

Vegetation Trend Analysis Using MODIS NDVI Time Series in the Marun Basin

Leila Mokaram¹, Ahmad Mazidi^{2,*}, Kamal Omidvar³

- 1- Ph.D. Student in Climatology, Department of Geography, Faculty of Humanities, Yazd University, Iran .ORCID:0009-0009-0947-9162
- 2- Associate Professor, Department of Geography and Climatology, Faculty of Humanities, Yazd University, Yazd, Iran. ORCID:0000-0003-4558-9907
- 3- Professor, Department of Geography and Climatology, Faculty of Humanities, Yazd University, Yazd, Iran .ORCID:0000-0002-4956-3002

Corresponding Author: Mazidi@yazd.ac.ir

Extended abstract

Introduction

Vegetation cover is a fundamental component of ecosystems, particularly in arid and semi-arid regions, playing a critical role in biodiversity conservation, soil erosion mitigation, carbon sequestration, and environmental sustainability. Given that such ecosystems are highly susceptible to both climatic fluctuations and anthropogenic pressures, long-term monitoring of vegetation dynamics is essential for effective natural resource management and environmental protection. In this context, remote sensing and satellite time-series data provide an efficient, spatially extensive, and temporally continuous tool for assessing vegetation changes, with the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) as a primary metric. Previous research has employed various satellite-derived datasets and statistical approaches to characterize vegetation trends across diverse spatial scales. While tests such as the Mann-Kendall and Sen's slope estimator are widely recognized for detecting long-term monotonic trends, many studies have overlooked the simultaneous integration of trend magnitude, intensity, and abrupt change-point analysis. To address this research gap, the present study utilizes a comprehensive long-term NDVI time series derived from MODIS imagery (2001–2023) within the Marun Basin. By integrating the Mann-Kendall, Sen's slope, and Sequential Mann-Kendall (SQMK) tests, this study aims to provide a robust analysis of vegetation dynamics, offering a scientific foundation for long-term monitoring, land-use management, and the identification of degradation-prone areas.

Materials and Methods

The Maroon watershed, covering approximately 3,808 km², is located in southwestern Iran on the slopes of the Zagros Mountains and extends across parts of Khuzestan and Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad provinces. In this study, 23 years of NDVI data (2001–2023) derived from the MOD13A1 product of the MODIS sensor aboard the Terra satellite were used to monitor vegetation cover changes. These data, with a spatial resolution of 500 m and a temporal resolution of 16 days, were extracted from the Google Earth Engine platform. To improve data reliability, the quality assurance layer was applied during preprocessing to remove low-quality pixels, including those affected by clouds and cloud shadow, and annual mean NDVI values were then calculated from the cloud-free observations for each year. The extracted data were subsequently transferred to a GIS environment and processed in ArcGIS 10.2 to generate annual vegetation cover maps. To assess vegetation change trends, the non-parametric Mann-Kendall test was employed to determine the significance and direction of trends. At the same time, Sen's slope estimator was used to quantify the magnitude of change. These methods were selected because of their robustness to outliers and their suitability for non-normally distributed time-series data. Initial data processing was conducted in the JavaScript environment of Google Earth Engine, whereas the statistical analyses were performed in RStudio using the R programming language. Overall, the integration of Google Earth Engine, GIS-based spatial analysis, and non-parametric statistical methods provided a comprehensive framework for examining the spatial and temporal patterns of vegetation change in the Maroon watershed. Figure 1 illustrates the methodological framework of this study.

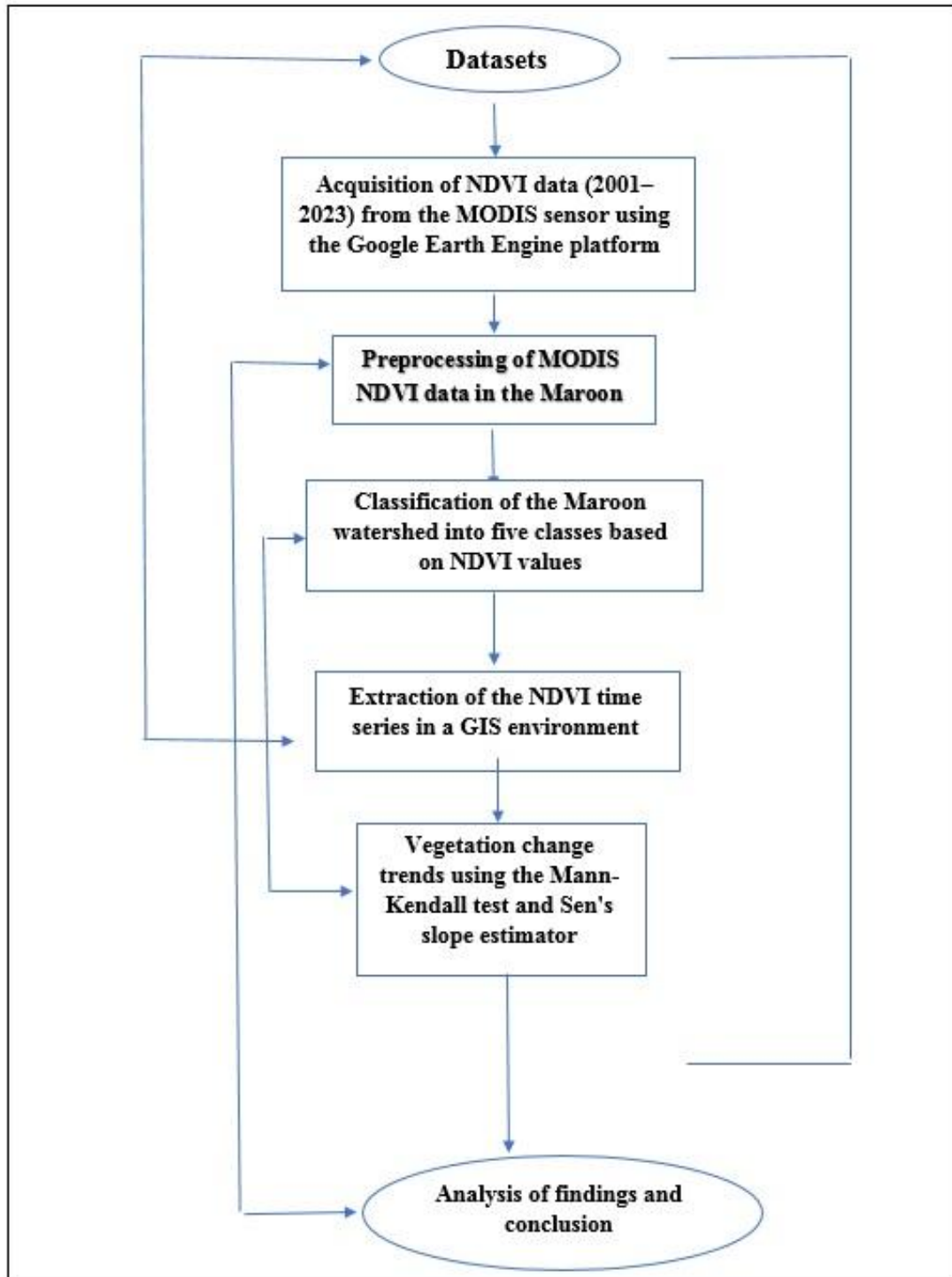


Fig 1. Research flowchart

Results and Discussion

Between 2001 and 2023, the Maroon watershed exhibited significant temporal fluctuations in vegetation cover, while its spatial distribution pattern remained relatively stable. Changes in vegetation manifested primarily as variations in greenness intensity rather than significant displacement of core vegetation areas. Within the study period, 2008 and 2023 were identified as the poorest and most favorable years, respectively. Trend analyses (Mann-Kendall and Sen's slope) revealed a significant decline in low-density vegetation classes, contrasted by a significant increase in moderate-density classes, suggesting a gradual improvement in vegetation conditions across parts of the watershed. Furthermore, the Sequential Mann-Kendall (SQMK) test identified a structural shift between 2011 and 2016, indicating a transition from a relatively static state to a more dynamic vegetation pattern.

Collectively, these findings underscore the efficacy of integrating spatial, temporal, and change-point analyses as a robust framework for precise ecological monitoring and informed decision-making in watershed management.

Conclusion

This study demonstrated that while the Maroon watershed maintained stable spatial patterns of vegetation between 2001 and 2023, it exhibited significant temporal fluctuations in vegetation density. Statistical analyses (Mann–Kendall and Sen’s slope) revealed a significant decreasing trend in low-density vegetation classes alongside an increasing trend in moderate-density classes, indicating a gradual improvement in vegetation cover. The identification of a structural break between 2012 and 2014 suggests a shift in the system’s temporal behavior toward a more dynamic state. These findings, consistent with previous research, validate the effectiveness of integrating MODIS NDVI time-series data with non-parametric statistical tests (Mann–Kendall and SQMK) for robust ecological monitoring. This methodological framework provides a reliable basis for natural resource management and conservation planning. Future studies should complement these findings by investigating the behavior of extreme NDVI values to provide a more comprehensive assessment of vegetation dynamics.

Keywords: NDVI; Mann–Kendall test; Sen’s slope; Sequential Mann–Kendall (SQMK); Maroon Watershed.

Pre-publication version

تحلیل روند پوشش گیاهی با استفاده از سری زمانی NDVI ماهواره مودیس در حوضه آبریز مارون

لیلا مکرم^۱، احمد مزیدی^{۲*}، کمال امیدوار^۳

۱- دانشجوی دکترای مخاطرات آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

۲- دانشیار گروه جغرافیا، آب و هواشناسی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

۳- استاد گروه جغرافیا، آب و هواشناسی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

*نویسنده مسئول: Mazidi@yazd.ac.ir

چکیده

پایش روندهای بلندمدت پوشش گیاهی نقش مهمی در درک پویایی اکوسیستم‌ها و مدیریت پایدار منابع طبیعی دارد. در این پژوهش، تغییرات زمانی و مکانی پوشش گیاهی در حوضه آبریز مارون طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ با استفاده از سری زمانی شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا توزیع مکانی-زمانی NDVI سالانه تحلیل گردید و سپس به منظور تعیین جهت و معنی‌داری روندها از آزمون ناپارامتری Mann-Kendall و برآوردگر Sen's slope استفاده گردید. همچنین برای شناسایی نقاط تغییر در روند پوشش گیاهی، آزمون Sequential Mann-Kendall (SQMK) به کار گرفته شد. نتایج تحلیل نقشه‌های سالانه نشان داد که اگرچه پوشش گیاهی حوضه در طول دوره مطالعه دارای نوسانات زمانی قابل توجهی است اما الگوی مکانی آن از پایداری نسبی برخوردار بوده و کانون‌های اصلی پوشش گیاهی عمدتاً در بخش‌های جنوبی و جنوب غربی حوضه متمرکز بوده‌اند. در میان سال‌های مطالعه، سال ۲۰۰۸ به عنوان کمینه پوشش گیاهی و سال ۲۰۲۳ به عنوان بیشینه سبزینه‌گی در کل دوره زمانی شناسایی شد. نتایج آزمون من-کندال نشان داد که طبقات پایین NDVI شامل $NDVI \leq 0.1$ و $0.1-0.2$ دارای روند کاهشی معنادار در سطح اطمینان ۹۹ درصد هستند، در حالی که طبقه $NDVI = 0.2-0.4$ روند افزایشی معناداری را نشان می‌دهد. در مقابل، طبقات با NDVI بالاتر روند معنی‌داری را نشان ندادند و از پایداری نسبی برخوردار بودند. نتایج آزمون SQMK نیز وجود نقاط تغییر عمده در حدود ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۴ را آشکار ساخت. به طور کلی، کاهش سطوح با NDVI پایین و افزایش نسبی طبقات NDVI متوسط بیانگر جابه‌جایی تدریجی از پوشش گیاهی بسیار تنک به پوشش متراکم‌تر و در نتیجه بهبود نسبی وضعیت پوشش گیاهی در بخش‌هایی از حوضه مارون طی دو دهه اخیر است. این یافته‌ها می‌تواند مبنای مناسبی برای پایش اکوسیستم، مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی حفاظتی در مناطق خشک و نیمه‌خشک باشد. واژگان کلیدی: NDVI، آزمون من-کندال، شیب سن، SQMK، حوضه آبریز مارون

مقدمه

پوشش گیاهی به عنوان یک محرک اصلی در تغییر شرایط زیستگاه‌ها و ترکیب گونه‌ها، یکی از مباحث مهم زیستی محسوب می‌شود (Rannow et al., 2014). نوسانات در وضعیت سلامت و تراکم توده‌های گیاهی که غالباً تحت تأثیر دگرگونی‌های اقلیمی و یا تغییر در الگوی کاربری اراضی رخ می‌دهد، می‌تواند پایداری اکوسیستم‌های جهانی، به‌ویژه پهنه‌های حساس خشک و نیمه‌خشک را با چالش‌های جدی مواجه سازد. ارزیابی دقیق این روندها در بازه‌های زمانی طولانی‌مدت از طریق تحلیل‌های آماری سری زمانی و پایش توزیع مکانی آن‌ها با بهره‌گیری از فناوری سنجنش از دور امکان‌پذیر است. امروزه، سامانه‌های ماهواره‌ای به دلیل ارائه پوشش وسیع و تداوم در تولید داده، به ابزاری بی‌بدیل برای مطالعه پویایی‌های گیاهی در مقیاس‌های کلان تبدیل شده‌اند (Harris et al., 2014). در سال‌های اخیر استفاده از تکنیک‌های دورسنجی در بررسی تغییرات پوشش گیاهی گسترش زیادی داشته است. سنجنش از دور به دلیل فوایدی مانند قابلیت پوشش گسترده منطقه مورد مطالعه، امکان برداشت داده با توالی منظم، فرمت رقومی مناسب برای پردازش کامپیوتری و مناسب‌تر بودن نسبت به سایر روش‌های برداشت زمینی در طی سال‌های اخیر همواره به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع جمع‌آوری داده‌های مکانی محسوب می‌شود (Zare Khormizi et al., 2017). پوشش گیاهی، مهم‌ترین تولیدکننده هر اکوسیستم گیاهی است و عوامل متعدد آن را منعکس می‌کند، بنابراین، با مطالعه رابطه تغییرات پوشش گیاهی با سایر عوامل نظیر دما، بارش، تبخیر و تعرق و خشکسالی می‌توان اثرات متقابل آنها را شناسایی کرد

پوشش گیاهی در نواحی خشک و نیمه خشک نقش بسیار مهمی در پایداری اکوسیستم دارد. این پوشش با کمک به حفظ تنوع زیستی، ذخیره سازی کربن و فراهم کردن منابع چرایی برای دامها اهمیت زیادی پیدا می کند. همچنین به عنوان منبع اصلی تأمین غذا، چه به صورت مستقیم و چه غیرمستقیم، برای بسیاری از موجودات زنده عمل می کند (Yang et al., 2022). بررسی روند تغییرات پوشش گیاهی مستلزم گردآوری داده های میدانی دقیق است؛ با این حال، جمع آوری چنین داده هایی معمولاً زمان بر و پرهزینه بوده و در بسیاری از مناطق به ویژه نواحی گسترده و دورافتاده با محدودیت های اجرایی همراه است. در این شرایط، بهره گیری از داده های سنجش از دور و به ویژه سری های زمانی تصاویر ماهواره ای به عنوان رویکردی کارآمد و قابل اعتماد مطرح می شود. این داده ها امکان پایش مستمر و گسترده تغییرات را فراهم کرده و ابزاری مناسب برای شناسایی و تحلیل روند تحولات ناشی از عوامل طبیعی و انسانی به شمار می آیند. افزون بر این، سری های زمانی تصاویر ماهواره ای با فراهم کردن اطلاعات منظم در مقیاس های زمانی و مکانی مختلف، بستری مناسب برای ارزیابی روندهای گذشته و ارائه پیش بینی های علمی درباره تغییرات آینده فراهم می کنند (Hashemi Dareh Badami et al., 2015; Mirahsani et al., 2019). سری زمانی به مجموعه ای از داده های آماری گفته می شود که در بازه های زمانی منظم و با فاصله های مشخص گردآوری شده اند. الگوی کلی تغییرات این داده ها در طول یک دوره زمانی بلندمدت که بیانگر جهت عمومی افزایش یا کاهش مقادیر است، به عنوان «روند» شناخته می شود (Niroumand et al., 2017). در سال های اخیر، داده های مربوط به پوشش گیاهی استخراج شده از تصاویر ماهواره ای به ابزاری کارآمد برای بررسی پویایی پوشش گیاهی در بوم سامانه های مختلف جهان تبدیل شده اند. این داده ها امکان پایش منابع طبیعی و اکوسیستم ها را در مدت زمان کوتاه تر و با هزینه ای کمتر فراهم می کنند و بدین ترتیب نقش مهمی در ارزیابی و مدیریت تغییرات محیطی ایفا می کنند (Willis, 2015). تحلیل های آماری در حوزه سری های زمانی معمولاً شامل بررسی روندهای بلندمدت، الگوهای فصلی، نوسان های دوره ای و تغییرات تصادفی هستند. در مطالعه روند، هدف شناسایی تغییرات کلی و بلندمدت در میانگین یک سری زمانی است؛ به عبارتی، نوسانات کوتاه مدت کنار گذاشته شده و بر رفتار کلی داده ها در طول زمان تمرکز می شود. شناسایی روند افزایشی، کاهشی یا ثابت در پوشش گیاهی می تواند نقش مهمی در برنامه ریزی و مدیریت پایش وضعیت پوشش گیاهی ایفا کند. روش های متفاوتی برای تعیین روند وجود دارند که به دو دسته روش پارامتری و غیر پارامتری تقسیم می شوند. تاکنون مطالعات زیادی درباره بررسی تغییرات پوشش گیاهی به وسیله سنجش از دور صورت گرفته است. فنشولت و همکاران (Fensholt et al., 2012) برای بررسی روندهای بلندمدت تغییرات فعالیت پوشش گیاهی در مقیاس جهانی، از داده های GIMMS و نیز اطلاعات حاصل از سنجنده MODIS مربوط به دوره زمانی ۲۰۱۰-۲۰۰۰ بهره بردند. آن ها پس از استخراج روند از هر دو مجموعه داده، نتایج را با یکدیگر مقایسه کردند. تحلیل ها نشان داد که الگوهای سبزینگی^۱ و کاهش سبزینگی پوشش گیاهی^۲ در هر دو منبع داده تا حد زیادی مشابه هستند. بیشترین ناهماهنگی میان نتایج دو مجموعه در بخش هایی از آمریکای جنوبی، استرالیا در نیمکره جنوبی و همچنین مناطق قطبی مشاهده شد. در مجموع، همخوانی قابل توجهی میان داده های دو محصول وجود داشت. کولدیتز و همکاران (Colditz et al., 2015) در پژوهشی که در کشور مکزیک انجام دادند، با بهره گیری از داده های پوشش گیاهی سنجنده MODIS طی دوره زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ و با به کارگیری روش های تحلیل روند، تغییرات پوشش گیاهی را مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق از سری زمانی ۱۵ ساله شاخص NDVI سنجنده MODIS برای شناسایی روندهای معنادار در فعالیت پوشش گیاهی استفاده شده است. عبدی و همکاران (Abdi et al., 2018) با بهره گیری از داده های محصول MOD13Q1 به بررسی الگوهای مکانی و زمانی خشکسالی در جنگل های پهن برگ هیرکانی و مراتع نیمه استپی شمال شرق ایران پرداختند. این پژوهش با اتکا به سری های زمانی تصاویر سنجنده با قدرت تفکیک مکانی متوسط انجام شد. نتایج نشان داد که جنگل های متراکم در دوره های خشکسالی شدید، نسبت به سایر پوشش ها تنش کمتری را تجربه کرده اند. با این حال، در برخی مناطق که شدت خشکسالی پایین بوده، تنش های شدید گیاهی مشاهده شده است که می تواند بیانگر نقش سایر عوامل و ناهنجاری های اقلیمی مؤثر بر وضعیت پوشش گیاهی باشد. عبدالعلی زاده و همکاران (Abdolalizadeh et al., 2019) با استفاده از داده های ماهواره ای لندست ۵ و لندست ۸، تأثیر مداخلات انسانی را بر پوشش گیاهی منطقه حفاظت شده مکاران مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که مراتع، به عنوان پوشش غالب منطقه، در اثر این

¹ - Greening

² - Browning

فعالیت‌ها با روندی رو به کاهش کیفیت مواجه شده و به مراتب فقیر تبدیل شده‌اند. دستی‌گردی و همکاران (Dastigerdi et al., 2022) به منظور تحلیل روند تغییرات فعالیت پوشش گیاهی در استان خراسان شمالی، از سری زمانی شاخص NDVI استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای مودیس استفاده کردند. نتایج حاصل از به‌کارگیری آزمون ناپارامتری من-کندال نشان داد که در بخش‌های شرقی و شمال شرقی استان روند پوشش گیاهی افزایش معناداری داشته است، در حالی که در نواحی جنوب غربی استان روندی کاهشی مشاهده می‌شود. دستورانی و همکاران (Dastorani et al., 2025) تغییرات پوشش گیاهی حوزه آبخیز کهنه خراسان رضوی را با استفاده از شاخص NDVI، SPI و داده‌های بارش در محیط Google Earth Engine بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش مقادیر NDVI در دوره ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۴ نسبت به دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۲، بیانگر بهبود نسبی پوشش گیاهی منطقه بوده که با افزایش بارش‌های این دوره مرتبط دانسته شد. این مطالعه بر قابلیت سنجش از دور و GEE در پایش تغییرات پوشش گیاهی مناطق نیمه‌خشک تأکید کرد.

فروزان‌فرد و همکاران (Forozanfard et al., 2025) به پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر پویایی پوشش گیاهی در اکوسیستم‌های خشک استان هرمزگان با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین پرداختند. در این پژوهش با استفاده از سری زمانی NDVI، داده‌های اقلیمی و سناریوی SSP3-7.0، روند تغییرات آینده پوشش گیاهی تا سال ۲۱۰۰ شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که پاسخ پوشش گیاهی به تغییرات اقلیمی در مناطق مختلف یکسان نیست و برخی مناطق افزایش و برخی دیگر پایداری نسبی NDVI را تجربه خواهند کرد. این مطالعه بر اهمیت استفاده از مدل‌های پیشرفته یادگیری ماشین و رویکردهای مکان‌محور برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر اکوسیستم‌های خشک تأکید کرد.

در مطالعه‌ای روندهای بلندمدت کاربری زمین و پوشش گیاهی در اسلوواکی مورد بررسی قرار گرفت. استفاده هم‌زمان از داده‌های CORINE و شاخص NDVI می‌تواند تغییرات اکولوژیکی را به‌خوبی آشکار سازد. نتایج آن‌ها کاهش مساحت جنگل‌ها و افزایش اراضی بوته‌زار را طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۸ نشان داد. همچنین تحلیل NDVI روندی مثبت و معنادار را در حدود ۴۳ درصد منطقه مورد مطالعه تأیید کرد. این پژوهش بر کارآمدی ترکیب سنجش‌از‌دور و تحلیل‌های آماری برای پایش بلندمدت پوشش گیاهی تأکید دارد (Kuzevic et al., 2026).

در مطالعه‌ای با بهره‌گیری از شاخص‌های دورسنجی NDVI و شاخص خشکسالی SPEI، روندهای بلندمدت پوشش گیاهی در غرب آفریقای جنوبی طی یک دوره شش‌دهه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که حساسیت پوشش گیاهی نسبت به نوسانات رطوبتی و رخداد‌های خشکسالی در گذر زمان افزایش یافته و تغییرات اقلیمی بلندمدت نقش قابل‌توجهی در کاهش تراکم پوشش گیاهی این منطقه ایفا کرده است. این پژوهش با ارائه تحلیل‌های سری زمانی ۶۰ ساله، شواهد معتبری از ارتباط تنگاتنگ میان تغییرات اقلیمی و پویایی اکوسیستم‌های خشک فراهم می‌آورد (Opiyo et al., 2025). ابوالحسنی و همکاران (Abolhasani et al., 2026) در پژوهشی با عنوان «شبیه‌سازی سناریوهای پویایی پوشش گیاهی تحت تأثیر عوامل انسانی و اقلیمی» نشان دادند که ترکیب روش RESTREND و الگوریتم جنگل تصادفی توانایی بالایی در تفکیک سهم عوامل اقلیمی و انسان‌زاد دارد. یافته‌های آن‌ها بیان کرد که حدود ۲۰ درصد از کاهش پوشش گیاهی ناشی از عوامل اقلیمی و حدود ۳۸ درصد از افزایش آن نتیجه فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه کشاورزی و باغداری است. این پژوهش همچنین نشان داد که اثرات اقلیمی بیشتر در شمال غرب، و تأثیر فعالیت‌های انسانی در غرب و جنوب حوضه آبخیز غالب است.

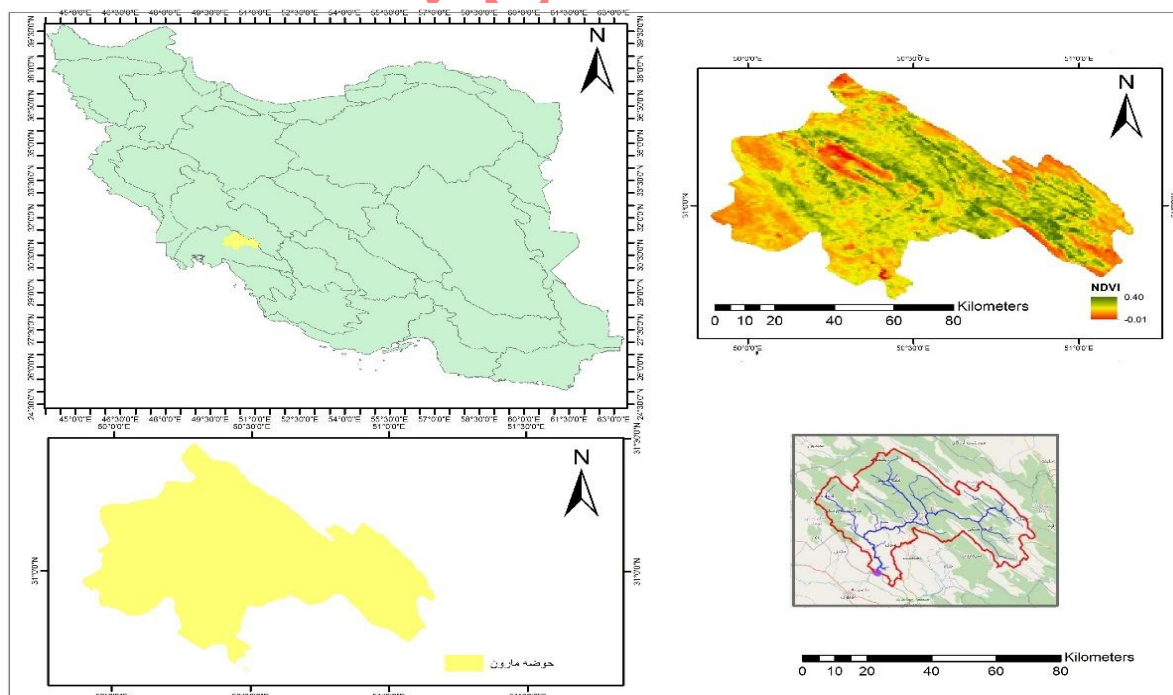
مرور پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که تحلیل تغییرات پوشش گیاهی با استفاده از داده‌های سنجش‌از‌دور و شاخص‌های گیاهی در دهه‌های اخیر رشد قابل‌توجهی داشته و روش‌های آماری سری زمانی، به‌ویژه آزمون‌های ناپارامتری همچون من-کندال و شیب سن، ابزارهای مؤثری برای شناسایی روندهای بلندمدت در اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک بوده‌اند. با این حال، بخش عمده‌ای از مطالعات پیشین یا بر تحلیل‌های مقطعی تمرکز داشته‌اند، یا صرفاً تغییرات پوشش گیاهی را بدون توجه به نقاط تغییر و رفتار زمانی-مکانی آن بررسی کرده‌اند. افزون بر این، پژوهش‌های اندکی به تحلیل هم‌زمان روند، شدت تغییر و زمان وقوع تغییرات در یک چارچوب جامع پرداخته‌اند؛ موضوعی که برای مدیریت منابع طبیعی در پهنه‌های حساس، به‌ویژه در حوضه‌های خشک ایران، ضروری است. نوآوری پژوهش حاضر در آن است که با استفاده از سری زمانی بلندمدت NDVI حاصل از تصاویر

(MODIS (2001–2023)، به کارگیری تلفیقی آزمون‌های من-کندال^۱، شیب سن^۲ و از آزمون ناپارامتری من-کندال ترتیبی^۳ امکان شناسایی روندهای بلندمدت، میزان تغییرات و نقاط تغییر پوشش گیاهی را در مقیاس مکانی-زمانی فراهم می‌کند. این رویکرد، تصویری دقیق‌تر و جامع‌تر از پویایی پوشش گیاهی حوزه آبریز مارون ارائه می‌دهد و می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد در پایش بلندمدت، مدیریت سرزمین و تشخیص پهنه‌های در معرض خطر تخریب پوشش گیاهی مورد استفاده قرار گیرد. این پژوهش با هدف پایش و تحلیل روند تغییرات پوشش گیاهی در حوزه مارون، مبتنی بر سری‌های زمانی تصاویر ماهواره‌ای انجام شده است. نتایج به دست آمده می‌تواند در ارتقای مدیریت سرزمین، شناسایی مناطق حساس و اولویت‌بندی پهنه‌های نیازمند حفاظت و احیای پوشش گیاهی در برابر فرسایش خاک نقش مؤثری ایفا کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز مارون در جنوب غرب ایران واقع شده و حدود ۳۸۰۸ کیلومترمربع وسعت دارد (شکل ۱). این حوزه بخش‌هایی از استان‌های خوزستان و کهگیلویه و بویراحمد را در بر می‌گیرد و در دامنه‌های رشته‌کوه زاگرس، میان عرض‌های جغرافیایی ۳۰ تا ۳۲ درجه شمالی و طول‌های ۴۹ تا ۵۱ درجه شرقی قرار دارد. رودخانه مارون از پیوستن شاخه‌هایی مانند شب‌لین، لوداب و سقاوه شکل می‌گیرد و پس از طی مسیری در حدود ۱۲۰ کیلومتر به دریاچه سد مارون می‌ریزد. سپس با عبور از تنگ تکاب وارد دشت بهبهان شده و به وسیله سد انحرافی شهدا و شبکه آبیاری بهبهان، و همچنین از طریق سد انحرافی جایزان، دشت‌های جایزان و فجر را آبیاری می‌کند (Tani, 2025). مهمترین توده‌های بارشی که باعث نزولات جوی در زاگرس می‌شوند از دریای مدیترانه و اقیانوس اطلس و تا حدودی از دریای سیاه و مناطق شمال اروپا می‌باشد و از شمال به جنوب و نیز از غرب به شرق از تعداد توده‌ها کاسته می‌شود. به طور کلی حداکثر بارندگی منطقه زاگرس در زمستان است و تابش شدید و تبخیر آب نقش زیادی در تنوع گونه‌های گیاهان این منطقه دارد، در حالی که فصل بهار نقش مهمی در آغاز و تداوم فعالیت زیستی پوشش گیاهی دارد (Kazemi, 2002).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوزه آبریز رودخانه مارون در زاگرس جنوبی

Fig. 1. Geographical location of the Maroon River watershed in the southern Zagros region

¹ - Mann-Kendall

² - Sen's slope

³ - Sequential Mann-Kendall

مواد و روش‌ها

در این مطالعه، داده‌های ۲۳ ساله (۲۰۰۱-۲۰۲۳) شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) از محصول MOD13A1 سنجنده MODIS نصب شده بر روی ماهواره Terra استخراج گردید. این محصول دارای قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر و قدرت تفکیک زمانی ۱۶ روزه بوده و به دلیل مناسب بودن برای تحلیل‌های سری زمانی بلندمدت و پوشش کامل منطقه مطالعاتی، به عنوان منبع داده انتخاب گردید. تمامی پردازش‌ها با استفاده از محیط برنامه‌نویسی JavaScript در پلتفرم (GEE^۱) در تاریخ دسامبر ۲۰۲۵ انجام شد.^۲ سنجنده MODIS با ۳۶ باند طیفی، حساسیت رادیومتریکی ۱۲ بیت و دامنه طول موج ۰/۴ تا ۱۴/۴ میکرومتر، هر یک تا دو روز یکبار از سطح زمین تصویربرداری می‌کند و محصولات پوشش گیاهی آن پس از انجام تصحیحات هندسی و اتمسفری تولید می‌شوند.

به منظور افزایش دقت تحلیل‌ها، در مرحله پیش‌پردازش از لایه کنترل کیفیت محصول MOD13A1 برای حذف پیکسل‌های دارای کیفیت پایین، شامل پیکسل‌های متأثر از ابر، سایه ابر و سایر مشاهدات نامطمئن استفاده شد و تنها پیکسل‌های دارای کیفیت مناسب در محاسبات شاخص NDVI وارد شدند. پس از اعمال ماسک کیفیت، سری زمانی NDVI برای هر سال به صورت میانگین سالانه از تصاویر ۱۶ روزه بدون ابر محاسبه شد تا اثر نوسانات کوتاه‌مدت و خطاهای ناشی از شرایط جوی کاهش یافته و امکان تحلیل روندهای بلندمدت فراهم گردد. سپس تصاویر برای هر سال تجمیع و شاخص NDVI بر اساس رابطه ۱ محاسبه و استخراج گردید:

$$NDVI = (NearInfrared - Red) / (NearInfrared + Red) \quad (۱)$$

در این پژوهش، پیش از بررسی روند تغییرات پوشش گیاهی در حوضه آبریز مارون، الگوهای تغییرات و نوسانات مکانی و زمانی پوشش گیاهی مورد تحلیل قرار گرفت. داده‌های شاخص NDVI استخراج شده از Google Earth Engine، به منظور انجام تحلیل‌های دقیق‌تر فضایی، در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی^۳ مورد پردازش قرار گرفتند و نقشه‌های سالانه پوشش گیاهی تهیه گردید. تلفیق قابلیت‌های پردازش سری‌های زمانی در GEE با توان تحلیلی GIS، زمینه لازم برای ارزیابی جامع الگوهای مکانی و نوسانات بین سالانه پوشش گیاهی را فراهم نمود. در مرحله بعدی روند تغییرات پوشش گیاهی حوضه مارون توسط آزمون ناپارامتری من-کندال و تخمین گر شیب سن در مقیاس سالانه مورد بررسی قرار گرفت. این آزمون در ابتدا توسط Mann در سال ۱۹۴۵ با تکیه بر معنی‌داری ضریب همبستگی تاو کندال (τ) معرفی گردید و بعدها Kendall در سال ۱۹۷۵ آن را گسترش داد. آزمون من-کندال از جمله روش‌های پرکاربرد در شناسایی روند داده‌های سری زمانی به شمار می‌رود و از ویژگی‌های مهم آن، حساسیت پایین نسبت به داده‌های پرت یا مقادیر حدی است (Kazemzadeh et al, 2013). به طور کلی، برای شناسایی روندهای یکنواخت در داده‌هایی که از توزیع نرمال پیروی نمی‌کنند، از آزمون آماری من-کندال مبتنی بر رتبه‌ها استفاده می‌شود. از آنجا که این آزمون علاوه بر تشخیص وجود روند، جهت آن (صعودی یا نزولی) را نیز تعیین می‌کند، نیازی به نرمال‌سازی داده‌ها در فرایند تحلیل وجود ندارد.

مراحل محاسبه آماره این آزمون (رابطه ۲) به شرح زیر است:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \operatorname{sgn}(x_j - x_k) \quad (۲)$$

که با قبول فرض H_0 توزیع S در حد $n \rightarrow \infty$ نرمال است.

n ، مدت سری زمانی داده‌ها؛

x_k و x_j نیز داده‌های متوالی k ام و j ام سری است. که در این رابطه $k, j \leq n$ است و $k \neq j$

^۱ - Google Earth Engine

^۲ - <https://code.earthengine.google.com>

^۳ - Quality Assurance

^۴ - GIS

Sgn ، تابع علامت است؛ و تابع علامت نیز از طریق رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$\operatorname{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

آزمون آماره‌های S میانگین صفر دارد و واریانس آن نیز از طریق رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$\operatorname{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum t(t-1)(2t+5)}{18} \quad (4)$$

در رابطه بالا t اندازه یک بازه زمانی در سری داده‌ها است و $\sum t$ نیز مجموع بازه‌ها (سری زمانی داده‌ها) است. برای مواردی که مدت سری زمانی داده‌های بیش‌تر از ۱۰ باشد ($n > 10$) آماره Z استاندارد شده را باید به کمک رابطه ۵ محاسبه کرد.

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\operatorname{Var}(s)}} & \text{if } s > 0 \\ 0 & \text{if } s = 0 \\ \frac{s-1}{\sqrt{\operatorname{Var}(s)}} & \text{if } s < 0 \end{cases} \quad (5)$$

بنابراین، در آزمون دوطرفه روند، اگر رابطه $|Z| \leq Z_{\frac{\alpha}{n}}$ در سطح اطمینان ۰/۰۹۵ برقرار باشد، باید فرضیه H_0 (قبول تصادفی بودن سری داده‌ها) را پذیرفت و در غیر این صورت باید فرضیه H_1 (وجود روند) را قبول کرد. اگر معنی‌داری در سطح $\alpha = 0.01$ (سطح ۰/۰۹۹ اطمینان) آزمون شد، فرضیه صفر H_0 در صورتی رد می‌شود که $|Z| > Z_{0.995} = 2/575$ برقرار باشد. مقادیر مثبت روند Z روند صعودی و مقادیر منفی Z روند نزولی سری داده‌ها را نشان می‌دهند (Vivekanandan, 2007). مقادیر آماره Z در آزمون من-کندال جهت روند تغییرات را مشخص می‌کنند؛ به این صورت که مقادیر مثبت نشان‌دهنده روند افزایشی و مقادیر منفی بیانگر روند کاهشی در پوشش گیاهی هستند. علاوه بر این، شیب سن (Q) بیانگر برآوردی از میزان تغییرات سالانه شاخص NDVI در هر طبقه بوده و پارامتر B بیشترین تغییر میانگین را در بازه زمانی مورد مطالعه نشان می‌دهد. این متغیرها به خوبی توانایی نمایش جهت، شدت و ثبات روندها را در داده‌های سری زمانی دارند.

تخمین شیب خط روند با روش سن

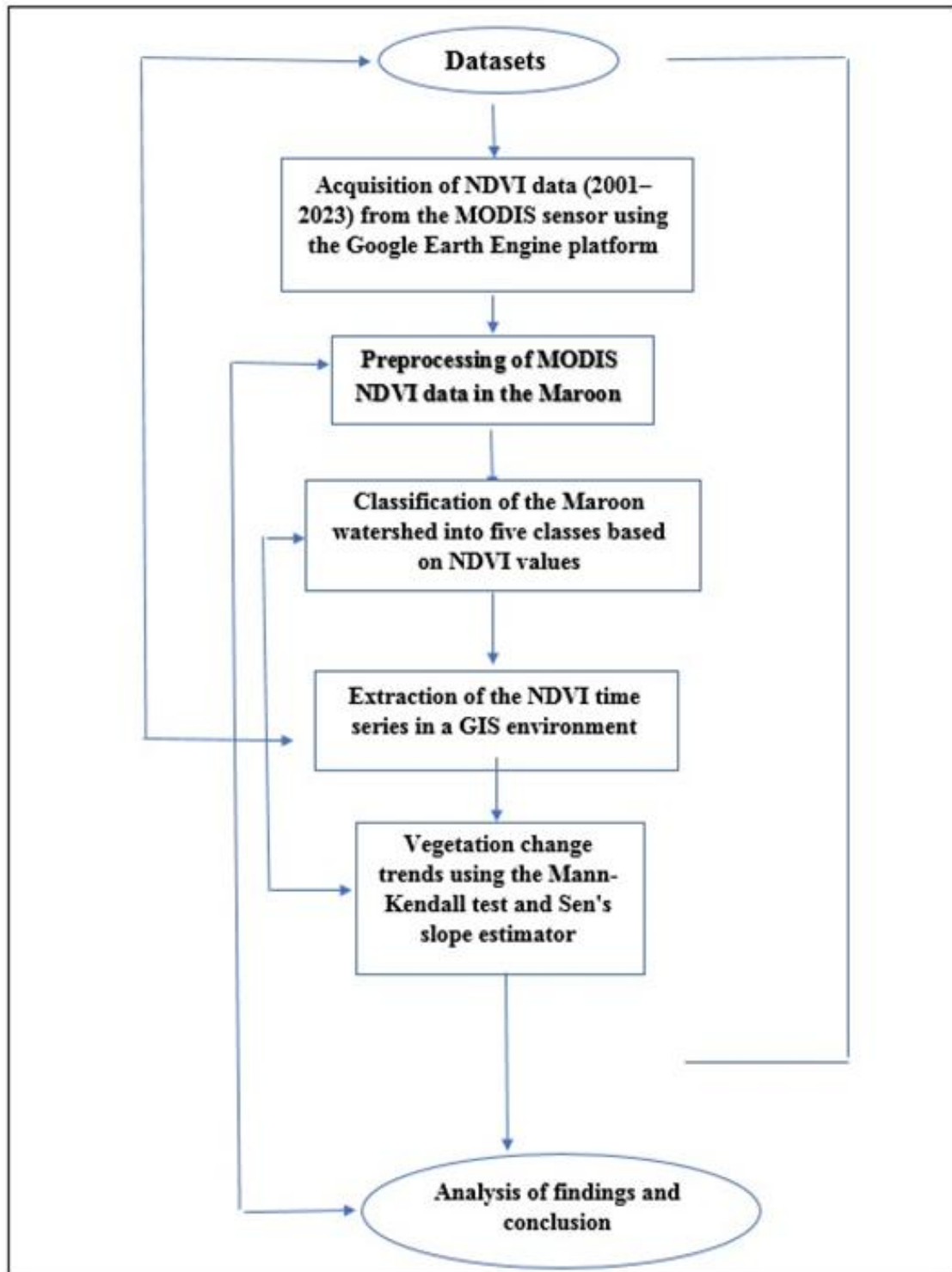
سن (Sen, 1968) با توسعه و بسط یک سری مطالعات آماری که (Theil, 1950) به انجام رسانده بود یک روش ناپارامتری را برای تحلیل سری‌های زمانی ارائه نمود. این روش تمام نقاط قوت من - کندال را دارا بوده بعلاوه اینکه در تحلیل روند سری‌های زمانی که در آنها فراوانی داده‌های تکراری زیاد می‌باشد از ارجحیت بیشتری نسبت به من - کندال برخوردار است و نتایج قابل قبول‌تری به دست می‌دهد. مقدار (β) طبق رابطه ۶ قابل محاسبه است.

$$\beta = \operatorname{median} \frac{X_j - X_i}{j - i} \quad \forall = (j > i) \quad (6)$$

مقادیر مثبت β نشان‌دهنده شیب صعودی (روند افزایشی) و مقادیر منفی آن نشان‌دهنده شیب نزولی (روند کاهشی) می‌باشد (Kanani et al., 2019).

پردازش و استخراج داده‌های شاخص NDVI با استفاده از پلتفرم (GEE) و از طریق ویرایشگر کد JavaScript انجام شد. به منظور انجام تحلیل‌های فضایی و تهیه نقشه‌ها، داده‌های استخراج‌شده به محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی منتقل و در نرم‌افزار

ArcGIS نسخه ۱۰.۲ پردازش گردیدند. همچنین تحلیل‌های آماری مربوط به آزمون من-کندال و تخمین گر شیب سن با استفاده از نرم‌افزار RStudio و محیط برنامه‌نویسی R انجام گردید. در شکل (۲) مراحل انجام تحقیق به نمایش گذاشته شده است.



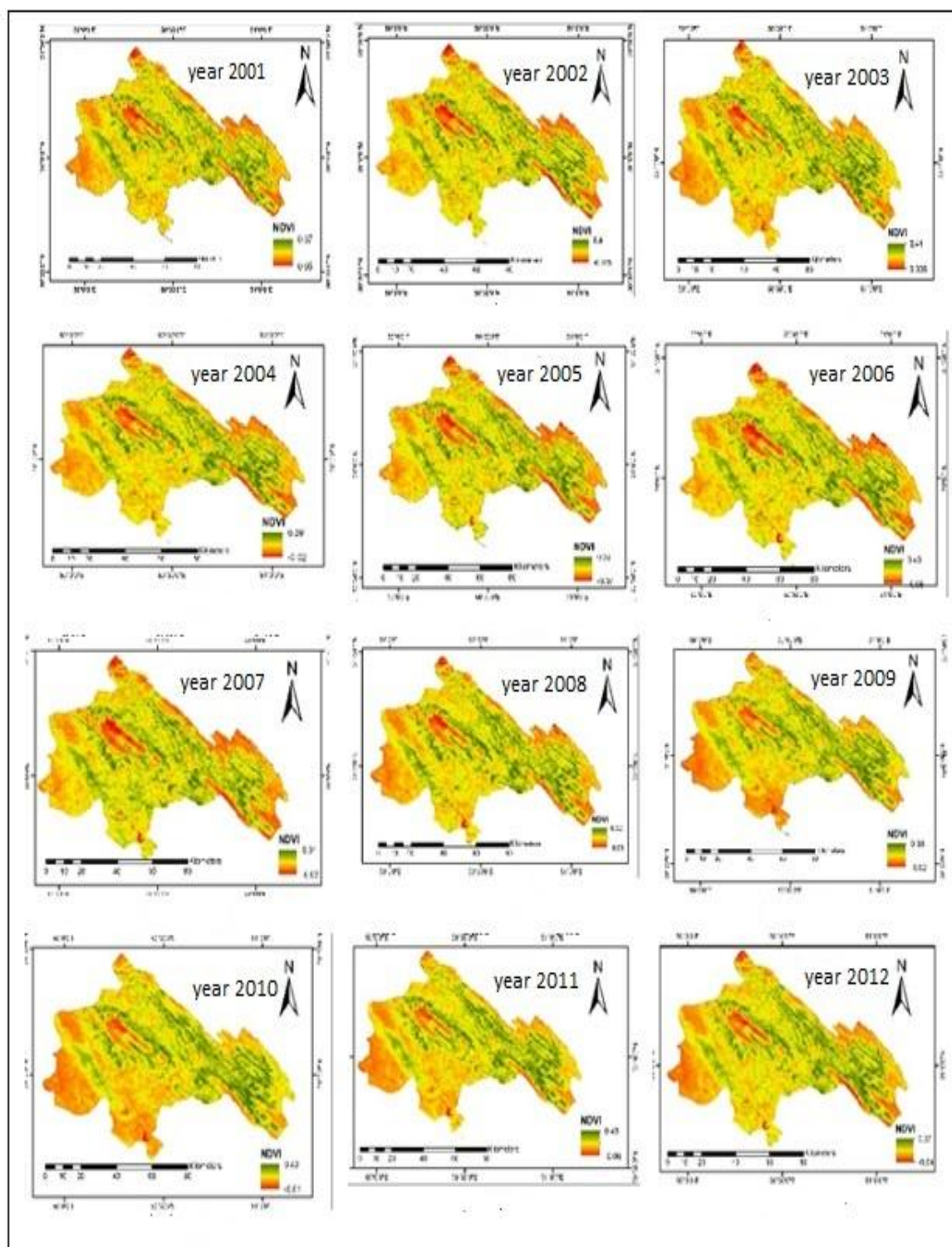
شکل ۲. فلوچارت تحقیق

Fig 2. Research flowchart

نتایج و بحث

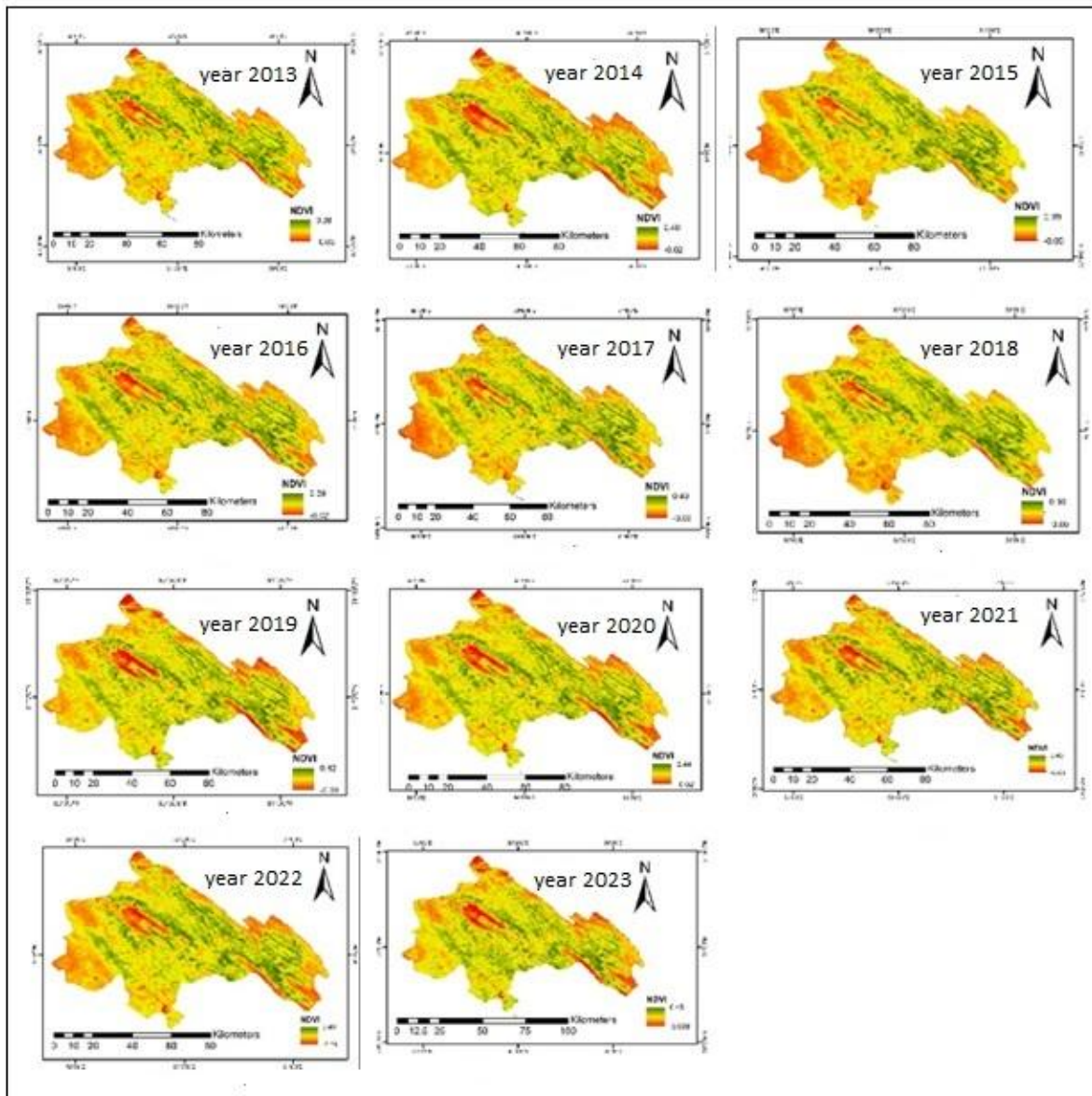
بررسی نقشه‌های سالانه شاخص NDVI حوضه مارون در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ (شکل ۳ و ۴) نشان می‌دهند که پوشش گیاهی منطقه در مقیاس زمانی دارای نوسانات قابل توجهی بوده، در حالی که الگوی کلی توزیع مکانی آن در سطح حوضه از پایداری نسبی برخوردار است. این هم‌زمانی نوسانات زمانی و ثبات مکانی، بیانگر آن است که تغییرات پوشش گیاهی عمدتاً به صورت تغییر در شدت و گستره سبزی‌نگی رخ داده و نه جابه‌جایی اساسی در کانون‌های مکانی پوشش گیاهی. مطابق با نقشه‌ها، در تمامی سال‌های دوره مطالعه، پوشش گیاهی حوضه عمدتاً در محدوده مقادیر کم تا متوسط NDVI متمرکز بوده و تنها در برخی سال‌ها، افزایش قابل توجهی در گستره نواحی با مقادیر بالاتر شاخص مشاهده می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که اکوسیستم منطقه به‌طور کلی از نوع اکوسیستم‌های با بهره‌وری متوسط بوده و واکنش آن به شرایط محیطی به صورت نوسانات بین‌سالانه بروز یافته است. از منظر زمانی، نقشه‌ها نوسانات شدیدی را در رفتار سبزی‌نگی حوضه آشکار می‌سازند. در میان این نوسانات، سال ۲۰۰۸ به عنوان «نقطه فرود» یا کمترین میزان پوشش گیاهی در کل دوره مطالعه متمایز است. در نقشه‌های مربوط به این سال، غلبه رنگ‌ها نشان‌دهنده مقادیر پایین NDVI در تقریباً تمام سطح حوضه مشهود است که گویای افت شدید تراکم گیاهی و تقلیل گستره سبزی‌نگی به حداقل ممکن است. در مقابل، روند ترمیم و بهبود پوشش گیاهی در سال‌های آخر با شتاب بیشتری مشاهده می‌شود، به‌طوری که سال ۲۰۲۳ به عنوان «نقطه اوج» پوشش گیاهی در بازه ۲۳ ساله خودنمایی می‌کند. در این سال، نه تنها کانون‌های دائمی پوشش گیاهی به بالاترین سطح تراکم خود رسیده‌اند، بلکه گستره مکانی پیکسل‌های با NDVI بالا به بیشترین حد در کل سری زمانی گسترش یافته است. از منظر مکانی، مقایسه نقشه‌های سالانه نشان می‌دهد که بخش‌های جنوبی و جنوب غربی حوضه در اغلب سال‌ها به‌عنوان کانون‌های با NDVI بالاتر ظاهر شده‌اند و نسبت به سایر بخش‌ها پایداری بیشتری در حفظ پوشش گیاهی از خود نشان داده‌اند. در مقابل، نواحی شرقی و شمال شرقی حوضه غالباً دارای مقادیر پایین‌تر NDVI بوده و پوشش گیاهی در این مناطق به‌صورت تنک‌تر و ناپایدارتر مشاهده می‌شود. بخش‌های مرکزی حوضه نیز رفتار بینابینی داشته و بیشترین تغییرپذیری سالانه را نشان داده‌اند؛ به‌طوری که در سال‌های با وضعیت کلی مطلوب (نظیر ۲۰۲۳)، این نواحی با جهش در سبزی‌نگی واکنش نشان داده و در سال‌های ضعیف (نظیر ۲۰۰۸)، افت شدیدی را تجربه کرده‌اند.

به‌طور کلی، تحلیل یکپارچه نقشه‌های NDVI نشان می‌دهد که پوشش گیاهی حوضه مارون طی دوره مطالعه دارای رفتار زمانی نوسانی همراه با ساختار مکانی نسبتاً پایدار بوده است. شناسایی سال ۲۰۰۸ به عنوان ضعیف‌ترین و سال ۲۰۲۳ به عنوان غنی‌ترین سال از نظر پوشش گیاهی، نشان‌دهنده دامنه وسیع تغییرپذیری اکوسیستم منطقه در پاسخ به عوامل محیطی است. این الگو بیانگر آن است که شاخص NDVI توانسته است به‌خوبی تغییرات شدت و گستره پوشش گیاهی را در مقیاس سالانه آشکار سازد و ابزار مناسبی برای پایش پویایی‌های پوشش گیاهی در این حوضه محسوب می‌شود.



شکل ۳. توزیع مکانی - زمانی شاخص NDVI سالانه در حوضه آبریز مارون طی دوره (۲۰۰۱ - ۲۰۱۲)

Fig 3. Spatiotemporal distribution of annual NDVI in the Maroon River watershed during the period 2001–2012.



شکل ۴. توزیع مکانی - زمانی شاخص NDVI سالانه در حوضه آبریز مارون طی دوره (۲۰۱۲ - ۲۰۲۳)
 Fig 4. Spatiotemporal distribution of annual NDVI in the Maroon River watershed during the period 2012–2023.

تحلیل روند من - کندال و شیب سن

در این مطالعه، به منظور تحلیل تغییرات بلندمدت پوشش گیاهی سالانه، از آزمون ناپارامتری من-کندال و برآورد شیب سن استفاده گردید. داده‌های شاخص پوشش گیاهی NDVI طی دوره‌ی ۲۳ ساله (۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳) استخراج و بر اساس پنج طبقه تراکمی شامل خیلی تنک، تنک، متوسط، انبوه و خیلی انبوه طبقه‌بندی شدند (جدول ۱). در این آزمون مقدار Z بیانگر جهت و معنی‌داری روند است، به گونه‌ای که مقادیر مثبت Z نشان‌دهنده روند افزایشی و مقادیر منفی Z بیانگر روند کاهشی هستند. شدت و میزان تغییر سالانه از طریق شاخص شیب سن (Q) مشخص می‌شود که مقادیر مثبت آن بیانگر افزایش و مقادیر منفی نشان‌دهنده کاهش سالانه در طول دوره مورد مطالعه است. همچنین مقدار β معرف برآورد اولیه یا مقدار تقریبی شاخص در ابتدای دوره زمانی می‌باشد که همراه با Q روند کلی تغییرات را مشخص می‌کند. نتایج آزمون من-کندال و برآورد شیب سن (Sen's slope) برای طبقات مختلف NDVI در حوضه آبریز مارون نشان می‌دهد که رفتار پوشش گیاهی در طول دوره مطالعه ناهمگن و وابسته به شدت تراکم پوشش است. در طبقات با پوشش گیاهی بسیار تنک ($NDVI \leq 0/1$) و تنک ($0/2 - 0/1$)،

مقدار آماره Z به ترتیب برابر با $-3/33$ و $-3/25$ بوده که در سطح اطمینان 99% و 95% معنادار است. مقادیر منفی شیب سن $Q = -5/167$ و $Q = -50/250$ نیز بیانگر وجود روند کاهشی معنادار در این طبقات است. این نتیجه نشان می‌دهد که اراضی با پوشش گیاهی ضعیف در طول دوره ۲۳ ساله روندی کاهشی داشته و احتمالاً بخشی از این سطوح به کلاس‌های پوشش بالاتر منتقل شده‌اند. در مقابل، طبقه $0/4 - 0/2$ $NDVI$ دارای مقدار $Z = 3/70$ و شیب سن مثبت $Q = 25/627$ بوده که نشان‌دهنده یک روند افزایشی معنادار در سطح اطمینان بالا است. این نتیجه بیانگر افزایش گستره پوشش گیاهی متوسط در حوضه و احتمال بهبود نسبی شرایط پوشش گیاهی در این کلاس طی دوره مطالعه است. در طبقات $0/6 - 0/4$ $NDVI$ و $0/8 - 0/6$ اگرچه مقادیر Z منفی (به ترتیب $-0/38$ و $-0/36$) مشاهده می‌شود، اما این مقادیر از نظر آماری معنی‌دار نیستند ($P > 0/05$) و همچنین شیب سن برای این طبقات صفر گزارش شده است. این موضوع نشان می‌دهد که در سطوح پوشش متراکم‌تر، تغییرات روندی قابل توجه و معناداری طی دوره مطالعه رخ نداده و این طبقات از پایداری نسبی برخوردار بوده‌اند. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که تغییرات پوشش گیاهی در حوضه مارون دارای یک الگوی انتقالی است؛ به‌گونه‌ای که کاهش طبقات با پوشش ضعیف همزمان با افزایش طبقات با پوشش متوسط مشاهده می‌شود، در حالی که طبقات با پوشش متراکم تغییرات معناداری را نشان نمی‌دهند. این الگو می‌تواند بیانگر بهبود نسبی ساختار پوشش گیاهی در برخی بخش‌های حوضه و در عین حال پایداری نسبی اکوسیستم‌های متراکم‌تر باشد.

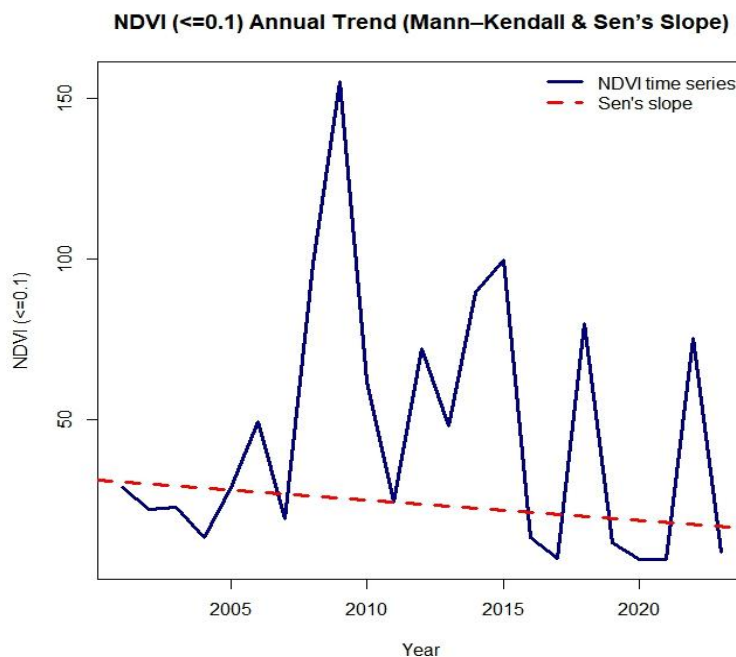
به‌طور کلی، استفاده از روش‌های آماری من-کندال و شیب سن امکان تحلیل دقیق، مقاوم و مستقل از توزیع داده‌ها را فراهم نموده و موجب افزایش اعتبار و دقت در استنتاج الگوهای تغییرات پوشش گیاهی گردیده است. نتایج این مطالعه اهمیت زیادی در درک دینامیک پوشش گیاهی سالانه در مناطق نیمه‌خشک مانند حوضه مارون داشته و می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای مدیریت اکولوژیکی و تصمیم‌گیری‌های محیط‌زیستی آینده مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۱. روند پوشش گیاهی ($NDVI$) سالانه حوضه ابریز مارون طی دوره (۲۰۰۱-۲۰۲۳)

Table 1. Annual $NDVI$ vegetation cover trend in the Maroon watershed during the period (2001–2023).

سری زمانی (Time series)	آزمون Z (Test Z)	سطح معنی‌داری (Signific)	آزمون سن (Q)	برآورد اولیه (β)
$NDVI \leq 0.1$	-3.33	***	-5.167	161.50
$NDVI > 0.1 - \leq 0.2$	-3.25	**	-50.250	3882.50
$NDVI > 0.2 - \leq 0.4$	3.70	***	25.679	1801.89
$NDVI > 0.4 - \leq 0.6$	-0.38		0.00	0.00
$NDVI > 0.6 - \leq 0.8$	-0.36		0.00	0.00

بررسی روند تغییرات شاخص $NDVI$ سالانه در حوضه مارون طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ با استفاده از آزمون من-کندال و شیب سن نشان داد که الگوهای پوشش گیاهی در کلاس‌های مختلف دارای روندهای متفاوتی هستند (شکل‌های ۵ تا ۸). نمودار تغییرات سالانه $NDVI = 0/1$ (شکل ۵) در حوضه مارون طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ همراه با خط روند برآوردشده به روش شیب سن نشان‌دهنده نوسانات بین‌سالی قابل توجه، اما با یک روند کلی کاهشی است. خط پیوسته آبی تغییرات سالانه سطح این طبقه از $NDVI$ را نمایش می‌دهد، در حالی که خط چین قرمز بیانگر روند یکنواخت محاسبه‌شده توسط برآوردگر شیب سن است. نتایج آزمون من-کندال برای این طبقه از $NDVI$ ، مقدار آماره Z منفی و معنادار را نشان می‌دهد ($Z = -3/23$ ، $P < 0/01$) که وجود یک روند کاهشی یکنواخت و معنادار را در سطح اطمینان ۹۹ درصد تأیید می‌کند. همچنین مقدار منفی شیب سن بیانگر کاهش تدریجی و پیوسته سطح مناطق با $NDVI$ بسیار پایین در طول دوره مطالعه است. اگرچه سری زمانی $NDVI \leq 0/1$ دارای نوسانات شدید سالانه است و در برخی سال‌ها (مانند حدود ۲۰۰۸-۲۰۰۹ و ۲۰۱۴-۲۰۱۵) افزایش‌های مقطعی مشاهده می‌شود، اما خط روند کلی نشان می‌دهد که این نوسانات کوتاه‌مدت نتوانسته‌اند جهت کلی تغییرات را معکوس کنند و روند غالب، کاهشی باقی مانده است.

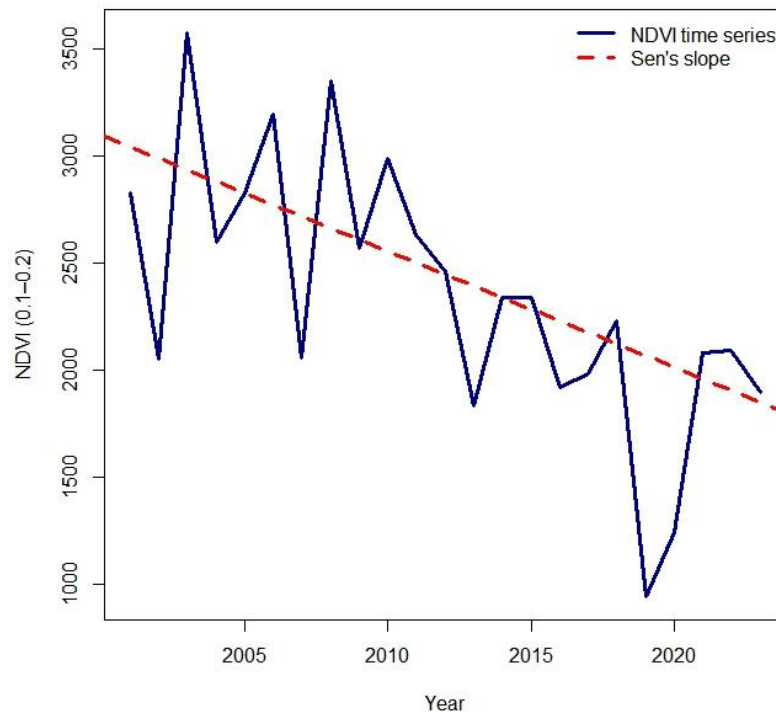


شکل ۵. برازش نمودار خط شیب سن پوشش گیاهی کلاس خیلی تنک ($NDVI \leq 0.1$) سالانه طی دوره (۲۰۲۳-۲۰۰۱) حوضه آبریز مارون

Fig 5. Fitted Sen's slope for the annual NDVI trend of the very sparse vegetation class ($NDVI \leq 0.1$) during 2001–2023 in the Maroon River watershed.

نمودار تغییرات سالانه طبقه $NDVI = 0.1 - 0.2$ (شکل ۶) در حوضه مارون طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ بیانگر وجود نوسانات بین‌سالی قابل توجه همراه با یک روند کلی نزولی است. خط آبی نمودار تغییرات سالانه سطح این طبقه از NDVI را نشان می‌دهد و خط چین قرمز، روند یکنواخت و بلندمدت حاصل از برآوردگر شیب سن را ترسیم می‌کند. این الگو به‌خوبی بیانگر کاهش تدریجی سطوح با پوشش گیاهی ضعیف در طی دوره مورد بررسی است. نتایج آزمون من-کندال برای این طبقه از NDVI با داشتن آماره Z منفی و معنادار در سطح اطمینان ۹۹ درصد ($Z < 0$, $P < 0.01$) نشان می‌دهد که روند نزولی مشاهده‌شده از لحاظ آماری معنادار است و تصادفی تلقی نمی‌شود. همچنین مقدار منفی شیب سن ($Q < 0$) تأیید می‌کند که روند کاهش به صورت تدریجی و پیوسته در طول زمان رخ داده است. بررسی روند زمانی نشان می‌دهد که در سال‌های ابتدایی دوره (به‌ویژه ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹) مقدار این طبقه از NDVI در سطح نسبتاً بالاتری قرار داشته، اما از حدود سال ۲۰۱۰ به بعد کاهش قابل توجهی آغاز شده و در سال‌های اخیر (۲۰۱۸-۲۰۲۱) به کمترین مقادیر خود رسیده است. با وجود برخی افزایش‌های محدود در سال‌های پایانی، روند کلی همچنان کاهشی باقی مانده است. از دیدگاه اکولوژیکی، این کاهش می‌تواند نشان‌دهنده بهبود نسبی پوشش گیاهی، کاهش مناطق با پوشش بسیار ضعیف، یا تغییر در شرایط محیطی و مدیریتی حوضه مارون طی دو دهه اخیر باشد. بنابراین، نمودار و تحلیل آماری هر دو تأکید دارند که طبقه $NDVI = 0.1 - 0.2$ در طی بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ روندی کاهشی، معنادار و پایدار را تجربه کرده است.

NDVI (0.1–0.2) Annual Trend (Mann–Kendall & Sen's Slope)



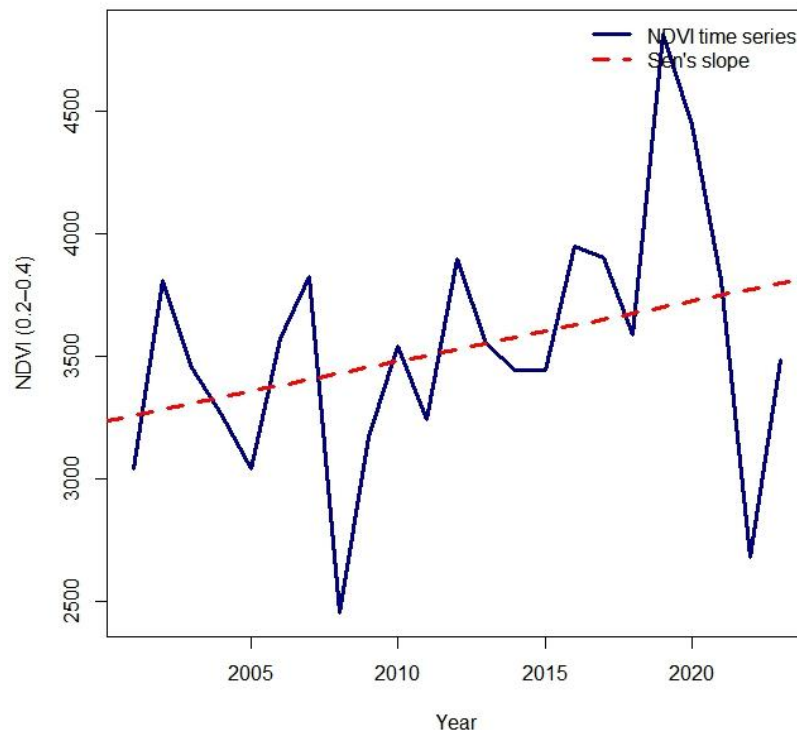
شکل ۶. برازش نمودار خط شیب سن پوشش گیاهی کلاس تنگ ($NDVI=0.1-0.2$) سالانه طی دوره (۲۰۰۱–۲۰۲۳) حوضه ابریز مارون
Fig. 6. Fitted Sen's slope for the annual NDVI trend of the sparse vegetation class ($0.1 \leq NDVI \leq 0.2$) during 2001–2023 in the Maroon River watershed.

نمودار تغییرات سالانه در بازه $NDVI = 0.1 - 0.2$ (شکل ۷) در حوضه مارون طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ نشان‌دهنده وجود نوسانات بین‌ساله قابل توجه همراه با یک روند کلی افزایشی است. خط آبی بیانگر تغییرات واقعی سالانه و خط چین قرمز نشان‌دهنده روند بلندمدت برآوردشده بر اساس شیب سن^۱ است که جهت مثبت آن حاکی از افزایش تدریجی این طبقه از NDVI در طول دوره مطالعه است. در سال‌های ابتدایی دوره، مقادیر NDVI در این طبقه عمدتاً در حدود ۳۰۰۰ تا ۳۵۰۰ نوسان داشته، در حالی که در سال‌های پایانی، به‌ویژه در حدود سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۱، افزایش قابل‌توجهی مشاهده می‌شود که با بیشینه مقدار در کل دوره همراه است. با وجود این، افت‌های مقطعی در برخی سال‌ها (مانند حدود سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۲۲) نیز دیده می‌شود، اما این تغییرات کوتاه‌مدت نتوانسته‌اند روند افزایشی کلی را تغییر دهند. نتایج آزمون من‌کندال^۲ نیز با آماره Z مثبت و معنادار ($P < 0.05$, $Z > 0$) و شیب مثبت سن ($Q > 0$) وجود یک روند افزایشی معنادار را در سطح اطمینان ۹۵ درصد تأیید می‌کند. از دیدگاه اکولوژیکی، این روند افزایشی می‌تواند نشان‌دهنده گسترش تدریجی پوشش گیاهی با تراکم کم تا متوسط در حوضه مارون باشد، به‌گونه‌ای که بخشی از اراضی با NDVI پایین‌تر ($0.1 \leq NDVI < 0.2$) به این طبقه منتقل شده‌اند. در عین حال، نوسانات بین‌ساله مشاهده‌شده در نمودار احتمالاً ناشی از تغییرات اقلیمی سالانه، به‌ویژه نوسانات بارش، دما و وقوع دوره‌های خشکسالی یا سال‌های پر بارش، تغییرات کاربری اراضی، فشارهای انسانی نظیر چرای دام و فعالیت‌های کشاورزی، و همچنین تفاوت‌های فنولوژیکی پوشش گیاهی در سال‌های مختلف است. در مجموع، با وجود این نوسانات کوتاه‌مدت، الگوی کلی تغییرات بیانگر روند افزایشی و بهبود نسبی وضعیت پوشش گیاهی با تراکم متوسط در حوضه مارون طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ است. در مجموع، نمودار حاضر حاکی از آن است که طبقه $NDVI = 0.1 - 0.2$ در طول دوره مطالعه، روندی افزایشی و پایدار داشته است.

^۱ - Sen's slope

^۲ - Mann–Kendall

NDVI (0.2–0.4) Annual Trend (Mann–Kendall & Sen's Slope)

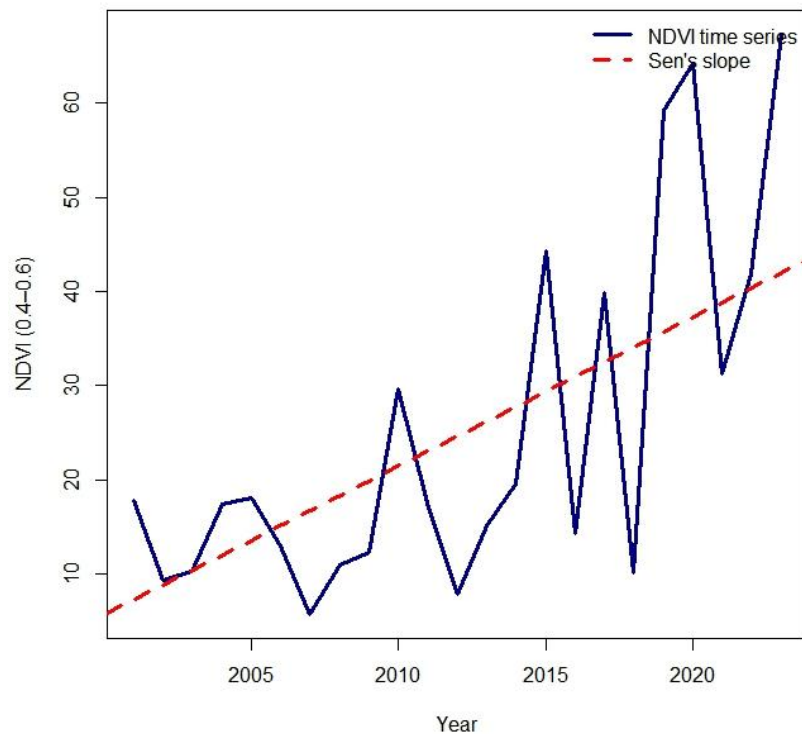


شکل ۷. برازش نمودار خط شیب سن پوشش گیاهی کلاس متوسط (NDVI=0.2- 0.4) سالانه طی دوره (۲۰۲۳ - ۲۰۰۱) حوضه ابریز مارون

Fig 7. Fitted Sen's slope for the annual NDVI trend of the moderate vegetation class (NDVI= 0.2 - 0.4) during 2001–2023 in the Maroon River watershed.

نمودار تغییرات سالانه NDVI در بازه ۰/۴ تا ۰/۶ (شکل ۸) طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ نشان‌دهنده این است که این طبقه دارای رفتار زمانی غیرایستا و چندمرحله‌ای است. اگرچه آزمون من-کندال در سطح کل دوره روند یکنواخت و معناداری را تأیید نمی‌کند ($Z = -0.38$ و $P > 0.05$) اما تحلیل سری زمانی و خط روند سن نشان‌دهنده وجود تمایل کلی به افزایش در مقیاس بلندمدت است. بررسی نمودار نشان می‌دهد که در سال‌های ابتدایی دوره، مقادیر NDVI در این طبقه در سطح پایین‌تر و با نوسانات محدود قرار دارد. با این حال از حدود اواسط دوره (تقریباً پس از ۲۰۱۲–۲۰۱۵)، تغییر در الگوی رفتاری سری زمانی مشاهده می‌شود، به‌طوری‌که مقادیر بالاتر و افزایش‌های مقطعی شدید در سال‌های پایانی (به‌ویژه ۲۰۱۹ به بعد) غالب می‌شوند. این تغییر ساختار زمانی، می‌تواند نشان‌دهنده وقوع یک گذار تدریجی در رژیم پوشش گیاهی باشد. در مقابل، نوسانات بین‌سالی قابل توجه، به‌ویژه افت‌های مقطعی در برخی سال‌ها، موجب شده است که روند کلی در آزمون آماری من-کندال به سطح معناداری نرسد. این موضوع بیانگر آن است که افزایش مشاهده‌شده در خط روند سن، یک روند یکنواخت و قطعی نیست، بلکه بیشتر ناشی از نوسانات بین‌سالی و تغییرات مقطعی در طول دوره مطالعه است. در واقع، اگرچه در سال‌های پایانی دوره مقادیر بالاتری نسبت به سال‌های ابتدایی مشاهده می‌شود، اما این تغییرات برای تأیید یک روند آماری پایدار کافی نیستند. بنابراین، رفتار این طبقه را می‌توان به عنوان یک الگوی غیرایستا با نوسانات شدید و بدون روند معنادار آماری در کل دوره تفسیر کرد.

NDVI (0.4–0.6) Annual Trend (Mann–Kendall & Sen's Slope)



شکل ۸. برازش نمودار خط شیب سن پوشش گیاهی کلاس انبوه (NDVI=0.4–0.6) سالانه طی دوره (۲۰۲۳–۲۰۰۱) حوضه آبریز مارون
Fig 8. Fitted Sen's slope for the annual NDVI trend of the dense vegetation class (NDVI =0.4 - 0.6) during 2001–2023 in the Maroon River watershed.

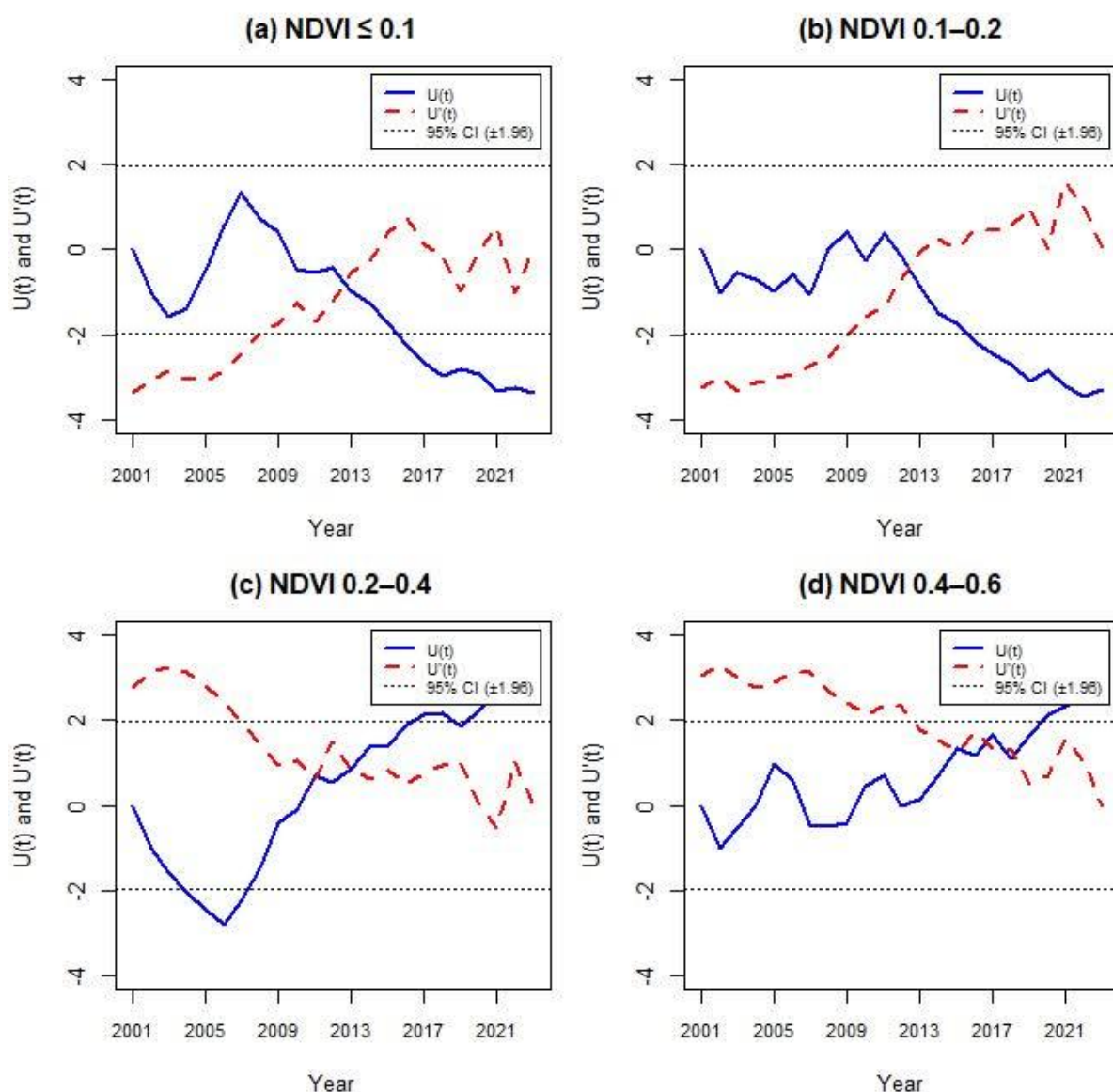
آزمون SQMK

به منظور تحلیل دقیق تر پویایی روند و شناسایی زمان دقیق شروع تغییرات و نقاط جهش^۱ در شاخص پوشش گیاهی حوضه آبریز مارون، از آزمون ناپارامتری من-کندال ترتیبی^۲ SQMK استفاده گردید. این نمودار با ترسیم دو سری آماره پیش‌رونده $U(t)$ و پس‌رونده $U'(t)$ ، امکان تشخیص تغییرات ساختاری روند را در طول دوره آماری ۲۰۲۳–۲۰۰۱ فراهم می‌کند. در نمودارهای SQMK، منحنی پیش‌رونده $U(t)$ بیانگر روند تجمعی داده‌ها در طول زمان و منحنی پس‌رونده $U'(t)$ نشان‌دهنده روند معکوس زمانی است. نقاط تقاطع دو منحنی بیانگر زمان احتمالی وقوع تغییر در روند^۳ هستند. عبور مقادیر $U(t)$ از حدود بحرانی ± 1.96 نشان‌دهنده معنی‌داری روند در سطح اطمینان ۹۵٪ است.

^۱ - Change points

^۲ - Sequential Mann-Kendall

^۳ - Change Point



شکل ۹. نمودارهای SQMK پوشش گیاهی حوزه آبریز مارون طی دوره آماری (۲۰۲۳–۲۰۰۱)

Fig. 9. Sequential Mann-Kendall (SQMK) plots of vegetation dynamics in the Maroon River watershed during 2001–2023.

تحلیل روند تغییرات در طبقات مختلف شاخص NDVI با استفاده از آزمون من-کندال ترتیبی (SQMK)، وقوع دگرگونی‌های ساختاری معنادار در حوزه آبریز مارون را طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ آشکار ساخت. بررسی‌ها نشان داد که حوزه در دهه اول مطالعه (۲۰۰۱ تا حدود ۲۰۱۱)، در تمامی طبقات NDVI فاقد روند یکنواخت و معنادار بوده و نوسانات طبیعی بر رفتار پوشش گیاهی غالب بوده است. با این حال، از ابتدای دهه ۲۰۱۰، یک چرخش ساختاری در رفتار اکوسیستم پدیدار شد. در طبقات با تراکم بسیار پایین ($0/1 \geq$ و $0/1$ تا $0/2$) نقاط تغییر در بازه ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۳ شناسایی گردید؛ به‌طوری‌که پس از این بازه، منحنی‌های آماره آزمون $U(t)$ با عبور از حد آستانه $-1/96$ ، روند کاهشی معناداری را در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($P < 0/05$) به نمایش گذاشتند. این وضعیت حاکی از کاهش پایدار و معنادار گستره اراضی با پوشش گیاهی بسیار تنک است. در مقابل، طبقات با تراکم متوسط تا بالا ($0/2$ تا $0/4$ و $0/4$ تا $0/6$) الگوی رفتاری متفاوتی را نشان دادند؛ در این طبقات نقاط تغییر در بازه زمانی کمی دیرتر، یعنی بین سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۶ رخ داد و پس از آن، روند افزایشی آماره آزمون با عبور از حد آستانه $+1/96$ ، سیر صعودی و معناداری را تثبیت کرد. تداوم این روند افزایشی در سال‌های پایانی دوره، به‌ویژه در طبقه $0/4$ – $0/6$ که از سال ۲۰۱۹ به بعد شتاب بیشتری گرفته است، گویای بهبود تدریجی وضعیت پوشش گیاهی در بخش‌هایی از حوزه است. در

مجموع، این همسویی زمانی در وقوع نقاط تغییر و تفاوت در جهت روند طبقات، مؤید این است که اکوسیستم حوضه مارون در پاسخ به عوامل محیطی از یک فاز ایستا و نوسانی، به سمت یک فاز پویا با گرایش مثبت در تراکم گیاهی گذار کرده است. درک ماهیت نایستای فرآیندهای هیدرولوژیکی و زیست محیطی، پیش شرطی اساسی در تحلیل دینامیک زمانی پوشش گیاهی است. یافته‌های این پژوهش، با تأیید نایستایی در داده‌ها، نشان می‌دهد که پویایی شاخص NDVI در حوضه مارون نه بر پایه روندهای خطی یکنواخت، بلکه تحت تأثیر تغییرات ساختاری و رژیم‌های انتقالی شکل گرفته است و وقوع نقاط تغییر در بازه زمانی ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۴ و تفاوت روندها در طبقات مختلف NDVI نشان می‌دهد که پویایی پوشش گیاهی حوضه مارون از الگوی ایستای ساده پیروی نمی‌کند و تحت تأثیر تغییرات ساختاری قرار دارد. این نتیجه با مطالعات اخیر در حوزه فرآیندهای هیدرولوژیکی و محیط زیستی همخوانی دارد که بر اهمیت در نظر گرفتن نایستایی در تحلیل سری‌های زمانی تأکید کرده‌اند. به عنوان نمونه، سالاری جازی و همکاران (Salarijazi et al., 2023) نشان دادند که نادیده گرفتن نایستایی می‌تواند به تفسیر نادرست رفتار سامانه‌های محیطی منجر شود. از این رو، به کارگیری آزمون SQMK در کنار آزمون‌های من-کندال و شیب سن، امکان تفسیر واقع‌بینانه‌تری از پویایی پوشش گیاهی را فراهم می‌کند. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که پژوهش حاضر صرفاً به ثبت یا توصیف تغییرات پوشش گیاهی محدود نبوده، بلکه توانسته است با بهره‌گیری از ترکیب تحلیل مکانی، روند زمانی و شناسایی نقاط تغییر، الگوی رفتاری پوشش گیاهی حوضه مارون را در یک دوره بلندمدت تبیین کند. بر این اساس، اهمیت اصلی مطالعه نه فقط در ارائه نقشه‌های NDVI، بلکه در آشکارسازی منطق تغییرات، تشخیص رفتار متفاوت طبقات پوشش گیاهی و شناسایی دوره‌های تحول در مقیاس حوضه آبریز است. این ویژگی، مطالعه حاضر را به یک ارزیابی تحلیلی در زمینه پویایی پوشش گیاهی تبدیل می‌کند و می‌تواند مبنایی مناسب برای پایش‌های بعدی و مطالعات تکمیلی در این زمینه باشد. با وجود کارایی آزمون‌های من-کندال، شیب سن و آزمون من-کندال ترتیبی در شناسایی روندهای بلندمدت، این روش‌ها عمدتاً رفتار کلی سری زمانی را ارزیابی می‌کنند و تغییرات مربوط به مقادیر حدی شاخص NDVI را به صورت مستقل مورد بررسی قرار نمی‌دهند. از آنجا که مقادیر حدی می‌توانند بازتاب‌دهنده واکنش پوشش گیاهی به رخداد‌های شدید اقلیمی و محیطی مانند خشکسالی‌ها یا سال‌های پربارش باشند، تحلیل جداگانه این مقادیر می‌تواند درک دقیق‌تری از پویایی اکوسیستم فراهم آورد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که پوشش گیاهی حوضه آبریز مارون طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ از تغییرپذیری زمانی قابل توجهی برخوردار بوده، در حالی که الگوی کلی پراکنش مکانی آن از ثبات نسبی برخوردار است. بررسی نقشه‌های سالانه NDVI نشان داد که اگرچه شدت سبزینگی در طول دوره مطالعه نوسان داشته است، اما کانون‌های اصلی استقرار پوشش گیاهی در سطح حوضه تا حد زیادی پایدار باقی مانده‌اند. این وضعیت بیانگر آن است که پویایی پوشش گیاهی در حوضه مارون بیش از آنکه به جابه‌جایی گسترده مکانی منجر شود، به صورت تغییر در شدت و تراکم پوشش در محدوده‌های نسبتاً ثابت بروز یافته است. همچنین شناسایی سال ۲۰۰۸ به عنوان ضعیف‌ترین سال و سال ۲۰۲۳ به عنوان غنی‌ترین سال از نظر وضعیت پوشش گیاهی، دامنه قابل توجه نوسانات این سامانه را در مقیاس بلندمدت نشان می‌دهد.

تحلیل روند زمانی با استفاده از آزمون من-کندال و برآوردگر شیب سن نشان داد که طبقات مختلف NDVI رفتار یکنواختی نداشته‌اند. کاهش معنادار طبقات با NDVI پایین ($0/1 \geq$ و $0/2 - 0/1$) بیانگر کاهش تدریجی سطوح با پوشش گیاهی بسیار تنک یا فاقد پوشش گیاهی است. در مقابل، افزایش معنادار طبقه ($0/4 - 0/2$) نشان می‌دهد که بخشی از سطح حوضه به سمت پوشش گیاهی با تراکم متوسط حرکت کرده است. طبقات بالاتر NDVI نیز فاقد روند معنادار بودند که این امر می‌تواند نشانه‌ای از پایداری نسبی بخش‌های دارای پوشش متراکم‌تر باشد. در مجموع، این الگو نشان می‌دهد که تغییرات پوشش گیاهی در حوضه مارون یک روند ساده و یکنواخت نداشته، بلکه به صورت جابه‌جایی تدریجی میان طبقات مختلف تراکم بروز یافته است. نتایج آزمون من-کندال ترتیبی (SQMK) نیز وجود نقاط تغییر همزمان در چند طبقه NDVI را عمدتاً در فاصله زمانی ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۴ آشکار ساخت. همزمانی این نقاط تغییر نشان می‌دهد که رفتار زمانی پوشش گیاهی در این بازه دچار گسست یا تغییر معنی‌دار شده است. از این منظر، یافته‌های پژوهش حاضر صرفاً بیانگر نوسانات تصادفی نیستند، بلکه وجود الگوهای مشخص در روندها و نقاط تغییر، بیان‌کننده پویایی درونی و تحول‌پذیری پوشش گیاهی در مقیاس حوضه است. به طور کلی، کاهش سطوح

NDVI با پایین و افزایش یا تثبیت طبقات NDVI متوسط و بالاتر نشان دهنده تغییر تدریجی ساختار پوشش گیاهی حوضه مارون به سمت تراکم بیشتر در بخشی از عرصه‌ها طی دو دهه اخیر است. یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات پیشین همخوانی قابل توجهی دارد. گزارش روندهای افزایشی و کاهش‌ی همزمان در طبقات مختلف پوشش گیاهی با نتایج (Fensholt et al., 2012) در مقیاس جهانی و (Colditz et al., 2015) در مقیاس منطقه‌ای مطابقت دارد و توانایی داده‌های سری زمانی NDVI سنجنده MODIS در آشکارسازی روندهای معنادار پوشش گیاهی را تأیید می‌کند. همچنین تفاوت واکنش طبقات مختلف پوشش گیاهی به شرایط محیطی با یافته‌های عبدی و همکاران (Abdi et al., 2018) در زمینه پاسخ ناهمگون پوشش‌های گیاهی به تنش‌های اقلیمی همسو است. در مقیاس ملی نیز نتایج این مطالعه با پژوهش دستی‌گردی و همکاران (Dastigerdi et al., 2022) قابل مقایسه بوده و وجود الگوهای متفاوت تغییرات پوشش گیاهی در مناطق مختلف را تأیید می‌کند. با این حال، این تغییرات باید در چارچوب ماهیت پویا و گاه ناهمگن سامانه‌های محیطی تفسیر شوند و از برداشت‌های قطعی و تعمیم‌های فراتر از دامنه داده‌ها پرهیز شود. بنابراین، اهمیت اصلی این پژوهش نه فقط در ارائه تصویری از وضعیت پوشش گیاهی، بلکه در شناسایی الگوهای زمانی-مکانی، روندهای معنادار و نقاط تغییر در مقیاس حوضه آبریز است؛ موضوعی که می‌تواند مبنای مناسبی برای مطالعات تکمیلی و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در زمینه پایش و حفاظت از منابع طبیعی باشد. یافته‌های این پژوهش همچنین نشان داد که ترکیب داده‌های سری زمانی NDVI با روش‌های آماری من-کندال، شیب سن و آزمون من-کندال ترتیبی، چارچوبی کارآمد و قابل اعتماد برای پایش بلندمدت پوشش گیاهی و آشکارسازی تغییرات معنادار آن در مقیاس حوضه فراهم می‌کند. این رویکرد می‌تواند در مطالعات مشابه، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌عنوان ابزاری مناسب برای ارزیابی پویایی پوشش گیاهی، شناسایی دوره‌های تغییر و پشتیبانی از برنامه‌های مدیریتی و حفاظتی مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، علاوه بر تحلیل روندهای کلی، رفتار مقادیر حدی NDVI نیز به‌صورت توصیفی یا با استفاده از روش‌های آماری مناسب بررسی شود تا تصویری جامع‌تر از تغییرات پوشش گیاهی ارائه گردد. این پیشنهاد با مطالعات اخیر که بر اهمیت بررسی مستقل مقادیر حدی در کنار شاخص‌های متداول تأکید کرده‌اند، همخوانی دارد و می‌تواند در مطالعات آتی این حوضه مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

- Abdi, O., Shirvani, Z., and Buchroithner, M.F. (2018). Spatiotemporal drought evaluation of Hyrcanian deciduous forests and semi-steppe rangelands using moderate resolution imaging spectroradiometer time series in Northeast Iran. *Land Degrad Dev*, 29, 2525-2541. <https://doi.org/10.1002/ldr.3025>. [In Persian]
- Abdolalizadeh, Z., Ebrahimi, A., and Mostafazadeh, R. (2019). Landscape pattern change in Marakan protected area, Iran. *Reg Environ Change*, 19, 1683-1699. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01504-9>. [In Persian]
- Abolhasani, A., Tavili, A., & Khosravi, H. (2026). Simulating different scenarios of vegetation dynamics under the influence of human and climatic factors based on the residual trend analysis and machine learning. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-35649-5>. [In Persian]
- Colditz, R.R., Ressler, R.A., and Bonilla Moheno, M. (2015). Trends in 15-year MODIS NDVI time series for Mexico. In *8th International Workshop on the Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images (MultiTemp)*. Jul. 22-24, Annecy, France, pp. 1-4. <https://doi.org/10.1109/Multi-Temp.2015.7245766>
- Dastigerdi, M., Nadi, M., Raeini, M., and Kiapash, Kh. (2022). Vegetation trend analysis using NDVI time series of MODIS satellite in North Khorasan province. *National Conference on Environmental Change using Remote Sensing Technology and GIS*. Sari, Iran. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2022.20208.3554>. [In Persian]
- Dastourani, M., Zarei, M., & Ghaderi, M. (2025). Climate change and vegetation cover variations in Kohnneh watershed, Razavi Khorasan Province using remote sensing in Google Earth Engine environment. *Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)*, 3(11), 47-62. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.8922.1118>. [In Persian]
- Fensholt, R. and Proud, S.R. (2012). Evaluation of earth observation-based global long-term vegetation trends—Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series. *Remote Sensing of Environment*, 119, 131-147. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.12.015>
- Forozanfard, M., Bezrafshan, O., Esmailpour, Y., Zamani, H., & Mohammadi, M. (2025). Predicting climate change impacts on vegetation dynamics (NDVI) in dry ecosystems using machine learning models: A case study of Hormozgan Province. *Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)*, In press. [In Persian]
- Harris, A., Carr, A.S. and Dash, J. (2014). Remote sensing of vegetation cover dynamics and resilience across southern Africa. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 28, 131-139. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.11.014>

- Hashemi Dareh Badami, S., Nouraei Sefat, A., Karimi, S., & Nazari, S. (2015). Analysis of the urban heat island development trend in relation to land use/land cover change using a time series of Landsat images. *Remote Sensing and Geographic Information System in Natural Resources*, 6(3), 15–28. [In Persian]
- Kazemi, S. A. (2002). Vegetation and rangeland types of Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Province. Country Ecological Regions Identification Project, *Forests and Rangelands Research Institute*. [In Persian]
- Kanani, R., Fakheri-Fard, A., Ghorbani, M.A., & Dinpashoh, Y. (2019). Trend Analysis of Gradual and Rapid Variations of Hydro-Climatological Factors (Case study: Lighvanchai Basin). *Water and Soil Science (AGRICULTURAL SCIENCE)*, 29(1), 97-110. SID. <https://sid.ir/paper/147941/en>. [In Persian]
- Kazemzadeh, M., Malekian, A., & Rasoulzadeh, A. (2013). Analysis of river flow trends using parametric and non-parametric statistical approaches in Ardabil Province. *Earth Sciences Research*, 5, 63–75. [In Persian]
- Kendall, M.G. (1975). Rank correlation methods, *Charles Griffin*, London.
- Kuzevic, S.; Bobikova, D.; Kuzevicova, Z. (2026). Assessment of Long-Term Land Cover and Vegetation Trends Using NDVI and CORINE Data: A Case Study from Slovakia. *Land* 15. <https://doi.org/10.3390/su18020663>
- Mirahsani, M., Salman Mahini, A.R., Sufyanian, A.R., Modares, R., Jafari, R., and Mohammadi, J. (2019). Evaluation of Vegetation Water Storage Index (VSWI) Time series images of MODIS sensor in drought monitoring of Gavkhooni watershed, *Journal of Applied Ecology*. 4, 47-31. <https://doi.org/10.29252/ijae.6.4.31>. [In Persian]
- Niromand, H., and Bozornia, M. (2017). Introduction to time series. Ferdowsi University of Mashhad. [In Persian]
- Opiyo, S. B., Pienaar, L., Piketh, S. J., Burger, R. P., & Chikooore, H. (2025). Assessment of vegetation density trends in response to long-term climate change impacts in Western South Africa (1962–2022) using SPEI and NDVI time series. *Discover Forests*, 1, 29. <https://doi.org/10.1007/s44415-025-00030-3>
- Rannow, S., & Neubert, M. (Eds.). (2014). *Managing protected areas in central and eastern Europe under climate change*. Springer.
- Salarijazi, M., Ghorbani, K., Mohammadi, M., Ahmadianfar, I., Mohammadrezapour, O., Naser, M.H., Yaseen, Z.M.(2023). Spatial-temporal estimation of maximum temperature high return periods for annual time series considering stationary/nonstationary approaches in Iran urban area. *Urban Climate* 49, 101504. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101504>. [In Persian]
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63, 1379–1389.
- Tani, N. (2025). Analysis of snow cover changes and its relationship with teleconnection indices in the southern Zagros and their effects on the discharge of the Karun and Marun rivers. PhD dissertation, Yazd University. Faculty of Humanities, Department of Geography. [In Persian]
- Theil, H. (1950). A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. Part 3. *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen*, 53, 1397–1412.
- Vivekanandan, N. (2007). Analysis of trend in rainfall using non-parametric statistical methods; International symposium on rainfall rate and radio wave propagation, *American Institute of Physics*, 101-113
- Willis, K.S. (2015). Remote sensing change detection for ecological monitoring in United States protected areas. *Biological Conservation*. 182, 233-242. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.12.006>
- Zare Khormizi, H., Hosseini, S. Z. A., Mokhtari, M. H., & Ghaffarian Malmiri, H. R. (2017). Reconstruction of MODIS NDVI time series using harmonic analysis of time series (HANTS): A case study of Yazd Province. *Spatial Planning and Development*, 21(3), 221–255. [In Persian]
- Yang, J., Weisberg, P.J., and Bristow, N.A. (2012). Landsat remote sensing approaches for monitoring long-term tree cover dynamics in semi-arid woodlands: Comparison of vegetation indices and spectral mixture analysis. *Remote Sensing of Environment*, 119, 62-71. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.12.004>