

Climate Change and Vegetation Cover in the Kahneh Watershed, Khorasan Razavi, Using Remote Sensing in the GEE Environment

Mostafa Dastorani^{1,*}, Mehdi Zarei², Malihe Qaderi³

1. Assistant Prof., Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran.

2. Associate Professor, Research Center for Geographical Sciences and Social Studies, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran.

3. Education and Environmental Culture Expert, Department of Environment of South Khorasan Province, Birjand, Iran.

***Corresponding Author: m.dastorani@hsu.ac.ir**

Extended abstract

Introduction

The Kahneh watershed in Khorasan Razavi Province, Iran, is located in a semi-arid region where vegetation cover is highly sensitive to climatic variations, particularly precipitation. Understanding how vegetation responds to changing climatic conditions is crucial for developing effective environmental and resource management strategies. This study investigates vegetation cover changes over two time periods (2000–2012 and 2012–2024), focusing on the relationship between climate variability and vegetation dynamics.

Methodology

Remote sensing data and geospatial analysis were conducted using the Google Earth Engine (GEE) platform. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was used to monitor vegetation cover, while the Standardized Precipitation Index (SPI) and monthly precipitation data were used to assess climate variability. NDVI data were derived from satellite imagery, and SPI was calculated to classify wet and dry years, enabling the correlation of precipitation anomalies with vegetation responses. Seasonal analyses were also performed to identify intra-annual variations in vegetation cover.

Results and Discussion

The analysis revealed a significant increase in NDVI values during the 2012–2024 period compared to 2000–2012, indicating an overall improvement in vegetation cover. The mean NDVI rose from 0.06 in 2000 to 0.10 in 2024, suggesting enhanced soil and vegetation conditions. These improvements were largely associated with increased annual precipitation, particularly in the later years of the study period. However, SPI analysis indicated fewer wet years in the 2012–2024 period, highlighting ongoing climate variability. Seasonal assessments demonstrated improved vegetation cover across all seasons, including traditionally dry periods, further emphasizing the positive impact of increased rainfall on ecosystem health.

Conclusion

The study underscores the positive influence of increased precipitation on vegetation cover in the Kahneh watershed over the past decade. Despite this improvement, ongoing climate variability and the long-term effects of climate change remain significant concerns. The research also highlights the limitations of relying solely on monthly climate data and NDVI. Future studies should incorporate additional environmental variables, such as temperature, soil moisture, and land use data, for a more comprehensive understanding of ecosystem dynamics. These findings contribute to a broader understanding of semi-arid ecosystem responses to climate change and provide valuable insights for guiding sustainable land and water resource management.

Keywords: Climate, Remote Sensing, GIS, Khorasan, Degradation.

تغییرات اقلیمی و پوشش گیاهی در حوزه آبخیز کهنه خراسان رضوی با استفاده از سنجش از دور در محیط GEE

مصطفی دستورانی^{۱*}، مهدی زارعی^۲، ملیحه قادری^۳

۱- استادیار گروه سنجش از دور و GIS دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.

۲- دانشیار مرکز پژوهشی علوم جغرافیایی و مطالعات اجتماعی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.

۳- کارشناس آموزش و فرهنگ‌سازی محیط زیست، اداره کل حفاظت محیط زیست خراسان جنوبی، بیرجند، ایران.

*نویسنده مسئول: m.dastorani@hsu.ac.ir

چکیده

تحقیق حاضر به تحلیل تغییرات پوشش گیاهی در حوزه آبخیز کهنه در استان خراسان رضوی، ایران، در دو بازه زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۲ و ۲۰۱۲-۲۰۲۴ پرداخته است. این منطقه به‌عنوان یک حوزه نیمه‌خشک، تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و نوسانات بارش قرار دارد. برای ارزیابی وضعیت پوشش گیاهی از شاخص NDVI، SPI و داده‌های ماهانه بارش در محیط گوگل ارث انجین استفاده شد. نتایج نشان داد که در بازه زمانی ۲۰۱۲-۲۰۲۴ نسبت به دوره ۲۰۰۰-۲۰۱۲، افزایش قابل توجهی در شاخص NDVI مشاهده شد که نشان‌دهنده بهبود شرایط پوشش گیاهی در منطقه است. این بهبود به‌ویژه در انتهای دوره دوم بیشتر مشهود بود و با افزایش بارش‌های سالانه در این دوره مرتبط است. همچنین، تحلیل تعداد سال‌های مرطوب با استفاده از شاخص SPI نشان‌دهنده کاهش تعداد سال‌های مرطوب در بازه ۲۰۱۲-۲۰۲۴ بود، که ممکن است به تغییرات اقلیمی و نوسانات بارش نسبت داده شود. در تجزیه و تحلیل فصلی تغییرات NDVI، نتایج حاکی از بهبود پوشش گیاهی در تمامی فصول سال، از جمله فصول خشک، بود. این بهبود نشان‌دهنده تأثیر مثبت بارش‌های اضافی در دوره دوم بر وضعیت اکولوژیکی و پوشش گیاهی است. علاوه بر این، افزایش میانگین شاخص NDVI از ۰/۰۶ در سال ۲۰۰۰ به ۰/۱۰ در سال ۲۰۲۴، که نشان‌دهنده افزایشی تقریباً دو برابری است، مؤید بهبود شرایط خاک و پوشش گیاهی منطقه می‌باشد. این تحقیق نشان می‌دهد که افزایش بارش در دوره ۲۰۱۲-۲۰۲۴ توانسته تأثیر مثبتی بر بهبود پوشش گیاهی منطقه داشته باشد، اما نوسانات اقلیمی و تأثیرات بلندمدت تغییرات اقلیمی نیاز به بررسی‌های بیشتر دارند. این تحقیق همچنین به محدودیت‌های موجود در تحلیل داده‌های ماهانه و لزوم استفاده از داده‌های دیگر برای تحلیل دقیق‌تر تغییرات پوشش گیاهی و تأثیرات سایر عوامل محیطی اشاره دارد.

واژگان کلیدی: اقلیم؛ سنجش از دور؛ سامانه اطلاعات جغرافیایی؛ روند؛ تخریب اراضی.

مقدمه

پوشش گیاهی یکی از اصلی‌ترین عناصر زیستی کره زمین است که نه تنها نقشی کلیدی در تنظیم چرخه‌های زیستی و کربنی ایفا می‌کند، بلکه به عنوان شاخص حساس برای تغییرات اقلیمی عمل می‌کند. تغییرات در دما، میزان بارندگی، شدت و مدت خشکسالی‌ها، و دیگر عوامل اقلیمی می‌توانند تأثیرات قابل توجهی بر رشد، ترکیب، توزیع، و ساختار پوشش گیاهی داشته باشند (Wu et al., 2021). این تغییرات نه تنها اکوسیستم‌های طبیعی، بلکه کشاورزی و منابع غذایی بشر را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند (Ma et al., 2021). یکی از مهم‌ترین اثرات تغییرات اقلیمی بر پوشش گیاهی، تغییر در محدوده پراکنش گونه‌ها است. با افزایش دمای جهانی، بسیاری از گونه‌های گیاهی به سمت ارتفاعات بالاتر یا عرض‌های جغرافیایی شمالی حرکت می‌کنند. این جابه‌جایی‌ها ممکن است منجر به از دست رفتن زیستگاه‌های طبیعی و کاهش تنوع زیستی شود. از سوی دیگر، افزایش سطح دی‌اکسید کربن در جو می‌تواند فتوسنتز و رشد برخی از گونه‌ها را تسریع کند، اما این مزیت در مناطقی با کمبود آب یا خاک‌های فقیر ممکن است محدود باشد (Ren et al., 2022).

خشکسالی‌های شدید و افزایش حوادث اقلیمی مانند طوفان‌ها، سیلاب‌ها و آتش‌سوزی‌های جنگلی نیز تهدیدی جدی برای سلامت و پایداری پوشش گیاهی محسوب می‌شوند. کاهش منابع آبی در دسترس و افزایش تبخیر سطحی می‌تواند منجر به کاهش تولید زیست‌توده و بیابان‌زایی در مناطق حساس شود. در عین حال، الگوهای جدید بارش ممکن است ساختار و ترکیب گونه‌های گیاهی را دستخوش تغییرات اساسی کند (Golla 2021, Jabal et al., 2022). تغییرات در پوشش گیاهی به طور مستقیم و غیرمستقیم بر شدت و میزان فرسایش آبی و بادی تأثیر می‌گذارد. پوشش گیاهی با تثبیت خاک از طریق ریشه‌ها و کاهش سرعت باد و رواناب سطحی، نقشی کلیدی در کاهش فرسایش ایفا می‌کند (Owen et al., 2021). هنگامی که پوشش گیاهی کاهش می‌یابد یا تخریب می‌شود، خاک در برابر عوامل فرسایشی آسیب‌پذیرتر می‌شود. در مناطقی با بارندگی‌های شدید، کاهش پوشش گیاهی منجر به افزایش رواناب سطحی و حمل ذرات خاک توسط آب می‌شود که پیامدهایی همچون کاهش حاصلخیزی خاک، رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها و تخریب زیستگاه‌های آبی را به دنبال دارد (Právělie 2021, Milewski et al., 2022). به همین ترتیب، در مناطق خشک و نیمه‌خشک، کاهش پوشش گیاهی باعث افزایش فرسایش بادی می‌شود، که می‌تواند گرد و غبار را به مناطق وسیعی منتقل کرده و کیفیت هوا، سلامت انسان و شرایط زیست‌محیطی را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، حفظ پوشش گیاهی نه تنها برای جلوگیری از تخریب خاک بلکه برای پایداری اکوسیستم‌ها و کاهش اثرات مخرب فرسایش ضروری است (Ying et al., 2024).

تحقیقات فراوانی در خصوص اثرات تغییر اقلیم بر پوشش گیاهی با استفاده از شاخص‌های مختلف صورت گرفته است. اما در این بین استفاده از سنجش از دور تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند گزینه‌ای بسیار جذاب، سریع و مقرون به صرفه برای ارزیابی تغییرات پوشش محسوب شود (Gong et al., 2024). یکی از پرکاربردترین شاخص‌ها در این زمینه، شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (Normalized Difference Vegetation Index) است. این شاخص که بر اساس مقادیر بازتاب طیفی در باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک محاسبه می‌شود، به عنوان یک نمایه مستقیم از سطح فتوسنتز و سلامت پوشش گیاهی عمل می‌کند. بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که NDVI می‌تواند تغییرات فصلی و سالانه در پوشش گیاهی را به خوبی توصیف کند و اثرات تغییرات اقلیمی مانند خشکسالی‌ها، تغییر در الگوهای بارش و گرمایش جهانی را آشکار سازد (Huang et al., 2021). شاخص‌های دیگر مانند EVI (شاخص ارتقای پوشش گیاهی) که حساسیت بیشتری به تغییرات در مناطق متراکم جنگلی دارد، و LAI (شاخص سطح برگ) نیز به طور گسترده برای تحلیل تغییرات اکوسیستم‌های گیاهی استفاده می‌شوند. این شاخص‌ها امکان ارزیابی دقیق‌تر ساختار پوشش گیاهی و تأثیر تغییرات اقلیمی بر آن را فراهم می‌آورند (Huete 2012). علاوه بر این، مطالعات مبتنی بر LST (دماهای سطح زمین) و ارتباط آن با شاخص‌های پوشش گیاهی به بررسی تنش‌های دمایی بر گیاهان و تغییرات مکانی آن‌ها کمک کرده‌اند. به‌ویژه در مناطق خشک، ترکیب شاخص‌هایی مانند NDVI و LST توانسته الگوهای بیابان‌زایی و کاهش ظرفیت تولیدی اراضی را آشکار کند (Yue et al., 2007). پیشرفت‌های اخیر در پردازش داده‌های ماهواره‌ای، به‌ویژه استفاده از داده‌های چند زمانه از مأموریت‌هایی مانند Sentinel, Landsat, MODIS، امکان تحلیل روندهای بلندمدت و پیش‌بینی تغییرات آینده را فراهم کرده است. به عنوان مثال،

ترکیب داده‌های Sentinel-2 با وضوح مکانی بالا و MODIS با پوشش زمانی گسترده، توانسته است جزئیات بیشتری از تغییرات پوشش گیاهی و واکنش آن به شرایط اقلیمی را در مقیاس جهانی ارائه دهد.

باقرزاده و همکاران (Bagherzadeh et al., 2020) در تحقیق خود با استفاده از نقشه‌های کاربری / پوشش اراضی، تصاویر ماهواره‌ای NDVI، دمای هوا و بارش، به بررسی روابط بین تغییرات اقلیمی و نوسانات NDVI در دشت مشهد-چناران، شمال شرق ایران طی سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۶ پرداختند. نتایج نشان داد که بارش سالانه با نوسانات NDVI در تمامی انواع پوشش گیاهی رابطه معناداری دارد. همچنین، دمای هوا تأثیر قابل‌توجهی بر NDVI ماهانه داشت و مراتع غنی بیشترین حساسیت را نشان دادند. این مطالعه بر کارایی شاخص NDVI در پایش تغییرات پوشش گیاهی در اقلیم‌های نیمه‌خشک تأکید کرد. فاروقی و همکاران (Farooghi et al., 2022) در پژوهشی با هدف بررسی حساسیت زمانی-مکانی خاک‌های دوران چهارم نسبت به نوسانات شاخص پوشش گیاهی و منابع آب در ایران، از داده‌های ماهواره‌ای Modis و مدل MERA نسخه ۲ برای دوره‌ای ۳۶ ماهه بین سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۱ استفاده کردند. نتایج نشان داد که میانگین حجم آب ذخیره‌شده در خاک‌های ایران ۳۴۵ میلی‌لیتر بر مترمربع است و مناطق با اقلیم بسیار مرطوب ۲۰٪، نیمه‌مرطوب ۱۸٪، مدیترانه‌ای ۸٪، نیمه‌خشک ۱۲٪، خشک ۲۱٪ و بیابانی ۲۵٪ تغییر در حجم آب ذخیره‌شده نسبت به شرایط مشابه اقلیمی نشان داده‌اند. همچنین، سواحل دریاچه ارومیه و استان خوزستان با حساسیت بالایی در رابطه با تأثیر نوع خاک بر پوشش و منابع آب شناسایی شدند. قربانیان و همکاران (Ghorbanian et al., 2022) با استفاده از داده‌های NDVI ماهواره MODIS (۲۰۰۰-۲۰۲۰) و الگوریتم PolyTrend، روند تغییرات پوشش گیاهی ایران را بررسی کردند. نتایج نشان داد ۴۴٪ از مناطق کشور تحت تحلیل قرار گرفته و نرخ سبزی‌نگی بیشتر از قهوه‌ای شدن بوده است. مراتع بیشترین تغییرات را تجربه کردند، در حالی که جنگل‌ها روند مثبت و اراضی زراعی روند منفی بیشتری داشتند. این پژوهش بر تأثیر بارش بر پوشش گیاهی و نقش شاخص‌های ماهواره‌ای در مدیریت پایدار تأکید دارد.

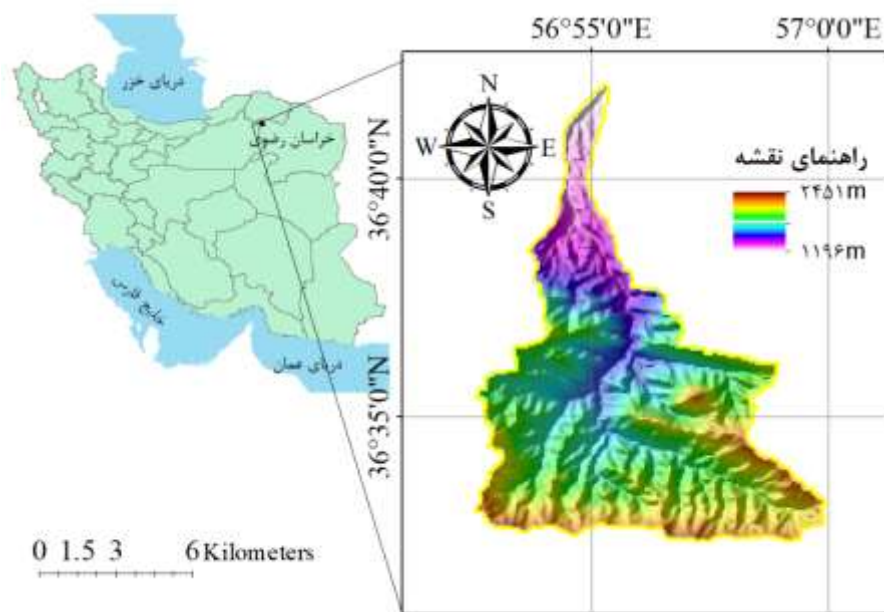
حوزه آبخیز کهنه در سبزوار به‌دلیل موقعیت جغرافیایی در منطقه‌ای نیمه‌خشک و حساس به تغییرات اقلیمی، اهمیت زیادی برای مطالعات زیست‌محیطی دارد. این منطقه با چالش‌هایی مانند کاهش منابع آب، تخریب پوشش گیاهی و فرسایش خاک مواجه است که نیازمند مدیریت پایدار و برنامه‌ریزی دقیق است. هدف این تحقیق، ارزیابی تغییرات پوشش گیاهی، بررسی تأثیر عوامل اقلیمی بر آن و تحلیل روندهای مرتبط با منابع آب و خاک در حوزه آبخیز کهنه است. نتایج این پژوهش می‌تواند در توسعه استراتژی‌های احیای زیست‌بوم، کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی و ارتقای پایداری منابع طبیعی منطقه مؤثر باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز کهنه با مساحتی در حدود ۸۵۹۱/۲ هکتار در حوزه آبریز کویر مرکزی و از نظر سیاسی در محدوده شهرستان جغتای واقع شده است. منطقه مطالعاتی در بازه طول جغرافیایی ۳۳° ۵۲' ۵۶" الی ۵۳° ۵۹' ۵۶" شرقی و عرض ۳۲° ۳۶' ۰۶" الی ۳۶° ۴۲' ۰۶" شمالی واقع شده است. حوزه کهنه جغتای دارای متوسط بارش سالانه ۳۰۸ میلی‌متر است. بیشترین بارندگی ماهانه در این حوزه مربوط به ماه‌های بهمن، اسفند و فروردین به‌ترتیب با مقادیر ۵۵/۶، ۵۵/۳ و ۵۴/۹ میلی‌متر است. در فصل تابستان، میزان بارش به حدود ۵/۵ میلی‌متر کاهش می‌یابد. بارش سالانه در این حوزه بین ۲۲۶ میلی‌متر در مناطق پست و ۳۳۴ میلی‌متر در مناطق مرتفع متغیر است. میانگین دمای سالانه این منطقه ۸/۸ درجه سانتی‌گراد است. متوسط حداقل و حداکثر دمای سالانه به‌ترتیب ۲/۸ و ۱۴/۹ درجه سانتی‌گراد است. حداقل مطلق دما در سال به ۲۰/۷- و حداکثر مطلق آن به ۴۰/۹ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. بیشترین تعداد روزهای یخبندان در ماه بهمن با ۳۰ روز ثبت شده و مجموع روزهای یخبندان سالانه به ۱۰۹ روز می‌رسد. بر اساس روش آمبرژه و دومارتن، اقلیم منطقه نیمه‌خشک است. همچنین، با استفاده از روش منحنی آمبروترمیک، دوره مرطوب این منطقه از اواخر مهر تا اوایل اردیبهشت محاسبه شده است. حوزه آبخیز کهنه جغتای بخشی از زون افیولیتی سبزوار محسوب می‌شود.

این مجموعه افیولیتی، یکی از نوارهای حلقوی ایران مرکزی است که از شمال تربت حیدریه تا سبزوار گسترش دارد. محدوده مطالعاتی و موقعیت آن نسبت به کشور در شکل ۱ نشان داده شده است.

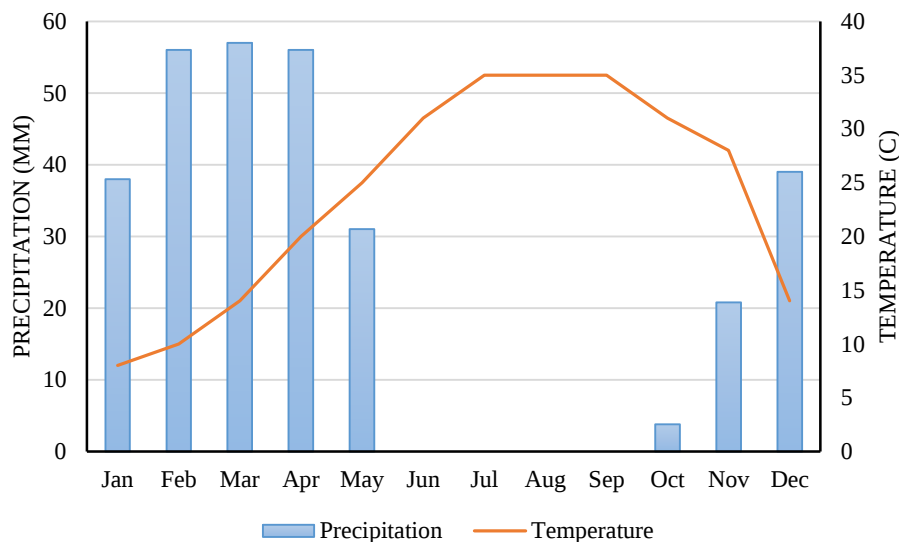


شکل ۱. موقعیت حوزه آبخیز کهنه در استان خراسان رضوی و ایران به همراه ناهمواری‌های منطقه مطالعاتی نمایش داده شده با نقشه
رقومی ارتفاعی

Fig 1. Location of the Kahneh watershed in Khorasan Razavi Province and Iran, along with the features of the study area displayed with a digital elevation map

داده‌های مورد استفاده

برای این تحقیق از داده‌های هواشناسی نزدیک‌ترین ایستگاه به منطقه مطالعاتی یعنی ایستگاه محمد آباد استفاده شد. میانگین بارش ماهانه این ایستگاه به همراه شاخص خشکسالی در شکل ۲ نمایش داده شده است. بر اساس اطلاعات ارائه شده میانگین بارش سالانه در آمار بیست‌ساله تهیه شده از اداره هواشناسی خراسان رضوی نزدیک به ۳۱۲ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه نزدیک به ۲۳/۸ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. ماه‌های تابستان اکثراً بدون بارش و ماه‌های پاییز تا زمستان دارای بارش می‌باشند. فصل رویش پوشش گیاهی در منطقه از اواسط بهمن آغاز و تا اواسط خرداد ادامه دارد.



شکل ۲. کلیموگراف ایستگاه هواشناسی محمد آباد در نزدیکی حوزه آبخیز کهنه در دوره زمانی بیست ساله
Fig 2. Climograph of Mohammad Abad meteorological station near Kahneh watershed over twenty years

شاخص NDVI

در این تحقیق، برای ارزیابی پوشش گیاهی و وضعیت سلامت آن در منطقه مورد نظر از شاخص NDVI استفاده شده است. NDVI یک شاخص طیفی است که با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و تحلیل اختلاف بین بازتابش نور قرمز و نور نزدیک به مادون قرمز، قادر است تا تغییرات پوشش گیاهی را شناسایی و اندازه‌گیری کند. این شاخص به‌طور گسترده‌ای در مطالعات اکوسیستم‌ها، کشاورزی و مدیریت منابع طبیعی کاربرد دارد و با مقادیر مختلف خود اطلاعات مفیدی در مورد تراکم و سلامت گیاهان فراهم می‌کند. NDVI برای ارزیابی پوشش گیاهی استفاده می‌شود و مقادیر آن بین -۱ تا ۱ متغیر است. مقادیر نزدیک به ۱ نشان‌دهنده پوشش گیاهی متراکم، مقادیر نزدیک به ۰ نشان‌دهنده زمین‌های خشک یا پوشش گیاهی کم‌چگال، و مقادیر منفی نشان‌دهنده اجسام غیر گیاهی مانند آب، سنگ یا برف هستند. فرمول شاخص NDVI به شکل زیر است (Bagherzadeh et al., 2020):

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

که در آن NIR نور نزدیک به مادون قرمز است که معمولاً از باند نزدیک مادون قرمز ماهواره‌ها مثل Landsat استخراج می‌شود. RED نور قرمز است که از باند قرمز همان تصویر ماهواره‌ای گرفته می‌شود.

پردازش اطلاعات

تمامی مراحل این پژوهش در پلتفرم Google Earth Engine (GEE) انجام شد. داده‌های مورد استفاده شامل بارش ECMWF برای تحلیل وضعیت بارش منطقه، و شاخص بارش استاندارد شده (SPI) که بر اساس داده‌های CHIRPS محاسبه شد، می‌باشد. شاخص SPI (Standardized Precipitation Index) یک ابزار نمایه‌ای است که برای اندازه‌گیری شدت و مدت خشکسالی و بارش‌های غیرعادی طراحی شده و می‌تواند برای تجزیه و تحلیل داده‌های بارش در مقیاس زمانی مختلف، از روزانه تا ماهانه یا سالانه، استفاده شود. در تحقیقاتی که با داده‌های بارش مرتبط است، ابتدا داده‌های بارش از منابع مختلف جمع‌آوری شده و سپس میانگین و انحراف معیار بارش محاسبه می‌شود. بعد از آن، با استفاده از فرمول SPI، مقادیر بارش استاندارد می‌شود تا انحرافات از وضعیت نرمال بارش

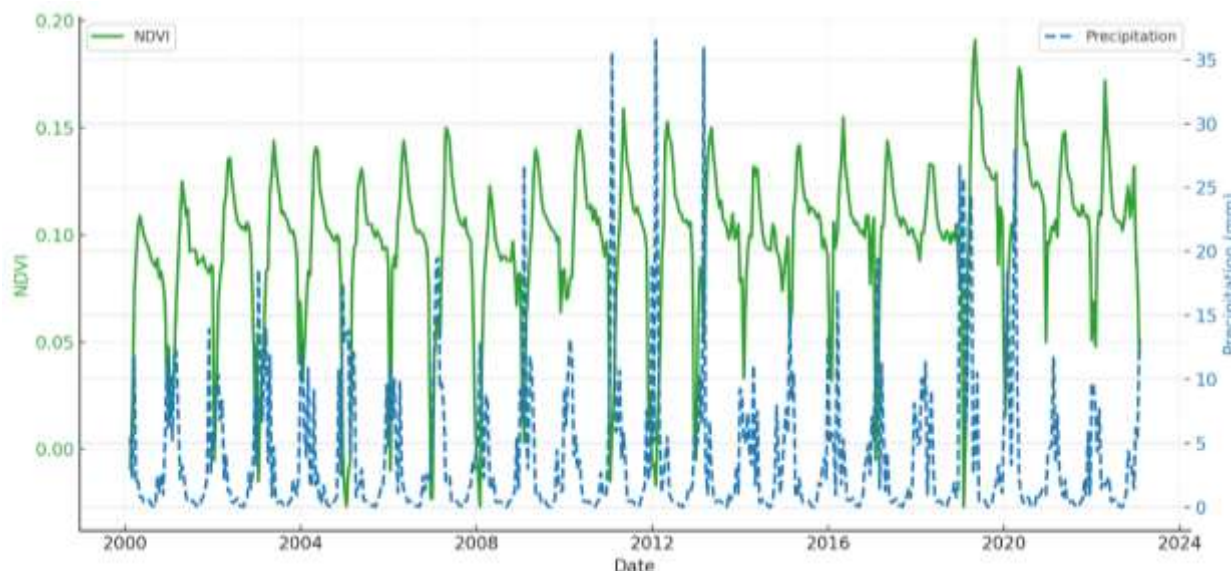
سنجیده شود. بر اساس مقادیر SPI، شرایط بارش به دسته‌های مختلف تقسیم می‌شود: مقادیر SPI مثبت (بیش از ۰/۱) نشان‌دهنده ترسالی هستند، مقادیر نزدیک به صفر نشان‌دهنده وضعیت نرمال و مقادیر منفی (کمتر از ۰/۱-) نشان‌دهنده خشکسالی می‌باشند. این تقسیم‌بندی به شبیه‌سازی شرایط خشکسالی یا ترسالی در مناطق مختلف و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی کمک می‌کند. همچنین برای تعیین شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) از تصاویر ماهواره‌ای Landsat 7 و Landsat 8 در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ استفاده شد. علاوه بر این، داده‌های ماهواره MODIS به منظور تکمیل اطلاعات و اطمینان از پوشش‌دهی مناسب داده‌ها مورد بهره‌برداری قرار گرفت. تمامی پیش‌پردازش‌ها نظیر تصحیحات اتمسفری، حذف ابر، محاسبه شاخص‌ها و تحلیل داده‌ها در محیط Google Earth Engine و با استفاده از ابزارها و اسکریپت‌های مرتبط این پلتفرم انجام شد.

نتایج و بحث

تغییرات همزمان بارش و پوشش گیاهی

در شکل ۳، تغییرات همزمان بارش و شاخص NDVI (شاخص پوشش گیاهی) در منطقه مطالعاتی نمایش داده شده است. این تغییرات روند کلی و ارتباط میان بارش و پوشش گیاهی را در بازه زمانی تحقیق نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، شاخص NDVI روندی هرچند کند اما روبه‌رشد داشته است، که نشان‌دهنده بهبود تدریجی وضعیت پوشش گیاهی در منطقه است. این روند رشد به‌ویژه در نیمه دوم بازه زمانی تحقیق برجسته‌تر شده و اوج‌های شاخص NDVI بیشتر و نوسانات آن نیز افزایش یافته است. بارش در نیمه دوم بازه زمانی نیز تغییرات قابل‌توجهی را نشان داده و بیشینه‌های آن در برخی ماه‌ها به حدود ۳۵ میلی‌متر رسیده است. این افزایش بارش در نیمه دوم دوره تحقیق می‌تواند دلیلی برای بهبود شرایط پوشش گیاهی باشد، زیرا تأمین آب کافی برای رشد گیاهان در مناطق نیمه‌خشک از اهمیت بالایی برخوردار است. تغییرات بارش و ارتباط آن با شاخص NDVI در این بازه زمانی نشان می‌دهد که افزایش میزان بارش توانسته است بر شاخص پوشش گیاهی تأثیر مثبتی داشته باشد و به تدریج باعث افزایش تراکم و کیفیت پوشش گیاهی شود.

همچنین نوسانات شاخص NDVI در انتهای بازه زمانی تحقیق به‌طور چشمگیری بیشتر شده است که می‌تواند نشان‌دهنده تأثیرپذیری شدیدتر پوشش گیاهی از تغییرات فصلی بارش و سایر عوامل محیطی باشد. این افزایش نوسانات، علاوه بر تأثیر مثبت بارش بر بهبود پوشش گیاهی، ممکن است به حساسیت بیشتر پوشش گیاهی نسبت به تغییرات اقلیمی و محیطی اشاره داشته باشد. به‌طور کلی، نتایج این بخش نشان می‌دهد که افزایش بارش در منطقه توانسته به بهبود نسبی پوشش گیاهی کمک کند، اما نوسانات آن و تأثیرات بلندمدت تغییرات اقلیمی همچنان نیازمند بررسی‌های دقیق‌تر هستند.



شکل ۳. تغییرات همزمان بارش و شاخص NDVI در منطقه مطالعاتی

Fig 3. Simultaneous changes in precipitation and the NDVI index in the study area

در این تحلیل، تعداد سال‌های مرطوب (wet years) برای دو بازه زمانی ۲۰۱۲-۲۰۰۰ و ۲۰۱۲-۲۰۲۴ با استفاده از میانگین سالانه شاخص SPI (شاخص استاندارد بارش) مورد بررسی قرار گرفت. در این تحلیل، سال‌هایی که میانگین سالانه SPI آن‌ها بزرگ‌تر یا مساوی ۰/۱ باشد، به عنوان سال‌های مرطوب تعریف شده‌اند. نتایج نشان داد که در بازه زمانی ۲۰۱۲-۲۰۰۰، تعداد ۸ سال مرطوب ثبت شده است. این سال‌ها شامل ۲۰۰۱، ۲۰۰۲، ۲۰۰۵، ۲۰۰۸، ۲۰۰۹، ۲۰۱۰، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ بوده‌اند که به وضوح نشان‌دهنده وجود دوره‌هایی با بارش قابل توجه و شرایط مرطوب‌تر در این بازه زمانی است.

در مقابل، در بازه زمانی ۲۰۱۲-۲۰۲۴، تعداد سال‌های مرطوب کاهش یافته و به ۴ سال محدود شده است که شامل سال‌های ۲۰۱۶، ۲۰۲۰، ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳ می‌باشد. این کاهش چشمگیر در تعداد سال‌های مرطوب می‌تواند به تغییرات اقلیمی و کاهش فراوانی بارش‌های قابل توجه نسبت داده شود. علاوه بر کاهش تعداد سال‌های مرطوب، نوسانات اقلیمی و میزان بارش سالانه در برخی سال‌های بازه زمانی ۲۰۱۲-۲۰۲۴ افزایش یافته است. این افزایش نوسانات می‌تواند نشان‌دهنده تأثیرات قابل توجه تغییرات اقلیمی بر الگوهای بارش در منطقه باشد. به طور کلی، یافته‌ها حاکی از آن است که در بازه زمانی اول، شرایط اقلیمی نسبتاً پایدارتر و تعداد سال‌های مرطوب بیشتر بوده، در حالی که در بازه زمانی دوم، هرچند تعداد سال‌های مرطوب کاهش یافته است، اما بارش‌های شدیدتر و نوسانات بیشتری در برخی سال‌ها مشاهده شده که اهمیت مطالعه اثرات تغییرات اقلیمی را برجسته می‌سازد.

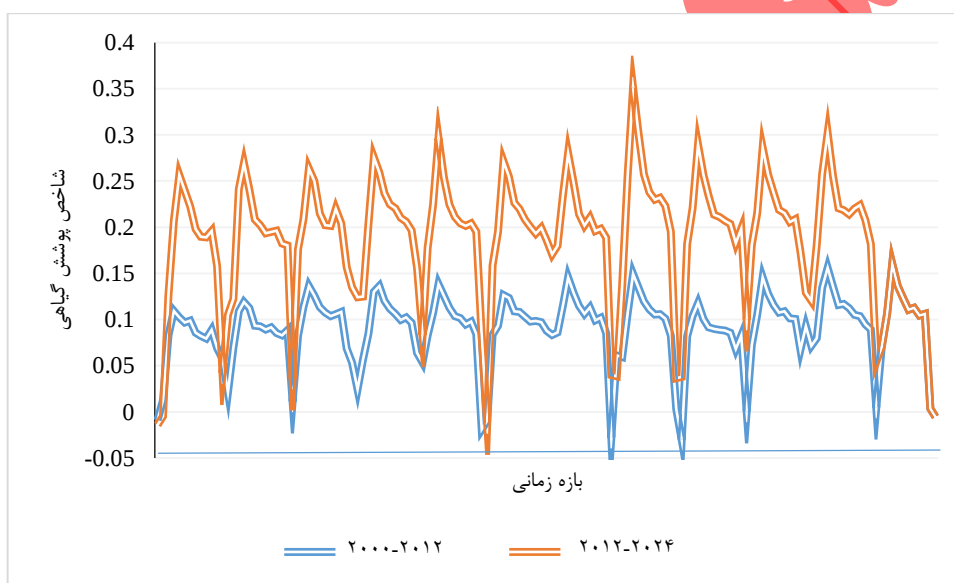
تغییرات فصلی و ماهانه NDVI

در شکل ۴، تغییرات شاخص NDVI در دو بازه زمانی ۲۰۱۲ تا ۲۰۰۰ و ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۴ به تفصیل نشان داده شده است. این مقادیر نشان‌دهنده میزان شاخص NDVI در بازه‌های زمانی ماهانه هستند. همان طور که از نمودارهای حاصل مشهود است، میزان این شاخص در بازه زمانی ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۴ نسبت به بازه قبلی رشد قابل توجهی را تجربه کرده است. این تغییرات به وضوح در پایان دوره دوم خود را نشان می‌دهند، به طوری که در این بازه زمانی، شرایط بهبود چشمگیری در پوشش گیاهی منطقه مشاهده می‌شود. این روند افزایشی، به ویژه در پایان دوره دوم، حاکی از بهبود شرایط زیستی و پوشش گیاهی در این منطقه می‌باشد.

اگر این تغییرات را در کنار داده‌های بارش و شاخص SPI (شاخص خشکسالی استاندارد) برای منطقه مورد تحلیل قرار دهیم، نتایج به وضوح نشان می‌دهند که با افزایش میزان بارش در این منطقه، پوشش گیاهی بهبود یافته و وضعیت خشکسالی کاهش یافته است.

افزایش بارش باعث بهبود شرایط خاک شده و همچنین موجب بهبود وضعیت اکولوژیکی منطقه می‌شود. این تحولات به‌طور مستقیم با افزایش پوشش گیاهی مرتبط است. به عبارت دیگر، وضعیت خاک و شرایط اکولوژیکی بهبود یافته باعث می‌شود که شرایط بهتری برای رشد پوشش گیاهی فراهم شود.

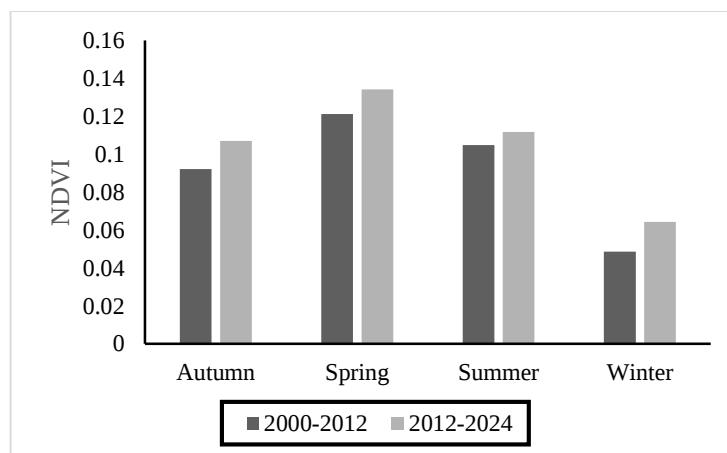
یکی از نکات قابل توجه در این تحقیق، این است که بیشترین میزان پوشش گیاهی در این شاخص با یک تأخیر زمانی نسبت به بیشترین میزان بارش مشاهده شده است. این پدیده نشان می‌دهد که بارش‌های بیشتر به زمان نیاز دارند تا اثرات خود را بر شرایط اکولوژیکی و پوشش گیاهی بگذارند. این تأخیر نشان می‌دهد که پوشش گیاهی برای پاسخ به تغییرات بارش به زمان بیشتری نیاز دارد و به سرعت به بارش‌های جدید واکنش نشان نمی‌دهد. به همین دلیل، افزایش بارش به تنهایی نمی‌تواند به‌طور قطعی به بهبود وضعیت پوشش گیاهی منجر شود. عوامل دیگری نظیر وضعیت خاک و تأخیر زمانی در واکنش پوشش گیاهی به بارش‌ها، بر این روند تأثیرگذار هستند. بنابراین، نمی‌توان تنها بر اساس افزایش بارش به بهبود قطعی پوشش گیاهی اطمینان حاصل کرد، بلکه باید عوامل مختلف دیگری را نیز در نظر گرفت که تأثیرات پیچیده‌ای بر وضعیت پوشش گیاهی دارند.



شکل ۴. تغییرات شاخص NDVI در مقیاس ماهانه در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۲ (نمودار پایینی) و ۲۰۱۲-۲۰۲۴ (نمودار بالایی)
Fig 4. Changes in the NDVI index on a monthly scale in the period 2000-2012 (bottom graph) and 2012-2024 (top graph)

در شکل ۵، تغییرات فصلی شاخص NDVI در منطقه مورد مطالعه به وضوح نمایش داده شده است. همان طور که داده‌های قبلی نیز نشان دادند، در بازه زمانی ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۴ نسبت به دوره اول ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۲، بهبود قابل توجهی در شاخص NDVI مشاهده می‌شود. این تغییرات در هر فصل سال قابل ملاحظه است و نشان‌دهنده روند کلی بهبود پوشش گیاهی در منطقه می‌باشد. افزایش بارش در دوره دوم، که در مقایسه با دوره اول قابل توجه است، نقش مهمی در این بهبود ایفا کرده است. بارش‌های بیشتر در دوره دوم شرایط بهتری را برای رشد پوشش گیاهی فراهم کرده‌اند، که به وضوح در تمامی فصول سال مشهود است. این بهبود در پوشش گیاهی نه تنها در فصل‌های بارانی بلکه در فصول خشک نیز قابل مشاهده است، که حاکی از تأثیرات مثبت طولانی مدت افزایش بارش‌ها بر شرایط زیستی منطقه می‌باشد.

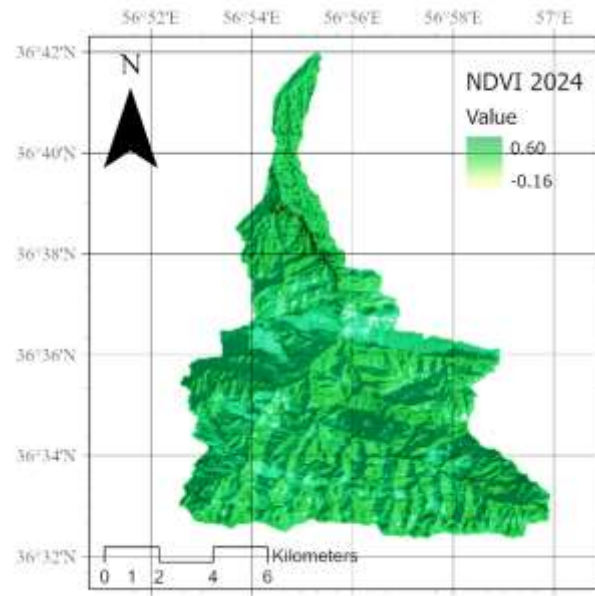
به‌طور کلی، این تغییرات نشان می‌دهند که با افزایش بارش در دوره دوم، پوشش گیاهی توانسته است در همه فصول، از جمله فصول خشک‌تر، وضعیت بهتری پیدا کند. این بهبود نشان‌دهنده اثرات مثبت بارش‌های اضافی بر اکوسیستم منطقه و تقویت شرایط زیست‌محیطی در آن است.



شکل ۵. تغییرات فصلی شاخص NDVI در دو بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۲ و ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۴ در منطقه مطالعاتی

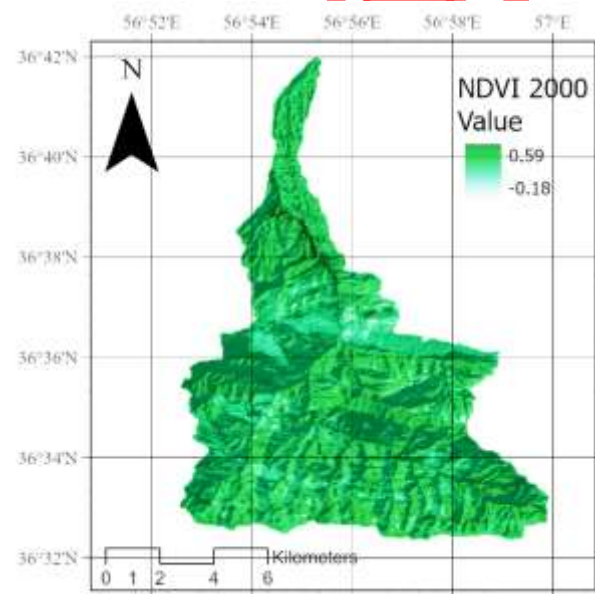
Fig 5. Seasonal changes in the NDVI index in the two periods, 2000 to 2012 and 2012 to 2024, in the study area

تغییرات شاخص NDVI در دو سال ۲۰۰۰ و ۲۰۲۴ که از تصاویر Landsat استخراج شده‌اند، در شکل ۶ به نمایش درآمده است. اگرچه میزان شاخص NDVI در این دو سال، بر اساس نقشه‌های حاصل، تغییرات قابل توجهی را نشان نمی‌دهند، اما بررسی میانگین دو بازه زمانی در نظر گرفته شده، نشان‌دهنده بهبود پوشش گیاهی در منطقه مطالعاتی است. در واقع، علی‌رغم اینکه تغییرات جزئی در نقشه‌ها قابل مشاهده است، تجزیه و تحلیل میانگین‌ها این را تأیید می‌کند که روند کلی پوشش گیاهی به سمت بهبود پیش رفته است. یکی از نشانه‌های بارز این بهبود، در آبراهه‌های شمالی منطقه مشاهده می‌شود. در این نواحی، شرایط رطوبتی بهبود یافته و پوشش گیاهی حاشیه آبراهه‌ها در مقایسه با سال ۲۰۰۰ وضعیت بهتری پیدا کرده است. این تغییرات نشان‌دهنده تأثیرات مثبت افزایش رطوبت و بارش بر این نواحی می‌باشد که به تقویت پوشش گیاهی در حاشیه آبراهه‌ها انجامیده است. در کنار این تصاویر، نمودار توزیع مقادیر شاخص NDVI نیز ارائه شده است. همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود، میانگین شاخص و طبقات بالاتر آن در منطقه ارتقا یافته‌اند. این امر می‌تواند نشانه‌ای از بهبود شرایط پوشش گیاهی در منطقه باشد. به‌طور خاص، میانگین شاخص NDVI از ۰/۰۶ در سال ۲۰۰۰ به ۰/۱۰ در سال ۲۰۲۴ افزایش یافته است که نشان‌دهنده افزایشی تقریباً دو برابری در این شاخص است. این تغییرات مثبت در شاخص NDVI، به وضوح نمایانگر بهبود پوشش گیاهی و شرایط زیستی در منطقه است که احتمالاً نتیجه افزایش بارش و بهبود شرایط اکولوژیکی می‌باشد.



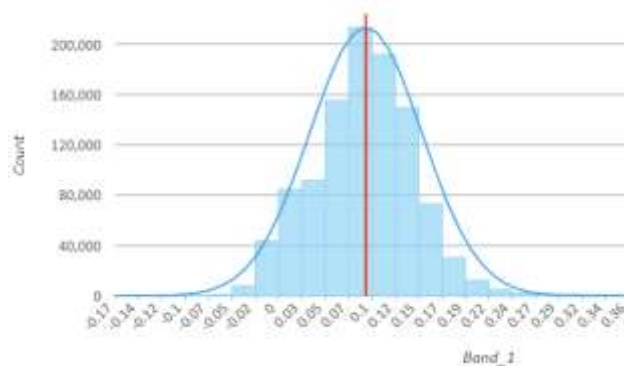
(الف

a)

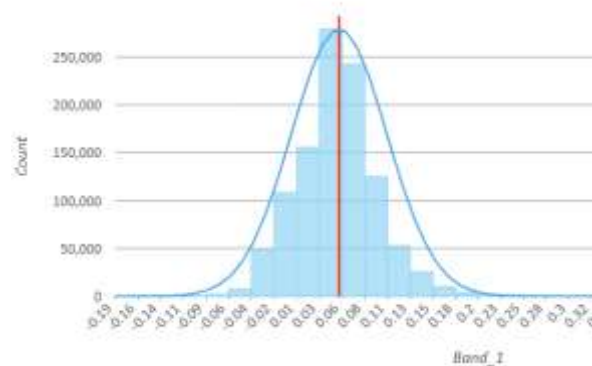


(ب

b)



(ج)
c)



(د)
d)

شکل ۶ تغییرات شاخص NDVI بین سال‌های ۲۰۰۰ (الف و ج) و ۲۰۲۴ (ب و د)

Fig 6. Changes in NDVI index between 2000 and 2024

نتیجه گیری

نتایج این تحقیق نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه بارش بر وضعیت پوشش گیاهی منطقه در دو بازه زمانی ۲۰۱۲-۲۰۲۴ و ۲۰۰۰-۲۰۱۲ است. طبق شکل ۲، تغییرات هم‌زمان بارش و شاخص NDVI، روندی صعودی و بهبود تدریجی در پوشش گیاهی منطقه را در این بازه زمانی نشان می‌دهند. این روند به‌ویژه در نیمه دوم دوره تحقیق بیشتر مشهود است، جایی که نوسانات شاخص NDVI افزایش یافته و اوج‌های بیشتری را تجربه کرده است. این تغییرات می‌تواند ناشی از افزایش بارش در نیمه دوم دوره باشد که تأثیر مستقیم بر پوشش گیاهی دارد. در واقع، افزایش بارش در این دوره باعث فراهم شدن شرایط بهتری برای رشد گیاهان شده و بهبود رطوبت خاک، که از عوامل اصلی در مناطق نیمه‌خشک است، در تقویت پوشش گیاهی نقش داشته است. نتایج این تحقیق با (Doulabian et al., 2021) متفاوت است. نامبردگان در تحقیق خود تحت سناریوهای مختلف شاهد کاهش بارش در اکثر مناطق ایران در آینده بوده‌اند که می‌تواند به کاهش پوشش گیاهی منجر شود. هرچند حوزه مورد مطالعه در این تحقیق حوزه کوچکی است سناریوهای اقلیمی آتی مورد بررسی نبوده و روند فعلی تغییرات اقلیمی تا ۲۰۲۴ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. به همین دلیل ممکن است تغییرات اقلیمی کلی در مقیاس محلی اندکی متفاوت عمل کند که با نتایج تریودی (Trivedi et al., 2008) همخوانی دارد.

افزایش بارش در نیمه دوم بازه زمانی، به‌ویژه در ماه‌هایی که بیشینه‌های بارش به حدود ۳۵ میلی‌متر رسیده‌اند، توانسته است تأثیر مثبتی بر تراکم و کیفیت پوشش گیاهی داشته باشد. این موضوع نشان‌دهنده اهمیت بارش به‌عنوان عامل کلیدی در بهبود وضعیت پوشش گیاهی در نواحی خشک و نیمه‌خشک است (Kalma and Franks 2003). از سوی دیگر، نوسانات بیشتر شاخص NDVI در انتهای دوره تحقیق، به‌ویژه در سال‌های اخیر، ممکن است نشان‌دهنده حساسیت بیشتر پوشش گیاهی به تغییرات فصلی و همچنین تأثیرات تغییرات اقلیمی باشد (Kong et al., 2017). این محققین بیان نمودند که تغییرات فصلی دما، رطوبت خاک و میزان تابش عوامل کلیدی ناشی از تغییر اقلیم هستند که بر پوشش گیاهی در نیمکره شمالی اثرگذار می‌باشند.

تحلیل تعداد سال‌های مرطوب در دو بازه زمانی ۲۰۱۲-۲۰۰۰ و ۲۰۲۴-۲۰۱۲ طبق شاخص SPI نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل توجه در شرایط اقلیمی این دو دوره است. در حالی که در دوره اول (۲۰۱۲-۲۰۰۰) تعداد سال‌های مرطوب بیشتر بوده است، در دوره دوم (۲۰۲۴-۲۰۱۲) تعداد سال‌های مرطوب کاهش یافته و نوسانات اقلیمی نیز افزایش یافته است. این کاهش تعداد سال‌های مرطوب و افزایش نوسانات بارش در دوره دوم می‌تواند به تغییرات اقلیمی و کاهش فراوانی بارش‌های شدید نسبت داده شود. این تغییرات اقلیمی، علاوه بر تأثیر بر پوشش گیاهی، می‌تواند بر سایر جنبه‌های زیست‌محیطی منطقه نیز تأثیرگذار باشد تحقیقات زیادی نشان دهنده تغییر فراوانی خشکسالی و ترسالی بر اثر تغییرات اقلیمی می‌باشند که می‌توان به لوکاس و همکاران (Loukas et al., 2008) و حسین‌زاده و همکاران (Hosseinizadeh et al., 2015) اشاره کرد.

در تحلیل تغییرات ماهانه شاخص NDVI در بازه‌های ۲۰۱۲-۲۰۰۰ و ۲۰۲۴-۲۰۱۲ (شکل ۴)، مشاهده شد که در بازه زمانی دوم، پوشش گیاهی به‌طور قابل توجهی بهبود یافته است. این بهبود در ارتباط مستقیم با افزایش بارش در دوره دوم است، که باعث بهبود شرایط خاک و کاهش اثرات خشکسالی شده است. این تغییرات نشان می‌دهند که افزایش بارش توانسته شرایط اکولوژیکی منطقه را تقویت کند و در نهایت به بهبود پوشش گیاهی منجر شود. نکته قابل توجه این است که بیشترین میزان پوشش گیاهی معمولاً با تأخیر زمانی نسبت به بیشترین میزان بارش مشاهده می‌شود. این پدیده تأثیرگذار به این معناست که پوشش گیاهی به زمان نیاز دارد تا به تغییرات بارش پاسخ دهد، و این تأخیر ممکن است بسته به وضعیت خاک و سایر عوامل محیطی تغییر کند. تأخیر در اثرگذاری اقلیمی بر پوشش گیاهی در موارد زیادی به اثبات رسیده که می‌توان به تحقیقات زو و همکاران (Zuo et al., 2021) و شو و همکاران (Xu et al., 2019) اشاره کرد.

در تحلیل فصلی شاخص NDVI (شکل ۵)، بهبود پوشش گیاهی در تمامی فصول سال به‌ویژه در فصل‌های خشک نیز مشهود است. این نشان‌دهنده اثرات مثبت افزایش بارش در دوره دوم بر پوشش گیاهی است. با توجه به اینکه بارش‌های بیشتر در دوره دوم به شرایط بهتری برای رشد پوشش گیاهی منجر شده‌اند، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش بارش توانسته به‌طور چشمگیری شرایط زیستی منطقه را بهبود بخشد. این روند افزایشی در پوشش گیاهی نه تنها در فصول بارانی بلکه در فصول خشک نیز خود را نشان داده است، که بیانگر تأثیر مثبت بلندمدت بارش‌ها بر اکوسیستم است.

در نهایت، تحلیل تغییرات شاخص NDVI در دو سال ۲۰۰۰ و ۲۰۲۴ (شکل ۶) نشان می‌دهد که با وجود اینکه تغییرات شاخص در این دو سال به خودی خود قابل توجه نبوده، تحلیل میانگین‌های دو دوره نشان‌دهنده بهبود چشمگیر پوشش گیاهی است. این بهبود به‌ویژه در نواحی شمالی منطقه و در آبراهه‌ها بیشتر مشهود است. افزایش رطوبت و بارش در این مناطق باعث بهبود شرایط خاک و تقویت پوشش گیاهی در حاشیه آبراهه‌ها شده است. همچنین، افزایش میانگین شاخص NDVI از ۰/۰۶ در سال ۲۰۰۰ به ۰/۱۰ در سال ۲۰۲۴ که نشان‌دهنده افزایشی تقریباً دو برابری است، به وضوح تأثیر مثبت بارش و بهبود شرایط اکولوژیکی بر پوشش گیاهی منطقه را تایید می‌کند.

با وجود نتایج مثبت این تحقیق، برخی محدودیت‌ها و کاستی‌ها وجود دارند که نیاز به تحقیقات آینده را ضروری می‌سازند. یکی از محدودیت‌های اصلی، استفاده از داده‌های ماهانه شاخص NDVI است که ممکن است نتایج دقیقی از تغییرات مقیاس روزانه یا فصلی به‌دست ندهد. استفاده از داده‌های روزانه می‌تواند به تجزیه و تحلیل دقیق‌تری از نوسانات سریع پوشش گیاهی و واکنش‌های آن به بارش‌های غیرمنتظره کمک کند. دیگر محدودیت این تحقیق، نبود تحلیل جامع در خصوص تأثیر سایر عوامل محیطی مانند دما،

رطوبت، نوع خاک و پوشش گیاهی بومی در تغییرات شاخص NDVI است. گرچه بارش نقش کلیدی در بهبود پوشش گیاهی دارد، اما تأثیرات دیگر عوامل محیطی نیز باید در مطالعات آینده در نظر گرفته شوند. علاوه بر این، در این تحقیق فقط از تصاویر Landsat برای تحلیل تغییرات پوشش گیاهی استفاده شده است. استفاده از داده‌های سنجنده‌های دیگر مانند Sentinel یا حتی داده‌های راداری می‌تواند دیدگاه‌های بیشتری در مورد تغییرات پوشش گیاهی و تأثیرات تغییرات اقلیمی بر آن فراهم آورد. برای تحقیقات آینده، پیشنهاد می‌شود که اثرات تغییرات اقلیمی بر پوشش گیاهی و شرایط اکولوژیکی منطقه در بازه‌های زمانی بلندمدت‌تر مورد بررسی قرار گیرد. همچنین، نیاز است که مدل‌های پیش‌بینی تغییرات پوشش گیاهی در مواجهه با تغییرات اقلیمی و بارش‌های شدیدتر در آینده توسعه یابند تا تأثیرات بلندمدت تغییرات اقلیمی بر اکوسیستم‌های منطقه بهتر ارزیابی شوند.

منابع

- Bagherzadeh, A., Hoseini, A. V., & Totmaj, L. H. (2020). The effects of climate change on normalized difference vegetation index (NDVI) in the Northeast of Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6, 671–683. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00724-x>
- Doulabian, S., Toosi, A. S., Calbimonte, G. H., Tousi, E. G., & Alaghmand, S. (2021). Projected climate change impacts on soil erosion over Iran. *Journal of Hydrology*, 598, 126432. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126432>
- Farooqhi, F., Ebrahimi, Z., & Rahime, M. (2022). Evaluation of Quaternary soil sensitivity with NDVI indices and soil moisture about nonparametric climate change. *Climate Change Research*, 3(9), 41–52.
- Ghorbanian, A., Mohammadzadeh, A., & Jamali, S. (2022). Linear and non-linear vegetation trend analysis throughout Iran using two decades of MODIS NDVI imagery. *Remote Sensing*, 14(15), 3683. <https://doi.org/10.3390/rs14153683>
- Golla, B. (2021). Agricultural production system in arid and semi-arid regions. *International Journal of Agricultural Science and Food Technology*, 7(2), 234–244. <https://doi.org/10.17352/2455-815X.000113>
- Gong, Z., Ge, W., Guo, J., & Liu, J. (2024). Satellite remote sensing of vegetation phenology: Progress, challenges, and opportunities. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 217, 149–164. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2024.08.011>
- Hosseinzadeh, A., SeyedKaboli, H., Zareie, H., Akhondali, A., & Farjad, B. (2015). Impact of climate change on the severity, duration, and frequency of drought in a semi-arid agricultural basin. *Geoenvironmental Disasters*, 2, 1–9. <https://doi.org/10.1186/s40677-015-0031-8>
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32(1), 1–6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
- Huete, A. R. (2012). Vegetation indices, remote sensing, and forest monitoring. *Geography Compass*, 6(9), 513–532. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2012.00507.x>
- Jabal, Z. K., Khayyun, T. S., & Alwan, I. A. (2022). Impact of climate change on crop productivity using MODIS-NDVI time series. *Civil Engineering Journal*, 8(6), 1136–1156. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-06-04>
- Kalma, J. D., & Franks, S. W. (2003). Rainfall in arid and semi-arid regions. In *Understanding water in a dry environment* (pp. 31–80). CRC Press.
- Kong, D., Zhang, Q., Singh, V. P., & Shi, P. (2017). Seasonal vegetation response to climate change in the Northern Hemisphere (1982–2013). *Global and Planetary Change*, 148, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.10.020>
- Loukas, A., Vasiliades, L., & Tzabiras, J. (2008). Climate change effects on drought severity. *Advances in Geosciences*, 17, 23–29. <https://doi.org/10.5194/adgeo-17-23-2008>
- Ma, S., Wang, L.-J., Jiang, J., Chu, L., & Zhang, J.-C. (2021). Threshold effect of ecosystem services in response to climate change and vegetation coverage change in the Qinghai-Tibet Plateau ecological shelter. *Journal of Cleaner Production*, 318, 128592. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128592>
- Milewski, R., Schmid, T., Chabrillat, S., Jiménez, M., Escribano, P., Pelayo, M., & Ben-Dor, E. (2022). Analyses of the impact of soil conditions and soil degradation on vegetation vitality and crop productivity based on airborne

hyperspectral VNIR–SWIR–TIR data in a semi-arid rainfed agricultural area (Camarena, Central Spain). *Remote Sensing*, 14(20), 5131. <https://doi.org/10.3390/rs14205131>

Owen, D., Davis, A. P., & Aydilek, A. H. (2021). Compost for permanent vegetation establishment and erosion control along highway embankments. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 147(8), 04021031. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001587](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001587)

Prăvălie, R. (2021). Exploring the multiple land degradation pathways across the planet. *Earth-Science Reviews*, 220, 103689. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103689>

Ren, Y., Liu, J., Liu, S., Wang, Z., Liu, T., & Shalamzari, M. J. (2022). Effects of climate change on vegetation growth in the Yellow River Basin from 2000 to 2019. *Remote Sensing*, 14(3), 687. <https://doi.org/10.3390/rs14030687>

Trivedi, M. R., Berry, P. M., Morecroft, M. D., & Dawson, T. P. (2008). Spatial scale affects bioclimate model projections of climate change impacts on mountain plants. *Global Change Biology*, 14(5), 1089–1103. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01553.x>

Wu, L., Ma, X., Dou, X., Zhu, J., & Zhao, C. (2021). Impacts of climate change on vegetation phenology and net primary productivity in arid Central Asia. *Science of the Total Environment*, 796, 149055. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149055>

Xu, C., McDowell, N. G., Fisher, R. A., Wei, L., Sevanto, S., Christoffersen, B. O., Weng, E., & Middleton, R. S. (2019). Increasing impacts of extreme droughts on vegetation productivity under climate change. *Nature Climate Change*, 9(12), 948–953. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0630-6>

Ying, L., Wang, L., Huang, X., Rao, E., Xiao, Y., Zheng, H., Shen, Z., & Ouyang, Z. (2024). Climate change impairs the effects of vegetation improvement on soil erosion control in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Catena*, 241, 108062. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108062>

Yue, W., Xu, J., Tan, W., & Xu, L. (2007). The relationship between land surface temperature and NDVI with remote sensing: Application to Shanghai Landsat 7 ETM+ data. *International Journal of Remote Sensing*, 28(15), 3205–3226. <https://doi.org/10.1080/01431160500306906>

Zuo, D., Han, Y., Xu, Z., Li, P., Ban, C., Sun, W., Pang, B., Peng, D., Kan, G., & Zhang, R. (2021). Time-lag effects of climatic change and drought on vegetation dynamics in an alpine river basin of the Tibet Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 600, 126532. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126532>