

Investigating the relationship between hydrological drought indices and Chah-Nimeh reservoir storage using remote sensing data

Hadi Siasar^{*1}, Omolbani Mohammadrezapour² and Mohammad.Javad. Zeynali³

Extended Abstract

Introduction:

Surface water reservoirs are among the most critical infrastructures for water supply, particularly in arid and semi-arid regions where water security is increasingly threatened by climate variability, prolonged drought, and intensified human pressure. In such environments, monitoring reservoir storage dynamics is essential for understanding hydrological drought and for supporting sustainable water resources management. The Chah-Nimeh reservoir system, located in the Sistan region of southeastern Iran, is a vital source of drinking and agricultural water. However, this system has experienced substantial storage decline in recent years, raising serious concerns about regional water security and environmental sustainability. Because Chah-Nimeh is strongly dependent on inflow from the transboundary Helmand River, its hydrological regime is influenced not only by local climatic conditions but also by upstream water regulation and cross-border management. Recent developments in remote sensing and cloud-based geospatial analysis have greatly improved the capacity to monitor reservoir surface area and storage variations with high temporal and spatial resolution. Therefore, this study aimed to investigate the temporal dynamics of reservoir storage and hydrological drought in the Chah-Nimeh reservoir during 2017-2025 using Sentinel-2 imagery and multi-source climatic datasets within the Google Earth Engine platform. It also examined the extent to which local climatic indicators explain the observed storage variations.

Materials and Methods:

This study was designed to evaluate the temporal dynamics of water storage and hydrological drought in the Chah-Nimeh reservoir using an integrated remote sensing and multi-source climate data framework. All analyses were conducted in the Google Earth Engine (GEE) cloud-computing platform, which enabled efficient processing of long-term geospatial datasets. Four main data sources were employed based on their open accessibility, scientific reliability, and appropriate spatial and temporal resolution. Sentinel-2 Level-2A imagery was used as the primary optical dataset for water surface extraction. A total of 345 atmospherically corrected images acquired between March 2017 and December 2025 were processed. Cloud and cloud-shadow contamination were removed using the Scene Classification Layer (SCL), and only images with less than 15% cloud cover were retained. Monthly composites were then generated using the median spectral values, yielding 83 valid monthly observations. To delineate the water body, three spectral water indices, namely NDWI, MNDWI, and AWEI, were calculated for each monthly composite. The use of multiple indices allowed both robust water detection and uncertainty estimation in the derived surface area. Reservoir volume was subsequently estimated from the extracted water surface area using the stage-area-storage relationship of the reservoir. A second-order polynomial regression was fitted between water surface area and storage volume, providing a reliable basis for monthly volume estimation. Water level was also derived through inverse interpolation from the stage-area curve. To assess climatic conditions, CHIRPS daily precipitation data, ERA5-Land monthly temperature and potential evapotranspiration data, and TerraClimate monthly products were incorporated. These datasets were used to compute climatic and hydrological indicators, including SPI, SPEI, PDSI, SRI, SSI, and SWLI. Among them, SWLI, derived directly from reservoir storage anomalies, was considered the principal indicator of hydrological drought, whereas SPI, SPEI, and PDSI were used only for comparative interpretation. The reliability of CHIRPS and ERA5-Land was evaluated against observations

1- Assistant Professor of Department of Agricultural, Payame Noor University, Tehran, Iran.

2- Associate Professor of Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran.

3- Assistant Professor of Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Torbat Heydarieh, Iran.

* Corresponding Author: hadisiasar@pnu.ac.ir

Received: 2026/02/11

Accepted: 2026/04/26

from the Zabol meteorological station using correlation coefficient, coefficient of determination, bias, and normalized root mean square error. Trend analysis was performed using the non-parametric Mann-Kendall test and Sen's slope estimator. Pearson correlation, coefficient of determination, normalized root mean square error, and mean absolute error were applied to examine the relationships between climatic variables and reservoir storage. In addition, lag-time analysis was conducted to identify the temporal response of reservoir storage to precipitation variability.

Results and Discussions:

The results revealed a pronounced decline in the storage status of the Chah-Nimeh reservoir during the study period, confirming the occurrence of significant hydrological stress. Analysis of the monthly time series showed that both reservoir volume and water surface area followed a statistically significant downward trend. Reservoir storage decreased at an average rate of 5.38 million m³ per year, while water surface area declined by 0.63 km² per year, indicating a persistent reduction in the effective capacity of the reservoir. These findings demonstrate that the reservoir experienced not merely short-term fluctuations, but a sustained long-term depletion trend. The temporal pattern of storage dynamics further showed that the reservoir passed through several distinct phases. A relatively stable and wetter phase was observed during 2019-2020, followed by a gradual decline during 2021-2022, and then a severe depletion phase extending through 2023 to early 2024. The lowest storage value was recorded in February 2024, when reservoir volume dropped to approximately 26.27 million m³, representing the most critical hydrological condition during the study period. In contrast, a sharp recovery occurred in May 2024, when storage increased abruptly from 36.56 to 99.05 million m³ within a single month. Given that local precipitation during this period was negligible, this sudden increase cannot be attributed to local rainfall and is more plausibly associated with changes in upstream inflow conditions or transboundary water release. Hydrological drought analysis provided further evidence of this pattern. Based on the SWLI index, which was adopted as the principal indicator of reservoir hydrological drought, 12 out of 82 analyzed months were classified as drought periods, of which 83% fell into the severe or extreme drought categories. The year 2023 represented the most critical hydrological drought condition, with an average SWLI of -1.35, indicating severe drought. However, a key finding of the study was the clear mismatch between reservoir-based hydrological drought and locally derived climatic drought indicators. During periods when SWLI indicated severe depletion, the meteorological indices SPI and SPEI often remained close to normal. This divergence was especially evident in 2023, when hydrological drought intensified despite the absence of a comparable meteorological drought signal. Correlation analysis supported this interpretation. None of the examined local climatic variables or drought indices showed sufficient explanatory power for reservoir storage variations. Even the relatively better-performing indicators, such as SPEI-6 and SPEI-12, exhibited limited agreement with observed storage dynamics, as confirmed by low R² values and relatively high NRMSE. These results suggest that the Chah-Nimeh reservoir is not governed primarily by local climatic forcing. Rather, its storage behavior is strongly influenced by upstream inflow from the Helmand River and by transboundary and managerial controls. Therefore, the hydrological drought observed in the reservoir should be interpreted as a process driven by these factors.

Conclusion:

The findings of this study demonstrated that hydrological drought in the Chah-Nimeh reservoir cannot be adequately interpreted using local meteorological indicators alone. Reservoir storage showed a significant declining trend during 2017-2025, while the SWLI index identified severe hydrological drought conditions, particularly in 2023 and early 2024. In contrast, the SPI, SPEI, and PDSI did not show consistent agreement with the observed storage depletion. This mismatch indicates that reservoir behavior is primarily controlled by regulated inflow from the Helmand River and transboundary management factors. The integrated Google Earth Engine-based framework proved effective for continuous monitoring of reservoir dynamics in data-scarce and transboundary dryland systems.

Keywords: Remote Sensing, Hydrological drought, Chah-Nimeh reservoir, Spectral water indice

Citation: Siasar. H., Mohammadrezapour. O., Zeynali. M.J., 2026. Investigating the relationship between hydrological drought indices and Chah-Nimeh reservoir storage using remote sensing data. *Iranian Water Research Journal*, 20(61), pp. 61-80 <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2026.14921.2631>

Copyright: © Authors, Published by Iranian Water Research Journal. This is an open-access article distributed under the CC-BY 4.0 (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



ارزیابی بررسی همبستگی بین شاخص‌های خشکسالی هیدرولوژیکی با حجم مخزن چاه‌نیمه با استفاده از داده‌های سنجش از دور

هادی سیاسر^{*}، ام‌البنی محمدرضاپور و محمد جواد زینلی^۲

چکیده:

مخازن آب سطحی به‌عنوان زیرساخت‌های راهبردی تأمین آب، نقش تعیین‌کننده‌ای در امنیت آبی مناطق خشک دارند و پایش تغییرات آن‌ها برای مدیریت پایدار منابع آب ضروری است. این پژوهش با هدف پایش خشکسالی هیدرولوژیکی مخزن چاه‌نیمه و بررسی میزان هم‌راستایی شاخص‌های اقلیمی با تغییرات ذخیره مخزن، با بهره‌گیری از رویکرد تلفیقی سنجش از دور و داده‌های اقلیمی چندمنبعه در محیط Google Earth Engine انجام شد. در این چارچوب، ۳۴۵ تصویر Sentinel-2 در دوره ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۵ همراه با داده‌های CHIRPS، ERA5-Land و TerraClimate پردازش شد. برای استخراج سطح آب و برآورد عدم قطعیت، شاخص‌های NDWI، MNDWI و AWEI به‌کار رفت و شاخص SWLI به‌عنوان مبنای اصلی ارزیابی خشکسالی هیدرولوژیکی مخزن محاسبه شد؛ در حالی که SPI، SPEI و PDSI صرفاً برای مقایسه و تفکیک خشکسالی هیدرولوژیکی از خشکسالی هواشناختی و کشاورزی استفاده شدند. نتایج نشان داد حجم مخزن سالانه ۵/۳۸ میلیون مترمکعب و مساحت سطح آب ۰/۶۳ کیلومترمربع کاهش یافته است. از ۸۲ ماه بررسی‌شده، ۱۲ ماه در وضعیت خشکسالی هیدرولوژیکی قرار داشت که ۸۳ درصد آن‌ها شدید یا حدی بود. در سال ۲۰۲۳ نیز SWLI با مقداری معادل ۱/۳۵-، خشکسالی شدید را نشان داد؛ در حالی که SPI و SPEI نزدیک به نرمال بودند. این ناهم‌زمانی نشان می‌دهد افت ذخیره مخزن بیش از آن‌که تابع بارش محلی باشد، تحت تأثیر کاهش جریان هیرمند و عوامل مدیریتی-فرامرزی است.

واژه‌های کلیدی: سنجش از دور، خشکسالی هیدرولوژیکی، مخزن چاه‌نیمه، شاخص‌های طیفی آب

ارجاع: سیاسر، ه.، محمدرضاپور، ا.، زینلی، م.ج.، ۱۴۰۵. ارزیابی بررسی همبستگی بین شاخص‌های خشکسالی هیدرولوژیکی با حجم مخزن چاه‌نیمه با استفاده از داده‌های سنجش از دور. مجله پژوهش آب ایران، ۲۰ (۶۱)، صص. ۸۰-۶۱. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2026.14921.2631>

۱- استادیار گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

نویسنده مسئول: hadisiasar@pnu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۲

مقدمه

منابع آب شیرین به عنوان یکی از بنیادی‌ترین عناصر تداوم حیات، در دهه‌های اخیر با فشارهای فزاینده‌ای ناشی از تغییرات اقلیمی، رشد جمعیت، گسترش فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی و مدیریت ناکارآمد روبه‌رو شده‌اند؛ روندی که به کاهش محسوس ذخایر آب سطحی و زیرزمینی در بسیاری از مناطق جهان انجامیده است (Boretti and Rosa, 2024). گزارش‌های بین‌المللی نیز نشان می‌دهند که بیش از دو میلیارد نفر در مناطق دارای تنش آبی زندگی می‌کنند و پیش‌بینی می‌شود این رقم تا سال ۲۰۵۰ به‌طور قابل توجهی افزایش یابد. در این میان، مخازن آب به عنوان زیرساخت‌های راهبردی برای تنظیم جریان، تأمین آب شرب و کشاورزی و تولید انرژی، نقشی محوری در مدیریت بحران آب دارند (Yao et al., 2023). کاهش حجم این مخازن، افزون بر تهدید امنیت آبی، پیامدهای زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی گسترده‌ای به همراه دارد که این مساله ضرورت پایش مستمر و دقیق آن‌ها را دوچندان می‌سازد. مناطق خشک و نیمه‌خشک که حدود ۴۰ درصد خشکی‌های زمین را دربر می‌گیرند که به دلیل کمبود بارش، تبخیر و تعرق بالا و وابستگی شدید به منابع آب سطحی، از آسیب‌پذیرترین نواحی در برابر خشکسالی و کم‌آبی به‌شمار می‌آیند (Muñoz-Sabater et al., 2021). ایران نیز به عنوان کشوری واقع در کمربند خشک جهانی با بارشی کمتر از یک‌سوم میانگین جهانی، با تنش آبی شدید مواجه است؛ در این میان، استان سیستان و بلوچستان به سبب اقلیم بیابانی، موقعیت جغرافیایی خاص و وابستگی به منابع آب فرامرزی رودخانه هیرمند، شرایطی پیچیده‌تر دارد (Sharafati et al., 2021).

در مطالعات هیدرولوژیکی، مفهوم پویایی ذخیره آب (Water Storage Dynamics) به تغییرات زمانی حجم و سطح مخازن، شامل نوسانات فصلی، روندهای بلندمدت و رویدادهای حدی، اطلاق می‌شود (Yao et al., 2023; Cooley et al., 2021). تحلیل این پویایی، امکان شناخت رفتار هیدرولوژیکی مخزن، شناسایی الگوهای غیرعادی و ارزیابی پاسخ آن به محرک‌های اقلیمی و مدیریتی را فراهم می‌کند. این موضوع در مخازن وابسته به رودخانه‌های فرامرزی، مانند چاه‌نیمه، اهمیت بیشتری می‌یابد، زیرا تغییرات ذخیره تنها تابع شرایط اقلیمی نیست، بلکه به تصمیمات مدیریتی کشورهای بالادست نیز وابسته است (Wada et al., 2016). مخازن چاه‌نیمه که در تأمین آب شرب و کشاورزی منطقه سیستان نقش اساسی دارند که در

سال‌های اخیر کاهش شدیدی در ذخیره آب تجربه کرده‌اند؛ وضعیتی که بر معیشت جمعیت منطقه اثر مستقیم گذاشته و مهاجرت‌های اقلیمی را تشدید کرده است. در چنین شرایطی، پایش دقیق تغییرات حجمی و سطحی مخزن و ارزیابی خشکسالی هیدرولوژیکی، بخشی ضروری از مدیریت یکپارچه منابع آب است. با وجود دقت بالای اندازه‌گیری‌های میدانی، این روش‌ها به دلیل هزینه زیاد، پوشش مکانی محدود و ناپیوستگی زمانی، برای پایش جامع کفایت ندارند (Yao et al., 2023).

سنجش از دور با فراهم کردن امکان پایش گسترده مکانی-زمانی، تکرار منظم تصویربرداری و دسترسی آزاد به داده‌ها، تحول مهمی در مطالعات منابع آب ایجاد کرده است و امکان ارزیابی کمی تغییرات هیدرولوژیکی را در مقیاس‌های مختلف فراهم می‌سازد (Donchyts et al., 2022). پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که این فناوری نه تنها برای استخراج سطح آب، بلکه برای پایش پویایی ذخیره مخازن و ارزیابی خشکسالی هیدرولوژیکی نیز در مقیاس‌های محلی تا جهانی کارآمد است (Hou et al., 2024; Chang et al., 2025). به‌ویژه در مناطقی که دسترسی میدانی دشوار یا داده‌های زمینی ناکافی است، اهمیت بیشتری دارد. در این میان، ماهواره Sentinel-2 با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر، تناوب زمانی پنج‌روزه و دسترسی آزاد، فرصت ارزشمندی برای پایش دقیق پیکره‌های آبی فراهم کرده است (Wang et al., 2022). مطالعات متعدد نیز توانایی این داده‌ها را در استخراج مرزهای آب، برآورد حجم مخزن و ردیابی تغییرات زمانی آن تأیید کرده‌اند. برای تشخیص آب، شاخص‌های طیفی گوناگونی توسعه یافته‌اند. NDWI از پرکاربردترین شاخص‌هاست، هرچند در تفکیک آب از سطوح ساختمانی و برخی پوشش‌های گیاهی محدودیت دارد (Li et al., 2022). این شاخص MNDWI با استفاده از باند مادون قرمز میانی عملکرد بهتری در برخی محیط‌ها ارائه می‌دهد و شاخص‌های AWEI نیز برای حذف اثر سایه و افزایش دقت در شرایط پیچیده طراحی شده‌اند (Jiang et al., 2021).

تلفیق داده‌های سنجش از دور با داده‌های اقلیمی، چارچوبی مؤثر برای تحلیل روابط اقلیم و هیدرولوژی فراهم می‌کند و در مطالعات اخیر نیز برای پایش چند شاخص خشکسالی کارایی بالایی نشان داده است (Siasar and Ebrahimi, 2025). در این زمینه، CHIRPS به عنوان منبعی معتبر برای بارش، ERA5-Land برای دما و تبخیر-تعرق پتانسیل، و TerraClimate برای شاخص‌های ترکیبی

جامع روابط اقلیم و هیدرولوژی را با لحاظ تأخیرهای زمانی مختلف فراهم می‌کند. سوم، مقایسه هم‌زمان شاخص‌های هیدرولوژیکی، هواشناختی و رطوبتی-کشاورزی، دیدگاهی چندبعدی برای ارزیابی خشکسالی ارائه می‌دهد. چهارم، تمرکز بر یک مخزن فرامرزی با پیچیدگی‌های هیدروپلیتیکی، امکان درک بهتر تعامل عوامل اقلیمی و مدیریتی در تغییرات ذخیره را فراهم می‌سازد.

بر این اساس، هدف اصلی این پژوهش ارزیابی چندزمانه پویایی ذخیره آب و خشکسالی هیدرولوژیکی مخزن چاه‌نیمه با استفاده از داده‌های سنجش از دور است. در این چارچوب، شاخص‌های مبتنی بر ذخیره و جریان، مبنای اصلی تفسیر خشکسالی هیدرولوژیکی قرار گرفته‌اند و شاخص‌های هواشناختی و کشاورزی صرفاً برای مقایسه توصیفی، تفکیک مفهومی و بررسی هم‌راستایی آن‌ها با رفتار مخزن استفاده شده‌اند. بنابراین، هدف پژوهش حاضر معرفی یک شاخص اقلیمی به‌عنوان پیش‌بینی‌کننده حجم مخزن نیست، بلکه هدف روشن ساختن میزان تأثیر شرایط اقلیمی محلی در برابر عوامل مدیریتی و فرامرزی بر افت ذخیره مخزن است. در همین راستا، اهداف فرعی شامل برآورد سری زمانی ماهانه سطح آب و حجم مخزن با استفاده از شاخص‌های چندگانه و کمی‌سازی عدم قطعیت، تحلیل روند تغییرات حجم و سطح آب، شناسایی الگوهای فصلی و بین‌سالی، ارزیابی خشکسالی هیدرولوژیکی و دوره‌های بحرانی، بررسی میزان هم‌راستایی متغیرهای اقلیمی با ذخیره مخزن با لحاظ تأخیر زمانی و در نهایت توسعه یک سامانه پایش جامع مبتنی بر GEE با قابلیت تکرار و به‌روزرسانی است. تحقق این اهداف می‌تواند به ارتقای دانش موجود درباره پویایی هیدرولوژیکی مخازن در مناطق خشک فرامرزی و نیز پشتیبانی عملی از مدیریت منابع آب در شرایط تغییر اقلیم کمک کند.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی چندزمانه پویایی ذخیره آب و خشکسالی هیدرولوژیکی در مخزن چاه‌نیمه، از رویکرد تحلیلی مبتنی بر سنجش از دور و تلفیق داده‌های اقلیمی چندمنبعه بهره گرفته است. چارچوب روش‌شناختی این مطالعه بر پایه پردازش ابری در پلتفرم Google Earth Engine طراحی شده است که امکان تحلیل سری‌های زمانی بلندمدت با حجم داده بالا را فراهم می‌سازد (Gorelick et al., 2017).

مانند PDSI، از جمله داده‌های پرکاربرد به‌شمار می‌روند (Funk et al., 2022; Muñoz-Sabater et al., 2021; Koppa et al., 2022; Abubakar et al., 2025). همچنین، شاخص‌های خشکسالی ابزار مهمی برای سنجش شدت، مدت و گستره خشکسالی هستند و مقایسه هم‌زمان شاخص‌های هواشناختی و هیدرولوژیکی می‌تواند تفاوت زمان پاسخ و رفتار این دو نوع خشکسالی را روشن‌تر سازد (Rafiei Taghanaki et al., 2024).

در مطالعات اخیر، بر اهمیت شاخص‌های هیدرولوژیکی مبتنی بر جریان، به‌ویژه SSI، و حساسیت آن‌ها به مقیاس زمانی تأکید شده است (Lema et al., 2025). در پژوهش حاضر، تمرکز اصلی بر پایش خشکسالی هیدرولوژیکی مخزن چاه‌نیمه است، از این‌رو شاخص‌های مبتنی بر ذخیره و جریان مبنای اصلی تحلیل قرار گرفته‌اند. در مقابل، شاخص‌های هواشناختی مانند SPI و SPEI و نیز شاخص PDSI صرفاً برای مقایسه، تفکیک مفهومی انواع خشکسالی و بررسی میزان هم‌راستایی یا ناهم‌راستایی آن‌ها با رفتار مخزن استفاده شده‌اند. بنابراین، هدف از کاربرد این شاخص‌ها معرفی آن‌ها به‌عنوان شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی نبوده، بلکه روشن‌ساختن نقش عوامل غیراقلیمی و مدیریتی در سامانه چاه‌نیمه است.

اگرچه مطالعات جهانی و ملی متعددی تغییرات ذخیره مخازن را با استفاده از سنجش از دور بررسی کرده‌اند، اما پژوهش‌های جامعی که به‌صورت هم‌زمان از شاخص‌های چندگانه تشخیص آب، داده‌های اقلیمی متنوع و شاخص‌های مختلف خشکسالی در یک چارچوب یکپارچه برای مخازن فرامرزی استفاده کنند، همچنان محدود است (Zhang et al., 2022). در این میان، پلتفرم Google Earth Engine به‌عنوان یک سامانه پردازش ابری، امکان تحلیل داده‌های عظیم ماهواره‌ای را بدون نیاز به دانلود فراهم کرده و نقش مهمی در توسعه تحلیل‌های مکانی-زمانی ایفا کرده است (Gorelick et al., 2017). مطالعات اخیر نیز کارایی این پلتفرم را در پایش پیکره‌های آبی، تحلیل روند و ارزیابی خشکسالی نشان داده‌اند (Zhao et al., 2022).

نوآوری پژوهش حاضر در چند محور اصلی قابل بیان است: نخست، ارائه یک چارچوب تحلیلی یکپارچه که سه شاخص NDWI، MNDWI و AWEI را به‌طور هم‌زمان به کار می‌گیرد و از طریق کمی‌سازی عدم قطعیت، برآورد‌هایی مطمئن‌تر با فاصله اطمینان ۹۵ درصد فراهم می‌آورد. دوم، تلفیق هم‌زمان داده‌های Sentinel-2، CHIRPS، ERA5 و TerraClimate در یک سامانه واحد است که امکان تحلیل

محدوده مطالعاتی

مخزن چاه نیمه سه در شمال دشت سیستان، استان سیستان و بلوچستان و در نزدیکی مرز افغانستان واقع شده است. این مخزن در حدود ۳۱ درجه و ۲۰ دقیقه عرض شمالی و ۶۱ درجه و ۴۰ دقیقه طول شرقی قرار دارد و مساحت آن ۲۸/۴۱۷ کیلومتر مربع است. چاه نیمه ها مجموعه ای از چهار گودال طبیعی هستند که از گذشته برای ذخیره آب استفاده می شدند و پس از احداث تأسیسات هیدرولیکی، به منابع اصلی تأمین آب شرب و کشاورزی منطقه سیستان تبدیل شدند (Sharafati et al., 2021). همچنین، از نظر ژئومورفولوژیکی، چاه نیمه ها گودال های طبیعی ناشی از فرسایش بادی هستند که طی هزاران سال شکل گرفته اند. عمق این گودال ها به بیش از ۳۵ متر می رسد و بستر آن ها عمدتاً از رسوبات آبرفتی و رسی با نفوذپذیری کم تشکیل شده است. در این میان، چاه نیمه سه به عنوان بزرگ ترین مخزن سامانه، نقش اصلی را در تنظیم و ذخیره جریان ورودی رودخانه هیرمند بر عهده دارد.

این مخزن در یکی از خشک ترین نواحی ایران قرار گرفته است؛ به طوری که میانگین بارش سالانه منطقه کمتر از ۶۰ میلی متر و تبخیر سالانه بیش از ۳۰۰۰ میلی متر است؛ شرایطی که مدیریت منابع آب را با دشواری جدی مواجه می سازد (Nabavi et al., 2020). تبخیر شدید ناشی از گرمای تابستان و بادهای ۱۲۰ روزه، مهم ترین چالش حفظ ذخیره مخزن به شمار می رود (AghaKouchak et al., 2021). افزون بر این، وابستگی کامل مخزن به جریان ورودی هیرمند، بُعدی هیدروپلیتیکی به سامانه بخشیده و پویایی ذخیره آن را تحت تأثیر عوامل فرامرزی نیز قرار داده است.

داده های ماهواره ای و اقلیمی

در این پژوهش، از چهار منبع اصلی داده استفاده شد که هر یک نقش مشخصی در تحلیل های هیدرولوژیکی داشتند. انتخاب این داده ها بر پایه دسترسی آزاد، پوشش زمانی مناسب، قدرت تفکیک مکانی-زمانی کافی و اعتبار علمی آن ها انجام شد. تصاویر ماهواره ای Sentinel-2 به عنوان منبع اصلی داده نوری برای استخراج سطح آب به کار رفتند (Wang et al., 2022). در بازه مارس ۲۰۱۷ تا دسامبر ۲۰۲۵، تعداد ۳۴۵ تصویر Sentinel-2 سطح A۲، پس از تصحیح اتمسفری، پردازش شد. پیش پردازش شامل حذف ابر و سایه ابر با استفاده از باند طبقه بندی (SCL) و اعمال آستانه پوشش ابری کمتر از ۱۵ درصد بود. سپس، ترکیب های ماهانه بر اساس میان

مقادیر طیفی تولید شد که در مجموع ۸۳ رکورد معتبر ماهانه را شامل گردید.

داده های بارش روزانه CHIRPS نسخه ۲،۰ به عنوان منبع اصلی اطلاعات بارش منطقه ای استفاده شد. این محصول که از تلفیق داده های ایستگاهی و ماهواره ای حاصل می شود، دارای پوشش زمانی از سال ۱۹۸۱ به بعد و قدرت تفکیک مکانی ۰/۵ درجه (حدود ۵/۵ کیلومتر) است (Funk et al., 2022). در مجموع، ۳۱۹۷ تصویر روزانه CHIRPS برای استخراج بارش تجمعی ماهانه پردازش شد. افزون بر بارش ماهانه، بارش تجمعی سه ماهه و شش ماهه نیز برای بررسی اثر تجمعی بارش بر ذخیره مخزن محاسبه گردید.

داده های بازتحلیل ERA5-Land برای استخراج دما و تبخیر-تعرق پتانسیل به کار رفتند. این محصول، با قدرت تفکیک مکانی ۰/۱ درجه (حدود ۹ کیلومتر) و تفکیک زمانی ساعتی، از دقیق ترین محصولات بازتحلیل در مقیاس جهانی به شمار می رود (Muñoz, 2021). Sabater et al., 2021 در این مطالعه، ۱۰۵ تصویر ماهانه ERA5-Land پردازش و میانگین دمای ماهانه و مجموع تبخیر-تعرق پتانسیل ماهانه استخراج شد. این متغیرها برای محاسبه شاخص SPEI و تحلیل توازن آب ضروری بودند. به منظور اطمینان از قابلیت استفاده از داده های اقلیمی، داده های بارش و دما با مشاهدات ایستگاه زابل مقایسه شدند. این ارزیابی با استفاده از ضریب همبستگی (r)، ضریب تبیین (R^2)، میانگین خطا (Bias) و خطای جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE) انجام شد. بر این اساس، داده های CHIRPS و ERA5-Land پس از ارزیابی محلی در تحلیل ها به کار رفتند. با این حال، به دلیل محدودیت داده های همزمان و پیوسته در کل محدوده و دوره مطالعه، اصلاح ارببی مستقل (Bias Adjustment) بر این محصولات اعمال نشد؛ بنابراین، نتایج باید در چارچوب دقت ذاتی داده های بازتحلیل و ماهواره ای تفسیر شوند.

داده های ماهانه TerraClimate نیز برای استخراج شاخص شدت خشکسالی پالم (PDSI) و کسری رطوبتی استفاده شد. این محصول اقلیمی با قدرت تفکیک مکانی بالا (حدود ۴ کیلومتر)، متغیرهای متنوع اقلیمی و هیدرولوژیکی را ارائه می دهد (Abatzoglou et al., 2018). در این پژوهش، ۹۴ تصویر ماهانه TerraClimate پردازش شد. شاخص PDSI به عنوان نماینده شرایط رطوبتی بلندمدت خاک، اطلاعات ارزشمندی درباره وضعیت خشکسالی کشاورزی و اکولوژیکی منطقه فراهم کرد و به عنوان مکمل شاخص های هواشناسی و هیدرولوژیکی استفاده شد.

خشکسالی هیدرولوژیکی مناسب‌تر از شاخص‌های هواشناختی و کشاورزی هستند، زیرا مستقیماً به رفتار هیدرولوژیکی حوضه و ورودی سامانه مخزن مرتبط‌اند.

ارزیابی داده‌های اقلیمی با مشاهدات ایستگاهی

برای ارزیابی دقت داده‌های اقلیمی مورد استفاده، از داده‌های ایستگاهی سازمان هواشناسی جمهوری اسلامی ایران (IRIMO) مربوط به ایستگاه زابل (کد ۴۰۸۲۹) استفاده شد. این ایستگاه در عرض جغرافیایی $31^{\circ}02'$ شمالی، طول جغرافیایی $61^{\circ}29'$ شرقی و ارتفاع $489/2$ متر از سطح دریا قرار دارد. داده‌های بارش ماهانه ایستگاهی با CHIRPS و داده‌های دمای ماهانه ایستگاهی با ERA5-Land مقایسه شدند. برای سنجش دقت، شاخص‌های r ، R^2 ، Bias و NRMSE محاسبه شد. هدف از این ارزیابی، بررسی قابلیت اتکای داده‌های شبکه‌ای در بازنمایی شرایط اقلیمی منطقه و جلوگیری از استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و بازتحلیل بدون اعتبارسنجی بود. خلاصه نتایج ارزیابی داده‌های اقلیمی ایستگاه زابل در جدول ۱، ارائه شده است.

علاوه بر این، دو شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی نیز محاسبه شد. شاخص استاندارد رواناب (SRI) که توسط Shukla and Wood (2008) معرفی شده است و بر پایه استاندارد سازی داده‌های رواناب محاسبه می‌شود و وضعیت هیدرولوژیکی حوضه را به‌طور مستقیم بازتاب می‌دهد. این شاخص با استفاده از داده‌های رواناب ماهانه ERA5-Land و در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳ و ۶ ماهه محاسبه شد (رابطه ۱):

$$SRI = (R - \mu R) / \sigma R \quad (1)$$

که در آن، R ، رواناب تجمعی، μR میانگین بلندمدت و σR انحراف معیار رواناب است. همچنین، شاخص استاندارد جریان (SSI) بر اساس داده‌های جریان سطحی TerraClimate محاسبه شد که ارتباط مستقیم‌تری با ورودی مخزن دارد (Vicente-Serrano et al., 2012). استفاده از شاخص‌های تکمیلی SRI و SSI با این هدف انجام شد که ارزیابی خشکسالی مخزن تنها به شاخص مبتنی بر حجم محدود نشود و امکان مقایسه آن با شاخص‌های مبتنی بر جریان و رواناب نیز فراهم گردد. این شاخص‌ها از نظر مفهومی برای تبیین

جدول ۱- ارزیابی داده‌های اقلیمی با داده‌های ایستگاه هواشناسی زابل

متغیر	منبع داده	r	R ²	Bias	RMSE	NRMSE (%)
بارش ماهانه	CHIRPS	۰/۸۶۵	۰/۷۴۸	-۱/۷۷۱	۳/۳۳۶	۲۳/۳۲۸
بیشینه دمای ماهانه*	ERA5-Land	۰/۹۹۳	۰/۹۸۶	-۵/۵۱۳	۵/۶۲۳	۲۱/۲۱۸

نانومتر) برای محاسبه این شاخص استفاده شد. آستانه تشخیص آب برای NDWI برابر با صفر در نظر گرفته شد که مقادیر بالاتر از این آستانه به عنوان آب طبقه‌بندی می‌گردند. شاخص اصلاح شده تفاضلی نرمال شده آب (MNDWI) توسط Xu (2006) برای بهبود تفکیک آب از سطوح ساختمانی و برخی پوشش‌های گیاهی توسعه یافت. این شاخص با جایگزینی باند مادون قرمز نزدیک با باند مادون قرمز میانی کوتاه‌موج (SWIR) محاسبه می‌شود (فرمول ۳):

$$MNDWI = (Green - SWIR) / (Green + SWIR) \quad (3)$$

در تصاویر سنیتل-۲، باند ۳ (سبز) و باند ۱۱ (SWIR) با طول موج مرکزی ۱۶۱۰ نانومتر برای این شاخص استفاده شد. در مناطقی که سطوح ساختمانی یا خاک‌های مرطوب وجود دارند، MNDWI عملکرد بهتری نسبت به NDWI نشان می‌دهد. شاخص خودکار استخراج توسط Feyisa et al. (2014) برای حذف اثر سایه‌ها و افزایش دقت تشخیص در محیط‌های پیچیده طراحی شد. نسخه بدون سایه این شاخص

شاخص‌های طیفی تشخیص آب

برای شناسایی و طبقه‌بندی پیکره آبی در تصاویر سنیتل-۲، از سه شاخص طیفی پرکاربرد بهره‌گیری شد که انتخاب آن‌ها بر اساس عملکرد اثبات‌شده در مطالعات پیشین و مناسب بودن برای شرایط محیطی منطقه مورد مطالعه انجام شده است. استفاده هم‌زمان از چند شاخص امکان کمی‌سازی عدم قطعیت و افزایش اعتماد به نتایج را فراهم می‌سازد (Li et al., 2022). شاخص تفاضلی نرمال شده آب (NDWI) که نخستین بار توسط McFeeters (1996) معرفی شد، یکی از پایه‌ای‌ترین شاخص‌های تشخیص آب محسوب می‌شود. این شاخص بر اساس تفاوت بازتاب طیفی آب در باندهای سبز و مادون قرمز نزدیک محاسبه می‌گردد و مقادیر مثبت آن نشان‌دهنده پیکره‌های آبی است (فرمول ۲):

$$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR) \quad (2)$$

در تصاویر سنیتل-۲، باند ۳ (سبز) با طول موج مرکزی ۵۶۰ نانومتر و باند ۸ (مادون قرمز نزدیک) با طول موج مرکزی ۸۴۲

نمایان می‌کنند. در این پژوهش، شاخص SWLI به‌عنوان شاخص اصلی خشکسالی هیدرولوژیکی مخزن انتخاب شد، زیرا مستقیماً از حجم ذخیره مخزن محاسبه شده و وضعیت واقعی سامانه آبی را بازتاب می‌دهد. در مقابل، شاخص‌های SPI و SPEI به‌عنوان شاخص‌های خشکسالی هواشناختی و PDSI به‌عنوان شاخص رطوبتی-کشاورزی تنها برای مقایسه و تفکیک مفهومی انواع خشکسالی استفاده شدند و مبنای اصلی تشخیص خشکسالی هیدرولوژیکی نبودند. این تمایز با نتایج مطالعات داخلی نیز همخوان است که نشان داده‌اند شاخص‌های هواشناختی و هیدرولوژیکی لزوماً رفتار زمانی یکسانی ندارند و تفاوت در زمان پاسخ می‌تواند به ناهم‌رستایی آن‌ها منجر شود (Rafiei Taghanaki et al., 2024). این رویکرد امکان درک جامع‌تر وضعیت خشکسالی را فراهم می‌سازد (AghaKouchak et al., 2021).

شاخص استاندارد سطح آب (SWLI) از رابطه زیر محاسبه شد:

$$SWLI = (V - \mu) / \sigma \quad (7)$$

که در آن، V حجم ماهانه مخزن، μ میانگین حجم در کل دوره مطالعه و σ انحراف معیار حجم است. مقادیر کمتر از ۱- نشان‌دهنده خشکسالی، کمتر از ۱/۵- نشان‌دهنده خشکسالی شدید، و کمتر از ۲- بیانگر خشکسالی حادی هستند؛ در مقابل، مقادیر بیش از ۱ نشان‌دهنده ترسالی است (Shakeri et al., 2023).

شاخص SPEI نیز به‌عنوان شاخص خشکسالی هواشناختی حساس به دما، در مقیاس زمانی سه‌ماهه محاسبه شد (Vicente-Serrano et al., 2010). برای این منظور، ابتدا توازن آب اقلیمی از تفاضل بارش و تبخیر-تغرق پتانسیل محاسبه و سپس مقادیر تجمعی سه‌ماهه آن استاندارد شد. این شاخص نسبت به SPI حساسیت بیشتری به تغییرات دمایی ناشی از گرمایش جهانی دارد. شاخص SPI نیز در سه مقیاس زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه محاسبه شد؛ به‌طوری‌که SPI-3 برای کمبود بارش کوتاه‌مدت، SPI-6 برای شرایط میان‌مدت و SPI-12 برای تحلیل خشکسالی‌های بلندمدت به‌کار رفت. محاسبه این شاخص بر پایه برازش توزیع گاما بر سری زمانی بارش تجمعی و تبدیل احتمال تجمعی به توزیع نرمال استاندارد انجام شد (McKee et al., 1993). افزون بر این، شاخص PDSI مستقیماً از داده‌های TerraClimate استخراج شد و به‌عنوان نماینده شرایط رطوبتی خاک و خشکسالی کشاورزی، نقش مکملی در کنار شاخص‌های کوتاه‌مدت SPEI-3 و SPI-3 ایفا کرد.

(AWEIsh) با ترکیب پنج باند طیفی با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌گردد:

$$AWEIsh = Blue + 2.5 \times Green - 1.5 \times (NIR + SWIR1) - 0.25 \times SWIR2 \quad (4)$$

در این رابطه، باندهای ۲ (آبی)، ۳ (سبز)، ۸ (NIR)، ۱۱ (SWIR1) و ۱۲ (SWIR2) سنتینل-۲ مورد استفاده قرار گرفت. این شاخص به‌ویژه در مناطقی که سایه تپه‌ها یا ابرها موجب خطای طبقه‌بندی می‌شود، عملکرد مطلوبی دارد. پس از محاسبه سه شاخص مذکور برای هر ترکیب ماهانه، مساحت سطح آب بر اساس هر شاخص به‌طور جداگانه محاسبه گردید. سپس میانگین و انحراف معیار مساحت‌های حاصل از سه شاخص به‌عنوان برآورد مرکزی و معیار عدم قطعیت گزارش شد. فاصله اطمینان ۹۵ درصد برای هر برآورد با استفاده از رابطه (۵) محاسبه گردید.

$$Mean \pm 1.96 \times SD \quad (5)$$

محاسبه حجم و ارتفاع سطح آب

تبدیل مساحت سطح آب به حجم ذخیره مخزن، از چالش‌های مهم در مطالعات سنجش از دور است، زیرا تصاویر نوری تنها اطلاعات دوبعدی سطح آب را فراهم می‌کنند (Yao et al., 2023). با این حال، مطالعات چندماهواره‌ای نشان داده‌اند که پایش سنجش از دوری تغییرات ذخیره آب در دریاچه‌ها و مخازن می‌تواند مبنایی قابل اعتماد برای تحلیل‌های هیدرولوژیکی و ارزیابی روندهای بلندمدت باشد (Hou et al., 2024). در این پژوهش، برای برآورد حجم مخزن چاه‌نیمه از منحنی ارتفاع-سطح-حجم (Stage-Storage Curve) مبتنی بر داده‌های نقشه‌برداری و مطالعات میدانی استفاده شد. برای این منظور، رابطه بین مساحت سطح آب و حجم ذخیره با رگرسیون چندجمله‌ای درجه دوم مدل‌سازی شد:

$$V = a \times A^2 + b \times A + c \quad (6)$$

که در آن، V حجم مخزن بر حسب میلیون مترمکعب، A مساحت سطح آب بر حسب کیلومتر مربع، و a ، b و c ضرایب حاصل از برازش منحنی هستند. این ضرایب به‌ترتیب برابر با ۰/۱۸۱۲، ۳/۵۴۷ و ۰/۸۴۵ به‌دست آمدند و ضریب تعیین مدل نیز بیش از ۰/۹۹ بود که نشان‌دهنده برازش بسیار مطلوب است. همچنین، ارتفاع سطح آب از طریق درون‌یابی معکوس منحنی ارتفاع-سطح محاسبه شد. ارتفاع به‌دست آمده، که بر حسب متر از سطح دریا بیان می‌شود، در محاسبه شاخص استاندارد سطح آب به‌کار رفت.

شاخص‌های خشکسالی

برای ارزیابی جامع و وضعیت خشکسالی، چهار شاخص مختلف محاسبه و تحلیل شد که هر یک بُعدی متفاوت از خشکسالی را

تحلیل روند و همبستگی

برای بررسی روند متغیرهای اصلی، از آزمون ناپارامتری من-کندال و برآوردگر شیب سن (Sen's slope) استفاده شد. آزمون من-کندال برای سری‌های زمانی هیدرولوژیکی مناسب است زیرا به نرمال بودن داده‌ها وابسته نیست و نسبت به داده‌های پرت حساسیت کمتری دارد. برآوردگر شیب سن نیز برای تعیین نرخ تغییر روند به صورت مقاوم به کار رفت. در کنار این دو روش، رگرسیون خطی ساده صرفاً برای نمایش بصری نرخ تغییرات سالانه استفاده شد؛ اما مبنای اصلی قضاوت درباره وجود و معنی‌داری روند، نتایج آزمون من-کندال بود.

همبستگی بین متغیرها با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون (r) سنجیده شد که شدت و جهت رابطه خطی میان دو متغیر را نشان می‌دهد (Zhao et al., 2022). افزون بر این، برای ارزیابی دقیق‌تر میزان انطباق بین متغیرهای اقلیمی و حجم مخزن، ضریب تبیین (R^2) و خطای جذر میانگین مربعات نرمال‌شده (NRMSE) نیز محاسبه شد. R^2 سهم واریانس حجم مخزن را که توسط هر متغیر قابل توضیح است نشان می‌دهد و NRMSE شاخصی برای سنجش خطای نسبی برآوردها نسبت به دامنه تغییرات حجم مخزن است، این شاخص از رابطه زیر محاسبه شد:

$$NRMSE = \frac{RMSE}{(V_{max} - V_{min})} \quad (8)$$

که در آن، RMSE جذر میانگین مربعات خطای بین مقادیر مشاهده‌شده و برآوردی حجم مخزن و $V_{max} - V_{min}$ دامنه تغییرات حجم مخزن است. همچنین، میانگین قدرمطلق خطا (MAE) نیز برای هر متغیر محاسبه شد. استفاده هم‌زمان از این شاخص‌ها، امکان ارزیابی جامع‌تری از قدرت تبیین، دقت نسبی و دقت مطلق برآوردها فراهم می‌سازد. در این چارچوب، همبستگی حجم مخزن با متغیرهایی مانند بارش ماهانه، بارش تجمعی سه‌ماهه و شش‌ماهه، دما، تبخیر-تعرق پتانسیل، توازن آب و شاخص‌های خشکسالی بررسی شد. همچنین، برای تعیین زمان پاسخ‌دهی مخزن به بارش، تحلیل تأخیر زمانی در بازه صفر تا ۱۲ ماه انجام گرفت؛ تأخیری که بیشترین همبستگی مثبت را نشان دهد، به عنوان زمان پاسخ‌دهی بهینه مخزن تفسیر شد. این تحلیل، با توجه به فاصله حوضه آبریز هیرمند تا مخزن چاه‌نیمه و طول مسیر انتقال آب، اهمیت ویژه‌ای دارد.

کنترل کیفیت داده‌ها

برای اطمینان از کیفیت نتایج، کنترل کیفیت داده‌ها با استفاده از روش دامنه بین‌چارکی (IQR) انجام شد. بر این اساس، مقادیری

که خارج از بازه $Q1 - 1.5 \times IQR$ تا $Q3 + 1.5 \times IQR$ قرار داشتند، به عنوان داده پرت شناسایی شدند. این داده‌ها معمولاً ناشی از خطاهای تشخیص آب در شرایط ابری یا کیفیت پایین تصویر هستند. در مجموع، از ۸۳ رکورد ماهانه اولیه، تنها یک داده پرت شناسایی و از تحلیل‌های نهایی حذف شد.

پلتفرم پردازش و خروجی‌ها

تمامی پردازش‌ها در پلتفرم Google Earth Engine انجام شد که امکان پردازش موازی حجم عظیمی از داده‌های ماهواره‌ای را بدون نیاز به دانلود فراهم می‌کند (Gorelick et al., 2017). کدهای تحلیلی در محیط JavaScript این سامانه توسعه یافتند و از قابلیت تکرار و به‌روزرسانی برخوردارند. خروجی‌های پژوهش شامل پنج فایل CSV مشتمل بر داده‌های ماهانه، آمار سالانه، اقلیم شناسی ماهانه، خلاصه همبستگی‌ها و داده‌های اقلیمی، و نیز یک فایل GeoTIFF شامل نقشه عمق‌سنجی بود که به Google Drive صادر شدند. علاوه بر این، ۱۰ نمودار تعاملی شامل سری‌های زمانی، نمودارهای پراکنش و نمودارهای مقایسه‌ای تولید شد.

نتایج و بحث

آمار توصیفی مخزن

تحلیل داده‌های ماهانه مخزن چاه‌نیمه در دوره هشت‌ساله مطالعه (۲۰۱۷-۲۰۲۵) نتایج قابل توجهی را آشکار ساخت که در ادامه به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرد. از مجموع ۸۳ رکورد ماهانه اولیه، یک داده پرت مربوط به فوریه ۲۰۲۰ با مقدار مساحت $1/366$ کیلومتر مربع و حجم $5/877$ میلیون مترمکعب شناسایی و با استفاده از روش دامنه بین‌چارکی (IQR) حذف گردید. پس از حذف این داده، ۸۲ رکورد ماهانه معتبر برای تحلیل‌های نهایی استفاده شد. آمار توصیفی متغیرهای اصلی مخازن چاه نیمه در جدول ۲، نشان داده شده است.

با توجه به نتایج جدول ۲، میانگین حجم مخزن در کل دوره مطالعه $83/51$ میلیون مترمکعب با انحراف معیار $25/18$ میلیون مترمکعب محاسبه گردید که نشان‌دهنده تغییرپذیری قابل توجه ذخیره مخزن در دوره مطالعه است. ضریب تغییرات (CV) برابر با $30/15$ درصد می‌باشد که بیانگر نوسانات نسبتاً بالای حجم مخزن است و می‌تواند ناشی از تغییرات فصلی، بین‌ساله و روند بلندمدت باشد. میانگین مساحت سطح آب $13/35$ کیلومتر مربع با انحراف معیار $3/41$ کیلومتر مربع ثبت گردید که معادل $46/97$ درصد از مساحت کل محدوده مخزن ($28/417$ کیلومتر مربع) است.

جدول ۲- توصیف داده‌های آماری مخازن چاه نیمه‌ها (۲۰۱۷-۲۰۲۵)

واحد	ماکزیمم	مینیمم	انحراف معیار	میانگین	پارامترها
MM^3	۱۲۱۲۴	۲۶/۲۷	۲۵/۱۸	۸۳/۵۱	حجم مخزن
km^2	۱۸/۲۵	۵/۵۸	۳/۴۱	۱۳/۳۵	مساحت سطح آب
mm	-۸۰	-۱۶۱۰	۴۵۱/۱۲۱	-۸۵۹/۲۳	بیان آب
mm	۳۸/۵۷	۰	۷/۱۵	۳/۰۸	بارندگی ماهانه
$^{\circ}C$	۳۸/۲۹	۵/۶۹	۹/۶۲	۲۳/۸۴	دمای ماهانه

این امر نشان می‌دهد که به‌طور میانگین، کمتر از نیمی از ظرفیت سطحی مخزن در طول دوره مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است. تحلیل توازن آب منطقه نتایج قابل تأملی را آشکار ساخت. میانگین توازن آب اقلیمی سه‌ماهه منفی ۸۵۹/۲۳ میلی‌متر با انحراف معیار ۴۵۱/۲۱ میلی‌متر محاسبه شد که نشان‌دهنده غلبه شدید تبخیر-تعرق پتانسیل بر بارش در این منطقه بیابانی است. شکل ۱ اجزای توازن آب ماهانه را نشان می‌دهد که در آن الگوی فصلی مشخصی قابل مشاهده است. تبخیر-تعرق پتانسیل در ماه‌های گرم سال (تیر و مرداد) به بیش از ۵۵۰ میلی‌متر در ماه می‌رسد، در حالی که بارش در این ماه‌ها عملاً صفر است. این کم‌سری شدید آب اقلیمی، اهمیت حیاتی جریان ورودی از رودخانه هیرمند را برای حفظ ذخیره مخزن برجسته می‌سازد.

نتایج ارزیابی داده‌های اقلیمی

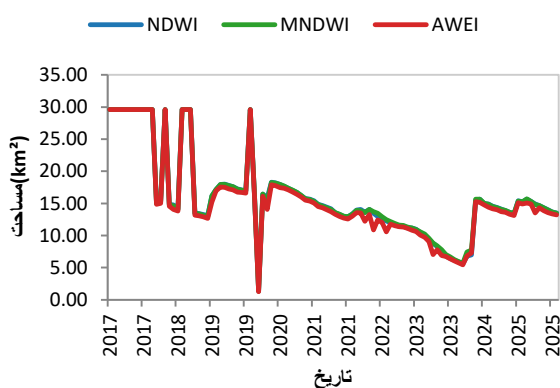
نتایج ارزیابی داده‌های اقلیمی نشان داد که عملکرد دو محصول اقلیمی مورد استفاده یکسان نیست. برای بارش ماهانه، داده‌های CHIRPS با $r = 0.865$ و $R^2 = 0.748$ ، $Bias = -1.771$ و $NRMSE = 23.328$ درصد انطباق نسبتاً مناسبی با داده‌های ایستگاهی زابل نشان داد. برای بیشینه دمای ماهانه نیز داده‌های ERA5-Land با $r = 0.993$ و $R^2 = 0.986$ ، $Bias = -5/513$ و $NRMSE = 21.218$ درصد هم‌خوانی بالایی با داده‌های ایستگاهی داشت. بر این اساس، استفاده از داده‌های اقلیمی در این پژوهش پس از ارزیابی محلی انجام شد و تفسیر نتایج با در نظر گرفتن تفاوت عملکرد این محصولات صورت گرفت.

تحلیل سری زمانی مساحت سطح آب و حجم مخزن

شکل ۱ تغییرات ماهانه مساحت سطح آب مخزن را با استفاده از سه شاخص طیفی NDWI، MNDWI و AWEI نشان می‌دهد. هم‌خوانی بالای نتایج سه شاخص در اکثر ماه‌ها،

اعتبار روش تشخیص آب را تأیید می‌کند. در سری زمانی مساحت سطح آب، یک ناهنجاری موضعی در شاخص AWEI در ابتدای سال ۲۰۲۰ مشاهده شد که با دو شاخص NDWI و MNDWI هم‌خوانی نداشت، از این‌رو این مقدار به‌عنوان داده پرت یا ناهنجاری احتمالی ناشی از خطای طبقه‌بندی، تلقی شد، نه تغییر واقعی سطح آب. به‌جز این مورد، روند سه شاخص در طول دوره مطالعه از الگوی نسبتاً مشابهی پیروی می‌کند و کاهش تدریجی سطح آب تا اوایل ۲۰۲۴ را نشان می‌دهد. با این حال، در برخی ماه‌ها تفاوت‌هایی بین شاخص‌ها مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از شرایط محیطی متفاوت باشد. به‌عنوان مثال، شاخص AWEI در ماه‌های تابستان که تبخیر بالاست و کناره‌های مخزن به تدریج خشک می‌شود، معمولاً مقادیر کمتری نسبت به دو شاخص دیگر نشان می‌دهد.

تغییرات ماهانه مساحت سطح آب



شکل ۱- تغییرات ماهانه مساحت سطح آب مخازن چاه نیمه

میانگین اختلاف بین شاخص NDWI و AWEI حدود ۰/۴ کیلومترمربع است که معادل ۳ درصد مساحت متوسط می‌باشد. سری زمانی مساحت سطح آب الگوی نزولی

میلیون مترمکعب در فوریه ۲۰۲۴ و فاز چهارم (می ۲۰۲۴ به بعد) دوره بازیابی با افزایش ناگهانی حجم است.

تحلیل روند بلندمدت

نتایج تحلیل روند با استفاده از رگرسیون خطی، آزمون من-کندال و برآوردگر شیب سن نشان داد که حجم مخزن و مساحت سطح آب در دوره مطالعه روندی کاهشی و از نظر آماری معنی‌دار داشته‌اند. حجم مخزن بر اساس رگرسیون خطی با نرخ $-۳۸/۵$ میلیون مترمکعب در سال کاهش یافته و آزمون من-کندال نیز این روند را با τ برابر $-۰/۵۰$ و $p < 0.01$ تأیید کرد. همچنین، مساحت سطح آب با نرخ $-۰/۶۳$ کیلومترمربع در سال کاهش یافت و برای آن نیز روند کاهشی معنی‌دار با τ برابر $-۰/۵۰$ و $p < 0.01$ به دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که افت ذخیره مخزن و سطح آب در دوره مطالعه ناشی از یک روند پایدار و معنی‌دار بوده است نه صرفاً نوسانات کوتاه‌مدت.

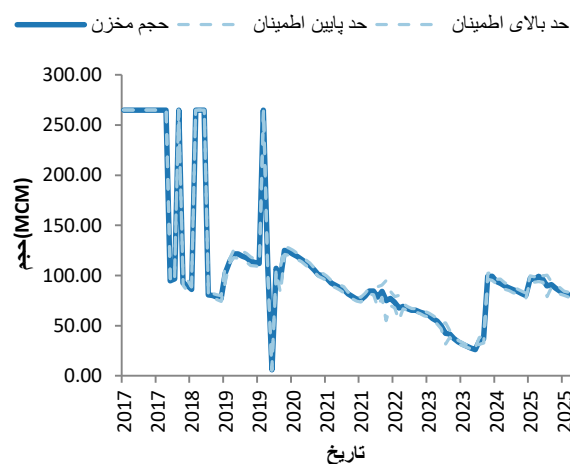
در مقابل، متغیرهای اقلیمی محلی شامل بارش، دما و تبخیر-تعرق پتانسیل روند معنی‌داری نشان ندادند. اگرچه در رگرسیون خطی، بارش روندی کاهشی ضعیف با نرخ $-۰/۵۵$ میلی‌متر در سال و دما روندی افزایشی با نرخ $۰/۴۲$ درجه سانتیگراد در سال نشان داد، اما نتایج آزمون من-کندال برای این دو متغیر به ترتیب با p برابر $۰/۸۱$ و $۰/۱۰$ بیانگر نبود روند معنی‌دار بود. این ناهم‌راستایی نشان می‌دهد که کاهش معنی‌دار ذخیره مخزن را نمی‌توان صرفاً به تغییرات اقلیمی محلی نسبت داد.

از سوی دیگر، شاخص‌های هیدرولوژیکی مبتنی بر مخزن و جریان، شامل SWLI، SSI و SDI، همگی روندی کاهشی و معنی‌دار نشان دادند؛ به طوری که SWLI و SSI هر دو با τ برابر $-۰/۰۵$ و $p < 0.01$ و SDI با τ برابر $-۰/۴۸$ و $p < 0.01$ کاهش معنی‌داری را ثبت کردند. در میان شاخص‌های هواشناختی، هیچ‌یک از مقیاس‌های SPI و SPEI در بازه‌های ۳، ۶ و ۱۲ ماهه روند کاهشی معنی‌داری نداشتند، هرچند SPEI-12 و PDSI به ترتیب روندی افزایشی و معنی‌دار نشان دادند. در مجموع، این یافته‌ها تأیید می‌کند که رفتار مخزن چاه‌نیمه بیش از آن که تابع مستقیم بارش و دمای محلی باشد، تحت تأثیر جریان ورودی کنترل شده هیرمند و عوامل مدیریتی-فرامرزی قرار دارد. جدول ۳، نتایج تلفیقی تحلیل روند متغیرهای اصلی را نشان می‌دهد.

مشخصی را از سال ۲۰۱۹ تا اوایل ۲۰۲۴ نشان می‌دهد. بیشترین مساحت سطح آب در ماه می ۲۰۲۰ با مقدار $۱۸/۲۵$ کیلومترمربع و کمترین مقدار (پس از حذف داده پرت) در فوریه ۲۰۲۴ با مقدار $۵/۵۸$ کیلومترمربع ثبت گردید. این تفاوت $۱۲/۶۷$ کیلومترمربعی بیانگر کاهش $۶۹/۴$ درصدی مساحت سطح آب در بدترین شرایط نسبت به بهترین شرایط است. شکل ۱، تغییرات ماهانه مساحت سطح آب را نشان می‌دهد.

شکل ۲، تغییرات ماهانه حجم مخزن را همراه با فاصله اطمینان ۹۵ درصد نشان می‌دهد. عرض باند اطمینان که بیانگر عدم قطعیت برآوردها است، در ماه‌های مختلف متفاوت است. در ماه‌هایی که اختلاف بین شاخص‌های تشخیص آب بیشتر است، عرض باند اطمینان نیز گسترده‌تر می‌شود. این امر به‌ویژه در ماه‌های انتقالی (بهار و پاییز) مشهودتر است. میانگین عدم قطعیت برآورد حجم (نصف عرض باند اطمینان ۹۵ درصد) حدود $۳/۵$ میلیون مترمکعب است که معادل $۴/۲$ درصد حجم متوسط می‌باشد و قابل قبول ارزیابی می‌گردد.

حجم مخزن و حدود اطمینان

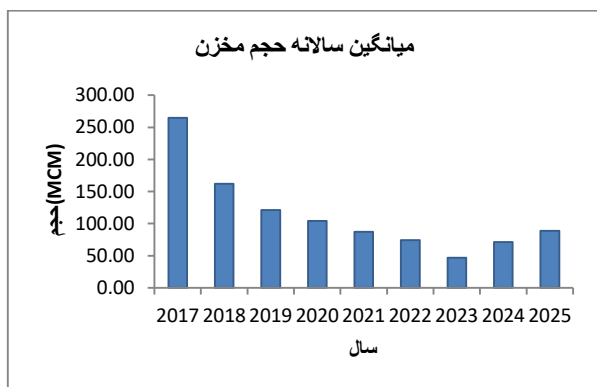


شکل ۲- تغییرات ماهانه در حجم مخزن با ۹۵٪ محدوده اطمینان

سری زمانی حجم مخزن، چهار فاز متمایز را نشان می‌دهد. فاز اول (۲۰۱۹-۲۰۲۰) دوره نسبتاً پرآب با حجم متوسط بالای ۱۰۰ میلیون مترمکعب است. فاز دوم (۲۰۲۱-۲۰۲۲) دوره کاهش تدریجی با افت متوسط سالانه حدود ۱۳ میلیون مترمکعب را شامل می‌شود. فاز سوم (۲۰۲۳ تا اوایل ۲۰۲۴) دوره خشکسالی شدید با رسیدن حجم به حداقل $۲۶/۲۷$

جدول ۳- نتایج تحلیل روند خطی میانگین داده ها (۲۰۱۷-۲۰۲۵)

متغیر	نرخ تغییر خطی	واحد	tau-من-کندال	p	شیب سن	تفسیر
حجم مخزن	-۵/۸۳	میلیون مترمکعب/سال	-۰/۰۵	۰/۰	-۱/۲۸	روند کاهشی معنی دار
مساحت سطح آب	-۰/۳۸	کیلومتر مربع/سال	-۰/۰۵	۰/۰	-۰/۱۵	روند کاهشی معنی دار
بارش	-۰/۵۵	میلی متر/سال	-۰/۰۲	۰/۸۱	۰/۰	بدون روند معنی دار
دما	۰/۲۴	درجه سلسیوس/سال	۰/۰	۱	۰/۰	بدون روند معنی دار
PET	—	میلی متر/سال	-۰/۰۴	۰/۵۹	-۰/۵۱	بدون روند معنی دار
SWLI	—	بدون بعد	-۰/۰۵	۰/۰	-۰/۰۲	روند کاهشی معنی دار
SSI	—	بدون بعد	-۰/۰۵	۰/۰	-۰/۰۲	روند کاهشی معنی دار
SRI	—	بدون بعد	-۰/۱۲	۰/۷	۰/۰	بدون روند معنی دار
SDI	—	بدون بعد	-۰/۸۴	۰/۰	-۰/۰۲	روند کاهشی معنی دار
PDSI	—	بدون بعد	۰/۶۱	۰/۲	۰/۰۳	روند افزایشی معنی دار
SPI-3	—	بدون بعد	-۰/۰۱	۰/۸۶	۰/۰	بدون روند معنی دار
SPI-6	—	بدون بعد	-۰/۰۳	۰/۴۶	۰/۰	بدون روند معنی دار
SPI12-	—	بدون بعد	-۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰	بدون روند معنی دار
SPEI-3	—	بدون بعد	۰/۰۳	۰/۶۶	۰/۰	بدون روند معنی دار
SPEI-6	—	بدون بعد	۰/۰۲	۰/۸۷	۰/۰	بدون روند معنی دار
SPEI-12	—	بدون بعد	۰/۹۱	۰/۱	۰/۰۱	روند افزایشی معنی دار



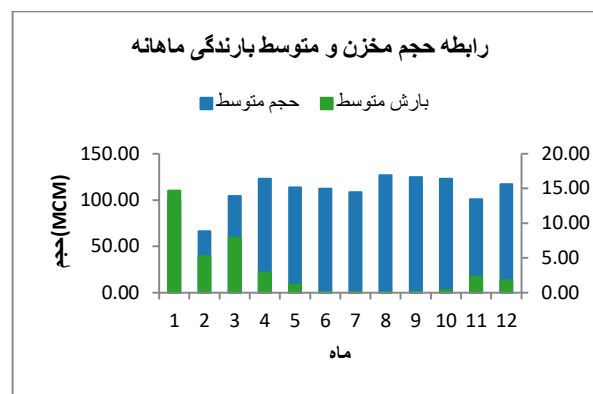
شکل ۳- میانگین سالانه حجم مخزن (۲۰۱۸-۲۰۲۵)

تحلیل تغییرات سالانه و فصلی

شکل ۳، میانگین حجم سالانه مخزن را در دوره ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۵ نشان می‌دهد. بیشترین میانگین حجم سالانه در سال ۲۰۱۹ با مقدار ۱۰۷/۹۵ میلیون مترمکعب و کمترین مقدار در سال ۲۰۲۳ با ۴۶/۹۸ میلیون مترمکعب ثبت گردید. تفاوت بین این دو سال ۶۰/۹۷ میلیون مترمکعب است که بیانگر کاهش ۵۶/۵ درصدی حجم سال ۲۰۲۳ نسبت به سال ۲۰۱۹ می‌باشد. این یافته سال ۲۰۲۳ را به عنوان بحرانی‌ترین سال از نظر ذخیره آب در دوره مطالعه معرفی می‌کند. تحلیل تغییرات سال به سال حجم مخزن نشان داد که بزرگ‌ترین کاهش سالانه مربوط به سال ۲۰۲۳ با افت ۳۶/۸ درصدی نسبت به سال ۲۰۲۲ است. در مقابل، بیشترین افزایش سالانه در سال ۲۰۲۴ با رشد ۵۲ درصدی نسبت به سال ۲۰۲۳ ثبت گردید که نشان‌دهنده بازایی قابل توجه مخزن پس از دوره خشکسالی است. سال ۲۰۲۵ نیز روند مثبت با افزایش ۲۵/۵ درصدی ادامه داشته است. تحلیل دامنه نو سانات فصلی (تفاوت بین حداکثر و حداقل حجم ماهانه در هر سال) نتایج جالبی را آشکار ساخت. بیشترین دامنه نوسان در سال ۲۰۲۴ با مقدار ۷۲/۹۶ میلیون مترمکعب ثبت گردید که ناشی از افزایش ناگهانی حجم در ماه می ۲۰۲۴ است. این افزایش ناگهانی از حدود ۳۶ میلیون مترمکعب در آوریل به حدود ۹۹ میلیون مترمکعب در می، یعنی افزایش ۶۳ میلیون مترمکعبی در یک ماه، احتمالاً ناشی از رهاسازی آب از سدهای بالادست در افغانستان بوده است.

شکل ۴ اقلیم‌شناسی ماهانه حجم و بارش را نشان می‌دهد. الگوی فصلی حجم مخزن نشان می‌دهد که بیشترین حجم در ماه می (۹۴/۹۶ میلیون مترمکعب) و ژوئن (۹۳/۶۱ میلیون مترمکعب) و کمترین حجم در ماه فوریه (۶۲/۲۱ میلیون مترمکعب) و دسامبر (۷۳/۹۱ میلیون مترمکعب) بوده است. جالب توجه است که اوج حجم مخزن در اواخر بهار است، نه در فصل بارش (زمستان)، که نشان می‌دهد تغییرات حجم مخزن بیش از آن که تابع مستقیم بارش محلی باشد، به جریان ورودی رودخانه هیرمند وابسته است، با این حال این ورودی با توجه به وجود سازه‌های کنترلی و سدهای بالادست، صرفاً یک پاسخ طبیعی به ذوب برف و بارش نبوده، بلکه تحت تأثیر هم‌زمان شرایط هیدرو-اقلیمی حوضه بالادست و تصمیمات مدیریتی مربوط به رهاسازی آب نیز قرار دارد.

به کار نرفتند و فقط برای مقایسه با SWLI و بررسی هم‌زمانی یا ناهم‌زمانی میان شرایط اقلیمی و وضعیت ذخیره مخزن استفاده شدند. نتایج نشان داد که الگوی زمانی SWLI با شاخص‌های هواشناختی هم‌راستایی کامل ندارد. بنابراین افت حجم مخزن چاه‌نیمه را نمی‌توان صرفاً پیامد خشکسالی هواشناختی دانست. شاخص SWLI که مستقیماً از حجم مخزن محاسبه می‌شود، از اواسط ۲۰۱۹ تا اوایل ۲۰۲۴ روندی کاهشی داشت و در فوریه ۲۰۲۴ به حداقل ۲/۱۳- رسید که بیانگر خشکسالی حادی هیدرولوژیکی است. پس از افزایش ناگهانی حجم مخزن در می ۲۰۲۴، SWLI نیز سریعاً بهبود یافت و مثبت شد.



شکل ۴- تغییرات ماهانه بارندگی و حجم مخزن

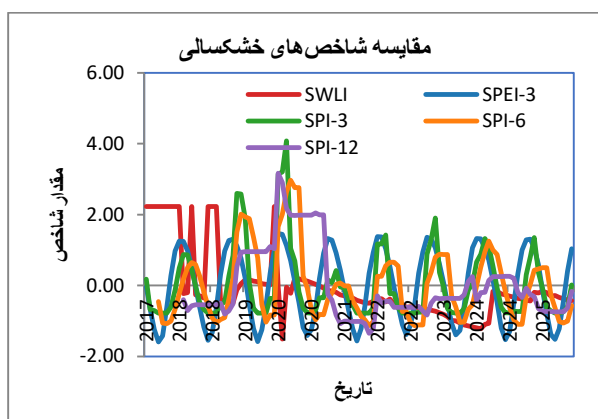
تحلیل پویایی ذخیره آب

پویایی ذخیره آب مخزن چاه‌نیمه از سه منظر نوسانات فصلی، روند بلندمدت و رویدادهای حادی تحلیل شد. از منظر نوسانات فصلی، اقلیم‌شناسی ماهانه حجم مخزن (شکل ۴) نشان می‌دهد که بیشترین حجم در ماه‌های می و ژوئن (میانگین ۹۴ میلیون مترمکعب) و کمترین حجم در ماه فوریه (میانگین ۶۲ میلیون مترمکعب) مشاهده می‌شود. دامنه نوسان فصلی متوسط ۳۲ میلیون مترمکعب است که معادل ۳۸ درصد میانگین حجم می‌باشد. این الگوی فصلی با چرخه ذوب برف در ارتفاعات افغانستان و ورود جریان از رودخانه هیرمند مطابقت دارد، نه با الگوی بارش محلی.

از منظر روند بلندمدت، نتایج آزمون من-کندال و برآوردگر شیب سن، همراه با رگرسیون خطی به‌عنوان نمایش کمکی نرخ تغییرات، روند کاهشی معنی‌دار ذخیره مخزن را نشان داد؛ به‌طوری‌که حجم مخزن با نرخ ۵/۳۸- میلیون مترمکعب در سال کاهش یافته است. این روند نزولی به‌ویژه از سال ۲۰۲۱ تشدید شده و در سال ۲۰۲۳ به اوج خود رسید. از منظر رویدادهای حادی، دو رویداد شاخص شناسایی گردید: رویداد افت حادی در زمستان ۲۰۲۳-۲۰۲۴ که حجم مخزن به ۲۶،۲۷ میلیون مترمکعب (کمتر از یک‌سوم میانگین) کاهش یافت، و رویداد بازیابی سریع در می ۲۰۲۴ که حجم در یک ماه ۱۷۱ درصد افزایش یافت. این رویدادهای حادی که با الگوهای اقلیمی محلی همخوانی ندارند، نقش تعیین‌کننده مدیریت جریان فرامرزی در پویایی ذخیره مخزن را تأیید می‌کنند.

تحلیل شاخص‌های خشکسالی

شکل ۵، مقایسه شاخص اصلی خشکسالی هیدرولوژیکی مخزن، یعنی SWLI را با شاخص‌های هواشناختی SPI و SPEI در مقیاس‌های زمانی مختلف نشان می‌دهد. در این پژوهش، SPI و SPEI برای تعریف خشکسالی هیدرولوژیکی

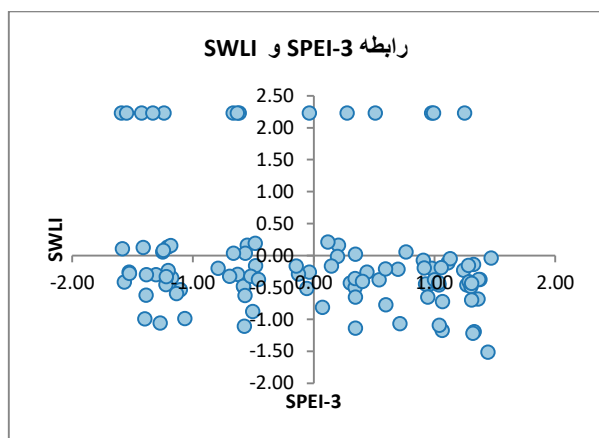


شکل ۵- مقایسه مقادیر شاخص‌های خشکسالی در دوره مورد مطالعه

شاخص‌های هواشناختی در مقیاس‌های SPI-3، SPI-6 و SPI-12 بررسی شدند. نتایج نشان داد SPI-3 بیشتر نوسانات کوتاه‌مدت بارش را بازتاب می‌دهد، در حالی که SPI-6 و به‌ویژه SPI-12 برای تفسیر شرایط هیدرولوژیکی مخزن مناسب‌ترند زیرا اثر کمبود تجمعی بارش را در بازه‌های طولانی‌تر نشان می‌دهند. با این حال، حتی با این مقیاس‌ها نیز هم‌راستایی کامل میان خشکسالی هواشناختی و افت حجم مخزن مشاهده نشد که نقش غالب جریان ورودی کنترل‌شده هیرمند و عوامل مدیریتی-فرامرزی را تأیید می‌کند. براساس SWLI، از ۸۲ ماه تحلیل‌شده، ۱۲ ماه در وضعیت خشکسالی (کمتر از ۱-) قرار داشتند که شامل ۱۰ ماه خشکسالی شدید (کمتر از ۱/۵-) و ۳ ماه خشکسالی حادی (کمتر از ۲-) بود. تمام ماه‌های خشکسالی حادی در بازه دسامبر ۲۰۲۳ تا فوریه ۲۰۲۴ رخ دادند که بحرانی‌ترین دوره خشکسالی هیدرولوژیکی در دوره مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در مقابل، ۵۶ ماه در وضعیت نرمال (بین ۱- و ۱+) و ۱۴ ماه در وضعیت ترسالی (بیشتر از ۱+) قرار داشتند. شکل ۶، نیز میانگین سالانه شاخص‌های خشکسالی را نشان می‌دهد.

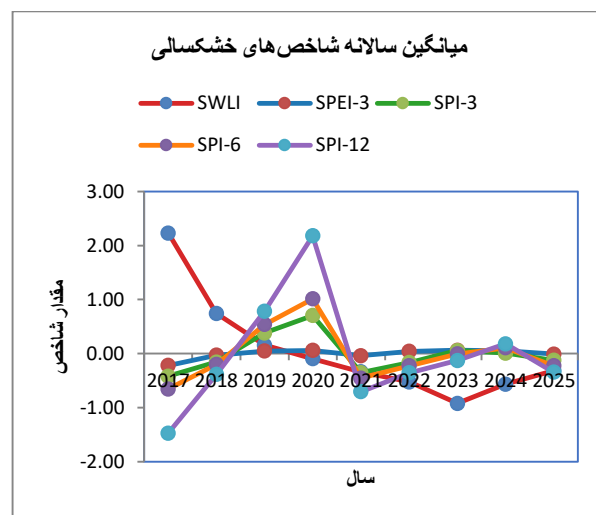
تحلیل همبستگی شاخص‌های خشکسالی

شکل ۷، نمودار پراکنش توصیفی مقادیر شاخص‌های SPEI-3 و SWLI را برای مقایسه بصری هم‌زمانی یا ناهم‌زمانی تغییرات آن‌ها نشان می‌دهد. در این پژوهش، این نمودار صرفاً با هدف مقایسه توصیفی یک شاخص هواشناختی با یک شاخص مبتنی بر ذخیره مخزن ارائه شده است و نباید به‌عنوان مبنای استنباط یک رابطه آماری یا علی مستقیم میان دو فرآیند هم‌سنخ تفسیر شود. دلیل این امر آن است که SPEI-3 از متغیرهای اقلیمی تصادفی مانند بارش و تبخیر-تعرق محاسبه می‌شود، در حالی که SWLI از حجم مخزنی به‌دست می‌آید که ورودی آن به‌شدت تحت تأثیر رژیم کنترل‌شده جریان هیرمند و تصمیمات مدیریتی در بالادست قرار دارد. از این‌رو، ناهم‌راستایی مشاهده‌شده میان این دو شاخص نه‌تنها غیرمنتظره نیست، بلکه خود نشان می‌دهد که رفتار مخزن را نمی‌توان صرفاً با شاخص‌های اقلیمی محلی توضیح داد.



شکل ۷- نمودار پراکنش توصیفی مقادیر شاخص‌های SPEI-3 و SWLI برای مقایسه بصری

چند عامل می‌توانند این ناهم‌زمانی را توضیح دهند. نخست، حجم مخزن چاه‌نیمه عمدتاً به جریان ورودی رودخانه هیرمند وابسته است که منشأ آن بارش و ذوب برف در ارتفاعات افغانستان است، نه بارش محلی محدوده مخزن. دوم، بین رخداد‌های اقلیمی در حوضه بالادست و ورود آب به مخزن تأخیر زمانی وجود دارد. سوم، میزان آب ورودی می‌تواند به‌طور مستقیم تحت تأثیر سازه‌های کنترلی و سیاست‌های رهاسازی آب در بالادست قرار گیرد. بنابراین، نقش هیرمند در این پژوهش باید به‌عنوان یک ورودی فرامرزی کنترل‌شده در نظر گرفته شود، نه یک جریان آزاد و طبیعی. بر این اساس، تغییرات حجم مخزن الزاماً بازتاب مستقیم شرایط بارش محلی



شکل ۶- میانگین سالانه شاخص‌های خشکسالی در دوره مورد مطالعه

سال ۲۰۲۳ با میانگین SWLI برابر با $-1/347$ - خشک‌ترین سال از نظر هیدرولوژیکی بود، در حالی که میانگین SPEI مقادیر SPI در مقیاس‌های مختلف نزدیک به صفر و نشان‌دهنده شرایط اقلیمی نسبتاً نرمال بودند. این ناهم‌زمانی تأیید می‌کند که افت شدید ذخیره مخزن در سال ۲۰۲۳ را نمی‌توان فقط به کمبود بارش محلی نسبت داد. با توجه به وجود سدها و سازه‌های کنترلی در بالادست هیرمند، ورودی مخزن چاه‌نیمه یک جریان طبیعی و آزاد نیست و تغییرات حجم مخزن می‌تواند به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تصمیمات رهاسازی آب، تنظیم جریان و شرایط مدیریتی-فرامرزی قرار گیرد. بنابراین، تفسیر نتایج این پژوهش بر پایه هم‌زمانی یا ناهم‌زمانی توصیفی شاخص‌ها انجام شد، نه بر پایه فرض رابطه علی مستقیم میان بارش محلی و ذخیره مخزن. به‌ویژه در سال ۲۰۲۳، میانگین SWLI برابر با $-1/347$ -، میانگین SPEI برابر با $0/44$ و میانگین SPI برابر با $0/16$ - بود که شرایط اقلیمی تقریباً نرمال را نشان می‌دهد. همچنین در زمستان ۲۰۲۳-۲۰۲۴، با وجود مثبت بودن شاخص‌های هواشناختی، SWLI به کمینه مقدار خود رسید. از این‌رو، خشکسالی ثبت‌شده در مخزن چاه‌نیمه را نمی‌توان صرفاً خشکسالی هواشناختی دانست، بلکه شواهد نشان می‌دهد این وضعیت عمدتاً ناشی از کاهش جریان ورودی هیرمند و اثر عوامل مدیریتی و فرامرزی است. بر این اساس، استفاده از SPEI-3 به‌تنهایی برای تفسیر رفتار مخزن کافی نیست و بررسی هم‌زمان SPEI-3، SPI-6، و SPI-12 تصویر کامل‌تری از تفاوت میان خشکسالی هواشناختی و خشکسالی هیدرولوژیکی در سامانه مخزن چاه‌نیمه ارائه می‌دهد.

در مقایسه شاخص‌های اقلیمی، SPEI-6 با $r = 0.24$ ، $R^2 = 0.06$ و $NRMSE = 23.09$ در صد و پس از آن SPEI-12 با $r = 0.23$ ، $R^2 = 0.05$ و $NRMSE = 17.91$ درصد بیشترین هم‌سویی نسبی را با تغییرات حجم مخزن در میان شاخص‌های هواشناختی نشان دادند. با این حال، این مقادیر همچنان پایین هستند و نشان می‌دهند که حتی بهترین شاخص‌های اقلیمی بررسی‌شده نیز فقط بخش بسیار محدودی از تغییرات حجم مخزن را توضیح می‌دهند. بنابراین، هیچ یک از این شاخص‌ها را نمی‌توان به‌عنوان پیش‌بینی‌کننده قابل اتکای حجم مخزن معرفی کرد. از نظر تفسیری، این نتیجه فقط بیانگر آن است که شرایط تراز آب مخزن در مقیاس‌های زمانی میان مدت و بلندمدت، اندکی بیشتر از مقیاس‌های کوتاه مدت با شرایط اقلیمی منطقه هم‌زمانی دارد.

در میان شاخص‌های هیدرولوژیکی، SDI با $r = 0.96$ ، $R^2 = 0.91$ و $NRMSE = 7.89$ درصد بیشترین انطباق را با تغییرات حجم مخزن نشان داد. این نتیجه قابل انتظار است، زیرا SDI نیز مانند SWLI و SSI ماهیتی هیدرولوژیکی دارد و به رفتار ذخیره و جریان آب نزدیک‌تر است. همچنین SRI با وجود معنی‌داری آماری ($p = 0.00$) تنها هم‌سویی ضعیفی با حجم مخزن نشان داد ($r = 0.30$ ، $R^2 = 0.09$ ، $NRMSE = 25.47$ درصد)، که نشان می‌دهد همه شاخص‌های هیدرولوژیکی نیز الزاماً توان یکسانی در بازنمایی رفتار مخزن ندارند.

در مقابل، SPI-3، SPI-6 و SPI-12 به‌ترتیب با ضرایب همبستگی ۰/۱۸، ۰/۱۳ و ۰/۱۵، هم‌سویی بسیار ضعیفی با حجم مخزن نشان دادند و مقادیر R^2 آن‌ها نیز بین ۰/۰۲ تا ۰/۰۳ بود. شاخص PDSI نیز با $r = 0.1$ ، $R^2 = 0.01$ و $NRMSE = 26.59$ درصد عملکرد بسیار ضعیفی نشان داد و برخلاف نسخه قبلی، در این تحلیل دیگر نمی‌توان آن را دارای بیشترین هم‌سویی نسبی با حجم مخزن دانست. از آن‌جا که PDSI اساساً شاخصی برای بازتاب شرایط رطوبتی خاک و خشکسالی کشاورزی است، نتیجه حاضر نیز تأیید می‌کند که این شاخص نه‌تنها پیش‌بینی‌کننده مستقیم حجم مخزن نیست، بلکه حتی در سطح توصیفی نیز انطباق قابل‌قبولی با رفتار مخزن چاه‌نیمه ندارد.

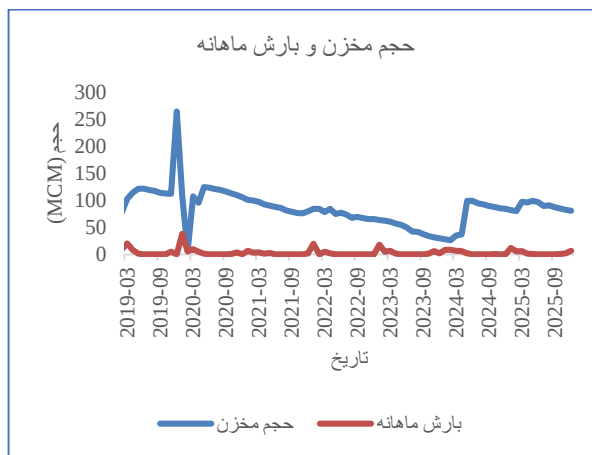
برای دما و تبخیر-تعرق پتانسیل نیز به‌ترتیب مقادیر $r = 0.09$ و $r = 0.12$ به‌دست آمد که هر دو بیانگر هم‌راستایی خطی بسیار ضعیف هستند. این هم‌زمانی محدود را می‌توان ناشی از هم‌وقوعی فصلی گرمایش، ذوب برف در ارتفاعات

یا حتی رواناب طبیعی بالادست نیست، بلکه می‌تواند تابعی از مدیریت جریان نیز باشد.

در همین چارچوب، مقایسه توصیفی بین SPI و SWLI نیز نشان داد که بین نوسانات بارش محلی و تغییرات ذخیره مخزن هم‌راستایی مشخصی مشاهده نمی‌شود. از این‌رو، این مقایسه نیز صرفاً جنبه توصیفی دارد و نباید به‌عنوان شواهدی بر وجود یا عدم وجود رابطه علی مستقیم میان بارش محلی و حجم مخزن تلقی شود. در مجموع، نتایج این بخش تأیید می‌کند که تفسیر رفتار مخزن چاه‌نیمه باید با تأکید بر شاخص‌های هیدرولوژیکی مبتنی بر ذخیره و با در نظر گرفتن رژیم کنترل‌شده ورودی هیرمند انجام شود، نه صرفاً بر پایه شاخص‌های هواشناختی محلی.

بررسی توصیفی تغییرات حجم مخزن در مقایسه با متغیرهای اقلیمی

شکل ۸، پراکنش مقادیر حجم مخزن و بارش ماهانه را نشان می‌دهد. با توجه به آن که حجم مخزن چاه‌نیمه تحت تأثیر ورودی کنترل‌شده رودخانه هیرمند و تصمیمات مدیریتی در بالادست قرار دارد، مقایسه آن با متغیرهای اقلیمی در این پژوهش صرفاً جنبه توصیفی و اکتشافی داشته و نباید به‌عنوان مبنای استنباط یک رابطه علی مستقیم تفسیر شود.



شکل ۸- پراکنش مقادیر حجم مخزن و بارش ماهانه

مقدار $r = 0.10$ برای بارش جاری نشان می‌دهد که هم‌راستایی خطی بین بارش محلی همان ماه و حجم مخزن بسیار ضعیف است. همچنین مقدار $R^2 = 0.01$ و $NRMSE = 26.57$ در صد بیانگر آن است که بارش محلی نه‌توان تبیین قابل‌قبولی برای تغییرات حجم مخزن دارد و نه از دقت کافی برای بازنمایی رفتار مخزن برخوردار است. از این‌رو، نوسانات بارش محلی، دست‌کم در مقیاس زمانی ماهانه، هم‌زمانی مشخصی با تغییرات حجم مخزن نشان نمی‌دهند.

افغانستان و تغییرات رهاسازی آب در بالادست دانست؛ بنابراین، این مقادیر نیز لزوماً بازتاب اثر مستقیم دما یا PET بر حجم مخزن نیستند. نتایج جدول ۴، نشان می‌دهد که از میان متغیرهای اقلیمی، هیچ شاخصی توان تبیین و دقت کافی برای پیش‌بینی حجم مخزن چاه‌نیمه را ندارد. در مقابل، شاخص‌های هیدرولوژیکی

مبتنی بر ذخیره و جریان، به‌ویژه SWLI، SSI و SDI، انطباق بسیار بیشتری با رفتار مخزن نشان می‌دهند. این یافته تأیید می‌کند که تفسیر تغییرات حجم مخزن چاه‌نیمه باید عمدتاً بر پایه شاخص‌های هیدرولوژیکی و با در نظر گرفتن رژیم کنترل‌شده ورودی هیرمند انجام شود، نه صرفاً بر پایه متغیرهای اقلیمی محلی.

جدول ۴- شاخص‌های آماری بین حجم مخزن و پارامترهای هیدرولوژیکی و اقلیمی

شاخص	R ²	NRMSE درصد	RMSE	MAE	مقدار P
swli	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
ssi	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
sdi	۰/۹۶	۰/۹۱	۷/۸۹	۲۰/۴۳	۱۲/۸۸
sri	۰/۳۰	۰/۰۹	۲۵/۴۷	۶۵/۹۷	۴۸/۱۳
SPEI_6	۰/۲۴	۰/۰۶	۲۳/۰۹	۵۹/۸۱	۴۰/۳۹
SPEI_12	۰/۲۳	۰/۰۵	۱۷/۹۱	۴۶/۴۰	۳۱/۶۷
SPEI_3	۰/۲۰	۰/۰۴	۲۵/۱۳	۶۵/۰۹	۴۶/۲۳
SPI_3	۰/۱۸	۰/۰۳	۲۵/۲۶	۶۵/۴۷	۴۵/۸۷
SPI_12	۰/۱۵	۰/۰۲	۱۸/۱۹	۴۷/۱۲	۲۵/۳۶
SPI_6	۰/۱۳	۰/۰۲	۲۳/۵۵	۶۱/۰۱	۴۱/۴۲
pet	۰/۱۲	۰/۰۱	۲۶/۵۲	۶۸/۶۹	۴۷/۵۵
precip	۰/۱۰	۰/۰۱	۲۶/۵۷	۶۸/۸۳	۴۸/۶۷
pdsi	۰/۱۰	۰/۰۱	۲۶/۵۹	۶۸/۸۶	۵۰/۳۷
temp	۰/۰۹	۰/۰۱	۲۶/۶۲	۶۸/۹۵	۴۷/۸۶

تحلیل رویداد خشکسالی ۲۰۲۳ و بازیابی ۲۰۲۴

سال ۲۰۲۳ به‌عنوان بحرانی‌ترین سال خشکسالی هیدرولوژیکی شنا سایی شد؛ به‌طوری‌که میانگین حجم مخزن در این سال ۴۶/۹۸ میلیون مترمکعب بود که کمتر از نصف میانگین کل دوره، یعنی ۸۳/۵۱ میلیون مترمکعب، است. روند کاهش حجم از ۶۳/۳۴ میلیون مترمکعب در ژانویه ۲۰۲۳ تا ۲۹/۵۱ میلیون مترمکعب در دسامبر ادامه یافت و سپس با رسیدن به حداقل ۲۶/۲۷ میلیون مترمکعب در فوریه ۲۰۲۴ تشدید شد؛ وضعیتی که نشان‌دهنده ناکافی بودن جریان ورودی در این دوره است. در مقابل، در می ۲۰۲۴ بازیابی ناگهانی و چشمگیری رخ داد و حجم مخزن از ۳۶/۵۶ میلیون مترمکعب در آوریل به ۹۹/۰۵ میلیون مترمکعب در می افزایش یافت؛ یعنی افزایشی برابر با ۶۲/۵ میلیون مترمکعب در یک ماه. با توجه به اینکه بارش می ۲۰۲۴ فقط ۱/۸۲ میلی‌متر بود، این افزایش را نمی‌توان به بارش محلی نسبت داد و محتمل‌ترین تبیین آن، رهاسازی آب از سدهای افغانستان است، هرچند تأیید قطعی این موضوع به داده‌های جریان ورودی نیاز دارد. بیشترین نسبت پرشدگی مخزن حدود ۲۰ درصد در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ و کمترین

مقدار آن حدود ۴/۳ درصد در فوریه ۲۰۲۴ ثبت شد که نشان‌دهنده استفاده محدود از ظرفیت کامل مخزن در دوره مورد مطالعه است. این روند کاهشی با نتایج مطالعات جهانی درباره افت ذخیره مخازن در مناطق خشک همخوانی دارد؛ به‌طوری‌که Yao et al (2023) نیز کاهش گسترده حجم ذخیره را گزارش کردند. همچنین، ضعف همبستگی میان بارش محلی و حجم مخزن، مشابه نتایج مطالعات مخازن وابسته به رودخانه‌های فرامرزی، اهمیت مدیریت یکپارچه منابع آب در مقیاس حوضه فراتر از مرزهای سیاسی را نشان می‌دهد (AghaKouchak et al., 2021).

تحلیل خشکسالی هیدرولوژیکی

ارزیابی خشکسالی در مخزن چاه‌نیمه به منظور بررسی هم‌زمان ابعاد هیدرولوژیکی، هواشناختی و کشاورزی آن، با رویکرد چند شاخصه انجام شد. در این چارچوب، شاخص استاندارد سطح آب (SWLI) به‌عنوان شاخص اصلی خشکسالی هیدرولوژیکی، بر پایه انحراف حجم مخزن از میانگین بلندمدت ۵۷/۸۲ میلیون مترمکعب و انحراف معیار ۲۶/۴۲ میلیون مترمکعب محاسبه شد. از ۸۲ ماه تحلیل شده، ۱۲ ماه معادل

۱۴/۶ در صد دوره در وضعیت خشکسالی با SWLI کمتر از منفی ۱ قرار داشتند که با مقدار نظری ۱۵/۸۷ درصد در توزیع نرمال همخوانی دارد. از ۱۲ ماه خشکسالی، ۱۰ ماه در طبقه خشکسالی شدید با SWLI کمتر از منفی ۱/۵ و ۳ ماه در طبقه خشکسالی حدی با SWLI کمتر از منفی ۲ قرار داشتند؛ بنابراین، ۸۳/۳ درصد ماه‌های خشکسالی در طبقات شدید یا حدی و تنها ۱۶/۷ درصد در طبقه خفیف قرار گرفتند. این الگو نشان می‌دهد که خشکسالی مخزن غالباً با افت ناگهانی جریان ورودی و نه به‌صورت تدریجی رخ می‌دهد. تحلیل شکل ۵ و مقایسه توصیفی SWLI با SPI-3 و SPEI-3 نیز نشان داد که رفتار شاخص هیدرولوژیکی با شاخص‌های هواشناسی هم‌راستا نیست. هر سه ماه خشکسالی حدی در بازه دسامبر ۲۰۲۳ تا فوریه ۲۰۲۴ رخ داد و SWLI به‌ترتیب مقادیر منفی ۲/۰۸، منفی ۲/۰۷۱ و منفی ۲/۱۳۱ را ثبت کرد؛ در همین دوره حجم مخزن از ۲۹/۵۱ به ۲۷/۸۴ و سپس ۲۸/۲۶ میلیون مترمکعب کاهش یافت. در مقابل، ۵۶ ماه معادل ۶۸/۳ درصد دوره در وضعیت نرمال و ۱۴ ماه معادل ۱۷/۱ درصد در وضعیت ترسالی قرار داشتند. بیشینه SWLI برابر ۱/۵۷۳ در می ۲۰۲۰ و هم‌زمان با حداکثر حجم ۱۲۴/۱۲ میلیون مترمکعب ثبت شد. همچنین در شکل ۶، سال ۲۰۲۳ با میانگین SWLI برابر منفی ۱/۳۴۷ خشک‌ترین سال هیدرولوژیکی بود؛ در حالی که میانگین SPEI برابر ۰/۰۴۴ و SPI برابر منفی ۰/۰۱۶ شرایطی نزدیک به نرمال را نشان دادند. این واگرایی بیانگر آن است که خشکسالی هیدرولوژیکی مخزن چاه‌نیمه بیش از آن که ناشی از بارش و تبخیر محلی باشد، تحت تأثیر کاهش جریان ورودی هیرمند و عوامل مدیریتی-فرامرزی قرار دارد.

بررسی توصیفی تغییرات حجم مخزن با متغیرهای اقلیمی
بررسی روابط توصیفی میان حجم مخزن و متغیرهای اقلیمی از اهداف اصلی این پژوهش بود و نتایج آن بینش مهمی درباره دینامیک هیدرولوژیکی مخزن چاه‌نیمه فراهم کرد. در این بخش، ضرایب همبستگی پیرسون فقط برای سنجش هم‌راستایی یا ناهم‌راستایی زمانی متغیرها به‌کار رفتند و نباید مبنای استنباط رابطه علی مستقیم تلقی شوند؛ زیرا حجم مخزن چاه‌نیمه، برخلاف متغیرهای اقلیمی، به‌شدت تحت تأثیر ورودی کنترل‌شده رودخانه هیرمند و تصمیمات مدیریتی بالادست قرار دارد.

بر اساس نتایج جدول ۵، در میان متغیرهای اقلیمی، شاخص شدت خشکسالی پالمر (PDSI) با ضریب همبستگی ۰/۴۴۵ بیشترین هم‌سویی نسبی را با تغییرات حجم مخزن نشان داد.

با این حال، این مقدار تنها معادل ضریب تبیین تقریبی ۰/۲۰ است؛ یعنی فقط حدود ۲۰ درصد تغییرات حجم مخزن را توضیح می‌دهد و بیش از ۸۰ درصد واریانس آن تبیین نشده باقی می‌ماند. بنابراین، این میزان هم‌سویی برای معرفی PDSI یا هر شاخص اقلیمی دیگر به‌عنوان پیش‌بینی‌کننده قابل اتکای حجم مخزن کافی نیست. همبستگی ضعیف سایر شاخص‌های هواشناسی نیز این نتیجه را تأیید می‌کند؛ به‌طوری که برای SPI مقدار ۰/۰۵- و برای SPEI مقدار ۰/۲۱۵- به‌دست آمد. از این‌رو، یافته اصلی این بخش نه معرفی یک شاخص اقلیمی برتر، بلکه نشان دادن ناکافی بودن شاخص‌های اقلیمی محلی برای تبیین رفتار مخزن چاه‌نیمه و تأکید بر نقش غالب جریان ورودی کنترل‌شده و عوامل مدیریتی-فرامرزی در تغییرات ذخیره مخزن است. همبستگی ضعیف سایر شاخص‌های هواشناسی (SPI با $r = -0.05$ و SPEI با $r = -0.215$) نیز این نتیجه‌گیری را تقویت می‌کند. بررسی توصیفی تأخیر زمانی بارش نیز نشان داد که همبستگی حجم مخزن با بارش یک ماه قبل ۰/۲۳۲- است؛ مقداری که فقط بیانگر ناهم‌راستایی خطی ضعیف است. این رابطه معکوس ضعیف می‌تواند ناشی از اثرات فصلی باشد؛ زیرا ماه‌های زمستان معمولاً بارش بیشتری دارند، در حالی که بیشینه حجم مخزن الزاماً در همان زمان رخ نمی‌دهد. در مقیاس‌های تجمعی‌تر، هم‌راستایی بین بارش و حجم مخزن اندکی بهبود یافت، اما همچنان این نتایج صرفاً در سطح توصیفی قابل تفسیرند. همبستگی بین دما و حجم مخزن نیز مثبت و ضعیف بود ($r = 0.21$) که در ظاهر با انتظار تئوریک ناسازگار است، زیرا معمولاً دمای بالاتر باید با تبخیر بیشتر و حجم کمتر همراه باشد. با این حال، این هم‌زمانی مثبت را می‌توان ناشی از هم‌وقوعی فصل گرم با دوره ذوب برف در ارتفاعات افغانستان و افزایش ورودی هیرمند دانست؛ بنابراین، این مقدار نیز لزوماً بازتاب اثر مستقیم دما بر حجم مخزن نیست.

شکل ۶، پراکنش مقادیر SPEI-3 و SWLI را به‌صورت مقایسه توصیفی نشان می‌دهد. ضریب همبستگی پیرسون بین این دو شاخص ۰/۲۱۵- است که بیانگر رابطه خطی ضعیف و ناهم‌راستایی نسبی میان شاخص هواشناسی و شاخص مبتنی بر ذخیره مخزن است. با توجه به آن که SPEI-3 از متغیرهای اقلیمی محاسبه می‌شود، در حالی که SWLI از حجم مخزن وابسته به ورودی کنترل‌شده به‌دست می‌آید، این مقایسه نباید به‌صورت تحلیل همبستگی میان دو فرایند هم‌سنخ تفسیر شود. در این زمینه، سه توضیح محتمل مطرح است: نخست، شرایط اقلیمی خشک در حوضه

همبستگی بین توازن آب اقلیمی و حجم مخزن نیز ۰/۲۵۴- بود که در همان چارچوب توصیفی، حاکی از ناهم‌راستایی نسبی میان شرایط اقلیمی محلی و وضعیت ذخیره مخزن است. در مجموع، نتایج جدول ۵، نشان می‌دهد که در میان متغیرهای اقلیمی، هیچ شاخصی توان تبیین و دقت کافی برای پیش‌بینی حجم مخزن چاه‌نیمه ندارد؛ در حالی که شاخص‌های هیدرولوژیکی مبتنی بر ذخیره و جریان، انطباق بسیار بیشتری با رفتار مخزن نشان می‌دهند. این یافته از نظر مدیریتی دارای اهمیت است، زیرا برای برنامه‌ریزی ذخیره مخزن، اتکا به پیش‌بینی‌های اقلیمی به‌تنهایی کافی نیست و باید اطلاعات مربوط به جریان ورودی و تصمیمات مدیریت آب در بالادست نیز مدنظر قرار گیرد.

بالادست ممکن است با تأخیر چندماهه بر جریان ورودی به مخزن اثر بگذارد؛ دوم، در سال‌های خشک منطقه‌ای احتمال دارد رها سازی آب در بالادست کاهش یابد و اثر آن با فاصله زمانی ظاهر شود؛ و سوم، اثرات فصلی نیز می‌توانند مؤثر باشند، به‌گونه‌ای که شاخص SPEI در تابستان به‌دلیل تبخیر بالا منفی می‌شود، در حالی که حجم مخزن در همین دوره ممکن است به‌سبب ورود آب ناشی از ذوب برف قبلی در سطح بالاتری قرار داشته باشد.

مقایسه توصیفی SPI و SWLI نیز نشان داد که مقدار $r = -0.05$ فقط بیانگر نبود رابطه خطی قابل ملاحظه میان این دو سری زمانی است و نباید به‌عنوان شاهی بر وجود یا عدم وجود رابطه علی مستقیم میان بارش محلی و حجم مخزن تلقی شود.

جدول ۵- خلاصه نتایج ضرایب همبستگی پیرسون بین حجم مخزن و متغیرهای اقلیمی

متغیر	ضریب همبستگی (R)	شدت رابطه	تفسیر علی
شاخص خشکسالی PDSI	۰/۴۴۵	متوسط	شرایط رطوبت منطقه‌ای در بلند مدت
تبخیر و ترقق بالقوه (PET)	۰/۲۵۷	ضعیف	اثر فصلی (همزمان با ذوب برف)
درجه حرارت	۰/۲۱۰	ضعیف	اثر فصلی (همزمان با ذوب برف)
بارش تجمعی شش ماهه	۰/۲۰۳	ضعیف	اثر تأخیری بارش حوضه بالادست
بیان آب	-۰/۲۵۴	ضعیف	اثر فصلی معکوس
SPEI-3m	-۰/۲۱۵	ضعیف	تفکیک خشکسالی اقلیمی و هیدرولوژیکی
بارندگی یک ماه قبل	-۰/۲۳۲	ضعیف	اثر فصلی معکوس
بارندگی فعلی	-۰/۰۳۱	غیرمعمول	عدم ارتباط مستقیم
SPI-3m	-۰/۰۵۰	متوسط	عدم ارتباط مستقیم

نتیجه‌گیری

Google Earth Engine و داده‌های Sentinel-2، CHIRPS، ERA5-Land و TerraClimate نشان دادند که سنجش از دور می‌تواند ابزاری مؤثر برای پایش چندزمانه مخازن و ارزیابی خشکسالی هیدرولوژیکی در سامانه‌های آبی فرامرزی باشد.

منابع

- Alademomi, A., Balogun, A.L., Al-Mutiry, M., Aina, Y.A. and Al-Amri, A., 2025. The spatio-temporal analysis of droughts using SPEI and satellite data. *Applied Sciences*, 15(4), 1865. <https://doi.org/10.3390/app15041865>
- Abatzoglou, J.T., Dobrowski, S.Z., Parks, S.A. and Hegewisch, K.C., 2018. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific Data*, 5(1), 170191. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191>

نتایج این پژوهش نشان داد که مخزن چاه‌نیمه در دوره ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۵ با کاهش معنی‌دار حجم و مساحت سطح آب مواجه بوده و تفسیر خشکسالی هیدرولوژیکی آن باید بر پایه شاخص‌های مبتنی بر ذخیره و جریان آب انجام شود، نه صرفاً شاخص‌های هواشناختی یا کشاورزی. در این چارچوب، شاخص SWLI به‌عنوان مبنای اصلی تشخیص خشکسالی هیدرولوژیکی، افت شدید ذخیره مخزن را به‌ویژه در سال ۲۰۲۳ و زمستان ۲۰۲۳-۲۰۲۴ به‌خوبی آشکار ساخت، در حالی که شاخص‌های SPI، SPEI و PDSI عمدتاً رفتار هم‌راستایی با تغییرات مخزن نشان ندادند. این ناهم‌زمانی بیانگر آن است که تغییرات ذخیره مخزن چاه‌نیمه بیش از آن که تابع مستقیم شرایط اقلیمی محلی باشد، تحت تأثیر جریان ورودی کنترل شده رودخانه هیرمند و عوامل مدیریتی-فرامرزی قرار دارد. همچنین، چارچوب تلفیقی مبتنی بر

- actually reflect? *Hydrology and Earth System Sciences*, 29, pp.1981–2002. <https://doi.org/10.5194/hess-29-1981-2025>
15. Li, Y., Gao, H., Zhao, G. and Tseng, K.H., 2022. A high-resolution bathymetry dataset for global reservoirs. *Remote Sensing of Environment*, 278, 113101. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113101>
 16. McFeeters, S.K., 1996. The use of the normalized difference water index in delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), pp.1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
 17. McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, pp.179–184.
 18. Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., et al., 2021. ERA5-Land: A global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13(9), pp.4349–4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
 19. Nabavi, S.O., Haimberger, L. and Samimi, C., 2020. Climatology of dust distribution over West Asia. *Aeolian Research*, 42, 100575. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2020.100575>
 20. Rafiei Taghanaki, Z., Nasr-Esfahani, M.A. and Mirabbasi Najafabadi, R., 2024. Investigating meteorological and groundwater drought relationships. *Iranian Water Research Journal*, 18(1). <https://doi.org/10.22034/IWRJ.2023.14530.2556>
 21. Shakeri, R., Amini, H., Fakheri, F. and Ketabchi, H., 2023. Assessment of drought conditions using SPI and SWLI. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, pp.101744–101760. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29522-5>
 22. Sharafati, A., Nabaei, S. and Shahid, S., 2021. Spatial assessment of meteorological drought features in Iran. *International Journal of Climatology*, 41(3), pp.1864–1884. <https://doi.org/10.1002/joc.6937>
 23. Siasar, H. and Ebrahimi, M., 2025. Agricultural drought monitoring using remote sensing indicators. *Iranian Water Research Journal*, 19(3), pp.75–94. <https://doi.org/10.22034/iwrj.2025.15218.2687>
 24. Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S. and López-Moreno, J.I., 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: SPEI. *Journal of Climate*, 23(7), pp.1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
 25. Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorín-Molina, C. and Morán-Tejeda, E., 2012. Accurate computation of a streamflow drought index. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(2), pp.318–332. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000433](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000433)
 26. Wada, Y., de Graaf, I.E.M. and van Beek, L.P.H., 2016. Human and climate impacts on global water resources. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 8(2), pp.735–763. <https://doi.org/10.1002/2015MS000618>
 3. AghaKouchak, A., Mirchi, A., Madani, K., Di Baldassarre, G., Nazemi, A., Alborzi, A. and Wanders, N., 2021. Anthropogenic drought: Definition, challenges, and opportunities. *Reviews of Geophysics*, 59(2), e2019RG000683. <https://doi.org/10.1029/2019RG000683>
 4. Boretti, A. and Rosa, L., 2024. Reassessing the projections of the World Water Development Report. *npj Clean Water*, 7(1), pp.1–12. <https://doi.org/10.1038/s41545-024-00298-2>
 5. Chang, L., Cheng, L., Zhang, L., Han, D., Zhang, J. and Liu, P., 2025. Remote sensing-based high-resolution reservoir drought index for identifying hydrological drought propagation. *Remote Sensing of Environment*, 328, 114859. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.114859>
 6. Cooley, S.W., Ryan, J.C. and Smith, L.C., 2021. Human alteration of global surface water storage variability. *Nature*, 591(7848), pp.78–81. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03262-3>
 7. Donchyts, G., Winsemius, H., Baart, F., Dahm, R., Schellekens, J., Gorelick, N. and Hurkmans, R., 2022. High-resolution surface water dynamics in Earth's small and medium-sized reservoirs. *Scientific Reports*, 12, 13776. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17074-6>
 8. Feyisa, G.L., Meilby, H., Fensholt, R. and Proud, S.R., 2014. Automated water extraction index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, pp.23–35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>
 9. Funk, C., Verdin, A., Michaelsen, J., Peterson, P., Pedreros, D. and Husak, G., 2022. A global satellite-assisted precipitation climatology. *Earth System Science Data*, 14(3), pp.1385–1399. <https://doi.org/10.5194/essd-14-1385-2022>
 10. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. and Moore, R., 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, pp.18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
 11. Hou, J., Van Dijk, A.I.J.M., Renzullo, L.J. and Larraondo, P.R., 2024. GloLakes: water storage dynamics for 27,000 lakes globally. *Earth System Science Data*, 16, pp.201–218. <https://doi.org/10.5194/essd-16-201-2024>
 12. Jiang, W., Ni, Y., Pang, Z., Li, X., Ju, H., He, G. and Qin, X., 2021. An effective water body extraction method with new water index for Sentinel-2 imagery. *Water*, 13(12), 1647. <https://doi.org/10.3390/w13121647>
 13. Koppa, A., Gebremichael, M., Zambon, R.C., Yeh, W.W.G. and Hopson, T.M., 2022. Seasonal hydropower planning for data-scarce regions. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 148(3), 04021104. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001514](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001514)
 14. Lema, F., Mendoza, P.A., Vásquez, N.A., Mizukami, N., Zambrano-Bigiarini, M. and Vargas, X., 2025. What does the Standardized Streamflow Index

27. Wang, Y., Ma, J., Xiao, X., Wang, X., Dai, S. and Zhao, B., 2022. Long-term dynamics of Poyang Lake surface water. *Remote Sensing*, 14(2), 239. <https://doi.org/10.3390/rs14020239>
28. Xu, H., 2006. Modification of NDWI for open water extraction. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), pp.3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
29. Yao, F., Livneh, B., Rajagopalan, B., Wang, J., Crétaux, J.F., Wada, Y. and Berge-Nguyen, M., 2023. Satellites reveal global lake storage decline. *Science*, 380(6646), pp.743–749. <https://doi.org/10.1126/science.abo2812>
30. Zhang, G., Yao, T., Xie, H., Yang, K., Zhu, L., Shum, C.K. and Chen, W., 2022. Response of Tibetan Plateau lakes to climate change. *Earth-Science Reviews*, 208, 103269. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103269>
31. Zhao, G., Li, Y., Zhou, L. and Gao, H., 2022. Evaporative water loss of global lakes. *Nature Communications*, 13, 3686. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31125-6>