., Chen, J., & Tian, Q. (2007). Combining remote sensing imagery and forest age inventory. *Journal of Environmental Management*. 85 (3), 616-623. DOI: 10.1016/j.jenvman.2006.07.015.
9. Akbari, M., Karim Zadeh, H. R., Modares, R., & Chakoshi, B. (2007). Assessment and classification of desertification using RS & GIS techniques (case study: the arid region, in the north of Isfahan). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 14 (2), 124-142. [In Persian with English abstract]
10. Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., & Huete, A. R. (1995). A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*. 13 (1), 95-120. DOI:10.1080/02757259509532298.
11. Bao, Y., Gao, W., & Gao, Z. (2009). Estimation of winter wheat biomass based on remote sensing data at various spatial and spectral resolutions. *Frontiers of Earth Science in China*. 3 (1), 118-128. DOI:10.1007/s11707-009-0012-x.
12. Baret, F., & Guyot, G. (1991). Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*. 35 (2-3), 161-173. doi.org/10.1016/0034-4257(91)90009-U.

13. Battude, M., Al Bitar, A., Brut, A., Tallec, T., Huc, M., Cros, J., & Demarez, V. (2017). Modeling water needs and total irrigation depths of maize crop in the south west of France using high spatial and temporal resolution satellite imagery. *Agricultural Water Management*. 189, 123-136. **DOI: 10.1016/j.agwat.2017.04.018.**
14. Elvidge, C. D., & Chen, Z. (1995). Comparison of broad-band and narrowband red and near-infrared vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*. 54 (1), 38-48. **doi.org/10.1016/0034-4257(95)00132-K.**
15. Lefsky, M. A., & Cohen, W. B. (2003). Selection of remotely sensed data. P 13-46, In M. A. Wulder and S. E. Franklin (eds.), *Remote Sensing of Forest Environments: Concepts and Case studies*. Kluwer Academic Publishers, Boston. USA.
16. Farazmand, M., Jafari, R., & Ramezani, N. (2014). Comparison the performance of vegetation indices and spectral mixture analysis for mapping rangeland vegetation cover. *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*. 5 (4), 105-120. [In Persian with English abstract]
17. Zhang, H., Chen, H., & Zhou, G. (2012). The model of wheat yield forecast based on MODIS-NDVI: a case study of Xinxiang. P12, In Proceedings of the ISPRS Annals of the Photogrammetry. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences Congress*. **DOI:10.5194/isprs-annals-I-7-25-2012.**
18. Mohammadi Ahmad Mahmoud, E., Kamkar, B., & Abdi, O. (2015). Comparison of geostatistical- and remote sensing data-based methods in wheat yield predication in some of growing stages (A case study: Nemooneh filed, Golestan province). *Journal of Crop Production*. 8 (2), 51-76. [In Persian with English abstract]
19. Allbed, A., Kumar, L., & Aldakheel, Y. (2014). Assessing soil salinity using soil salinity and vegetation indices derived from IKONOS highspatial resolution imageries: Applications in a date plam dominated region. *Geoderma*. 230-231, 1-8. **DIO: 10.1016/j.geoderma.2014.03.025.**
20. Bakhshandeh, S., Kazemi, H., Soltani, A., & Kamkar, B. (2022). Estimation of carbon sequestration potential in soybean farms using remote sensing plant indices (Case study of Gorgan County, Golestan province). *ournal of Plant Production Research*. 29 (1), 19-37. **DOI: 10.22069/JOPP.2022.18657.2752.**
21. Toscano, P., Castrignanò, A., Di Gennaro, S. F., Vonella, A. V., Ventrella, D., & Matese, A. (2019). A precision agriculture approach for durum wheat yield assessment using remote sensing data and yield mapping. *Agronomy*. 9 (8), 437. **doi.org/10.3390/agronomy9080437.**
22. Xu, Ch., Ding, Y., Zheng, X., Wang, Y., Zhang, R., Zhang, H., Dai, Z., & Xie, Q. (2022). A comprehensive comparison of machine learning and feature selection methods for Maize biomass estimation using Sentinel-1 SAR, Sentinel-2 vegetation indices, and biophysical variables. *Remote Sensing*. 14 (16), 4083. **doi.org/10.3390/rs14164083.**
23. Onesimo, M., Timothy, D., & Omer, G. (2017). Remote sensing of crop health for food security in Africa: potentials and constraints. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 8, 231-239. **DOI: 10.1016/j.rsase.2017.10.004.**
24. Bao, Zh., Shifaw, E., Deng, Ch., Sha, J., Li, X., Hanchiso, T., & Yang, W. (2022). Remote sensing-based assessment of ecosystem health by optimizing vigor-organization-resilience model: A case study in Fuzhou City, China. *Ecological Informatics*. 72, 101889. **DOI: 10.1016/j.ecoinf.2022.101889.**
25. Hunt, M. L., Blackburn, G. A., Carrasco, L., Redhead, J. W., & Rowland, C. S. (2019). High resolution wheat yield mapping using sentinel-2. *Remote Sensing of Environment*. 233, 111410. **DOI: 10.1016/j.rse.2019.111410.**

26. Management of agricultural Jihad of Bandar-e-Turkmen city. (2019). Horticulture and agricultural products. www.ajgol.ir/fa.
27. Cai, G., Du, M., & Liu, Y. (2011). Regional drought monitoring and analyzing using MODIS data - A case study in Yunnan province. In, Berlin, Heidelberg, Computer and Computing Technologies in Agriculture IV. *Springer Berlin Heidelberg*. 345, 243-251. DOI:10.1007/978-3-642-18336-2_29.
28. Gillespie, T. W., Ostermann-Kelm, S., Dong, C., Willis, K. S., Okin, G. S., & MacDonald, G. M. (2018). Monitoring changes of NDVI in protected areas of southern California. *Ecological Indicators*. 88, 485-494. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.01.031.
29. Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 25, 295-309. Doi: 10.1016/0034-4257(88)90106-X.
30. Balasundram, S. K., Memarian, H., & Khosla, R. (2013). Estimating oil palm yields using vegetation indices derived from quickbird. *Life Science Journal*. 10 (4), 851-860. <http://www.lifesciencesite.com>. 109.
31. Panov, D. Yu., & Sakharova, E. Yu. (2022). Using radar data for grain crops yield forecasting in the Novosibirsk region. *Russian Meteorology and Hydrology*. 47, 473-478. DOI:10.3390/pr11030647.
32. Niazmoradi, M., Kazemi, H., Gherekhloo, J., Soltani, A., & Kamkar, B. (2022). Health assessment of wheat agroecosystems (Case of study: Bandar-e-Torkeman county, Golestan province). PhD thesis in Agronomy, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. 155 p. [In Persian with English abstract]
33. Vuorinne, I., Heiskanen, J., & Pellikka, P.K.E. (2021). Assessing leaf biomass of *Agave sisalana* using sentinel-2 vegetation indices. *Remote Sensing*. 13 (2), 233. DOI: 10.3390/rs13020233.
34. Soltanian, M., Naderi khorasgani, M., & Tadayyon, A. (2021). Estimation of above-ground biomass of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) using multiple linear regression, artificial neural network models remote sensing data. *Journal of Crop Production*. 13 (3), 179-196. DIO: 10.22069/EJCP.2021.18102.2343. [In Persian with English abstract]
35. Meraj, G., Kanga, S., Ambadkar, A., Kumar, P., Kumar Singh, S., Farooq, M., Alan Johnson, B., Rai, A., & Sahu, N. (2022). Assessing the yield of wheat using satellite remote sensing-based machine learning algorithms and simulation modeling. *Remote Sensing*. 14, 3005. DOI: 10.3390/rs14133005.