

A novel synthesis Index-Based approach for drought monitoring Northwestern Iran

Misag Sepehriamin¹ , Mansoureh Sadrykia^{*2} , Hassan Emami³

1- Master of Science, Surveying engineering department, Faculty of civil engineering, University of Tabriz, Tabriz-Iran. Email: misag.1998@gmail.com

2- (*Corresponding author) Assistant professor, Surveying engineering department, Faculty of civil engineering, University of Tabriz, Tabriz-Iran, Email: m.sadrykia@tabrizu.ac.ir

3- Associate professor, Surveying engineering department, Faculty of Marand engineering, University of Tabriz, Tabriz-Iran, Email: h_emami@tabrizu.ac.ir

Article Info

Date of receive:

2025/10/06

Date of last review:

2025/11/15

Date of accept:

2025/12/11

Date of online publication:

2025/12/11

Keywords:

Drought,
Meteorology,
Remote sensing,
Geographic Information
System (GIS),
Agriculture,
Hydrology

Extended Abstract

Introduction

Drought, as one of the most important climate hazards with widespread impacts on environmental sustainability and human livelihoods, requires a multidimensional approach for monitoring and assessment. In this study, with the aim of providing a comprehensive model for assessing drought in northwest Iran, a new composite index was developed based on the integration of four perspectives: meteorology, agriculture, hydrology, and remote sensing. The data used included synoptic observations of the Iran Meteorological Organization, Landsat image time series, and MODIS data for the period 2000 to 2024. All processing and calculations of the indices were performed in the Google Earth Engine environment. The resulting indices were normalized using the Analytic Hierarchy Process (AHP) method and optimized weights, and six-month drought maps were produced. The combined results showed that the severity of drought has increased significantly after 2015, especially in the Lake Urmia basin, while higher mountainous areas show a more stable pattern of moisture. So that the area of severe drought areas in the first half of 2015 reached an area of 49.68 km² and in the second half it reached 34.50 km², which is almost more than half of the area of the study area. This amount reached 58.70 km² in the first half of 2019 and 35.20 km² in the second half, which reached the peak of drought in 2021, so that the first half of this number reached 42.36 km² and in the second half it reached 41 km². Also, the combined results of drought maps emphasize that the most droughts occurred in the areas around Lake Urmia and these areas are under serious threat. Finally, the combined method presented in this study provides an efficient method for more accurate spatial and temporal identification of critical areas and provides an effective decision-making tool for managing water resources and agriculture in arid and semi-arid regions ... Page 08

How to Cite:

Sepehriamin, M. Sadrykia, M. Emami, H. (2026). A novel synthesis Index-Based approach for drought monitoring in Northwestern Iran. Scientific-Research Quarterly Geographical Data (SEPEHR). 35(137), 07-25.

Materials & Methods

This study introduces a novel hybrid methodology for drought monitoring by integrating four distinct perspectives—meteorological, agricultural, hydrological, and remote sensing—to achieve a more comprehensive and accurate assessment. Focusing on the drought-stricken region of Lake Urmia in the provinces of East and West Azerbaijan, the research combined multi-source data within a Geographic Information System (GIS) environment. To manage the computationally intensive workload, key indices from each perspective were calculated over a 25-year period, segmented into six-month intervals, using the Google Earth Engine platform. The process first synthesized indices within each perspective using the Analytic Hierarchy Process (AHP) algorithm to generate individual drought severity maps. These four distinct maps were then integrated into a single, comprehensive six-monthly drought map through an overlay analysis with equal weighting, effectively transforming qualitative, multi-domain assessments into a quantifiable, spatially explicit drought severity index. The accuracy of this integrated index was validated against meteorological maps derived from reliable in-situ data, offering a refined tool for precise drought monitoring.

Results and Discussion

Spatio-temporal analysis of composite drought maps reveals a critical trend of intensifying drought severity in the Lake Urmia basin, particularly from 2000 onwards. The quantitative evidence demonstrates a dramatic expansion of areas classified under "severe dryness," which escalated from approximately 73 km² in the first half of 2015 to 154 km² in the second half, and further soared to 300 km² and 615 km² in the respective halves of 2020. By 2024, the affected area remained persistently high at 310 km² and 200 km² for the first and second halves, marking increases of approximately 24% and 25% compared to the corresponding periods in 2015. Spatially, the results confirm that the most severe drought conditions are concentrated in the lands immediately surrounding Lake Urmia. This spatial pattern suggests a

vicious cycle whereby the lake's desiccation exacerbates local agricultural and ecological drought through feedback mechanisms such as salt-dust storms, thereby rendering these areas acutely vulnerable and threatening their long-term habitability if the current trend persists.

Conclusions

This study conclusively demonstrates that the proposed multi-perspective, index-based methodology is a powerful and efficient tool for the comprehensive spatio-temporal monitoring and assessment of drought. Empirical findings confirm a significant intensification of drought within the Lake Urmia basin following 2015, successfully identifying the lake's periphery as the critical epicenter of this environmental crisis. By providing a robust model for monitoring agricultural and ecological drought, this integrated approach equips policymakers and environmental managers with a precise mechanism to pinpoint critical areas at risk. Consequently, the identified regions on the resulting maps offer essential information for planners to implement timely, targeted mitigation and adaptation strategies, thereby enabling proactive measures to combat the devastating effects of drought in vulnerable ecosystems globally.



فصلنامه علمی - پژوهشی

اطلاعات جغرافیایی (س) دوره ۳۵، شماره ۱۳۷، بهار ۱۴۰۵

صفحات ۲۵ - ۷

مقاله پژوهشی

<https://doi.org/10.22131/sepehr.2025.2073394.3154>

یک رویکرد جدید ترکیبی شاخص-مبنا برای پایش خشکسالی در شمال غرب ایران

میشاق سپهری امین^۱، منصوره صدری کیا^{۲*}، حسن امامی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران misag.1998@gmail.com

۲- (*نویسنده مسئول) استادیار، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران m.sadrykia@tabrizu.ac.ir

۳- دانشیار، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده فنی و مهندسی مرنند، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران h_emami@tabrizu.ac.ir

چکیده

خشکسالی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مخاطرات اقلیمی، با اثرات گسترده بر پایداری محیط‌زیست و معیشت انسان، نیازمند رویکردی چندبُعدی برای پایش و ارزیابی است. در این پژوهش، با هدف ارائه‌ی الگویی جامع برای ارزیابی خشکسالی در شمال‌غرب ایران، شاخص ترکیبی نوینی بر پایه‌ی تلفیق چهار دیدگاه هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژی و سنجش‌ازدور توسعه یافت. داده‌های مورد استفاده شامل مشاهدات سینوپتیک سازمان هواشناسی کشور، سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای لندست و داده‌های مادیس در بازه‌ی زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ بودند. کلیه پردازش‌ها و محاسبات شاخص‌ها در محیط گوگل ارث انجین انجام شد. شاخص‌های حاصل پس از نرمال‌سازی، با به‌کارگیری روش تحلیل سلسله‌مراتبی و وزن‌های بهینه‌شده ادغام و نقشه‌های شش‌ماهه خشکسالی تولید شدند. نتایج نشان دادند که شدت خشکسالی پس از سال ۲۰۱۵، به‌ویژه در حوضه دریاچه ارومیه، افزایش معنی‌داری یافته است؛ در حالی که نواحی کوهستانی مرتفع‌تر، الگوی پایداری از رطوبت را حفظ کرده‌اند. بر این اساس، مساحت مناطق دارای خشکی شدید در نیمه‌اول سال ۲۰۱۵، به ۴۹/۶۸ کیلومترمربع و در نیمه‌دوم به ۳۴/۵۰ کیلومترمربع رسید که بیش از نیمی از مساحت منطقه مورد مطالعه را شامل می‌شد. این میزان در نیمه‌اول سال ۲۰۱۹ به ۵۸/۷۰ کیلومترمربع و در نیمه‌دوم به ۳۵/۲۰ کیلومترمربع و در سال ۲۰۲۱ به اوج خود رسید، به‌طوری که در نیمه‌اول این سال مساحت مناطق خشک به ۴۲/۳۶ کیلومترمربع و در نیمه‌دوم به ۴۱ کیلومترمربع افزایش یافته است. همچنین نتایج تأکید می‌کنند که بیشترین خشکی در مناطق اطراف دریاچه ارومیه رخ داده و این عرصه‌ها در معرض تهدید جدی قرار دارند. در نهایت، روش ترکیبی ارائه‌شده در این مطالعه، به‌عنوان روشی کارآمد برای شناسایی مکانی و زمانی دقیق‌تر نواحی بحرانی، ابزار تصمیم‌گیری مؤثری برای مدیریت منابع آب و کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک فراهم می‌نماید.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۷/۱۴

تاریخ آخرین بازنگری:

۱۴۰۴/۰۸/۲۴

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۹/۲۰

تاریخ انتشار:

۱۴۰۴/۰۹/۲۰

واژه‌های کلیدی:

خشکسالی؛

هواشناسی؛

سنجش‌ازدور؛

سیستم اطلاعات

جغرافیایی؛

کشاورزی؛

هیدرولوژی

استناد به این مقاله:

سپهری امین، م؛ صدری کیا، م؛ امامی، ح (۱۴۰۵) یک رویکرد جدید ترکیبی شاخص-مبنا برای پایش خشکسالی در شمال غرب ایران؛ فصلنامه علمی پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، ۳۵ (۱۳۷)، ۷-۲۵.

۱- مقدمه

تعریف دقیق خشکسالی به دلیل تعدد و تنوع پارامترهای مستقیم و غیرمستقیم مؤثر بر وقوع آن دشوار است. این پدیده ماهیتی خزنده دارد، به تدریج آغاز می‌شود و گسترش می‌یابد، اما ویژگی‌های آن در مناطق مختلف، متفاوت است. خشکسالی از نظر هواشناسی عموماً به عنوان کمبود بارش در یک دوره طولانی (ماهانه، فصلی یا سالانه) تعریف می‌شود که پدیده‌ای برگشت‌پذیر است و ابعاد مختلف زندگی انسان و محیط زیست را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برخلاف خشکی که پدیده‌ای دائمی و اقلیمی است، خشکسالی در همه مناطق -چه خشک و چه مرطوب- رخ می‌دهد و وضعیتی طبیعی در چرخه اقلیمی به شمار می‌رود. این مخاطره طبیعی غیرقابل پیشگیری، به آرامی آغاز شده و علاوه بر منطقه اصلی، نواحی مجاور را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ به طوری که اثرات تدریجی آن در بخش‌هایی مانند منابع آب، کشاورزی و محیط زیست ظهور می‌کند. نوسانات بارش نسبت به میانگین‌های بلندمدت، ویژگی ذاتی سیستم اقلیمی زمین است و در ایران -به ویژه به دلیل نوسان بالای بارش- تناوب خشکسالی و ترسالی پدیده‌ای بارز محسوب می‌شود (Chow, & Kareliotis, 1970; Savari, Eskandari, & Eskandari, 2022). شاخص‌های خشکسالی به عنوان معیاری برای ارزیابی و اندازه‌گیری خشکسالی مورد استفاده قرار می‌گیرند و از این رو، مطالعه ویژگی‌های خشکسالی از طریق آن‌ها حائز اهمیت است. با توجه به تفاوت در نوع و کاربرد این شاخص‌ها، ضروری است که کارایی آن‌ها در برابر تغییرات دما و سایر متغیرها در اولویت قرار گیرد. همچنین، عدم توجه به عوامل مؤثر بر شرایط محیطی ممکن است به برداشت‌های نادرست از خشکسالی در آینده منجر شود. از جمله چالش‌های پیش‌رو در ارزیابی خشکسالی می‌توان به روش‌های کاهش مقیاس داده‌ها، دسترسی به داده‌های اقلیمی، محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل (PET)^۱، تغییرپذیری اقلیم و تأثیرات انسانی اشاره کرد. اگرچه دقت

شاخص‌های خشکسالی با استفاده از داده‌های رطوبت خاک بهبود می‌یابد، اما کمبود داده‌های مشاهداتی معتبر و عدم قطعیت در مدل‌های هیدرولوژیکی، چالش‌هایی را برای پیش‌بینی خشکسالی در سناریوهای تغییر اقلیم ایجاد می‌کند. خشکسالی، به عنوان یک پدیده طبیعی مهم، ناشی از دوره‌های طولانی کم‌بارشی است. کمبود آب و استفاده بیش‌ازحد از منابع آبی، به ویژه در بخش کشاورزی، موجب بروز تراز منفی آب، تغییر پوشش گیاهی و تشدید پدیده بیابان‌زایی شده است. مطالعات مختلف خشکسالی با در نظر گرفتن یک دیدگاه، توسط محققان مختلفی صورت گرفته است؛ در این راستا، سبحانی و همکاران در تحقیقی به مدل‌سازی و پیش‌بینی پدیده خشکسالی در ایران پرداخته‌اند و برای این منظور از پارامترهای اقلیمی (بارش، دما، ساعات آفتابی، حداقل رطوبت نسبی و سرعت باد) در ۳۰ ایستگاه طی دوره ۲۹ ساله (۲۰۱۸-۱۹۹۰) استفاده کرده‌اند که با ترکیب چهار شاخص ($SEB-MCZI^2$ $SET-SPI^3$) تحت عنوان $TIBI^4$ و به کارگیری شبکه عصبی به پیش‌بینی خشکسالی پرداخته‌اند. نتایج تحقیق آنان نشان داد که پارامترهای دما و بارش دقت بیشتری در مقیاس‌های شش تا ۱۲ ماهه دارند و همچنین بیشترین درصد وقوع خشکسالی مربوط به ایستگاه بندرعباس (۲۴/۳٪ در مقیاس ۱۲ ماهه) و کمترین مربوط به ایستگاه شهرکرد (۰/۳۶٪ در مقیاس شش ماهه) بوده است (Sobhani, Safarian Zengir, & Kianian, 2019). در تحقیقی، فخار و نظری به شناسایی و توصیف خشکسالی ایران با استفاده از شاخص‌های چندگانه مبتنی بر تصاویر سنجنده مادیس ($MODIS^5$) پرداختند و میزان خشکسالی را طی بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ با استفاده از شاخص بارش استاندارد (SPI) به صورت یک‌ماهه، سه‌ماهه و یک‌ساله بر اساس مجموعه داده‌های بارش $CHIRPS^6$ با قدرت تفکیک مکانی پنج کیلومتر، شاخص وضعیت پوشش

2- Standardized Precipitation Index

3- Modified China-Z Index

4- Temperature, Index, and Biodiversity Index

5- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

6- Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Station data

1- Potential Evapotranspiration

در دوره آماری سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۴۰۲ در منطقه مورد مطالعه نشان داد که از شمال به جنوب بر شدت خشکسالی افزوده شده؛ به‌طوری‌که خشکسالی حاد در مناطق جنوبی و ترسالی حاد در مناطق شمالی دشت بم مشاهده شده است. ضریب همبستگی سالانه بین شاخص‌های SPI با VCI و SPI با VHI به ترتیب برابر با ۰/۷۰ و ۰/۵۳ به‌دست آمده که نشان‌دهنده همبستگی مثبت و نسبتاً زیاد این شاخص‌ها در سطح ۰/۰۵ است؛ همچنین ضریب همبستگی بین شاخص SPI و TCI برابر با ۰/۱۱ بوده که بیانگر همبستگی ضعیف اما معنادار مثبت در سطح ۰/۰۵ است. بنابراین در تحقیق فوق، شاخص‌های VCI و VHI همبستگی بیشتری با بارش سالانه منطقه داشته و نتایج قابل‌قبول‌تری در مقایسه با شاخص TCI ارائه شده است (Rafiei Sardooi, Eghtedarnedjad, & Kohestani, 2025). بر اساس مدل‌های گرمایش جهانی، ایران با کاهش بارندگی و افزایش دما مواجه بوده که منجر به اثرات منفی بر کشاورزی و پایداری محیط زیست به‌دلیل خشکسالی شده است. در تحقیقی دیگر، شرفی از یک مدل تخمینی احتمال ریسک خشکسالی مبتنی بر تئوری انتشار اطلاعات برای ارزیابی خشکسالی کشاورزی استفاده کرده است که با محاسبه درصد ناهنجاری بارندگی (PA)^۵ و شاخص آسیب‌پذیری خشکسالی، به این نتیجه رسید که از نظر خطرناک بودن ریسک، دشت‌های شازند، خمین و ساوه با ریسک خشکسالی بسیار زیاد مواجه هستند (Sharafi, 2023). با توجه به تحقیقات پیشین در حوزه خشکسالی، تلقی نمودن خشکسالی به‌عنوان یک پدیده تک بعدی و در نظر گرفتن صرفاً یک دیدگاه برای بررسی خشکسالی، با چالش‌هایی روبرو خواهد بود. مثلاً دیدگاه هواشناسی فقط بر کمبود بارش توجه دارد و یا دیدگاه هیدرولوژی فقط بر آب‌های زیرزمینی و دیدگاه کشاورزی فقط بر روی رطوبت خاک متمرکز است. بنابراین استفاده از یکی از این دیدگاه‌ها به تنهایی امکان تولید نقشه‌ای دقیق و جامع از خشکسالی را فراهم نمی‌کند. در تحقیق حاضر، از ترکیب چهار دیدگاه

گیاهی (VCI)^۱، شاخص وضعیت دما (TCI)^۲ و شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI)^۳ مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج به‌دست آمده، دریافتند که پراکندگی بارندگی در نواحی جنوب شرقی و مرکزی کشور کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر در سال است. همچنین بر اساس شاخص TCI نشان دادند که مناطقی در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ در کلاس خشکسالی شدید قرار داشته‌اند و با بررسی شاخص VHI نشان دادند که شش استان واقع در ناحیه جنوبی کشور، در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۱ خشکسالی طولانی مدت را تجربه کرده‌اند. به‌طور کلی، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که خشکسالی در کشور طی سال‌های اخیر به‌طور قابل‌توجهی در حال افزایش بوده است و مناطق شمال غرب، جنوب شرقی و مرکز کشور بیشتر در معرض خطر قرار دارند (Fakhar, & Nazari, 2024). در تحقیقی دیگر، داده‌های بارندگی ۳۳ ایستگاه سینوپتیک ایران طی دوره‌ی سال‌های ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۵ برای پایش خشکسالی مورد استفاده قرار گرفته و پایش بر اساس شاخص استاندارد شده بارش (SPI)^۴ در مقیاس زمانی شش‌ماهه انجام شده است. برای پیش‌بینی نیز از مدل مارکوف استفاده شده و نتایج نشان داده‌اند مدل مورد استفاده توانایی شبیه‌سازی رفتار احتمالی خشکسالی و امکان پیش‌بینی زودهنگام آن را فراهم می‌کند (Ghamghami, & Bazrafshan, 2012). اغلب روش‌های سنتی، مبتنی بر مشاهدات ایستگاه‌های هواشناسی بوده و بیشتر به بررسی خشکسالی هواشناسی پرداخته‌اند، با این حال استفاده از تکنیک سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای به‌عنوان ابزاری مفید برای پایش خشکسالی کشاورزی در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در تحقیق رفیعی ساردوئی و همکاران، ارتباط بین شاخص خشکسالی هواشناسی (SPI) و شاخص‌های سنجش از دور (VCI, TCI, VHI) در دشت بم مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج پهنه‌بندی خشکسالی با شاخص SPI

1- Vegetation Condition Index

2- Thermal Condition Index

3- Vegetation Health Index

4- Standardized Precipitation Index

آذربایجان غربی با مساحت تقریبی ۳۷,۰۰۰ کیلومتر مربع (معادل ۲/۲۵ درصد از مساحت کشور) و استان آذربایجان شرقی با وسعتی حدود ۴۵,۰۰۰ کیلومتر مربع، عمدتاً از آب‌وهوای سرد کوهستانی و توپوگرافی مرتفع برخوردارند. با در نظر گرفتن کلیه این عوامل، این منطقه به‌عنوان یکی از کلیدی‌ترین و آسیب‌پذیرترین کانون‌ها در برابر پدیده خشکسالی شناسایی می‌شود. منطقه مورد مطالعه این تحقیق در نگاره ۱ نشان داده شده است.

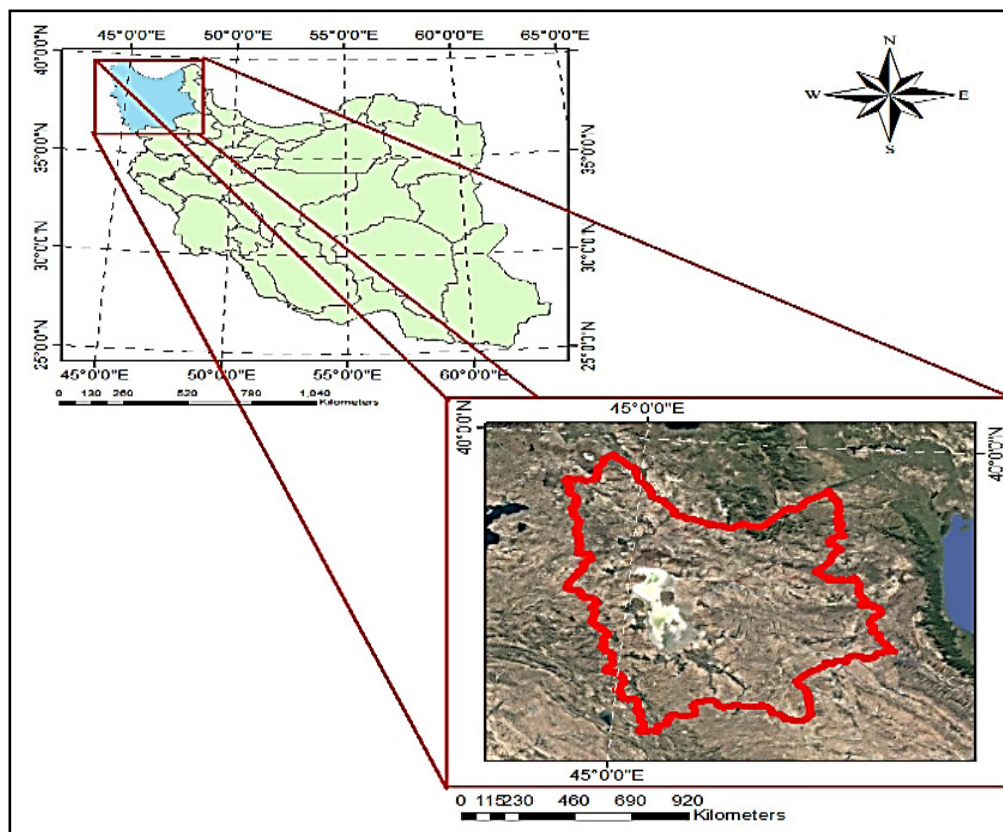
۲-۱- داده‌های تحقیق و پیش‌پردازش آن‌ها

در این پژوهش، برای تولید نقشه شاخص خشکسالی از دیدگاه‌های مختلف و داده‌های متنوعی بهره گرفته شد. به‌منظور محاسبه شاخص‌های مبتنی بر بارش، داده‌های بارندگی ایستگاه‌های سینوپتیک از پایگاه سازمان هواشناسی کشور برای دوره آماری ۲۵ ساله (سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴) اخذ شد و همچنین برای تهیه نقشه‌های خشکسالی از منظر کشاورزی، هیدرولوژیک و سنجش‌ازدور، از سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای لندست و تصاویر سنجنده مادیس طی دوره آماری ۲۵ ساله (سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴) استفاده شد. خلاصه‌ای از داده‌های مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به استفاده از سه نوع داده متفاوت برای پایش خشکسالی در بازه‌های شش‌ماهه، و به‌منظور جلوگیری از حجیم‌شدن داده‌ها و صرفه‌جویی در زمان پیش‌پردازش و پس‌پردازش‌ها، سامانه گوگل ارث انجین مورد استفاده قرار گرفت. این سامانه که یکی از قدرتمندترین ابزارهای پردازش ابری در حوزه سنجش از دور و تحلیل‌های مکانی به‌شمار می‌رود، امکان انجام کلیه پردازش‌های لازم برای تولید شاخص‌های موردنظر را فراهم کرد و تهیه نقشه‌های مرتبط با هر شاخص را تسهیل نمود. تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده نیازمند اعمال اصلاحات مختلفی بودند تا به وضعیت مطلوب برای پردازش برسند؛ از جمله این اصلاحات می‌توان به تصحیحات رادیومتری برای رفع اعوجاج‌های ناشی از

خشکسالی (هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژی و سنجش از دور) برای تهیه نقشه‌های خشکسالی استفاده شده است. ابتدا شاخص‌های استاندارد هر دیدگاه برای یک دوره ۲۵ ساله محاسبه و سپس کلیه نقشه‌های خروجی در محدوده ۰ و ۱ استانداردسازی شدند. در ادامه، با ساخت ماتریس مقایسه زوجی و در نظر گرفتن وزن‌های برابر برای هر چهار دیدگاه، و بدون فرض برتری هر روش، نقشه نهایی خشکسالی با ترکیب وزنی مساوی محاسبه شد. استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی برای وزن‌دهی و ترکیب این چهار لایه و تولید یک نقشه خشکسالی تلفیقی، مزایای متعددی دارد؛ از جمله کاهش ابهام تفسیری برای کاربران نهایی، زیرا به جای ارائه چهار نقشه جداگانه با پیام‌های بالقوه متضاد، یک نقشه واحد طبقه‌بندی شده به کلاس‌های مرطوب، نرمال، خشکی و خشکی شدید ارائه می‌شود که برای مدیران اجرایی قابل درک است. این شاخص ترکیبی، امکان مقایسه استاندارد زمانی و مکانی را فراهم کرده و به دلیل داشتن مقادیر همگن در طول ۲۵ سال؛ تحلیل روند، بازگشت‌پذیری و شدت خشکسالی را با معیاری واحد ممکن می‌نماید. همچنین، این شاخص به‌عنوان متغیر هدف در مدل‌های یادگیری ماشین، دقت بالاتری نسبت به پیش‌بینی هر شاخص را به تنهایی دارد. بنابراین، پایش یکپارچه خشکسالی، دقت تشخیص، جامعیت مکانی-زمانی و قابلیت کاربرد عملی را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

۲- منطقه تحقیق

منطقه مورد مطالعه این پژوهش، استان‌های آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی در شمال غرب ایران را در بر می‌گیرد که به دلیل وضعیت بحرانی دریاچه ارومیه و به‌عنوان کانون این بحران انتخاب شده است. این دریاچه که دارای اهمیت اکولوژیکی بالا و میزبان تنوع زیستی منحصربه‌فرد و جوامع بومی است، از سال ۱۳۴۶ تحت حفاظت قرار گرفته و در سال ۱۳۵۵ از سوی یونسکو در زمره ذخیره‌گاه‌های زیست‌کره جهان و به‌عنوان پارک ملی ثبت شده است. استان



نگاره ۱: منطقه مورد مطالعه

پوشش زمین در پیکسل‌های درشت‌مقیاس مادیس تخمین زده می‌شود؛ سپس تغییرات بازتاب طیفی بین دو تاریخ در سطح هر کلاس محاسبه شده و با درونیابی به کمک تکنیک اسپیلاین^۲، این تغییرات به‌طور دقیق در فضای پیکسل‌های ریزمقیاس لندست توزیع می‌شود. در نهایت، تغییرات محاسبه‌شده به تصویر پایه لندست اضافه می‌شود تا تصویر نهایی با کیفیت بالا حاصل شود. پیاده‌سازی این الگوریتم در گوگل ارث انجین از طریق اسکریپت‌های سفارشی و با استفاده از مجموعه‌های ee.ImageCollection، بسیار ساده و کارآمد است. این راه‌حل قدرتمند، امکان غلبه بر محدودیت‌های ذاتی هر یک از داده‌ها را فراهم کرده و با حفظ جزئیات مکانی لندست و توان تفکیک زمانی مادیس، بستری ارزشمند برای پایش پوشش گیاهی، مدیریت کشاورزی و رصد تغییرات محیطی ایجاد می‌کند.

حسگر، اثرات اتمسفر و تابش خورشید، همچنین حذف ابر و سایه و نیز انجام تصحیحات زمانی به‌منظور کاهش اثرات تغییرات جوی و پوشش گیاهی اشاره کرد. در این تحقیق از الگوریتم ادغام داده‌های مکانی-زمانی انعطاف‌پذیر Flexible Spatiotemporal Data Fusion (FSDAF) که توسط Zhu و همکاران در سال ۲۰۱۶ توسعه یافته و روشی مؤثر و انعطاف‌پذیر برای ترکیب داده‌های سنجش از دور در پلتفرم گوگل ارث انجین ارائه می‌دهد، استفاده شده است (Zhu et al., 2016). این الگوریتم با تلفیق داده‌های دارای قدرت تفکیک مکانی بالا اما فرکانس زمانی پایین (مانند لندست) و داده‌های با فرکانس زمانی بالا ولی قدرت تفکیک مکانی پایین (مانند مادیس)، تصاویر ادغام‌شده‌ای با وضوح مکانی و زمانی بالا تولید می‌کند. مراحل کار آن به این صورت است که ابتدا با استفاده از روش تفکیک طیفی^۱، درصد هر کلاس

جدول ۱: لیست داده های ۲۵ ساله (۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴) مورد استفاده

ردیف	نوع داده	باند های مورد استفاده	بازه زمانی
۱	داده های بارش ایستگاه های سینوپتیک سازمان هواشناسی کشور	-	روزانه
۲	لندست ۵	سبز-قرمز-مادون قرمز	شش ماهه
۳	لندست ۸	سبز-قرمز-مادون قرمز	شش ماهه
۴	مادیس	قرمز-مادون قرمز و SWIR	شش ماهه

پایش یکپارچه خشکسالی از چهار دیدگاه در مقایسه با پایش تک بعدی، مزایای علمی متعددی دارد؛ از جمله کاهش خطای تشخیص ناقص و کاذب، زیرا هر شاخص تک بعدی تنها بخشی از پدیده خشکسالی را نشان می دهد. برای مثال، شاخص هواشناسی مانند SPI کاهش بارش را سریع تشخیص می دهد اما تأثیر آن بر خاک و گیاه را نشان نمی دهد؛ شاخص های کشاورزی تأثیر بر رطوبت خاک را نشان می دهند اما ممکن است به دلیل آبیاری مصنوعی، خشکسالی هواشناسی را پنهان کنند؛ شاخص های هیدرولوژی معمولاً با تأخیر زمانی چندماهه تا چندساله واکنش نشان می دهند؛ و شاخص های سنجش از دور نیز تحت تأثیر عواملی مانند ابر، کیفیت سنجنده و زاویه خورشید قرار می گیرند. بنابراین، ترکیب چهار دیدگاه باعث می شود هیچ خشکسالی واقعی از قلم نیافتد و تشخیص های کاذب ناشی از محدودیت های یک شاخص کاهش یابند. در نهایت، یک نقشه خشکسالی ترکیبی (چهاربعدی) می تواند به طور همزمان پاسخگوی نیازهای کشاورزان (تأثیر بر محصول)، مدیران آب (تأثیر بر مخازن) و سیاست گذاران باشد؛ در حالی که هر شاخص به تنهایی فقط یک بخش را پوشش می دهد. این پژوهش از نوآوری هایی همچون پایش خشکسالی برای نخستین بار از چهار منظر متفاوت در یک بازه ۲۵ ساله در استان های آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی، استفاده تلفیقی از داده های لندست و مادیس، و تمرکز بر تولید نقشه های شش ماهه با تفکیک زمانی بالا برای شناسایی نواحی بحرانی اطراف دریاچه ارومیه برخوردار بود.

قابل ذکر است که ابتدا نقشه های خشکسالی در بازه زمانی سال های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ به صورت شش ماهه برای منطقه تهیه شد. سپس برای هر دیدگاه، نقشه ای واحد از ترکیب شاخص های منتخب با استفاده از روش سلسله مراتبی تولید و در نهایت با ترکیب وزنی یکسان از این چهار دیدگاه، نقشه واحدی برای هر دوره شش ماهه به دست آمد.

۲-۲- روش تحقیق

مراحل انجام پژوهش به شرح زیر صورت پذیرفت: داده های مورد استفاده در این تحقیق شامل مشاهدات سینوپتیک سازمان هواشناسی کشور، تصاویر ماهواره ای لندست و داده های مادیس در بازه زمانی ۲۵ ساله (سال های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴) جمع آوری شد. با توجه به حجم انبوه داده ها (به دلیل بازه ۲۵ ساله)، از بستر پایگاه گوگل ارث انجین برای تولید نقشه های خشکسالی در بازه های شش ماهه استفاده شد. پس از اعمال تصحیحات رادیومتریکی و هندسی، پردازش های لازم برای تولید شاخص های خشکسالی در هر چهار دیدگاه انجام و این شاخص ها استخراج شدند. سپس برای ترکیب نقشه های خروجی چهار دیدگاه (هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژی و سنجش از دور)، شاخص های استاندارد هر دیدگاه برای دوره ۲۵ ساله محاسبه و مقادیر آن ها در بازه ۰ و ۱ استانداردسازی شد. با ساخت ماتریس مقایسه زوجی و با در نظر گرفتن وزن های برابر برای هر چهار دیدگاه و بدون تفاوت یا برتری دادن به روش ها، نقشه نهایی خشکسالی با ترکیب وزنی مساوی محاسبه شد.

جدول ۲: شاخص‌های منتخب دیدگاه هواشناسی

ردیف	شاخص	روابط شاخص‌ها
۱	شاخص بارش استاندارد شده (SPI) ^(۱)	$[1] \quad SPI = \frac{P_i - \bar{P}}{s}$ P_i: مقدار بارش در دوره مورد نظر $\bar{P}$: میانگین دراز مدت بارش در دوره مورد نظر s: انحراف معیار مقادیر بارش در دوره مورد نظر
۲	شاخص ناهنجاری بارندگی (RAI) ^(۲)	(۱): $\bar{M} > P$ $[2] \quad RAI = 3 * \left[\frac{P - \bar{P}}{\bar{M} - \bar{P}} \right]$ $\bar{P}$: میانگین کل بارندگی ایستگاه‌های مورد نظر P: مقدار بارندگی اتفاق افتاده در دوره مطالعاتی $\bar{M}$: میانگین ده مورد از بیشترین مقادیر بارندگی در بازه مورد مطالعه (۲): $\bar{X} < P$ $[3] \quad RAI = -3 * \left[\frac{P - \bar{P}}{\bar{X} - \bar{P}} \right]$ $\bar{P}$: میانگین کل بارندگی ایستگاه‌های مورد نظر P: مقدار بارندگی اتفاق افتاده در دوره مطالعاتی $\bar{X}$: میانگین ده مورد از کمترین مقادیر بارندگی در بازه مورد مطالعه
۳	شاخص درصد نرمال بارش (PNPI) ^(۳)	$[4] \quad PNPI = \frac{P}{\bar{P}} \times 100$ P: مجموع بارندگی در سال مورد مطالعه $\bar{P}$: میانگین بارش دراز مدت

جایگزین مناسبی برای شاخص‌های پیشین شد (Naresh Kumar et al., 2009). این شاخص با استانداردسازی داده‌های بارندگی، امکان مقایسه‌ی مناطق با اقلیم‌های مختلف را فراهم می‌کند (Łabędzki, 2007). میزان انحراف معیار یک رویداد مشخص از شرایط نرمال را محاسبه می‌کند که با استفاده از رابطه‌ی [۱] در جدول (۲) قابل محاسبه است. مقادیر مثبت SPI نشان‌دهنده‌ی بارش بیشتر از میانگین و شرایط ترسالی، و مقادیر منفی آن بیانگر بارش کمتر از میانگین و شرایط

در ادامه به معرفی شاخص‌های هر دیدگاه پرداخته می‌شود. **الف) شاخص‌های دیدگاه هواشناسی:** پایش خشکسالی هواشناسی به‌عنوان مبنای تمامی انواع خشکسالی از اهمیت بالایی برخوردار است (Naresh Kumar et al., 2009). بر این اساس، سه شاخص پرکاربرد این حوزه در جدول (۲) تشریح شده‌اند.

شاخص استاندارد شده بارش (SPI) توسط مک‌کی و همکاران (۱۹۹۳) برای پایش خشکسالی در کلرادو توسعه یافت و به‌دلیل قابلیت تحلیل تأثیر بارش بر منابع آب زیرزمینی، آب‌های سطحی، رطوبت خاک و پوشش برفی،

1- Standardized Precipitation Index

2- Rainfall Anomaly Inde

3- Percent of Normal Precipitation Index

شده است که در جدول (۳) ارائه و تشریح می‌شوند. شاخص تفاضل پوشش گیاهی (DVI) با محاسبه تفاوت بین بازتاب نور مادون قرمز نزدیک و قرمز، پوشش گیاهی را ارزیابی می‌کند. این شاخص اگرچه ساده و سریع است، اما در مناطق با پوشش گیاهی ضعیف به دلیل حساسیت کم به اثرات خاک دقت کمتری دارد. در مقابل، شاخص نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) با نرمال‌سازی این تفاوت، ارزیابی دقیق‌تری از سلامت گیاهان ارائه می‌دهد و مقادیر آن بین ۱+ (پوشش انبوه) تا ۱- (عدم پوشش) متغیر است. شاخص نمایه نسبت پوشش گیاهی (RVI) نیز با استفاده از نسبت بازتاب باند مادون قرمز نزدیک به قرمز، سلامت و تراکم گیاهان را می‌سنجد. برای پایش رطوبت، شاخص نرمال‌شده تفاوت رطوبت (NDMI) با استفاده از باندهای مادون قرمز نزدیک و موج کوتاه (SWIR)، تنش آبی گیاهان را شناسایی می‌کند و مقادیر نزدیک به ۱+ نشانگر مناطق بدون تنش آبی است. همچنین، شاخص نرمال‌شده آب (NDWI) برای شناسایی و پایش محتوای آب در پوشش گیاهی و منابع آبی به کار می‌رود. این شاخص‌ها در مطالعات کشاورزی، زیست‌محیطی و مدیریت منابع طبیعی کاربرد گسترده‌ای دارند. این شاخص‌ها در معادلات (۵) تا (۹) جدول (۳) نشان داده شده‌اند.

ج) شاخص‌های دیدگاه هیدرولوژیکی: خشکسالی هیدرولوژیکی معمولاً پس از خشکسالی هواشناسی و کشاورزی گسترش می‌یابد و در واقع مرحله نهایی و شدید خشکسالی محسوب می‌شود (Shi et al. 2022). خشکسالی هیدرولوژیکی به کاهش محسوس سطح آب دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و مخازن اشاره دارد و به‌طور خاص به معنای کمبود دبی یا حجم جریان آب نسبت به شرایط نرمال است. در مقابل، خشکسالی کشاورزی به وضعیتی گفته می‌شود که در آن رطوبت خاک برای تأمین نیاز محصول کافی نیست و خسارات قابل توجهی به بار می‌آورد (Danandeh Mehret al. 2023). در این پژوهش، برای بررسی خشکسالی هیدرولوژیکی، از شاخص ذخیره آب سطحی (SWSI) استفاده شده است؛

خشکسالی است. شاخص ناهنجاری بارندگی (RAI) نیز توسط روی (۱۹۶۵) ارائه شد که انحراف بارش از حالت نرمال را محاسبه می‌کند. این شاخص که تنها متکی بر داده‌های بارندگی است، به‌ویژه در ارزیابی شدت خشکسالی ماه‌های پرباران کاربرد دارد و با استفاده از روابط [۲] و [۳] جدول (۲) محاسبه می‌شود. مقادیر RAI در پنج طبقه از خشکسالی بسیار شدید تا ترسالی بسیار شدید طبقه‌بندی می‌شوند (Raziei, 2021). شاخص درصد نرمال بارش (PNPI) نیز از دیگر شاخص‌های مهم ارزیابی خشکسالی است که از تقسیم بارش رخ داده بر بارش نرمال حاصل شده و به صورت درصد بیان می‌شود. از مزایای این شاخص، سادگی محاسبه و درک آن در یک منطقه یا فصل خاص است؛ با این حال، این شاخص قادر به مقایسه‌ی فراوانی انحرافات از حالت نرمال در مکان‌های مختلف نیست و نمی‌تواند تأثیرات خاص خشکسالی یا راهکارهای مدیریتی را به‌طور مستقیم تعیین کند (Werick et al., 1994). محاسبه‌ی PNPI با رابطه‌ی [۴] در جدول (۲) انجام می‌شود و مقادیر آن در چهار طبقه از خشکسالی ضعیف تا بسیار شدید دسته‌بندی می‌شوند (Amirataee and Montaseri, 2017).

ب) شاخص‌های دیدگاه کشاورزی: خشکسالی کشاورزی به‌عنوان نتیجه کمبود رطوبت خاک تعریف می‌شود که در اثر برهم‌خوردن تعادل بین تأمین آب و هدررفت آن از طریق تبخیر-تعرق به‌وجود می‌آید. این نوع خشکسالی زمانی رخ می‌دهد که ذخیره رطوبتی ریشه گیاه در خاک در فاصله بین دو بارندگی، برای ادامه حیات محصولات کشاورزی، گیاهان و مراتع کافی نباشد. نبود یا کمبود جریان رطوبت برای تغذیه ناحیه ریشه یا کاهش رطوبت نسبی هوا ممکن است به حدی باشد که رطوبت موجود خاک قادر به جبران تلفات ناشی از تبخیر-تعرق نباشد. به عبارت دیگر، خشکسالی کشاورزی هنگامی محقق می‌شود که رطوبت قابل دسترس خاک برای گیاهان به سطحی کاهش یابد که موجب پژمردگی و خسارت جدی به تولید محصول شود. در این پژوهش، پنج شاخص پرکاربرد این حوزه انتخاب

جدول ۳: شاخص‌های منتخب دیدگاه کشاورزی

ردیف	شاخص	روابط شاخص‌ها
۱	شاخص تفاضل پوشش گیاهی (DVI) ^(۱)	DVI = NIR - RED NIR: باند مادون قرمز نزدیک، RED: باند قرمز
۲	شاخص نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) ^(۲)	$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$ NIR: باند مادون قرمز، RED: باند قرمز
۳	شاخص نرمال شده رطوبت (NDMI) ^(۳)	$NDMI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$ SWIR: کانال طیف مادون قرمز با طول موج کوتاه NIR: طیف مادون قرمز
۴	شاخص نرمال شده آب (NDWI) ^(۴)	$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$ GREEN: باند سبز با طول موج، NIR: باند مادون قرمز نزدیک
۵	شاخص نمایه نسب پوشش گیاهی (RVI) ^(۵)	$RVI = NIR / Red$ NIR: باند مادون قرمز RED: باند قرمز

د) شاخص‌های دیدگاه سنجش از دور: اگرچه دیدگاه‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی عمدتاً مبتنی بر داده‌های ایستگاه‌های زمینی هستند، اما به دلیل محدودیت‌های مکانی و زمانی این داده‌ها و نیز پراکندگی نامناسب ایستگاه‌ها، استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای به عنوان ابزاری کارآمد برای پایش مکانی-زمانی خشکسالی، مورد توجه پژوهشگران و متخصصان قرار گرفته است. این روش با قابلیت بالای داده‌پردازی، مدل‌سازی و بازیابی اطلاعات از نقاط مختلف، به ویژه در سال‌های اخیر، نقش مهمی در مدیریت اثرات خشکسالی ایفا می‌کند. این دیدگاه، سه شاخص برای بررسی خشکسالی ارائه داده که در جدول (۵) تشریح شده‌اند.

اما با توجه به محدودیت دسترسی به داده‌های مورد نیاز این شاخص، از شاخص جایگزین استخراج خودکار آب (AWEI) بهره گرفته شده است. نقشه‌های حاصل از این شاخص، مناطق را به دو کلاس «پوشیده از آب سطحی» و «مناطق غیرآبی» تقسیم‌بندی کرده که در جدول (۴) ارائه شده‌اند. شاخص استخراج خودکار آب (AWEI) به منظور بهبود شناسایی سطوح آبی در تصاویر ماهواره‌ای توسعه یافته و به ویژه در مناطقی با پوشش سطحی پیچیده مانند مناطق شهری یا سایه‌دار کاربرد دارد. این شاخص با استفاده از ترکیب وزنی باندهای مختلف طیفی، ویژگی‌های آبی را با دقت بیشتری استخراج کرده و مشکل اشتباه گرفتن آب با پوشش‌های غیرآبی مانند سایه‌ها و مناطق شهری را کاهش می‌دهد. AWEI به ویژه در مطالعات شهری، نقشه‌برداری از سیلاب‌ها و تحلیل‌های مرتبط با منابع آبی بسیار مفید است (Kareem, Attae and Omran, 2024) که با استفاده از رابطه [۱۰] جدول (۴) محاسبه می‌شود.

1- Difference Vegetation Index

2- Normalized Difference Vegetation Index

3- Normalized Moisture Index

4- Normalized Difference Water Index

5- Ratio Vegetation Index

جدول ۴: شاخص‌های منتخب دیدگاه هیدرولوژی

ردیف	شاخص	روابط شاخص‌ها
۱	شاخص استخراج خودکار آب (AWEI) ^۱	$[10] AWEI = 4 \times (Green - SWIR\ 1) - (0.25 \times NIR + 2.75 \times SWIR\ 2)$ Green: باند سبز، Nir: باند مادون قرمز نزدیک و Swir1: باند مادون قرمز کوتاه Swir2: باند مادون قرمز کوتاه با طول موج ۲/۰۹ تا ۲/۳۵ نانومتر

جدول ۵: شاخص‌های منتخب دیدگاه سنجش از دوری

ردیف	شاخص	روابط شاخص
۱	دیورژانس شاخص نرمال شده پوشش گیاهی (DEV_{NDVI})	$[11] DEV_{NDVI} = NDVI_i - NDVI_{mean-m}$ $NDVI_i$: شاخص نرمال شده ام $NDVI_{mean-m}$: میانگین کل شاخص نرمال شده پوشش گیاهی در بازه زمانی مورد مطالعه
۲	شاخص ارزیابی وضعیت پوشش گیاهی (VCI) ^۲	$[12] VCI = \frac{NDVI_i - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$ $NDVI_i$: مقادیر NDVI پیکسل در دوره زمانی و مکانی مشخص $NDVI_{MAX}$ و $NDVI_{MIN}$: حداقل و حداکثر مقدار NDVI یک منطقه مشخص در دوره زمانی مورد مطالعه
۳	شاخص شرایط دمایی (TCI) ^۳	$[13] TCI = \frac{BT_{max} - BT_i}{BT_{max} - BT_{min}} \times 100$ BT_{max} و BT_{min}: حداقل و حداکثر دمای روشنایی سنجنده BT_i: دمای ثبت شده روشنایی در دوره زمانی مشخص

که با استفاده از مقادیر حداقل و حداکثر NDVI در یک منطقه و در یک دوره مشخص محاسبه می‌شود، بازه‌ای بین صفر و یک دارد؛ مقادیر نزدیک به یک نشان‌دهنده وضعیت مطلوب پوشش گیاهی و مقادیر نزدیک به صفر بیانگر شرایط خشکسالی هستند. همچنین شاخص شرایط دمایی (TCI) با هدف کاهش اثرات ابر در ارزیابی پوشش گیاهی ارائه شد. این شاخص که بر اساس الگوریتم VCI و با استفاده از دمای روشنایی (BT) محاسبه می‌شود (Scott et

دیورژانس شاخص نرمال شده پوشش گیاهی (DEV_{NDVI}) مفهومی پیچیده در حوزه سنجش از دور و کشاورزی است که برای ارزیابی تغییرات پوشش گیاهی در طول زمان به کار می‌رود. این شاخص، میزان تغییرات NDVI را بین دو تصویر یا دو دوره زمانی نشان می‌دهد و اطلاعاتی درباره رشد، سلامت و تراکم پوشش گیاهی ارائه می‌کند (Danandeh Mehr et al. 2023). از سوی دیگر، شاخص ارزیابی وضعیت پوشش گیاهی (VCI) به منظور رفع مشکلات NDVI در برآورد پوشش گیاهی تحت شرایط آب‌وهوایی مختلف معرفی شد (Quiring, & Ganesh, 2010). این شاخص

1- Automated Water Extraction Index

2- Vegetation Condition Index

3-Temperature Condition Index

شدت این پدیده در دهه اخیر افزایش داشته است. در دیدگاه هیدرولوژیک نیز ۴۶ نقشه تولید شد که منطقه به دو کلاس آبی (دارای آب) و سفید (فاقد آب) طبقه‌بندی شدند. اگرچه در این دیدگاه مناطق شرقی در کلاس آبی و اطراف دریاچه در کلاس کم‌آب قرار گرفتند، اما نسبت به دو دیدگاه قبلی صحت کمتری در نمایش خشکسالی وجود داشت، زیرا در نیمه دوم سال‌ها تقریباً تمام منطقه فاقد آب نشان داده شدند؛ درحالی که داده‌های بارش در دیدگاه هواشناسی تغییرات واقعی‌تر را نمایان می‌کند. در دیدگاه سنجش از دور نیز با استفاده از سه شاخص NDVI Divergence، VCI و TCI و تلفیق آن‌ها با روش فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، ۴۸ نقشه خشکسالی ایجاد شد. در نمونه نقشه‌های نشان داده شده (نگاره‌های ۲ و ۳)، رنگ زرد نشانه خشکی و سبز نشانه رطوبت است. بر این اساس، بیشترین خشکسالی مربوط به نیمه دوم سال ۲۰۱۰ و کمترین آن مربوط به نیمه دوم سال ۲۰۱۵ بوده و همچنین مناطق اطراف دریاچه ارومیه بیشترین تغییرات الگوی خشکسالی را تجربه کرده‌اند. در نهایت، ترکیب این دیدگاه‌ها می‌تواند به‌عنوان روشی کارآمد برای پایش جامع خشکسالی به‌کار رود. به‌دلیل تعداد زیاد نقشه‌های تولید شده در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ دو نمونه از نقشه‌های نتایج مربوط به سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۴ در نگاره‌های (۲) و (۳) نشان داده شدند.

۳-۲- نتایج حاصل از ترکیب چهار دیدگاه خشکسالی

پایش یکپارچه خشکسالی از چهار منظر هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژی و سنجش از دور در یک دوره ۲۵ ساله، در مقایسه با پایش تک‌بعدی، دارای مزایای علمی متعدد و قابل‌توجهی است. هر شاخص تک‌بعدی تنها بخشی از پدیده خشکسالی را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال، شاخص‌های هواشناسی مانند SPI کاهش بارش را به سرعت تشخیص می‌دهند اما تأثیر آن بر خاک و گیاه را نشان نمی‌دهند؛ شاخص‌های کشاورزی تأثیر بر رطوبت خاک را نشان می‌دهند اما ممکن است به‌دلیل آبیاری

(al. 2016) مقادیر پایین‌تر را برای شرایط گرم و مقادیر بالاتر را برای وضعیت متعادل و سرد آب‌وهوایی نشان می‌دهد.

۳- نتایج و بحث

با توجه به مطالب ارائه‌شده در بخش قبلی، برای پایش و بررسی خشکسالی در منطقه مورد مطالعه، ابتدا هر یک از شاخص‌های اشاره‌شده برای بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ در مقاطع شش‌ماهه تولید شد. سپس شاخص‌های تولیدشده از هر دیدگاه، با استفاده از روش آماری فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و با اعمال وزن یکسان، ترکیب شدند تا نقشه واحدی از خشکسالی برای هر دوره شش‌ماهه به دست آید. نقشه‌های حاصل از این تلفیق در بخش‌های بعدی ارائه شده‌اند.

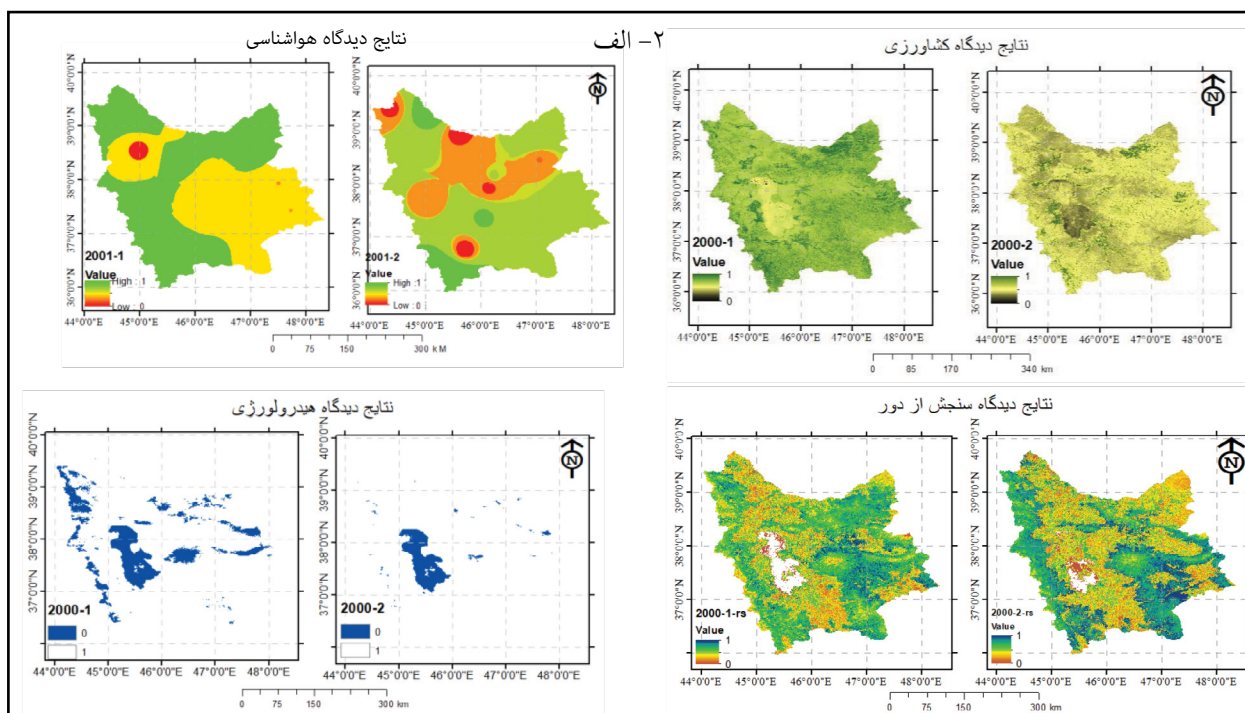
۳-۱- نتایج حاصل از چهار دیدگاه هواشناسی به‌صورت مجزا

در این پژوهش برای تحلیل خشکسالی از چهار دیدگاه متفاوت استفاده شد. در دیدگاه هواشناسی با به‌کارگیری سه شاخص و روش فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، ۴۶ نقشه در بازه سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ تولید شد (داده‌های هواشناسی برای سال ۲۰۲۴ در دسترس نبود). در نمونه نقشه‌های نشان داده شده (نگاره‌های ۲ و ۳) حرکت رنگ‌ها به سمت قرمز بیانگر خشکی بیشتر و به سمت سبز نشان‌دهنده ترسالی است؛ بر این اساس، مناطق اطراف دریاچه ارومیه بیشترین سهم خشکسالی و نواحی شرقی منطقه بیشترین ترسالی را داشته‌اند و نقشه سال ۲۰۲۳ نیز این الگو را تأیید می‌کند. در دیدگاه کشاورزی با استفاده از پنج شاخص و روش فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، ۴۸ نقشه برای دوره سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ ایجاد شد. در نمونه نقشه‌های نشان داده شده در نگاره‌های (۲) و (۳)، رنگ‌های زرد و خاکستری بیانگر خشکی، سبز نشان‌دهنده ترسالی و سیاه نمایانگر آب هستند. طبق نتایج به‌دست‌آمده حاشیه دریاچه ارومیه به‌ویژه در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ کانون خشکسالی شناسایی شد و

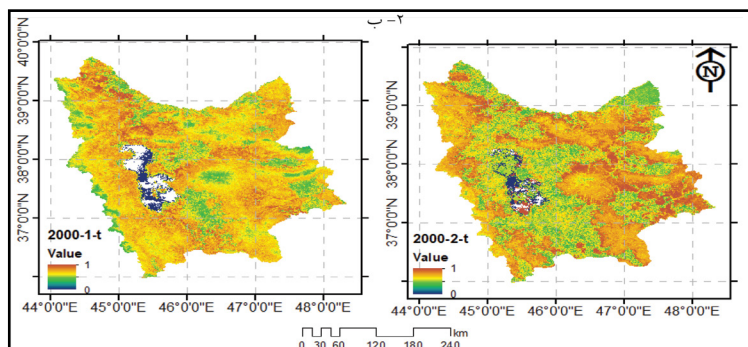
تولید نقشه‌های شاخص‌های دیدگاه‌ها از تصاویر لندست و مادیس استفاده شده است و تصاویر این دو سنجنده قدرت مکانی و زمانی متفاوتی دارند برای همسان‌سازی آن‌ها، الگوریتم ادغام داده‌های مکانی-زمانی انعطاف‌پذیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. چهار دیدگاه هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژی و سنجش از دور با استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و با وزن‌های مساوی ترکیب شدند تا هم دقت تحلیل خشکسالی افزایش یابد و هم کاستی‌های هر دیدگاه جبران شود. همچنین برای اینکه نتایج حاصل دقت کافی برای پایش خشکسالی را داشته باشند. نقشه‌های تولیدی در بازه ۱ تا ۰ نرمالیزه شدند. نتایج حاصل از این تلفیق در نگاره‌های ۲ و ۳ برای دو سال ۲۰۰۰ و ۲۰۲۴ به‌عنوان نمونه ارائه شده‌اند.

در تفسیر نتایج حاصل از ترکیب چهار دیدگاه می‌توان بیان کرد که طیف رنگ آبی مناطق مرطوب و طیف رنگ زرد مناطق نرمال و طیف رنگ قرمز مناطقی هستند که تحت

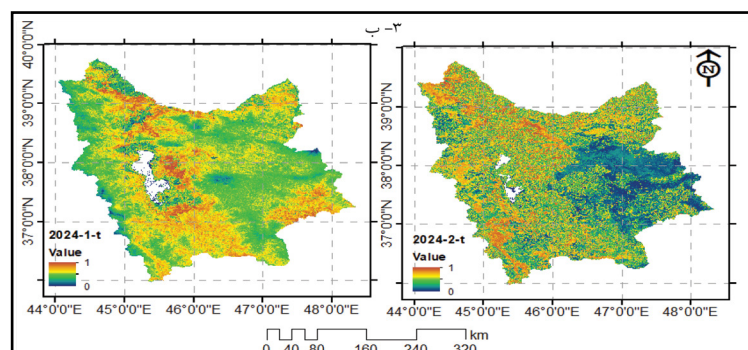
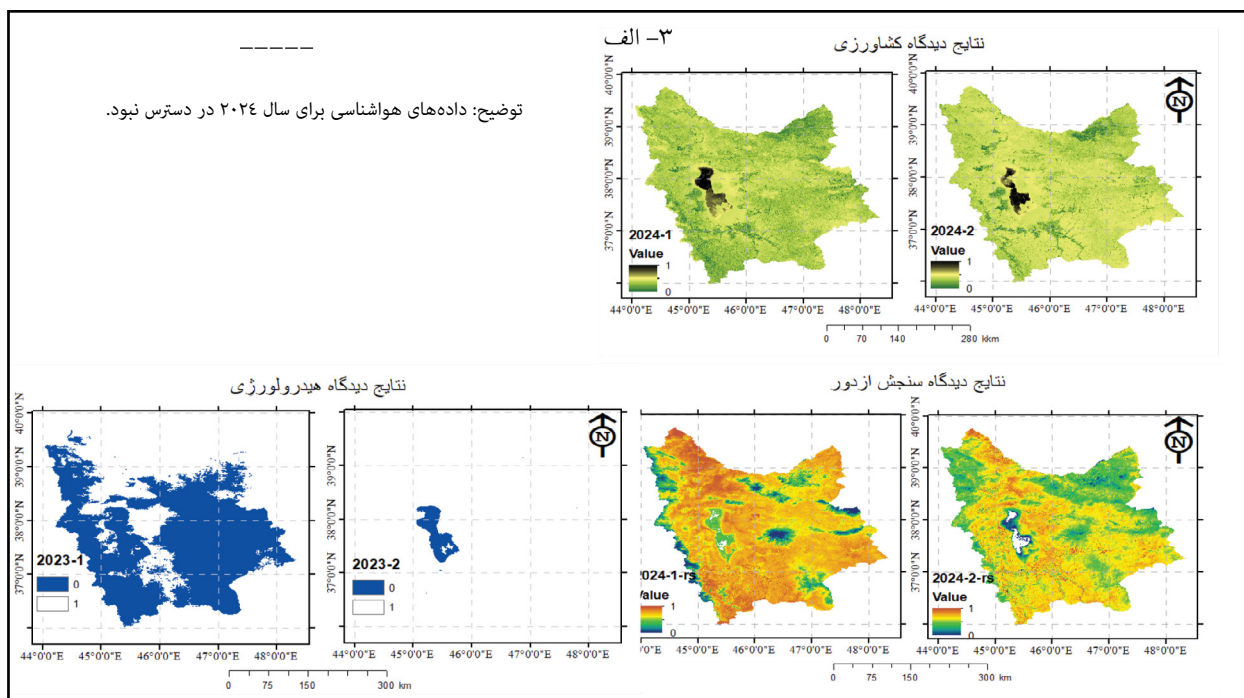
مصنوعی، خشکسالی هواشناسی را پنهان کنند؛ شاخص‌های هیدرولوژی معمولاً با تأخیر چندماهه تا چندساله واکنش نشان می‌دهند؛ و شاخص‌های سنجش از دور نیز تحت تأثیر عواملی مانند ابر، کیفیت سنجنده و زاویه خورشید قرار می‌گیرند. در نتیجه، یک نقشه خشکسالی ترکیبی (چهاربعدی) می‌تواند به‌طور همزمان پاسخگوی نیازهای کشاورزان (تأثیر بر محصول)، مدیران آب (تأثیر بر مخازن) و سیاست‌گذاران باشد، در حالی که هر شاخص به‌تنهایی فقط یک جنبه را پوشش می‌دهد. در این پژوهش نتایج حاصل از چهار دیدگاه مختلف خشکسالی که هر یک به‌طور جداگانه و با استفاده از داده‌های لازم تهیه و تولید شده بودند با یکدیگر تلفیق شدند. این رویکرد با هدف پوشش ضعف‌های احتمالی ناشی از بررسی تنها یک دیدگاه (مانند زمان‌بر بودن جمع‌آوری داده‌های بارش در دیدگاه هواشناسی یا احتمال نقص فنی و عدم ثبت کامل داده‌ها در یک ایستگاه سینوپتیک) اتخاذ شد. باتوجه به اینکه در



نگاره ۲: الف) نقشه‌های خشکسالی تولید شده از چهار دیدگاه (سال ۲۰۰۰) ب) ترکیب دیدگاه‌ها



ادامه نگاره ۲: الف) نقشه‌های خشکسالی تولید شده از چهار دیدگاه (سال ۲۰۰۰) ب) ترکیب دیدگاه‌ها



نگاره ۳: الف) نقشه‌های خشکسالی تولید شده از چهار دیدگاه (سال ۲۰۲۴) ب) ترکیب دیدگاه‌ها

با توجه به نتایج جدول (۶) می‌توان بیان کرد که از سال ۲۰۲۳ تا ۲۰۲۴ خشکسالی منطقه مورد مطالعه همواره

تأثیر خشکسالی قرار گرفته‌اند. روند زمانی کلی خشکسالی در جدول (۶) به صورت کامل جمع‌بندی شده است:

جدول ۶: تحلیل زمانی ترکیب دیدگاه های خشکسالی

بازه زمانی	شدت خشکسالی	تفسیر
۲۰۰۰-۲۰۰۵	نرمال تا نیمه خشک (۰/۴-۰/۳)	دوره ی تعادل نسبی، بارش های پراکنده اما کافی
۲۰۰۶-۲۰۱۲	خشکسالی متوسط (۰/۶-۰/۵)	کاهش بارندگی و افت اولیه در منابع سطحی
۲۰۱۳-۲۰۱۶	خشکسالی شدید (۰/۸-۰/۷)	افت هم زمان بارش، پوشش گیاهی و آب دریاچه ارومیه
۲۰۱۷-۲۰۲۳	خشکسالی بسیار شدید (۰/۹۵-۰/۸۵)	تثبیت خشکسالی مزمن، خشک شدن کامل بستر دریاچه و بحران کشاورزی

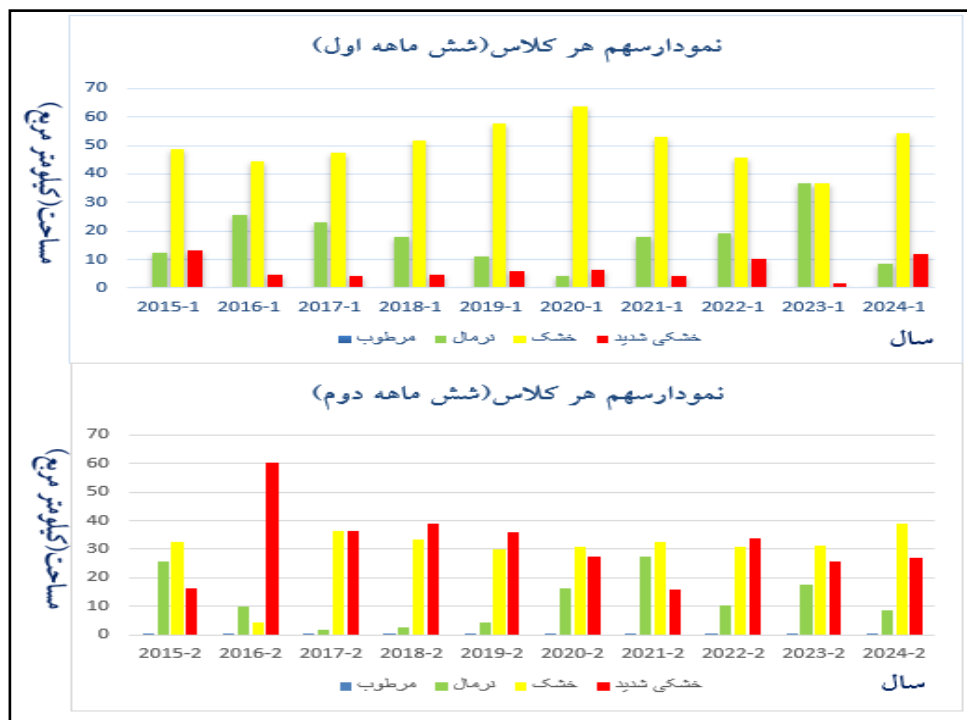
روندی افزایشی داشته است و در حال حاضر به آستانه بحرانی نزدیک شده است. نتایج حاصل از بررسی مکانی خشکسالی بر اساس ترکیب دیدگاه ها در جدول (۷) ارائه شده است. از دیدگاه هواشناسی، کاهش ۲۵ درصدی بارش سالانه و افزایش دما باعث افزایش شاخص خشکسالی شده است. از دیدگاه کشاورزی، کاهش رطوبت خاک و افت پوشش گیاهی موجب افزایش شاخص از ۰/۴۵ به ۰/۸۵ شده و از دیدگاه هیدرولوژیکی نیز افت محسوس در منابع آب سطحی و کاهش جریان رودخانه ها مشاهده شده که ارتباط مستقیمی با خشکسالی کشاورزی دارد. از دیدگاه سنجش از دور، شاخص از ۰/۵۸ به ۰/۳۳ کاهش یافته است. شاخص مرکب تلفیقی نشان می دهد که بیش از ۷۵ درصد از مساحت دو استان در خشکسالی متوسط تا بسیار شدید قرار دارد و نرخ افزایش سالانه خشکسالی حدود ۲/۷ درصد است. مناطق اطراف دریاچه ارومیه، دشت های نقره، بوکان و بناب بیشترین شدت خشکسالی را دارند.

الگوی فصلی خشکسالی با در نظر گرفتن شش ماهه اول و شش ماهه دوم سال های مورد مطالعه نیز مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد در شش ماهه اول سال (بهار و تابستان) به طور متوسط شدت خشکسالی حدود ۰/۷۵ (یعنی خشکسالی شدید و تبخیر بالا) و در نیمه دوم سال (پاییز و زمستان) شدت خشکسالی حدود ۰/۵۰ بوده که بهبود نسبی در مقایسه با نیمه اول سال را نشان می دهد. به عبارت دیگر می توان گفت در نیمه اول سال خشکسالی حدود ۲۵٪ شدیدتر از نیمه دوم سال بوده است. نگاره (۴)، مساحت هر یک از کلاس های خشکسالی را به تفکیک شش ماهه اول و دوم سال از سال ۲۰۱۵ به بعد نمایش داده است.

در این پژوهش، نقشه های ترکیبی خشکسالی در بازه مورد مطالعه به چهار کلاس مرطوب، نرمال، خشکی و خشکی شدید تفکیک شده و مساحت مربوط به کلاس خشکی به واحد کیلومتر مربع محاسبه شده است. نتایج ترکیبی نشان می دهند که شدت خشکسالی پس از سال ۲۰۱۵، به ویژه در

جدول ۷: تحلیل مکانی نتایج ترکیب چهار دیدگاه

ناحیه	وضعیت نهایی	شدت خشکسالی	توضیحات
اطراف دریاچه ارومیه (ارومیه، نقره، بناب، عجب شیر)	منطقه فوق بحرانی	بسیار شدید (۱-۰/۹)	در هر چهار دیدگاه خشک
جنوب آذربایجان غربی (بوکان، مهاباد)	شدید تا بسیار شدید	۰/۸-۰/۷	کاهش جریان رودخانه ها و افت عملکرد زراعی
شمال و شمال شرق آذربایجان شرقی (اهر، کلیبر، سراب)	متوسط	۰/۵-۰/۴	پایداری نسبی به دلیل ارتفاع و جنگل ها
غرب و جنوب غرب مرزی (پیرانشهر، سردشت)	کم تا متوسط	۰/۵-۰/۳	تأثیر کمتر خشکسالی به دلیل بارش محلی بیشتر



نگاره ۴: نمودار مساحت کلاس‌های خشکسالی به تفکیک شش ماهه اول و دوم

خشکسالی را حدود ۰/۶۵ نشان می‌دهد که بیانگر وضعیت شدید تا بسیار شدید است.

نتایج بیانگر آن است که خشکسالی در آذربایجان شرقی و غربی وارد مرحله مزمن شده و بدون مداخلات مدیریتی مناسب، شاخص خشکسالی تا سال ۲۰۳۰ به مقدار بحرانی نزدیکتر خواهد شد. این وضعیت نیازمند برنامه‌ریزی یکپارچه، احیای منابع آبی و اصلاح الگوی کشت است.

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی روند خشکسالی در استان‌های آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ از چهار دیدگاه اصلی (هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیکی و سنجش از دور) انجام شد. ترکیب نتایج این چهار دیدگاه منجر به محاسبه شاخص مرکب خشکسالی شد که وضعیت کلی منطقه را از نظر شدت و تداوم خشکسالی نشان می‌دهد. در بخش روش‌شناسی این پژوهش، از الگوریتم ادغام داده‌های مکانی-زمانی انعطاف‌پذیر استفاده

حوضه دریاچه ارومیه، افزایش معنی‌داری یافته است؛ در حالی که نواحی کوهستانی مرتفع‌تر، الگوی پایدارتری از رطوبت را حفظ کرده‌اند. به‌طوری‌که مساحت مناطق دارای خشکی شدید در نیمه اول سال ۲۰۱۵ معادل ۴۹/۶۸ کیلومتر مربع بوده و در نیمه دوم به ۳۴/۵۰ کیلومتر مربع رسیده که تقریباً بیش از نیمی از مساحت منطقه مورد مطالعه را شامل می‌شود. این میزان در نیمه اول سال ۲۰۱۹ به ۵۸/۷۰ کیلومتر مربع و در نیمه دوم به ۳۵/۲۰ کیلومتر مربع افزایش یافته و در سال ۲۰۲۱ به اوج خشکسالی رسیده است؛ به‌گونه‌ای که در نیمه اول این سال، عدد مذکور به ۴۲/۳۶ کیلومتر مربع و در نیمه دوم به ۴۱ کیلومتر مربع رسیده است. همچنین نتایج ترکیبی نقشه‌های خشکسالی تأکید می‌کند که بیشترین خشکی‌ها در مناطق اطراف دریاچه ارومیه رخ داده و این عرصه‌ها در معرض تهدید جدی قرار دارند. این نتایج نشان می‌دهند که خشکسالی در منطقه روندی افزایشی، پایدار و ساختاری داشته و از پدیده‌ای فصلی به بحرانی اکولوژیکی تبدیل شده است. شاخص ترکیبی نهایی، میانگین شدت

تعارض منافع

در این پژوهش، حامی مالی و تعارض منافع وجود ندارد.

References

- 1- Amirataee, B., & Montaseri, M. (2017). The performance of SPI and PNPI in analyzing the spatial and temporal trend of dry and wet periods over Iran. *Natural Hazards*, 86, 89–106. DOI: 10.1007/s11069-016-2675-4.
- 2- Chow, V. T., & Karelitis, S. J. (1970). Analysis of Stochastic Hydrologic Systems. *Water Resources Research*, 6(6), 1569-1582. DOI: 10.1029/WR006i006p01569.
- 3- Danandeh Mehr, A., Rikhtehgar Ghiasi, A., Yaseen, Z. M., Sorman, A. U., & Abualigah, L. (2023). A novel intelligent deep learning predictive model for meteorological drought forecasting. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 14, 10441–10455. DOI: 10.1007/s12652-022-04314-w.
- 4- Fakhar, M. S., & Nazari, B. (2024). Monitoring and assessing spatial and temporal characteristics of drought in Iran using remote sensing. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 2(1), 39–58. DOI: 10.22077/JDCR.2024.7011.1050.
- 5- Ghamghami, M., & Bazrafshan, J. (2012). Prediction of meteorological drought conditions in Iran using Markov chain model. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 1(3), 1-12.
- 6- Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32(1), 1–6. DOI: 10.1007/s11676-020-01155-1.
- 7- Kareem, H., Attiae, M., & Omran, A. (2024). Estimation the Water Ratio Index (WRI) and Automated Water Extraction Index (AWEI) of Bath in The United Kingdom Using Remote Sensing Technology of The Multispectral Data of Landsat 8-Oli. *Water Conservancy and Management*, 8, 125–132. DOI: 10.26480/wcm.02.2024.171.178.
- 8- Łabędzki, L. (2007). Estimation of local drought frequency in central Poland using the standardized precipitation index SPI. *Irrigation and Drainage*, 56(1), 67-77. DOI: 10.1002/ird.285.

شد. این الگوریتم روشی مؤثر برای ترکیب داده‌های با قدرت تفکیک مکانی بالا اما فرکانس زمانی پایین (مانند لندست) با داده‌های با فرکانس زمانی بالا اما قدرت تفکیک پایین (مانند مادیس) در بستر گوگل ارث انجین است که امکان تولید تصاویر ادغام‌شده با قدرت تفکیک بالا را برای پایش دقیق‌تر پدیده‌های پویای سطح زمین فراهم می‌کند. در این پژوهش، نقشه‌های ترکیبی خشکسالی در بازه زمانی مورد مطالعه به چهار کلاس مرطوب، نرمال، خشکی و خشکی شدید تفکیک شده و مساحت مربوط به کلاس خشکی به واحد کیلومتر مربع محاسبه شده است. نتایج ترکیبی نشان می‌دهند که شدت خشکسالی پس از سال ۲۰۱۵، به‌ویژه در حوضه دریاچه ارومیه، افزایش معنی‌داری یافته است؛ در حالی که نواحی کوهستانی مرتفع‌تر، الگوی پایدارتری از رطوبت را حفظ کرده‌اند. به‌طوری‌که مساحت مناطق دارای خشکی شدید در نیمه اول سال ۲۰۱۵ معادل $49/68$ کیلومتر مربع و در نیمه دوم به $34/50$ کیلومتر مربع رسیده که تقریباً بیش از نیمی از مساحت منطقه مورد مطالعه را شامل می‌شود. این میزان در نیمه اول سال ۲۰۱۹ به $58/70$ کیلومتر مربع و در نیمه دوم به $35/20$ کیلومتر مربع افزایش یافته و در سال ۲۰۲۱ به اوج خشکسالی رسیده است؛ به‌گونه‌ای که در نیمه اول این سال، عدد مذکور به $42/36$ کیلومتر مربع و در نیمه دوم به 41 کیلومتر مربع رسیده است. همچنین نتایج ترکیبی نقشه‌های خشکسالی تأکید می‌کند که بیشترین خشکی‌ها در مناطق اطراف دریاچه ارومیه رخ داده و این عرصه‌ها در معرض تهدید جدی قرار دارند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان بیان کرد که ترکیب این دیدگاه‌ها باعث درک کامل‌تری از چرخه خشکسالی، هشدار زودهنگام و پیش‌بینی دقیق‌تر این پدیده، و تصمیم‌گیری بهتر برای مدیریت منابع آب و بحران خشکسالی می‌شود. این رویکرد به ایجاد یک سیستم هشدار زودهنگام قدرتمند، مدیریت هوشمندتر منابع و کاهش خسارات ناشی از خشکسالی کمک خواهد کرد.

among Iranian farmers. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 67, 102654. DOI: 10.1016/j.ijdr.2021.102654

16- Scott, D., Rutty, M., Amelung, B., & Tang, M. (2016). An inter-comparison of the holiday climate index (HCI) and the tourism climate index (TCI) in Europe. *Atmosphere*, 7(6), 80. DOI: 10.3390/atmos7060080.

17- Sharafi, S. (2023). Evaluating probability of agricultural drought risk using diffusion theory (Case Study: Shazand, Khomein, and Saveh Plains). *Journal of Ecohydrology*, 10(3), 301–319. DOI: 10.22059/ije.2023.364593.1757.

18- Shi, H., Zhou, Z., Liu, L., & Liu, S. (2022). A global perspective on propagation from meteorological drought to hydrological drought during 1902–2014. *Atmospheric Research*, 280, 106441. DOI: 10.1016/j.atmosres.2022.106441.

19- Sobhani, B., Safarian Zengir, V., & Kianian, M. (2019). Modeling, monitoring and prediction of drought in Iran. *Iranica Journal of Energy & Environment*, 10(3), 216–224. DOI: 10.5829/ijee.2019.10.03.08.

20- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150. DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.

21- Werick, W., Willeke, G., Guttman, N., Hosking, J., & Wallis, J. (1994). National drought atlas developed. Institute for Water Resources. DOI: 10.1029/94EO00706.

22- Zhu, X., Helmer, E. H., Gao, F., Liu, D., Chen, J., & Lefsky, M. A. (2016). A flexible spatiotemporal method for fusing satellite images with different resolutions. *Remote Sensing of Environment*, 172, 165–177. DOI: 10.1016/j.rse.2015.11.016.

9- Moghaddasi, M., Moghaddasi, M. N., & Nia, M. Drought characteristics assessment based on the combination of global precipitation and runoff data in second-order watersheds of the country. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(9), 1299–1317. DOI: 10.22059/ijswr.2023.359076.669456.

10- Naresh Kumar, M., Murthy, C. S., Sessa Sai, M. V. R., & Roy, P. S. (2009). On the use of Standardized Precipitation Index (SPI) for drought intensity assessment. *Meteorological Applications*, 16(3), 381–389. DOI: 10.1002/met.136.

11- Prodhan, F. A., Zhang, J., Hasan, S. S., Sharma, T. P., & Mohana, H. P. (2022). A review of machine learning methods for drought hazard monitoring and forecasting: Current research trends, challenges, and future research directions. *Environmental Modelling & Software*, 149, 105327. DOI: 10.1016/j.envsoft.2022.105327.

12- Quiring, S. M., & Ganesh, S. (2010). Evaluating the utility of the Vegetation Condition Index (VCI) for monitoring meteorological drought in Texas. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(3), 330–339. DOI: 10.1016/j.agrformet.2009.11.015

13- Rafiei Sardooi, E., Eghtedarnejad, M., & Kohestani, S. (2025). Evaluation of Remote-Sensing-Based Indices for Drought Monitoring Using MODIS Images (Case Study: Bam Plain). *Journal of Range and Watershed Management*, -. DOI:10.22059/jrwm.2025.393588.1821.

14- Raziei, T. (2021). Revisiting the rainfall anomaly index to serve as a simplified standardized precipitation index. *Journal of Hydrology*, 602, 126761. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126761.

15- Savari, M., Eskandari Damaneh, H., & Eskandari Damaneh, H. (2022). Drought vulnerability assessment: Solution for risk alleviation and drought management

COPYRIGHTS

©2026 by the authors. Published by National Geographical Organization. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons [Attribution-NoDerivs 4.0 International \(CC BY-ND 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/).



