

Spatio-Temporal Dynamics of Vegetation Cover in East Azerbaijan Province, Iran: A 22-Year Analysis Using MODIS Data and Advanced Statistical Models

Farhanaz Khorramabadi¹, Sina Fard Moradinia^{2*}, Mostafa Tahani Yazdeli³, Sayyed Mohammad Hosseini⁴

¹Department of Climatology, Faculty of Geography and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran

²Department of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Ta.C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

³Department of Urban Planning, Faculty of Art and Architecture, University of Guilan, Rasht, Iran.

⁴Department of Climatology, Faculty of Humanities, Sayyed Jamaledin Asadabadi University, Asadabad, Iran.

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 07 February 2026

Revised 30 March 2026

Accepted 09 April 2026

Published online 22 June 2026

Keywords:

Ecological change

NDVI modeling

geospatial statistics

GWR

principal component analysis

ABSTRACT

Objective: Vegetation cover is a critical indicator of regional ecosystem health and a key component of global climate regulation models. In vulnerable mountainous environments, characterized by high sensitivity to climatic and anthropogenic pressures, monitoring vegetation dynamics over time is essential for effective resource management.

Method: This study focuses on the spatio-temporal variations of vegetation cover in East Azerbaijan Province, a crucial mountainous region in northwestern Iran, over a 22-year period (2000–2022). To achieve this objective, statistical and geospatial methods, including the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Kolmogorov–Smirnov test (KST), Geographically Weighted Regression (GWR), and Principal Component Analysis (PCA), were applied to MODIS satellite products.

Result: The findings reveal sustained but unstable vegetation dynamics in the region. The KST indicated that NDVI distributions were non-normal across all months, suggesting considerable ecological instability. Notably, the mean annual rate of NDVI change increased from 0.166% in the first decade (2000–2009) to 0.192% in the second period (2010–2022). The high NDVI variance (36.78%) confirms pronounced spatial heterogeneity across the province. Furthermore, a moderate positive correlation (45%) was observed between precipitation and vegetation cover, highlighting the dominant role of moisture availability. Finally, PCA identified three high-density vegetation groups, collectively explaining 93.49% of the total variance, while the GWR model demonstrated strong predictive capability for localized vegetation changes.

Conclusion: These results provide valuable quantitative evidence of ongoing ecological changes in this important mountainous region and offer essential insights for regional land-use planning and conservation strategies.

*Corresponding author, Email: fardmoradinia@iau.ac.ir

Cite this article: Khorramabadi, F., Fard Moradinia, S., Tahani Yazdeli, M., Hosseini S.M. (2026). Spatio-Temporal Dynamics of Vegetation Cover in East Azerbaijan Province, Iran: A 22-Year Analysis Using MODIS Data and Advanced Statistical Models. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 5(2), 101-124. <https://doi.org/10.22034/nawee.2025.556274.1176>



© The Author(s).

Publisher: Gonbad Kavous University.

DOI: <https://doi.org/10.22034/nawee.2025.556274.1176>

Introduction

Vegetation cover is one of the most important indicators of ecosystem health, playing a critical role in environmental sustainability, climate regulation, soil conservation, and water resource management. The mountainous arid and semi-arid regions of Iran, particularly East Azerbaijan Province, are highly vulnerable to ecological instability due to climate change, decreasing precipitation, rising temperatures, and increasing anthropogenic pressures. The primary objective of this study was to investigate the spatio-temporal dynamics of vegetation cover in East Azerbaijan Province during the 22-year period from 2000 to 2022 using MODIS remote-sensing data and advanced statistical models. The study aimed to assess vegetation trends, ecological stability, the influence of climatic factors, and the spatial patterns governing vegetation distribution across the region.

Materials and Methods

This study utilized MODIS satellite imagery (MOD13Q1 Version 6 product) to derive the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). The study area comprised East Azerbaijan Province in northwestern Iran, characterized by predominantly arid to semi-arid climatic conditions and complex mountainous topography. The dataset included vegetation information, precipitation, temperature, relative humidity, vapor pressure, and other climatic variables. Data processing and analysis were conducted using ArcGIS, MATLAB, and Minitab software. NDVI was calculated based on the ratio between near-infrared and red spectral reflectance bands. To investigate the statistical and spatial structure of the data, the Kolmogorov–Smirnov test (KST) was applied to evaluate data normality. Principal Component Analysis (PCA) was employed to reduce data dimensionality and identify dominant temporal patterns, while Geographically Weighted Regression (GWR) was used to examine spatial relationships among vegetation cover, elevation, and precipitation. In addition, homogeneity tests, including the Pettitt test and Standard Normal Homogeneity Test (SNHT), were conducted to evaluate the temporal stability of the datasets.

Results and Discussion

The results revealed a moderate increasing trend in vegetation cover across East Azerbaijan Province during the study period. The average annual NDVI growth rate increased from 0.166% during 2000–2009 to 0.192% during 2010–2022. Despite this positive trend, statistical analyses indicated considerable ecological instability throughout the region. The Kolmogorov–Smirnov test showed that NDVI values in most months did not follow a normal distribution, highlighting the high sensitivity of vegetation cover to climatic and environmental stressors.

Frequency analysis indicated that approximately 83% of the province was classified as having sparse vegetation cover. Furthermore, the relatively high NDVI variance (approximately 36.78%) confirmed substantial spatial heterogeneity across the study area. NDVI values ranged from -0.076 to 0.62 , reflecting significant environmental variability among different parts of the province.

Analysis of climatic relationships demonstrated that precipitation was the dominant controlling factor of vegetation dynamics, with a positive correlation coefficient of 0.45 between precipitation and NDVI. The GWR model further revealed that both elevation and precipitation exerted significant influences on the spatial distribution of vegetation cover. The model successfully explained local vegetation variability, with a coefficient of determination (R^2) of approximately 0.76 . The northeastern regions of the province, particularly Arasbaran and Kaleybar, exhibited the highest vegetation density, whereas the central and western regions showed lower vegetation cover due to reduced precipitation and increased evapotranspiration.

The PCA results indicated that the first two principal components explained approximately 64.27% of the total variance. Temporal clustering derived from PCA identified three dominant vegetation growth patterns: (1) the peak growing season from June to September, (2) a moderate growth period from January to May, and (3) a dormant vegetation period from October to December. Seasonal vegetation maps revealed that the highest greenness levels occurred during June and July, while a sharp decline in vegetation cover was observed in September, likely associated with reduced precipitation and the onset of drought stress.

Conclusion

The findings of this study demonstrate that although vegetation cover in East Azerbaijan Province has experienced a modest increase over the past two decades, this improvement has been accompanied by substantial ecological instability and pronounced spatial heterogeneity. The strong dependence of vegetation dynamics on precipitation

and elevation highlights the vulnerability of regional ecosystems to climate variability, particularly drought events and declining moisture availability.

The GWR model proved highly effective in simulating local vegetation dynamics and can serve as a valuable tool for environmental planning and natural resource management. The results emphasize the need to shift from centralized management approaches toward region-specific strategies that account for local topographic and climatic characteristics. Furthermore, the conservation of northern forest ecosystems, the promotion of drought-resilient agricultural practices, and the integration of spatial predictive models into environmental policymaking are recommended as key strategies for enhancing ecological sustainability in the region.



تحلیل مکانی-زمانی تغییرات پوشش گیاهی در استان آذربایجان شرقی ایران طی یک دوره ۲۲ ساله با استفاده از داده‌های MODIS و مدل‌های آماری پیشرفته

فرحناز خرم‌آبادی^۱، سینا فرد مرادی نیا^{۲*}، مصطفی تهانی یزدلی^۳، سید محمد حسینی^۴

^۱ گروه آب و هواشناسی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

^۲ گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

^۳ گروه برنامه‌ریزی شهری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

^۴ گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه سید جمال‌الدین اسدآبادی، اسدآباد، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

کلیدواژه‌ها:

تغییرات اکولوژیکی

مدل‌سازی شاخص تفاضل

نرمال‌شده پوشش گیاهی

آمار مکانی-جغرافیایی

مؤلفه‌های اصلی

هدف: پوشش گیاهی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های سلامت اکوسیستم، نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری محیط‌زیست، تنظیم چرخه‌های اقلیمی، حفاظت خاک و مدیریت منابع آب دارد. مناطق کوهستانی خشک و نیمه‌خشک ایران، به‌ویژه استان آذربایجان شرقی، به دلیل حساسیت بالا نسبت به تغییرات اقلیمی، کاهش بارش، افزایش دما و فشارهای انسان‌زاد، در معرض ناپایداری‌های اکولوژیکی قرار دارند.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش از تصاویر ماهواره‌ای (MODIS محصول MOD13Q1 نسخه ۶) برای استخراج شاخص تفاضل نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) استفاده شد. پردازش داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای ArcGIS، MATLAB و Minitab انجام شد. برای تحلیل تغییرات پوشش گیاهی، شاخص NDVI بر اساس نسبت بازتاب باند فرسرخ نزدیک و باند قرمز محاسبه گردید. سپس به‌منظور بررسی ساختار آماری و فضایی داده‌ها، از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (KST) جهت ارزیابی نرمال بودن توزیع داده‌ها، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای کاهش ابعاد داده‌ها و شناسایی الگوهای غالب زمانی، و مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) برای تحلیل روابط مکانی بین پوشش گیاهی، ارتفاع و بارش استفاده شد. همچنین آزمون‌های همگنی نظیر Pettitt و Standard Normal Homogeneity نیز برای ارزیابی پایداری زمانی داده‌ها به کار گرفته شدند.

نتایج و بحث: نتایج پژوهش نشان داد که پوشش گیاهی استان آذربایجان شرقی طی دوره مورد مطالعه دارای روند افزایشی ملایمی بوده است، به‌گونه‌ای که میانگین نرخ تغییرات سالانه NDVI از ۰/۱۶۶ درصد در دوره ۲۰۰۹-۲۰۲۰ به ۰/۱۹۲ درصد در دوره ۲۰۱۰-۲۰۲۲ افزایش یافته است. با وجود این روند مثبت، تحلیل‌های آماری بیانگر ناپایداری قابل توجه اکولوژیکی در منطقه بودند. آزمون کولموگروف-اسمیرنوف نشان داد که توزیع NDVI در اکثر ماه‌ها از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کند و این موضوع بیانگر حساسیت شدید پوشش گیاهی منطقه نسبت به تنش‌های اقلیمی و محیطی است.

تحلیل فراوانی داده‌ها نشان داد که حدود ۸۳ درصد از منطقه در طبقه پوشش گیاهی تنک قرار دارد و واریانس بالای NDVI (حدود ۳۶/۷۸ درصد) وجود ناهمگنی شدید فضایی را در سطح استان تأیید می‌کند. مقادیر NDVI در محدوده‌ای بین ۰/۰۷۶- تا ۰/۶۲ متغیر بوده و این دامنه تغییرات نشان‌دهنده تفاوت زیاد شرایط زیست‌محیطی در مناطق مختلف استان است.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که اگرچه پوشش گیاهی استان آذربایجان شرقی طی دو دهه اخیر روند افزایشی ملایمی را تجربه کرده است، اما این افزایش همراه با ناپایداری اکولوژیکی و ناهمگنی شدید فضایی بوده است.

*نویسنده مسئول: Email: fardmoradinia@iau.ac.ir

استناد: خرم‌آبادی، ف.، فرد مرادی نیا، س.، تهانی یزدلی، م.، حسینی، م. (۱۴۰۵). عنوان مقاله. رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست، ۵ (۲)، ۱۰۱-۱۲۴.

<https://doi.org/10.22034/nawee.2025.556274.1176>

© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه گنبد کاووس.



مقدمه

پوشش گیاهی یکی از مؤلفه‌های اساسی اکوسیستم‌های خشکی به‌شمار می‌رود و نقشی بنیادین در تداوم کارکرد، بهره‌وری و پایداری اکوسیستم‌ها ایفا می‌کند. افزون بر این، پوشش گیاهی با فراهم‌سازی زیستگاه‌های حیاتی برای گروه‌های مختلف گونه‌ها، در حفظ تنوع زیستی نیز نقش کلیدی دارد. با این حال، الگوهای اقلیمی تأثیر زیربنایی و تعیین‌کننده‌ای بر توزیع مکانی پوشش گیاهی در یک منطقه معین دارند (Peng et al, 2012). تغییرات در سلامت و تراکم پوشش گیاهی که ناشی از تغییرات اقلیمی یا دگرگونی‌های کاربری اراضی هستند، می‌توانند پیامدهای قابل‌توجهی برای اکوسیستم‌ها به همراه داشته باشند؛ به‌ویژه در محیط‌های شکننده‌ای مانند مناطق کوهستانی خشک و نیمه‌خشک (میر احسنی و همکاران، ۱۳۹۸). مطالعات نشان می‌دهد که نواحی اقلیمی متنوع، از مناطق خشک تا مرطوب، نوساناتی در پوشش گیاهی را تجربه می‌کنند که این نوسانات به‌طور هم‌زمان تحت تأثیر محرک‌های اقلیمی و اجتماعی-اقتصادی قرار دارند (مقدم، ۱۳۸۸). با این وجود، مناطق خشک و نیمه‌خشک از جمله بخش‌های وسیعی از ایران به‌طور فزاینده‌ای در برابر پیامدهای تغییر اقلیم، تغییرات کاربری اراضی و رخدادهای مکرر خشکسالی آسیب‌پذیر شده‌اند (Zenouzi, 2022). این تنش‌ها می‌توانند به کاهش چشمگیر پوشش گیاهی و بروز پیامدهای نامطلوب اکولوژیکی منجر شوند. به عنوان نمونه، شهرنشینی سریع در کلان‌شهرهایی نظیر تهران موجب از دست رفتن گسترده پوشش سبز شده است. (Zenouzi, 2022)

این پژوهش بر استان آذربایجان شرقی متمرکز است؛ منطقه‌ای کوهستانی در شمال غرب ایران که دارای اقلیمی عمدتاً خشک تا نیمه‌خشک است. این استان که در محل تلاقی راهبردی رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس قرار گرفته، به‌عنوان یک کریدور اکولوژیکی مهم عمل می‌کند و با ریزاقلیم‌های متنوع و توپوگرافی پیچیده شناخته می‌شود. این ویژگی‌های جغرافیایی منحصربه‌فرد، منطقه را به شدت مستعد تخریب محیط‌زیست، به‌ویژه فرسایش خاک، می‌سازد. با وجود ارزش اکولوژیکی بالای این ناحیه، فشارهای فزاینده اقلیمی و انسان‌زاد، پایداری زیستی و هیدرولوژیکی آن را تهدید می‌کند. شاخص تفاضل نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) که از تصاویر ماهواره‌ای استخراج می‌شود، یکی از شاخص‌های تثبیت‌شده برای ارزیابی سلامت و پویایی پوشش گیاهی است. (تمرتاش، 1392, Pettorelli et al, 2005) با توجه به همبستگی قوی NDVI با زی‌توده گیاهی، این شاخص به‌عنوان ابزاری ارزشمند در تحلیل پوشش گیاهی انجام‌شده در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. در دهه‌های اخیر، فناوری سنجنش‌ازدور به‌دلیل توانایی در ارائه داده‌های دقیق، به‌روز و چندزمانه، به ابزاری ضروری برای پایش تغییرات پوشش گیاهی تبدیل شده است (ناطقی، ۱۳۹۶, Harris et al, 2014; Jin et al, 2017). قابلیت بازتولید داده‌ها در کنار قالب دیجیتال آن‌ها، سنجنش‌ازدور را به یکی از ارزشمندترین منابع داده برای کاربردهای مختلف آشکارسازی تغییرات بدل کرده است (Lu et al, 2004). در این میان، تصاویر حاصل از حسگرهای MODIS نصب‌شده بر ماهواره‌های Terra و Aqua از اهمیت ویژه‌ای برای این تحقیق برخوردارند. این حسگرها اطلاعات طیفی جامع، تفکیک‌های مکانی متنوع (۱ کیلومتر، ۵۰۰ متر و ۲۵۰ متر) و تفکیک‌های زمانی بالا (۱۶ روزه و ماهانه) را فراهم می‌کنند که پاسخ‌گوی نیازهای جامعه پژوهشی است. از این‌رو، درک پویایی‌های مکانی-زمانی پوشش گیاهی برای پیش‌بینی و مدیریت پیامدهای تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی بر پوشش گیاهی منطقه‌ای امری حیاتی به‌شمار می‌رود (Campo-Bescós, 2013). این موضوع به‌ویژه در مناطقی با عدم قطعیت بالای بارش اهمیت دارد؛ مناطقی که در آن‌ها پارامترهای فنولوژی پوشش گیاهی نوسانات بین‌ساله قابل‌توجهی نشان می‌دهند (Qader, 2022).

پژوهش‌های مرتبط با آشکارسازی تغییرات پوشش گیاهی تا حد زیادی بر داده‌های سنجنش‌ازدور و شاخص‌های پوشش گیاهی (VIS) متکی هستند. (امیری و یگانه، ۱۳۹۶) با این حال، شاخص‌هایی مانند NDVI بدون محدودیت نیستند. Feng et al, (2021) نشان دادند که اگرچه NDVI روند افزایشی را در حوضه رودخانه هانگژو نشان می‌دهد، اما این شاخص می‌تواند تحت تأثیر عواملی فراتر از تراکم پوشش گیاهی، از جمله شرایط سطح زمین و فعالیت‌های انسان‌زاد قرار گیرد. به‌طور مشابه، Xuefei et al, (2021) همبستگی ضعیفی میان NDVI و بارش در حوضه رودخانه هایپه گزارش کردند که بیانگر محدودیت‌های بالقوه این شاخص در مناطق خشک است. با وجود این، مطالعات متعدد الگوی فصلی تکرارشونده‌ای را در پوشش گیاهی در

مقیاس ماهانه نشان داده‌اند که اغلب با تغییرپذیری بارش هم‌زمان است. در ایران نیز پژوهش‌هایی به بررسی ارتباط میان ویژگی‌های پوشش گیاهی و عوامل محیطی پرداخته‌اند. برای مثال، شکرالهی و همکاران، ۱۳۹۱ رابطه میان پوشش و تراکم پوشش گیاهی و عوامل فیزیوگرافیک را در مراتع بررسی کرده و بر تعامل پیچیده عواملی همچون جهت شیب و پوشش تاج گیاهی تأکید کرده‌اند. صالح پور و همکاران، (۱۳۹۲)، ارتفاع را به‌عنوان عامل اصلی تعیین‌کننده پوشش گیاهی در رشته‌کوه دنا معرفی کردند. همچنین، حسینی و فاطمی نیا، (۱۴۰۰)، شاخص سطح برگ (LAI) را در استان همدان پایش کردند و شریفی، ۱۴۰۱، نیز وجود رابطه‌ای مستقیم و معنادار میان $NDVI$ و بارش را در همین منطقه تأیید نمود و به الگوهای متمایز در سال‌های خشک و تر اشاره کرد. محسنی‌فر، حلفی و پناه‌پور، (۱۴۰۳)، اثر فرسایش هزاردره بر هدررفت عناصر غذایی خاک و خصوصیات خاک در استان خوزستان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که حداقل مواد آلی در خاک حفاظت‌شده، یک درصد و در منطقه فرسایشی ۰/۳۲ درصد است که نشان‌دهنده فرسایش خاک سطحی و از دست رفتن مواد آلی خاک است. سمیعی، سیدیان، فتح آبادی، و جهان‌تغی، (۱۴۰۲)، مدلی جهت محاسبه مقادیر دبی سیلاب با دوره بازگشت معین با استفاده از ویژگی‌های هندسی حوزه آبخیز و با ارائه مدل‌های چند متغیره ارائه کردند. متغیرهای موثر شامل: ضریب گراولوس، درصد مساحت سازندهای نفوذپذیر، شیب حوزه آبخیز، زمان تمرکز، مساحت آبخیز، سرعت جریان، درصد مساحت اراضی با جهت شمال، درصد مساحت اراضی با جهت جنوب، درصد مساحت اراضی مرتعی، درصد مساحت اراضی زراعی، درصد تراکم آبراهه با رتبه ۳، دمای متوسط سالانه و بارندگی حداکثر سالانه می‌باشد. با استفاده از این روابط (مدل‌ها) می‌توان مقادیر دبی حداکثر لحظه‌ای با دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله را در حوزه‌های فاقد آمار در زیر حوزه‌های گرگانرود به دست آورد. کمالی و فراهادی، (۱۴۰۱)، مقایسه روند تغییرات مکانی و زمانی تبخیر و تعرق ذرت در منطقه ماهیدشت با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با منابع علمی موجود (به علت نبودن داده‌های لایسیمیتری) را انجام دادند. نتایج نشان داد که متوسط شاخص $NDVI$ در طول دوره رشد در مزارع مورد مطالعه بین ۰/۴۷ تا ۰/۵۳ بوده که با توجه به منابع در محدوده قابل قبولی قرار دارد. ضریب بازتاب نور (آلبدو) با متوسط ۰/۱۸-۰/۱۷ تغییرات اندکی در بین مزارع منتخب داشت. تغییرات زمانی نتایج نشان دهنده روند افزایشی دمای سطحی، تبخیر و تعرق و شاخص گیاهی $NDVI$ تا اواسط دوره رشد و سپس کاهش این پارامترها می‌باشد.

با وجود این پیشینه پژوهشی، خلأ مهمی در خصوص بررسی پویایی‌های بلندمدت و چنددهه‌ای پوشش گیاهی در مناطق گذار اکولوژیکی پیچیده شمال غرب ایران همچنان وجود دارد. اغلب مطالعات پیشین بر بازه‌های زمانی کوتاه‌تر یا مدل‌های رگرسیونی سراسری متعارف تکیه داشته‌اند و غالباً نایستایی‌های مکانی پاسخ پوشش گیاهی به توپوگرافی و پایداری آماری این روندها در طول زمان را نادیده گرفته‌اند. در نتیجه، کمبود رویکردهای یکپارچه‌ای احساس می‌شود که به‌طور هم‌زمان نرمال‌بودن توزیع، ناهمگنی مکانی و بُعد زمانی تغییرات پوشش گیاهی را در این پهنه کوهستانی شکننده ارزیابی کنند. در راستای پر کردن این خلأ، پژوهش حاضر چارچوبی روش‌شناختی نوین ارائه می‌دهد که ترکیبی از سری زمانی ۲۲ ساله داده‌های $MODIS$ (۲۰۰۰-۲۰۲۲) و تکنیک‌های آماری پیشرفته شامل آزمون کولموگروف اسمیرنوف (KST) برای بررسی پایداری توزیع، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای کاهش ابعاد داده‌ها، و رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) برای مدل‌سازی مکانی را به کار می‌گیرد. هدف اصلی این تحقیق، ارزیابی دقیق پویایی‌های مکانی-زمانی پوشش گیاهی در استان آذربایجان شرقی به‌منظور پشتیبانی از مدیریت محیط‌زیست منطقه‌ای است. بر این اساس، پژوهش حاضر در پی پاسخ‌گویی به پرسش‌های کلیدی زیر است:

الگوها و ناهنجاری‌های مکانی-زمانی پوشش گیاهی در استان آذربایجان شرقی طی دو دهه گذشته چگونه تغییر کرده‌اند؟

آیا پوشش گیاهی در مقیاس‌های ماهانه و سالانه از پایداری آماری و توزیع نرمال برخوردار است؟

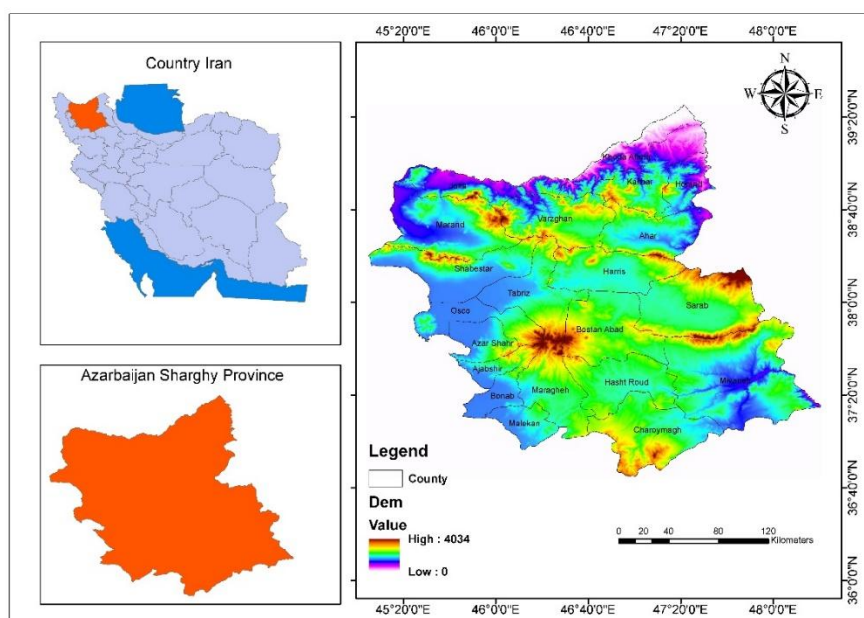
مؤلفه‌های زمانی غالب که واریانس تراکم پوشش گیاهی را تبیین می‌کنند کدام‌اند؟

ارتفاع تا چه اندازه بر توزیع مکانی پوشش گیاهی اثرگذار است و مدل GWR تا چه حد می‌تواند این روابط محلی را در مقایسه با روش‌های سنتی به‌طور مؤثر مدل‌سازی کند؟

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان آذربایجان شرقی در شمال غرب ایران واقع شده است. از نظر جغرافیایی، این استان در بازه طول‌های جغرافیایی ۴۵ درجه و ۰۷ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۲۰ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۲۶ دقیقه شمالی گسترش دارد (پناهی و خرم آبادی، ۱۳۹۸). اقلیم منطقه به‌طور کلی سرد و خشک است، هرچند به دلیل تنوع شرایط توپوگرافی، ویژگی‌های اقلیمی آن در سطح استان دچار تغییرپذیری مکانی می‌شود. استان آذربایجان شرقی بخش‌هایی از چهار حوضه آبریز اصلی شامل ارس، سفیدرود، قزل‌اوزن و دریاچه ارومیه را دربر می‌گیرد. در این میان، حوضه آبریز دریاچه ارومیه گسترده‌ترین سطح را در محدوده استان به خود اختصاص داده است (شکل ۱). این ترکیب از موقعیت جغرافیایی، ناهمواری‌های متنوع و ویژگی‌های اقلیمی سرد و خشک، چارچوبی مناسب برای بررسی فرآیندها و پویایی‌های محیطی، به‌ویژه تحلیل تغییرات مکانی-زمانی پوشش گیاهی، فراهم می‌آورد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

داده‌ها

این پژوهش بر ارزیابی تغییرات تراکم پوشش گیاهی در استان آذربایجان شرقی از طریق طبقه‌بندی داده‌های ماهواره‌ای متمرکز است. بدین منظور، مدل‌های آماری بر روی تصاویر ماهواره‌ای *MODIS* به کار گرفته شده و شاخص پوشش گیاهی طی یک دوره ۲۲ ساله از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ مورد بررسی قرار گرفته است. حسگر *MODIS* که بر روی ماهواره‌های *Terra* و *Aqua* نصب شده است، داده‌ها را در ۳۶ باند طیفی جمع‌آوری می‌کند. میدان دید وسیع، دامنه طیفی گسترده، تعداد زیاد باندها، پوشش زمانی مناسب و تفکیک مکانی قابل قبول، این حسگر را به گزینه‌ای ایده‌آل برای اهداف این پژوهش تبدیل کرده است (*Afifi*, 2016). این تحقیق با رویکردی توصیفی-تحلیلی انجام شده و از نرم‌افزارهای *ArcGIS*، *Minitab* و *MATLAB* برای پردازش و تحلیل داده‌ها استفاده شده است. پوشش گیاهی و وضعیت سلامت آن نمایانگر شرایط اقلیمی هر منطقه است. دسترسی به موقع به داده‌های میدانی برای پایش پوشش گیاهی در مقیاس‌های جهانی و منطقه‌ای، اغلب با محدودیت‌ها و چالش‌های متعددی همراه است. از این رو، سنجش‌ازدور با فراهم‌سازی دیدی جامع از منطقه، به عنوان روشی کارآمد و برتر نسبت

به سایر رویکردها شناخته می‌شود. بر این اساس، در این مطالعه از دو مجموعه داده برای تحلیل تغییرات زمانی و مکانی پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. مجموعه داده نخست شامل متغیرهای اقلیمی است که جزئیات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. مجموعه داده دوم مربوط به محصول *MODIS Q1* نسخه ۶ است که مقدار شاخص پوشش گیاهی (*VI*) را برای هر پیکسل فراهم می‌کند. در این تحقیق، دو لایه اصلی پوشش گیاهی مورد استفاده قرار گرفته است. لایه نخست شامل شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (*NDVI*) است که به عنوان شاخص پیوسته و سازگار با *NDVI* استخراج شده از حسگر رادیومتر با قدرت تفکیک بسیار بالا (*AVHR*) سازمان ملی اقیانوسی و جوی ایالات متحده آمریکا (*NOAA*) شناخته می‌شود.

جدول ۱- مشخصات پارامترهای اقلیمی مطالعه شده

ردیف	پارامتر اقلیمی	مخفف
۱	حداقل دمای بیشینه روزانه	<i>tmin_min</i>
۲	حداکثر دمای بیشینه روزانه	<i>tmax_max</i>
۳	فشار ایستگاهی	<i>p0m_m</i>
۴	میانگین رطوبت نسبی	<i>Umm</i>
۵	میانگین حداقل رطوبت نسبی	<i>umin_m</i>
۶	میانگین حداکثر رطوبت نسبی	<i>umax_m</i>
۷	میانگین کل پوشش ابری (ابریت)	<i>nm_m -</i>
۸	فشار بخار آب	<i>Ewm</i>
۹	بارش ۲۴ ساعته	<i>rrr24</i>

شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (*NDVI*)

شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (*NDVI*) یکی از شاخص‌های تثبیت شده، ساده و کاربردی برای سنجش سلامت گیاهان به شمار می‌رود. این شاخص به سادگی محاسبه می‌شود و در مقایسه با سایر شاخص‌ها، حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات پوشش گیاهی دارد. *NDVI* نسبت به شرایط جوی و ویژگی‌های خاک، به جز در نواحی با پوشش گیاهی بسیار اندک، تأثیرپذیری کمتری نشان می‌دهد. این شاخص مطابق با معادله (۱) محاسبه می‌شود: (*Kogan, 1993*)

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

در این معادله، *NIR* نشان دهنده بازتابندگی در باند فروسرخ نزدیک و *RED* بیانگر بازتابندگی در باند قرمز است. از نظر تئوریک، مقادیر *NDVI* در بازه -۱ تا +۱ قرار می‌گیرند، هرچند در عمل مقادیر به دست آمده در محدوده‌ای محدودتر واقع می‌شوند. پوشش‌های گیاهی متراکم معمولاً مقادیر *NDVI* نزدیک به ۱ دارند، در حالی که ابرها، برف و پهنه‌های آبی دارای مقادیر منفی هستند. سنگ‌های برهنه و خاک‌هایی که پاسخ طیفی مشابهی در هر دو باند دارند، مقادیری نزدیک به صفر نشان می‌دهند. خاک عادی عملاً به عنوان خط پایه عمل می‌کند؛ به گونه‌ای که اگر مقدار *NDVI* یک پیکسل از مقدار مربوط به خاک برهنه بیشتر باشد، نشان دهنده وجود پوشش گیاهی است. (*Allison, 1989*) در این پژوهش، *NDVI* با استفاده از معادله (۱)

بر روی تصاویر پیش پردازش شده محاسبه شد. در ماههایی که بیش از یک تصویر در دسترس بود، میانگین ماهانه $NDVI$ محاسبه و مورد استفاده قرار گرفت.

تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) یک روش ریاضی است که داده‌ها را به یک دستگاه مختصات جدید تبدیل می‌کند؛ به گونه‌ای که بیشترین واریانس داده‌ها در راستای محور اول و سپس محورهای بعدی بیشینه می‌شود. PCA. ابزاری کارآمد برای کاهش ابعاد داده‌هاست و مطابق با معادله (۲) بیان می‌شود: (Ting and Bishab, 1999)

$$YT = XTW = V\Sigma \quad (2)$$

در این رابطه، $V\Sigma W^T$ بیانگر تجزیه مقادیر منفرد (SVD) ماتریس XT است. هدف اصلی PCA تبدیل مجموعه داده با ابعاد بالا X به مجموعه داده‌ای با ابعاد کمتر Y است. ماتریس داده X شامل N بردار $(X1, X2, \dots, XN)$ است که هر یک دارای M بعد بوده و در مجموع یک ماتریس $M \times N$ را تشکیل می‌دهند. میانگین مجموعه داده‌ها به صورت یک بردار و مطابق با معادله (۳) محاسبه می‌شود: (Vidal and Sastri, 2005).

$$u[m] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X[m, i] \quad (3)$$

سپس، ماتریس فاصله از میانگین طبق معادله (۴) به دست می‌آید:

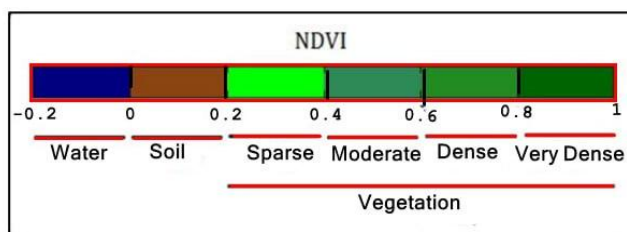
$$B = X - uh \quad (4)$$

که در آن h یک بردار $I \times N$ با مقدار ۱ در تمامی درایه‌ها است. در گام بعد، ماتریس کوواریانس C با ابعاد $M \times M$ محاسبه می‌شود. مقادیر ویژه و بردارهای ویژه ماتریس کوواریانس C نیز بر اساس معادله (۵) استخراج می‌گردند (Weidman, 1999; Kargupta et al, 2001)

$$V-ICV=D \quad (5)$$

در این معادله، V ماتریس بردارهای ویژه و D ماتریس قطری شامل مقادیر ویژه است. هر مقدار ویژه متناظر با یک بردار ویژه مشخص است. ماتریس V یک ماتریس $M \times M$ است که هر ستون آن یک بردار ویژه را نمایش می‌دهد؛ بردار ویژه Vq در ستون q ام قرار دارد و مقدار ویژه متناظر با آن λq درایه قطری q ام ماتریس D است.

شکل ۲ مقادیر $NDVI$ تعریف شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. بر اساس این تعریف، مقادیر $NDVI$ در بازه ۰/۸ تا ۱ نشان‌دهنده پوشش گیاهی بسیار متراکم، مقادیر بین ۰/۶ تا ۰/۸ بیانگر پوشش گیاهی متراکم، مقادیر بین ۰/۴ تا ۰/۶ نشان‌دهنده پوشش گیاهی متوسط، مقادیر بین ۰/۲ تا ۰/۴ معرف پوشش گیاهی تنک و مقادیر بین ۰ تا ۰/۲ بیانگر پوشش گیاهی ضعیف و خاک زمینه هستند. شایان ذکر است که مقدار ۰/۱ نمایانگر خاک زمینه بوده و مقادیر بین ۰/۱ تا ۰/۲ نیز می‌توانند نشان‌دهنده مراتع و اراضی بوته‌زار باشند که در این مطالعه در زمره خاک در نظر گرفته شده‌اند. مقادیر کمتر از صفر به عنوان پهنه‌های آبی شناسایی می‌شوند که می‌توانند شامل دریاچه‌ها، تالاب‌ها، مخازن آبی، برف و حتی یخ‌های کوهستانی (در فصل سرد) باشند. به‌طور کلی، در این پژوهش مقادیر $NDVI$ بزرگ‌تر از ۰/۲ به عنوان پوشش گیاهی در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۲- مقادیر تعریف شده در این پژوهش. (Expectation and Absolute Sufficiency, 2018)

آزمون‌های همگنی

در پژوهش حاضر، مطابق با آنچه در جدول ۲ ارائه شده است، از سه آزمون همگنی داده‌ها استفاده شد.

جدول ۲- مشخصات آزمون‌های همگنی مورد استفاده

نویسنده	فرضیه صفر	نوع	تست
پتیت (۱۹۷۹)	$H_0: \alpha < 0.05$	غیر پارامتریک	همگنی پتی (آزمون پتی)
کولموگروف و اسمیرنوف (۱۹۴۰)	$H_0: \alpha < 0.05$	غیر پارامتریک	کولموگروف-اسمیرنوف
الکساندرسون و موبیرگ (۱۹۹۷)	$H_0: \alpha < 0.05$	پارامتریک	همگنی نرمال استاندارد

آزمون همگنی پتیت (Pettitt Homogeneity Test)

آزمون پتیت یک آزمون ناپارامتری است که برای سری‌های زمانی، نیازمند فرض نرمال بودن داده‌ها نیست. این آزمون بر اساس فرضیه صفر عمل می‌کند که مطابق آن، مقادیر موجود در سری زمانی مستقل و همگن هستند. در مقابل، چنانچه در میانگین سری زمانی یک شکست یا ناپیوستگی مشاهده شود، فرضیه مقابل مبنی بر ناهمگنی پذیرفته می‌شود. مشابه آزمون بوشاند (Buishand)، آزمون پتیت در شناسایی ناهمگنی‌ها در بخش‌های میانی سری زمانی کارایی بیشتری دارد و از معدود آزمون‌هایی است که زمان وقوع ناهمگنی را نیز گزارش می‌کند.

آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (Kolmogorov-Smirnov Test)

آزمون کولموگروف-اسمیرنوف برای بررسی انطباق توزیع یک نمونه با یک توزیع آماری مشخص به کار می‌رود. این آزمون حداکثر اختلاف بین فراوانی‌های مورد انتظار و فراوانی‌های مشاهده‌شده را در دسته‌های مختلف محاسبه می‌کند، همان‌گونه که در معادله (۶) نشان داده شده است.

$$D = \max |F(X) - F^{\wedge}(X)| \quad (6)$$

در این معادله، F نشان‌دهنده فراوانی نسبی تجمعی مشاهده‌شده و $F^{\wedge}$ بیانگر فراوانی نسبی تجمعی مورد انتظار است. آزمون کولموگروف-اسمیرنوف بر بیشینه فاصله عمودی میان تابع توزیع تجربی (EDF)؛ *Empirical Distribution Function* و تابع توزیع تجمعی نظری *Cumulative Distribution Function* (CDF) تمرکز دارد به‌گونه‌ای که در چارچوب فرضیه صفر، توزیع نظری به‌طور مشخص توزیع نرمال در نظر گرفته می‌شود. برای اجرای این آزمون، مقادیر نمونه ابتدا مرتب‌سازی شده و سپس مطابق با معادله (۷) تعریف می‌شوند.

$$\left. \begin{aligned} D^+ &= \max_{i=1, \dots, n} \left[\frac{i}{n} - P_{(i)} \right] \\ D^- &= \max_{i=1, \dots, N} \left[P_{(i)} - \frac{(i-1)}{n} \right] \end{aligned} \right\} S. t \ p_{(i)} = \varphi \left(\frac{x_{(i)} - \bar{x}}{\sigma} \right) \quad (7)$$

$$D = \max(D^+, D^-)$$

در این آزمون، نمادهای D^+ و D^- به ترتیب بیانگر بزرگ‌ترین فاصله عمودی زیر و بالای منحنی تابع توزیع تجمعی نرمال هستند. آماره آزمون کولموگروف اسمیرنوف با نماد D نمایش داده می‌شود. فرضیه صفر (نرمال بودن داده‌ها) زمانی رد می‌شود که مقدار آماره D از یک مقدار بحرانی مشخص فراتر رود. این مقادیر بحرانی در جداول آماری استاندارد ارائه شده‌اند.

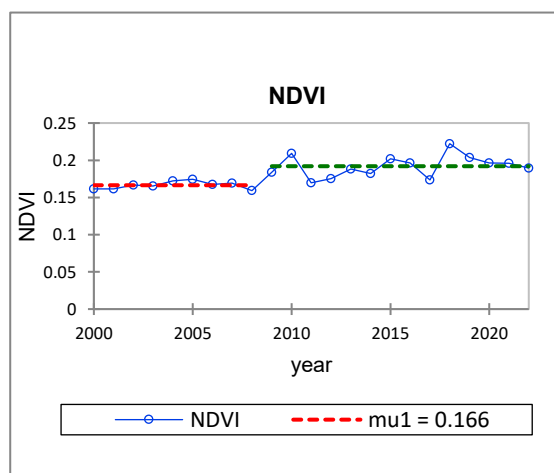
$$D^* = D(\sqrt{n} - 0.01 + 0.85/\sqrt{n}) \quad (۸)$$

مقادیر بحرانی آزمون کولموگروف-اسمیرنوف برای سطوح معناداری ۰/۱، ۰/۰۵ و ۰/۰۱ به ترتیب برابر با ۰/۸۱۹، ۰/۸۹۵ و ۱/۰۳۵ هستند. این آزمون تنها در حالتی مناسب است که توزیع فرضیه آزمون به‌طور کامل مشخص شده باشد؛ به این معنا که هیچ پارامتری از نمونه نیاز به برآورد نداشته باشد. در سایر شرایط، این آزمون ماهیتی محافظه‌کارانه دارد.

۳. نتایج

۳/۱. تغییرات زمانی پوشش گیاهی

تحلیل سری‌های زمانی پوشش گیاهی در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ نشان‌دهنده وجود روندهای متمایز در دو زیردوره زمانی است. همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، میانگین تغییرات $NDVI$ در دوره نخست (۲۰۰۹-۲۰۰۰) برابر با ۰/۱۶۶٪ بوده است. در دوره دوم (۲۰۲۲-۲۰۰۹)، این مقدار به ۰/۱۹۲٪ افزایش یافته است. مقایسه میانگین‌ها (μ_2 و μ_1) بیانگر وجود یک روند افزایشی کلی در پوشش گیاهی منطقه آذربایجان شرقی طی دوره دوم است.



شکل ۳- روند تغییرات میانگین پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه

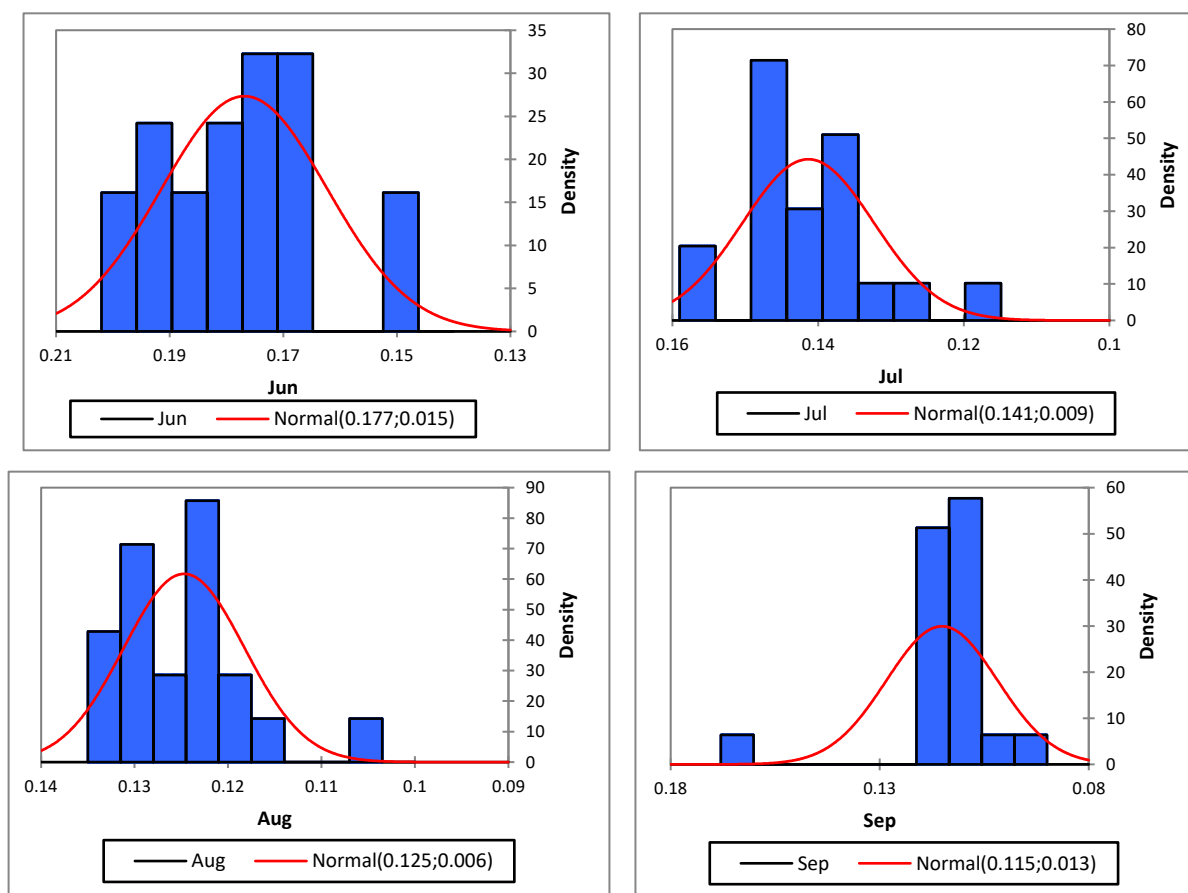
۳/۲. توزیع آماری و همبستگی مکانی

جدول ۳- ماتریس مقادیر ضریب همبستگی تراکم حدی پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه

ماتریس	Jun	Jul	Aug	Sep
Jun	1	0.905	0.824	0.463
Jul	0.905	1	0.896	0.214
Aug	0.824	0.896	1	0.495
Sep	0.463	0.214	0.495	1

جدول ۴- مقادیر آماری آزمون کولموگروف-اسمیرنوف مربوط به تراکم حدی پوشش گیاهی در استان آذربایجان شرقی

ماه	P-Value	K	متوسط	شیب تغییرات	فرضیه پذیرفته شده
Jun	0.844	0.130	0.177	0.015	H1
Jul	0.593	0.165	0.141	0.00	H1
Aug	0.652	0.157	0.125	0.00	H1
Sep	0.036	0.307	0.115	0.01	H0



شکل ۴- تابع توزیع تجربی آزمون کولموگروف-اسمیرنوف برازش شده بر بیشترین تراکم پوشش گیاهی در استان آذربایجان شرقی

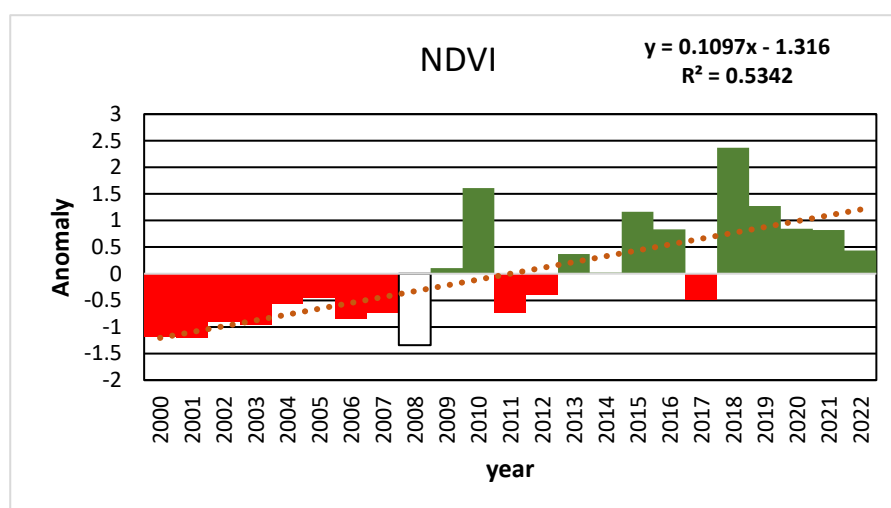
۳/۳. توزیع فراوانی و ناهنجاری‌ها

توزیع فراوانی پوشش گیاهی ($NDVI$) در جدول ۵ و شکل ۷ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین فراوانی (۸۳٪) به طبقه پنجم ($NDVI$ برابر با ۰/۱۶۰ تا ۰/۲۰۱) تعلق دارد که بیانگر پوشش گیاهی تنک است. توزیع مشاهده شده با توزیع نظری مورد انتظار تفاوت دارد که این موضوع با مقادیر آزمون کای دو (χ^2) ارائه شده در جدول ۵ تأیید می‌شود.

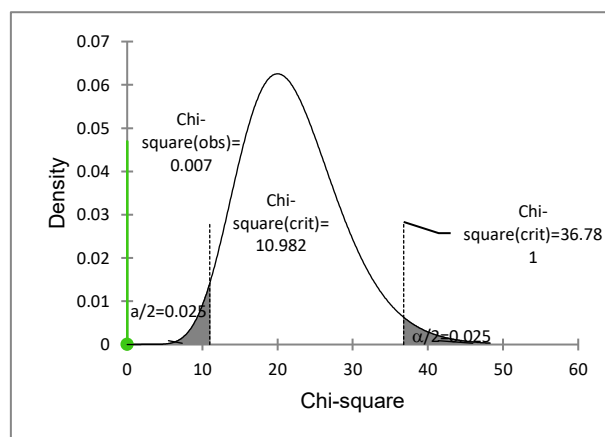
علاوه بر این، نمودار ناهنجاری‌ها (شکل ۵) و توزیع احتمالی ناهنجاری‌ها (شکل ۶) واریانس بالای شاخص $NDVI$ (۳۶/۷۸٪) را نشان می‌دهند؛ به گونه‌ای که مقادیر $NDVI$ در سطح استان در بازه‌ای از ۰/۰۷۶ تا ۰/۶۲ تغییر می‌کند.

جدول ۵- توزیع فراوانی درصد پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه

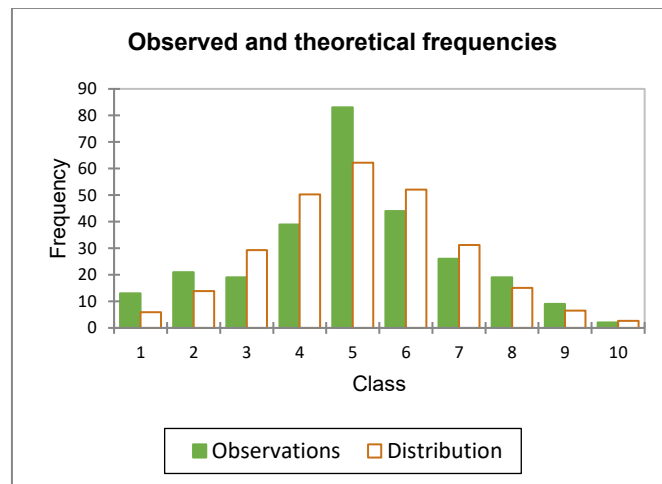
کلاس	کمران پایین	کمران بالا	فراوانی (داده‌ها)	فراوانی (توزیع)	Chi-square
1	-0.001	0.039	13	5.967	8.289
2	0.039	0.080	21	13.899	3.627
3	0.080	0.120	19	29.249	3.591
4	0.120	0.160	39	50.242	2.515
5	0.160	0.201	83	62.242	6.923
6	0.201	0.241	44	52.140	1.271
7	0.241	0.281	26	31.172	0.858
8	0.281	0.321	19	15.031	1.048
9	0.321	0.362	9	6.497	0.965
10	0.362	0.402	2	2.674	0.170



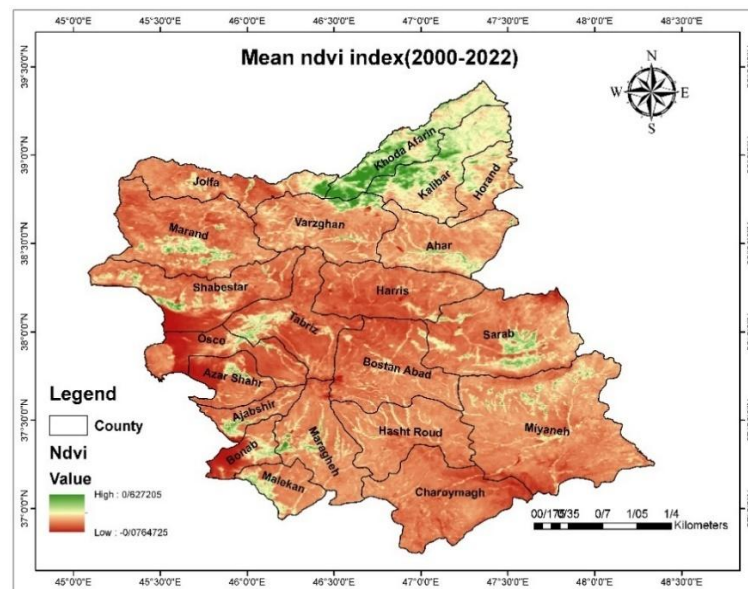
شکل ۵- نمودار ناهنجاری توزیع پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه



شکل ۶- نمودار توزیع احتمال ناهنجاری پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه



شکل ۷- مقایسه توزیع فراوانی مشاهده شده و نظری پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه



شکل ۸- میانگین شاخص پوشش گیاهی استان آذربایجان شرقی در دوره زمانی مطالعه

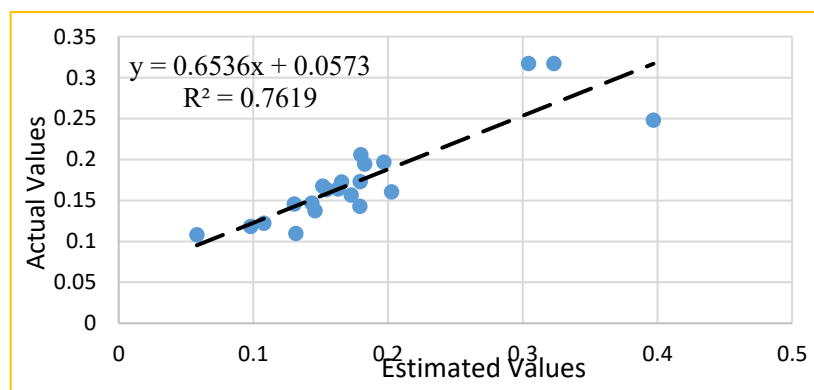
۴-۳- رابطه بین پوشش گیاهی، ارتفاع و بارش

رابطه بین ارتفاع و شاخص $NDVI$ با استفاده از تحلیل رگرسیون ماهانه بررسی شد (جدول ۶). ضریب تعیین (R^2) در میانه فصل رشد بیشترین مقدار را نشان داد (ژوئن: ۰/۷۰؛ ژوئیه: ۰/۶۵؛ اوت: ۰/۷۰)، در حالی که کمترین مقادیر مربوط به ماه‌های زمستانی بود.

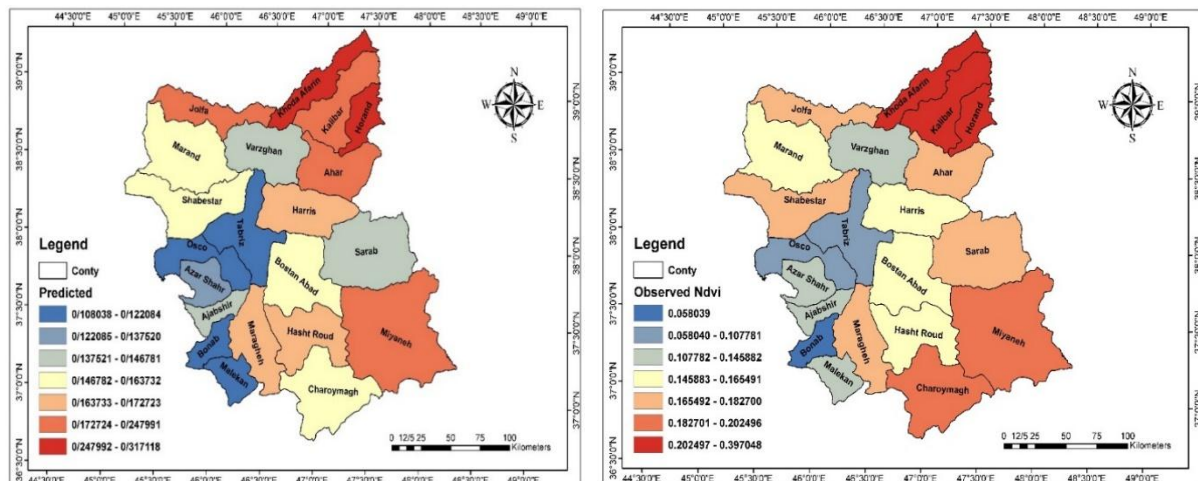
علاوه بر این، مدل رگرسیون وزن دار جغرافیایی (GWR) (شکل ۹) رابطه‌ای قوی میان بارش و پوشش گیاهی سالانه را نشان داد؛ به گونه‌ای که مقدار ضریب تعیین به ۷۶٪ رسید. خروجی مکانی مدل GWR (اشکال ۱۰ و ۱۱) بیشترین مقادیر برآورد شده پوشش گیاهی را در شهرستان‌های شمال شرقی استان (خداآفرین و کلیبر) و کمترین مقادیر را در نواحی غربی (تبریز و بناب) شناسایی می‌کند.

جدول ۶- روابط رگرسیونی ماهانه بین ارتفاع و شاخص NDVI در استان آذربایجان شرقی

مدل رگرسیون	همبستگی	R-squared	ماه
0.0628 NDVI - 0.000019×(High)	0.23	0.13	January
0.0628 NDVI - 0.000019×(High)	0.11	0.33	February
0.0628 NDVI - 0.000019×(High)	0.55	0.63	March
0.0628 NDVI - 0.000019×(High)	0.47	0.51	April
0.0628 NDVI - 0.000019×(High)	0.58	0.63	May
0.0628 NDVI - 0.000019×(High)	0.50	0.70	June
0.0628 NDVI - 0.000019×(High)	0.78	0.65	July
0.0628 NDVI - 0.000019×(High)	0.68	0.70	August
0.0628 NDVI - 0.000019×(High)	0.48	0.33	September
0.0628 NDVI - 0.000019×(High)	0.24	0.11	October
0.0628 NDVI - 0.000019×(High)	0.33	0.28	November
0.0628 NDVI - 0.000019×(High)	0.18	0.13	December



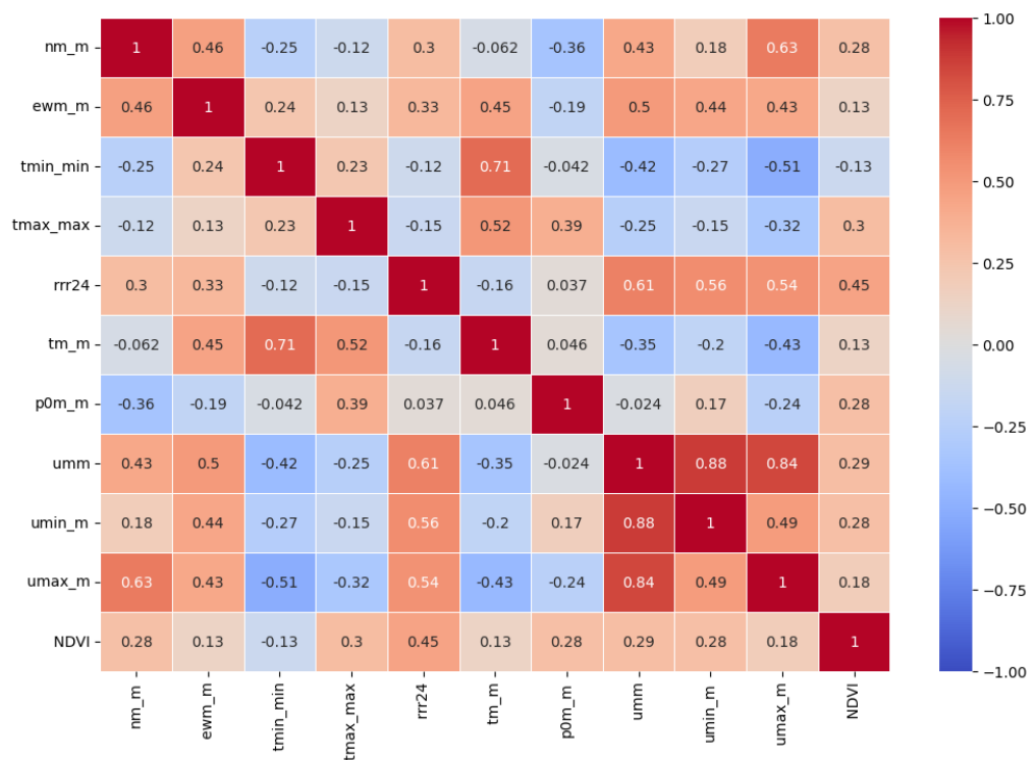
شکل ۹- نمودار پراکنش مقادیر واقعی و برآوردشده پوشش گیاهی سالانه در مدل رگرسیون وزن دار جغرافیایی (GWR)



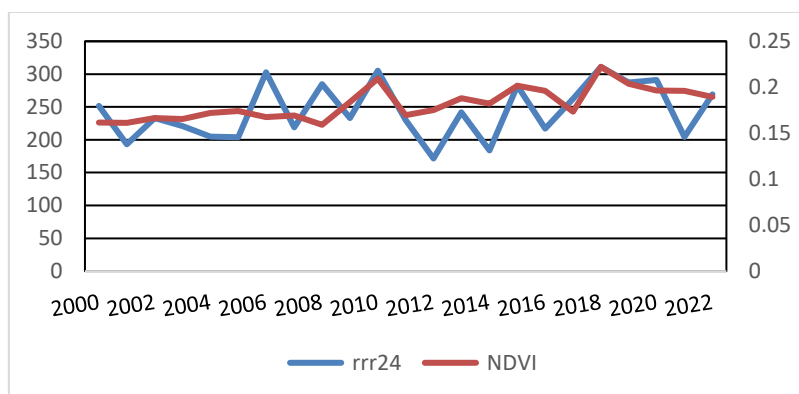
شکل ۱۰- پوشش گیاهی مشاهده شده (واقعی) بر اساس روش رگرسیون وزن دار جغرافیایی (GWR)

شکل ۱۱- پوشش گیاهی برآورد شده با استفاده از روش رگرسیون وزن دار جغرافیایی (GWR)

مقایسه بصری میان مقادیر مشاهده شده (شکل ۱۰) و مقادیر برآورد شده توسط مدل رگرسیون وزن دار جغرافیایی (GWR) (شکل ۱۱) نشان دهنده درجه بالایی از همخوانی مکانی است. مدل GWR الگوهای توزیع پوشش گیاهی را با موفقیت شبیه سازی کرده و توانسته است هم نواحی شمالی با پوشش گیاهی متراکم و هم مناطق مرکزی با پوشش گیاهی تنک را به دقت بازنمایی کند. این همخوانی بصری، همراه با مقدار بالای ضریب تعیین ($R^2 = 0.76$ در نمودار پراکنش)، تأیید می کند که ارتفاع و بارش عوامل اصلی کنترل کننده تغییرات مکانی پوشش گیاهی در سراسر منطقه مورد مطالعه هستند.



شکل ۱۲- ماتریس همبستگی بین متغیرهای اقلیمی و شاخص پوشش گیاهی (NDVI) در منطقه مورد مطالعه.



شکل ۱۳- تغییرات پوشش گیاهی تحت تأثیر نوسانات بارش در منطقه مورد مطالعه

۳/۵. تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

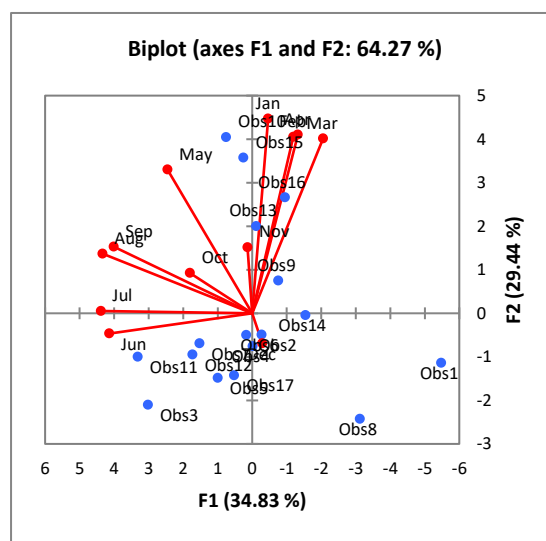
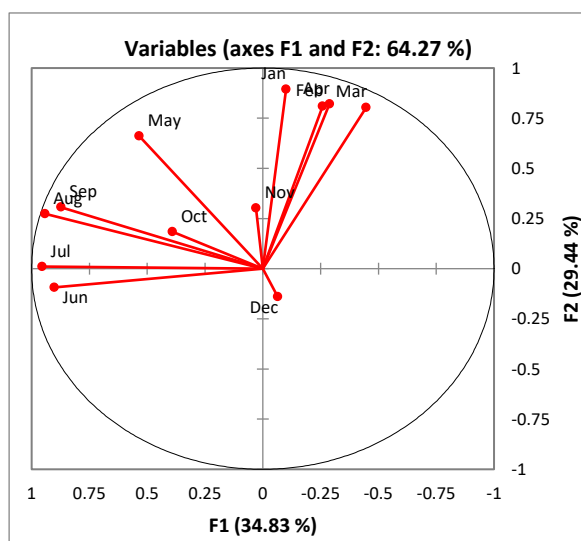
نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) (جدول ۷) داده‌های شاخص پوشش گیاهی را به چهار مؤلفه اصلی کاهش داد. دو مؤلفه نخست در مجموع ۶۴/۲۷٪ از واریانس کل داده‌ها را تبیین می‌کنند. ماتریس بارهای عاملی (جدول ۸) و نمودار PCA (شکل ۱۴) ماه‌های سال را در قالب سه خوشه متمایز طبقه‌بندی می‌کنند: تراکم بالا (ژوئن تا سپتامبر)، تراکم متوسط (ژانویه تا مه) و تراکم پایین (اکتبر تا دسامبر).

جدول ۷- توزیع مکانی ضرایب همبستگی میان مؤلفه‌های اصلی

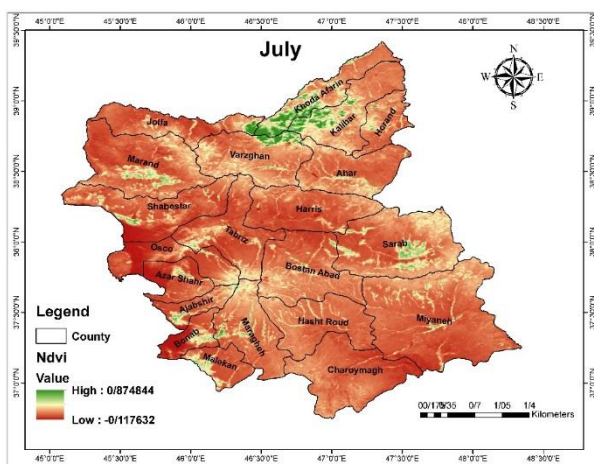
آمار	F1	F2	F3	F4
مقدار ویژه	4.18	3.53	2.07	0.78
درصد واریانس	34.83	29.44	17.26	6.52
درصد تجمعی	34.83	64.27	81.53	88.05

جدول ۸- توزیع درجه همبستگی در مؤلفه‌های مورد نظر

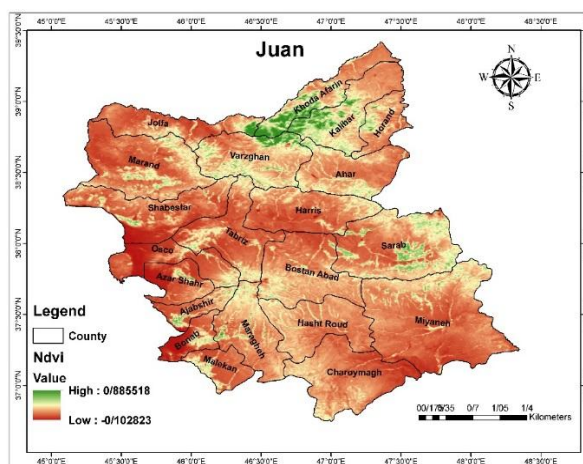
Month	F1	F2	F3
Jan	0.01	0.80	0.02
Feb	0.07	0.66	0.09
Mar	0.20	0.64	0.00
Apr	0.08	0.67	0.02
May	0.29	0.44	0.02
Jun	0.81	0.01	0.12
Jul	0.91	0.00	0.05
Aug	0.89	0.07	0.00
Sep	0.76	0.09	0.10
Oct	0.15	0.03	0.56
Nov	0.00	0.09	0.55
Dec	0.00	0.02	0.55



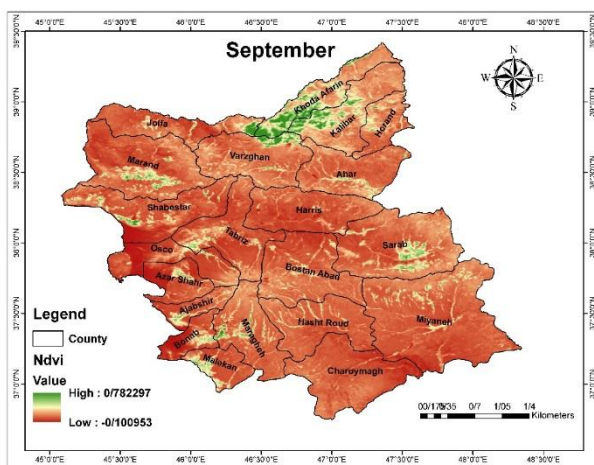
شکل ۱۴- نمودار ساختار عاملی توزیع ماهانه پوشش گیاهی بر اساس روش تحلیل عاملی



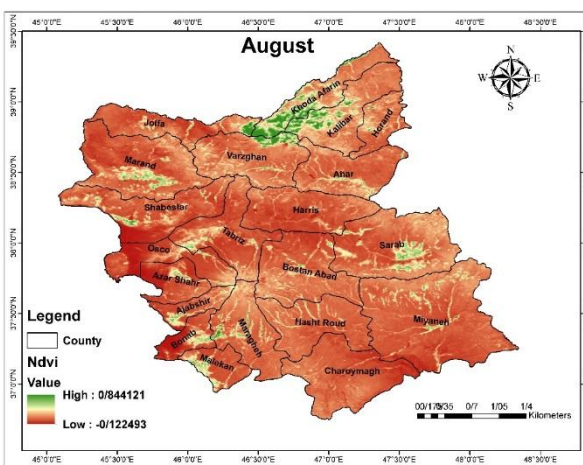
شکل ۱۶- میانگین شاخص پوشش گیاهی در ماه ژوئیه



شکل ۱۵- میانگین شاخص پوشش گیاهی در ماه ژوئن

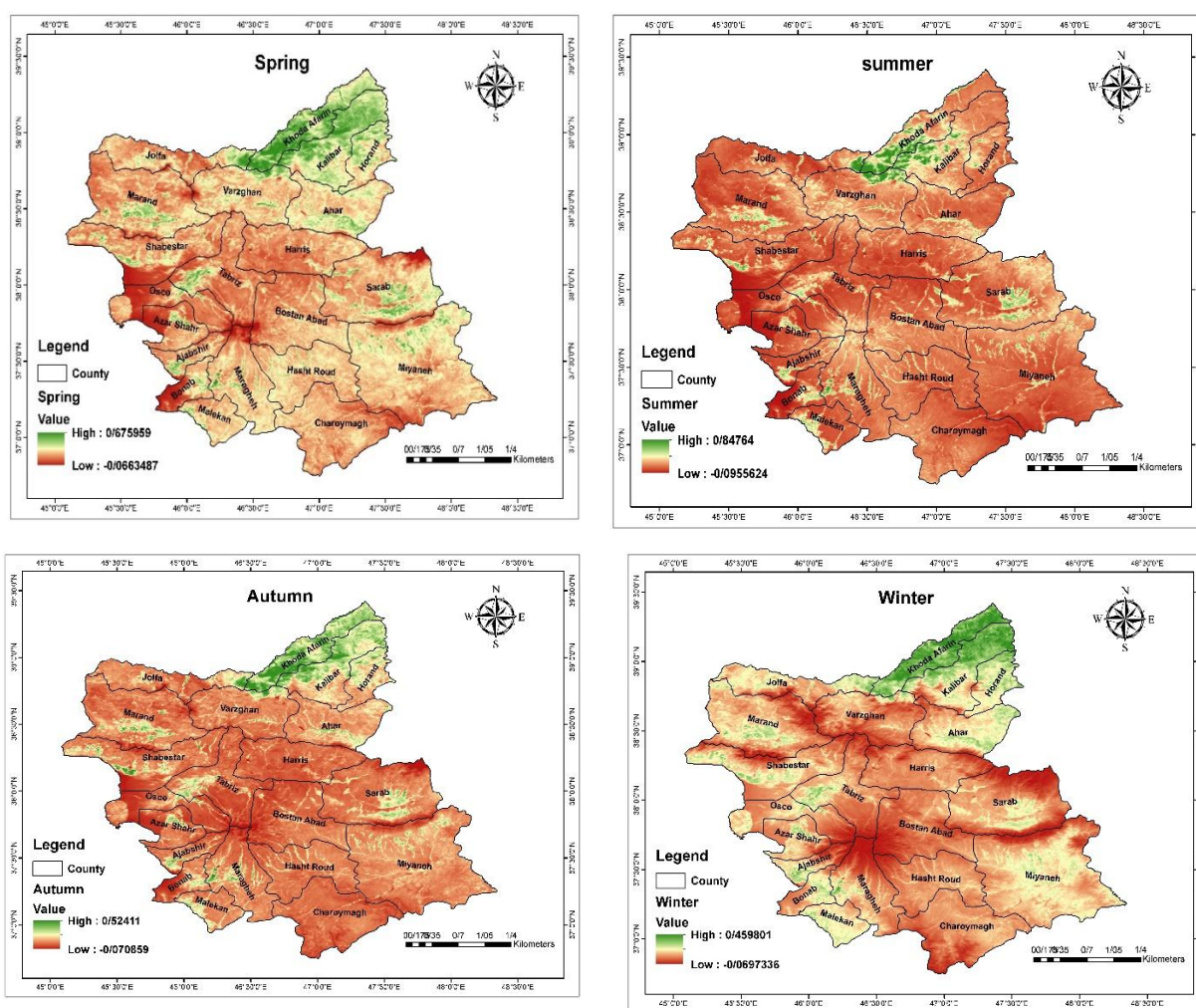


شکل ۱۸- میانگین شاخص پوشش گیاهی در ماه سپتامبر



شکل ۱۷- میانگین شاخص پوشش گیاهی در ماه اوت

تحلیل پویایی‌های ماهانه پوشش گیاهی در اشکال ۱۵ تا ۱۸ به روشنی چرخه فنولوژیکی منطقه را نشان می‌دهد. ماه‌های ژوئن و ژوئیه (اشکال ۱۵ و ۱۶) اوج سبزی‌نگی پوشش گیاهی را به نمایش می‌گذارند که این امر به رشد کامل مراتع و محصولات کشاورزی نسبت داده می‌شود. با این حال، در ماه سپتامبر (شکل ۱۸) کاهش سریع و چشمگیری در پوشش گیاهی در بخش عمده‌ای از استان مشاهده می‌شود؛ به جز جنگل‌های متراکم نواحی شمالی. این افت ناگهانی که در آزمون کولموگروف-اسمیرنوف نیز به عنوان یک ناهنجاری آماری شناسایی شده است، بیانگر حساسیت بالای پوشش گیاهی منطقه نسبت به قطع بارش و آغاز تنش خشکی است.



شکل ۱۹- میانگین شاخص پوشش گیاهی در فصل‌های مختلف

۴-۱- تحلیل پویایی و ناپایداری پوشش گیاهی

نتایج این پژوهش حاکی از وجود یک روند مثبت در پوشش گیاهی طی دوره ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۲ در مقایسه با دهه پیش از آن است. با این حال، علی‌رغم این افزایش کلی، منطقه از ناپایداری قابل توجهی برخوردار است. واریانس بالای مشاهده‌شده در ناهنجاری‌های $NDVI$ (۳۶/۷۸٪) و نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف نشان می‌دهد که پوشش گیاهی استان آذربایجان شرقی در بازه‌های زمانی مشخص به طور معناداری از توزیع نرمال انحراف دارد. این ناپایداری بیانگر حساسیت بالای منطقه نسبت به تنش‌های محیطی است. همان‌گونه که در مطالعات پیشین نیز اشاره شده است، نوسانات شدید پوشش گیاهی اغلب بازتاب‌دهنده

بی‌ثباتی شرایط رشد بوده و می‌تواند پیامدهای جدی برای کشاورزی و منابع آب به‌همراه داشته باشد؛ از جمله تشدید فرسایش خاک و افزایش رواناب سطحی.

۲-۴- محرک‌های اقلیمی و توپوگرافی

یافته‌های این مطالعه تأیید می‌کند که بارش محرک اصلی پویایی‌های پوشش گیاهی در شمال غرب ایران است. ماتریس همبستگی (شکل ۱۲) وجود یک همبستگی مثبت (۰/۴۵) میان $NDVI$ و بارش را نشان می‌دهد. این نتیجه با یافته‌های *Richard و Poccard, (1998)* و *Nicholson et al, (1990)* هم‌خوانی دارد که بارش را به‌عنوان عامل تعیین‌کننده مهم سلامت پوشش گیاهی در مناطق نیمه‌خشک معرفی کرده‌اند. به‌طور مشابه، *Wang et al, (2018)* نیز گزارش کرده‌است که افزایش بارش عموماً با افزایش توده گیاهی همراه است. تحلیل مکانی با استفاده از مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) نشان داد که پوشش گیاهی به‌صورت تصادفی توزیع نشده، بلکه به‌شدت تحت تأثیر توپوگرافی و ارتفاع قرار دارد. مقادیر بالای ضریب تعیین (تا ۰/۷۰) در تحلیل‌های رگرسیونی ماه‌های تابستان بیانگر نقش کلیدی ارتفاع در حفظ رطوبت و تنظیم دما است؛ به‌ویژه در نواحی کوهستانی شمال شرقی استان (منطقه ارسباران). در مقابل، دشت‌های کم‌ارتفاع مرکزی و غربی به‌دلیل بارش کمتر و احتمالاً نرخ‌های بالاتر تبخیر و تعرق، از پوشش گیاهی تنک‌تری برخوردارند. انحراف توزیع فراوانی از الگوی تصادفی نیز این نتیجه‌گیری را تقویت می‌کند که تغییرات اقلیمی به‌ویژه الگوهای دما و بارش در حال بازتشکل‌دهی ترکیب گونه‌ای و توزیع پوشش گیاهی در سطح استان هستند.

۳-۴- تغییرات فصلی

نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) فصلی‌بودن رژیم پوشش گیاهی را به‌خوبی برجسته می‌سازد. خوشه‌بندی ماه‌های ژوئن، ژوئیه و اوت متناظر با اوج فصل رشد است که در آن «سبزی‌نگی» به‌دلیل فعالیت فیزیولوژیکی گندم بهاره، جو و مراتع کوهستانی به بیشینه خود می‌رسد. افت شدید مشاهده‌شده در (ناحیه سوم) PCA (اکتبر تا دسامبر) نشان‌دهنده آغاز پیری (سنسانس) و رکود رویشی است. این کاهش فصلی پوشش گیاهی، خاک را در فصل پاییز در برابر فرسایش بادی و آبی آسیب‌پذیر می‌سازد که عاملی حیاتی در برنامه‌ریزی مدیریت اراضی به‌شمار می‌رود.

۴-۴- محدودیت‌های پژوهش

۱. با وجود ارائه تحلیلی جامع از روندهای پوشش گیاهی، این مطالعه با چند محدودیت همراه است که باید مورد توجه قرار گیرد:
 ۱. محدودیت‌های تفکیک مکانی: این پژوهش بر تصاویر ماهواره‌ای متکی است که بسته به تفکیک مکانی، ممکن است تغییرات پوشش گیاهی در مقیاس‌های کوچک یا قطعات خرد ویژه کشاورزی خرده‌مالکی در منطقه را به‌طور کامل ثبت نکند.
 ۲. متغیرهای اقلیمی: تمرکز اصلی بر بارش و ارتفاع بوده است. سایر عوامل مهم نظیر رطوبت خاک، نرخ‌های تبخیر و تعرق و حدی‌های دمایی خاص به‌صورت مستقل در مدل GWR لحاظ نشده‌اند که می‌تواند دقت پیش‌بینی را بهبود بخشد.
 ۳. عوامل انسان‌زاد: تحلیل حاضر عمدتاً بر محرک‌های محیطی متمرکز است؛ در حالی که تغییرات کاربری اراضی، شهرنشینی و دگرگونی‌های سیاست‌های کشاورزی در استان آذربایجان شرقی تأثیر قابل‌توجهی بر $NDVI$ دارند، اما در این مدل آماری به‌طور جداگانه تفکیک نشده‌اند. پژوهش‌های آینده باید داده‌های اجتماعی-اقتصادی را ادغام کنند تا تغییرات ناشی از اقلیم از تغییرات انسان‌زاد در پوشش گیاهی تفکیک شود.

نتیجه‌گیری

این تحلیل مکانی-زمانی ۲۲ ساله از استان آذربایجان شرقی، ناپایداری اکولوژیکی قابل‌توجهی را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که توزیع شاخص تفاضل نرمال‌شده پوشش گیاهی ($NDVI$) به‌رغم وجود یک روند بهبود ملایم چنددهه‌ای که در دهه دوم به نرخ رشد سالانه ۰/۱۹۲٪ رسیده است، به‌طور معناداری غیرنرمال است (بر اساس نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف). این

پژوهش با تلفیق موفق مدل رگرسیون وزن دار جغرافیایی (GWR) با داده‌های اقلیمی و توپوگرافی و دستیابی به دقت پیش‌بینی بالا (ضریب تعیین $R^2 = 0.76$)، شکاف دانشی مهمی را در خصوص تأثیر هم‌زمان ارتفاع و بارش بر پویایی‌های پوشش گیاهی در شمال غرب ایران پوشش می‌دهد.

این ارزیابی بلندمدت و صریح مکانی، بنیان لازم را برای تفکیک نوسانات فصلی گذرا از تخریب دائمی اکوسیستم‌ها در این منطقه خشک و شکننده فراهم می‌سازد. ناهمگنی مکانی بالای تأییدشده، ضرورت تغییر فوری سیاست‌ها از مدیریت متمرکز به سمت راهبردهای حفاظتی محلی و وابسته به ارتفاع را گوشزد می‌کند؛ به گونه‌ای که مناطق با تراکم بالای پوشش گیاهی نظیر ارسباران در اولویت حفاظت قرار گیرند و هم‌زمان، در نواحی با تراکم پایین، شیوه‌های کشاورزی مقاوم به خشکسالی توسعه یابد. در نهایت، پژوهش‌های آتی باید بر کمی‌سازی اثر تنش‌های انسان‌زاد غیر اقلیمی نظیر فشار چرای دام تمرکز کنند؛ عواملی که احتمالاً در شکل‌گیری توزیع غیرنرمال تأییدشده پوشش گیاهی نقش بسزایی دارند.

پیامدهای سیاستی و توصیه‌ها

نتایج این مطالعه تأکید می‌کند که شدت، تداوم، فراوانی و گستره پوشش گیاهی در سراسر استان آذربایجان شرقی حتی در این محدوده جغرافیایی نسبتاً کوچک به شدت ناهمگون است. این ناهمگنی ضرورت گذار از رویکردهای متمرکز و یکسان‌انگارانه به سمت مدیریت و برنامه‌ریزی محلی و متناسب با ویژگی‌های هر منطقه را برجسته می‌سازد.

حفاظت هدفمند: نواحی شمالی استان (نظیر ارسباران و مناطق پیرامونی) باید به عنوان مناطق با اولویت بالای حفاظتی تعیین شوند تا از اکوسیستم‌های جنگلی و مرتعی متراکم که برای تنوع زیستی منطقه و نگهداشت آب حیاتی‌اند صیانت شود. مدیریت منابع آب: با توجه به وابستگی قوی پوشش گیاهی به بارش، برنامه‌های مدیریتی باید بر بهبود روش‌های استحصال و ذخیره آب و اجرای شیوه‌های کشاورزی مقاوم به خشکسالی در نواحی غربی و مرکزی تمرکز کنند تا پایداری پوشش گیاهی در مناطق کم‌تراکم تقویت شود.

ادغام مدل‌سازی پیش‌بینانه: مدل توانمند رگرسیون وزن دار جغرافیایی (GWR) با دقت پیش‌بینی بالا (ضریب تعیین $R^2 = 0.76$)، باید به صورت فوری در ابزارهای تصمیم‌سازی نهادهای برنامه‌ریزی منطقه‌ای ادغام شود تا تخصیص منابع بر پایه اثرات محلی ارتفاع و بارش بر پوشش گیاهی به طور دقیق انجام گیرد.

جهت‌گیری‌های پژوهشی آتی

بر اساس یافته‌ها، جهت‌گیری‌های زیر برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود: بررسی علل ناپایداری: پژوهش‌های آتی باید فراتر از عوامل اقلیمی رفته و عوامل محلی خاص مؤثر بر ناپایداری تأییدشده و توزیع غیرنرمال پوشش گیاهی را بررسی کنند؛ با تمرکز بر کمی‌سازی اثر تغییرات محلی کاربری اراضی، فشار چرای دام و فعالیت‌های انسانی.

تمرکز بر ناهنجاری‌های فصلی: نیاز است توزیع غیرنرمال منحصربه‌فرد مشاهده‌شده در ماه سپتامبر که نشان‌دهنده افت سریع فصل رشد است به طور اختصاصی بررسی شود تا محرک‌های دقیق اقلیمی یا انسان‌زاد آغازگر این فرایند شناسایی شوند. تقویت مدل‌سازی پیش‌بینانه: ادغام متغیرهای تبیینی اضافی نظیر نوع خاک، لیتولوژی و جهت شیب در مدل GWR به منظور افزایش دقت پیش‌بینی پوشش گیاهی و بهبود درک محرک‌های اکولوژیکی محلی توصیه می‌شود.

تأمین مالی (Funding Declaration)

این پژوهش هیچ گونه حمایت مالی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان (Author Contributions Statement)

فرحناز خرم‌آبادی: مفهوم‌پردازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری و آماری، نگارش پیش‌نویس اولیه مقاله
سینا فرد مرادی‌نیا: راهبری و مفهوم‌پردازی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل و ارزیابی نتایج
مصطفی تهانی یزدلی: مفهوم‌پردازی، مشاوره، بازبینی متن مقاله، تحلیل‌های آماری
سید محمد حسینی: مفهوم‌پردازی، مشاوره، بازبینی متن مقاله، تحلیل‌های آماری

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع وجود ندارد.

منابع

- امیری، فاضل؛ یگانه، حسن (1391). ارزیابی شاخصهای گیاهی برای تهیه نقشه درصد پوشش گیاهی در اراضی نیمه خشک بخش مرکزی ایران (حوزه آبخیز قرهآقاج). نشریه مرتع و آبخیزداری، شماره ۲، ۱۷۵-۱۸۹.
- پناهی، علی؛ خرم آبادی، فرحناز (1398). ارزیابی دقت دادههای CSIRO و مدل LARS-WG در شبیه سازی متغیرهای اقلیمی استان آذربایجان شرقی. نشریه دگرگونی ها و مخاطرات آب و هوایی، شماره ۲، ۱۴۰-۱۶۲.
- تمرتاش، رضا؛ جعفری، محمد؛ حیدری شریف آباد، حسین؛ زاهدی امیری، قوام الدین (1392). تعیین رابطه عناصر تغذیه‌ای در برخی گونه‌های مرتعی و خاک اکوسیستم‌های مرتعی منطقه طالقان. نشریه حفاظت زیست بوم گیاهان، شماره ۳، ۱۵-۳۰.
- حسینی، سید محمد؛ فاطمینیا، فخریسادات (1400). پایش اقلیمی- ماهوارهای شاخص سطح برگ در استان همدان. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، شماره ۶۱، ۲۷۷-۲۵۹.
- سمیعی، محمد، سیدیان، سیدمرتضی، فتح آبادی، ابوالحسن و جهان تیغ، نصرالدین (1402). مدل سازی و بررسی مهمترین عوامل مؤثر بر وقوع سیلاب حوزه آبخیز گرگانرود. رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست، (۲)، ۱۲۳-۱۳۶.
- شریفی، ویدا (۱۴۰۱). تحلیل اثر خشکسالی بر پارامترهای فنولوژی شاخص های گیاهی از سری زمانی تصاویر سنجنده MODIS (مورد مطالعاتی: استان همدان). پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته نقشه برداری، گرایش سنجش از دور، دانشکده مهندسی گروه عمران، دانشگاه کردستان.
- شکراللهی، شکوفه؛ مرادی، حمیدرضا؛ دیانتهی تیلکی، قاسمعلی (۱۳۹۱). بررسی اثر ویژگیهای خاک و عوامل فیزیوگرافی بر پوشش گیاهی (مطالعه موردی: بخشی از مراتع ییلاقی پلور). تحقیقات مرتع و بیابان ایران، شماره ۱۹، ۶۵۵-۶۶۸.
- صالح پور، زینب؛ جعفری کوخدان، عزیزاله؛ علیرضائزاد، علی (۱۳۹۲). بررسی تغییرات پوشش گیاهی در ارتباط با عوامل فیزیوگرافی رشته کوه دنا. فیزیولوژی محیطی گیاهی، شماره ۸، ۲۸-۳۷.
- کمالی، نسیم و فرهادی بانسوله، بهمن (۱۴۰۱). مقایسه‌ی تغییرات زمانی و مکانی تبخیر و تعرق ذرت در منطقه‌ی ماهیدشت حاصل از تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ و منابع موجود. رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست، (۱)، ۵۱-۶۲.
- محسنی فر، کامران، حلفی، علی و پناه‌پور، ابراهیم (۱۴۰۳). اثر فرسایش هزاردره بر هدررفت مواد آلی و تغییرات برخی خصوصیات خاک مناطق خشک استان خوزستان (حوضه درب خزینه شوشتر). (رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست)، (۱)، ۳-۱۲.
- مقدم، محمدرضا (۱۳۸۸). مرتع و مرتعداری، چاپ ۶، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- میراحسنی، مرضیه سادات؛ سلیمانماهینی، عبدالرسول؛ سفاینان، علیرضا؛ محمدی، جهانگیر؛ مدرس، رضا؛ جعفری، رضا؛ پورمنافی، سعید (۱۳۹۸). ارزیابی روند تغییرات پوشش گیاهی با استفاده از تصاویر سری زمانی و آزمون من-کندال در حوضه آبخیز گاوخونی. محیط شناسی، شماره ۱، ۹۹-۱۱۴.
- ناطق، سعیده؛ نوحهگر، احمد؛ احسانی، امیر هوشنگ؛ بذرافشان، امالبنین (۱۳۹۶). بررسی تغییرات پوشش گیاهی براساس شاخصهای گیاهی با استفاده از سنجش از دور. فصلنامه تحقیقات مرتع و بیابان ایران، شماره ۲۴، ۷۷۸-۷۹۰.
- Amiri, F., Yeganeh, H., 2012. Evaluation of vegetation indices for mapping vegetation cover percentage in semi-arid lands of central Iran (Qareh-Aghach watershed). Rangeland and Watershed Management Journal, 65(2), 175-189. (In Persian)
- Panahi, A., & Khorramabadi, F., (2019). Accuracy assessment of CSIRO data and the LARS-WG model in simulating climatic variables of East Azerbaijan Province. Journal of Climate Change and Climatic Hazards, 7(2), 140-162. (In Persian)
- Tamartash, R., Jafari, M., Heidari Sharif Abad, H., & Zahedi Amiri, Q., (2013). Determining the relationship between nutrient elements in some rangeland species and soil of rangeland ecosystems in Taleghen region. Plant Ecosystem Conservation Journal, 1(3), 15-30. (In Persian)

- Hosseini, S. M., & Fatemina, F. S., (2021). Climatic-satellite monitoring of leaf area index in Hamadan Province. *Applied Research in Geographical Sciences*, 21(61), 259–277. (In Persian)
- Samaei, M., Seydian, S. M., Fathabadi, A., & Jahantigh, N., (2023). Modeling and investigation of the most important factors affecting flood occurrence in the Gorganroud watershed. *Modern Approaches in Water and Environmental Engineering*, 2(2), 123–136. (In Persian)
- Sharifi, V., (2022). Analysis of drought impacts on phenological parameters of vegetation indices using MODIS time-series imagery (Case study: Hamadan Province) (Master's thesis). Department of Surveying Engineering, Remote Sensing Division, University of Kurdistan, Iran. (In Persian)
- Shokrollahi, S., Moradi, H. R., Dianati Tilaki, G., (2012). Investigation of the effects of soil properties and physiographic factors on vegetation cover (Case study: Part of the Polour summer rangelands). *Iranian Journal of Rangeland and Desert Research*, 19, 655–668. (In Persian)
- Salehpour, Z., Jafari Kookhdan, A., Alirezanaajad, A., (2013). Investigation of vegetation cover changes in relation to physiographic factors in the Dena Mountain Range. *Plant Environmental Physiology*, 8, 28–37. (In Persian)
- Kamali, N., & Farhadi Bansoule, B., (2022). Comparison of temporal and spatial variations of maize evapotranspiration derived from Landsat 8 satellite imagery and available data sources in Mahidasht region. *Modern Approaches in Water and Environmental Engineering*, 1(1), 51–62. (In Persian)
- Mohsenifar, K., Halafi, A., Panahpour, E., (2024). Effects of badland erosion on organic matter loss and changes in selected soil properties in arid regions of Khuzestan Province (Darb-e Khazineh watershed, Shushtar). *Modern Approaches in Water and Environmental Engineering*, 3(1), 1–12. (In Persian)
- Moghadam, M. R., (2009). *Rangeland and rangeland management* (6th ed.). Tehran University Press.
- Mirahsani, M. S., Salmanmahiny, A., Safaeinan, A., Mohammadi, J., Modares, R., Jafari, R., & Pourmanafi, S., (2019). Assessment of vegetation cover change trends using time-series imagery and the Mann–Kendall test in the Gavkhouni watershed. *Environmental Sciences*, 17(1), 99–114. (In Persian)
- Nateghi, S., Nouhagar, A., Ehsani, A. H., Bazrafshan, O., (2017). Investigation of vegetation cover changes based on vegetation indices using remote sensing techniques. *Iranian Journal of Rangeland and Desert Research*, 24, 778–790. (In Persian)
- Afifi, M. I., 2016. Monitoring particulate matter using multi-spectral images of Modis satellite in the southwest of Iran, *Geography Quarterly*. 55:184-194.
- Allison, E. W. 1989. Monitoring drought affected vegetation with AVHRR Digest International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 4,1965-1967.
- Campo-Bescós, M., Muñoz-Carpena, R., Southworth, J., Zhu, L., Waylen, P., Bunting, E., (2013). Combined Spatial and Temporal Effects of Environmental Controls on Long-Term Monthly NDVI in the Southern Africa Savanna. *Remote Sensing*, 5(12), 6513–6538.
- Feng, J., Dong, B., Qin, T., Liu, S., Zhang, J., Gong, X., 2021. Temporal and Spatial Variation Characteristics of NDVI and Its Relationship with Environmental Factors in Huangshui River Basin from 2000 to 2018. *Polish Journal of Environmental Studies*, 30(4), 3043–3063.
- Harris, A., Carr, A.S., Dash, J., 2014. Remote sensing of vegetation cover dynamics and resilience across southern Africa. *International Journal of Applied Earth Observation and Geo information*, 28, 131-139.
- Jin, S., Yang, L., Zhu, Z., Homer, C., 2017. A land cover change detection and classification protocol for updating Alaska NLCD 2001 to 2011. *Remote Sensing of Environment*, 195, 44–55.
- Jolliffe, I. T., 2002. *Principal Component Analysis*, second Edition, Springer.
- Kargupta, H., Huang, W. Y., Sivakumar, K., E. Johnson., 2001. Distributed Clustering Using Collective Principal Component Analysis, *Knowl. Inf. Syst*, 3 (4), 422 –448.
- Kogan, F. N., 1993. United States droughts of late 1980's as seen by NOAA polar orbiting satellites. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1,197-199.
- Kolmogorov, A., 1933. Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione. *Giornale dell'Istituto Italiano degli Attuari*, 4, 83–91.
- Lazzarini, M., Marpu, P. R., Ghedira, H., 2013. Temperature-land cover interactions: the inversion of urban heat island phenomenon in desert city areas. *Remote Sensing of Environment*, 130, 136-152.
- Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E., Moran, E., 2004. Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 12, 2365-2407.
- Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E., Moran, E., (2004). Change detection techniques. *International journal of remote sensing*, 25(12), 2365-2401.
- Nicholson, S. E., M. L. Davenport, A. L. Malo., 1990. A Comparision of the Vegetation Response to Rainfall in the Sahel and East Africa Using Normalized Defference Vegetation Index from NOAA AVHRR, *Climatic Change*, 17,209-241.
- Peng, J., Liu, Z., Liu, Y., Wu, J., Han, Y., 2012. Trend analysis of vegetation dynamics in Qinghai–Tibet Plateau using Hurst Exponent. *Ecological Indicators*, 14(1), 28-39.

- Pettorelli, N., Vik, O., Myrsetrud, A., Gaillard, J.M., Tucker, C.J., Stenseth, N.C., 2005. Using the satellite derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Journal Trends in ecology and evolution*, 9(20), 503-510.
- Qader, S. H., Priyatikanto, R., Khwarahm, N. R., Tatem, A. J., & Dash, J., (2022). Characterising the land surface phenology of middle eastern countries using moderate resolution landsat data. *Remote Sensing*, 14(9), 2136.
- Richard, Y., I. Pocard., 1998. A Statistical Study of NDVI Sensitivity to Seasonal and Interannual Rainfall Variations in Southern Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 19(15), 2907- 2920.
- Tipping, M. E., C. M. Bishop., 2008. Probabilistic principal component analysis. Technical Report NCRG /97/010, Microsoft Research.
- Vidal, R., Y. Ma., Sastry, S., Vidal, Y., Ma, S., Sastry., 2003. Generalized principal component analysis (GPCA). In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, I, 621-628.
- Wang, X., 1997. Multivariate analysis of desert in Anxi. *Acta Botanica Sinica*, 39 (5), 461-466.
- Wang, Z.P., Zhang, X. Z., He, Y.T., Li, M., Shi, P.L., Zu, J.X., Niu, B., (2018). Responses of normalized difference vegetation index (NDVI) to precipitation changes on the grassland of Tibetan Plateau from 2000 to 2015. *journal of applied ecology*, 29(1), 75-83.
- Widaman, K. F., 1990. Bias in Pattern Loadings Represented by Common Factor - Analysis and Component Analysis. *Multivariate Behavioral Research*, 25 (1), 89 -95.
- Xuefei, LiuJie., Dong, G., Han, X., 2021. Spatial-temporal variation of NDVI and its responses to precipitation in the upper of Heihe from 2000 to 2019. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 783(1), 012148.
- Zenouzi, A. S., Yenneti, K., Teimouri, R., Abbasiyan, F., Palme, M., (2022). Analysis of changes in vegetation index during the rapid urban spatial development period (1990–2020) in Tehran metropolis, Iran. *Atmosphere*, 13(12), 2010.
- Zhang, Q., Kong, D., Singh, V. P., Shi, P., 2017. Response of vegetation to different timescales drought across China: spatiotemporal patterns, causes and implications, *Glob. Planet. Chang*, 152, 1-11.