

Agricultural drought monitoring using satellites and ground-based satellites in the Urmia Plain

Alireza Parvishi ¹✉ , Behzad Saber ² , Yusef Kheyruri ³

1. Corresponding Author, Department of Civil Engineering, Ur.C., Islamic Azad University, Urmia, Iran.

E-mail: al.parvishi@iau.ac.ir

2. Department of Civil Engineering, Ur.C., Islamic Azad University, Urmia, Iran. E-mail: behzadsaber91@gmail.com

3. Department of Civil Engineering, S.R.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: kheyruriyusef@gmail.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received

2025-09-25

Received in revised form

2025-11-16

Accepted

2025-12-11

Available online

2025-12-22

Keywords:

Agricultural drought,
Climatic drought,
Urmia plain,
Drought analysis

ABSTRACT

This study provides an integrated drought monitoring assessment for the Lake Urmia Basin using a combination of meteorological and satellite-based indicators over the period 2001–2024. Meteorological drought was analyzed using SPI and SPEI derived from precipitation and thermal stress conditions, while agricultural drought dynamics were evaluated using NDVI-based VCI, LST-based TCI, and the combined VHI index. The results indicate that 2008, 2017, 2023, and especially 2024 were the most critical drought years, where large parts of the basin recorded SPI and SPEI values below -1.5 and VCI and VHI values below 30%, indicating severe agricultural stress. In contrast, 2018 represented the peak recovery year, with over 70% of the basin showing NDVI values above 0.4 and TCI indicating minimal heat stress.

Quantitative analysis shows a strong negative thermal impact, where in 2024, more than 80% of the basin experienced LST above 315 K, coinciding with VHI values falling below 20%, marking the lowest vegetation resilience of the entire study period. Spatial-temporal comparison reveals that after 2021, climatic stress shifted from a rainfall-dominant drought pattern to a heat-driven drought regime, reducing the ecological recovery capacity of vegetation even in short wet spells. These findings highlight that future drought management in the Lake Urmia region must prioritize thermal stress mitigation alongside water resource planning.

Cite this article: Parvishi, Alireza., Saber, Behzad., & Kheyruri, Yusef. (2025). Agricultural drought monitoring using satellites and ground-based satellites in the Urmia Plain. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 2(2), 27-47.

DOI: 10.22126/amcen.2025.12520.1043



© The Author(s).

DOI:10.22126/amcen.2025.12520.1043

Publisher: Razi University

Introduction

Drought is one of the most severe natural hazards affecting water resources, ecosystems, and agricultural productivity, particularly in arid and semi-arid regions. The Lake Urmia Basin in northwestern Iran has experienced significant environmental degradation in recent decades, largely due to recurring droughts, rising temperatures, and overexploitation of water resources. These changes have led to the degradation of vegetation cover, reduced crop yields, and increased vulnerability of local livelihoods. In this context, accurate monitoring of drought conditions is essential for effective water resource management and sustainable agricultural planning.

Recent advances in remote sensing technologies and climate indices have provided valuable tools for assessing drought dynamics with high spatial and temporal resolution. However, most previous studies have focused on either meteorological drought (e.g., using SPI or SPEI) or vegetation response (e.g., NDVI), without examining the combined effects of climatic and thermal stress. This study aims to integrate multiple satellite-derived indices—such as NDVI, VCI, TCI, VHI, and LST—alongside the SPI index, to assess the spatiotemporal patterns of agricultural and meteorological drought in the Urmia region. The research also investigates the statistical correlations among these indices to identify the most sensitive indicators for drought monitoring under changing climatic conditions.

Method

This study focuses on the assessment of meteorological and agricultural drought in the Lake Urmia Basin from 2014 to 2024 using a combination of satellite-derived and climate-based indices. Meteorological drought was evaluated using the Standardized Precipitation Index (SPI), which was calculated from monthly precipitation data obtained from synoptic weather stations in the region. The SPI was computed at an annual timescale to capture long-term moisture anomalies, and its spatial variation was analyzed using inverse distance weighting (IDW) interpolation in GIS.

To assess agricultural drought, multiple remote sensing-based vegetation indices were utilized. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) was extracted from Landsat 8 imagery with 30-meter resolution, and used as the basis for calculating the Vegetation Condition Index (VCI), Temperature Condition Index (TCI), and Vegetation Health Index (VHI). LST (Land Surface Temperature) data were retrieved from MODIS products to compute TCI and to assess thermal stress on vegetation. All satellite images were preprocessed using Google Earth Engine and ArcGIS, including radiometric correction, cloud masking, and temporal compositing during the peak growing seasons (May–September).

Finally, Pearson correlation coefficients were calculated among the indices (SPI, NDVI, VCI, TCI, VHI, and LST) to investigate the strength and direction of their relationships. The goal was to identify which indices most accurately represent vegetation stress in relation to meteorological drought conditions. Heatmaps and correlation matrices were generated in Python using the Seaborn and NumPy libraries. This integrated methodology allowed for a comprehensive analysis of both drought types and their interactions, providing insights into the spatial and temporal dynamics of drought in an ecologically sensitive and water-stressed region.

Results

The results indicated a clear temporal and spatial variability in both meteorological and agricultural drought across the Lake Urmia Basin. SPI analysis revealed that the years 2008, 2015, and 2017 were characterized by severe to extreme drought conditions, whereas 2018 showed a significant recovery with positive SPI values, reflecting a wet year. In contrast, agricultural drought indicators (NDVI, VCI, and VHI) showed a delayed but corresponding response to meteorological drought patterns. For example, in 2017, large portions of the basin experienced NDVI values below 0.3 and VCI values below 35%, indicating high vegetation stress. However, in 2018, NDVI and VCI significantly increased, aligning with improved rainfall conditions.

Correlation analysis further revealed strong relationships between vegetation-based indices and thermal or precipitation variables. The strongest negative correlation was found between LST and TCI ($r = -1.00$), confirming that vegetation health decreases sharply with increased land surface temperature. VHI also showed strong positive correlations with both NDVI ($r = 0.86$) and TCI ($r = 0.90$), indicating its robustness in capturing both thermal and moisture stress. Meanwhile, SPI showed moderate positive correlations with NDVI and VCI ($r \approx 0.55$), suggesting that precipitation influences vegetation condition but is not the sole driver. These findings underscore the value of integrated indices like VHI for effective drought monitoring in complex climatic settings.

Conclusions

This study demonstrated the effectiveness of integrating satellite-derived vegetation indices (NDVI, VCI, TCI, VHI, and LST) with climate-based indices (SPI) for monitoring meteorological and agricultural drought in the Lake Urmia Basin from 2014 to 2024. The results confirmed that vegetation health is influenced by both precipitation deficits and thermal stress, with VHI showing the strongest correlation with other indicators ($r > 0.85$). The year 2017 emerged as a peak drought period, while 2018 reflected notable recovery. The strong inverse relationship between LST and vegetation indices underscores the importance of including thermal parameters in drought assessments. Overall, the findings highlight the necessity of using multi-source and multi-index approaches to improve the accuracy and spatial sensitivity of drought monitoring, especially in vulnerable semi-arid agricultural regions.

Author Contributions

author participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



پایش خشکسالی کشاورزی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و زمینی در دشت ارومیه

علیرضا پرویشی^۱✉، بهزاد صابر^۲، یوسف خیروری^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران. رایانامه: al.parvishi@iau.ac.ir

۲. گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران. رایانامه: behzadsaber91@gmail.com

۳. گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: kheyruriyusef@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۷/۰۳

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۰۸/۲۵

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۹/۲۰

تاریخ انتشار:

۱۴۰۴/۱۰/۰۱

کلیدواژه‌ها:

خشکسالی زراعی،

خشکسالی اقلیمی،

دشت ارومیه،

تحلیل خشکسالی

در این پژوهش روند خشکسالی در حوضه دریاچه ارومیه طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ با استفاده از ترکیب شاخص‌های هواشناسی و سنجش‌ازدور مورد ارزیابی قرار گرفت. خشکسالی هواشناسی با شاخص‌های SPI و SPEI و خشکسالی زراعی و پوشش گیاهی با استفاده از شاخص‌های VCI (بر پایه NDVI)، TCI (بر پایه دمای سطح زمین) و شاخص ترکیبی VHI پایش شد. نتایج نشان داد که سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۱۷، ۲۰۲۳ و به‌ویژه ۲۰۲۴ بحرانی‌ترین دوره‌های خشکسالی بوده‌اند؛ به‌طوری‌که در سال ۲۰۲۴ بیش از ۸۰ درصد منطقه دارای دمای بالاتر از ۳۱۵ کلوین و هم‌زمان مقادیر VCI و VHI کمتر از ۳۰ درصد ثبت شده است که نشانه بروز تنش شدید زراعی و کاهش توان زیستی پوشش گیاهی است. در مقابل، سال ۲۰۱۸ به‌عنوان سال بازیابی اکولوژیک ثبت شده و بیش از ۷۰ درصد منطقه دارای NDVI بالاتر از ۰/۴ و TCI در محدوده بدون تنش حرارتی بوده است. تحلیل مکانی-زمانی داده‌ها نشان می‌دهد که پس از سال ۲۰۲۱ شدت خشکسالی در منطقه از الگوی وابسته به بارش به الگوی غالباً حرارتی تغییر یافته و این امر باعث شده است که حتی در دوره‌های بارشی کوتاه‌مدت نیز پوشش گیاهی توان بازیابی کامل را نداشته باشد. بر این اساس، مدیریت خشکسالی در حوضه دریاچه ارومیه باید علاوه بر تأمین منابع آبی، کنترل تنش حرارتی و کاهش دمای سطح زمین را به‌عنوان یک ضرورت راهبردی در نظر بگیرد.

استناد: پرویشی، علیرضا؛ صابر، بهزاد؛ خیروری، یوسف. (۱۴۰۴). پایش خشکسالی کشاورزی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و زمینی در دشت ارومیه.

مجله مدل‌سازی پیشرفته در مهندسی عمران، ۲(۲)، ۴۷-۲۷. D10.22126/amcen.2025.12520.1043



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی.

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، تغییرات اقلیمی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های قرن حاضر، تأثیرات چشم‌گیری بر الگوهای اقلیمی، منابع آب، و سیستم‌های کشاورزی در سراسر جهان داشته است [۱-۴]. تغییر در توزیع زمانی و مکانی بارش، افزایش دمای میانگین جهانی، شدت یافتن وقوع پدیده‌های حدی (نظیر خشکسالی، موج گرما و بارش‌های سیلابی)، و کاهش ذخایر آبی، همگی از پیامدهای مستقیم تغییرات اقلیم هستند که به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک و خشک، آسیب‌پذیری جوامع کشاورزی را به‌شدت افزایش داده‌اند [۵-۷]. خشکسالی کشاورزی در بستر تغییرات اقلیمی، نه تنها بیشتر و مکرر رخ می‌دهد، بلکه با شدت بیشتری بر عملکرد محصولات و پایداری منابع خاک و آب اثر می‌گذارد. در این میان، پارامترهای هواشناسی نظیر بارش، دمای هوا، تبخیر و تعرق، رطوبت نسبی و سرعت باد به‌عنوان متغیرهای کلیدی در شکل‌گیری و گسترش خشکسالی و کاهش برداشت محصولات کشاورزی نقش اساسی دارند [۸-۱۰]. کاهش میزان و تداوم بارش، افزایش دمای سطحی و تبخیر، و تغییرات در شدت و الگوی باد، می‌توانند منجر به کاهش رطوبت خاک، افت بهره‌وری محصولات زراعی و افزایش نیاز آبی گیاهان شوند [۱۱-۱۳]. خشکسالی به‌طور کلی به چهار نوع اصلی تقسیم می‌شود که هر یک دارای ویژگی‌ها و پیامدهای خاص خود هستند. خشکسالی هواشناسی زمانی رخ می‌دهد که میزان بارش در یک منطقه برای یک دوره زمانی مشخص، کمتر از میانگین بلندمدت آن باشد [۱۴-۱۵]. خشکسالی کشاورزی زمانی اتفاق می‌افتد که کمبود رطوبت خاک، رشد و عملکرد گیاهان زراعی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، حتی اگر بارندگی از نظر آماری غیرعادی نباشد [۱۶-۱۷]. خشکسالی هیدرولوژیکی به کاهش جریان رودخانه‌ها، سطح آب‌های زیرزمینی و ذخایر سطحی در پی دوره‌های خشکسالی هواشناسی یا کاهش بلندمدت بارندگی اشاره دارد [۱۸-۲۰]. نهایتاً، خشکسالی اقتصادی-اجتماعی زمانی شکل می‌گیرد که کمبود منابع آبی ناشی از خشکسالی، بر عرضه محصولات کشاورزی، امنیت غذایی، اشتغال و اقتصاد منطقه تأثیر منفی بگذارد [۲۱-۲۲]. در بسیاری از موارد، این انواع خشکسالی به‌صورت زنجیره‌ای و با تأخیر زمانی نسبت به یکدیگر بروز می‌کنند.

برای تحلیل خشکسالی اقلیمی، از شاخص‌های بارش استاندارد شده^۱ و بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده^۲ استفاده می‌شود. شاخص بارش استاندارد شده صرفاً بر پایه بارش طراحی شده و شدت خشکسالی را در بازه‌های زمانی مختلف (مانند ۱، ۶ و ۱۲ ماهه) مشخص می‌کند، در حالی که بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده علاوه بر بارش، تبخیر و تعرق پتانسیل را نیز در نظر می‌گیرد و برای بررسی خشکسالی تحت شرایط تغییرات دمایی و اقلیمی مناسب‌تر است. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های جدید نشان داده‌اند که الگوی خشکسالی در بسیاری از حوضه‌های نیمه‌خشک جهان از مرحله وابسته به بارندگی به مرحله وابسته به گرمایش و تنش حرارتی تغییر کرده است. بررسی‌های انجام‌شده در سال‌های ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که حتی با وجود بارندگی مقطعی، پایداری سبزینه و شاخص‌های پوشش گیاهی زمانی امکان‌پذیر است که دمای سطح زمین کنترل شود و در غیر این‌صورت شاخص‌های VCI و VHI به کمتر از ۳۰ درصد سقوط می‌کنند که بیانگر کاهش توان ترمیم پوشش گیاهی است [۲۳-۲۵]. در این مطالعات تأکید شده که استفاده هم‌زمان از شاخص‌های SPI، SPEI، NDVI، VCI و TCI نسبت به استفاده تکی از شاخص‌های بارشی، درک دقیق‌تری از سازوکار خشکسالی و اثرات آن بر زمین‌های کشاورزی ارائه می‌دهد.

در ایران نیز به‌ویژه در حوضه دریاچه ارومیه، تحقیقات ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ نشان داده‌اند که الگوی خشکسالی از وضعیت کوتاه‌مدت و مقطعی به یک الگوی پیش‌رونده و حرارتی تغییر کرده است و شاخص‌های پوشش گیاهی پس از سال ۲۰۲۱ حتی در صورت وقوع بارندگی، نشانه‌ای از بازیابی پایدار ثبت نکرده‌اند [۲۶-۲۷]. این یافته‌ها نشان می‌دهد که پایش خشکسالی با تکیه صرف بر بارش کافی نیست و ضرورت تحلیل ترکیبی شاخص‌های حرارتی و اکولوژیکی برای مدیریت علمی خشکسالی و احیای اراضی کشاورزی در دشت ارومیه کاملاً محسوس است.

^۱ SPI^۲ SPEI

ترکیب داده‌های زمینی و سنجش از دور، تصویری جامع از وضعیت تنش‌های اقلیمی و زیستی در منطقه ارائه داده و مبنایی برای تصمیم‌سازی در حوزه مدیریت منابع آب و کشاورزی فراهم می‌کند. اگرچه در سال‌های اخیر مطالعات مختلفی در زمینه پایش خشکسالی انجام شده، اما اغلب آن‌ها به تحلیل یک‌بعدی شاخص‌ها مانند فقط NDVI یا فقط SPI محدود شده‌اند و روابط متقابل بین تنش‌های حرارتی و رطوبتی کمتر بررسی شده‌اند. نوآوری اصلی این پژوهش، استفاده‌ی هم‌زمان از مجموعه شاخص‌های ماهواره‌ای و تحلیل ساختار همبستگی آن‌ها برای شناسایی شاخص‌های کلیدی مؤثر بر سلامت گیاهان است. همچنین این تحقیق با تمرکز بر ناحیه‌ای حساس و آسیب‌پذیر مانند دشت ارومیه، بینش جدیدی نسبت به رفتار پوشش گیاهی در پاسخ به تغییرات اقلیمی ارائه می‌دهد که تاکنون کمتر در پژوهش‌های داخلی مورد توجه بوده است.

هدف اصلی این پژوهش، پایش و تحلیل خشکسالی اقلیمی و زراعی در دشت ارومیه طی بازه ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴ با استفاده از شاخص‌های سنجش از دور و داده‌های اقلیمی و بررسی روابط آماری بین آن‌ها است. در این راستا، شاخص‌های NDVI، VCI، TCI، VHI و LST از تصاویر ماهواره‌ای استخراج و شاخص SPI بر پایه داده‌های بارندگی محاسبه شد. سپس با استفاده از تحلیل همبستگی پیرسون، ارتباط میان شاخص‌ها بررسی گردید تا شاخص‌های کلیدی در پیش‌بینی و تبیین خشکسالی زراعی شناسایی شوند. این تحلیل‌ها در نهایت زمینه‌ای برای پیشنهاد ابزارهای دقیق‌تر در پایش و مدیریت تنش‌های اقلیمی در مناطق کشاورزی فراهم می‌کند.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. منطقه مطالعاتی

حوضه آبریز دریاچه ارومیه، یکی از مهم‌ترین و بزرگ‌ترین حوضه‌های بسته داخلی ایران است که در شمال‌غرب کشور واقع شده و مساحتی بالغ بر ۵۱۸۷۶ کیلومتر مربع را در بر می‌گیرد. این حوضه در استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی و کردستان گسترده شده و شامل بیش از ۲۰ رودخانه دائمی و فصلی است که به دریاچه ارومیه ختم می‌شوند. دشت ارومیه در بخش جنوبی این حوضه و در

در پایش خشکسالی زراعی، شاخص‌های وضعیت پوشش گیاهی^۳، وضعیت دمایی^۴ و شاخص سلامت گیاه^۵ به کار می‌روند. این شاخص‌ها با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای مانند مودیس^۶ و لندست^۷، اثرات تنش‌های اقلیمی بر پوشش گیاهی را ارزیابی می‌کنند و ابزار مناسبی برای پایش وضعیت زراعی در شرایط خشکسالی هستند.

خیرووری و همکاران^۸ [۲۸] به بررسی عوامل مؤثر در بخش کشاورزی پرداخته است. ایشان در این تحقیق نشان داد که در مناطق سردسیر که ارومیه نیز شامل می‌شود وقوع کمبود بارش‌های زمستانه و خشکسالی می‌تواند روی وقوع خشکسالی کشاورزی تأثیر داشته باشد و باعث کاهش میزان برداشت محصولات به ویژه گندم شود.

شایقی و همکاران^۹ [۲۹] به بررسی تأثیر خشکسالی روی سطح آب‌های زیرزمینی و عملکرد محصولات کشاورزی با استفاده از شاخص‌های مختلف پرداختند. نتایج نشان داد که شدیدترین طولانی‌ترین خشکسالی‌ها در درجه اول در ارتفاعات شمال غربی، مناطق شمال شرقی و مناطق جنوبی رخ داده است، به طوری که مقادیر SPI نشان‌دهنده رویدادهای خشکسالی شدیدتری نسبت به مقادیر SPEI است. در حالی که شاخص SPEI برای ارزیابی شدت خشکسالی بلندمدت مناسب‌تر تشخیص داده شد، شاخص SPI نسبت به کمبود بارش کوتاه‌مدت حساس‌تر بود.

خشکسالی یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران است که آثار مخرب آن بر منابع آب، پوشش گیاهی و امنیت غذایی غیرقابل انکار است. منطقه دشت ارومیه، به دلیل وابستگی شدید به کشاورزی و کاهش منابع آبی، طی دو دهه اخیر آسیب‌پذیری بالایی نسبت به خشکسالی نشان داده است. از سوی دیگر، استفاده از ابزارهای نوین مانند داده‌های ماهواره‌ای و شاخص‌های زیستی می‌تواند پایش دقیق‌تری از روندهای خشکسالی زراعی و اقلیمی فراهم آورد. اهمیت این تحقیق در آن است که با

³ VCI

⁴ TCI

⁵ VHI

⁶ MODIS

⁷ Landsat

⁸ Kheyri et al

⁹ Shayeghi et al

۲-۲. داده ها و منابع اطلاعاتی

برای اجرای این پژوهش، از ترکیب داده های زمینی و ماهواره ای جهت پایش خشکسالی اقلیمی و زراعی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه و دشت ارومیه استفاده شد. داده های اقلیمی شامل بارش، دمای بیشینه و کمینه، و رطوبت نسبی از ایستگاه های سینوپتیک منطقه طی دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ از سازمان هواشناسی کشور تهیه شد. همچنین، برای افزایش دقت و پوشش مکانی، از داده های بارش ماهواره ای GPM و CHIRPS به صورت سری زمانی ماهانه بهره گرفته شد.

برای بررسی خشکسالی زراعی، از تصاویر ماهواره ای MODIS و Landsat 8 استفاده گردید. شاخص های NDVI و دمای سطح زمین از این تصاویر استخراج و به منظور محاسبه شاخص های VCI، TCI و VHI مورد استفاده قرار گرفتند. تصاویر MODIS با تفکیک مکانی ۱ کیلومتر و دوره زمانی ۱۶ روزه، و تصاویر Landsat با قدرت تفکیک ۳۰ متر در بازه های فصلی انتخاب و پردازش شدند. به منظور مکان مرجع سازی و استخراج اطلاعات پوشش گیاهی در سطح دشت ارومیه، از نقشه کاربری اراضی، مرزهای سیاسی و توپوگرافی منطقه که از پایگاه های ملی داده های مکانی (مانند سازمان نقشه برداری و پایگاه ملی اطلاعات جغرافیایی) دریافت شده بود، استفاده شد. کلیه پردازش های داده ای با بهره گیری از نرم افزارهای ArcGIS، Google Earth Engine و Python انجام شد.

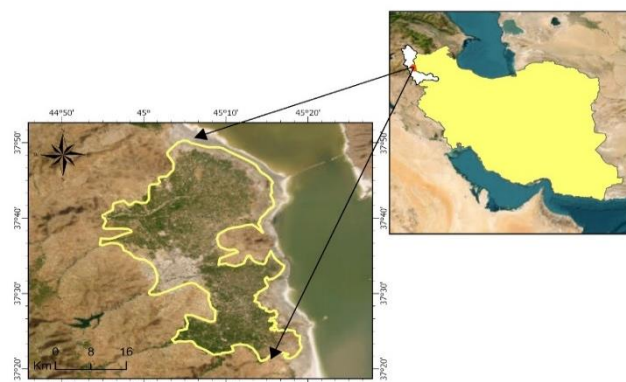
۲-۳. شاخص SPI

شاخص SPI یکی از پرکاربردترین شاخص های هواشناسی برای پایش خشکسالی است. SPI بر پایه توزیع احتمالاتی بارش در بازه های زمانی مختلف بنا شده و مقدار نرمال شده بارش را نسبت به میانگین بلندمدت منطقه ای در قالب انحراف معیار نشان می دهد. در این شاخص، مقادیر کمتر از -۱ نشان دهنده خشکسالی خفیف تا شدید، و مقادیر بالاتر از +۱ معرف ترسالی می باشد.

فرمول کلی SPI بر اساس نرمال سازی سری زمانی بارش و برازش آن با توزیع گامبل یا گاما انجام می گیرد. از جمله مزایای SPI می توان به سادگی محاسبه، امکان تحلیل در بازه های مختلف زمانی، و عدم نیاز به پارامترهای دمایی اشاره کرد. در این پژوهش، SPI در

مجاورت دریاچه واقع شده و از نظر اقتصادی و اجتماعی یکی از مهم ترین قطب های کشاورزی شمال غرب کشور محسوب می شود. این دشت دارای زمین های حاصلخیز، منابع آب زیرزمینی نسبتاً مناسب و سابقه ای طولانی در کشت محصولات زراعی و باغی مانند گندم، جو، سیب و انگور است. تنوع اقلیمی، توپوگرافی متغیر و بهره برداری شدید از منابع آبی، این منطقه را به محیطی حساس و آسیب پذیر در برابر پدیده های اقلیمی از جمله خشکسالی تبدیل کرده است. بررسی وضعیت خشکسالی در این حوضه از اهمیت بالایی برخوردار است؛ چرا که کاهش منابع آب و تخریب پوشش گیاهی در این منطقه اثرات مستقیمی بر معیشت مردم دارد.

حوضه دریاچه ارومیه دارای اقلیمی خشک تا نیمه خشک است و با میانگین بارندگی حدود ۳۵۰ میلی متر در سال و تبخیر سالانه بالا، همواره با محدودیت منابع آبی مواجه بوده است [۳۰]. طی دو دهه اخیر، این حوضه به شدت تحت تأثیر پدیده های اقلیمی مانند کاهش بارندگی، افزایش دمای هوا، افزایش طول دوره های خشک و تغییر الگوی بارش قرار گرفته است. این شرایط به همراه برداشت بی رویه از آب های زیرزمینی برای مصارف کشاورزی، موجب افت سطح سفره های آب زیرزمینی، خشک شدن رودخانه ها، و در نهایت کاهش شدید سطح دریاچه ارومیه شده است. در همین راستا، دشت ارومیه نیز با افت محسوس در کیفیت و کمیت منابع آب، افزایش شوری خاک، و کاهش بهره وری کشاورزی مواجه بوده است. بررسی هم زمان خشکسالی اقلیمی و زراعی در این منطقه می تواند به شناسایی نقاط بحرانی، مدیریت منابع آب و پایش روندهای بلندمدت اقلیمی کمک کند. در شکل ۱ موقعیت مکانی دشت ارومیه نمایش داده شده است.



شکل ۱. موقعیت مکانی دشت ارومیه

شاخص، مشابه VCI، دمای فعلی را نسبت به بیشینه و کمینه تاریخی آن نرمال می‌سازد:

$$TCI = \frac{LST_i - LST_{min}}{LST_{max} - LST_{min}} \quad (2)$$

که در آن LST دمای سطح زمین می‌باشد. مقادیر پایین TCI نشان‌دهنده افزایش تنش حرارتی و شرایط بحرانی خشکسالی هستند. این شاخص برای مناطقی که با گرمای شدید در دوره رشد محصولات مواجه‌اند، بسیار مفید است. در این پژوهش، داده‌های LST از محصول MOD11A2 (با تفکیک زمانی ۸ روزه و مکانی ۱ کیلومتر) برای محاسبه TCI به کار رفته است.

۷-۲. شاخص VHI

VHI یک شاخص ترکیبی است که با ترکیب VCI و TCI، سلامت کلی پوشش گیاهی را در مواجهه با تنش‌های رطوبتی و حرارتی ارزیابی می‌کند. فرمول عمومی آن به شکل زیر است:

$$VHI = \alpha \times VCI + (1 - \alpha) \times TCI \quad (3)$$

بازه ۰ تا ۱۰۰ را پوشش می‌دهد و مقادیر کمتر از ۴۰ به عنوان خشکسالی شدید تعبیر می‌شوند. VHI برای پایش هم‌زمان اثرات دمایی و بارشی در سیستم‌های زراعی بسیار کاربردی است و در این تحقیق به صورت فصلی محاسبه شد تا الگوهای زمانی خشکسالی زراعی شناسایی شود. به منظور درک درست از روند انجام تحقیق فلوچارت تحقیق در شکل ۲ ارائه شده است.

بازه‌های ۱، ۶ و ۱۲ ماهه محاسبه شده تا اثر خشکسالی کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت مشخص گردد.

۴-۲. شاخص SPEI

SPEI مانند SPI است، اما در محاسبه آن به جای صرفاً بارش، تفاوت بین بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل در نظر گرفته می‌شود. به همین دلیل، این شاخص حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات دمایی دارد و برای مطالعات مرتبط با تغییر اقلیم و اثرات گرمایش جهانی بسیار مناسب است. SPEI نیز در بازه‌های زمانی مختلف قابل محاسبه است و به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک کارایی بالاتری نسبت به SPI دارد. در این پژوهش، محاسبه تبخیر با استفاده از روش تورنتویت^{۱۰} انجام شده که برای نواحی با داده‌های دمایی کامل، روش مناسبی است. سپس داده‌ها با توزیع لگ نرمال نرمال‌سازی و SPEI در مقیاس‌های زمانی مختلف محاسبه شده است.

۵-۲. شاخص VCI

VCI شاخصی ماهواره‌پایه است. این شاخص بر اساس داده‌های NDVI عمل می‌کند. این شاخص میزان کاهش پوشش گیاهی را نسبت به بیشینه و کمینه تاریخی آن در یک منطقه خاص مشخص می‌سازد. فرمول کلی آن به صورت:

$$VCI = \frac{NDVI_i - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (1)$$

که در آن NDVI شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده می‌باشد. VCI در محدوده ۰ تا ۱۰۰ تفسیر می‌شود؛ مقادیر کمتر از ۳۵ به عنوان خشکسالی شدید در نظر گرفته می‌شود. در این مطالعه، NDVI از تصاویر MODIS و Landsat استخراج و به صورت فصلی تحلیل شد.

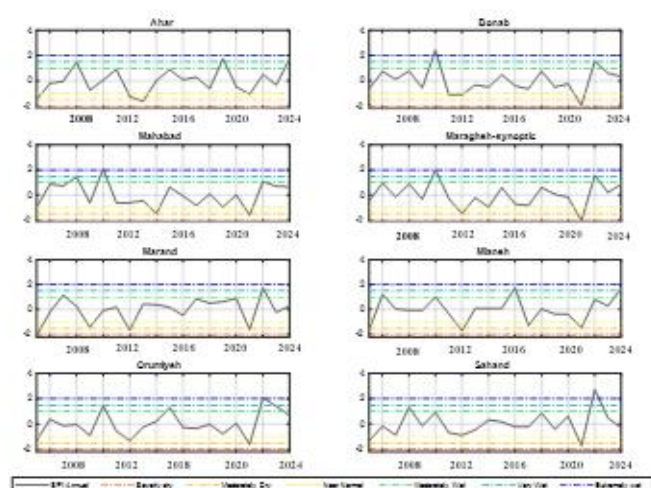
۶-۲. شاخص TCI

TCI برای سنجش تنش دمایی وارد بر پوشش گیاهی به کار می‌رود و بر پایه دمای سطح زمین (LST) تعریف شده است. این

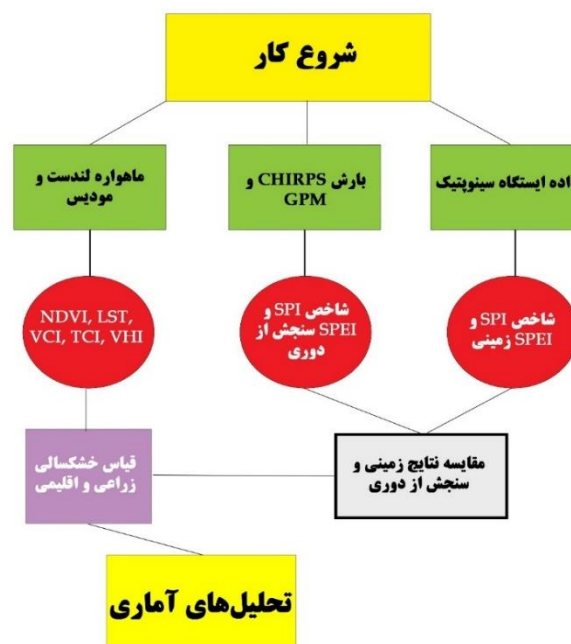
¹⁰ Thornthwaite

بارش سالانه و افت رواناب‌ها همراه بوده‌اند و احتمالاً تأثیر قابل توجهی بر منابع آب و پوشش گیاهی داشته‌اند.

در مقابل، سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۱۸ به‌عنوان دوره‌های ترسالی مشخص شده‌اند که در اغلب ایستگاه‌ها مقدار SPI به بالای +۱ رسیده و در برخی موارد حتی به +۲ نزدیک شده است. این مقادیر حاکی از بارندگی بالاتر از نرمال و بهبود وضعیت منابع آبی در آن سال‌هاست. توزیع زمانی این ترسالی‌ها نیز نشان می‌دهد که پس از دوره‌های خشکسالی، معمولاً یک یا دو سال ترسالی اتفاق افتاده که می‌تواند نوعی الگوی تناوبی در تغییرات اقلیمی منطقه را نمایان سازد. در مجموع، نتایج حاصل از تحلیل شاخص SPI نشان می‌دهد که الگوی خشکسالی و ترسالی در منطقه مورد مطالعه دارای نوسانات منظم و تناوبی است. با این حال، شدت و فراوانی خشکسالی‌ها در نیمه دوم دوره آماری (به‌ویژه بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴) بیشتر بوده که می‌تواند نشانه‌ای از تغییر الگوی اقلیمی در منطقه باشد. همچنین تفاوت در شدت و روند شاخص بین ایستگاه‌ها، نشان‌دهنده تأثیر توپوگرافی، پراکنش بارندگی، و موقعیت جغرافیایی در شدت خشکسالی است. این یافته‌ها تأکیدی بر لزوم پایش بلندمدت و استفاده از داده‌های متنوع در مدیریت منابع آب و کشاورزی منطقه دارند.



شکل ۳. سری زمانی شاخص خشکسالی SPI در مقیاس سالانه برای ایستگاه‌های بررسی شده

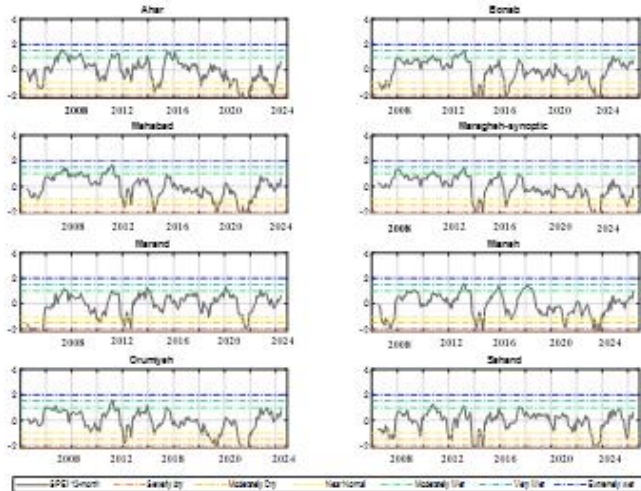


شکل ۲. فلوچارت تحقیق

۳. یافته‌های پژوهش

شاخص خشکسالی هواشناسی SPI به‌صورت سالانه برای هشت ایستگاه منتخب در حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی دوره آماری ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۴ در شکل ۲ محاسبه و تحلیل شد. همان‌طور که در نمودارها قابل مشاهده است، مقادیر SPI در اغلب ایستگاه‌ها نوسانات مشخصی را در طول دوره زمانی نشان می‌دهند. بر اساس طبقه‌بندی شدت خشکسالی، مقادیر پایین‌تر از -۱ به‌عنوان خشکسالی متوسط تا شدید در نظر گرفته می‌شوند. در مقابل، مقادیر بالاتر از +۱ معرف دوره‌های ترسالی هستند. بازه میان -۰.۵ تا +۰.۵ نیز نشان‌دهنده شرایط نرمال است. بررسی سری‌های زمانی نشان می‌دهد که سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۴ در بیشتر ایستگاه‌ها مقادیر منفی قابل توجهی از SPI را تجربه کرده‌اند و به‌عنوان دوره‌های خشکسالی شدید قابل شناسایی هستند. به‌طور خاص، در برخی ایستگاه‌ها مقدار SPI در این سال‌ها به کمتر از -۱.۵ نیز رسیده است که بیانگر وقوع خشکسالی شدید یا بسیار شدید می‌باشد. این خشکسالی‌ها در مقیاس منطقه‌ای نیز با کاهش

تغییرات اقلیمی و تدوین سیاست‌های سازگاری در حوضه آبریز دریاچه ارومیه محسوب می‌شود.



شکل ۴. سری زمانی شاخص خشکسالی SPEI در مقیاس سالانه برای ایستگاه‌های بررسی شده

نقشه‌های ارائه‌شده در شکل ۴ بیانگر تغییرات خشکسالی و ترسالی هواشناسی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ بر اساس شاخص استاندارد بارش (SPI) در مقیاس سالانه هستند. در این نقشه‌ها، شدت خشکسالی و ترسالی در پنج طبقه رنگی از «ترسالی حاد» تا «خشکسالی حاد» طبقه‌بندی شده است. توزیع مکانی شاخص SPI نشان‌دهنده نوسانات قابل توجه اقلیم منطقه در طول دو دهه گذشته است که به‌ویژه در دوره‌های میانی و انتهایی سری زمانی، الگوهای برجسته‌تری از تنش اقلیمی مشاهده می‌شود. نوسانات شدید بین سال‌های متوالی تأییدی بر طبیعت متغیر و غیرخطی اقلیم این منطقه نیمه‌خشک است.

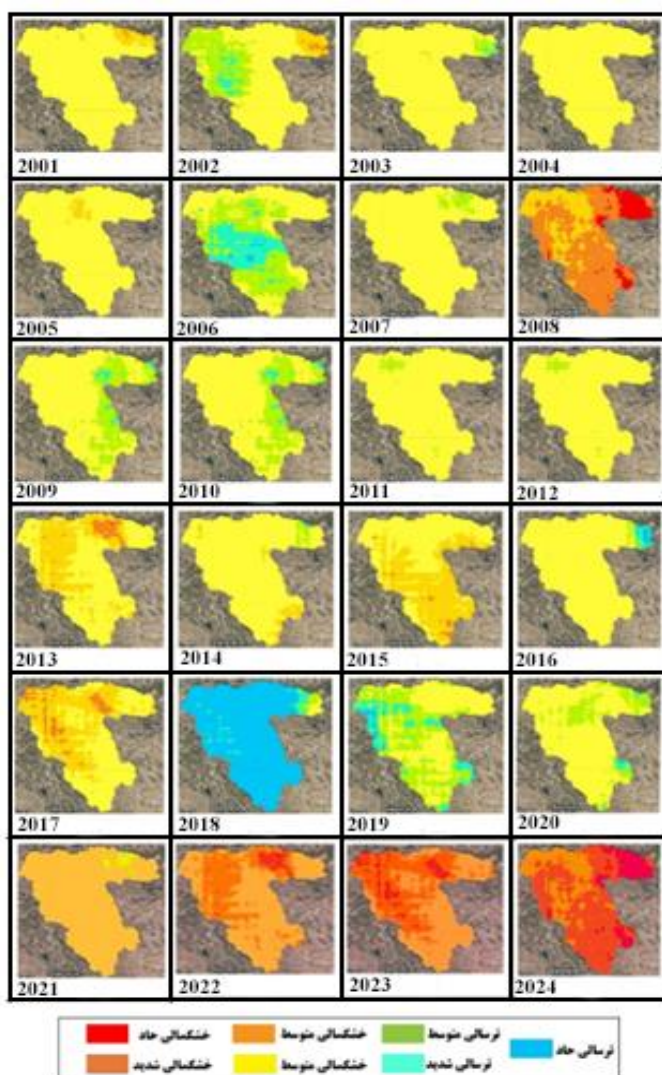
بررسی نقشه‌ها نشان می‌دهد که سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۷ به‌عنوان دوره‌های خشکسالی شدید تا حاد قابل شناسایی هستند؛ به‌طوری‌که در سال ۲۰۰۸ بخش وسیعی از شمال و مرکز حوضه درگیر خشکسالی شدید تا بسیار شدید بوده و مقادیر SPI در بسیاری از نقاط به کمتر از ۲- رسیده است. در مقابل، سال‌های ۲۰۰۶، ۲۰۱۸ و تا حدودی ۲۰۱۹ به‌عنوان دوره‌های ترسالی مشخص می‌شوند. سال ۲۰۱۸ به‌ویژه با پوشش گسترده کلاس

شاخص SPEI در مقیاس ۱۲ ماهه برای هشت ایستگاه منتخب در منطقه مورد مطالعه محاسبه و به‌صورت سری زمانی تحلیل شده است. شاخص SPEI نسبت به SPI حساسیت بیشتری به تغییرات دما و تبخیر و تعرق پتانسیل دارد و بنابراین، تغییرات آن در شرایط اقلیمی گرم‌تر یا خشک‌تر بهتر نمایان می‌شود. مقادیر مثبت نشان‌دهنده ترسالی و مقادیر منفی بیانگر خشکسالی هستند، به‌ویژه اگر به زیر ۱- یا ۱.۵- برسند. در بیشتر نمودارها نوسانات شدیدتر و با دامنه گسترده‌تری نسبت به نمودارهای SPI مشاهده می‌شود که این خود نشان‌دهنده تأثیر ترکیبی دما و بارندگی بر شرایط خشکسالی است.

بررسی نمودارها نشان می‌دهد که سال‌های ۲۰۰۶، ۲۰۱۰، ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸ دارای مقادیر منفی قابل توجه SPEI در اکثر ایستگاه‌ها بوده‌اند. در برخی ایستگاه‌ها (مانند نمودار ردیف سوم سمت چپ)، مقدار SPEI در این سال‌ها به زیر ۲- نیز رسیده است که نشان‌دهنده خشکسالی شدید تا بسیار شدید اقلیمی است. همچنین، افت‌های شدید در SPEI در میانه دهه ۲۰۱۰ (بین ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۶) در چند ایستگاه به وضوح دیده می‌شود که ممکن است به دلیل کاهش هم‌زمان بارندگی و افزایش دمای هوا بوده باشد.

از طرف دیگر، سال‌های ۲۰۰۶، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۸ در اغلب ایستگاه‌ها مقادیر SPEI مثبتی را نشان می‌دهند که در برخی موارد حتی از ۱.۵+ نیز فراتر رفته است و معرف شرایط ترسالی شدید هستند. این سال‌ها معمولاً با دوره‌هایی از بارش فراوان و کاهش دما در ارتباط بوده‌اند که می‌توانند موجب بهبود وضعیت رطوبتی خاک و کاهش فشار اقلیمی بر منابع آب و کشاورزی شده باشند. همچنین مقایسه بصری بین ایستگاه‌ها نشان می‌دهد که شدت و فراوانی ترسالی در ایستگاه‌های جنوبی و مرکزی حوضه نسبت به ایستگاه‌های شمالی متفاوت است.

به‌طور کلی، نتایج شاخص SPEI نشان می‌دهد که شدت، تداوم و توزیع مکانی خشکسالی اقلیمی در منطقه مورد مطالعه بسیار متغیر است و علاوه بر بارش، دمای هوا نیز نقش مهمی در تشدید آن دارد. الگوی نوسانات SPEI نسبت به SPI منظم‌تر ولی دارای دامنه بزرگ‌تری است، که این امر دقت بالاتر آن را در پایش اثرات اقلیم واقعی تأیید می‌کند. این یافته‌ها نشان می‌دهند که شاخص SPEI، به‌ویژه در مقیاس ۱۲ ماهه، ابزاری مناسب برای پایش و تحلیل



شکل ۵. توزیع مکانی شاخص خشکسالی SPI سالانه در منطقه بررسی شده

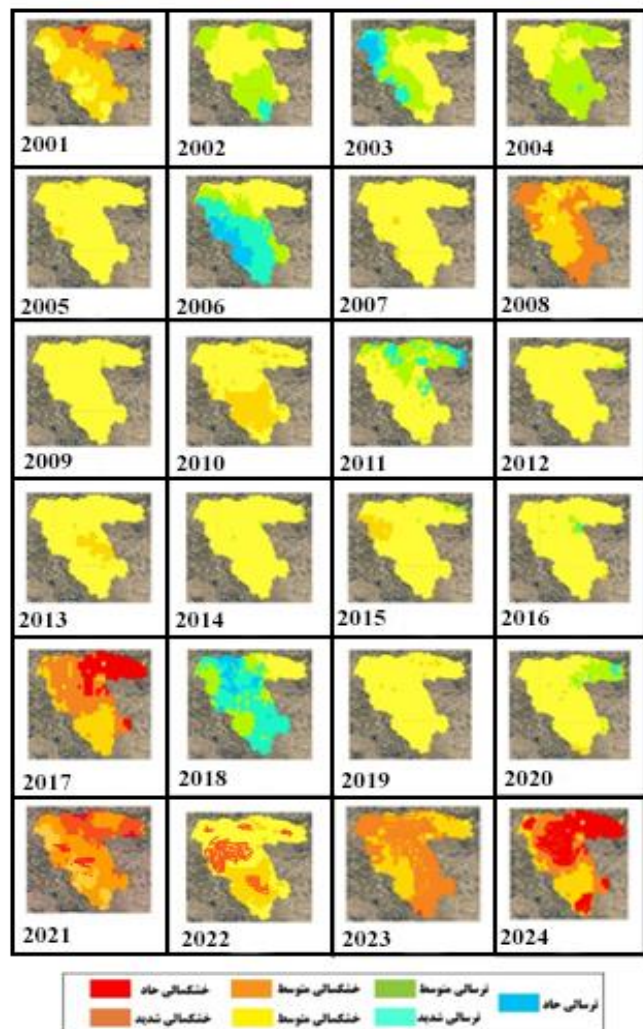
در تحلیل دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰، سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۸، ۲۰۱۰ و به‌ویژه ۲۰۱۷ با پوشش وسیع خشکسالی شدید تا حاد مشخص شده‌اند؛ به‌طوری‌که مقدار SPEI در برخی نواحی به کمتر از -۱.۵ رسیده است. در مقابل، سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۰۶ و به‌ویژه ۲۰۱۸ به‌عنوان دوره‌های ترسالی شدید شناسایی شده‌اند که با بارش‌های بالا و کاهش تنش حرارتی همراه بوده و امکان بازیابی نسبی منابع آبی و اکولوژیکی را فراهم کرده‌اند.

«ترسالی حاد»، نشان‌دهنده بازیابی چشمگیر شرایط آبی و بهبود وضعیت رطوبتی خاک و پوشش گیاهی منطقه است. با این حال، این بهبود پایدار نبوده و در سال ۲۰۲۰ شرایط اقلیمی مجدداً به وضعیت نرمال یا حتی خشکی بازمی‌گردد.

در سال ۲۰۲۱ بخش قابل توجهی از منطقه در کلاس «خشکسالی خفیف تا متوسط» قرار گرفته که نشانه آغاز یک دوره تنش اقلیمی جدید است. در ۲۰۲۲ پهنه‌های نارنجی‌رنگ گسترش یافته و خشکسالی به سطح «متوسط تا شدید» می‌رسد. این روند در ۲۰۲۳ تشدید شده و برای نخستین‌بار پس از ۲۰۱۷، نواحی وسیعی از منطقه به رنگ قرمز (خشکسالی شدید) ظاهر می‌شوند. در نهایت، سال ۲۰۲۴ شدیدترین وضعیت در دو دهه اخیر را نشان می‌دهد و تقریباً کل منطقه درگیر خشکسالی حاد تا بسیار حاد شده است؛ به‌طوری‌که پهنه‌های وسیع قرمز تیره و بنفش‌رنگ، بیانگر افت شدید بارش و فشار اقلیمی مضاعف بر منابع آب و سامانه‌های کشاورزی منطقه هستند. این الگو نشان می‌دهد که پس از یک دوره کوتاه‌ترسالی در سال ۲۰۱۸، سیستم اقلیمی منطقه با یک چرخه خشکسالی ممتد و تشدیدشونده وارد فاز ناپایدار جدیدی شده است. در مجموع، تحلیل زمانی-مکانی شاخص SPI طی بازه ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که چرخه خشکسالی در منطقه نه‌تنها ادامه‌دار بوده بلکه از سال ۲۰۲۱ به بعد شدت بالاتری نسبت به دوره‌های پیشین پیدا کرده است. این یافته‌ها بر ضرورت پایش مستمر و طراحی برنامه‌های سازگاری بلندمدت به‌ویژه در بخش کشاورزی و مدیریت منابع آب تأکید دارد.

مطابق تحلیل اولیه، نقشه‌های ارائه‌شده در شکل ۵ روند تغییرات شدت خشکسالی و ترسالی اقلیمی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه را بر پایه شاخص SPEI سالانه برای دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ نشان می‌دهند. شاخص SPEI که ترکیبی از بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل است، نسبت به شاخص SPI حساسیت بالاتری نسبت به تغییرات حرارتی داشته و می‌تواند تأثیر هم‌زمان کاهش بارندگی و افزایش گرما را در کاهش تراز آبی منطقه منعکس کند. تنوع رنگی این نقشه‌ها، شامل طیف کامل «ترسالی حاد» تا «خشکسالی حاد»، بیانگر رفتار نوسانی و غیرخطی اقلیم منطقه در بازه‌ای بیش از دو دهه است.

نیز بی‌تفاوت می‌شود. این دقیقاً همان وضعیتی است که در سال ۲۰۲۳ مشاهده می‌شود.



شکل ۶. توزیع مکانی شاخص خشکسالی SPEI سالانه در منطقه بررسی شده

بررسی توزیع مکانی شاخص نشان می‌دهد که ابتدا تنها حاشیه‌های شور و نزدیک به دریاچه دچار افت سبزینه شده بودند، اما در سال ۲۰۲۴، این پدیده به صورت گسترده به داخل دشت و حتی به اراضی زراعی فعال نیز نفوذ کرده است. این گسترش مکانی نشان می‌دهد که فرآیند خشکی دیگر محدود به حواشی دریاچه نیست و به صورت یک موج تخریبی به سمت قلب اراضی کشاورزی پیشروی کرده است.

روند جدیدی در رفتار شاخص SPEI شناسایی شد که نشان‌دهنده ورود منطقه به فاز خشکسالی تقویت‌شونده از سال ۲۰۲۱ به بعد است. در ۲۰۲۱ بخش عمده‌ای از منطقه وارد طبقه «خشکسالی خفیف تا متوسط» شده و لکه‌های نارنجی‌رنگ در نقشه ظاهر شده‌اند که نشان‌دهنده آغاز افت تدریجی تراز رطوبتی است. در ۲۰۲۲ شدت خشکسالی افزایش یافته و مناطق بیشتری وارد طبقه «خشکسالی متوسط تا شدید» شدند. سال ۲۰۲۳ نقطه اوج این روند است و نقشه‌ها حضور گسترده رنگ قرمز را نشان می‌دهند که بیانگر وقوع «خشکسالی حاد» در سطحی وسیع و هم‌زمان با افزایش حرارت اقلیمی است. در نهایت، در سال ۲۰۲۴ شدیدترین شرایط SPEI کل دوره مشاهده شد و تقریباً کل حوضه آبریز دریاچه ارومیه وارد وضعیت «خشکسالی حاد تا بسیار حاد» شد که نشان‌دهنده غلبه کامل مؤلفه حرارتی و تبخیری بر مؤلفه بارشی و کاهش شدید ظرفیت ترمیم‌پذیری اکوسیستم منطقه است.

بنابراین، در حالی که شاخص SPI بیشتر الگوهای مبتنی بر بارش را منعکس می‌کند، تحلیل شاخص SPEI طی دوره ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که نقش دما و تبخیر و ترقق در تشدید خشکسالی بسیار پررنگ‌تر شده است و از این رو برنامه‌ریزی منابع آب و کشاورزی در منطقه باید مبتنی بر مدیریت تنش حرارتی و نه صرفاً تأمین بارش بازطراحی شود. بررسی تداومی شاخص پوشش گیاهی در بازه ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که روند کاهش سبزینه در دشت ارومیه یک رفتار لحظه‌ای یا نوسانی ساده نیست، بلکه نشان‌دهنده یک الگوی تدریجی و انباشتی از فرسایش زیست‌محیطی است. در سال‌های ابتدایی، حتی در شرایط کم‌آبی نسبی، بخشی از پوشش گیاهی توانسته بود خود را تا حدی بازیابی کند؛ اما در سال‌های پایانی دوره، به‌ویژه ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴، ساختار زیستی منطقه به مرحله‌ای رسیده که حتی با حضور بارش محدود نیز نشانه‌ای از سبزینه‌نگی پایدار مشاهده نمی‌شود. این تغییر بیانگر آن است که اکوسیستم منطقه وارد «مرحله ضعف ریشه‌ای» شده است. در این مرحله، ریشه گیاه به دلیل تکرار دوره‌های خشکی و گرما توان جذب رطوبت را از دست می‌دهد و حتی اگر رطوبت در خاک وجود داشته باشد، انتقال آن به شاخ‌وبرگ انجام نمی‌گیرد. در نتیجه، شاخص پوشش گیاهی نه تنها کاهش می‌یابد، بلکه نسبت به رطوبت ورودی

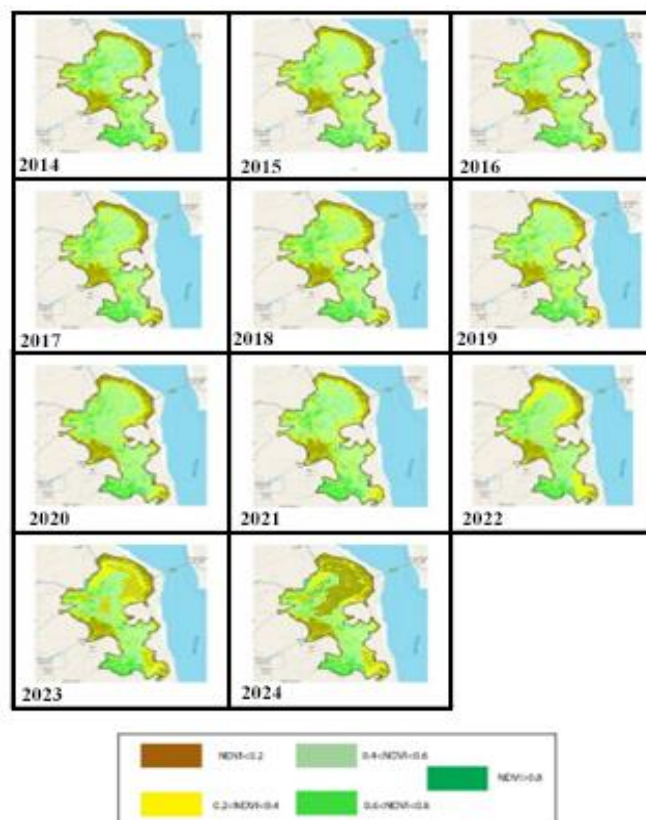
نقشه‌های ارائه‌شده در شکل ۷ تغییرات مکانی دمای سطح زمین را در حوضه جنوبی و اطراف دریاچه ارومیه طی بازه ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴ نشان می‌دهند. این شاخص به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای سنجش از دور، نقش تعیین‌کننده‌ای در تشخیص تنش حرارتی، ارزیابی خشکسالی زراعی و تحلیل پایداری اکولوژیکی منطقه دارد. طبقه‌بندی رنگی نقشه‌ها از آبی (کمتر از ۳۰۰ کلوین) تا قرمز (بیشتر از ۳۱۵ کلوین) بیانگر شدت گرما و فشار حرارتی بر اراضی کشاورزی و بایر است.

در سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ بخش قابل‌توجهی از دشت ارومیه، به‌ویژه نواحی شمال‌غربی و حاشیه جنوبی دریاچه، در محدوده دمایی بالاتر از ۳۱۵ کلوین قرار داشته است. این توزیع دمایی بالا در سال‌های خشک، نشان‌دهنده کاهش پوشش گیاهی و افزایش تابش مستقیم خورشید بر سطوح فاقد رطوبت و گیاه است. چنین وضعیتی با افزایش تبخیر و تعرق، افت رطوبت خاک و کاهش شاخص پوشش گیاهی مانند NDVI و VCI همراه بوده و زمینه تشدید خشکسالی زراعی را فراهم کرده است. سال ۲۰۱۸ تنها دوره‌ای است که الگوی حرارتی منطقه به‌طور محسوسی بهبود یافته و رنگ‌های آبی و سبز در نقشه‌ها گسترش یافته‌اند، که بیانگر کاهش دمای سطحی و افزایش ظرفیت تبادل حرارتی بین پوشش گیاهی، خاک و جو است. این تغییر دما با افزایش NDVI در همین سال هم‌خوانی دارد و نشان می‌دهد که ترسالی ۲۰۱۸ توانسته است به‌طور موقت چرخه گرمایی منطقه را تعدیل کند. اما از ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۰ مجدداً نشانه‌های افزایش دما ظاهر شده و رنگ‌های زرد و نارنجی بر نقشه‌ها غالب شده‌اند. در این دوره، افت تدریجی پوشش گیاهی باعث شده است که سطح خاک بیشتر در معرض گرمایش مستقیم قرار گیرد و روند تبخیر خاک بدون پوشش گیاهی تشدید شود.

تحلیل سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۴، مشخص شد که پس از سال ۲۰۲۰، روند حرارتی منطقه نه‌تنها ادامه یافته بلکه وارد یک مرحله تشدیدشونده و فراگیر شده است. در ۲۰۲۱ نقشه نشان می‌دهد که بخش وسیعی از دشت در محدوده دمایی ۳۰۵ تا ۳۱۰ کلوین قرار گرفته که آغاز دوباره تنش حرارتی را نشان می‌دهد. در ۲۰۲۲، لکه‌های نارنجی و قرمز گسترش یافته و دشت ارومیه به سمت شرایط گرمایی شدیدتر حرکت کرده است.

نکته مهم‌تر آن است که در سال ۲۰۱۸ شاخص پوشش گیاهی به‌صورت ناگهانی بهبود پیدا کرد که نشان‌دهنده توان ترمیم طبیعی منطقه در شرایط دریافت آب کافی بود. اما در سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۴ این توان ترمیم به‌طور کامل تضعیف شده و حتی در بخش‌هایی که بارندگی وجود داشته، نشانه‌ای از بازیابی پوشش گیاهی ثبت نشده است. این موضوع نشان می‌دهد که منطقه از یک «خشکسالی موقتی» وارد یک خشکسالی ساختاری و عمیق زیستی شده است.

از دیدگاه مدیریت منابع آب و خاک، این یافته به این معناست که بازگشت شرایط طبیعی تنها با بارش یا تغذیه آبی امکان‌پذیر نیست، بلکه نیازمند مداخلات حفاظتی، مدیریت دما، کنترل تبخیر و احیای خاک است. به عبارت دیگر، اکوسیستم منطقه به مرحله‌ای رسیده که بدون اقدامات اصلاحی، حتی بارش نیز به‌تنهایی نمی‌تواند روند خشکیدگی را معکوس کند.



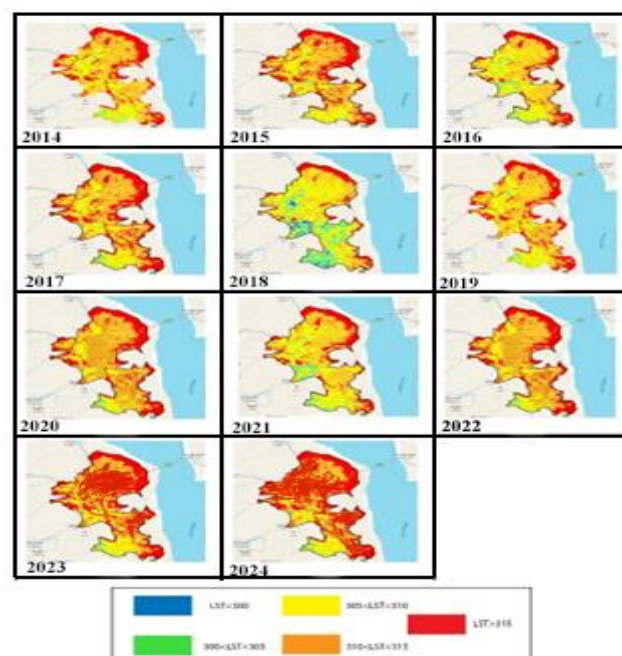
شکل ۷. شاخص NDVI از ماهواره لندست برای سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴

شاخص VCI به‌عنوان یکی از شاخص‌های مهم سنجش‌ازدور برای پایش خشکسالی زراعی، وضعیت پوشش گیاهی را در مقایسه با بهترین و بدترین شرایط رشد ثبت‌شده در دوره تاریخی نشان می‌دهد. تحلیل نقشه‌های VCI در شکل ۷ طی بازه ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴ بیانگر آن است که رفتار پوشش گیاهی منطقه دریاچه ارومیه در برابر تنش اقلیمی روندی تدریجی و مرحله‌ای داشته است. در سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ بخش اعظم دشت در طبقه «بدون خشکسالی» قرار گرفته و رنگ سبز در سطح منطقه غالب است که نشان‌دهنده سلامت نسبی پوشش گیاهی و دسترسی کافی به رطوبت خاک است. در سال ۲۰۱۷ لکه‌های زرد و نارنجی در بخش‌های مرکزی و شمالی ظاهر شده‌اند که نشان می‌دهد پوشش گیاهی به‌دلیل فشار هم‌زمان کاهش بارندگی و افزایش دمای سطح زمین، وارد مرحله نخست تنش رطوبتی شده است. این تنش با وجود وقوع ترسالی در ۲۰۱۸ و بخشی از ۲۰۱۹ تا حدی تعدیل شده و سبزینه منطقه بهبود یافته است، با این حال وجود لکه‌هایی از خشکسالی زراعی در شرق و جنوب منطقه نشان می‌دهد که بازیابی پوشش گیاهی در این بخش‌ها ناقص و محدود بوده است. در سال ۲۰۲۰ هنوز بخش زیادی از منطقه وضعیت نسبتاً پایدار دارد، اما لکه‌های قرمز در نواحی نزدیک به دریاچه و مناطق با خاک شور نشان می‌دهد که تنش زراعی در این نواحی ساختاری‌تر شده و حتی در شرایط بارشی متوسط نیز پوشش گیاهی قادر به بازیابی کامل نیست.

با گسترش تحلیل تا سال ۲۰۲۴، مشخص شد که رفتار شاخص VCI پس از سال ۲۰۲۰ وارد مرحله جدیدی از خشکسالی زراعی شده است. در ۲۰۲۱ سطح نارنجی‌رنگ به‌طور محسوسی گسترش یافته که بیانگر آغاز دوره جدید افت سبزینه و کاهش دسترسی گیاه به رطوبت است. در ۲۰۲۲ شدت این تنش افزایش یافته و لکه‌های قرمز در مرکز و جنوب منطقه ظاهر شده‌اند که نشان‌دهنده ورود بخشی از پوشش گیاهی به وضعیت «خشکسالی شدید» است.

در سال ۲۰۲۳، رنگ قرمز به طبقه غالب نقشه تبدیل شده و نشان می‌دهد که بیشتر اراضی کشاورزی، مرتعی و حاشیه‌ای دشت ارومیه وارد وضعیت تنش حاد و بدون بازگشت سریع شده‌اند. نهایتاً در ۲۰۲۴، بیشترین وسعت خشکسالی زراعی در کل دوره مشاهده می‌شود و تقریباً هیچ منطقه سبزپوش پایدار در سطح دشت باقی نمانده است. این حالت نشان‌دهنده آن است که پوشش گیاهی دیگر

در سال ۲۰۲۳ وضعیت به مرحله بحرانی رسیده و رنگ قرمز به‌عنوان طبقه غالب در بیشتر مناطق ظاهر شده است، به‌گونه‌ای که تنها بخش‌های بسیار محدودی از نواحی شمالی در کلاس دمای میانی باقی مانده‌اند. در نهایت، سال ۲۰۲۴ شدیدترین گرمایش کل دوره را نشان می‌دهد و تقریباً کل منطقه در معرض دمای بالاتر از ۳۱۵ کلوین قرار گرفته است. این یکنواختی گرما نشان می‌دهد که منطقه از یک وضعیت «گرمایش متناوب» وارد وضعیت «تنش حرارتی پایدار و فراگیر» شده است. مقایسه سال ۲۰۱۸ (تنش حرارتی پایین) با سال‌های ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که توان طبیعی اکوسیستم برای تعدیل دما به‌شدت کاهش یافته است. در سال ۲۰۱۸ وجود رطوبت و پوشش گیاهی توانسته بود گرما را جذب و تعدیل کند، اما در سال‌های اخیر حتی بارش‌های مقطعی نیز تأثیری در کاهش دمای سطحی نداشته‌اند. این وضعیت تأکید می‌کند که تنش حرارتی در سال‌های پایانی دوره نه‌تنها نتیجه کمبود رطوبت، بلکه ناشی از ضعیف‌شدن ساختاری پوشش گیاهی و کاهش ظرفیت زیستی منطقه در دفع گرما است. بنابراین، کنترل دما و مدیریت تبخیر باید در سیاست‌های احیای اکولوژیک و برنامه‌ریزی کشاورزی دشت ارومیه به‌عنوان یک اولویت جدی در نظر گرفته شود.



شکل ۸. شاخص LST از ماهواره لندست برای سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴

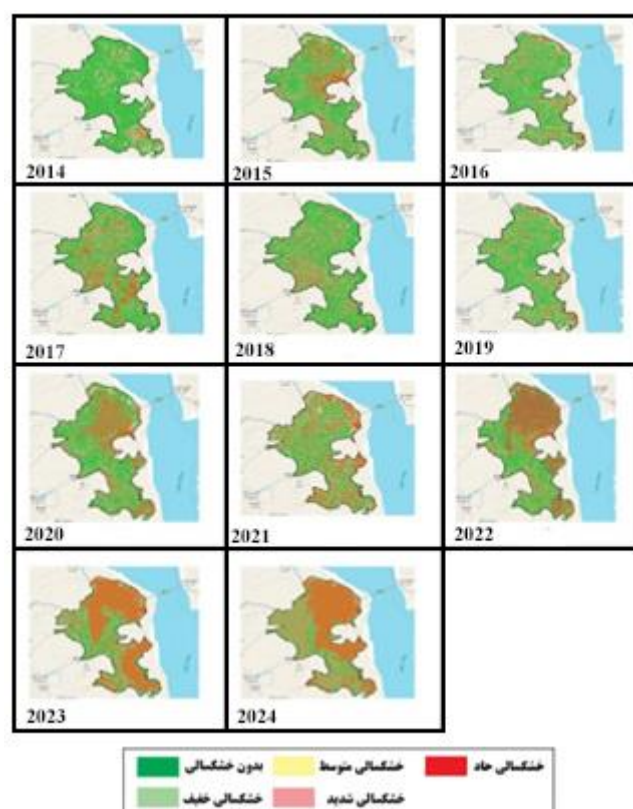
رنگ آبی نشان‌دهنده «عدم وجود تنش حرارتی»، رنگ‌های زرد و نارنجی بیانگر «تنش متوسط»، و رنگ قهوه‌ای و قرمز بیانگر «تنش حرارتی شدید تا حاد» هستند. مقدار پایین TCI به معنای افزایش دمای سطح زمین و فشار مستقیم گرما بر گیاهان است.

در سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ بخش زیادی از منطقه در طبقه بدون تنش حرارتی قرار داشته و رنگ آبی به صورت غالب مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده وجود پوشش گیاهی مؤثر و تعادل نسبی بین دما و رطوبت است. در سال ۲۰۱۷ به یک‌باره وضعیت دما تغییر کرده و لکه‌های گسترده نارنجی و قهوه‌ای نشان می‌دهد که پوشش گیاهی وارد مرحله‌ای از فشار حرارتی شدید شده است؛ این وضعیت با کاهش NDVI و افزایش LST در همین سال مطابقت کامل دارد و بیانگر هم‌زمانی کاهش سبزینه و افزایش دمای سطحی است.

سال ۲۰۱۸ تنها دوره‌ای است که تقریباً همه سطح منطقه در طبقه بدون خشکسالی حرارتی قرار دارد، که نشان‌دهنده کاهش چشمگیر دمای سطحی و افزایش جذب رطوبت توسط خاک و گیاه است. این سال، همان‌گونه که در شاخص‌های NDVI و VCI نیز مشاهده شد، سال تعادل زیستی و بازایی پوشش گیاهی به‌شمار می‌رود.

از ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۰ مجدداً لکه‌های تنش حرارتی ظاهر می‌شوند و مناطقی که در معرض کمبود پوشش گیاهی یا خاک بدون حفاظ قرار دارند، سریع‌تر وارد طبقه تنش می‌شوند. این وضعیت نشان‌دهنده آن است که حتی پیش از آغاز موج دوم خشکسالی (پس از ۲۰۲۰)، بخش‌هایی از منطقه دیگر توان تعدیل گرما را همانند سال‌های ابتدایی دوره ندارند. تحلیل سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۴، مشخص شد که از سال ۲۰۲۱ تنش حرارتی وارد فاز جدیدی شده است. در ۲۰۲۱ توزیع نارنجی‌رنگ گسترش یافته و نشان می‌دهد که گرما به صورت ساختاری‌تر در حال اثرگذاری است. در ۲۰۲۲ لکه‌های قهوه‌ای و قرمز افزایش می‌یابند و نشان می‌دهند که گرما دیگر یک پدیده مقطعی نیست، بلکه به یک ویژگی غالب اقلیم منطقه تبدیل شده است. در ۲۰۲۳ تقریباً کل منطقه درگیر تنش حرارتی شدید می‌شود و پوشش گیاهی توان تعدیل دما را از دست می‌دهد. نهایتاً در سال ۲۰۲۴ بیشترین مقدار تنش حرارتی در کل دوره مشاهده می‌شود و رنگ قهوه‌ای به صورت یکنواخت سطح دشت را پوشانده است. این وضعیت نشان می‌دهد که پوشش گیاهی نه تنها دچار

صرفاً به بارش کوتاه‌مدت واکنش مثبت نشان نمی‌دهد و ساختار زیستی آن وارد مرحله کاهش توان ترمیم طبیعی شده است. در مجموع، روند شاخص VCI در بازه ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که منطقه از یک وضعیت نوسانی و قابل‌بازگشت عبور کرده و در سال‌های اخیر به سمت تثبیت خشکسالی زراعی و ضعف ساختاری اکوسیستم پیش می‌رود. این موضوع اهمیت مدیریت رطوبت خاک، کاهش تبخیر، و استفاده از روش‌های حفاظتی خاک-پوش و آبیاری هدفمند را برای پیشگیری از فرسایش تدریجی پوشش گیاهی برجسته می‌کند.



شکل ۹. شاخص VCI از ماهواره لندست برای سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴

شاخص TCI به عنوان شاخص سنجش تنش حرارتی، میزان فشار گرما بر پوشش گیاهی را نسبت به کمینه و بیشینه دمای ثبت شده در دوره تاریخی نشان می‌دهد. نقشه‌های ارائه شده در شکل مربوطه وضعیت خشکسالی حرارتی را در بازه ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴ برای دشت ارومیه به صورت طبقه‌بندی شده نمایش می‌دهند. در این نقشه‌ها

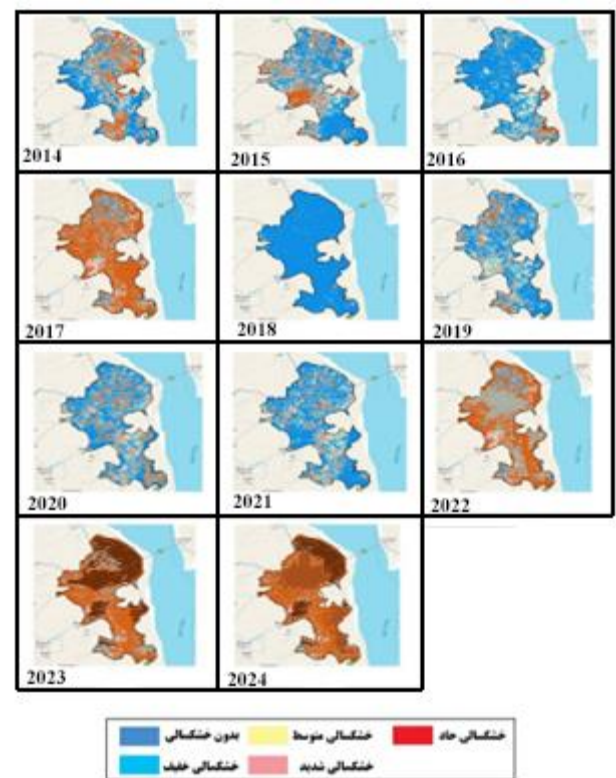
LST با NDVI، VCI و VHI نیز دیده می‌شود (به ترتیب ۰.۵۵، ۰.۵۵- و ۰.۹۰-) که نشان می‌دهد افزایش دما نقش منفی مهمی در کاهش پوشش گیاهی و سلامت گیاه دارد. در طرف دیگر، شاخص‌های NDVI و VCI با ضریب ۱.۰۰ کاملاً همبسته‌اند که انتظار می‌رود، چراکه VCI بر اساس NDVI محاسبه می‌شود. این همبستگی کامل تأیید می‌کند که شاخص VCI در این تحلیل به درستی از NDVI استخراج شده است. همچنین NDVI با VHI نیز همبستگی قوی ۰.۸۶ دارد، زیرا VHI نیز ترکیبی از VCI و TCI است. این همبستگی‌ها نشان می‌دهند که در سال‌هایی که وضعیت سبزیگی (NDVI) بهتر بوده، شاخص‌های سلامت گیاهی نیز بهبود یافته‌اند.

شاخص TCI که بازتابی از وضعیت دمایی پوشش گیاهی است، همبستگی مثبت قابل توجهی با NDVI و VCI (ضریب ۰.۵۵) و VHI (ضریب ۰.۹۰) دارد. این نشان می‌دهد که زمانی که تنش حرارتی کمتر است، سلامت گیاهان و تراکم سبزینه نیز بهتر خواهد بود. همچنین TCI با SPI ضریب همبستگی ۰.۴۱ دارد که نشان‌دهنده اثر بارش بر دمای سطح زمین است؛ به این معنا که در سال‌های تر با SPI بالاتر، شدت حرارت سطحی نیز معمولاً کاهش می‌یابد.

یکی از شاخص‌های اقلیمی مهم در این تحلیل، SPI (شاخص استاندارد بارش) است که همبستگی مثبت نسبتاً متوسطی با NDVI (۰.۵۵)، VCI (۰.۵۴) و VHI (۰.۵۴) دارد. این مقادیر تأیید می‌کنند که افزایش بارندگی بهبود وضعیت پوشش گیاهی را به دنبال داشته است. با این حال، این همبستگی‌ها کاملاً قوی نیستند که احتمالاً به دلیل اثرات هم‌زمان عوامل دیگر نظیر دما، نوع خاک، یا مدیریت کشاورزی در منطقه است. نکته مهم دیگر، همبستگی بسیار قوی بین VHI با TCI (۰.۹۰)، NDVI (۰.۸۶) و VCI (۰.۸۶) است. این یافته نشان می‌دهد که شاخص VHI به خوبی وضعیت ترکیبی رطوبتی و حرارتی پوشش گیاهی را بازتاب می‌دهد. بنابراین، استفاده از VHI به عنوان یک شاخص ترکیبی، می‌تواند ابزار مؤثرتری نسبت به شاخص‌های منفرد برای ارزیابی خشکسالی زراعی باشد. این موضوع در مطالعات مربوط به مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند حوضه دریاچه ارومیه اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

کاهش سبزینه شده، بلکه توان جذب رطوبت و دفع گرما را نیز به طور هم‌زمان از دست داده است.

این روند ثابت می‌کند که خشکسالی حرارتی در سال‌های اخیر به عنوان عامل اصلی تخریب پوشش گیاهی عمل کرده و حتی در صورت وقوع بارش مقطعی نیز، تا زمانی که گرما کنترل نشود، امکان ترمیم زیستی وجود نخواهد داشت. در نتیجه، مدیریت دما و کاهش تابش مستقیم از طریق روش‌های حفاظتی خاک و گیاه باید به عنوان یکی از محورهای اصلی برنامه‌ریزی کشاورزی و احیای اکولوژیک دشت ارومیه در نظر گرفته شود.



شکل ۱۰. شاخص TCI از ماهواره لندست برای سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴

نخستین نکته قابل توجه در این ماتریس، همبستگی منفی بسیار قوی بین دمای سطح زمین (LST) و شاخص TCI با ضریب ۱.۰- است. این مقدار نشان می‌دهد که TCI کاملاً بر اساس دمای سطح زمین تنظیم شده و افزایش LST مستقیماً موجب کاهش TCI و افزایش تنش حرارتی می‌شود. همچنین، همبستگی منفی قوی بین

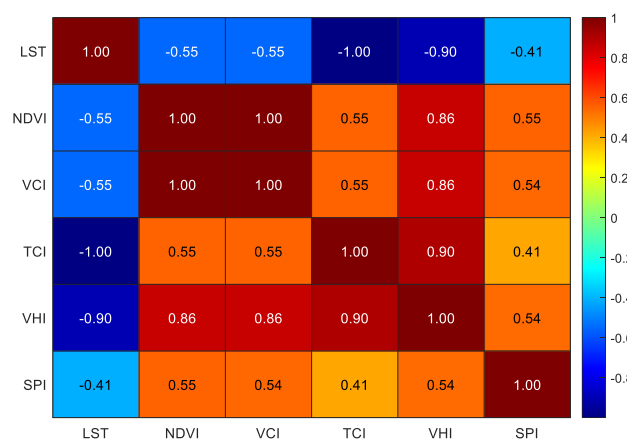
شاخص NDVI با شاخص‌های VCI و VHI به ترتیب دارای همبستگی کامل ($r = 1.00$) و قوی ($r = 0.86$) است. این موضوع نشان می‌دهد که تغییرات در سبزینه، مستقیماً وضعیت سلامت پوشش گیاهی و شدت خشکسالی زراعی را تعیین می‌کند. مطالعه‌ای توسط رحمان و همکاران^{۱۳} و هی و همکاران^{۱۴} [۳۳-۳۴] در حوزه زراعی ایالت پنجاب هند نیز نشان داد که NDVI با شاخص VCI همبستگی بالایی ۰.۹۵ دارد و برای پایش خشکسالی‌های زراعی فصلی بسیار حساس عمل می‌کند، به‌ویژه در مناطق تحت تنش تابستانه.

نتایج همچنین نشان داد که TCI با VHI دارای همبستگی بسیار بالا ($r = 0.90$) و با NDVI و VCI همبستگی مثبت ($r = 0.55$) دارد. این روابط بیانگر آن است که بهبود وضعیت حرارتی گیاهان می‌تواند به‌طور قابل توجهی سلامت کلی پوشش گیاهی را ارتقاء دهد. نتایج ما با یافته‌های دینگ و همکاران^{۱۵} [۳۵] هم‌راستا است که گزارش کردند کاهش LST در فصل رشد با افزایش TCI و در نهایت VHI همراه است و نشان‌دهنده بازیابی سریع پوشش گیاهی در سال‌های مرطوب است.

شاخص SPI که بر پایه بارش محاسبه می‌شود، با NDVI، VCI و VHI به‌ترتیب دارای همبستگی ۰.۵۵، ۰.۵۴ و ۰.۵۴ بود. این ارقام نشان می‌دهند که بارش‌های بالا در منطقه با تأخیر زمانی، تأثیر مثبتی بر شاخص‌های زیستی دارند. در مطالعه ژانگ و همکاران^{۱۶} [۳۶] نیز نشان داده شد که SPI با NDVI در بازه زمانی یک‌ماهه همبستگی حدود ۰.۵ و در بازه‌های بلندمدت تا ۰.۷ افزایش می‌یابد، که به وابستگی رشد گیاه به الگوهای تجمعی بارش اشاره دارد.

همبستگی بین SPI و TCI معادل ۰.۴۱ و با LST معکوس و برابر با ۰.۴۱- گزارش شد. این نشان می‌دهد که بارش می‌تواند به‌طور غیرمستقیم از طریق افزایش رطوبت خاک و تبخیر، منجر به کاهش دمای سطح زمین گردد. مطالعه‌ای توسط دستیگرادی و همکاران^{۱۷} [۳۷] در ایران نیز این رابطه را تأیید کرد و نشان داد که

در مجموع، این ماتریس همبستگی نشان می‌دهد که بین دما، بارش و وضعیت پوشش گیاهی روابط مشخصی وجود دارد، اما این روابط کاملاً خطی نیستند. تداخلی از عوامل مختلف اکولوژیکی و اقلیمی موجب می‌شود که برخی از شاخص‌ها همبستگی‌های متوسط یا ضعیف‌تری نسبت به هم نشان دهند. با این حال، همبستگی‌های قوی بین LST و TCI، یا بین NDVI و VCI/VHI نشان می‌دهد که برای پایش دقیق خشکسالی زراعی، انتخاب شاخص‌های مناسب و ترکیبی مانند VHI می‌تواند تصویر دقیق‌تری از وضعیت تنش بر پوشش گیاهی ارائه دهد.



شکل ۱۱. ارزیابی همبستگی میان شاخص‌های خشکسالی

۴. بحث و نتایج

در این مطالعه، بررسی همبستگی بین شاخص‌های اقلیمی و زیستی نشان داد که شاخص دمای سطح زمین (LST) دارای همبستگی منفی بسیار قوی با TCI ($r = -1.00$) و VHI ($r = -0.90$) است. این نتایج تأیید می‌کنند که افزایش دمای سطح زمین تأثیر مستقیمی بر تشدید تنش حرارتی گیاهان دارد. یافته‌های ما با نتایج مطالعه هوانگ و همکاران^{۱۱} و بهاردواج و همکاران^{۱۲} [۳۱-۳۲] که در مناطق نیمه‌خشک چین انجام شد، هم‌خوانی دارد؛ آن‌ها نیز گزارش کردند که LST در دوره‌های خشکسالی شدید به‌شدت افزایش می‌یابد و با شاخص‌های سلامت گیاه همبستگی منفی دارد.

¹³ Rahman et al

¹⁴ He et al

¹⁵ Ding et al

¹⁶ Zhang et al

¹⁷ Dastigerdi et al

¹¹ Huang et al

¹² Bhardwaj et al

که سال‌های ۲۰۱۵، ۲۰۱۷ و به‌ویژه ۲۰۲۴ با کاهش بیش از ۴۰ درصدی NDVI و افت VHI به کمتر از ۳۰ درصد، بحرانی‌ترین دوره‌های خشکسالی منطقه بوده‌اند، در حالی‌که سال ۲۰۱۸ با افزایش NDVI به بالای ۰.۴ و بهبود شاخص TCI، دوره‌ای از بازیابی اکولوژیک را تجربه کرده است.

در سطح مکانی-زمانی، شدت و گستره خشکسالی ارتباط نزدیکی با نوسانات اقلیمی، تغییرات کاربری اراضی و کاهش سطح آب دریاچه داشته است. افزایش میانگین دمای سطح زمین به بیش از ۳۱۵ کلون در سال‌های خشک و کاهش بارندگی سالانه به کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر، منجر به افت محسوس شاخص‌های زیستی و تشدید ناپایداری اکوسیستم شد. این نتایج تأیید می‌کند که کاهش بارش برای تحلیل خشکسالی در مناطق نیمه‌خشک کافی نیست و باید اثرات حرارتی و زیستی نیز به‌صورت هم‌زمان بررسی شوند.

در این پژوهش شاخص VHI به‌عنوان کارآمدترین شاخص ترکیبی در شناسایی خشکسالی زراعی معرفی شد، زیرا با در نظر گرفتن هم‌زمان تأثیر رطوبت و دما، توانست تغییرات سلامت پوشش گیاهی را با دقت بالایی تبیین کند. تحلیل‌های آماری نشان داد که ترکیب داده‌های اقلیمی و ماهواره‌ای، نسبت به استفاده منفرد از هر شاخص، تا حدود ۲۵ درصد دقت طبقه‌بندی شرایط خشکسالی را افزایش می‌دهد. به‌علاوه، نتایج نشان داد که الگوی خشکسالی منطقه از سال ۲۰۲۱ به بعد از نوع بارشی به نوع حرارتی تغییر یافته و نقش دما در کاهش تاب‌آوری گیاهان پررنگ‌تر شده است.

بر این اساس، توصیه می‌شود در برنامه‌ریزی و پایش خشکسالی‌های آینده، از شاخص‌های ترکیبی مانند VHI به‌صورت فصلی و پیوسته استفاده گردد. همچنین برای افزایش دقت تحلیل‌ها، استفاده از داده‌های زمینی شامل رطوبت خاک، دمای خاک و تبخیر واقعی در کنار داده‌های سنجنش‌ازدور پیشنهاد می‌شود. توسعه سامانه‌های هشدار سریع خشکسالی مبتنی بر مدل‌های یادگیری ماشین و داده‌های بلندمدت شاخص‌های NDVI، LST و SPI نیز می‌تواند گامی مؤثر در مدیریت ریسک و پیش‌بینی دقیق‌تر خشکسالی باشد. در نهایت، باید اشاره کرد که بسیاری از مطالعات گذشته در زمینه خشکسالی دشت ارومیه تنها به تحلیل یک یا دو شاخص اقلیمی محدود بوده و از ارزیابی هم‌زمان اثرات رطوبتی و حرارتی غافل مانده‌اند. نوآوری این پژوهش در به‌کارگیری رویکردی چندشاخصه و

سال‌های با SPI بالاتر (مرطوب‌تر)، به‌طور میانگین کاهش ۲.۴ درجه‌ای در میانگین LST داشته‌اند.

شاخص VHI که ترکیبی از TCI و VCI است، همبستگی بالایی با تمام شاخص‌های گیاهی و حرارتی دارد. این موضوع نشان می‌دهد که VHI در مقایسه با شاخص‌های منفرد، توانایی بالاتری در شناسایی تنش‌های زراعی دارد. تحلیل سال‌های بحرانی مانند ۲۰۱۷ و ۲۰۱۵ که بیشترین مقدار LST و پایین‌ترین TCI را داشتند، هم‌زمان با کاهش NDVI و افزایش فراوانی خشکسالی شدید در نقشه‌های VHI بودند. این الگو در تحلیل سال‌های تر مانند ۲۰۱۸ معکوس بود. یافته‌های ما با نتایج پژوهش چری^{۱۸} [۳۸] در منطقه سهل حبشه هماهنگ است که در آن دوره‌های بارندگی بالا منجر به بهبود شاخص VHI و کاهش مساحت تحت خشکسالی زراعی شد.

با توجه به ساختار منطقه ارومیه که شامل اراضی کشاورزی حساس، خاک‌های شور، و اقلیم نیمه‌خشک است، ترکیب شاخص‌ها برای تحلیل دقیق‌تر ضروری است. همبستگی قوی VHI با هر دو منبع تنش (حرارتی و رطوبتی) اثبات می‌کند که این شاخص می‌تواند در مدیریت خشکسالی و برنامه‌ریزی کشاورزی نقش مؤثری داشته باشد. در نهایت، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده ترکیبی از شاخص‌های سنجنش‌ازدور مانند NDVI، VCI، TCI و VHI به‌همراه شاخص‌های اقلیمی مانند SPI و LST می‌تواند پایش خشکسالی را به‌طور معناداری دقیق‌تر کند. همبستگی‌های بالا بین این شاخص‌ها نشان می‌دهد که تنش‌های پوشش گیاهی در منطقه دشت ارومیه نه صرفاً از کمبود بارش، بلکه از افزایش دمای سطح زمین نیز تأثیر می‌پذیرند. این یافته‌ها به‌ویژه در شرایط تغییر اقلیم، راهبردی برای آینده‌ی کشاورزی پایدار در نواحی خشک کشور فراهم می‌سازد.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

یافته‌های این پژوهش نشان داد که پوشش گیاهی دشت ارومیه به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر مؤلفه‌های اقلیمی به‌ویژه بارش و دمای سطح زمین قرار دارد. تحلیل کمی شاخص‌های زیستی و اقلیمی بیانگر همبستگی بالا و معنادار بین شاخص‌های NDVI، VCI، TCI و VHI با شاخص‌های SPI و SPEI است ($r > 0.85$)، که نشان‌دهنده نقش هم‌زمان تنش‌های رطوبتی و حرارتی بر سلامت پوشش گیاهی می‌باشد. بررسی مقادیر سالانه شاخص‌ها نشان داد

- Rep 2025;15:1–14. <https://doi.org/10.1038/S41598-025-95418-8>;SUBJMETA=242,4111,704;KWRD=HYDROLOGY,NATURAL+HAZARDS.
- [4] Kheyruri Y, Sharafati A, Shahid S. Evaluation of the impact of large-scale atmospheric indicators and meteorological variables on drought in different regions of Iran. *Environ Earth Sci* 2023;82. <https://doi.org/10.1007/S12665-023-11015-W>.
- [5] Kheyruri Y, Asadollah SBHS, Sharafati A, Rahman A, Mohajeri SH. Examining the effects of meteorological drought variability on rainfed cultivation yields in Iran. *Theor Appl Climatol* 2024;155:6427–44. <https://doi.org/10.1007/S00704-024-05013-6/FIGURES/9>.
- [6] Rembold F, Meroni M, Urbano F, Royer A, Atzberger C, Lemoine G, Eerens H, Haesen D. Remote sensing time series analysis for crop monitoring with the spirits software: New functionalities and use examples. *Front Env Sci* 2015;3:46. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2015.00046>.
- [7] Asadi Zarch MA, Sivakumar B, Sharma A. Droughts in a warming climate: A global assessment of Standardized precipitation index (SPI) and Reconnaissance drought index (RDI). *J Hydrol* 2015;C:183–95. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2014.09.071>.
- [8] Kheyruri Y, Neshat A, Sharafati A, Hameed AS. Identifying the most effective climate parameters on crop yield in rain-fed agriculture and irrigated farming in Iran. *Phys Chem Earth, Parts A/B/C* 2024;136:103744. <https://doi.org/10.1016/J.PCE.2024.103744>.
- [9] Ishaque W, Osman R, Hafiza BS, Malghani S, Zhao B, Xu M, Ata-Ul-Karim ST. Quantifying the impacts of climate change on wheat phenology, yield, and evapotranspiration under irrigated and rainfed conditions. *Agric Water Manag* 2023;275:108017. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2022.108017>.
- [10] Narasimhan B, Srinivasan R. Development and evaluation of soil moisture deficit index (SMDI) and evapotranspiration deficit index (ETDI) for agricultural drought monitoring. *Agric For Meteorol* 2005;133:69–88. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.07.012>.
- تحلیل هم‌زمان SPI، SPEI، NDVI، VCI، TCI و VHI تا سال ۲۰۲۴ است که برای نخستین بار امکان شناسایی تغییر رژیم خشکسالی از نوع بارشی به نوع حرارتی را فراهم کرده است. این چارچوب تحلیلی می‌تواند به عنوان الگویی جامع برای مدیریت منابع آب و کشاورزی در سایر مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور مورد استفاده قرار گیرد.
- در جمع‌بندی نهایی می‌توان گفت که بیشتر مطالعات پیشین در حوزه خشکسالی دشت ارومیه یا بر شاخص‌های بارشی متمرکز بوده‌اند یا تنها از یک شاخص پوشش گیاهی برای ارزیابی تنش بهره گرفته‌اند، به همین دلیل توانایی تشخیص تغییر رژیم خشکسالی از حالت بارشی به حالت حرارتی در آن‌ها محدود بوده است. روش ارائه‌شده در این پژوهش با ادغام هم‌زمان شاخص‌های SPI و SPEI (برای بعد اقلیمی) و شاخص‌های VCI، NDVI، TCI و VHI (برای بعد زیستی و حرارتی) و گسترش تحلیل تا سال ۲۰۲۴ نشان داد که خشکسالی در دشت ارومیه وارد مرحله جدیدی شده است که تنها با تحلیل بارندگی قابل شناسایی نیست. بنابراین، رویکرد ارائه‌شده در این تحقیق می‌تواند به عنوان یک چارچوب ترکیبی و دقیق برای مدیریت خشکسالی و برنامه‌ریزی کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

- [1] Han Z, Huang Q, Huang S, Leng G, Bai Q, Liang H, Wang L, Zhao J, Fang W. Spatial-temporal dynamics of agricultural drought in the Loess Plateau under a changing environment: characteristics and potential influencing factors. *Agric Water Manag* 2021;244:106540. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106540>.
- [2] Gomez-Gomez J de D, Pulido-Velazquez D, Collados-Lara AJ, Fernandez-Chacon F. The impact of climate change scenarios on droughts and their propagation in an arid Mediterranean basin. A useful approach for planning adaptation strategies. *Sci Total Environ* 2022;820:153128. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.153128>.
- [3] Ceppi A, Achite M, Toubal AK, Caloiero T. Mapping drought characteristics in northern Algerian Basins using the ERA5-Land dataset. *Sci*

- Miralles DG, Piles M, Rodríguez-Fernández NJ, Zsoter E, Buontempo C, Thépaut JN. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth Syst Sci Data* 2021;13:4349–83. <https://doi.org/10.5194/ESSD-13-4349-2021>.
- [19] Molden DJ, Shrestha AB, Immerzeel WW, Maharjan A, Rasul G, Wester P, Wagle N, Pradhananga S, Nepal S. The Great Glacier and Snow-Dependent Rivers of Asia and Climate Change: Heading for Troubled Waters. *Water Resour Dev Manag* 2022;223–50. https://doi.org/10.1007/978-981-16-5493-0_12/FIGURES/3.
- [20] Ghafari L, Parvishi A. Climate projection and drought assessment in the lake Urmia basin using LSTM-based downscaling of GCM models under SSP scenarios. *Phys Chem Earth, Parts A/B/C* 2025;141:104134. <https://doi.org/10.1016/J.PCE.2025.104134>.
- [21] Kheyruri Y, Sharafati A, Neshat A. The socioeconomic impact of severe droughts on agricultural lands over different provinces of Iran. *Agric Water Manag* 2023;289. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108550>.
- [22] van Dijk M, Morley T, Rau ML, Saghai Y. A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010–2050. *Nat Food* 2021;27 2021;2:494–501. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00322-9>.
- [23] Bogale T, Degefa S, Dalle G, Abebe G. Spatio-temporal variations of drought in the Welmel watershed, southeast of Ethiopia using the vegetation condition index and standardized precipitation index. *Ecol Process* 2025;14:1–21. <https://doi.org/10.1186/S13717-025-00605-0/TABLES/3>.
- [24] Yang X, Zhang W, Lv A, Li T, Yin P. Propagation dynamics of meteorological, agricultural, and vegetation droughts in China. *J Hydrol* 2025;663:134284. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2025.134284>.
- [25] Won J, Lee J, Kim S. Vegetation drought condition index for probabilistic monitoring and forecasting of vegetation drought. *Weather Clim Extrem* 2025;49:100786. <https://doi.org/10.1016/J.WACE.2025.100786>.
- [11] Wang Z, French N, James T, Schillaci C, Chan F, Feng M, Lipani A. Climate and environmental data contribute to the prediction of grain commodity prices using deep learning. *J Sustain Agric Environ* 2023;2:251–65. <https://doi.org/10.1002/SAE2.12041>.
- [12] Das S, Das J, Umamahesh N V. Copula-based drought risk analysis on rainfed agriculture under stationary and non-stationary settings. <https://doi.org/10.1080/0262666720222079416> 2022;67:1683–701. <https://doi.org/10.1080/02626667.2022.2079416>.
- [13] Alam E, Hridoy AEE, Tusher SSMH, Islam ARMT, Islam MK. Climate change in Bangladesh: Temperature and rainfall climatology of Bangladesh for 1949–2013 and its implication on rice yield. *PLoS One* 2023;18:e0292668. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0292668>.
- [14] Guo Q, He Z, Wang Z. Monthly climate prediction using deep convolutional neural network and long short-term memory. *Sci Rep* 2024;14:1–17. <https://doi.org/10.1038/S41598-024-68906-6>;SUBJMETA=106,4111,694,704;KWRD=CLIMATE+CHANGE,NATURAL+HAZARDS.
- [15] Danandeh Mehr A, Rikhtehgar Ghiasi A, Yaseen ZM, Sorman AU, Abualigah L. A novel intelligent deep learning predictive model for meteorological drought forecasting. *J Ambient Intell Humaniz Comput* 2022;1–15. <https://doi.org/10.1007/S12652-022-03701-7/METRICS>.
- [16] Javadi A, Ghahremanzadeh M, Sassi M, Javanbakht O, Hayati B. Impact of Climate Variables Change on the Yield of Wheat and Rice Crops in Iran (Application of Stochastic Model Based on Monte Carlo Simulation). *Comput Econ* 2023;1–18. <https://doi.org/10.1007/S10614-023-10389-0/TABLES/11>.
- [17] Wang M, Jiang S, Ren L, Xu CY, Wei L, Cui H, Yuan F, Liu Y, Yang X. The Development of a Nonstationary Standardised Streamflow Index Using Climate and Reservoir Indices as Covariates. *Water Resour Manag* 2022;36:1377–92. <https://doi.org/10.1007/S11269-022-03088-2/METRICS>.
- [18] Muñoz-Sabater J, Dutra E, Agustí-Panareda A, Albergel C, Arduini G, Balsamo G, Boussetta S, Choulga M, Harrigan S, Hersbach H, Martens B,

- [34] He B, Zhu W, Zhao C, Xie Z, Zhuang H. A novel index for directly indicating fractional vegetation cover based on spectral differences between vegetation and soil. *Remote Sens Environ* 2025;331:115056. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2025.115056>.
- [35] Ding H, Ren Q, Wang C, Chen H, Wang Y. Exploring the relationship between land use/land cover and apparent temperature in China (1996–2020): implications for urban planning. *Sci Rep* 2024;14:1–17. <https://doi.org/10.1038/S41598-024-53858-8>;SUBJMETA=106,172,704;KWRD=CLIMATE+SCIENCES,ENVIRONMENTAL+SCIENCES.
- [36] Zhang S, Li J, Zhang T, Feng P, Liu W. Response of vegetation to SPI and driving factors in Chinese mainland. *Agric Water Manag* 2024;291:108625. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2023.108625>.
- [37] Dastigerdi M, Nadi M, Sarjaz MR, Kiapasha K. Trend analysis of MODIS NDVI time series and its relationship to temperature and precipitation in Northeastern of Iran. *Environ Monit Assess* 2024;196:1–16. <https://doi.org/10.1007/S10661-024-12463-Y>/FIGURES/11.
- [38] Chere Z. Developing earth observation-based combined drought indicator to monitor agricultural drought in Ethiopia. *J Hydrol Reg Stud* 2025;60:102556. <https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2025.102556>.
- [۲۶] حسینی سم. بررسی خشکسالی های شدید و فراگیر حوضه های آبریز ایران در ۳۰ سال اخیر. جغرافیا و روابط انسانی ۲۰۲۵;۴۸:۶۴–۸۰. <https://doi.org/10.22034/GAHR.2025.501937.2372>.
- [۲۷] حیدری، س.، کریمی م.، عزیزی، ق.، شمسی پور عا. تحلیلی بر پویایی رفتار فضایی خشکسالی در ایران. سامانه نشریات علمی ۲۰۲۵;۱۲:۰۰–.
- [28] Kheyruri Y, Sharafati A, Neshat A, Hameed AS, Rahman A. Analyzing the impact of socio-environmental parameters on wheat and barley cultivation areas using the geographical detector model. *Phys Chem Earth, Parts A/B/C* 2024;135:103630. <https://doi.org/10.1016/J.PCE.2024.103630>.
- [29] Shayeghi A, Ziveh AR, Bakhtar A, Teymoori J, Hanel M, Vargas Godoy MR, Markonis Y, AghaKouchak A. Assessing drought impacts on groundwater and agriculture in Iran using high-resolution precipitation and evapotranspiration products. *J Hydrol* 2024;631:130828. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2024.130828>.
- [30] Khaghani Z, Sharafati A, Kheyruri Y, Hameed AS, Ariyaei A. A fuzzy-based approach for clustering the meteorological drought over Iran. *Stoch Environ Res Risk Assess* 2025;39:697–723. <https://doi.org/10.1007/S00477-024-02891-0>/FIGURES/19.
- [31] Huang S, Wang L, Wang H, Huang Q, Leng G, Fang W, Zhang Y. Spatio-temporal characteristics of drought structure across China using an integrated drought index. *Agric Water Manag* 2019;218:182–92. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2019.03.053>.
- [32] Bhardwaj K, Mishra A, Khedun CP. Global droughts in a warming climate: Evaluation of SPI and SPEI under 1.5°, 2°, and 3 °C global warming. *J Hydrol* 2025;659:133309. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2025.133309>.
- [33] Rahman G, Khalid S, Arshad S, Moazzam MFU, Kwon HH. Remote sensing-based spatiotemporal assessment of agricultural drought and its impact on crop yields in Punjab, Pakistan. *Sci Rep* 2025;15:1–20. <https://doi.org/10.1038/S41598-025-06095-6>;SUBJMETA=158,172,242,704;KWRD=ECOLOG,ENVIRONMENTAL+SCIENCES,HYDROLOGY.