Hakim Sabzevari University

Arid Regions Geographic Studies

Homepage: jargs.hsu.ac.ir

P- ISSN: 2228-7167
E- ISSN: 2981-1910

Revealing and analyzing the temporal-spatial trend of desertification in the south of Yazd province (Study area: Khatam and Abarkuh counties)

Zahra Behzadi[1], Mohammad Sharifi Pichoon[2]✉

1. Department of geography, Faculty of humanities, Yazd university, Yazd, Iran. Zhrabhzady495@gmail.com
2. Corresponding author, Department of geography, Faculty of humanities, Yazd university, Yazd, Iran. msharifi@yazd.ac.ir

Article Information

Research Paper

Vol: 17
No: 64
P: 195-220
Received: 2025-09-22
Revised: 2025-11-03
Accepted: 2025-11-05
Published: 2026-08-01

Keywords:

- *Desertification*
- *South of Yazd Province*
- *Desertification indicators*
- *Environmental changes*
- *Google Earth Engine*

Cite this Article:

Behzadi, Zahra, & Sharifi Paichoon, Mohamad. (2026). Revealing and analyzing the temporal-spatial trend of desertification in the south of Yazd province. *Journal of Arid Regions Geographic Studies* 17*(64):* 195-220.

Publisher: Hakim Sabzevari University

The Author(s) retain the copyright and full publishing rights.

10.22034/jargs.2025.548516.1232

Abstract

Aim: The southern part of Yazd Province, particularly in Khatam and Abarkuh counties, is more exposed to desertification due to limited rainfall, rising temperatures, and human pressure. This study aims to analyze the spatio-temporal trends of desertification and its influencing climatic factors from 2000 to 2022 using remote sensing and climatic variables.

Material & Method: The study examined vegetation cover index (NDVI), Palmer Drought Severity Index (PDSI), precipitation, runoff, and minimum/maximum temperatures. Data were extracted from MODIS, TerraClimate, and WorldClim satellite products and processed using ArcGIS, R programming, and Google Earth Engine. The non-parametric Mann-Kendall test was applied to determine trends, and the Pearson correlation coefficient was calculated to assess relationships between NDVI and other variables.

Findings: Results show a significant decline in NDVI across over 85% of southern Yazd Province (−0.026 per month), mainly driven by reduced precipitation (65% of pixels), lower runoff (60%), and negative PDSI values (70%). The decline was most severe in low-elevation, arid areas, affecting up to 90% of pixels. Minimum and maximum temperatures increased in over 80% of the region, accelerating evapotranspiration and soil moisture loss. Persistent negative PDSI values indicate long-term droughts. Time-series analysis confirmed significant decreases in NDVI ($Z = -4.21$) and PDSI ($Z = -2.04$), with no significant trends in precipitation ($Z = 1.02$), runoff ($Z = 1.08$), or temperature.

Conclusion: Desertification in southern Yazd stems from the combined effects of declining precipitation (65%), runoff reduction (60%), temperature rise (80%), and recurrent droughts (70%). If current trends persist, the ongoing NDVI decline (−0.026 per month) could result in over 30% vegetation loss within the next decade, severely threatening ecosystem stability.

Innovation: The innovation lies in the integrated use of long-term satellite data, trend analysis, and correlation assessment of these parameters with NDVI.

Extended Abstract

1. Introduction

Desertification is one of the most complex and serious environmental challenges in the arid and semi-arid regions of the world, particularly in the central plateau of Iran. This phenomenon, which occurs gradually under the influence of both natural and anthropogenic factors, leads to ecosystem degradation, soil deterioration, loss of vegetation cover, decline in water quality, and ultimately, the destabilization of local livelihoods. Yazd Province, due to its geographical position within the global arid belt, is among the most susceptible regions in Iran to desertification. Among its territories, Khatam and Abarkouh counties in the southern part of Yazd Province are particularly vulnerable, owing to their extremely low annual precipitation (less than 120 mm), high summer temperatures (exceeding 45°C), high evapotranspiration rates (over 2500 mm per year), and anthropogenic pressures such as dryland farming, overgrazing, and excessive groundwater extraction. The primary objective of this study is to analyze the spatio-temporal trends of desertification in this region and to investigate its relationship with key climatic variables, including the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), precipitation, minimum and maximum temperature, surface runoff, and the Palmer Drought Severity Index (PDSI), over the period 2000–2022. This time frame was selected due to the availability of high-resolution satellite data and significant climatic fluctuations over the past two decades, making it suitable for long-term desertification analysis.

2. Materials and Methods

This study utilized long-term satellite and climatic datasets. NDVI was derived from the MODIS product MOD13A3, with a 1 km spatial resolution and a monthly temporal resolution. Precipitation and minimum and maximum temperature data were obtained from the WorldClim database with a spatial resolution of 1 km. PDSI and surface runoff data were extracted from the TerraClimate database with a spatial resolution of 4 km and monthly temporal intervals. All datasets were processed for the period 2000–2022 within the boundaries of Khatam and Abarkouh counties in southern Yazd Province. After data preprocessing, the annual mean of each variable was calculated. The non-parametric Mann–Kendall test was employed to analyze temporal trends, while the Sen's slope estimator was used to quantify the rate of change. Pearson's correlation coefficient was applied to examine the relationships between NDVI and other variables using R software and the Google Earth Engine platform. Furthermore, pixel-wise trend and correlation analyses were conducted, and spatial maps were generated.

3. Results and Discussion

Trend analysis revealed that more than 85% of the study area exhibited a statistically significant decreasing trend in NDVI (average slope of –0.026 units per month, $p < 0.001$). This decline was more pronounced in lowland, arid regions such as the central plains of Khatam and eastern Abarkouh, where up to 90% of the pixels showed negative trends. Conversely, the western foothill areas, which receive relatively higher rainfall, showed weaker declines or even slight increases in NDVI. Climatically, precipitation showed a significant decreasing trend across 69% of the region (average slope of –0.00006 mm per month), surface runoff decreased in 71% of the area, and the PDSI showed negative trends in 78% of the area, indicating intensified drought conditions. Minimum and maximum temperatures exhibited increasing trends in 61% and 67% of the area, respectively, contributing to higher evapotranspiration rates and additional stress on vegetation cover. Correlation analysis indicated significant positive relationships between NDVI and precipitation (75%), surface runoff (65%), and PDSI (72%), while NDVI exhibited negative correlations with minimum and maximum temperatures (54%). Temporally, the second decade (2010–2022) was more critical than the first (2000–2010); the years 2015–2018 recorded the most severe droughts and the lowest NDVI values. Only in 2020 did exceptional rainfall temporarily improve vegetation conditions; however, this improvement was short-lived, and the downward trend resumed in subsequent years.

4. Conclusion

Desertification in the southern part of Yazd Province is a multifactorial process influenced simultaneously by decreasing precipitation, reduced runoff, intensified droughts, and rising temperatures. Continuation of these trends could lead to the loss of more than 30% of the vegetation cover within the next decade. Areas with more than an 85% decline in NDVI should be prioritized for rehabilitation interventions. Such measures include the planting of native, drought-resistant species, runoff and watershed management, soil conservation, and community-based environmental education. It is also recommended that continuous monitoring of climatic indicators using satellite data and climate prediction models be established as part of an early warning system for desertification, enabling proactive adaptation planning to climate change.

5. Acknowledgements and Funding

This article is derived from the Master's thesis of Zahra Behzadi in the field of Environmental Hazards at Yazd University, titled "Investigating the Desertification Trend in the Southern Part of Yazd Province (Khatam and Abarkouh Counties)," conducted with the material and spiritual support of Yazd University.

6. Conflict of Interest

The authors declare that there are no financial or personal conflicts of interest in conducting this study.

مطالعات جغرافیایی مناطق خشک

دانشگاه حکیم سبزواری

آشکارسازی و تحلیل روند زمانی–مکانی بیابان‌زایی در جنوب استان یزد (منطقه مورد مطالعه: شهرستان‌های خاتم و ابرکوه)

زهرا بهزادی[1]، محمد شریفی پیچون[2]✉

۱– گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه یزد، یزد، ایـران. Zhrabhzady495@gmail.com

۲– نویسنده مسئول، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه یزد، یزد، ایران. msharifi@yazd.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دوره: ۱۷

شماره: ۶۴

صفحه: ۲۲۰-۱۹۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۱۰

کلیدواژه‌ها:

- *بیابان‌زایی*
- *جنوب استان یزد*
- *شاخص‌های بیابان‌زایی*
- *تغییرات محیطی*
- *گوگل ارث انجین*

نحوه ارجاع به این مقاله:

بهزادی، زهرا.، شریفی پیچون، محمد. (۱۴۰۵). آشکارسازی و تحلیل روند زمانی–مکانی بیابان‌زایی در جنوب استان یزد (منطقه مورد مطالعه: شهرستان‌های خاتم و ابرکوه). *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۱۷(۶۴): ۱۹۵-۲۲۰.

ناشر: دانشگاه حکیم سبزواری

نویسندگان حق نشر و حقوق کامل انتشار را حفظ می‌کنند.

10.22034/jargs.2025.548516.1232

چکیده

هدف: جنوب استان یزد به ویژه در شهرستان‌های خاتم و ابرکوه به دلیل محدودیت بارندگی، افزایش دما و فشار انسانی بیش از سایر بخش‌ها در معرض بیابان‌زایی قرار دارد. هدف این پژوهش تحلیل روند زمانی–مکانی بیابان‌زایی و عوامل اقلیمی مؤثر بر آن طی بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ با استفاده از داده‌های سنجش از دور و متغیرهای اقلیمی است.

روش و داده: در این تحقیق شاخص‌های پوشش‌گیاهی (NDVI)، خشکسالی پالمر (PDSI)، بارندگی، رواناب و دماهای حداقل و حداکثر بررسی شدند. داده‌ها از محصولات ماهواره‌ای MODIS، TerraClimate و WorldClim استخراج و پس از پردازش در ArcGIS، با زبان برنامه‌نویسی R و سامانه Google Earth Engine تحلیل گردیدند. آزمون ناپارامتریک من–کندال برای تعیین روند و ضریب همبستگی پیرسون برای سنجش ارتباط بین NDVI و سایر متغیرها محاسبه گردید.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که شاخص NDVI در بیش از ۸۵٪ مساحت منطقه روند کاهشی معنی‌دار (با شیب متوسط ۰/۰۲۶-) داشته است. این کاهش با افت بارندگی در ۶۵٪ پیکسل‌ها، کاهش رواناب در ۶۰٪ مناطق و مقادیر منفی شاخص PDSI در ۷۰٪ پیکسل‌ها همزمان بود. در مناطق پست و کم‌بارش کاهش شدیدتر NDVI (تا ۹۰٪ پیکسل‌ها با روند کاهشی) مشاهده شد. در ماه‌های حداقل و حداکثر روند افزایشی در بیش از ۸۰٪ مساحت مشاهده شد که موجب تشدید تبخیر–تعرق و کاهش رطوبتی خاک گردید. شاخص PDSI در بیشتر سال‌ها مقادیر منفی را نشان داد که بیانگر خشکسالی‌های طولانی‌مدت است. تحلیل نتایج آزمون من–کندال نیز کاهش معنی‌دار (Z-statistic = -۴/۲۱۱۱) و NDVI (Z-statistic = -۲/۰۴۴۳) PDSI را تأیید کرد.

نتیجه‌گیری: یافته‌های پژوهش نشان داد که بیابان‌زایی در جنوب استان یزد نتیجه هم‌زمانی کاهش بارندگی (تا ۶۵٪ مساحت با روند کاهشی)، افت رواناب (۶۰٪ پیکسل‌ها)، افزایش دما (۸۰٪ مساحت با روند افزایشی) و خشکسالی‌های متوالی (کاهش PDSI در ۷۰٪ مناطق) است. تداوم این روندها خطر بیابان‌زایی را در آینده تشدید کرده و پایداری اکوسیستم را تهدید می‌نماید.

نوآوری، کاربرد نتایج: نوآوری این تحقیق در استفاده ترکیبی از داده‌های ماهواره‌ای در بازه بلندمدت، تحلیل روند و بررسی همبستگی این پارامترها با شاخص NDVI است. نتایج می‌تواند به مدیران منابع‌طبیعی و تصمیم‌گیران استانی در برنامه‌ریزی سازگار با تغییرات اقلیمی کمک کند.

۱- مقدمه

بیابان‌زایی به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی قرن بیست‌ویکم، تهدیدی جدی برای امنیت غذایی، منابع آب، تنوع زیستی و پایداری اقتصادی جوامع به شمار می‌آید. بر اساس گزارش «چشم‌انداز جهانی زمین» سازمان ملل متحد، بیش از ۲ میلیارد نفر در جهان به طور مستقیم تحت تأثیر تخریب سرزمین قرار دارند و سالانه حدود ۱۲ میلیون هکتار از اراضی حاصل‌خیز به دلیل بیابان‌زایی از بین می‌رود (UNCCD[1], 2022). در ایران، به دلیل قرارگیری بیش از ۸۵ درصد مساحت کشور در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، شرایط برای گسترش بیابان‌زایی بسیار مستعد است. مطالعات داخلی نشان داده است که حدود ۱۰۰ میلیون هکتار از اراضی کشور در معرض درجات مختلف بیابان‌زایی قرار دارد که ۲۰ میلیون هکتار آن با فرسایش بادی، ۷۵ میلیون هکتار با فرسایش آبی، و چند میلیون هکتار نیز با تخریب‌های شیمیایی و فیزیکی تهدید می‌شوند (Getty, 2020).

بیابان‌زایی فرآیندی چندبعدی است که در اثر برهم‌کنش عوامل طبیعی و انسانی رخ می‌دهد. از منظر اقلیمی، کاهش بارندگی، افزایش دمای حداقل و حداکثر، تشدید تبخیر و تعرق، و وقوع خشکسالی‌های متوالی، چرخه‌ای از کاهش رطوبت خاک، افت پوشش گیاهی و فرسایش خاک را به راه می‌اندازد. از سوی دیگر، فعالیت‌های انسانی همچون بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، تغییر کاربری اراضی، چرای مفرط و کشاورزی نامتوازن فشار مضاعفی بر اکوسیستم وارد می‌کنند (Reynolds et al., 2007). به همین دلیل، پایش و تحلیل شاخص‌های کلیدی نظیر پوشش گیاهی (NDVI[2])، رواناب، شاخص خشکسالی پالمر (PDSI[3])، بارندگی و تغییرات دمایی به عنوان ابزاری علمی و کاربردی در ارزیابی روند بیابان‌زایی توصیه شده است (Verón et al., 2006). در ایران نیز پژوهشگران نشان داده‌اند که افت شدید پوشش گیاهی و تغییرات الگوی بارش، بیشترین سهم را در پیشروی بیابان دارند و در کنار آن، تغییرات دمایی و تشدید خشکسالی‌ها، شرایط را بحرانی‌تر کرده است (Zahtabiyan et al., 2015). با توجه به روند فزاینده بیابان‌زایی در ایران و به ویژه مناطق خشک مرکزی، شناسایی دقیق شاخص‌های مؤثر و ارزیابی روند تغییرات آن‌ها برای مدیریت پایدار منابع طبیعی ضروری است. تجربه‌های بین‌المللی نشان داده است که بدون پایش منظم پارامترهایی همچون: رواناب، تبخیر و تعرق و بارندگی امکان پیش‌بینی دقیق و برنامه‌ریزی مؤثر برای کنترل بیابان‌زایی وجود ندارد (Thomas, 2011). در ایران، بسیاری از مناطق خشک به دلیل ضعف در داده‌های بلندمدت و فقدان مدل‌های پیش‌بینی بومی، در برابر شوک‌های اقلیمی و فشارهای انسانی آسیب‌پذیرند (Feizi Koushki et al., 2019).

اوزجان و همکاران، در مطالعه‌ای به بررسی اثر خشکسالی بر مقادیر کمی جریان رودخانه‌ی بیتلیس درکشور ترکیه پرداختند و با استفاده از شاخص جریان خشکسالی (SDI[4]) و تجزیه و تحلیل روند تغییرات خشکی با استفاده از داده‌های متوسط جریان ماهانه دریافتند که اثر خشکسالی بر مقادیر دبی جریان رودخانه محسوس بوده و بیش‌ترین دوره‌ی خشک مربوط به ماه ژوئن با ۶۵٪ وضعیت خشکی و کمترین دوره‌ی خشک در ماه مارس با ۴۸٪ وضعیت خشکی بوده است (Özcan et al., 2019). زو و همکاران در مطالعه‌ای چهارچوبی برای شناسایی مناطق اولویت‌دار برای کنترل بیابان‌زایی از طریق یکپارچه سازی حساسیت زمین طراحی کردند. این چهارچوب در شمال چین تأیید شد و با موفقیت مناطق اولویت‌دار و گزینه‌های احیای زمین را برای حمایت از کنترل بیابان‌زایی به هم مرتبط کردند. نتایج نشان داد در شمال چین مناطقی که اولویت بالایی برای‌کنترل بیابان‌زایی داشتند و تنها ۱۱/۵٪ از کل مساحت را تشکیل داده‌اند و در مناطق مرکزی و شمال‌غربی پراکنده بوده‌اند و مناطقی که اولویت بالایی در بیابان‌زایی منطقه داشتند ۵۱/۲٪ بوده‌اند که عمدتاً در بخش‌های غربی و شمال چین توزیع شده‌اند (Xu et al., 2022).

ژیانگ و همکاران در تحقیقی، از شاخص رطوبت برای تعیین نوع آب و هوا و ترسیم محدوده احتمالی وقوع بیابان‌زایی در چین استفاده کردند. سپس، بر اساس پلتفرم Google Earth Engine، از داده‌های MODIS برای ساخت شاخص‌های مختلف پایش بیابان‌زایی استفاده کردند و از آن‌ها در چهار مدل یادگیری ماشین استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل جنگل تصادفی با چهار ترکیب شاخص، بالاترین دقت ۸۶٪ را دارد (Jiang et al., 2023). شو و همکاران در پژوهشی به بررسی دقیق توزیع فضایی بیابان‌زایی با وضوح ۳۰ متر از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ در فلات مغولستان پرداختند. برای این امر، منطقه بالقوه وقوع بیابان‌زایی با

1. United Nations Convention to Combat Desertification
2. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)
3. Palmer Drought Severity Index (PSDI)
4. Standardized Drought Index (SDI)

استفاده از شاخص رطوبت در MP[1] شناسایی شد. در ادامه مدل فضایی و پنج مدل یادگیری ماشین برای تهیه نقشه بر اساس Google Earth Engine و داده‌های لندست[۲] ساخته شدند. توزیع فضایی–زمانی بیابان‌زایی بیشتر تجزیه و تحلیل شد و عوامل اصلی محرک توزیع و تکامل بیابان‌زایی با استفاده از مدل Geodetector شناسایی شدند. نتایج نشان داد که مساحت بالقوه وقوع بیابان‌زایی ۸۳/۸۸ درصد از کل مساحت زمین را تشکیل می‌دهد (Xu et al.,2024). رن و همکاران در مطالعه‌ای از یک مدل بهبود یافته بیابان‌زایی (MEDALUS[3]) برای ارزیابی توزیع فضایی چند ساله حساسیت بیابان‌زایی در سراسر چین در سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ استفاده کردند. برای این امر از تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA[4]) برای ارزیابی ثبات داخلی مدل استفاده کردند. علاوه بر این، از یک روش آشکارساز جغرافیایی برای بررسی ساز و کارهای محرک حساسیت بیابان‌زایی در چین استفاده کردند. نتایج نشان داد که مناطق بیابانی بسیار حساس عمدتاً در مناطق بیابانی شمال غربی و بخش شمالی چین رو به افزایش است. علاوه بر این، نسبت مساحت زمینی که کاهش کلی (۱۷٪) در حساسیت را نشان می‌دهد از نسبت مساحت زمینی که افزایش را نشان می‌دهد، بیشتر بوده است (Ren et al., 2024). اسلام و همکاران در تحقیقی به بررسی علل اساسی بیابان‌زایی و پیامدهای عمیق زیست‌محیطی، برای مبارزه با آن پرداختند. برای این منظور از رویکردهایی که هدف از آن کاهش اثرات بیابان‌زایی است، به ویژه اهمیت شیوه‌های مدیریت پایدار زمین، مانند جنگل‌کاری مجدد و حفاظت از خاک، استفاده کردند. همچنین موانع متعددی را که بر سر راه اجرای عملی این راهبردها وجود دارد و مسیرهای بالقوه آینده را برای مدیریت مؤثرتر بررسی کردند. نتایج پژوهش نشان داد از آنجا که بیابان‌زایی همچنان اکوسیستم‌ها و معیشت در مناطق آسیب‌پذیر را تهدید می‌کند، درک جامع از راهبردها، چالش‌ها و راه‌حل‌های بالقوه برای اطمینان از انعطاف‌پذیری جوامع آسیب‌دیده و حفظ تنوع زیستی بسیار مهم خواهد بود (Islam et al., 2025). زو و همکاران در مطالعه‌ای بر اساس موتور گوگل ارث و با ترکیب داده‌های سنجش از دور، مجموعه‌ای از داده‌های LUCC و FVC را با دقت بالا از سرزمین شنی مو اوس از سال ۱۹۸۶ تا ۲۰۲۰ تولید کردند. مجموعه داده‌های LUCC با نمونه‌برداری تصادفی بر اساس بررسی‌های میدانی و تصاویر سنجش از دور تأیید شد و دقت کلی ۹۰٪ بود. بر اساس این دو مجموعه داده، ویژگی‌های دینامیکی فضایی–زمانی بیابان‌زایی و احیای اکولوژیکی در منطقه بیشتر تجزیه و تحلیل و آشکار شد. نتایج نشان داد که زمین‌های بیابانی در سرزمین شنی مو اوس از سال ۱۹۸۶ تا ۲۰۲۰ به میزان ۶۹/۴۵ درصد کاهش یافته است و مرکز ثقل به تدریج به سمت شمال غربی دور از تجمع انسانی منتقل شده است (Xu et al., 2025).

اکبری و همکاران با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به بررسی وضعیت بیابان‌زایی در جنوب نیشابور پرداختند. برای این امر پس از عملیات میدانی، بررسی عکس‌های‌هوایی و تصاویر ماهواره‌ای اقدام به جمع‌آوری اطلاعات و تجزیه و تحلیل آن‌ها در سیستم اطلاعات جغرافیایی‌کردند. سپس طبق روش فائو–یونپ، به امتیازدهی معیارهای تأثیرگذار مانند فرسایش‌بادی و آبی، گسترش شوری و زوال پوشش‌گیاهی پرداختند. نتایج نشان‌داد که منطقه به دلیل خشکسالی، تبدیل اراضی مرتعی به کشاورزی دیم، فرسایش‌آبی و بادی، تخریب پوشش‌گیاهی و مدیریت نامناسب زمین با مشکل بیابان‌زایی روبه‌رو بوده است (Akbari et al., 2011). حبیبی و همکاران در پژوهشی به بررسی و تهیه‌ی نقشه‌ی شدت بیابان‌زایی در رخساره‌های ژئومورفولوژی در استان خوزستان پرداختند و جهت ارزیابی وضعیت بیابان‌زایی از معیارهایی شامل خاک، اقلیم، پوشش‌گیاهی، فرسایش بادی و آبی، مدیریت و سیاست استفاده کردند. نتایج نشان داد که ۵۳/۷ درصد از کل منطقه در کلاس بیابان‌زایی بسیار شدید، ۳۶/۳ درصد درکلاس شدید و ۹/۸ درصد در کلاس متوسط از نظر بیابان‌زایی قرارگرفته است (Habibi et al., 2014). سرگزی و همکاران در مقاله‌ای به بررسی نیروهای مدیریتی مؤثر بر بیابان‌زایی در دشت سیستان پرداختند. به منظور انجام این پژوهش از طریق منابع علمی مرتبط، پرسش‌نامه و گروهی تخصصی از کارشناسان مرتبط طی دو مرحله با به‌کارگیری روش دلفی لیستی از عوامل پیشران مدیریتی تهیه کردند. سپس عوامل کاندید در ۸ معیار، گروه‌بندی شدند و در انتها با ابزار پرسش‌نامه، مورد قضاوت کارشناسان قرارگرفتند. نتایج حاصل از تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نشان‌داد که مهم‌ترین عوامل مدیریتی مؤثر بر تخریب زمین و بیابان‌زایی دشت سیستان به ترتیب رتبه مربوط به: فقدان مدیریت جامع حوضه‌ی آبریز در برنامه‌ریزی‌ها، معیار دانش و شناخت؛ تنها بودن منابع طبیعی درکار مقابله با بیابان‌زایی و معیار مدیریت بیابان بوده‌اند (Sargazi et al., 2019). حیدری‌علمدارلو و همکاران تحقیقی با ارائه‌ی راهکارهای مدیریت

1. Moisture Proxy (MP)
2. Landsat
3. Mediterranean Desertification and Land Use (MEDALUS)
4. Principal Component Analysis (PCA)

بیابان‌زایی در دشت یزد-اردکان بر اساس مدل SWOT انجام دادند. جهت اجرای این پژوهش، عوامل درونی (دانش بومی قوی، اقلیم خشک و وجود کانون‌های فرسایش باد در منطقه) و عوامل بیرونی (تغییر نوع پوشش و ورود گونه‌های‌گیاهی غیر بومی و ناسازگار با شرایط منطقه با آثار مخرب، برهم زدن تعادل زیست‌محیطی) مؤثر بر فرایند بیابان‌زایی در منطقه‌ی مورد نظر توسط روش دلفی تعیین و توسط مدل SWOT جمع‌بندی شدند و راهکارهای کنترل بیابان‌زایی برای منطقه ارائه شدند (Heydari Alamdarloo et al., 2022). قاسمی آریان و همکاران پژوهشی با هدف برآورد شدت بیابان‌زایی و تخریب سرزمین از منظر آب و فرونشست در حوضه آبریز قره قوم انجام دادند. برای این امر، نقشه‌های پهنه‌بندی سه شاخص معیار آب زیرزمینی: (هدایت الکتریکی، نسبت جذب سدیم، افت سطح تراز) برای ۲۷۳ چاه مشاهده شده در بازه زمانی ۱۳۹۷-۱۳۸۰، بر اساس طبقات شدت بیابان‌زایی (کم، متوسط، شدید و خیلی شدید) به روش معکوس مربع فاصله (IDW[1]) در محیط نرم‌افزار GIS تهیه کردند. در ادامه، با تلفیق نقشه‌های یاد شده با نقشه میزان فرونشست زمین برای سال آبی ۱۳۹۵-۱۳۹۴، نقشه شدت بیابان‌زایی محدوده مطالعاتی را استخراج کردند. نتایج نشان داد وضعیت بالفعل بیابان‌زایی از نظر شاخص هدایت الکتریکی، در ۴۶/۶ درصد حوضه مورد مطالعه شدید و خیلی شدید است. همچنین این میزان در رابطه با نسبت جذب سدیم در ۹۰/۶ درصد حوضه، کم و در رابطه با شاخص افت آب زیرزمینی ۵۳/۴ درصد حوضه شدید و خیلی شدید است (Ghasemi Arian et al., 2025). ذاکری نژاد و همکاران در مطالعه‌ای به ارزیابی روند بیابان‌زایی و تغییرات زیست محیطی در حوضه مند، با استفاده از شاخص‌های سنجش ازدور شامل (NDVI، EVI[2]، SAVI[3]، LAI، VCI[4]، LST[5] و آلبدو)، در سه بازه زمانی ۲۰۰۰، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳ پرداختند. نتایج نشان داد که منطقه دارای روند معناداری از بیابان‌زایی است. شاخص‌های پوشش گیاهی شامل NDVI، EVI و SAVI روند کاهشی معناداری را نشان دادند. همچنین شاخص‌های خاکی مانند آلبدو و LAI نیز تغییرات قابل توجهی را آشکار کردند (Zakeri Nejad et al., 2025).

مرور مطالعات بین‌المللی و داخلی نشان می‌دهد که بیابان‌زایی پدیده‌ای چندبعدی است که تحت تأثیر هم‌زمان عوامل اقلیمی، هیدرولوژیکی و انسانی قرار دارد. شاخص‌هایی همچون NDVI، رواناب، خشکسالی پالمر، بارندگی و تغییرات دمایی، ابزارهای کلیدی برای ارزیابی و پایش روند بیابان‌زایی به شمار می‌آیند و در اغلب تحقیقات، ترکیب آن‌ها دقت و جامعیت تحلیل را افزایش داده است. یافته‌های جهانی تأکید دارند که تغییرات اقلیمی، از طریق تشدید خشکسالی‌ها، افزایش دما و تغییر الگوهای بارش، محرک اصلی بیابان‌زایی در مناطق خشک هستند. جنوب استان یزد، شامل شهرستان‌های خاتم و ابرکوه، به دلیل موقعیت جغرافیایی و قرارگیری در کمربند خشک ایران مرکزی و ویژگی‌های خاص اقلیمی، از مناطق بسیار حساس و مستعد بیابان‌زایی محسوب می‌شود. این ناحیه با میانگین بارش سالانه کمتر از ۱۲۰ میلی‌متر، تبخیر و تعرق بالقوه سالانه بیش از ۲۵۰۰ میلی‌متر، و دمای حداکثر تابستانی که گاه از ۴۵ درجه سانتی‌گراد فراتر می‌رود، با کمبود شدید منابع آبی و فشار گرمایی مواجه است (Iran Meteorological Organization, 2022). پراکنش نامنظم بارش، همراه با رگبارهای کوتاه‌مدت و شدید، نه تنها منجر به ایجاد رواناب‌های مخرب و فرسایش آبی می‌شود؛ بلکه از تغذیه کافی آبخوان‌ها نیز جلوگیری می‌کند. در این شرایط، کاهش تراکم و تنوع پوشش‌گیاهی و افزایش پدیده خشکسالی‌های پی در پی، که با شاخص خشکسالی پالمر به خوبی قابل ردیابی است، زمینه تشدید فرسایش خاک و گسترش اراضی بیابانی را فراهم کرده است (Shokoohi et al., 2012). شهرستان‌های خاتم و ابرکوه به دلیل حساسیت بالای اکولوژیکی در استان یزد، نیازمند مطالعه‌ای جامع برای تعیین روند تغییرات این شاخص‌ها هستند تا بتوان اقدامات مدیریتی هدفمند و مبتنی بر شواهد علمی را اجرا کرد. هدف این پژوهش، پایش و تحلیل بلندمدت پنج شاخص کلیدی یادشده و تبیین ارتباط آن‌ها با فرآیند بیابان‌زایی در جنوب استان یزد است تا نتایج آن بتواند مبنای تصمیم‌گیری مدیران منابع طبیعی و سیاست‌گذاران حوزه محیط‌زیست قرار گیرد. رویکرد نوآورانه این مطالعه در مقایسه با تحقیقات پیشین در ایران، استفاده همزمان از چند شاخص کلیدی و تحلیل همبستگی میان آن‌ها است که می‌تواند روابط علت و معلولی بین تغییرات پوشش‌گیاهی و سایر پارامترهای اقلیمی را آشکار سازد. این تلفیق داده‌ها و تحلیل‌ها، علاوه بر افزایش دقت ارزیابی وضعیت بیابان‌زایی، امکان شناسایی مناطق بحرانی و اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی را نیز فراهم می‌آورد. با توجه به گستره و شدت پدیده بیابان‌زایی در جنوب استان یزد و نقش پررنگ عوامل اقلیمی و انسانی در تشدید آن،

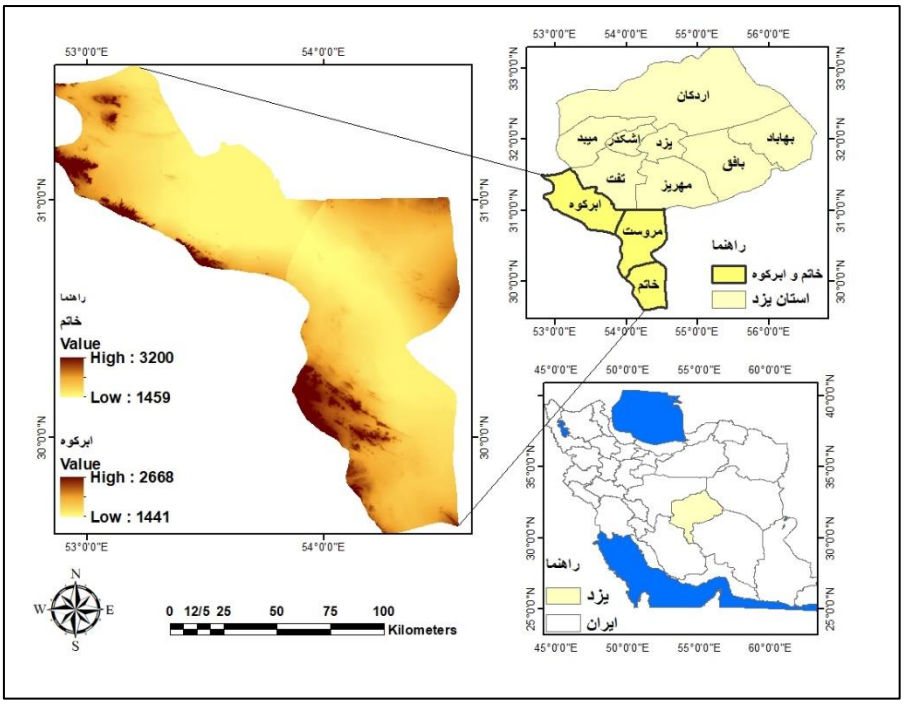
1. Inverse Distance Weighting (IDW)
2. Enhanced Vegetation Index (EVI)
3. Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)
4. Vegetation Condition Index (VCI)
5. Land Surface Temperature (LST)

این پژوهش با هدف ارزیابی جامع پنج شاخص کلیدی: پوشش گیاهی، رواناب، خشکسالی پالمر، بارندگی، و دماهای حداقل و حداکثر در یک بازه زمانی بلندمدت طراحی شده است. نتایج حاصل می‌تواند ضمن ارائه تصویری روشن از روندها و روابط میان این شاخص‌ها، مبنای برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری برای کاهش اثرات بیابان‌زایی گردد (Ganjaian et al. 2023).

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در جنوب استان یزد، شامل شهرستان‌های خاتم و ابرکوه، در محدوده جغرافیایی حدود ′۳۰°۰۰ تا ′۳۱°۰۰ عرض شمالی و ′۵۳°۰۰ تا ′۵۵°۰۰ طول شرقی واقع شده است و در شکل (۱) آمده است. این منطقه بخشی از پهنه خشک و نیمه‌خشک فلات مرکزی ایران است که از شمال به شهرستان مهریز، از جنوب به استان فارس، از شرق به استان کرمان و از غرب به استان اصفهان محدود می‌شود. اقلیم غالب آن بر اساس طبقه‌بندی دومارتن، خشک بیابانی و نیمه‌خشک است. میانگین بارندگی سالانه کمتر از ۱۲۰ میلی‌متر، میانگین دمای سالانه بین ۱۹ تا ۲۲ درجه سانتی‌گراد، و تبخیر و تعرق بالقوه بیش از ۲۵۰۰ میلی‌متر گزارش شده است (Iran Meteorological Organization, 2022). پراکنش بارش در این منطقه به شدت نامنظم بوده و بیشترین میزان بارندگی در ماه‌های زمستان و اوایل بهار رخ می‌دهد، در حالی که فصل تابستان کاملاً خشک و گرم است. حداکثر دما در تیر و مرداد گاهی از ۴۵ درجه سانتی‌گراد فراتر می‌رود و حداقل دما در دی‌ماه ممکن است به زیر صفر برسد. منابع آب سطحی بسیار محدود بوده است. از نظر خاک‌شناسی، بخش‌های وسیعی از اراضی منطقه دارای خاک‌های سبک شنی–رسی و لومی با درصد پایین مواد آلی هستند. ترکیب این شرایط اقلیمی، هیدرولوژیکی و خاکی، جنوب استان یزد را به یکی از کانون‌های بالقوه بیابان‌زایی در کشور تبدیل کرده است.



شکل ۱. نقشه موقعیت جغرافیایی مناطق مورد مطالعه در سطح استان و کشور

۲-۲- روش پژوهش

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، جنوب استان یزد شامل شهرستان‌های خاتم و ابرکوه است که با مساحت تقریبی ۱۰۵۰۰ کیلومتر مربع، در اقلیم خشک و نیمه‌خشک قرار دارد و بر اساس طبقه‌بندی De Martonne، دارای شاخص خشکی بین ۵ تا ۱۰ است. گردآوری و تدوین مبانی و چارچوب پژوهش با بهره‌گیری از منابع کتابخانه‌ای، پایگاه‌های معتبر علمی و سامانه‌های تصاویر ماهواره‌ای

انجام شد. پردازش داده‌ها نیز با نرم‌افزارهای R، GIS و سامانه Google Earth Engine صورت گرفت. هدف پژوهش، تحلیل روند تغییرات بیابان‌زایی و شاخص‌های مؤثر بر آن طی یک دوره آماری ۲۲ ساله (۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲) است. بازه زمانی دریافت داده‌ها به صورت ماهانه است و برای تحلیل دقیق‌تر تبدیل به میانگین سالانه شدند.به عبارتی بازه زمانی مورد استفاده در این پژوهش میانگین سالانه هر شاخص است. شاخص‌ها و متغیرهای مورد استفاده شامل رواناب، شاخص پوشش گیاهی، بارندگی، دمای حداقل و حداکثر، و شاخص خشکسالی پالمر هستند.

برای بررسی روند شاخص‌ها با استفاده از آماره من–کندال، داده‌های مورد نیاز از منابع معتبر ماهواره‌ای و اقلیمی تهیه شد. داده‌های مربوط به رواناب و شاخص خشکسالی پالمر از پایگاه TerraClimate دانشگاه آیداهو با تفکیک مکانی تقریبی ۴ کیلومتر (۱/۲۴ درجه) و دوره زمانی ماهانه دریافت گردید. این داده‌ها در قالب فایل‌های NetCDF ارائه می‌شوند که هر فایل سالانه شامل ۱۲ لایه رستری است و در محیط ArcGIS به فرمت استاندارد تبدیل شد. داده‌های دما و بارندگی نیز از پایگاه WorldClim.org اخذ گردید. شاخص پوشش گیاهی NDVI از محصول ماهواره‌ای MODIS ناسا با کد محصول MOD13A3 (نسخه ۶.۱) استخراج شد که با تفکیک مکانی ۱ کیلومتر و پوشش ماهانه، امکان پایش دقیق تغییرات گیاهی را فراهم می‌کند؛ این محصول بر پایه داده‌های سنجنده MODIS بر روی ماهواره‌های Terra و Aqua استوار است (در این پژوهش از ماهواره Terra استفاده شد) و مقادیر NDVI را از ۰ تا ۱ (با مقیاس ۰/۰۰۰۱) ارائه می‌دهد تا تغییرات پوشش گیاهی را در برابر عوامل اقلیمی مانند خشکسالی ارزیابی کند. پس از گردآوری داده‌ها، پردازش و تحلیل‌ها در محیط نرم‌افزار R انجام شد و مقادیر متغیرهای مورد بررسی برای هر پیکسل طی دوره آماری محاسبه گردید.

در بخش همبستگی پیرسون، شاخص NDVI به عنوان مبنا در نظر گرفته شد؛ زیرا یکی از مهم‌ترین شاخص‌های نشان‌دهنده تغییرات بیابان‌زایی است. در این مرحله، ۱۲ لایه رستری NDVI با ۱۲ لایه رستری هر شاخص یا متغیر مورد بررسی در محیط R ادغام شد و ضریب همبستگی بین NDVI و سایر شاخص‌ها یا پارامترها برای هر پیکسل محاسبه گردید. مقادیر ضریب همبستگی پیرسون در بازه ۱+ تا ۱– متغیر بود. برای بررسی سری زمانی سالانه شاخص‌ها در بازه ۲۲ ساله، از داده‌های آماده پایگاه آیداهو در سامانه Google Earth Engine استفاده شد و تغییرات سالانه هر شاخص با استفاده از کدنویسی در محیط R استخراج گردید.

پایش بیابان‌زایی در مقیاس‌های زمانی و مکانی بلندمدت نیازمند به کارگیری رویکردهای تحلیلی ترکیبی است که داده‌های اقلیمی، سنجش از دور و مدل‌های آماری را تلفیق کند. در این پژوهش، داده‌های ماهواره‌ای مانند NDVI و داده‌های اقلیمی بلندمدت شامل بارندگی، رواناب، شاخص خشکسالی پالمر و دماهای حداقل و حداکثر مورد استفاده قرار گرفتند. تحلیل روندها با روش آماری آزمون من–کندال انجام شد که دقت بالایی در شناسایی تغییرات غیرخطی و نقاط عطف زمانی دارد (Yue et al., 2002).

کد برای NDVI از MODIS:

```
Map.centerObject(table);
Map.addLayer(table);

var modis = ee.ImageCollection('MODIS/061/MOD13A3')
. filterBounds(table)
. filterDate('۲۰۲۲-۱۲-۳۱' ,'۲۰۰۰-۰۱-۰۱')
. select('NDVI');


 //Scale NDVI (multiplied by 0.0001)
var ndvi = modis.map(function(img} (
  var scale = img.multiply;(۰.۰۰۰۱)
  var clip = scale.clip(table);
  return clip.rename('NDVI')
.   copyProperties(img, ['system:time_start', 'system:time_end']);
;({
```

```
 //Reduce to yearly means for trend analysis
var yearlyNDVI = ee.ImageCollection.fromImages)
  ee.List.sequence(2000, 2022).map(function(year} (
    var start = ee.Date.fromYMD(year, 1, 1);
    var end = ee.Date.fromYMD(year, 12, 31);
    return ndvi.filterDate(start, end).mean()
.     set('system:time_start', start.millis())
.     set('year', year);
({
;(

 //Export or analyze further (e.g., Mann-Kendall in R after export)
print(yearlyNDVI);
```

کد نمونه برای PDSI از TerraClimate:

```
Map.centerObject(table);
Map.addLayer(table);

var idaho = ee.ImageCollection('IDAHO_EPSCOR/TERRACLIMATE')
. filterBounds(table)
. filterDate('۲۰۲۲-۱۲-۳۱' ,'۲۰۰۰-۰۱-۰۱')
. select('pdsi');

 //Scale PDSI (multiplied by 0.01)
var pdsi = idaho.map(function(img} (
  var scale = img.multiply;(۰.۰۱)
  var clip = scale.clip(table);
  return clip.rename('pdsi')
.   copyProperties(img, ['system:time_start', 'system:time_end']);
;({

 //Reduce to yearly means for trend analysis
var yearlyPDSI = ee.ImageCollection.fromImages)
  ee.List.sequence(2000, 2022).map(function(year} (
    var start = ee.Date.fromYMD(year, 1, 1);
    var end = ee.Date.fromYMD(year, 12, 31);
    return pdsi.filterDate(start, end).mean()
.     set('system:time_start', start.millis())
.     set('year', year);
({
;(
```

```
//Export or analyze further (e.g., Mann-Kendall in R after export)
print(yearlyPDSI);
```

- **آزمون من-کندال[1]**

آزمون من-کندال یک روش ناپارامتریک برای تشخیص روند در سری‌های زمانی است که نیاز به توزیع نرمال داده‌ها ندارد و در برابر نقاط پرت مقاوم است (Yue et al., 2002). این آزمون بر پایه محاسبه علامت تفاوت‌های جفتی داده‌ها عمل می‌کند. مراحل اجرای آن به شرح زیر است:

در مرحله اول، برای یک سری زمانی X با n داده $(X_1, X_2, ..., X_n)$، علامت تفاوت هر جفت $(X_j - X_i)$ برای $j > i$ محاسبه می‌شود. علامت مثبت (+) نشان‌دهنده افزایش، منفی (−) کاهش، و صفر عدم تغییر است.

در مرحله دوم، آماره S محاسبه می‌شود که طبق رابطه (۱) است:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} /sgn(X_j - X_i) \qquad (۱)$$

که sgn تابع علامت است (۱ برای مثبت، −۱ برای منفی، ۰ برای صفر).

مرحله سوم، واریانس Var(S) برای $n \geq 10$ به صورت رابطه (۲) است:

$$Var(s) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{k=1}^{m} tk(t_k-1)(2t_k+5)}{18} \qquad (۲)$$

که m تعداد گروه‌های برابر و tk اندازه گروه k است.

در مرحله چهارم،آماره Z استاندارد محاسبه می‌شود:

اگر $S > 0$، $Z = (S - 1) / sqrt(Var(S))$

اگر $S = 0$، $Z = 0$

اگر $S < 0$، $Z = (S + 1) / sqrt(Var(S))$

اگر $|Z| > Z(1-\alpha/2)$ (برای $\alpha=0.05$، حدود ۱.۹۶)، روند معنی‌دار است (مثبت برای افزایشی، منفی برای کاهشی).

۲-۳- شاخص‌ها و پارامترهای مورد بررسی

۲-۳-۱- روش پژوهش برای محاسبه روند شاخص خشکسالی پالمر

شاخص شدت خشکسالی پالمر بر اساس مدل بیلان آبی پالمر (Palmer, 1965) طراحی شده است و با استفاده از داده‌های بارش، دما، تبخیر و تعرق بالقوه و ظرفیت رطوبتی خاک، وضعیت خشکسالی را در بازه‌های زمانی ماهانه ارزیابی می‌کند. محاسبه این شاخص به صورت خودکار در گوگل ارث انجین در چند گام انجام می‌شود:

برای برآورد PET معمولاً از روش (Thornthwaite) یا (Penman-Monteith) استفاده می‌شود. در روش Thornthwaite، فرمول کلی به شکل رابطه (۳) است:

$$PET = 16 \times (L / 12) \times (N / 30) \times (10 \times T / I)^{\wedge} m \qquad (۳)$$

که در آن T دمای میانگین ماهانه (C°)، L طول روز، N تعداد روزهای ماه، و I و m ضرایب تجربی هستند.

محاسبه بیلان آبی ماهانه در رابطه (۴) آمده است:

1. Mann-Kendall

$$D = P - PET \quad (۴)$$

که در آن P بارش ماهانه و D انحراف رطوبتی (کسری یا مازاد) است.

محاسبه Z-Index در رابطه (۵) آمده است:

$$Z = \alpha(P - Pn) + \beta(E - En) + \gamma(R - Rn) + \delta(L - Ln) \quad (۵)$$

که در آن Rn ,En ,Pn ,Ln مقادیر نرمال ماهانه و α ، β، γ، δ ضرایب حساسیت اقلیمی هستند.

محاسبه مقدار نهایی PDSI در رابطه (۶) آمده است:

$$PDSI_t = 0.897 \times PDSI_(t-1) + Z_t / 3 \quad (۶)$$

که در آن PDSI-t مقدار شاخص در ماه t و PDSI(t−1) مقدار شاخص در ماه قبل است.

در این پژوهش، داده‌های PDSI از پایگاه Terra Climate دریافت گردید. این پایگاه محاسبات فوق را بر اساس داده‌های اقلیمی اجرا کرده و خروجی را در قالب فایل‌های NetCDF با تفکیک مکانی تقریبی ۴ کیلومتر ارائه می‌دهد. داده‌های مربوط به دوره زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ استخراج و به فرمت رستری استاندارد تبدیل شد. سپس روند تغییرات با استفاده از آزمون من–کندال و شیب سن تحلیل گردید.

۲-۳-۲- روش پژوهش برای محاسبه روند بارندگی

ابتدا برای دانلود داده‌های بارندگی ماهانه از سایت Worldclime.org، که یک منبع بزرگ برای داده‌های آب و هوایی جهانی است استفاده گردید. بعد از دریافت داده‌ها، فایل Netcdf در محیط R بارگیری شد. برای این کار از بستر کار با داده‌های ماهواره‌ای Raster و ncdf4 بهره گرفته شد. سپس داده‌ها مورد پردازش قرار گرفتند. در ادامه با استفاده از کتابخانه Kendall، آزمون آماری من–کندال انجام و مقدار p-value و روند شاخص بارندگی محاسبه شد. در نهایت با استفاده از نتایج به دست آمده به ایجاد نقشه پهنه‌بندی بارندگی پرداخته شد.

۲-۳-۳- روش پژوهش برای محاسبه روند حداقل و حداکثر دما

ابتدا با مراجعه به سایت Worldclime.org داده‌های حداقل دما (t_{min}) و حداکثر دما (t_{max}) برای مقیاس ماهانه برای منطقه مورد مطالعه دانلود گردید. بعد از دریافت داده‌ها، در نرم افزار R داده‌ها فراخوانی شدند. در ادامه برای نمایش داده‌ها از کد plot(data) استفاده و از آزمون من–کندال بر روی داده‌های ماهانه بهره گرفته شد.

۲-۳-٤- روش پژوهش برای محاسبه روند شاخص پوشش گیاهی

برای بررسی روند تغییرات پوشش گیاهی، از داده‌های شاخص تفاضلی نرمال‌شده پوشش گیاهی محصول ماهواره MODIS با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر و بازه زمانی ماهانه استفاده شد. داده‌ها از پلتفرم Google Earth Engine (GEE) برای دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ استخراج گردیدند. پس از اعمال فیلتر مکانی بر روی محدوده جنوب استان یزد، داده‌ها به‌صورت ماهانه دریافت و سپس با روش ترکیب بیشینه[1] به سری سالانه تبدیل شدند.

فرمول محاسبه NDVI بر اساس بازتاب طیفی در باند نزدیک به مادون قرمز (NIR)[2] و باند قرمز[3] به صورت رابطه (۷) است:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (۷)$$

1. Maximum Value Composite
2. Near-Infrared (NIR)
3. RED

NIR بازتاب باند نزدیک به مادون قرمز

RED بازتاب باند قرمز

در مرحله بعد، داده‌های NDVI سالانه به محیط نرم‌افزار R منتقل شدند. برای هر پیکسل، آزمون ناپارامتری من–کندال به منظور تشخیص وجود روند یکنواخت و برآوردگر شیب سن[1] برای تعیین نرخ تغییرات اجرا گردید.

۲-۳-۵- روش پژوهش برای محاسبه روند رواناب

رواناب سطحی[2] به عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی هیدرولوژیکی، مقدار آبی را نشان می‌دهد که پس از کسر تبخیر و تعرق واقعی و تغییرات ذخیره رطوبتی خاک از بارندگی باقی می‌ماند و به صورت جریان سطحی یا زیرسطحی حرکت می‌کند. این شاخص در ارزیابی بیابان‌زایی اهمیت دارد؛ زیرا کاهش رواناب می‌تواند نشان‌دهنده افزایش خشکی خاک، کاهش نفوذپذیری و تشدید فرسایش باشد. در داده‌های TerraClimate، رواناب با استفاده از مدل ساده بیلان آبی (WBM)[3] محاسبه می‌شود که بر پایه داده‌های بارندگی، تبخیر و تعرق مرجع و دما استوار است. فرمول پایه‌ای محاسبه رواناب در این مدل در رابطه (۸) آمده است:

$$Q = \mathrm{P} - \mathrm{AET} - \Delta\mathrm{SM} \qquad (۸)$$

که در آن:

Q: رواناب (mm)

P : بارندگی (mm)

AET: تبخیر و تعرق واقعی (mm)

برای استخراج و تحلیل روند شاخص رواناب در این پژوهش از داده‌های ماهانه محصول Terra Climate دانشگاه آیداهو استفاده شد. این داده‌ها در قالب فایل‌های NetCDF (NC) و با تفکیک زمانی ماهانه در دسترس است. داده‌ها با قدرت تفکیک مکانی تقریبی ۴ کیلومتر، بر پایه مدل‌های اقلیمی و داده‌های مشاهداتی تصحیح شده، تخمین رواناب سطحی را به صورت جهانی ارائه می‌دهد. داده‌های مربوط به دوره زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ برای محدوده جغرافیایی جنوب استان یزد از پایگاه (Terra Climate)، گوگل ارث انجین دریافت گردید. هر فایل سالانه شامل ۱۲ لایه رستری (ماهانه) بود که در محیط نرم‌افزار ArcGIS به فرمت استاندارد تبدیل شد. سپس داده‌های ماهانه به محیط نرم‌افزار R منتقل و با استفاده از کدنویسی، لایه‌ها به صورت Stack ادغام گردید. برای محاسبه روند از آزمون ناپارامتری من–کندال که مناسب داده‌های غیرنرمال و دارای توزیع آزاد است استفاده شد. نرخ تغییرات هر پیکسل نیز با روش شیب سن برآورد گردید. در نهایت، خروجی‌ها به‌صورت نقشه‌های مکانی روند رواناب برای دوره آماری ۲۲ ساله ترسیم شد.

۳- یافته‌ها

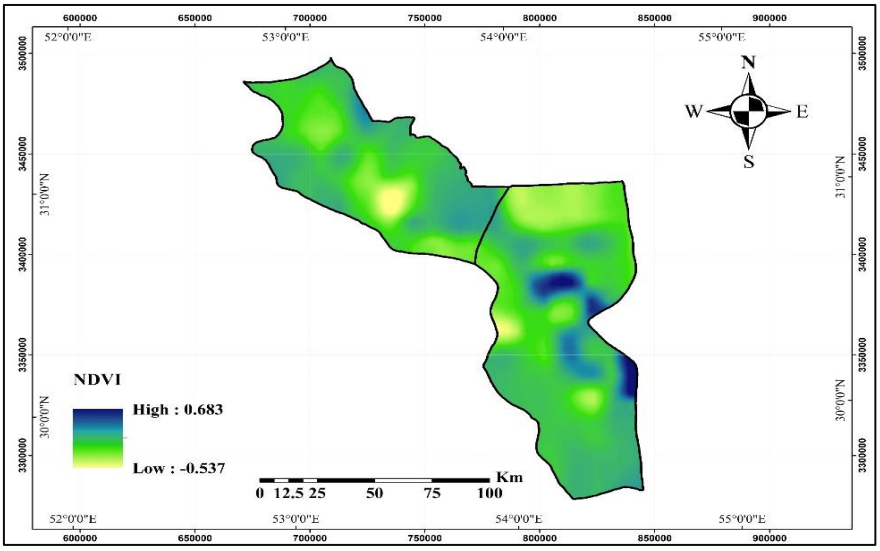
۳-۱- تحلیل روند شاخص‌های اقلیمی و محیطی

۳-۱-۱- پهنه‌بندی روند تغییرات شاخص پوشش‌گیاهی NDVI

نتایج تحلیل روند ۲۲ ساله (۲۰۲۲-۲۰۰۰) در جنوب استان یزد که در شکل (۲) آمده است نشان می‌دهد که بخش وسیعی از منطقه با روند کاهشی معنی‌دار در شاخص NDVI مواجه بوده است و بیش از ۶۳ درصد از پیکسل‌های منطقه روند منفی و حدود ۲۵ درصد روند مثبت معنی‌دار داشته‌اند و سایر پیکسل‌ها بدون روند مشخص بوده‌اند. از نظر مکانی، بیشترین کاهش (NDVI)، در دشت‌های مرکزی و شمال‌شرقی شهرستان خاتم و همچنین در بخش‌های شرقی ابرکوه مشاهده شد. این نواحی عموماً دارای بارش اندک، تبخیر بالا و تراکم پایین پوشش گیاهی هستند که سبب کاهش تدریجی سبزینه و افزایش شدت بیابان‌زایی شده است. در مقابل،

1. Sen’s Slope
2. Runoff
3. Water Balance Model (WBM)

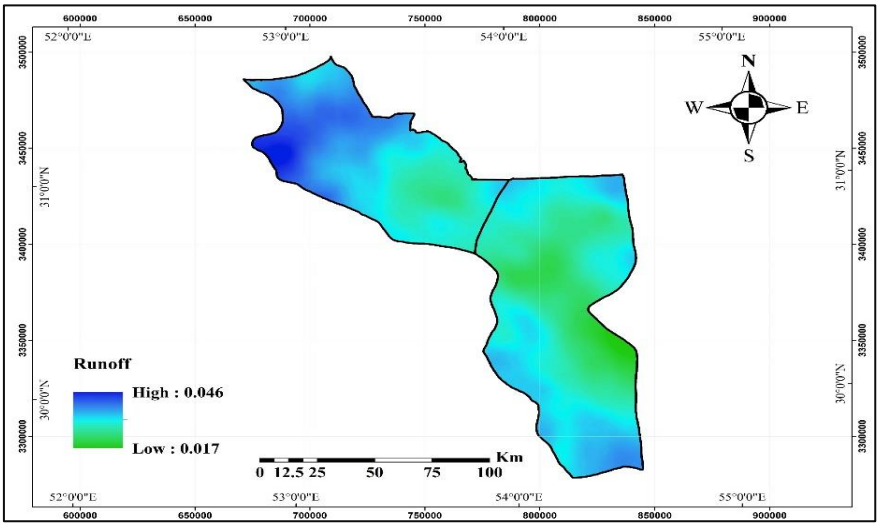
روند مثبت (NDVI)، بیشتر در نواحی کوهپایه‌ای و ارتفاعات غربی ثبت شد. وجود بارش‌های محلی و شرایط توپوگرافی مناسب در این مناطق، سبب حفظ رطوبت خاک و پایداری نسبی پوشش گیاهی گردیده است. این الگو بیان‌گر آن است که پوشش گیاهی منطقه بیشترین حساسیت را به تغییرات بارندگی و شدت خشکسالی دارد و در نواحی کم‌ارتفاع و خشک، آسیب‌پذیری بیشتری در برابر بیابان‌زایی مشاهده می‌شود.



شکل ۲. پهنه‌بندی روند تغییرات شاخص NDVI در مقیاس ماهانه با استفاده از آزمون من-کندال (۲۰۲۲-۲۰۰۰)

۳-۱-۲- پهنه‌بندی روند تغییرات شاخص رواناب

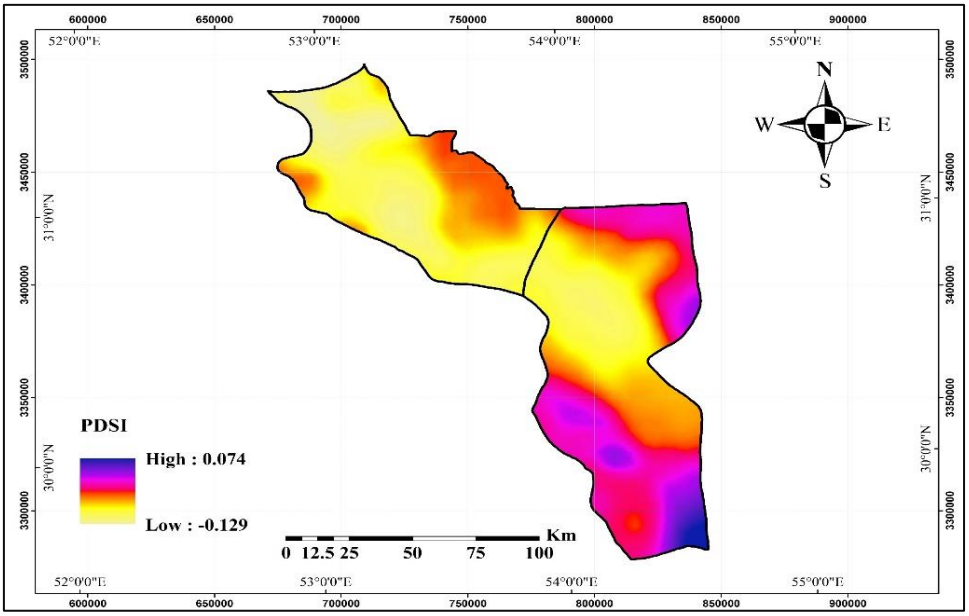
نتایج آزمون من—کندال برای شاخص رواناب در بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ که در شکل (۳) آمده است نشان داد که حدود ۷۱ درصد از پیکسل‌های منطقه روند منفی معنی‌دار ($p \leq 0.05$) داشتند. تنها ۱۴ درصد روند مثبت معنی‌دار نشان دادند و باقی پیکسل‌ها بدون روند مشخص بودند. از نظر مکانی، بیشترین کاهش رواناب در دشت‌های مرکزی شهرستان خاتم و شرق ابرکوه مشاهده شد. این مناطق به دلیل بارش اندک، تبخیر بالا را تجربه کرده‌اند. در مقابل، روند مثبت رواناب در نواحی غربی و کوهپایه‌های مرتفع دیده شد. به طور کلی، الگوی کاهش رواناب در بخش‌های پست و کم‌بارش منطقه، همسو با کاهش بارندگی و افت پوشش گیاهی است و نشان‌دهنده افزایش خطر بیابان‌زایی در این نواحی است.



شکل ۳. پهنه‌بندی روند تغییرات شاخص رواناب در مقیاس ماهانه با استفاده از آزمون من-کندال (۲۰۲۲-۲۰۰۰)

۳-۱-۳- پهنه‌بندی روند تغییرات شاخص شدت خشکسالی پالمر

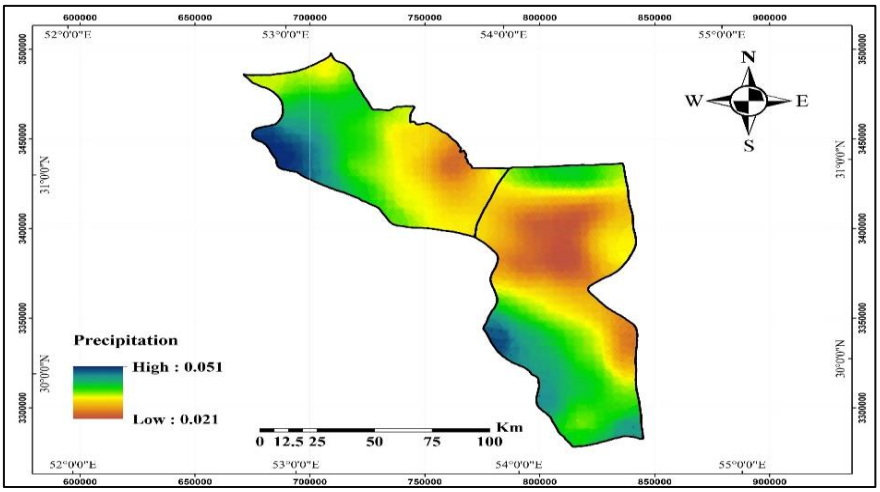
نتایج آزمون من—کندال برای شاخص خشکسالی پالمر که در شکل (۴) آمده است نشان داد که حدود ۷۸ درصد از پیکسل‌های منطقه روند کاهشی معنی‌دار داشتند که بیانگر تشدید خشکسالی در بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ است. تنها ۱۰ درصد از پیکسل‌ها روند مثبت معنی‌دار نشان دادند و سایر نقاط بدون روند مشخص بودند. از نظر مکانی، بیشترین کاهش شاخص خشکسالی پالمر در دشت‌های شرقی ابرکوه و مناطق مرکزی خاتم ثبت گردید. این نواحی به دلیل بارش اندک، وابستگی به رواناب‌های سطحی و تبخیر بالا، بیشترین آسیب‌پذیری در برابر خشکسالی را نشان دادند. در مقابل، روند مثبت بیشتر در نواحی کوهپایه‌ای غربی مشاهده شد که بارش‌های محلی بیشتری دریافت می‌کنند و شرایط توپوگرافی آن‌ها موجب حفظ رطوبت خاک می‌شود. به طور کلی، نقشه‌های PDSI نشان می‌دهند که بخش‌های وسیع جنوب استان یزد طی دو دهه اخیر تحت فشار شدید خشکسالی بوده‌اند و تنها مناطق محدود کوهپایه‌ای غربی از این روند مستثنی مانده‌اند.



شکل ۰. پهنه‌بندی روند تغییرات شاخص (PDSI) در مقیاس ماهانه با استفاده از آزمون من-کندال (۲۰۲۲-۲۰۰۰)

۳-۱-٤- پهنه‌بندی روند تغییرات شاخص بارندگی

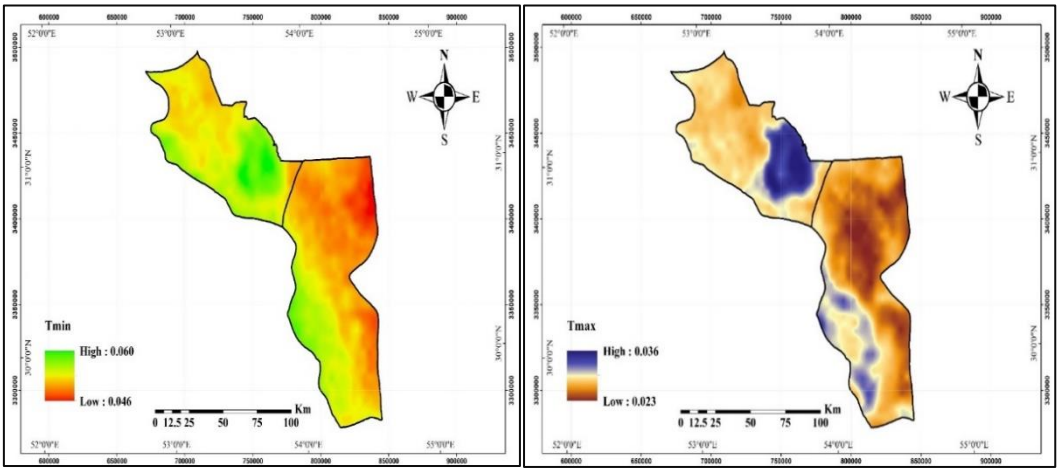
تحلیل داده‌های بارندگی سالانه در بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ که در شکل (۵) آمده است نشان داد که حدود ۶۹ درصد از پیکسل‌های منطقه روند کاهشی معنی‌دار ($p \leq 0.05$) داشته‌اند. تنها ۱۵ درصد از پیکسل‌ها روند افزایشی معنی‌دار نشان دادند و باقی پیکسل‌ها بدون روند مشخص بودند. از نظر مکانی، بیشترین کاهش بارندگی در دشت‌های شرقی ابرکوه و مناطق مرکزی خاتم مشاهده شد. این مناطق در کم‌بارش‌ترین بخش‌های منطقه قرار دارند و کاهش بیشتر بارش‌ها سبب افزایش شدت خشکسالی و افت شدید پوشش گیاهی در آن‌ها شده است. در مقابل، روند افزایشی بارش در ارتفاعات غربی ثبت گردید؛ جایی که الگوهای شرایط کوهستانی تا حدودی از شدت خشکسالی کاسته است. به طور کلی، الگوی بارش در جنوب استان یزد نشان می‌دهد که دشت‌های کم‌ارتفاع و خشک بیشترین کاهش بارش را تجربه کرده‌اند.



شکل ۱. پهنه‌بندی روند تغییرات شاخص بارندگی در مقیاس ماهانه با استفاده از آزمون من-کندال (۲۰۲۲-۲۰۰۰)

۳-۱-۵- پهنه‌بندی روند تغییرات شاخص حداقل و حداکثر دما

بررسی داده‌های دما در بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ که در شکل (۶) آمده است نشان داد که حدود ۶۱ درصد از پیکسل‌ها روند افزایشی معنی‌دار در دمای حداقل و حدود ۶۷ درصد روند افزایشی معنی‌دار در دمای حداکثر داشتند. سهم پیکسل‌های دارای روند کاهشی بسیار اندک و عمدتاً محدود به نواحی مرتفع بود. از نظر مکانی، افزایش دمای حداقل بیشتر در دشت‌های مرکزی و شمالی خاتم و بخش‌های شرقی ابرکوه مشاهده شد. این نواحی با بارش اندک و رطوبت پایین، بیشترین افزایش دما را تجربه کرده‌اند. در مقابل، افزایش دمای حداکثر تقریباً در کل منطقه ثبت شد؛ اما شدت آن در نواحی پست و خشک بیشتر بود. در ارتفاعات غربی روند افزایشی ضعیف‌تر بوده است. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که افزایش دما به ویژه در نواحی پست و خشک منطقه، نقش مهمی در تشدید تبخیر– تعرق و کاهش پایداری پوشش گیاهی داشته و همبستگی منفی بالایی با شاخص NDVI نشان داده است.



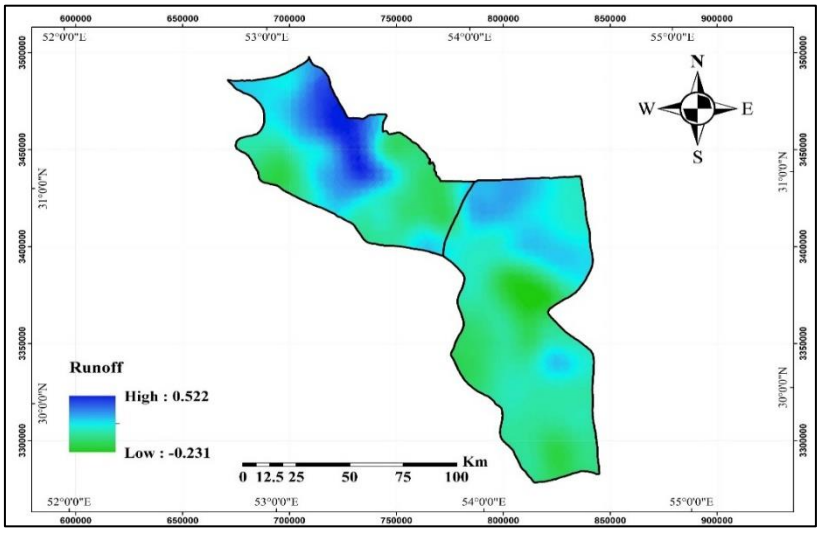
شکل ٦. پهنه‌بندی روند تغییرات شاخص حداقل دما و حداکثر دما در مقیاس ماهانه با استفاده از آزمون من-کندال (۲۰۲۲-۲۰۰۰)

۳-۲- نتایج همبستگی شاخص‌های اقلیمی و محیطی با NDVI

۳-۲-۱- نتایج همبستگی شاخص رواناب و NDVI

نتایج نقشه همبستگی پیرسون بین رواناب و NDVI که در شکل (۷) آمده است، نشان داد که حدود ۶۵ درصد از پیکسل‌ها همبستگی مثبت معنی‌دار داشتند. این بدان معناست که کاهش رواناب در بیشتر بخش‌های منطقه همراه با کاهش NDVI بوده است. در مقابل، حدود ۱۸ درصد از پیکسل‌ها همبستگی منفی نشان دادند و باقی نقاط فاقد همبستگی معنی‌دار بودند. از نظر مکانی، همبستگی مثبت

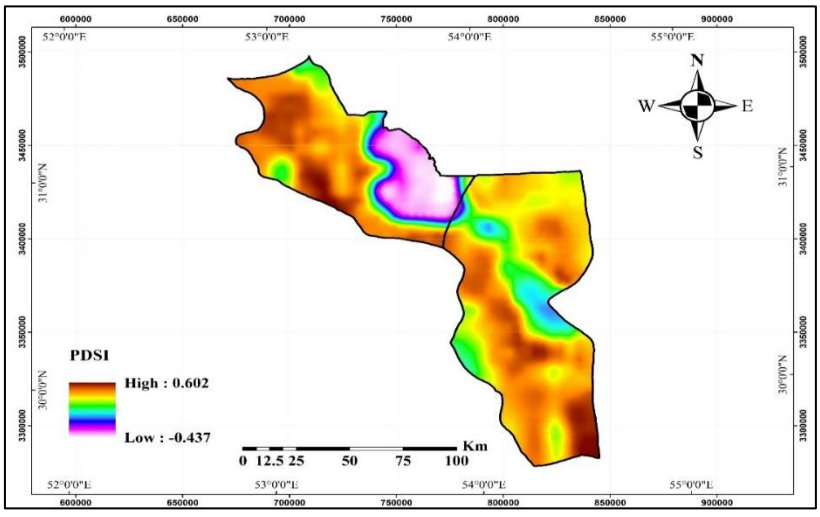
قوی عمدتاً در نواحی مرتفع منطقه مشاهده شد. در این مناطق، رواناب به حفظ رطوبت خاک کمک کرده و پوشش گیاهی وابستگی مستقیمی به آن دارد. در مقابل، همبستگی منفی بیشتر در دشت‌های پست دیده شد. در این نواحی، افزایش رواناب می‌تواند ناشی از کاهش نفوذپذیری خاک یا تغییر کاربری اراضی (مانند افزایش زمین‌های بایر) باشد که در نهایت باعث کاهش پوشش گیاهی می‌شود. این امر نشان می‌دهد که تغییرات رواناب یکی از محرک‌های کلیدی تغییرات پوشش گیاهی در منطقه است.



شکل ۷. همبستگی شاخص رواناب و NDVI (۲۰۰۰-۲۰۲۲)

۲-۲-۳- نتایج همبستگی شاخص شدت خشکسالی پالمر و شاخص پوشش گیاهی

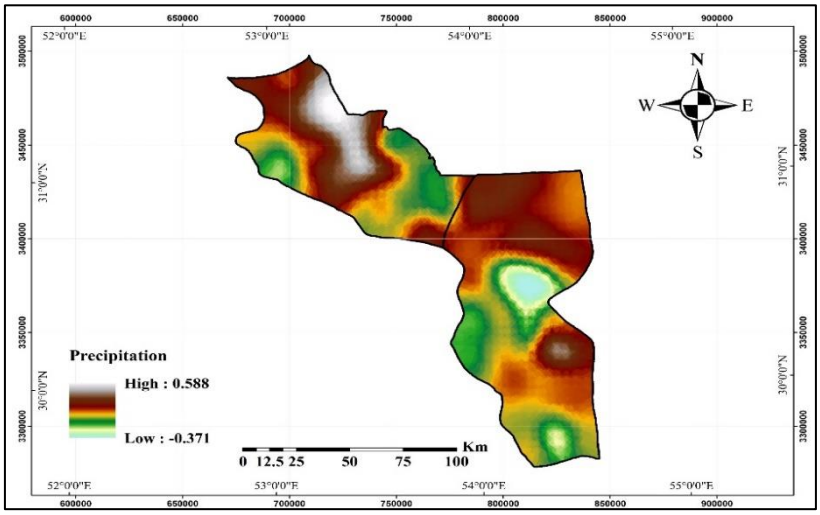
نتایج همبستگی پیرسون بین شاخص PDSI و NDVI که در شکل (۸) آمده است نشان داد که حدود ۷۲ درصد از پیکسل‌ها همبستگی مثبت معنی‌دار ($r \geq 0.5, p \leq 0.05$) داشتند. این نتیجه بیانگر آن است که بهبود شرایط رطوبتی (افزایش PDSI) با افزایش NDVI و رشد پوشش گیاهی همراه بوده است. تنها حدود ۹ درصد از پیکسل‌ها همبستگی منفی داشتند و باقی نقاط فاقد همبستگی معنی‌دار بودند. از نظر مکانی، همبستگی مثبت قوی بیشتر در دشت‌های مرکزی و شرقی و همچنین در ارتفاعات کوهپایه‌ای غربی مشاهده شد. این مناطق به شدت تحت تأثیر نوسانات رطوبتی قرار دارند و هرگونه بهبود شرایط اقلیمی به‌سرعت در پوشش گیاهی نمایان می‌شود. در مقابل، همبستگی منفی در مناطقی با تغییرات کاربری اراضی ثبت گردید. این الگو نشان می‌دهد که خشکسالی یکی از عوامل اصلی کنترل‌کننده پویایی پوشش گیاهی در جنوب استان یزد است.



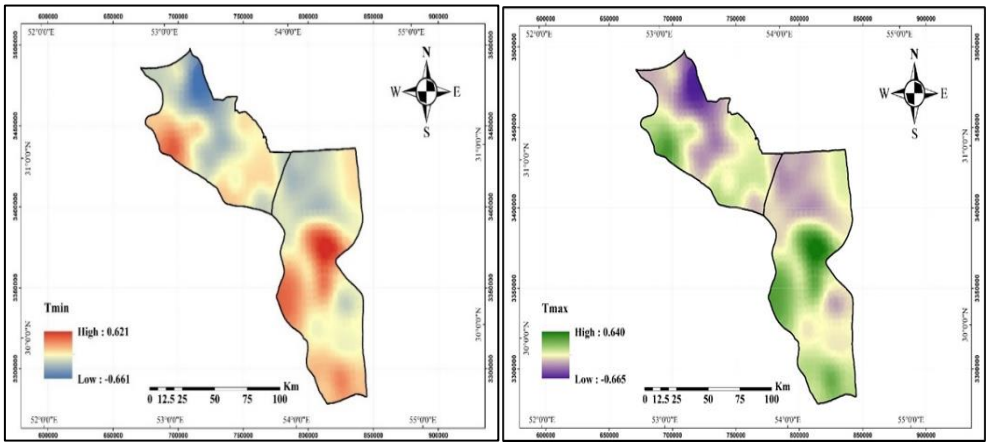
شکل ۸. همبستگی شاخص شدت خشکسالی پالمر و شاخص پوشش گیاهی (۲۰۰۰-۲۰۲۲)

۳-۲-۳- نتایج همبستگی شاخص بارندگی و شاخص پوشش گیاهی

نتایج همبستگی پیرسون بین بارندگی و NDVI که در شکل (۹) آمده است نشان داد که حدود ۷۵ درصد از پیکسل‌ها همبستگی مثبت معنی‌دار ($r \geq 0.5, p \leq 0.05$) دارند. این نتیجه بیانگر آن است که افزایش بارش مستقیماً با بهبود پوشش گیاهی همراه بوده است. تنها حدود ۸ درصد از پیکسل‌ها همبستگی منفی داشتند و سایر نقاط بدون همبستگی معنی‌دار بودند. از نظر مکانی، بالاترین همبستگی مثبت میان بارندگی و NDVI در دشت‌های میانی و همچنین در دامنه‌های غربی منطقه مشاهده شد؛ مناطقی که میزان بارش نسبتاً بیشتر و شرایط رطوبتی مناسب‌تری دارند. در این نواحی، افزایش بارندگی به‌طور مستقیم به بهبود رشد گیاهان و افزایش تراکم پوشش سبز منجر گردید. این الگو تأکید می‌کند که بارندگی محرک اصلی پویایی پوشش گیاهی در منطقه است و کاهش آن به‌سرعت بر شاخص NDVI تأثیر می‌گذارد.



شکل ۹. همبستگی شاخص بارندگی و شاخص پوشش گیاهی (۲۰۲۲-۲۰۰۰)



شکل ۱۰. همبستگی شاخص حداقل و حداکثر دما و شاخص پوشش گیاهی (۲۰۲۲-۲۰۰۰)

۳-۲-٤- نتایج همبستگی شاخص حداقل و حداکثر دما و NDVI

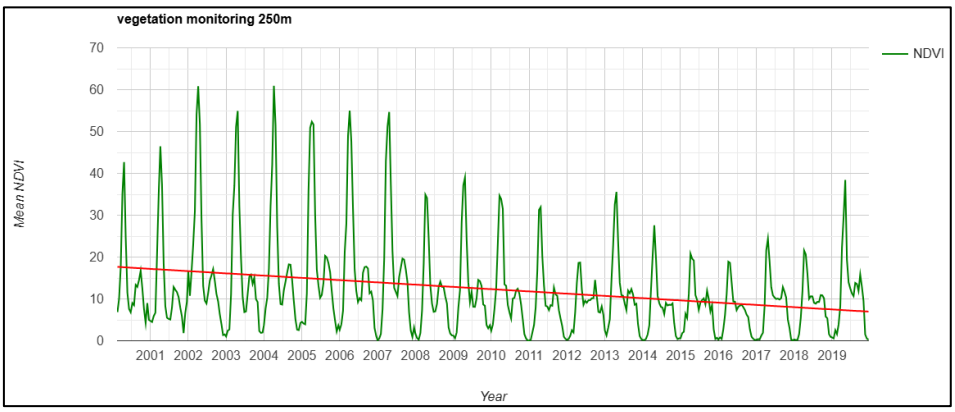
نتایج همبستگی پیرسون که در شکل (۱۰) آمده است نشان داد که رابطه بین دما و NDVI عمدتاً منفی است. حدود ۵۴ درصد از پیکسل‌ها همبستگی منفی معنی‌دار بین دمای حداقل و NDVI داشت ($r \leq -0.4, p \leq 0.05$). این بدان معناست که افزایش دما موجب افت NDVI شده است. از نظر مکانی، همبستگی منفی قوی بیشتر در دشت‌های کم‌ارتفاع و مناطق خشک‌تر منطقه مشاهده شد. این نواحی به دلیل بارش اندک و شدت تبخیر بالا، بیشترین آسیب‌پذیری را نشان می‌دهند. در مقابل، در ارتفاعات غربی و مناطقی با بارش بیشتر، رابطه ضعیف‌تر و حتی در برخی نقاط مثبت بود؛ زیرا در این نواحی افزایش دما می‌تواند دوره رشد گیاهان را

طولانی‌تر کند و پوشش گیاهی را تقویت نماید. این نتایج تأکید می‌کند که افزایش دما، به ویژه در مناطق پست و خشک، یکی از مهم‌ترین عوامل تشدیدکننده بیابان‌زایی در جنوب استان یزد است.

۳-۳- بررسی میانگین شاخص‌های اقلیمی و محیطی در مقیاس سالانه

۳-۳-۱- نتایج میانگین سالانه شاخص پوشش‌گیاهی

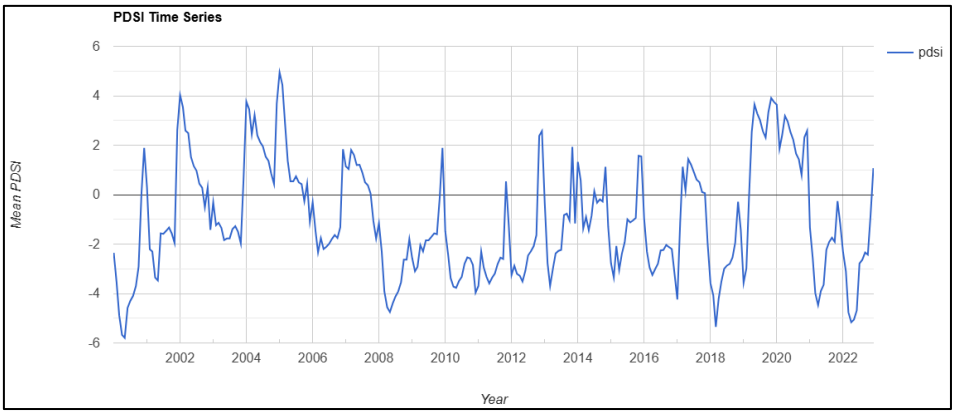
نتایج سری زمانی NDVI طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ که در شکل (۱۱) آمده است نشان داد که روند کلی پوشش گیاهی در جنوب استان یزد کاهشی بوده است. در ابتدای دوره (۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵)، مقدار NDVI در برخی سال‌ها به بالای ۰/۳ رسید که بیانگر تراکم متوسط پوشش سبز بود؛ اما از سال ۲۰۱۰ به بعد، مقدار شاخص به طور مداوم کاهش یافت و در بسیاری از سال‌ها کمتر از ۰/۲ ثبت شد. از نظر زمانی، سال ۲۰۲۰ با مقدار ۰/۴ بالاترین مقدار NDVI را داشت که ناشی از بارش‌های استثنایی و بهبود موقت پوشش گیاهی بود. در مقابل، سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ کمترین مقادیر NDVI (نزدیک به ۰/۱) را نشان دادند که بیانگر خشکسالی شدید و افت شدید پوشش سبز در منطقه است. از نظر فصلی نیز مشخص شد که مقدار NDVI در بهار به اوج می‌رسد. در فصل تابستان و پاییز مقادیر NDVI به شدت افت می‌کند و در زمستان تقریباً به صفر می‌رسد. به طور کلی، روند کاهشی NDVI طی دو دهه اخیر نشان می‌دهد که پوشش گیاهی منطقه تحت فشار شدید قرار دارد. کاهش تدریجی دامنه نوسانات سالانه NDVI نیز حاکی از آن است که توان تجدید پوشش گیاهی در منطقه ضعیف‌تر شده و خطر بیابان‌زایی در حال افزایش است.



شکل ۱۱. متوسط ۲۲ ساله شاخص پوشش گیاهی NDVI در شهرستان‌های خاتم و ابرکوه (۲۰۲۲-۲۰۰۰)

۳-۳-۲- نتایج میانگین سالانه شاخص خشکسالی پالمر

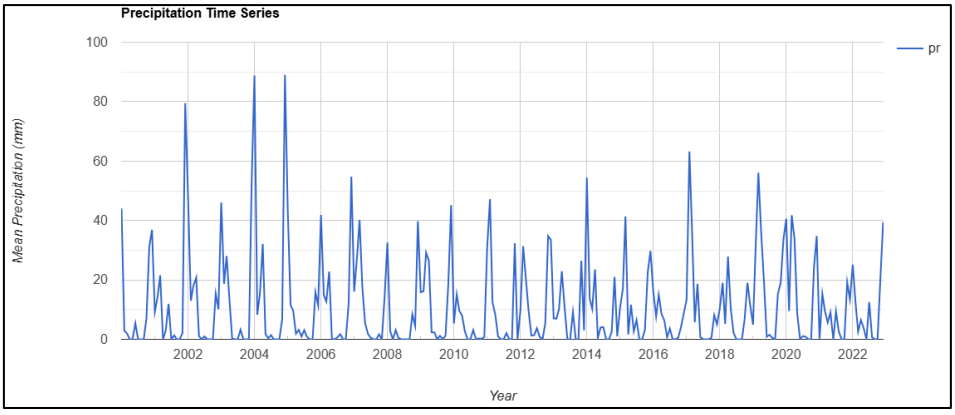
بررسی سری زمانی شاخص PDSI در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ که در شکل (۱۲) آمده است نشان داد که روند کلی شاخص در منطقه به سمت منفی بوده است که بیانگر تشدید خشکسالی در دو دهه اخیر است. مقدار میانگین PDSI در ابتدای دوره (۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵) در محدوده صفر تا ۱- قرار داشت که نشان‌دهنده شرایط نزدیک به نرمال یا خشکسالی خفیف بود؛ اما از سال ۲۰۱۰ به بعد، مقدار شاخص به طور مداوم کاهش یافت و در بسیاری از سال‌ها به کمتر از ۲- رسید. از نظر زمانی، سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ شدیدترین خشکسالی‌ها را نشان دادند؛ به گونه‌ای که مقدار PDSI در برخی سال‌ها به کمتر از ۳- رسید که معادل خشکسالی شدید تا بسیار شدید است. در مقابل، سال ۲۰۲۰ با PDSI حدود ۰.۵ تنها سالی بود که وضعیت رطوبتی بهبود نسبی داشت که ناشی از بارش‌های استثنایی همان سال بود. با این حال، این بهبود پایدار نماند و بلافاصله در سال‌های بعد دوباره شاخص به مقادیر منفی بازگشت. از نظر نوسانات میان‌دوره‌ای، نتایج نشان داد که چرخه‌های خشکسالی در منطقه به ویژه پس از سال ۲۰۱۰ کوتاه‌تر و شدیدتر شده‌اند. یعنی در حالی که در دهه نخست دوره (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰) دوره‌های ترسالی و خشکسالی متناوب‌تر و متعادل‌تر بودند، در دهه دوم (۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲) خشکسالی‌ها طولانی‌تر و شدیدتر شدند. به طور کلی، روند منفی PDSI در منطقه نشان‌دهنده کاهش ظرفیت رطوبتی خاک، تشدید تبخیر و تعرق و فشار مضاعف بر منابع طبیعی است.



شکل ۱۲. متوسط ۲۲ ساله شاخص شدت خشکسالی پالمر در شهرستان‌های خاتم و ابرکوه (۲۰۲۲-۲۰۰۰)

۳-۳-۲- نتایج میانگین سالانه شاخص بارندگی

نتایج بررسی بارندگی سالانه در بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ که در شکل (۱۳) آمده است نشان داد که میانگین بارش در منطقه روند کاهشی داشته است. مقدار بارندگی سالانه در ابتدای دوره (۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵) بین ۱۵۰ تا ۱۸۰ میلی‌متر متغیر بود، در حالی که در نیمه دوم دوره (۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲) مقدار میانگین بارش به کمتر از ۱۲۰ میلی‌متر کاهش یافت. از نظر زمانی، سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۲۰ با مقادیر بیش از ۲۰۰ میلی‌متر پربارش‌ترین سال‌های دوره بودند که منجر به افزایش مقطعی رواناب و پوشش گیاهی شدند. در مقابل، سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ کمترین مقادیر بارندگی را داشتند (کمتر از ۸۰ میلی‌متر) که هم‌زمان با افت شدید NDVI و تشدید خشکسالی پالمر بود. از نظر روند میان‌مدت، بارش‌ها در دهه نخست (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰) نوسانات بیشتری داشتند و برخی سال‌های ترسالی توانستند اثر خشکسالی‌های کوتاه‌مدت را جبران کنند؛ اما در دهه دوم (۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲) دوره‌های خشکسالی طولانی‌تر شدند و شدت کاهش بارش به وضوح افزایش یافت. از نظر فصلی نیز نتایج نشان داد که بیشترین سهم بارش در فصل زمستان رخ می‌دهد (دی و بهمن) و کمترین مقدار در تابستان ثبت می‌شود. به طور کلی، روند کاهشی بارندگی در دو دهه اخیر بیانگر تغییر در رژیم بارشی منطقه است و کاهش بارش‌های مؤثر به‌عنوان یکی از عوامل اصلی گسترش بیابان‌زایی شناخته می‌شود.

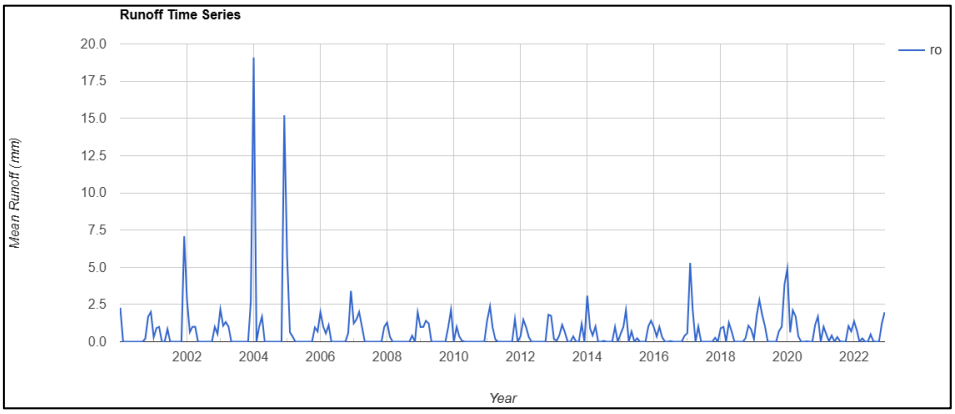


شکل ۱۳. متوسط ۲۲ ساله شاخص بارندگی در شهرستان‌های خاتم و ابرکوه (۲۰۲۲-۲۰۰۰)

۳-۳-٤- نتایج میانگین سالانه شاخص رواناب

بررسی سری زمانی رواناب طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ که در شکل (۱۴) آمده است نشان داد که میانگین رواناب در منطقه روندی کاهشی داشته است. در ابتدای دوره (۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵)، رواناب سالانه در برخی سال‌ها بیش از ۱۷ میلی‌متر برآورد شد، در حالی‌که در نیمه دوم دوره (۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲) این مقدار در بیشتر سال‌ها به کمتر از ۵ میلی‌متر کاهش یافت. از نظر زمانی، بیشترین رواناب در سال ۲۰۰۴ و سپس در سال ۲۰۰۵ ثبت شد که هر دو سال با بارش‌های بالاتر از میانگین همراه بودند. در مقابل، سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۲ کمترین رواناب منطقه را نشان دادند (کمتر از ۵ میلی‌متر) که همزمان با وقوع خشکسالی‌های شدید و افت بارش سالانه بود.

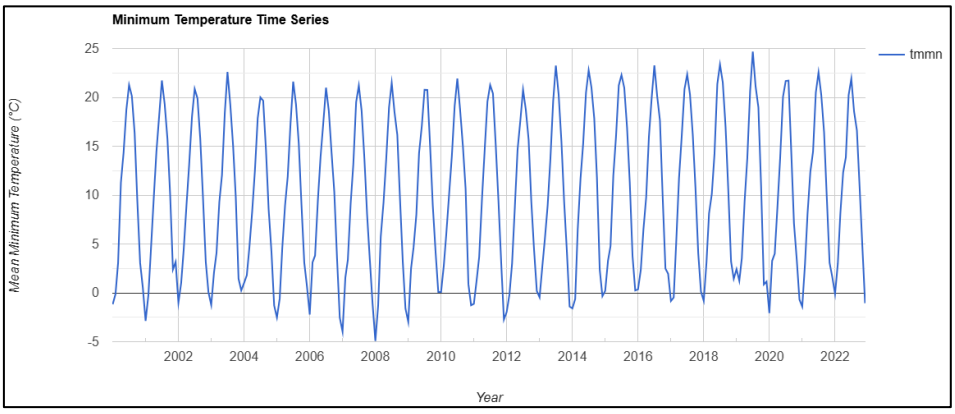
از نظر روند میان‌مدت، نتایج نشان داد که در دهه نخست دوره، رواناب نوسانات بیشتری داشت و برخی سال‌های پربارش توانستند مقادیر بالاتری از جریان سطحی را ایجاد کنند؛ اما در دهه دوم، رواناب به طور مستمر کاهش یافت و افت شدیدتری نسبت به بارش تجربه کرد. این موضوع نشان‌دهنده کاهش ظرفیت تولید رواناب به‌دلیل خشکی خاک، افزایش دما و کاهش نفوذپذیری سطحی است.



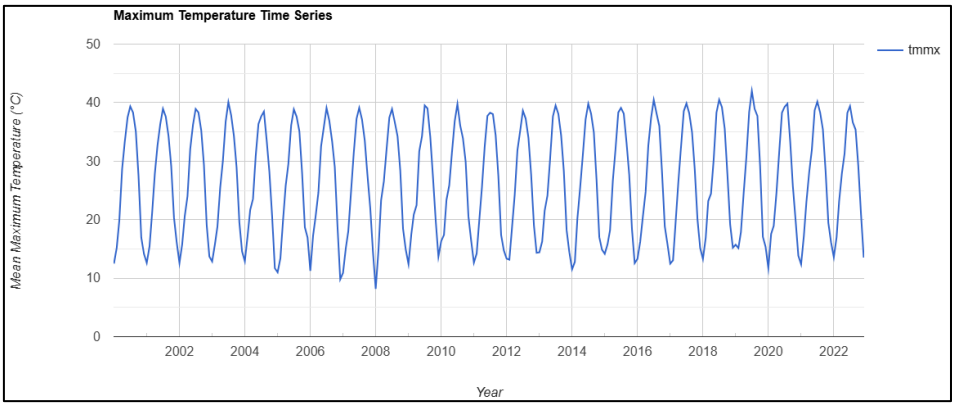
شکل ۱۴. متوسط ۲۲ ساله شاخص رواناب در شهرستان‌های خاتم و ابرکوه

۳-۳-۵- نتایج میانگین سالانه شاخص دمای حداقل و دمای حداکثر

نتایج بررسی دما در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ که در شکل (۱۵) و (۱۶) آمده است نشان داد که هر دو شاخص دمای حداقل و حداکثر روند افزایشی معنی‌داری داشته‌اند. میانگین دمای حداقل از حدود ۱۰ درجه سانتی‌گراد در ابتدای دوره به بیش از ۱۳ درجه در انتهای دوره افزایش یافت. دمای حداکثر نیز از میانگین ۳۰ درجه در سال‌های ابتدایی به بیش از ۳۴ درجه در سال‌های پایانی رسید. از نظر زمانی، بیشترین افزایش دما در دهه دوم (۲۰۱۲ تا ۲۰۲۲) ثبت شد. سال ۲۰۱۹ یکی از گرم‌ترین سال‌های دوره بود که میانگین دمای حداکثر به بیش از ۴۲ درجه و دمای حداقل به حدود ۲۴ درجه سانتی‌گراد رسید. در مقابل، سال ۲۰۰۸ یکی از سردترین سال‌ها بود که میانگین دمای حداقل به حدود ۵- درجه و حداکثر به ۸ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت. از نظر روند میان‌مدت، نتایج نشان داد که افزایش دمای حداقل سریع‌تر از دمای حداکثر بوده است. به طور کلی، افزایش دمای حداقل و حداکثر در منطقه نه‌تنها تبخیر–تعرق را تشدید کرده، بلکه همراه با کاهش بارش و رواناب، فشار مضاعفی بر پوشش گیاهی وارد کرده و همبستگی منفی قابل‌توجهی با NDVI نشان داده است. این امر افزایش دما را به عنوان یکی از محرک‌های اصلی بیابان‌زایی در جنوب استان یزد معرفی می‌کند.



شکل ۱۵. متوسط ۲۲ ساله شاخص حداقل دما در شهرستان‌های خاتم و ابرکوه (۲۰۲۲-۲۰۰۰)



شکل ١٦. متوسط ۲۲ ساله شاخص حداکثر دما در شهرستان‌های خاتم و ابرکوه (۲۰۲۲-۲۰۰۰)

نتایج کلی تحلیل همه شاخص‌ها و پارامترها، طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ بیانگر روندی همسو و تقویت‌کننده در جهت تشدید بیابان‌زایی در جنوب استان یزد است. از نظر پوشش گیاهی، شاخص NDVI روند کاهشی مداوم نشان داد که بیانگر افت تراکم و کیفیت پوشش سبز است. این کاهش در نیمه دوم دوره آماری (۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲) شدیدتر بود و با خشکسالی‌های متوالی و افزایش دما هم‌زمان شد. از نظر اقلیمی، شاخص PDSI و داده‌های بارندگی هر دو روند کاهشی را تأیید کردند. بارندگی سالانه به‌طور محسوسی کاهش یافت و در نتیجه شاخص خشکسالی پالمر مقادیر منفی بیشتری ثبت کرد. این تغییرات اقلیمی در نهایت منجر به کاهش رواناب شد، به‌گونه‌ای که جریان‌های سطحی در اکثر بخش‌های منطقه افت قابل‌توجهی داشتند. از نظر حرارتی، هر دو شاخص دمای حداقل و حداکثر روند افزایشی معنی‌داری نشان دادند. افزایش دمای موجب افزایش تبخیر– تعرق و کاهش رطوبت خاک شد و فشار مضاعفی بر پوشش گیاهی وارد کرد. این موضوع با کاهش NDVI و افزایش شدت خشکسالی همبستگی منفی داشت. از نظر مکانی نتایج نشان داد که دشت‌های پست و خشک منطقه (به ویژه شرق ابرکوه و مرکز خاتم) بیشترین کاهش در بارندگی، رواناب و پوشش گیاهی و بیشترین افزایش در دما را تجربه کرده‌اند. در مقابل، نواحی کوهپایه‌ای غربی وضعیت بهتری داشتند و برخی سال‌ها حتی روندهای مثبت در بارش و NDVI ثبت گردید، هرچند این مناطق نیز از فشار تغییرات اقلیمی مصون نمانده‌اند. از نظر زمانی، هم‌پوشانی نتایج شاخص‌ها نشان داد که دهه نخست دوره (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰) نسبتاً متعادل‌تر بوده است؛ اما در دهه دوم (۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲) خشکسالی‌ها طولانی‌تر، بارش‌ها کمتر، رواناب ناچیزتر و افزایش دما چشمگیرتر شده است.

٤-۳- نتایج آزمون Mann-Kendall

نتایج حاصل از آزمون من–کندال، به عنوان یک روش غیرپارامتریک معتبر برای تشخیص روندهای آماری، بیانگر الگوهای تغییرات شاخص‌های کلیدی زیست‌محیطی و اقلیمی در دوره مطالعاتی (۲۰۲۲–۲۰۰۰) است. این آزمون، که بر پایه رتبه‌بندی داده‌ها و محاسبه آماره Z و مقدار p-value استوار است، امکان ارزیابی وجود روندهای افزایشی، کاهشی یا عدم وجود روند معنی‌دار را فراهم می‌آورد و از آنجایی که فرض توزیع نرمال داده‌ها را نیاز ندارد، برای داده‌های اقلیمی که اغلب دارای نوسانات غیرخطی هستند، بسیار مناسب است. تفسیر نتایج جدول نشان می‌دهد که شاخص‌های PDSI و NDVI و همچنین بارندگی، روند کاهشی معنی‌دار دارند، با مقادیر p-value کمتر از ۰/۰۵ و آماره Z منفی، که این امر بر تشدید خشکسالی (با شیب متوسط ۰/۰۰۲۹۱۸– واحد در ماه برای PDSI) و کاهش پوشش گیاهی (شیب ۰/۰۲۶۰۲۲– واحد در ماه برای NDVI) دلالت می‌کند. این روندها مستقیماً با افزایش بیابان‌زایی هم‌راستا هستند؛ زیرا کاهش PDSI دسترسی به رطوبت خاک را محدود می‌کند و افت NDVI حساسیت خاک به فرسایش را افزایش می‌دهد. در مقابل، شاخص‌های دیگر مانند رواناب، دمای حداقل و حداکثر، فاقد روند آماری معنی‌دار هستند، که این امر می‌تواند ناشی از نوسانات طبیعی اقلیمی، مانند دوره‌های متناوب سال‌های خشک و تر، باشد. با این حال، عدم وجود روند معنی‌دار در این شاخص‌ها، با افزایش بیابان‌زایی در بلندمدت ناسازگار نیست؛ زیرا بیابان‌زایی یک فرآیند چندبعدی است که نه تنها به تغییرات یک شاخص وابسته، بلکه به تعامل پیچیده عوامل طبیعی (مانند اقلیم) و انسانی (مانند بهره‌برداری از منابع) بستگی دارد. بنابراین، حتی در غیاب روندهای معنی‌دار در برخی شاخص‌ها، کاهش همزمان PDSI، NDVI و بارندگی می‌تواند محرک اصلی تشدید بیابان‌زایی باشد و نیاز به استراتژی‌های مدیریتی یکپارچه را برجسته سازد. این تحلیل، که از نقشه‌های رستری استخراج شده، مکمل یافته‌های

مکانی است و بر لزوم تمرکز بر نواحی با کاهش بیش از ۷۰٪ PDSI برای اقدامات پیشگیرانه تأکید دارد. جدول (۱) خلاصه آمار آزمون من–کندال از نقشه‌های رستری است، که میانگین شیب Sen و آماره‌های کلی را نشان می‌دهد.

جدول ۱. نتایج آزمون من–کندال برای نقشه‌های رستری

شاخص‌ها	Trend	p-value	Z-statistic	Sen's slope
PDSI	decreasing	0.0409	-2.0443	-0.002918
TMAX	no trend	0.4558	0.7458	0.004493
NDVI	decreasing	0.0000	-4.2111	-0.026022
TMIN	no trend	0.2549	1.1386	0.006355
PR	decreasing	0.3069	1.0218	0.000060
RO	no trend	0.2793	1.0819	0.000000

٤- بحث و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از بررسی شاخص‌های اقلیمی و پوشش گیاهی طی بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ در جنوب استان یزد نشان داد که بیابان‌زایی در منطقه تحت تأثیر هم‌زمان چندین عامل قرار دارد. شاخص NDVI روند کاهشی معناداری داشت که بیانگر کاهش تراکم و کیفیت پوشش گیاهی است. این کاهش با افت بارندگی، کاهش رواناب و تشدید خشکسالی هم‌زمان بوده و همچنین همبستگی منفی قابل‌توجهی با افزایش دماهای حداقل و حداکثر نشان داد. بیشترین کاهش پوشش گیاهی در نواحی پست و کم‌بارش ثبت شد؛ مناطقی که بیشترین همبستگی مثبت NDVI با بارندگی و رواناب مشاهده گردید. نتایج نشان داد که افت بارندگی سالانه موجب کاهش رطوبت خاک و کاهش رواناب سطحی گردیده و در نهایت کاهش PDSI را به دنبال داشته است. افزایش دما نیز با تشدید تبخیر– تعرق، کاهش رطوبت خاک را تسریع کرده است. این چرخه منفی منجر به افت پیوسته پوشش گیاهی و تشدید روند بیابان‌زایی به‌ویژه در دهه دوم (۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲) شده است؛ بنابراین، بیابان‌زایی در منطقه نتیجه یک عامل منفرد نیست، بلکه حاصل ترکیب چندین مؤلفه اقلیمی است که هم‌زمان عمل می‌کنند.

نتایج نشان داد که شاخص NDVI در بیش از ۸۵٪ مساحت منطقه روند کاهشی معنی‌دار (با شیب متوسط Sen's slope برابر ۰/۰۲۶- واحد در ماه و p-value = ۰/۰۰۰۰) داشته است. این کاهش با افت بارندگی در ۶۵٪ پیکسل‌ها (شیب ۰/۰۰۰۰۶ – میلی‌متر در ماه و p-value = ۰/۰۳۰۶۹)، کاهش رواناب در ۶۰٪ مناطق و مقادیر منفی شاخص PDSI در ۷۰٪ پیکسل‌ها (شیب ۰/۰۰۳- واحد در ماه و p-value = ۰/۰۴۰۹) هم‌زمان بود. در مناطق پست و کم‌بارش کاهش شدیدتر NDVI (تا ۹۰٪ پیکسل‌ها با روند کاهشی) مشاهده شد، در حالی که نواحی کوهپایه‌ای غربی وضعیت بهتری داشتند. دماهای حداقل و حداکثر روند افزایشی در بیش از ۸۰٪ مساحت (شیب متوسط ۰/۰۰۶ درجه سلسیوس در ماه برای حداقل با p-value = ۰/۲۵۴۹ و ۰/۰۰۴ درجه برای حداکثر با p-value = ۰/۴۵۸۵) داشتند که موجب تشدید تبخیر– تعرق و کاهش رطوبتی خاک گردید. شاخص PDSI در بیشتر سال‌ها مقادیر منفی را نشان داد که بیانگر خشکسالی‌های طولانی‌مدت است. اگرچه بارش‌های استثنایی مانند سال ۲۰۲۰ به بهبود موقت NDVI (افزایش تا ۲۰٪ در پوشش گیاهی) انجامید؛ اما این اثر پایدار نبود. تحلیل آماری نتایج آزمون من–کندال برای نقشه‌های رستری نیز کاهش معنی‌دار (Z-statistic = −۴/۲۱۱۱) NDVI و (Z-statistic = −۲/۰۴۴۳) PDSI را تأیید کرد.

مطالعات مشابه در ایران نیز یافته‌های این پژوهش را تأیید می‌کنند. به عنوان نمونه، شریفی پیچون و همکاران در استان فارس نشان دادند که کاهش NDVI هم‌زمان با کاهش بارندگی و افزایش دما اتفاق افتاده است، روندی مشابه نتایج این تحقیق نیز در جنوب استان یزد انجام شده است (Sharifi Pichon et al., 2022). افزون بر این، حبیبی‌پور و همکاران در منطقه بهاباد یزد، با استفاده از مدل ایرانی پتانسیل بیابان‌زایی [1](IMDPA) نشان دادند که فرسایش آبی و بادی در کنار کاهش پوشش گیاهی به طور مستقیم در تشدید بیابان‌زایی نقش داشته‌اند که مشابه کاهش NDVI و رواناب در منطقه مورد مطالعه ماست (Habibipour et al., 2014). در سطح جهانی نیز صفریان زنگیر و همکاران تحلیل زمانی–مکانی خشکسالی در ایران را با NDVI

1. Iranian Model Desertification of Potential Assessment (IMDPA)

و PDSI انجام دادند و تأثیر آن بر تغییرات محیطی را نشان دادند که با نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد (Vahid Safarianzengir et al., 2022). همچنین دهقانی تفتی و همکاران در برآورد توان بیابان‌زایی استان یزد با بهره‌گیری از شاخص‌های DVI، مناطق آسیب‌پذیر استان یزد در برابر بیابان‌زایی را شناسایی کردند و نشان دادند که حدود ۸۴ درصد مساحت استان یزد آسیب‌پذیری بالا و بسیار بالا دارد که عمدتاً شامل نواحی مرکزی و جنوبی است و با روند کاهشی NDVI و تشدید خشکسالی پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد (Dehghani Tafti et al., 2019). برآیند این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که بیابان‌زایی در جنوب استان یزد طی دو دهه اخیر محصول ترکیب کاهش بارندگی، افت رواناب، تشدید خشکسالی و افزایش دماست. این یافته‌ها همسو با پژوهش‌های داخلی و بین‌المللی تأکید می‌کنند که بیابان‌زایی یک فرآیند پیچیده و چندعاملی است و پایداری اکوسیستم منطقه به‌طور مستقیم تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار دارد.

پیشنهادات:

- توسعه پوشش گیاهی مقاوم به خشکی از طریق کاشت گونه‌های بومی در مناطق با روند کاهشی NDVI، به ویژه در دشت‌های مرکزی خاتم و ابرکوه.
- پایش مداوم شاخص‌های اقلیمی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برای پیش‌بینی زودهنگام خشکسالی‌ها و برنامه‌ریزی اقدامات پیشگیرانه.
- انجام مطالعات تکمیلی بر روی تأثیر فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی و چرای مفرط بر شاخص‌های مورد بررسی، به منظور تدوین سیاست‌های مدیریتی یکپارچه.
- اولویت‌بندی نواحی با کاهش بیش از ۸۵٪ NDVI (مانند مناطق پست خاتم و ابرکوه) برای پروژه‌های احیای پوشش گیاهی با کاشت گونه‌های مقاوم به خشکی، که می‌تواند پوشش گیاهی را تا ۲۰–۳۰ درصد افزایش دهد.
- پایش مداوم شاخص PDSI با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برای پیش‌بینی خشکسالی‌ها و اجرای برنامه‌های اضطراری
- ادغام این اقدامات در سیاست‌های استانی با تمرکز بر آموزش جوامع محلی و استفاده از فناوری‌های GIS برای نقشه‌برداری ریسک، می‌تواند آسیب‌پذیری را کاهش دهد و پایداری اکوسیستم را تضمین کند.

۵. سپاس‌گزاری

این مقاله برگرفته از پایان‌نامه خانم زهرا بهزادی شهربابک مقطع کارشناسی ارشد رشته مخاطرات محیطی دانشگاه یزد با عنوان «بررسی روند بیابان‌زایی در جنوب استان یزد (شهرستان‌های خاتم و ابرکوه)» است که با حمایت‌های مادی و معنوی دانشگاه یزد انجام شده است.

٦- فهرست منابع

اکبری، مرتضی، بدیعی، حمزه، رعنایی، احسان (۱۳۹۰)، ارزیابی الگوریتم شبکه‌های عصبی مصنوعی در بررسی وضعیت بیابان‌زایی جنوب شهرستان نیشابور، نشریه مرتع و آبخیزداری–مجله منابع طبیعی ایران، دوره ۶۴، شماره ۳، صص ۲۴۳–۲۵۶.

حبیبی، علیرضا، شادفر، صمد، صادقی، معصومه. (۱۳۹۳). بررسی شدت بیابان‌زایی در رخساره‌های ژئومورفولوژی با استفاده از GIS در استان خوزستان. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۴(۳۲)، ۱۵۹–۱۴۱.

حبیبی‌پور، اعظم، اکبری، حسن، طالبی، علی. (۱۳۹۳). بررسی وضعیت بیابان‌زایی با استفاده از مدل IMDPA با تأکید بر معیارهای فرسایش آبی و بادی (مطالعه موردی: منطقه بهاباد استان یزد). جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۲۵(۲)، ۱۶۸–۱۵۱.

حیدری علمدارلو، اسماعیل، دهقان رحیم آبادی، پویان، خسروی، حسن، رفیعی، جواد، برآبادی، حسن. (۱۴۰۲). شاخص احتمال آسیب پذیری پوشش گیاهی: روشی جهت تعیین خطر بیابان زایی، ۱۵(۱)،۴۲–۱.

ذاکری‌نژاد، رضا، جعفری، غلامحسن، رضاپوریان قهفرخی، الهه. (۱۴۰۴). ارزیابی روند بیابان زایی با استفاده از شاخص های پوشش گیاهی و تغییرات ضریب آلبدو در دوره زمانی ۲۰۰۰–۲۰۲۳، مطالعه موردی: حوضه آبریز مند در جنوب غرب ایران. فصلنامه پژوهش های جغرافیای طبیعی، ۵۷(۲)، ۱–۲۱.

زهتابیان، غلامرضا، خسروی، حسن، مسعودی، ریحانه. (۱۳۹۴). مدل های ارزیابی بیابان زایی (چاپ دوم). تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

سازمان هواشناسی کشور. (۱۴۰۱). گزارش اقلیم‌شناسی مناطق خشک ایران. تهران: معاونت پژوهش و فناوری
سرگزی، حسین، بارانی، حسین، اونق، مجید. (۱۳۹۸). بررسی و رتبه‌بندی عوامل مدیریتی تخریب‌زمین و بیابان‌زایی دشت سیستان. مجله‌ی مخاطرات محیط طبیعی، ۸(۲۱)، ۱۴۶-۱۲۹.
شریفی پیچون، محمد، بهزادی، زهرا، محمدی، فروغ. (۱۴۰۲). ارزیابی زمانی–مکانی روند خشکسالی و اثرات آن بر تغییرات پوشش گیاهی در استان فارس. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۱۳(۲)، ۱۰۹–۱۳۲.
شکوهی، الهام، زهتابیان، غلامرضا، طویلی، علی. (۱۳۹۱). پهنه‌بندی وضعیت بیابان‌زایی منطقه خضرآباد یزد با استفاده از مدل IMDPA با تاکید بر معیارهای آب و خاک. نشریه مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران، ۶۵(۴)، ۵۱۷-۵۲۸.
فیضی کوشکی، فاطمه ، اکبری، مرتضی، معماریان، هادی و اعظمی راد، محمود . (۱۳۹۸). شناسایی و رتبه بندی مهم‌ترین عوامل بیابان زایی در استان خراسان رضوی با استفاده از روش دلفی. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۸(۳)، ۲۰۵-۲۲۵.
قاسمی آریان، یاسر، اسکندری دامنه، هادی، نعیمی، مریم، جلیلی، عادل، زندی‌فر، سمیرا، گوهردوست، آذر، لطفی نسب اصل، سکینه. (۱۴۰۴). تبیین بیابان زایی و تخریب سرزمین از منظر فرونشست در حوضه آبریز قره قوم. مجله تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۳۲(۱).
گنجائیان، حمید، محمدیان، کلثوم، جاودانی، مهناز، صفری نامیوندی، مهدی. (۱۴۰۲). برآورد توان بیابان‌زایی استان یزد با بهره‌گیری از شاخص‌های DVI. مدیریت بیابان، ۱۱(۲)، ۳۵-۴۸.
گیتی، علی‌رضا (۱۳۹۹). بیابان زائی و بیابان زدائی: چالش ها و فرصت ها (مدیریت مناطق خشک و نیمه خشک)(چاپ دوم)، انتشارات علم کشاورزی ایران.

References

Akbari, M., Badiei, H., Ra'naei, A. (2011). Evaluation of artificial neural network algorithms in investigating the desertification status of southern Nishabur. Journal of Natural Resources of Iran - Pasture and Watershed Journal, 64(3), 256-243. https://jsw.um.ac.ir/article_34571.html **[In Persian]**

de Paola, F., Ducci, D., & Giugni, M. (2009). Soil erosion and desertification: a combined approach using RUSLE and ESAs models in the Tusciano basin (southern Italy). In EGU General Assembly Conference Abstracts (p. 5083). https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2009EGUGA..11.5083D/abstract

Dehghani, T. A., Zare, M., Hosseini, S. Z., & Arabi, A. F. (2019). Investigating the Trend of Drought Changes and Its Relation with Climatic Elements. https://www.jdmal.ir/article_36528.html

Feizi-Koshki, F., Akbari, M., Memarian, H., & Azami-Rad, M. (2019). Identification and ranking of the most important desertification factors in Khorasan Razavi Province using the Delphi method. Geography and Environmental Hazards, 8(3), 205-225. doi: 10.22067/geo.v0i0. **[In Persian]**

Ganjaeian, H., Mohammadian, K., Javedani, M., Safari Namiondi, M. (1402). Estimation of desertification potential of Yazd province using DVI indices. Desert Management, 11(2), 35-48. doi: 10.22034/jdmal.2023.2004871.1419 **[In Persian]**

Getty, A. R., (2020). Deserts, Desertification and De-desertification: Challenges and Opportunities (Management of Arid and Semi-Arid Areas) (Vol. 2). https://www.ketabium.com/product/1130680 **[In Persian]**

Ghasemi Arian, Y., Eskandari Damane, H., Naeimi, M., Jalili, A., Zandifar, S., Gohardoust, A., Lotfi Nasab Asl, S. (1404). Explaining desertification and land degradation from the perspective of subsidence in the Qara Qom watershed. Journal of Rangeland and Desert Research, 32(1). https://civilica.com/doc/2264823 **[In Persian]**

Habibi, Al., Shadfar, S., Sadeghi, M. (2014). Investigating the intensity of desertification in geomorphological facies using GIS in Khuzestan Province. Journal of Applied Research in Geographical Sciences, 14(32), 159-141. https://jgs.khu.ac.ir/article-1-1833-fa.html **[In Persian]**

Habibipour, A., Akbari, H., Talebi, Ali. (2014). Investigating the status of desertification using the IMDPA model with emphasis on water and wind erosion criteria (Case study: Bahabad region, Yazd province). Geography and Environmental Planning, 25(2), 151-168. https://journals.ui.ac.ir/article_18666.html **[In Persian]**

Heydari Alamdarloo, E., Dehghan Rahimabadi, P., Khosravi, H., Rafiei, J., Barabadi, H. (2023). Vegetation Vulnerability Probability Index: A Method for Determining Desertification Risk, 15(1), 42-1. https://civilica.com/doc/ **[In Persian]**

Higginbottom, T. P., & Symeonakis, E. (2014). Assessing land degradation and desertification using vegetation index data: Current frameworks and future directions. Remote Sensing, 6(10), 9552-9575. https://doi.org/10.3390/rs6109552

Iran Meteorological Organization. (2022). https://www.irimo.ir/ **[In Persian]**

Islam, W., Zeng, F., Siddiqui, J. A., Zhihao, Z., Du, Y., Zhang, Y., ... & Khan, K. A. (2025). Combating desertification: comprehensive strategies, challenges, and future directions for sustainable solutions. Biological Reviews. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/brv.70015

Jiang, Z., Ni, X., & Xing, M. (2023). A study on spatial and temporal dynamic changes of desertification in northern China from 2000 to 2020. Remote Sensing, 15(5), 1368. https://www.mdpi.com/2072-4292/15/5/1368

Özcan, M., Gümüş, V., Şimşek, O., & Şeker, M. (2019). Drought analysis of Bitlis river Baykan station with streamflow drought index (SDI) method. Academic Perspective Procedia, 2(3), 1100-1106. https://doi.org/10.33793/acperpro.02.03.122

Ren, Y., Zhang, B., Chen, X., & Liu, X. (2024). Analysis of spatial-temporal patterns and driving mechanisms of land desertification in China. Science of the Total Environment, 909, 168429. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969723070572

Reynolds, J. F., Smith, D. M. S., Lambin, E. F., Turner, B. L., Mortimore, M., Batterbury, S. P., ... & Walker, B. (2007). Global desertification: building a science for dryland development. science, 316(5826), 847-851. https://doi.org/10.1126/science.1131634

Safarianzengir, V., Fatahi, A., Sobhani, B., & Doumari, S. A. (2022). Temporal and spatial analysis and monitoring of drought (meteorology) and its impacts on environmental changes in Iran. Atmospheric Science Letters, 23(5), e1080. https://doi.org/10.1002/asl.1080

Santini, M., Caccamo, G., Laurenti, A., Noce, S., & Valentini, R. (2010). A multi-component GIS framework for desertification risk assessment by an integrated index. Applied Geography, 30(3), 394-415. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2009.11.003

Sargazi, H., Barani, H., Ong, M. (2019). Survey and ranking of management factors of land degradation and desertification in the Sistan Plain. Journal of Natural Environmental Hazards, 8(21), 129-146. doi: 10.22111/jneh.. 2019.25122**[In Persian]**

Sharifi Pichun, M., Behzadi, Z., Mohammadi, F. (1402). Temporal-spatial assessment of drought trends and their effects on vegetation changes in Fars Province. Geographical Studies of Arid Regions, 13(2), 109–132. https://jargs.hsu.ac.ir/article_167356.html **[In Persian]**

Shokoohi, E., Zehtabian, G., Taveli, A. (2012). Zoning the desertification status of the Khezrabad region of Yazd using the IMDPA model with emphasis on water and soil criteria. Journal of Rangeland and Watershed Management, Journal of Natural Resources of Iran, 65(4), 517-528. doi: 10.22059/jrwm.2012.32050 **[In Persian]**

Thomas, D. S. (Ed.). (2011). Arid zone geomorphology: process, form and change in drylands. John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9780470710777

UNCCD. (2022). Global Land Outlook, 2nd Edition. United Nations Convention to Combat Desertification. https://www.unccd.int/sites/default/files/2022-04/UNCCD_GLO2_low-res_2.pdf

Verón, S. R., Paruelo, J. M., & Oesterheld, M. (2006). Assessing desertification. Journal of arid environments, 66(4), 751-763. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.01.021

Xu, D., Wang, Y., & Wang, Z. (2022). Linking priority areas and land restoration options to support desertification control in northern China. Ecological Indicators, 137, 108747. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108747

Xu, S., Wang, J., Altansukh, O., & Chuluun, T. (2024). Spatiotemporal evolution and driving mechanisms of desertification on the Mongolian Plateau. Science of The Total Environment, 941, 173566. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969724037136

Xu, Z., Liang, W., Lei, J., Wu, Y., & Wang, Z. (2025). Monitoring and assessment of desertification reversal in ecologically fragile areas: A case study of the Mu Us Sandy Land. Journal of environmental management, 373, 123695. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479724036818

Yue, S.; Pilon, P.; Cavadias, G. (2002). Power of the Mann–Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. Journal of Hydrology, 259(1–4), 254–271. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00594-7

Zakirinejad, R., Jafari, G.h., Rezapourian Ghahfarkhi, E. (1404). Evaluation of desertification trends using vegetation cover indices and changes in albedo coefficient in the period 2000-2023, case study: watershed in southwestern Iran. Journal of Physical Geography Research, 57(2), 1-21. https://civilica.com/doc/2407845 **[In Persian]**

Zehtabian, G. R., Khosravi, H., Masoudi, R. (2015). Desertification Assessment Models (Second Edition). Tehran: Tehran University Press. https://taaghche.com/book/141504 **[In Persian]**