نشریه علمی

علوم و مهندسی آبخیزداری ایران
Iran-Watershed Management
Science & Engineering

Vol. 19, No. 68, Spring 2025

سال نوزدهم- شماره ۶۸- بهار ۱۴۰۴

Temporal-spatial analysis of changes of some hydroclimatic components in Iran

Ali Nori[1], Vahid Moosavi[2], Hamidreza Moradirekabdarlolaei[3]

Received: 16-02-2025, Revised: 05-03-2025, Accepted: 20-04-2025, Published: 09-06-2025
https://doi.org/10.22034/19.68.4

Extended abstract

IntroductionIn

recent decades, droughts have intensified globally, affecting diverse climatic regions with varying characteristics. Rising global temperatures alter climatic components like precipitation, evapotranspiration, and soil moisture, impacting river regimes and exacerbating water scarcity. Droughts are categorized into meteorological, agricultural, hydrological, and socio-economic types, with interconnected impacts on groundwater depletion, agricultural productivity, drinking water access, and socio-political stability. In arid/semi-arid regions like Iran, groundwater is critical for drinking, agriculture, and economic development, necessitating advanced management strategies to address spatial-temporal variability. Studies emphasize analyzing hydrological and climatic trends using parametric/non-parametric methods. The non-parametric Mann-Kendall test is widely used for trend detection in non-normal data, while Discrete Wavelet Transform (DWT) decomposes time-series data to identify non-stationary patterns. Global Land Data Assimilation System (GLDAS) data (25 km resolution), developed by NASA and NOAA, enables large-scale analysis of land surface parameters (e.g., soil moisture, evaporation) using models like CLM and Noah. This study employs GLDAS data, Mann-Kendall tests, and 1D wavelet analysis to assess hydroclimatic trends across Iran's climates and major basins. By integrating statistical and signal-processing methods, it aims to decode drought frequency oscillations in meteorological, hydrological, and groundwater indices, offering insights for policymakers to optimize water management amid climate change. The research distinguishes itself through national-scale analysis, frequency-domain insights from satellite data (vs. station-based studies), and simultaneous evaluation of broad trends and granular fluctuations, aiding climate adaptation and drought forecasting.

Methodology

In this study, data were initially obtained from the Google Earth Engine platform. Annual precipitation data for a 20-year period from 2003 to 2022 were extracted using CHIRPS, which offers a temporal resolution of five days. CHIRPS data are specifically designed for climate and drought management studies, covering the period from 1981 to present. Due to the absence of precipitation data before 2003 in GLDAS, CHIRPS was selected. Additionally, GLDAS data for groundwater level, soil moisture, and surface runoff were acquired for the same period at a 25 km spatial resolution. These variables are directly linked to the water cycle and are crucial for water resource planning, drought management, climate change prediction, and policy-making.

1. Master's degree in Watershed Science and Engineering
2. Assistant Professor, Department of Watershed Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran.
Corresponding Authors: v.moosavi@modares.ac.ir
3. Professor, Department of Watershed Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-19]

Daily and five-day data were aggregated into monthly scales using MATLAB and then processed in ENVI software for the entire study period. The Mann-Kendall non-parametric test was employed to detect trends and non-stationarity in the hydroclimatic time series. To analyze the nature and patterns of changes, one-dimensional discrete wavelet transform (DWT) was applied. Wavelets are powerful mathematical tools for decomposing signals and time series, enabling identification of short- and long-term trends and fluctuations. Daubechies wavelet, well-suited for precipitation data, was chosen as the mother wavelet. DWT decomposed the 12-month meteorological, hydrological, and groundwater drought indices of Iran's climates into eight levels of detail and approximation components. This approach facilitated detailed trend analysis of drought indices over the study period, providing valuable insights into hydroclimatic variability and drought dynamics.

Results

The trend analysis using the Mann-Kendall test revealed that precipitation exhibited a decreasing, though statistically insignificant, trend across most regions. Similarly, actual evapotranspiration, soil moisture, and groundwater levels showed significant decreasing trends, consistent with the decline in precipitation. Overall, the results indicate that precipitation, or meteorological drought, is the primary hydrometeorological component, acting as the starting point for other types of droughts. Wavelet analysis of drought trends across different climates in Iran showed that the trend of the Approximation frequency, reflecting low-frequency changes in the original signal, was similar across all climates. This suggests a common change pattern nationwide. The Approximation frequency displayed an increasing trend for all drought types, indicating that drought frequency has intensified in recent years and is likely to continue increasing. The Detail frequency analysis revealed that fluctuations in the SPI (Standardized Precipitation Index) and SSI (Standardized Soil Moisture Index) were significantly greater in wetter climates than in drier regions. In dry areas, fewer details were observed in the trends of these indices, likely due to greater rainfall variability, larger water resources, and complex hydrological structures in wetter areas. Changes in groundwater levels were less pronounced compared to other indices, resulting in fewer details in both high- and low-frequency trends. This can be attributed to the delayed response of groundwater to rainfall or meteorological drought. In contrast, hydrological drought, specific to surface water resources, showed substantial fluctuations due to the strong dependence of surface water on precipitation in most regions.

Discussion and Conclusion

Iran's climate is influenced by the subtropical high-pressure system, a dynamic warm air system that has intensified in strength and extent due to global warming. This expansion reduces precipitation in affected areas because these high-pressure systems induce descending air currents, which inhibit cloud formation and rainfall while increasing evapotranspiration. Although global warming has raised temperatures in Iran, actual evapotranspiration has decreased over the past 20 years due to declining precipitation. Groundwater levels have also declined, primarily driven by reduced rainfall alongside factors like over-extraction, illegal wells, and industrial use in low-precipitation regions. Overall, precipitation or meteorological drought is the primary hydroclimatic factor influencing other drought types. Wavelet analysis of drought indices (SPI and SSI) revealed that fluctuations are more pronounced in humid climates compared to arid ones, likely due to greater rainfall variability, more abundant water resources, and complex hydrology in wetter regions. In contrast, arid areas show fewer fluctuations and details due to limited water sources. Groundwater changes exhibited minimal variability, reflecting delayed responses to drought and greater stability across climates. Surface water drought showed significant variability, influenced by its strong dependence on rainfall and sensitivity to short-term events like floods or dry spells. This dynamic nature causes surface water to respond rapidly to climatic changes. The study's findings help identify critical regions vulnerable to reduced rainfall, increased evapotranspiration, groundwater depletion, and surface water fluctuations. Despite the lower resolution of satellite data compared to ground observations, this research provides valuable insights for water resource management, drought and flood risk planning, agricultural development, and land-use planning at a national scale.

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-19]

Keywords: *Hydroclimate, Drought, Mann-Kendall, Discrete Wavelet Transform (DWT), Signal Processing*

Article Type: Research Article

Acknowledgement

This research is in the form of a master's thesis by the first author of the article and is financially supported by Tarbiat Modares University. The authors also express their gratitude and appreciation to the Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares Pardis Noor.

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the writing and publication of the contents and results of this research.

Data Availability Statement

The data and results used in this research will be made available upon reasonable request and correspondence with the corresponding author.

Authors' contribution

Ali Nori: Data collection and preprocessing, computations, writing, drafting, and finalizing the manuscript.

Vahid Moosavi: Research idea, guidance, and supervision of the research process, result validation, data analysis, manuscript editing, and revision.

Hamidreza Moradi Rekabdar Kolaei: Guidance on the research process, manuscript editing, and revision.

Citation: Nori A, moosvai V, MoradiRekabdarkolaei H. Temporal-spatial analysis of changes of some hydroclimatic components in Iran. jwmseir 2025; 19 (68): 46-63

Iran-Watershed Management Science & Engineering, Year 2025, Vol 19, No 68, PP 46-63

Publisher: Watershed Management Society of Iran © Author(s)

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-19]

تحلیل زمانی-مکانی تغییرات برخی مؤلفه‌های هیدرواقلیمی در ایران

علی نوری[۱]، وحید موسوی[۲]، حمیدرضا مرادی رکابدارکلائی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۸، تاریخ داوری: ۱۴۰۳/۱۲/۱۵ ، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۳۱، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۳/۱۹
https://doi.org/10.22034/19.68.4

چکیده

در دهه‌های اخیر، رویداد خشکسالی در بسیاری از کشورها رشد حداکثری داشته است. امروزه اولین نشانه‌های خشکسالی شدید و طولانی‌مدت در کاهش میزان بارندگی مشاهده می‌شود. به طبع آن در طول یک دوره خشک، تبخیر و تعرق پتانسیل می‌تواند افزایش یابد، در ادامه میزان ذخیره رطوبت خاک تحت تأثیر این شرایط شروع به کاهش می‌کند و در نتیجه تغذیه آب زیرزمینی کاهش می‌یابد. منطقه مورد مطالعه پژوهش حاضر، کشور ایران است. به‌منظور بررسی تغییرات مؤلفه‌های هیدرواقلیمی در کشور با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GLDAS ابتدا داده‌های بارش، تبخیر و تعرق، آب سطحی و آب زیرزمینی با مقیاس مکانی ۲۵ کیلومتر در دوره آماری ۲۰ سال از پایگاه Google Earth Engine دریافت شد. در ادامه برای پردازش سیگنال مؤلفه‌های بارش، رواناب و آب زیرزمینی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژی و آب زیرزمینی ۱۲ ماهه در هر اقلیم کشور محاسبه شد. همچنین در بین موجک‌ها، تبدیل موجک گسسته برای تحلیل روند و شناسایی الگوهای نوسانی در داده‌های هیدرولوژیکی و اقلیمی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج تحلیل روند حاصل از آزمون من-کندال نشان داد برای مؤلفه بارش این مؤلفه تقریباً در تمام مناطق کشور روند کاهشی و غیرمعنی‌دار بوده است. سایر مؤلفه‌ها نیز به‌طبع کاهش بارش تغییرات کاهشی و معنی‌دار در غالب مناطق کشور داشته‌اند. نتایج حاصل از بررسی روند خشکسالی‌ها با تحلیل موجک در اقلیم‌های مختلف کشور نشان داد روند فرکانس Approximation که نشان‌دهنده تغییرات کلی است، در تمام کشور روندی مشابه دارد. نتایج در روند فرکانس Detail نیز نشان داد در شاخص SPI و SSI نوسانات در اقلیم‌های مرطوب به مراتب بیشتر از اقلیم‌های با خصوصیات خشک بوده است که از مهمترین دلایل آن می‌توان به تنوع بارندگی، منابع آبی بیشتر و پیچیدگی ساختار هیدرولوژی اشاره نمود. همچنین تغییرات در سطح آب زیرزمینی در مقایسه با سایر شاخص‌ها بسیار کمتر بوده است و این شاخص جزئیات بسیار کمتری در فرکانس‌های بالا و پایین روند آن مشاهده شد که دلیل آن را می‌توان تأخیر زیاد واکنش آب زیرزمینی به بارندگی یا خشکسالی هواشناسی دانست. از طرفی فرکانس خشکسالی هیدرولوژی دارای نوسانات بسیار زیاد جزئیات حتی در سطوح بالا داشت که این موضوع ناشی از وابستگی شدید منابع آب سطحی کشور به بارندگی است.

کلید واژه‌ها: **هیدرواقلیم، خشکسالی، من-کندال، تبدیل موجک گسسته، پردازش سیگنال**

نوع مقاله: پژوهشی

استناد: نوری علی، موسوی وحید، مرادی رکابدارکلائی حمیدرضا. تحلیل زمانی-مکانی تغییرات برخی مؤلفه‌های هیدرواقلیمی در ایران. علوم ومهندسی آبخیزداری ایران۱٤۰٤؛ ۱۹(٦۸): ٤٦-٦۳

علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال ۱٤۰٤، دوره ۱۹، شماره ٦۸، صفحه ٤٦-٦۳

ناشر: انجمن آبخیزداری ایران

© نویسندگان

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران.
۲- استادیار، گروه مهندسی ابخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران. نویسنده مسئول: Email: v.moosavi@modares.ac.ir
۳- استاد، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-19]

مقدمه

به نظر می‌رسد که در دهه‌های اخیر، رویداد خشکسالی[1] در بسیاری از کشورها رشد حداکثری داشته است [۲۱] این پدیده تقریبا در تمام مناطق اقلیمی رخ می‌دهد با این وجود خصوصیات آن در مناطق مختلف متفاوت است [۳۳]. افزایش میانگین دمای سطح جهان مؤلفه‌های اقلیمی مانند بارش، تبخیر و تعرق، رطوبت خاک و ... را تغییر داده است که این امر می‌تواند رژیم جریان رودخانه را نیز تحت تأثیر قرار دهد [۳۲]. با توجه به انواع مختلف کمبود آب (بارندگی و سطح آب زیرزمینی)، خشکسالی‌ها به چهار دسته‌ی اصلی خشکسالی هواشناسی[2]، کشاورزی[3]، هیدرولوژیک[4] و اجتماعی-اقتصادی[5] تقسیم می‌شوند [۱]. بین انواع مختلف خشکسالی، رابطه نزدیکی وجود دارد که تأثیر و تبدیل به یکدیگر را می‌تواند به همراه داشته باشد [۲۸]. به‌طور کلی، خشکسالی‌ها می‌توانند به کاهش میزان کمیت و کیفیت آب زیرزمینی، کاهش تولید محصولات کشاورزی، مشکل در تأمین آب شرب، افزایش هزینه‌های آب، افزایش خطر آتش‌سوزی و کاهش کیفیت هوا، خسارات به بهداشت عمومی و افزایش نیاز به واردات محصولات کشاورزی [۲٤] و همچنین به افزایش تنش‌های اجتماعی و سیاسی منجر شوند [۱۳]. در این بین آب زیرزمینی برای مبارزه با خشکسالی، استفاده شرب، تولید مواد غذایی و حتی در توسعه اقتصادی کشور دارای اهمیت بسیار است. در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان از جمله ایران، که میانگین بارندگی سالانه آن کفایت نیاز آبی را نمی‌دهد، حفظ و مدیریت منابع آب زیرزمینی اهمیت بسیار بالایی داشته و آگاهی از چگونگی تغییرات مکانی و زمانی سفره‌ها و همچنین ساختار ریاضی تغییرپذیری، به منظور مدیریت بهینه اطلاعات مهمی در اختیار مدیران قرار می‌دهد [٤]. منابع آب‌های زیرزمینی در بسیاری از مناطق به عنوان اصلی‌ترین و مهمترین منبع آب شرب، کشاورزی و صنعت به شمار می‌روند [۲٤]. تغییرات آب و هوا و اثرات آن بر بخش‌های مختلف کره زمین امروزه به یکی از اولویت‌های بزرگ دنیا تبدیل شده است که این امر از تغییر در میزان و الگوی بارش و افزایش دما آغاز می‌شود [٥]. از این رو امروزه اولین نشانه‌های خشکسالی شدید و طولانی‌مدت در اکثر نقاط دنیا در کاهش میزان بارندگی مشاهده می‌شود. به‌طور کلی نتایج بسیاری از مطالعات نشان داده که افزایش جهانی دمای کره زمین موجب تغییر در الگوی بارندگی و پدیده‌های حدی مانند خشکسالی شده است [۳۱]. در این میان، بارندگی یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های اقلیمی است و تغییرات شرایط اقلیمی بر الگوی بارش تأثیر گذاشته و میزان رواناب را تغییر می‌دهد. به همین دلیل با توجه به اهمیت روند داده‌های هیدرولوژیکی و اقلیمی نیاز است داده‌ها در سطح کشور از نظر تغییرات و وجود روند مورد بررسی قرار گیرند [۱٦]. کمبود طولانی مدت بارش منجر به کاهش ورودی به سیستم هیدرولوژی می‌شود. در طول یک دوره خشک، تبخیر و تعرق پتانسیل می‌تواند افزایش یابد. پس از یک دوره کوتاه، میزان ذخیره رطوبت خاک تحت تأثیر این شرایط شروع به کاهش می‌کند، در نتیجه تغذیه آب زیرزمینی کاهش یافته و ممکن است پس از مدتی از آغاز خشکسالی، سطح تراز آب چاه‌ها به کاهش بارندگی واکنش نشان دهد [۳۷]. بررسی روند علاوه بر مشخص کردن نوسانات طولانی مدت فرایندهای هیدرولوژیکی، دوره تناوب و دیگر خصوصیات آن‌ها را مشخص می‌کند. به همین منظور روش‌های مختلف پارامتری و ناپارامتری جهت بررسی روند توسط محققین ارائه شده است. در روش پارامتری مستقل بودن و پیروی از توزیع نرمال داده‌ها ضروری است درصورتی که روش‌های ناپارمتری نیاز نیست داده‌ها از توزیع نرمال پیروی کنند و نسبت به داده‌های پرت و گم‌شده حساسیت کمتری دارند. از بین آزمون‌های روند ناپارامتری برای تشخیص روند سری‌های زمانی روش من-کندال[6]روش مناسبی است [٦]. تبدیل موجک (WT)[7] ابزاری ریاضی است که برای تحلیل سیگنال‌ها و داده‌های سری زمانی به‌کار می‌رود. این روش امکان تجزیه سیگنال‌ها به اجزای مختلف در مقیاس‌های زمانی و فرکانسی متفاوت را فراهم می‌کند و به‌ویژه در تحلیل داده‌های غیر ایستا و پیچیده مؤثر است. از میان موجک‌ها تبدیل موجک گسسته (DWT)[8] نسخه‌ای از تبدیل موجک است که در آن سیگنال‌ها به‌صورت گسسته نمونه‌برداری و تحلیل می‌شوند. این روش در زمینه‌های از جمله پردازش سیگنال، فشرده‌سازی داده‌ها، حذف نویز و تحلیل سری‌های زمانی کاربرد دارد [۷]. در حوزه مطالعات هیدرواقلیمی DWT برای تحلیل روند و شناسایی الگوی نوسانی در داده‌های هیدرولوژیکی و اقلیمی مورد استفاده قرار گرفته است [۲]. مطالعات متعددی در زمینه ارزیابی روند تغییرات پدیده خشکسالی در کشور و همچنین سطح جهان انجام شده است. عراقی و همکاران [۱۷] در پژوهش خود با استفاده از تبدیل موجک گسسته و انجام آزمون من-کندال، داده‌های دمای متوسط در ایستگاه سینوپتیک مشهد در دوره ٥٥ ساله (۱۹٥٦ تا ۲۰۱۰) مـورد تحلیل و بررسی قـرار دادند. نتایج نشان داد که روند تغییرات دما در همه مقیاس‌های زمانی مطالعه شده (ماهانه، فصلی، سالانه و فصول به صورت مجزا) مثبت و معنی‌دار است. همچنین مشخص شد فرکانس‌های غالب در مقیاس‌های ماهانه، فصلی و سالانه، تائید کننده رفتار نوسانی یکدیگر هستند، اما در خصوص فصول به‌صورت مجزا به نظر میرسد کـه الگـوی نوسانی فصل‌های دارای محدوده دمایی مشابه، شباهت بیشتری به یکدیگر دارند. در پژوهشی ملکی نژاد و همکاران [۲۱] تغییرات بارندگی و خشکسالی استان تهران را با استفاده از آزمون من-کندال و سن[9] بررسی کردند

1. Drought
2. Meteorological drought
3. Agricultural drought
4. Hydrological drought
5. Socio-economic drought

6. mann-kendall
7. Wavelet Transform
8. Discrete Wavelet Transform
9. Sen Test

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-19]

و نتایج نشان داد که در ایستگاه‌های مورد مطالعه روند خاصی در سری‌های زمانی فصلی وجود ندارد. در حالی که در سری‌های سالانه در سطح اعتماد ۹۹ درصد روند صعودی وجود دارد. قربانی و همکاران [۱۲] نیز در پژوهشی روند شاخص خشکسالی SPI[1] استان اصفهان را با آزمون‌های سن، پتیت و من-کندال طی دوره آماری ۱۹۹۰-۲۰۱۷ بررسی نمودند. مقادیر آماره آزمون پتیت، سن و من-کندال به‌ترتیب ٪۷۵، ٪۶۰، ٪۵۹ از ایستگاه‌های مورد مطالعه دارای روند معنادار کاهشی خشکسالی بودند. ابراهیمی و میراکبری [۸] هواشناسی حال و آینده محدوده تالاب جازموریان را با دو شاخص SPEI[2] و RDI[3] و مدل گردش عمومی CanESM2 مورد ارزیابی قرار دادند. طبق نتایج به دست آمده شاخص SPEI نسبت به RDI تأثیر تبخیر و افزایش دما را بر خشکسالی بهتر می‌تواند نشان دهد.

در سال‌های اخیر، فراوانی و شدت خشکسالی‌ها در حال افزایش است و این مسئله برای جامعه، اقتصاد و محیط زیست خطرات قابل‌توجهی ایجاد می‌کند. کشور ایران نیز دارای اقلیم‌های متفاوت است که با چالش‌های آبی جدی روبرو است. در مدیریت منابع آب سیاست‌گذاران می‌توانند با شناسایی روند این مؤلفه‌ها در مناطق کشور برنامه‌های بهینه‌تری برای مدیریت آب تدوین نمایند. همچنین نتایج این مطالعه می‌تواند بر ارزیابی بیشتر تغییرات اقلیمی و اثرات بر منابع آب مفید باشد. از سوی دیگر وابستگی شدید کشاورزی به تغییرات این مؤلفه‌ها و پیش‌بینی خشکسالی و کم‌آبی‌های آینده با توجه به تغییرات منابع آب سطحی و زیرزمینی را می‌توان از دیگر اهمیت‌های این پژوهش برشمرد. به دلیل وسعت بالای سطح مورد مطالعه در این پژوهش از داده‌های مدل سیستم اطلاعات جهانی سطح زمین (GLDAS)[4] با مقیاس ۲۵ کیلومتر استفاده شد. این مدل به‌طور مشترک توسط دانشمندان ناسا، مرکز پرواز فضایی گودارد[5]، سازمان ملی اقیانوسی و جوی[6] و مرکز ملی پیش‌بینی محیط زیست[7] در برخی زمینه‌ها توسعه یافته است [۱۰]. این سیستم با استفاده از چهار مدل سطح زمین CLM, Mosaic, Noah and VIC پارامترهای سطح زمین مانند رطوبت خاک و دمای سطح و شارها مانند تبخیر و شار گرمای محسوس را شبیه‌سازی می‌کند [۲۹]. هدف این پژوهش، بررسی تغییرات مؤلفه‌های هیدرواقلیمی در کشور با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GLDAS و آزمون آماری من-کندال و نیز تبدیل یک بعدی موجک در اقلیم‌ها و بزرگ آبخیزهای مختلف کشور است. در پژوهش حاضر، فرکانس نوسانات شاخص‌های خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژی و آب زیرزمینی بررسی شده‌است. بررسی همزمان روند کلی و جزئیات در تغییرات فرکانسی با روش آماری و پردازش سیگنال، پژوهش در مقیاس ملی و به تفکیک اقلیم‌ها برخلاف بررسی‌های منطقه‌ای گذشته و همچنین روند تغییرات در فرکانس داده‌های ماهواره‌ای بر خلاف داده‌های ایستگاهی در گذشته وجه تمایز این پژوهش در مقایسه با پژوهش های دیگر است.

مواد و روش‌ها

منطقه‌موردمطالعه

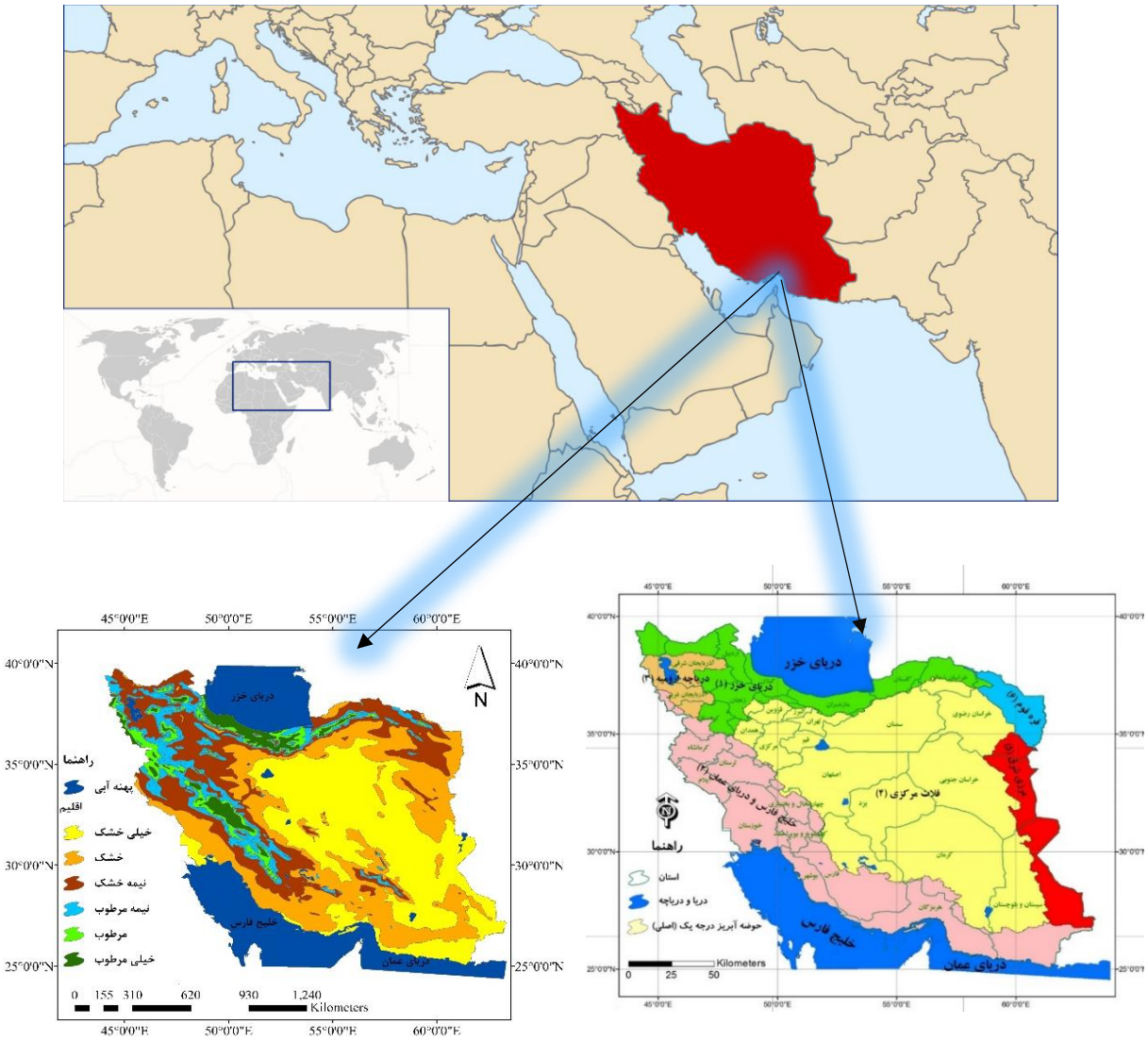
منطقه مورد مطالعه کل کشور ایران است که در مختصات جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض شمالی و ٤٤ تا ٦٣ درجه طول شرقی جای دارد و از شمال به آذربایجان، ارمنستان، ترکمنستان و دریای خزر (دریای کاسپین)، از شرق به پاکستان و افغانستان، از جنوب به خلیج فارس و دریای عمان و از غرب به ترکیه و عراق می‌رسد. کل گستره ایران، ۱/٦٤٨/۱۹۵ کیلومترمربع است که ۱۱٦/٦۰۰ کیلومترمربع آن را آب‌های این کشور تشکیل می‌دهند. نزدیک به یک سوم از مرز ۸/۳۳٤ کیلومتری آن نیز آبی است. از دیدگاه ناهمواری‌ها، ایران کشوری کوهستانی با بیابان و دشت‌هایی در میانه است. بلندترین نقطه کشور، کوه دماوند با ٥٦۲٥ متر و کم‌ترین ارتفاع از سطح آب‌های آزاد در کشور نیز مربوط به دریای خزر با منفی ۲۸ متر ثبت شده است. سرزمین ایران کوهستانی و نیمه‌خشک است و میانگین ارتفاع آن، بیش از ۱۲۰۰ متر از سطح دریا است [۳۵]. این پژوهش در شش بزرگ‌آبخیز اصلی و شش اقلیم موجود در کشور که این پهنه‌بندی اقلیمی مطابق با تقسیم‌بندی صورت گرفته در وبسایت جامع هوا و اقلیم‌شناسی ایران است (شکل ۱).

روش انجام پژوهش

برای انجام پژوهش حاضر، در ابتدا داده‌های مورد نیاز از پایگاه Google Earth Engine دانلود شد. با استفاده از داده‌های CHIRPS[8] داده‌های مربوط به بارش سالانه در یک دوره ۲۰ساله از ابتدای سال ۲۰۰۳ تا انتهای سال ۲۰۲۲ کشور اخذ شد. این تصاویر دارای قدرت تفکیک زمانی پنج روزه است. این مجموعه شامل داده‌های بارش است که برای مطالعات اقلیمی و مدیریت خشکسالی طراحی شده که بازه زمانی این داده‌ها از سال ۱۹۸۱ میلادی تاکنون است [۳٤]. علت انتخاب این داده‌ها نبود داده‌های بارش قبل از سال ۲۰۰۳ در داده‌های GLDAS است. سپس از داده‌های GLDAS داده‌های مربوط به سطح آب زیرزمینی، رطوبت خاک و جریان سطحی در همین دوره زمانی با مقیاس ۲۵ کیلومتر دریافت شد. اصلی‌ترین دلیل بررسی این مؤلفه‌ها ارتباط مستقیم آن با چرخه آب و منابع آبی کشور است. همچنین این چهار مؤلفه بیشترین کاربرد را در برنامه‌ریزی منابع آب، مدیریت خشکسالی، پیش‌بینی تغیرات اقلیمی و سیاست‌گذاری‌های مرتبط دارند. جدول (۱) مشخصات مربوط به داده‌های این مطالعه است.

1. Standardized Precipitation Index
2. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
3. Regenerative drought index
4. Global Land Data Assimilation
5. GSFC
6. NOAA
7. NCEP
8. Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-19]



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

Fig 1. Location of the study area

جدول ۱. مشخصات داده‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر

Table 1. Characteristics of the data used in this study

نوع داده data type	مقیاس مکانی Spatial scale	مقیاس زمانی Time scale	واحد unit	بیشترین Max	کمترین Min	پارامتر parameter
CHIRPS	۲۵ کیلومتر 25 KM	پنج روزه ۵ days	mm/PENTAD	1072/43	0	بارش precipitation
GLDAS	۲۵ کیلومتر 25 KM	روزانه daily	kg/m^2	9/56	0/001389	رطوبت سطحی خاک Soil surface moisture
GLDAS	۲۵ کیلومتر 25 KM	روزانه daily	$kg/m^2/s$	0/00121	-0/02737	تبخیر وتعرق Evaporation and transpiration
GLDAS	۲۵ کیلومتر 25 KM	روزانه daily	mm	3599/01	77/0153	سطح آب زیرزمینی Groundwater level

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-19]

در گام بعد با استفاده از زبان برنامه‌نویسی MATLAB داده‌های روزانه و ۵ روزه به مقیاس زمانی ماهانه تبدیل شده و در نرم‌افزار ENVI از ماه ابتدایی سال ۲۰۰۳ تا ماه انتهای سال ۲۰۲۲ روی هم‌گذاری شدند.

در این پژوهش برای بررسی روند تغییرات مؤلفه‌های هیدرواقلیمی در سطح کشور از آزمون آماری من-کندال استفاده شد. این آزمون برای شناسایی روند و عدم ایستایی میانگین در داده‌های سری‌زمانی است. تست من-کندال، تست ناپارامتریک رتبه مبنا جهت بررسی روند می‌باشد که توسط من و کندال ارائه شد [۱۹]. در این آزمون تحت فرض H_0 بیانگر آن است که هیچ روند صعودی یا نزولی در سری زمانی وجود نداشته و فرض H_1 نیز به معنای وجود روند صعودی یا نزولی در سری زمانی است. تست من-کندال به‌صورت معادله (۱) است.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^{n} \operatorname{sgn}(x_j - x_k) \qquad (۱)$$

که n نشان‌دهنده تعداد مشاهدات سری (در این پژوهش ۲۰ سال) و X_j و X_k داده‌های jام و kام سری هستند (j>k). تابع علامت یا sgn به شرح رابطه (۲) قابل محاسبه است [۹].

$$sgn\,(x) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \qquad (۲)$$

برای مقادیر n >10، S دارای واریانس V(S) بر اساس رابطه (۳) است:

$$V(S) = \frac{1}{18}\left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{k=1}^{m} t_k(t_k-1)(2t_k+5) \right] \qquad (۳)$$

که در آن t_p تعداد تکرارهای مقادیر تکراری در سری زمانی است. در مواردی‌که اندازه نمونه بزرگ‌تر از ۳۰ است، استانداردسازی علامت آماره‌ی S، مطابق با رابطه‌ی (٤)، آماره‌ی Z آزمون را فراهم می‌کند:

$$Z_S = \begin{cases} \dfrac{S-1}{\sqrt{Var\,(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \dfrac{S+1}{\sqrt{Var\,(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \qquad (٤)$$

علامت Z جهت روند را نشان می‌دهد؛ مقدار منفی Z روندی کاهشی و مقدار مثبت آن روندی افزایشی را نشان می‌دهد. زمانی‌که |ZS|>Z1-a/2، فرضیه صفر رد می‌شود و فرض مقابل (H1) یعنی وجود یک روند قابل‌ملاحظه پذیرفته خواهد شد. Z1-a/2 از جدول توزیع نرمال استاندارد به‌دست می‌آید. در سطح اطمینان ۹۵٪، اگر مقدار قدر مطلق Z بالاتر از ۱/۹٦، و در سطح اطمینان ۹۹٪ اگر |ZS|>2.576 باشد، فرضیه صفر رد می‌شود. با توجه به ناپارامتری بودن این روش نیاز نیست داده‌ها از توزیع نرمال پیروی کنند و این روش‌ها نسبت به داده‌های پرت و گم شده حساسیت کمتری دارند [۱۵].

در گام بعدی به منظور بررسی نوع و نحوه تغییرات متغیرهای هیدرواقلیمی از تبدیل موجک یک بعدی استفاده شد. موجک‌ها ابزارهای ریاضی قدرتمندی هستند که برای تجزیه و تحلیل سیگنال‌ها و سری‌های زمانی به کار می‌روند. برخلاف تبدیل فوریه که اطلاعات فرکانسی یک سیگنال را در بازه‌های زمانی نامحدود بررسی می‌کند، موجک‌ها قادرند اطلاعات فرکانسی را به صورت محلی و در بازه‌های زمانی محدود تحلیل کنند. این ویژگی موجک‌ها را به ابزار بسیار مناسبی برای بررسی سیگنال‌ها و داده‌هایی مانند سری‌های زمانی هیدرولوژیکی و اقلیمی تبدیل می‌کند. رویکرد موجک، ماتریسی را برای آشکارکردن روابط دقیق بین دو سری زمانی را در یک چارچوب ترکیبی دامنه‌ی زمان-فرکانس فراهم می‌کند. در واقع از مزایای موجک درک بهتر پویایی‌های حرکت مشترک بین متغیرها و همچنین توانـایی آن در تجزیه داده‌ها به چندین مقیاس زمانی است [۲۳].

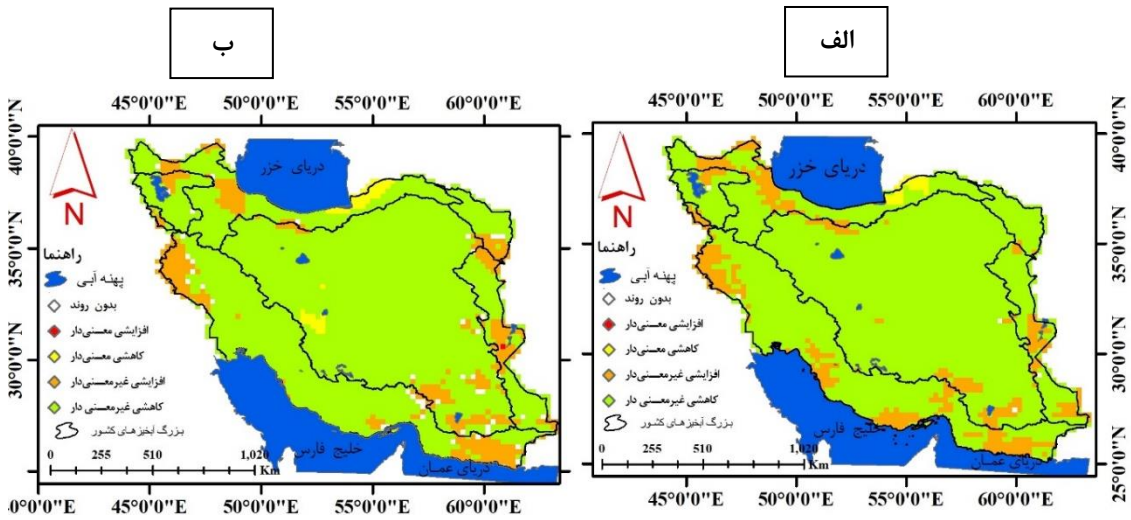
در این پژوهش از این روش برای تجزیه و تحلیل سیگنال‌های بارش، آب سطحی و آب زیرزمینی به‌منظور بررسی روندها و نوسانات در مقیاس‌های زمانی مختلف استفاده شد. این روش می‌تواند به شناسایی الگوها و روندهای کوتاه‌مدت و بلندمدت کمک کند [۳٦]. در ابتدا موجک Daubechies که بیشترین تطابق را با ویژگی‌های سیگنال داده‌های بارش دارد، به‌عنوان موجک مادر انتخاب شد. وضوح زمانی، مزیت اصلی تبدیل موجک (WT) است، زیرا به امکان تشخیص تغییرات در سیگنال‌های زمانی با وضوح بالا کمک می‌کند [۳۰]. تبدیل موجک گسسته (DWT) برای محاسبه تقریب[1] و اجزای جزئیات[2] سیگنال‌های اصلی استفاده شد. به این ترتیب از موجک‌های مادر مختلف برای تجزیه متغیرهای ورودی استفاده شد. استفاده از بهترین موجک مادر برای تجزیه سری‌های زمانی کار چالش برانگیزی است زیرا به ماهیت داده‌ها بستگی دارد. مقیاس‌ها و موقعیت‌ها در DWTها دوتایی هستند. فیلترهای بالا گذر و پایین گذر در DWT برای محاسبه مؤلفه‌های فرکانس بالا و فرکانس پایین سری‌های زمانی استفاده می شوند. DWT را می‌توان به صورت رابطه (۵) نمایش داد:

$$\Psi_{j.k}(t) = \frac{1}{\sqrt{|s^j{}_0|}}\Psi\left(\frac{t-k\tau_0 s^j{}_0}{s^j{}_0}\right) \qquad (۵)$$

که در آن j یک عدد صحیح است و k نیز یک عدد صحیح است که ترجمه را کنترل می‌کند، S_0 مرحله اتساع را نشان می‌دهد و τ_0 نشان‌دهنده ضریب ترجمه است [١٤]. همچنین ضرایب موجک برای مقیاس‌ها و جابجایی‌های مختلف محاسبه شدند. این

1. Approximation
2. Detail

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-19]



شکل ۲. روند تغییرات بارش کشور در بازه ۲۰ ساله به صورت (الف) ماهانه و (ب) سالانه

Fig 2. The trend of changes in precipitation in the country over a 20-year period (a) monthly and (b) annually

ضرایب به سیگنال اصلی اجازه می‌دهند که به اجزای با فرکانس بالا[1] (Detail) و فرکانس پایین[2] (Approximation) تجزیه شوند که در پژوهش حاضر، شاخص‌های خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژی و آب زیرزمینی ۱۲ ماهه هر اقلیم ایران، به‌وسیله موجک گسسته در ۸ سطح شکسته و مورد بررسی قرار گرفتند.

در ادامه به‌منظور تحلیل روند خشکسالی‌ها، شاخص‌های خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژی و آب زیرزمینی در این بازه زمانی محاسبه شد. خشکسالی هواشناسی با استفاده از شاخص SPI که توسط Mackee و همکاران [۲۲] ارائه‌شده است محاسبه شد. شاخص SPI بر اساس اختلاف میان مقدار بارندگی در هر ماه و میانگین بارندگی در دوره زمانی مشخص تقسیم بر انحراف معیار بارندگی محاسبه می‌شود که معمولاً از توزیع گاما استفاده می‌شود. g(X) تابع چگالی گاما، از رابطه (٦) به دست می‌آید:

$$g(X)=\frac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(a)}X^{(a-1)}e^{-x/\beta} \qquad (٦)$$

که در آن α: پارامتر شکل، β: پارامتر مقیاس، X: مقدار بارندگی و $\Gamma(a)$: تابع گاما است که به‌صورت $\Gamma(a)=\int_0^{\infty}t^{a1-e}dt$ تعریف می‌شود.

ضرایب β و α بر اساس رابطه (7) به دست می‌آید:

$$\hat{\alpha}=\frac{1}{4A}\left[1+\sqrt{1+\frac{4A}{3}}\right].\beta=\frac{x}{\hat{\alpha}} \qquad (٧)$$

که در آن، n تعداد مشاهدات بارندگی است، به علاوه $\bar{X}$ میانگین بارندگی تجمعی برای یک ماه در طول دوره آماری است [۱۸]. خشکسالی هیدرولوژی با شاخص خشکسالی جریان (SSI) و با رابطه (۸) محاسبه شد.

$$SMDI=\frac{\bar{Q}-Q_i}{s} \qquad (٨)$$

که در آن: Q_i، مقدار جریان رودخانه در دوره زمانی موردنظر، $\bar{Q}$، میانگین جریان رودخانه در یک دوره مرجع (معمولاً چندین سال)، S، انحراف معیار جریان رودخانه در دوره مرجع است که این شاخص در یک دوره نسبتاً طولانی محاسبه می‌شود [۲۵]. خشکسالی آب زیرزمینی با داده‌های ماهواره GLDAS به‌وسیله شاخص استاندارد آب زیرزمینی (SGI) و با استفاده از رابطه (۹) محاسبه شد.

$$SGI=\frac{GWS\ anomaly-\mu}{\sigma} \qquad (٩)$$

که در آن SGI نشان‌دهنده تعداد انحرافات استاندارد ناهنجاری ذخیره آب زیرزمینی از میانگین یا به‌عبارتی شاخص خشکسالی آب زیرزمینی، GWS anomaly مقدار سطح آب زیرزمینی در دوره زمانی ۲۰ ساله، μ میانگین مقادیر سطح آب زیرزمینی و σ انحراف معیار مقادیر سطح آب زیرزمینی است [۲۷].

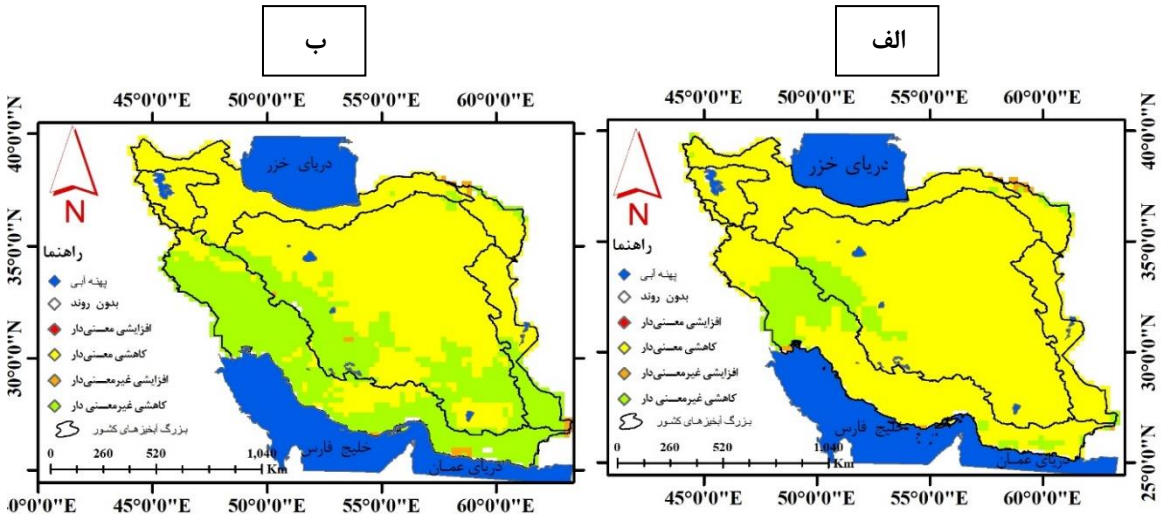
نتایج

در این پژوهش داده‌های بارش، آب سطحی، تبخیر و تعرق و سطح آب زیرزمینی تحت بررسی آزمون من-کندال برای تعیین روند ۲۰ ساله قرار گرفتند که نتایج با استفاده از نرم‌افزار Arc Map به‌صورت نقشه در آمدند که در این نقشه‌ها از پهنه‌های آبی صرف نظر شده و بدون روند درنظر گرفته می‌شوند. به‌منظور تعیین روند آزمون من-کندال مؤلفه‌های هیدرواقلیمی نقشه‌های حاصل از این آزمون به دو صورت روند کلی(سالانه) و روند ماهانه در شکل‌های (۲) تا (۵) به‌دست آمد.

نقشه تحلیل روند حاصل از آزمون من-کندال برای مؤلفه بارش در شکل (۲) نشان می‌دهد به‌جز مناطق محدود که تحت تأثیر کوهستان است و به‌صورت محلی دارای روند صعودی غیرمعنی‌دار بوده، تقریباً در تمام مناطق کشور بارش در این بازه زمانی روند

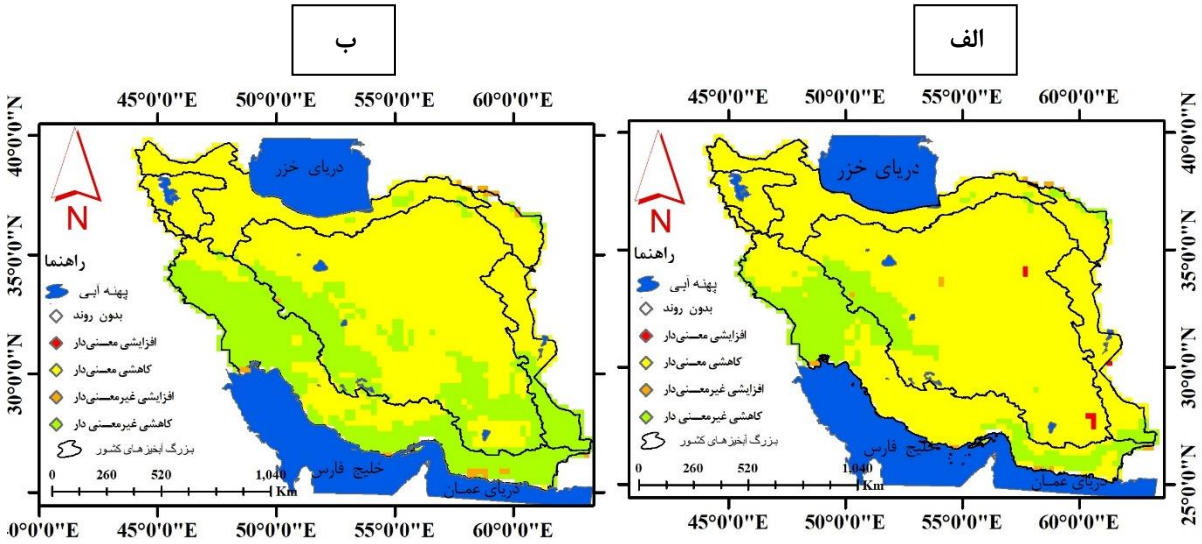
1. High-Frequency
2. Low-Frequency

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-19]



شکل ۳. روند تغییرات تبخیر و تعرق کشور در بازه ۲۰ ساله به صورت (الف) ماهانه و (ب) سالانه

Fig 3. The trend of changes in evapotranspiration in the country over a 20-year period (a) monthly and (b) annually



شکل ٤. روند تغییرات رطوبت خاک کشور در بازه ۲۰ ساله به صورت (الف) ماهانه و (ب) سالانه

Fig 4. The trend of changes in soil moisture in the country over a 20-year period (a) monthly and (b) annually.

کاهشی و غیرمعنی‌دار بوده است.

همانطور که مشاهده می‌شود روند تغییرات مؤلفه بارش در اکثر مناطق کشور روند کاهش به‌طور کاهشی و غیرمعنی‌دار بوده است. در برخی مناطق کشور که دارای ارتفاعات کوهستانی است، به‌دلیل کاهش دما نزولات بیشتر است. این موضوع می‌توان به افزایشی بودن بارش در این مناطق منجر شود.

نقشه حاصل از آزمون من-کندال مربوط به تبخیر و تعرق واقعی در شکل (۳) نشان می‌دهد روند این مؤلفه در کشور در تمامی مناطق کشور کاهشی و غالبا معنی‌دار بوده است.

این نتایج بیانگر آن است که به‌دنبال کاهشی بودن روند تغییرات بارش در سطح کشور و کاهش منابع آبی در سطح زمین تغییرات مؤلفه تبخیر و تعرق واقعی نیز به‌صورت معنی‌دار در غالب سطح کشور کاهش یافته است. اما در برخی مناطق غربی به‌دلیل نوسانات و پیچیدگی بیشتر در روند تبخیر و تعرق غالب نتایج مخصوصا به‌صورت سالانه کاهشی غیرمعنی‌دار است.

نقشه حاصل از آزمون من-کندال بر روی رطوبت خاک در شکل (٤) نشان می‌دهد مانند دو مؤلفه قبلی این روند نیز کاهشی و در اکثر مناطق کشور به‌صورت معنی‌دار است.

نتایج حاصل از تغییرات این مؤلفه نیز نشان می‌دهد به‌دنبال کاهش بارش‌ها رطوبت خاک نیز به طبع آن کاهش یافته است و این موضوع به‌عنوان اصلی‌ترین عامل در کاهش روند تغییرات رطوبت خاک است. غیرمعنی‌دار بودن این تغییرات در عمده مناطق غربی مخصوصا بزرگ آبخیز خلیج فارس و دریای عمان را می‌توان عامل وجود رودخانه‌های فصلی بیشتر و شامل بودن بیشتر این مناطق

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-19]

تحت تأثیر ارتفاعات رشته کوه زاگرس دانست.

سطح آب زیرزمینی تحت تأثیر عوامل مختلف قرار می‌گیرد. با این حال نقشه حاصل از تحلیل روند سطح آب زیرزمینی در محدوده آبخوان‌های کشور در شکل (۵) نشان می‌دهد که روند تغییرات سطح آب زیرزمینی کاهشی و در بیشتر مناطق معنی‌دار است.

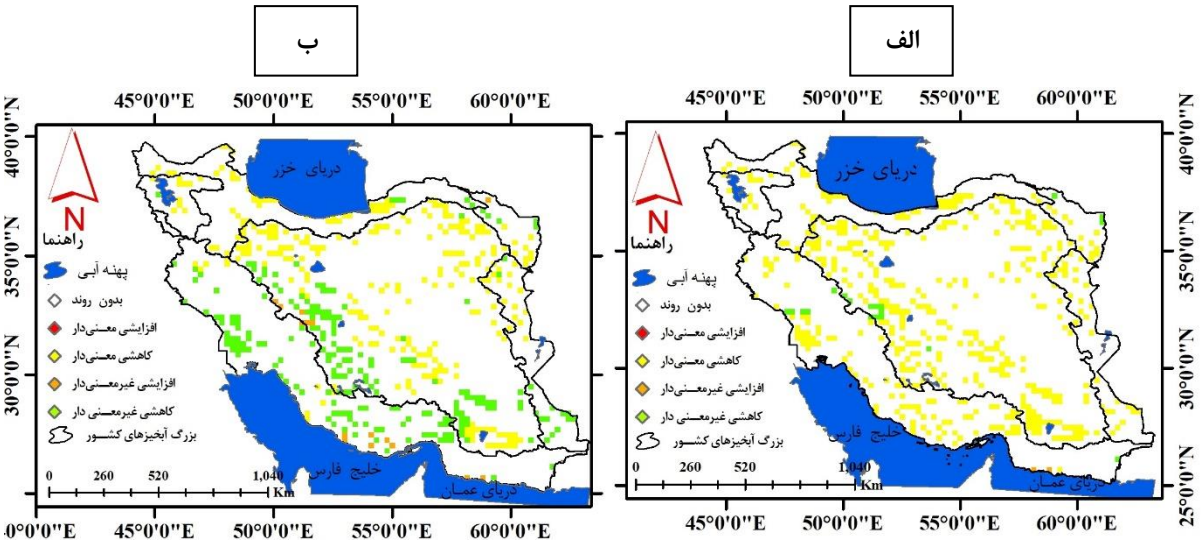
همانطور که مشاهده می‌شود این نتایج در محدوده آبخوان‌ها تهیه شده است. به‌طبع کاهش بارش و رطوبت خاک کاهشی بودن تغییرات آب زیرزمینی را نیز می‌توان طبیعی دانست. اما بدیهی است که کاهش منابع آب زیرزمینی فقط در اثر تغییرات اقلیمی خلاصه نمی‌شود و برداشت بیش از حد به‌نسبت تغذیه منابع آب زیرزمینی جهت مصارف شهری، کشاورزی، صنعت و غیره را نیز می‌توان از عوامل کاهش سطح آب زیرزمینی برشمرد.

نتایج حاصل از بررسی روند خشکسالی‌ها با تحلیل موجک در اقلیم‌های مختلف کشور در شکل‌های ٦ تا ٨ نشان داده شده است. در این نمودارها بخش اول مربوط به سیگنال اصلی یعنی شاخص‌های خشکسالی است. بخش بعدی در هر نمودار جزء Approximation را نشان می‌دهد. این جزء تغییرات کلی یا اصطلاحا تغییرات فرکانس پایین را در سیگنال اصلی نشان می‌دهد. این مؤلفه از سیگنال روند کلی موجود در آن سیگنال را فارغ از تغییرات جزئی موجود در آن نشان می‌دهد. در واقع در گام اول تجزیه، یک Approximation و یک جزء Detail از سیگنال جدا می‌شود و در سطح بعدی تجزیه Approximation حاصل مجددا به یک Approximation و یک Detail تجزیه می‌شود و این کار تا جایی که کاربر نیاز بداند می‌تواند انجام شود. در این مطالعه، تجزیه شاخص‌های خشکسالی تا ٨ سطح انجام شده است بنابراین در خصوص هر سیگنال ٨ مؤلفه Detail و یک مؤلفه Approximation حاصل شده است.

نتایج حاصل از بررسی خشکسالی هواشناسی در ٦ اقلیم ایران در شکل (٦) نشان می‌دهد که در تمام اقلیم‌ها روند فرکانس Approximation تقریبا مشابه بوده و تغییرات در تمام کشور روندی مشابه دارد. این مؤلفه نشان دهنده روند افزایشی در تمامی خشکسالی‌ها بوده است. نکته مهم این است که این مؤلفه نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر روند افزایش خشکسالی‌ها تشدید شده و همچنان ادامه دارد و احتمالا در آینده نیز این افزایش ادامه خواهد داشت. اولین مؤلفه Detail دارای بیشترین نوسان است و این نوسانات در Detailهای بعدی کمتر و کمتر میشود. تا حدی که دیگر در جزئیاتی در سیگنال وجود نداشته باشد که این مؤلفه به خط نسبتا صاف تبدیل می‌شود. هرچه این صاف شدن در Detailهای ابتدایی‌تر انجام شود نشان می‌دهد که جزییات کمتری در سیگنال اصلی وجود داشته است و سیگنال ساده‌تری است.

نتایج تحلیل موجک بر روی شاخص خشکسالی هواشناسی بیانگر پیچیدگی و نوسان بیشتر مؤلفه فرکانس بالا در اقلیم‌های با ساختار هیدرولوژی پیچیده‌تر است. به‌طوری که در Detail شماره ۵ در اقلیم‌های خشک روند تقریبا صاف و جزئیات کمتری در فرکانس وجود دارد ولی در اقلیم‌های مرطوب همچنان جزئیاتی برای نمایش وجود دارد. این امر نشان دهنده پیچیدگی بیشتر این اقلیم‌ها است. نتایج حاصل از بررسی خشکسالی هیدرولوژی در ٦ اقلیم ایران در شکل (٧) نیز نشان می‌دهد که در تمام اقلیم‌ها روند فرکانس Approximation تقریبا مشابه بوده و تغییرات در تمام کشور روندی مشابه دارد.

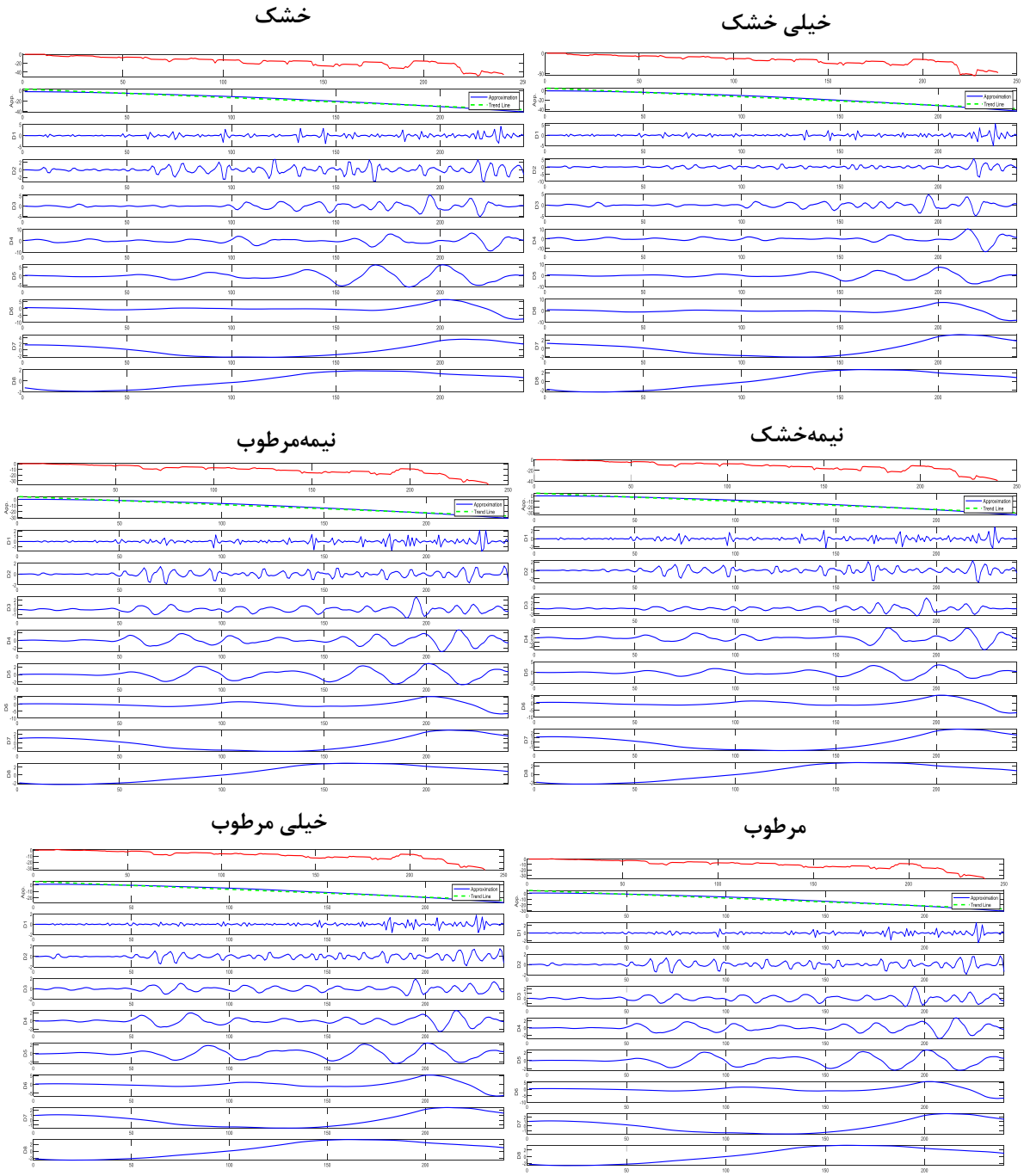
این نتایج نیز همانند خشکسالی هواشناسی در اقلیم‌های مرطوب دارای جزئیات بیشتری نسبت به اقلیم‌های کم‌باران است. با این تفاوت که در بخش آب‌های سطحی نوسانات فرکانس پایین به



شکل ۵. روند تغییرات آب زیرزمینی کشور در بازه ۲۰ ساله به صورت (الف) ماهانه و (ب) سالانه

Fig 5. The trend of changes in the country's groundwater over a 20-year period (a) monthly and (b) annually.

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-19]

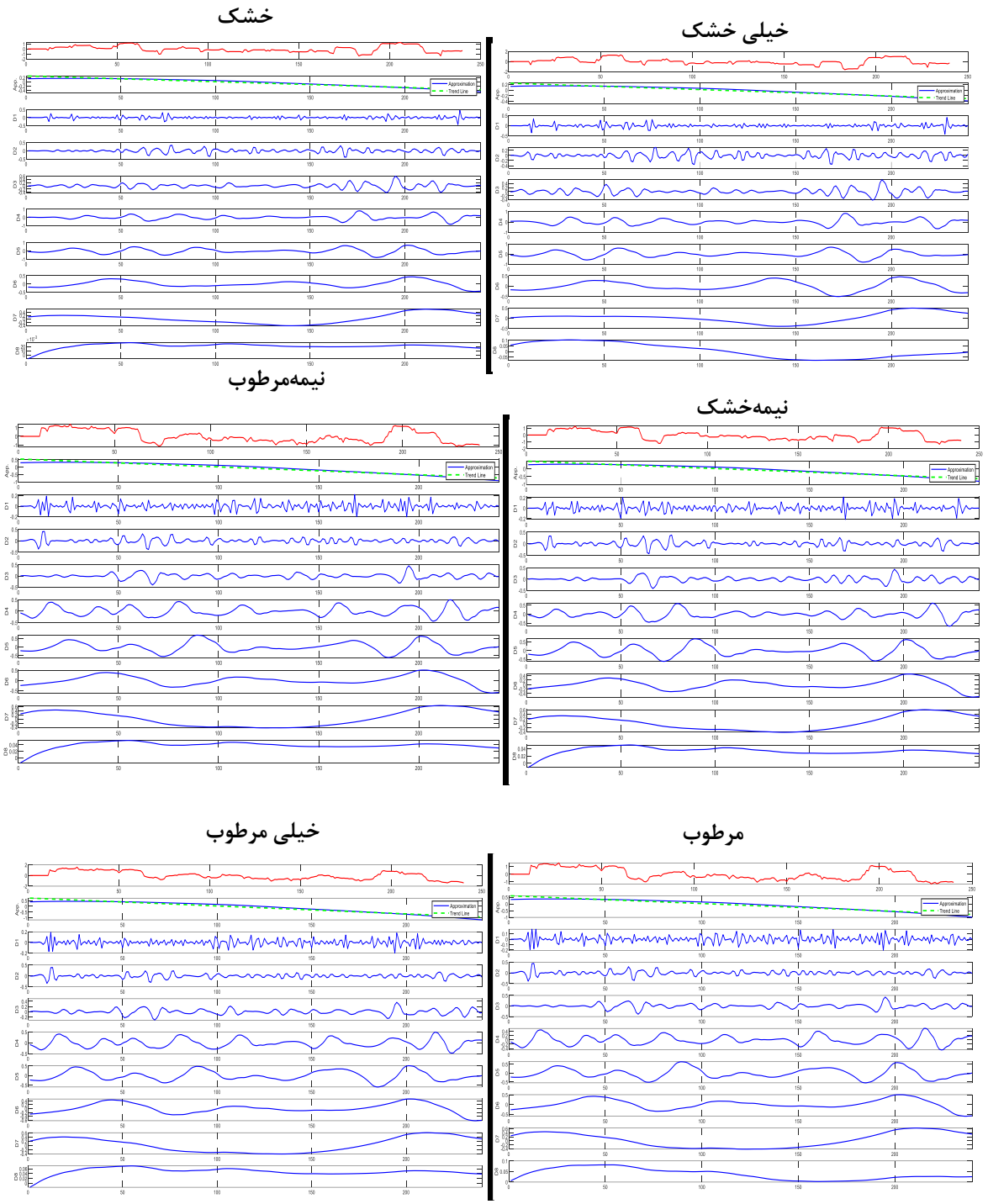


شکل ٦. نتایج روند خشکسالی هواشناسی در اقلیم‌های ایران

Fig 6. Results of meteorological drought trends in Iranian climates

نسبت شاخص SPI بسیار زیاد است. به‌طوری که در Detail شماره ٦ نیز هنوز دارای جزئیاتی برای ارائه است. وجود نوسانات در Detail ششم شاخص‌های خشکسالی هیدرولوژیک نشان می‌دهد که هنوز اطلاعات قابل‌توجه یا نوسانات با بسامد بالا در داده‌های رواناب سطحی حتی در مقیاس‌های زمانی نسبتاً بالا وجود دارد. رواناب سطحی تحت تأثیر عوامل متعددی مانند بارش، رطوبت خاک، کاربری زمین و توپوگرافی قرار می گیرد که می تواند دینامیک و تنوع پیچیده‌ای را به وجود آورد. این عوامل ممکن است باعث شوند که شاخص خشکسالی هیدرولوژیک نوسانات پایداری را حتی در سطوح عمیق‌تر تجزیه نشان دهند. این امر نشان می‌دهد که شاخص‌های خشکسالی هیدرولوژیک به فرآیندهای هیدرولوژیکی کوتاه‌مدت حساس هستند که حتی در مقیاس‌های زمانی بزرگ‌تر

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-19]



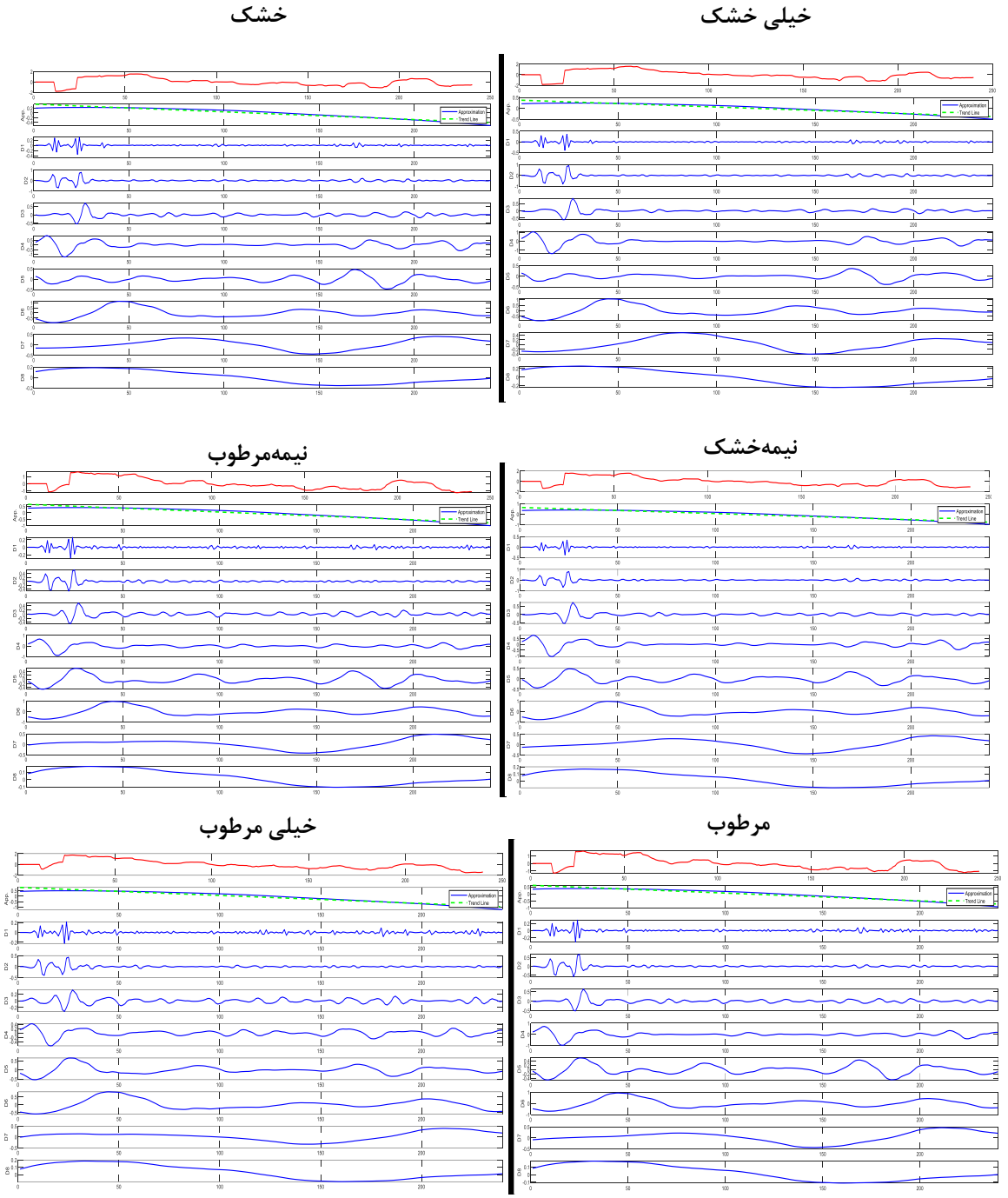
شکل ۷. نتایج روند خشکسالی هیدرولوژی در اقلیم‌های ایران

Fig 7. Results of the hydrological drought trend in Iranian climates

به‌طور کامل هموار نمی‌شوند. نتایج حاصل از بررسی خشکسالی آب زیرزمینی در ٦ اقلیم ایران در شکل (۸) نیز نشان می‌دهد که در تمام اقلیم‌ها روند فرکانس Approximation تقریبا مشابه بوده و تغییرات در تمام کشور روندی مشابه دارد.

نتایج حاصل از تحلیل موجک بر روی شاخص خشکسالی آب زیرزمینی نشان می‌دهد که این شاخص در مقایسه با سایر خشکسالی‌ها از نوسانات بسیار کمی برخوردار است. سیستم‌های آب زیرزمینی معمولاً به دلیل تأثیر بافری سفره‌های زیرزمینی به تغییرات بارندگی و فرآیندهای هیدرولوژیکی سطحی به کندی پاسخ می‌دهند. این بدان معناست که سطوح آب زیرزمینی در مقایسه با سیستم‌های هیدرولوژیکی سطحی (مانند جریان، رطوبت خاک یا رواناب سطحی) کمتر و با دامنه کمتری نوسان دارند. این واقعیت

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-19]



شکل ۸. نتایج روند خشکسالی آب زیرزمینی در اقلیم‌های ایران

Fig 8. Results of groundwater drought trends in Iranian climates

که شاخص‌های خشکسالی آب‌های زیرزمینی کمترین نوسان را در اجزای Detail نشان می‌دهند و زودتر در تجزیه موجک صاف می‌شوند، نشان می‌دهد که خشکسالی آب زیرزمینی تحت تأثیر تغییرپذیری فرکانس پایین (روندهای بلندمدت) است و کمتر تحت تأثیر فرکانس بالا (کوتاه) قرار می‌گیرد. این رفتار با ماهیت فیزیکی سیستم‌های آب زیرزمینی، که بارش و تغذیه مجدد را در مقیاس‌های زمانی طولانی‌تر ادغام می‌کنند، همسو و تنوع کوتاه‌مدت را کمتر می‌کند. شاخص‌های خشکسالی هیدرولوژیکی (به عنوان مثال، بر اساس جریان، ذخیره مخزن، یا رواناب سطحی) تحت تأثیر بارش و سایر عوامل مانند تبخیر، کاربری زمین و ویژگی‌های خاک قرار دارند. این شاخص‌ها معمولاً تنوع بیشتری نسبت به شاخص‌های خشکسالی آب‌های زیرزمینی نشان می‌دهند، زیرا به تغییرات آب و هوایی سریع‌تر پاسخ می‌دهند. SPI، که صرفا بر اساس بارش است، معمولا رفتار متوسط بین شاخص‌های خشکسالی آب زیرزمینی

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-19]

و هیدرولوژیکی را نشان می‌دهد. اگر مؤلفه‌های Detail در SPI نوسانات بیشتری نسبت به شاخص خشکسالی آب‌های زیرزمینی اما کمتر از شاخص‌های خشکسالی هیدرولوژیکی نشان دهند، این نشان‌دهنده نقش آن به عنوان یک شاخص مبتنی بر بارش است که به تغییرات کوتاه‌مدت و بلندمدت حساس است. مسطح شدن اولیه اجزای Detail در شاخص‌های خشکسالی آب‌های زیرزمینی نشان می‌دهد که این شاخص‌ها برای تحلیل شرایط خشکسالی طولانی‌مدت مناسب‌تر هستند. این شاخص نسبت به نوسانات کوتاه مدت حساسیت کمتری دارند و بیشتر منعکس‌کننده کسری‌های پایدار در تغذیه مجدد طی ماه‌ها تا سال‌ها هستند. وجود نوسانات بیشتر در اجزای جزییات شاخص‌های خشکسالی هیدرولوژیکی نشان می‌دهد که این شاخص‌ها برای ثبت شرایط خشکسالی کوتاه‌مدت و بلندمدت مفید هستند. رفتار میانی SPI آن را به ابزاری همه کاره برای پایش خشکسالی هواشناسی در مقیاس‌های زمانی متعدد تبدیل می‌کند. با این حال، ممکن است اثرات تأخیری خشکسالی بر آب‌های زیرزمینی یا واکنش‌های سریع سیستم‌های هیدرولوژیکی سطحی را به‌طور کامل نشان ندهد. هنگام تجزیه و تحلیل خشکسالی با استفاده از این شاخص‌ها، در نظر گرفتن رفتار مقیاس زمانی آن‌ها مهم است. تفاوت در الگوهای نوسان، ماهیت مکمل این شاخص‌ها را برجسته می‌کند. ترکیب SPI، شاخص‌های خشکسالی هیدرولوژیکی، و شاخص‌های خشکسالی آب‌های زیرزمینی می‌تواند درک جامع‌تری از دینامیک خشکسالی در اجزای مختلف چرخه آب ارائه دهد.

بحث و نتیجه‌گیری

از آنجا که اقلیم کشور ما تحت تأثیر پرفشار جنب حاره است که یک سیستم فشاری دینامیک است، لذا سیستم‌های پرفشار دینامیک چون مرکز هوای گرم هستند با وقوع پدیده گرمایش جهانی این سیستم‌های فشاری هم از نظر شدت و هم از نظر وسعت تقویت می‌شوند. نتیجه این گسترش سطحی و افزایش شدت، موجب کاهش بارش در نواحی تحت تأثیر این‌گونه سیستم‌ها می‌شود. دلیل این موضوع آن است که سیستم‌های پرفشار دینامیک با جریانات نزولی همراه هستند بنابراین نه‌تنها پدیده ابرناکی و بارش را به‌همراه ندارند بلکه باعث کاهش بارش و افزایش شدت تبخیر و تعرق در سطح زمین می‌شود. گرچه گرمایش جهانی باعث افزایش دمای هوا در کشور ایران نیز شده است با توجه به این موضوع انتظار می‌رود تبخیر و تعرق رو به افزایش باشد اما این موضوع مربوط به تبخیر و تعرق پتانسیل است و لذا در ایران با توجه روند کاهشی بارش‌ها در بازه ۲۰ ساله، کاهشی و معنی‌دار بودن روند سایر مؤلفه‌های هیدرواقلیمی از جمله تبخیر و تعرق واقعی که مربوط به تبخیر آب موجود در سطح زمین است نیز امری طبیعی است. درمورد سطح آب زیرزمینی واضح است که عوامل بسیار زیادی از جمله برداشت بیش از حد مجاز، احداث چاه‌های غیرقانونی، استفاده از منابع آب زیرزمینی در صنایع پرمصرف مناطق کم بارش و ... منجر به کاهشی بودن روند در بازه ۲۰ ساله بوده است. اما بدیهی است کاهش بارش‌ها در این دوره زمانی اصلی‌ترین دلیل برای این موضوع است.

به‌طور کلی نتایج نشان می‌دهد اصلی‌ترین و مهم‌ترین مؤلفه هیدرواقلیمی که ابتدایی‌ترین تأثیر را بر سایر مؤلفه‌ها می‌گذارد بارش یا خشکسالی هواشناسی است که از آن می‌توان به‌عنوان نقطه شروع سایر خشکسالی‌ها نام برد. این نتایج با مطالعات ابراهیمی خوسفی و همکاران، [۹] و احمدی و رستمی، [۳] همخوانی دارد.

نتایج حاصل از بررسی روند شاخص‌های خشکسالی با استفاده از موجک گسسته نشان داد در شاخص SPI و SSI نوسانات در اقلیم‌های مرطوب به مراتب بیشتر از اقلیم‌های با خصوصیات خشک است. به عبارتی در اقلیم‌های با خصوصیات خشک و کم‌بارش، جزئیات کمتری در روند این شاخص‌ها مشاهده می‌شود که از مهمترین دلایل آن می‌توان به تنوع بارندگی، منابع آبی بیشتر و پیچیدگی ساختار هیدرولوژی در مناطق مرطوب اشاره نمود. همچنین در مناطق خشک، منابع آب کمتر و تغییرات در آن محدودتر است؛ لذا در سطوح بالاتر (جزئیات دقیق‌تر) تفاوت‌ها و نوسانات کمتری مشاهده می‌شود. همچنین تغییرات در سطح آب زیرزمینی در بازه زمانی موجود در پژوهش حاضر در مقایسه با سایر شاخص‌ها بسیار کمتر بوده است که به طبع آن این شاخص جزئیات بسیار کمتری در فرکانس‌های بالا و پایین روند آن مشاهده گردید؛ چراکه سفره‌های آب زیرزمینی با تأخیر زیادی به بارندگی یا خشکسالی واکنش نشان داده و معمولاً این شاخص در مقایسه با سایر شاخص‌های خشکسالی در دوره‌های زمانی طولانی‌تر و تغییرات تدریجی مدیریت می‌شوند و از پایداری قابل‌توجهی در تمام اقلیم‌ها برخوردار هستند. به‌طور کلی نیز به‌دلیل آن‌که خشکسالی به‌عنوان یک پدیده بزرگ‌مقیاس روند مشابهی در اقلیم‌های مختلف دارد و در پژوهش حاضر از ریزاقلیم‌های موجود در مناطق مختلف ایران چشم‌پوشی شده است، فرکانس پایین (Approximation) روند مشابه و کاهشی را در هرسه شاخص و همه گستره کشور کشور نشان می‌دهد. اما در شاخص SPI جزئیات به‌نسبت بیشتری در اقلیم‌های مرطوب مشاهده شد. وجود مناطق مرتفع، کم‌بودن میانگین دما، وجود توده‌های باران‌زا و همچنین تعداد روزهای بارندگی بیشتر در سال در مقایسه با مناطق خشک را می‌توان از دلایل نوسان و جزئیات بیشتر در فرکانس‌های بالای مناطق مرطوب دانست. در مبحث خشکسالی هیدرولوژی که مختص به آب‌های سطحی کشور است نوسانات بسیار زیاد جزئیات حتی در سطوح بالا طبیعی و قابل انتظار است. از مهم‌ترین عوامل این نتایج می‌توان به وابستگی شدید منابع آب سطحی در اکثر مناطق کشور به بارندگی اشاره کرد؛ زیرا آب‌های سطحی به‌دلیل فصلی بودن در بیشتر مناطق کشور مستقیماً تحت تأثیر بارش‌ها قرار داشته و تغییرات کوچک در بارندگی نوسانات زیاد را در این منابع ایجاد می‌کند. همچنین تأثیرپذیری بسیار زیاد منابع آب سطحی از رویدادهای کوتاه‌مدت مانند سیلاب‌ها، بارش‌های شدید یا خشکسالی‌های موقت هم می‌تواند

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-19]

به سرعت روی آب‌های سطحی تأثیر گذار باشد. بنابراین می‌توان اذعان داشت که منابع آب سطحی با توجه به طبیعت پویا پاسخ سریع‌تری به تغییرات اقلیمی داشته و از این‌رو وابستگی بیشتری به ویژگی‌های اقلیمی منطقه دارند. نتایج این پژوهش می‌تواند در شناسایی مناطق بحرانی که در معرض بیشتر کاهش بارش، افزایش تبخیر و تعرق، افت آب زیرزمینی و نوسانات آب‌های سطحی هستند مؤثر باشد. نتایج به‌دست آمده تصویری روشن را در مدیریت منابع آب، مدیریت ریسک خشکسالی و سیل، برنامه‌ریزی بلندمدت کشاورزی و همچنین آمایش سرزمین در اختیار مدیران قرار می‌دهد. استفاده از داده‌های ماهواره‌ای با وجود دقت کمتر نسبت به داده‌های مشاهداتی، با توجه عدم دسترسی به داده‌های زمینی و همچنین پراکنش کم ایستگاه‌های زمینی در مقیاس ملی صورت پذیرفت. اما به‌طور کلی بررسی روند مؤلفه‌های هیدرواقلیمی در مقیاس پایین با داده‌های زمینی نتایج با جزئیات بیشتری را ارائه خواهد داد که این نتایج به‌طبع برای مدیریت در مقیاس منطقه‌ای مناسب‌تر است.

سپاسگزاری

این پژوهش در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول مقاله و تحت حمایت مالی دانشگاه تربیت مدرس است. همچنین بدین وسیله نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی را از دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی تربیت مدرس پردیس نور بیان می‌دارند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این پژوهش اعلام می‌دارند که هیچگونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه و درخواست معقول با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

علی نوری: دریافت و پیش‌پردازش داده‌ها، انجام محاسبات، نگارش، تدوین و تنظیم مقاله

وحید موسوی: ایده تحقیق، راهنمایی و نظارت بر روند پژوهش، کنترل نتایج، تجزیه و تحلیل، ویرایش و بازبینی مقاله

حمیدرضا مرادی رکابدارکلائی: راهنمایی بر روند پژوهش، ویرایش و بازبینی مقاله

منابع مورد استفاده

1. Abatzoglou, J. T., McEvoy, D. J., & Redmond, K. T. (2017). The west wide drought tracker: drought monitoring at fine spatial scales. Bulletin of the American Meteorological Society, 98(9), 1815-1820. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0193.1

2. Abdollahi, S., Khalilianpour, M., & Rizi-Dehkardi, J. (2017). Application of discrete wavelet analysis for trend analysis of rainfall in Tabriz station, 16th Iranian Hydraulic Conference, Ardabil. https://civilica.com/doc/727328/ (In Persian)

3. Ahmadi, M., & Rostami, A. (2019). Investigating the trend of changes in hydroclimatic elements using the Mann-Kendall test (Case study: Urmia Lake Basin). Watershed Sciences and Engineering, 22(3), 145-157. (In Persian) https://civilica.com/doc/589774

4. Al-Bouali, A., Ghazavari, R., & Sadat-Najad, S. (2022). Investigating the effects of drought on groundwater resources using the SPI index (Case study: Kashan Plain). Desert Ecosystem Engineering, 5(10), 13-22. https://civilica.com/doc/589774/ (In Persian)

5. Bagbanan, P., Ahmadabadi, A., & Karimi, A. (2021). Investigating the impact of climate change on the hydrological changes of the Hablehroud watershed. Climate Change Research, 2(5), 27-40. https://doi.org/10.30488/ccr.2020.251868.1025 (In Persian)

6. Bagherpour, M., Sidian, M., Fath-Abadi, A., & Mohammadi, A. (2017). Investigating the effectiveness of the Mann-Kendall test in identifying trends in autocorrelated time series. Iranian Journal of Watershed Sciences and Engineering, 11(36), 11-21. http://jwmsei.ir/article-1-532-fa.html (In Persian)

7. Bayat, M. (2020). Analysis and simulation of noise removal using wavelet transform for defect detection in materials. Law Enforcement Information and Communication Technology Journal, 1(3), 35-45. SID. https://sid.ir/paper/408395/fa (In Persian)

8. Ebrahimi-Khoshfi, Z., & Mirakbari, M. (2019). Evaluating the impact of climate change on the drought of Jazmourian Wetland using the CanESM2 model. Desert Management, 7(14), 149-166. SID. https://sid.ir/paper/252809/fa (In Persian)

9. Ebrahimi-Khoshfi, Z., Mirakbari, M., Ebrahimi-Khoshfi, M., & Soleimani-Sardo, M. (2022). Evaluating temporal changes in drought using the Mann-Kendall test and Sen's slope in Kerman province from 1990 to 2018. Desert Ecosystem Engineering, 11(36), 1-16. 10.22052/deej.2023.248210.0 (In Persian)

10. Faraji, Z., Kaviani, A., & Shakiba, A. (2017). Evaluation of evapotranspiration, precipitation, and temperature data obtained from the GLDAS land surface model using observational data in Qazvin province. Water and Soil Conservation Research Journal, 24(3), 283-297. https://doi.org/10.22069/jwfst.2017.11535.2630 (In Persian)

11. Fattore, C., Abate, N., Faridani, F., Masini, N., Lasaponara, R. 2021. Google earth engine as multi-sensor open-source tool for supporting the preservation of archaeological areas: the case study of flood and fire mapping in Metaponto, Italy. Sensors, 21(5), 1791. https://doi.org/10.3390/s21051791

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-19]

12. Ghorbani, H., Vali, A., & Zarei Pour, H. (2019). Trend analysis of meteorological drought using the Mann-Kendall, Sen, and Pettitt tests in Isfahan province. Spatial Analysis of Environmental Hazards, 6(2), 129-146. http://dx.doi.org/10.29252/jsaeh.6.2.129 (In Persian)

13. Guo, Y., Huang, S., Huang, Q., Wang, H., Fang, W., Yang, Y., Wang, L. (2019a). Assessing socioeconomic drought based on an improved Multivariate Standardized Reliability and Resilience Index. Journal of Hydrology, 568, 904-918. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.055

14. Haghighi, E., & Salimi, L. (2021). Color image cryptography based on discrete wavelet transform and optimized alpha blending technique. Wavelet and Linear Algebra, 7(3) (Special Issue), 51-78. 10.22072/wala.2020.115961.1254 (In Persian)

15. Hamed, K. H. (2008). Trend detection in hydrologic data: The Mann–Kendall trend test under the scaling hypothesis. Journal of hydrology, 349(3-4), 350-363. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.009

16. Heydari, S., Karimi, M., Azizi, Q., & Shamsipour, A. (2024). Spatial clusters and trend changes in regions with co-occurring drought in Iran. Natural Geography Research, 56(1), 83-101. doi: 10.22059/jphgr.2024.374275.1007820. (In Persian)

17. Iraqi, A., Mousavi-Baygi, M., & Hashemi-Nia, S. M. (2015). Using discrete wavelet transform to analyze the trend and identify oscillation patterns in temperature (Case study: Mashhad synoptic station). Water and Soil, 29(1), 239-249. doi: 10.22067/jsw.v0i0.28602 (In Persian)

18. Jahanshahi, E., Moghadam-Nia, A., & Nahtani, M. (2016). Evaluating the effect of drought on groundwater resources using the SPI index (Case study: Shahre Babak Plain, Kerman Province). Desert Ecosystem Engineering, 5(10), 85-98. https://doi.org/10.22034/hydro.2021.11068 (In Persian)

19. Kendall, M. G. (1948). Rank correlation methods. ‘‘‘‘ Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. Econometrica: Journal of the econometric society, 245-259. https://doi.org/10.4236/ojg.2017.75045

20. Lee, J. H., Kwon, H. H., Jang, H. W., Kim, T. W. (2016). Future changes in drought characteristics under extreme climate change over South Korea. Advances in Meteorology, 2016, 1-19. https://doi.org/10.1155/2016/9164265

21. Maleki Nejad, H., Soleimani Motlagh, M., Jaidari, E., & Shater-Abshori, S. (2012). Analyzing trends of rainfall and drought changes using Mann-Kendall and Sen tests in Tehran province. Niwar Journal, 37(81-80), 43-54. (In Persian)

22. McKee, T.B., Doesken, N.J. & Kleist, J. (1995). Drought Monitoring with Multiple Time Scales. In Proc, 9th Conf. on Applied Climatology, January 15- 20, American Meteorological Society, Massachusetts, Pp. 233-236. https://doi.org/10.4236/ojer.2025.142006

23. Moshiri, S., Pakizeh, K., Dabiriyan, M., & Jafari, E. (2010). Investigating the relationship between stock returns and inflation using wavelet analysis in Tehran Stock Exchange. Iranian Economic Research, 13(42), 55-74. (In Persian)

24. Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). Drought modeling—A review. Journal of hydrology, 403(1-2), 157-175. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.03.049

25. Mortezaei Farizahandi, Q., Lotfi Maghanjoghi, J., Khaliqi Sigaroudi, S., Mohseni Saravi, M., & Nazari Samani, A. A. (2020). Analysis and review of hydrological drought indices in Kurdistan province. Watershed Engineering and Management Journal, 12(2), 441-453. 1004-SCWMO (R4) (In Persian)

26. Mousavi, A., Soleimani, K., Shokrian, F., & Roshan, S. (2020). Investigating the spatial and temporal trends of groundwater quality parameters using geostatistical methods (Case study: Lordegan Plain, Chaharmahal and Bakhtiari province). Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering Research, 3(10), 275-262. https://doi.org/10.22125/iwe.2020.107108 (In Persian)

27. Nazari Tehrudi, M., Ramazani, Y., & Ahmadi, F. (2020). Hydrogeological drought management based on the multi-variable HDMI index. Environmental and Water Engineering Journal, 6(4), 473-484. https://doi.org/10.22034/jewe.2020.242609.1401 (In Persian)

28. Peters, E., Bier, G., Van Lanen, H.A. and Torfs, P.J., 2006. Propagation and spatial distribution of drought in a groundwater catchment. Journal of Hydrology, 321(1-4), pp.257-275. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.08.004

29. Rodell, M., Houser, P.R., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C.J., Arsenault, K., Cosgrove, B., Radakovich, J., Bosilovich, M., Entin, J.K., Walker, J.P., Lohmann, D., and Toll, D. 2004. The Global Land Data Assimilation System. Bulletin of the American Meteorological Society. 85: 3. 381-394. https://doi.org/10.1175/BAMS-85-3-381

30. Roushangar, K., Nourani, V., & Alizadeh, F. (2018). A multiscale time-space approach to analyze and categorize the precipitation fluctuation based on the wavelet transform and information theory concept. Hydrology Research, 49(3), 724-743. https://doi.org/10.2166/nh.2018.143

31. Salahi-Moghaddam, A., Khoshdel, A., Habibi-Nokhandan,

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-19]

M., & Sedaghat, M. (2012). Medical climatology of iran. J Army Uni Med Sci, 2, 49-56. https://www.researchgate.net/publication/257602975_Medical_Climatology_of_Iran_In_Persian

32. Sari Saraf, B., Mahmoudi, S., Zangeneh, S., & Pashaei, Z. (2015). Monitoring and predicting wet and dry spells in Tabriz using the CLIMGEN model and the SPI index. Hydrogeomorphology, 2(2), 61-78. (In Persian)

33. Savari, M., Eskandari Damaneh, H. & Eskandari Damaneh, H. (2022). Drought vulnerability assessment: Solution for risk alleviation and drought management among Iranian farmers. International Journal of Disaster Risk Reduction, 67, 10265. DOI: 10.22092/ijwmse.2020.341878.1772

34. Tabatabaei, M., Salehpour Jam, A., & Mosaffaie, J. (2023). Suspended sediment simulation using machine learning algorithms and CHIRPS satellite precipitation data with emphasis on data clustering and gamma test, case study: Ramyan Watershed, Golestan Province. Watershed Engineering and Management, 15(3), 328-350. https://doi.org/10.22092/ijwmse.2022.358396.1972

35. Teymouri, F. and Bazrafshan, A. (2017). Analysis of the temporal distribution of precipitation in Iran during the past four decades. Journal of Geography and Development, 15(48), 171-188. https://doi.org/10.22111/gdij.2017.3367 (in Persian)

36. Torrence, C., & Compo, G. P. (1998). A practical guide to wavelet analysis. Bulletin of the American Meteorological society, 79(1), 61-78. https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079%3C0061:APGTWA%3E2.0.CO;2

37. Van Loon, A. F. (2013). On the propagation of drought. Wageningen University. https://doi.org/10.18174/249786

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-19]