

Multi-Scale Analysis of Sefidrud Dam Operational Dynamics Over a 16-Water-Year Period: Evidence of Behavioral Change and Nonstationary in the Inflow–Storage–Outflow Cycle

Hadi Modaberi^{1*}, Hossein Hakimi Khansar², Abbas Heidari³ and Morteza Karimi⁴

1- Assistance Professor, Department of Water Resources Monitoring, Environmental Research Institute, Academic Center for Education Culture & Research (ACECR), Rasht, Iran.

2- PhD Graduate, Department of Water Engineering, University of Tabriz - Expert in control and stability of water structures, Gilan Regional Water Authority.

3- Bachelor of Electrical-Electronics, Superintendent of Sefidrud Dam and Power Plant, Gilan Regional Water Authority.

4- Researcher, Department of Water Monitoring, Environmental Research Institute, Academic Center for Education Culture & Research (ACECR), Rasht, Iran.

* Modaberi8@gmail.com

Received: 18 May 2025

Revised: 17 June 2026

Accepted: 20 June 2026

Discussion: 22 December 2026



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Dams are commonly designed under assumptions of stationarity and the ability of the system to recover toward an equilibrium state. However, growing evidence shows that climatic and managerial pressures can violate these assumptions, leading to nonstationary behavior. In recent literature, “stationarity failure” has been used to describe the weakening of structural relationships among inflow, storage, and outflow—a condition in which a system may lose its capacity to return to a previous equilibrium state. The Sefidrud Dam (nominal capacity of approximately ~1,765 MCM) is a strategic infrastructure within the Sefidrud basin, playing a vital role in agricultural water supply, flood control, and hydropower generation. It has faced concurrent pressures from droughts, altered runoff patterns, and increasing downstream demands. Previous studies have been mostly univariate (e.g., trend analysis of inflow or water level alone) and have therefore neglected the closed “inflow–storage–outflow” cycle as a coherent dynamic system. This study focuses on three operational variables (inflow IFR, storage RSV, outflow OFR) – excluding water level (RWL) due to its perfect collinearity with to investigate quantitative evidence of a transition toward nonstationary behavior at the Sefidrud Dam using a 16-water-year daily dataset and an integrated multimethod approach.

Methodology: Daily data of three variables – inflow (IFR), reservoir storage volume (RSV), and total outflow (OFR) – were collected from the Sefidrud Dam monitoring network over 16 water years (from October 2009 to September 2025). The dataset had no missing values and covered all 5,844 days (including leap years). To detect structural and behavioral changes, a comprehensive analytical framework was applied: (1) Pettitt non-parametric test for abrupt change point detection (change in the central location of the distribution, not directly the mean);

(2) Mann–Kendall test coupled with Sen’s slope estimator to assess monotonic long-term trends; (3) STL (Seasonal-Trend decomposition using Loess) to separate trend, seasonal, and residual components; (4) rolling window correlation (365-day window) to examine the temporal evolution of pairwise relationships (IFR–RSV, RSV–OFR, IFR–OFR); (5) continuous wavelet transform (CWT) using the Morlet wavelet (cmor1.5-1.0) on the RSV time series to identify shifts in dominant oscillation scales. Additionally, a sensitivity test was performed by removing irrigation months (May to September) and re-running trend analyses on the remaining data to assess whether seasonal agricultural releases were the primary driver of observed changes. All computations and visualizations were carried out in Python using libraries `pymannkendall`, `stats models`, and `pywt`.

Results and Discussion: Descriptive statistics showed that IFR and OFR had very high coefficients of variation (CV of 149% and 162%, respectively), indicating strong daily fluctuations and strongly right-skewed distributions. Reservoir storage volume (RSV) exhibited intermediate variability, with its CV increasing from ~18% in early years to ~30% in later years – an early sign of weakening storage stability. The Pettitt test identified a significant structural break ($p < 0.001$) for all three variables around water year 2020–2021 (early 2020s). Mean RSV decreased from about 561 MCM before the break to about 298 MCM after the break, a drop of 46.9%. The Mann–Kendall test indicated significant downward trends for all variables ($p < 0.05$), but Sen’s slope values for IFR (-0.0001 MCM/day) and OFR (-2.05×10^{-5} MCM/day) were negligible, whereas the slope for RSV was -0.0483 MCM/day. Contrary to a simple inflow-reduction explanation, the long-term Sen’s slope of IFR was negligible, indicating that the storage decline cannot be attributed to a gradual, systematic reduction in inflow over the study period. The substantial decline in mean IFR after the break should therefore be interpreted as part of the structural shift rather than as evidence of a long-term monotonic trend.

STL decomposition revealed that the trend component of RSV declined sharply after 2020–2021, while the seasonal component remained stable throughout – indicating that the changes were non-seasonal and structural in nature. Rolling correlation analysis showed that the correlation between IFR and RSV fell from about 0.68 in the early period to near zero (or negative) after the break (sharp decline of the inflow–storage linkage), whereas the correlation between RSV and OFR increased from about 0.4–0.5 to above 0.8. This concurrent shift demonstrates a transition from an inflow-driven operational regime to a storage-driven regime, where release decisions increasingly depend on available storage rather than on incoming flows. Daily storage changes (ΔS) after the break exhibited larger interquartile range and negative skewness, indicating more frequent and rapid reservoir drawdowns. Continuous wavelet transform (CWT) revealed a striking shift: before 2021, most wavelet power was concentrated at the annual scale (~365 days), reflecting long-term planning and seasonal cycles. After the break, power shifted markedly toward shorter scales of 60–120 days – indicating a shift toward shorter-term fluctuations; however, linking this specifically to “reactive” decision-making would require additional operational data (e.g., release rules, demand patterns). The sensitivity test (removing irrigation months) showed that the downward trend of RSV remained statistically significant ($p < 0.001$), with the absolute Sen’s slope even increasing slightly (from -0.0483 to -0.0589), suggesting that seasonal agricultural releases were not the primary cause of the structural shift. Taken together, these multiple lines of quantitative evidence indicate that after water year 2020–2021 the Sefidrud Dam has experienced a substantial behavioral shift towards nonstationary, although longer-term data would be required to determine whether this shift is permanent or reversible.

Conclusion: This study provides convergent quantitative evidence – a ~46.9% storage decline, sharp decline of

inflow–storage correlation, increased short-term fluctuations, and a wavelet spectral shift from annual to 60–120 day scales – suggesting a strong transition towards nonstationary behavior at the Sefidrud Dam since water year 2020–2021 (early 2020s). Annual inflow reduction did not play a primary role; instead, endogenous system pressures (operational patterns, rising demand, managerial constraints) appear to be the main drivers. However, due to the limited 16-year record, it is not possible to definitively claim a permanent, irreversible “stationarity failure”; part of the observed changes could be associated with multi-year drought cycles or natural climatic variability. Extension of the time series to at least 30 years is necessary to confirm a persistent regime shift. The integrated analytical framework (change point test, trend analysis, STL, rolling correlation, and wavelet analysis) can serve as a general tool for dynamic health monitoring and early detection of regime shifts in other reservoir systems. Based on the findings, it is recommended to: (1) dynamically update reservoir performance curves to match the post-shift regime; (2) integrate continuous wavelet analysis into early warning systems as a leading indicator of instability; (3) employ data-driven and machine learning models (e.g., LSTM with SHAP) to restore or strengthen the functional inflow–storage linkage. Ultimately, this study highlights that dam performance assessment should not be limited to water deficit indicators or inflow trends; rather, “system dynamic health” and the stability of internal control linkages must be placed at the center of management and decision making.

Keywords: Transition to nonstationary; Reservoir operation; Dynamic correlation; Multi-scale analysis; Sefidrud Dam.

Conflict of Interest: The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article.

Funding: The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements: All information and results are presented in the text of the article. The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Authors’ contribution:

First Author: Data analysis and article writing.

Second Author: Software analysis, Model calibration.

Third Author: Data collection, Writing the initial draft.

Fourth Author: Formal Analysis, Validation

تحلیل چندمقیاسی دینامیک‌های عملیاتی سد سفیدرود در دوره ۱۶ سال آبی: شواهدی از تغییر رفتار و غیرایستایی در چرخه ورودی-ذخیره-خروجی

هادی مدبری^{۱*}، حسین حکیمی خوانسر^۲، عباس حیدری^۳ و مرتضی کریمی^۴

۱- استادیار گروه پایش منابع آب پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی، رشت، ایران.

۲- دکتر، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز و کارشناس کنترل و پایداری، وزارت نیرو- شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان.

۳- کارشناس برق - الکترونیک، رئیس سد و نیروگاه سد سفیدرود، وزارت نیرو شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان، ایران.

۴- پژوهشگر گروه پایش منابع آب، پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی، رشت، ایران.

* Modaberi8@gmail.com

نشریه هیدرولیک

انجمن هیدرولیک ایران

وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir



دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۸

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۲۷

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰

نقد و بررسی: ۱۴۰۵/۱۰/۰۱

چکیده: پایداری عملکرد مخازن بزرگ به توانایی آن‌ها در حفظ یک تعادل بلندمدت میان جریان ورودی، حجم ذخیره و جریان خروجی وابسته است. با این حال، شواهد فزاینده‌ای نشان می‌دهد که بسیاری از سامانه‌های مخزنی تحت فشارهای اقلیمی و مدیریتی، رفتار غیرایستا و تغییر رژیم را تجربه می‌کنند. در این مطالعه، دینامیک‌های عملیاتی سد سفیدرود با استفاده از داده‌های روزانه سه متغیر کلیدی جریان ورودی (IFR)، حجم ذخیره مخزن (RSV) و جریان خروجی (OFR) در دوره ۱۶ سال آبی (۱۳۸۸-۱۴۰۴) مورد تحلیل قرار گرفت. برای شناسایی تغییرات ساختاری و رفتاری سامانه، مجموعه‌ای از روش‌های آماری و چندمقیاسی شامل آزمون نقطه تغییر Pettitt، آزمون روند Mann-Kendall همراه با شیب Sen، تجزیه STL، همبستگی پویای پنجره‌ای و تحلیل موجک پیوسته (CWT) به کار گرفته شد. نتایج نشان‌دهنده وقوع یک شکست ساختاری معنادار در حوالی سال آبی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ (اوایل دهه ۲۰۲۰ میلادی) است که با کاهش حدود ۴۶/۹ درصدی حجم ذخیره مخزن (از ۵۶۱ به ۲۹۸ میلیون مترمکعب)، کاهش چشمگیر همبستگی بین IFR و RSV (از حدود ۰/۶۸ به مقادیر نزدیک به صفر، با میانگین ۰/۲۲ در دوره پس از گسست) و افزایش چشمگیر نوسانات کوتاه‌مدت همراه بوده است. میانگین همبستگی بین RSV و OFR نیز از ۰/۴۱ به ۰/۷۹ افزایش یافته است. تحلیل فصلی و آزمون حساسیت با حذف دوره آبیاری کشاورزی نشان داد که رهاسازی‌های فصلی، هرچند موجب تشدید نوسانات کوتاه‌مدت می‌شوند، عامل اولیه این تغییر رژیم نیستند. اگرچه شناسایی علت اصلی این گذار فراتر از داده‌های این مطالعه است، اما عوامل متعددی (تغییر الگوهای بهره‌برداری، خشکسالی و احداث سدهای بالادست) در آن دخالت دارند؛ سهم هر یک به دلیل محدودیت داده قابل تفکیک نیست. جابه‌جایی توان موجک RSV از مقیاس سالانه (۳۶۵ روز) به مقیاس ۶۰-۱۲۰ روز، نشانه‌ای از تغییر در منطق بهره‌برداری است. به نظر می‌رسد سامانه از برنامه‌ریزی بلندمدت به تصمیم‌گیری واکنشی حرکت کرده است. با این حال، تأیید قطعی این گذار نیازمند داده‌های بلندمدت‌تر و تحلیل تکمیلی است. بخشی از تغییرات مشاهده‌شده ممکن است ناشی از یک دوره خشکسالی بلندمدت باشد. تأیید نهایی نیازمند تحلیل هم‌زمان شاخص‌های اقلیمی است.

کلیدواژگان: گذار به ناپایداری، بهره‌برداری مخزن، همبستگی پویا، تحلیل چندمقیاسی، سد سفیدرود.

منابع آب، نقش‌های چندمنظوره‌ای در تأمین آب کشاورزی و آشامیدنی، تولید انرژی برق‌آبی، نظارت و مهار سیلاب و

۱- مقدمه
سدها به‌عنوان از جمله مهم‌ترین زیرساخت‌های مهندسی

در چنین شرایطی، سامانه وارد حالتی می‌شود که رفتار آن دیگر تابع خطی ورودی‌ها نیست و پاسخ‌های غیرمنتظره و ناپایدار بروز می‌کند.

این وضعیت در این پژوهش با عنوان «شکست ایستایی» تعریف می‌شود؛ مفهومی که به تضعیف شدید پایدار رابطه‌های ساختاری بین ورودی، ذخیره و خروجی اشاره دارد و فراتر از صرف وجود روند یا تغییر آماری در یک متغیر منفرد است (Serinaldi & Kilsby, 2015; Parolari & Manoli, 2019). پژوهش‌های انجام شده پیشین در سامانه‌های مخزنی مختلف نشان داده‌اند که حتی در شرایطی که جریان‌های ورودی کاهش معناداری ندارند، تغییرپذیری در الگوهای بهره‌برداری می‌تواند منجر به کاهش ذخیره، افزایش نوسان‌ها و بی‌ثباتی عملیاتی شود (Guariso et al., 1979; Giuliani et al., 2013; Zhou et al., 2019).

سد سفیدرود، با ظرفیت اسمی حدود ۱۷۶۵ میلیون مترمکعب، یکی از سدهای راهبردی کشور در حوضه آبریز سفیدرود به شمار می‌آید و نقش حیاتی در تأمین آب کشاورزی، تنظیم جریان، نظارت و مهار سیلاب و تولید انرژی برق‌آبی ایفا می‌کند. این سد در دهه‌های اخیر با فشارهای هم‌زمان اقلیمی و مدیریتی روبه‌رو بوده است؛ از جمله افزایش فراوانی خشکسالی‌ها، تغییرپذیری الگوی رواناب و پیچیده‌تر شدن هدف‌های بهره‌برداری (Farmer & Coles, 2003; Bonelli et al., 2015; Salazar & Toledo, 2020). پژوهش‌های انجام شده پیشین در این سد نیز به وجود رفتارهای غیرخطی، تغییرپذیری در ذخیره و نوسان‌های نامعوم در تراز آب اشاره کرده‌اند (Farmer & Coles, 2003; Marton et al., 2015). با این حال، بخش عمده‌ای از پژوهش‌های موجود، چه در سد سفیدرود و چه در دیگر سامانه‌های مخزنی، بر تحلیل‌های تک‌متغیره تمرکز داشته‌اند؛ مانند بررسی روند جریان ورودی، تراز مخزن یا حجم ذخیره به‌صورت مستقل (Gul et al., 2013; Kam, 2021). این رویکردها اگرچه برای شناسایی تغییرپذیری‌های کلی سودمند بوده اما از درک پویایی‌های درونی سامانه که ناشی از برهمکنش هم‌زمان ورودی، ذخیره و خروجی است، ناتوان بوده‌اند (Lee et al., 1987; Zhou, 2015).

تعدیل نوسان‌های هیدرولوژیکی ایفا می‌کنند. عملکرد پایدار این سامانه‌ها به‌طور سنتی بر فرض «ایستایی» استوار بوده است؛ فرضی که بر ثبات آماری ویژگی‌های کلیدی مانند میانگین، واریانس و ساختار همبستگی جریان‌ها در طول زمان تأکید دارد (Lee et al., 1987; Delleur, 2014). با این حال، شواهد فزاینده نشان می‌دهد که این فرضیه در دهه‌های اخیر، به‌ویژه تحت فشار هم‌زمان تغییرپذیری‌های اقلیمی، افزایش تقاضای انسانی و مداخله‌های عملیاتی، به‌طور فزاینده‌ای نقض شده است (Gul et al., 2013; Sharafati and Zahabiypun, 2013; Serinaldi & Kilsby, 2015; Zhou et al., 2019). در ادبیات نوین هیدرولوژی، مفهوم نایستایی (Nonstationarity) به‌عنوان یکی از چالش‌های بنیادی در تحلیل و مدیریت سامانه‌های منابع آب مطرح شده است. تغییرپذیری رژیم‌های بارش، دما و رواناب، در کنار اثرگذاری‌های انسان‌ساخت مانند سدسازی و تغییرپذیری کاربری اراضی، موجب تغییرات معنادار در توزیع‌های آماری جریان و ذخیره شده‌اند (Farmer & Coles, 2003; Wissner et al., 2012; Gul et al., 2013). این تغییرات نه‌تنها ویژگی‌های تک‌متغیره، بلکه رابطه‌های درونی بین اجزای سامانه‌های مخزنی را نیز دستخوش دگرگونی کرده‌اند (Giuliani et al., 2013; Zhou, 2014). در چارچوب سامانه‌های مخزنی، ایستایی شرط لازم برای تعریف یک حالت تعادلی یا steady-state است؛ حالتی که در آن مخزن می‌تواند پس از نوسان‌های کوتاه‌مدت ورودی یا خروجی، به رژیم عملکردی پیشین خود بازگردد. در چارچوب سامانه‌های مخزنی، ایستایی آماری شرط لازم برای تعریف یک رفتار شایان پیش‌بینی و بازگشت‌پذیر در بلندمدت است؛ به این معنا که مخزن بتواند پس از نوسانات کوتاه‌مدت ورودی یا خروجی، به الگوی عملکردی پیشین خود بازگردد (Lee et al., 1987; Marton et al., 2015). با این حال، پژوهش‌های چندی نشان داده‌اند که تغییرپذیری‌های تدریجی یا ناگهانی در سیاست‌های بهره‌برداری، تقاضای پایین‌دست یا شرایط هیدرولوژیکی می‌تواند این قابلیت بازبایی را تضعیف یا به‌طور کامل حذف کند (Jiménez García, 2012; Tongal et al., 2016; Hashemi Monfared et al., 2017; Wallington, 2021).

ایستایی در چرخه ورودی-ذخیره-خروجی این سد وجود دارد یا خیر. رویکرد یکپارچه اتخاذ شده در این پژوهش می‌تواند چارچوبی شایان تعمیم برای پایش سلامت پویایی دیگر سدهای چندمنظوره در شرایط فشارهای اقلیمی-انسانی مشابه فراهم آورد (Giuliani et al., 2013; Zhou et al., 2019).

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- داده‌ها

در این پژوهش داده‌ها شامل مجموعه‌ای از مشاهده‌های روزانه هیدرولوژیکی و عملیاتی سد سفیدرود است. این داده‌ها از طریق شبکه پایش و ثبت بهره‌برداری سد در بازه زمانی ۱۶ سال آبی (۱۳۸۸-۱۴۰۴) گردآوری شد. پایگاه داده اولیه بیش از ۳۰ متغیر را شامل می‌شود که جنبه‌های مختلف ورودی، ذخیره و خروجی سامانه مخزن را در نظر می‌گرفت. سه متغیر اصلی که چرخه عملیاتی سد را به صورت مستقیم شامل می‌شوند، برای تمرکز بر پویایی‌های اصلی عملکرد سد، برای تحلیل انتخاب شدند.

این متغیرها شامل جریان ورودی (IFR)، حجم ذخیره مخزن (RSV) و جریان خروجی کل (OFR) هستند. جریان ورودی (IFR) بیانگر مجموع ورودی‌های رودخانه‌ای و دیگر منابع مؤثر بر مخزن است و با واحد میلیون مترمکعب در روز (MCM/day) ثبت شده است. به دلیل رابطه قطعی حجم-ارتفاع و نبود بررسی رسوب‌گذاری در این دوره، تراز مخزن (RWL) از تجزیه و تحلیل اصلی حذف شده است. حجم ذخیره مخزن (RSV) به عنوان شاخص اصلی وضعیت انباشت آب، حجم آب موجود در مخزن را بر حسب میلیون مترمکعب (MCM) نشان می‌دهد. در نهایت، جریان خروجی کل (OFR) شامل مجموع همه‌ی خروجی‌های برنامه‌ریزی‌شده و ناخواسته مخزن، اعم از کاربردهای کشاورزی، آشامیدنی، صنعت، نیازهای زیست‌محیطی، نشت‌ها، دریاچه‌ها، خروجی نیروگاه و سرریز و ... بوده و با واحد میلیون مترمکعب در روز (MCM/day) بیان شده است. (متغیر تراز سطح آب مخزن (RWL) به دلیل هم‌خطی کامل با حجم مخزن از تجزیه و تحلیل‌های اصلی حذف و تنها در گزارش آمار توصیفی

2014). در مقابل، پژوهش‌های اخیر بر ضرورت تحلیل چرخه بسته «ورودی-ذخیره-خروجی» به عنوان یک سامانه پویایی منسجم تأکید کرده‌اند. شواهد نشان می‌دهد که تغییرپذیری در همبستگی‌های پویا بین این متغیرها می‌تواند نشانه‌ای زود هنگام از گذار رژیم و شکست ساختاری در عملکرد سد باشد (Giuliani et al., 2013; Tongal et al., 2016; Wallington, 2021). نادیده گرفتن این رابطه‌ها می‌تواند به برآوردی بیش از حد خوش‌بینانه از پایداری سامانه منجر شود.

پیشرفت در روش‌های آماری فراسنجه‌ای و تجزیه و تحلیل دوره‌های زمانی، امکان بررسی دقیق تر رفتارهای ناپایدار را فراهم کرده است. آزمون‌هایی مانند پتیت برای شناسایی نقطه‌های تغییرپذیری، من-کندال و شیب سن برای تحلیل روند، تجزیه STL برای تفکیک مؤلفه‌های روند و فصلی، و تحلیل‌های چندمقیاسی مانند موجک پیوسته برای آشکارسازی تغییرپذیری در مقیاس‌های زمانی تصمیم‌گیری‌ها، به طور گسترده در پژوهش‌های اخیر به کار رفته‌اند (Melo & Wendland, 2016; Stratimirović et al., 2020; Chalise et al., 2023). به‌ویژه تحلیل موجک نشان داده است که گذار از نوسان‌های بلندمدت به مقیاس‌های کوتاه‌مدت می‌تواند بازتابی از تغییرپذیری در منطق بهره‌برداری و افزایش تصمیم‌گیری‌های واکنشی باشد (Stratimirović et al., 2020; Sborshchikovi et al., 2021).

با وجود این پیشرفت‌ها، به کارگیری هم‌زمان و یکپارچه این ابزار در تجزیه و تحلیل چرخه عملیاتی سدها، به‌ویژه در پژوهش‌های داخلی، همچنان محدود باقی مانده است. شکاف اصلی این پژوهش در نبود ارزیابی چندمتغیره‌ای است که بتواند پایداری ساختاری سامانه مخزن را به عنوان یک ویژگی emergent ناشی از تعامل اجزا بررسی کند (Parolari & Manoli, 2019; Wallington, 2021).

بر این مبنا، این پژوهش با تمرکز بر سه متغیر کلیدی جریان ورودی (IFR)، حجم ذخیره (RSV) و جریان خروجی کل (OFR)، پویایی‌های عملیاتی سد سفیدرود را در یک بازه ۱۶ ساله آبی تحلیل می‌کند. پرسش محوری آن است که آیا شواهد کمی و معناداری از رخداد یک شکست

اولیه نگهداری شده است.

در پیش تحلیل‌ها، داده‌ها از لحاظ مقدارهای نامطلوب، وجود گسست و پرش‌های ناواقعی بررسی و ارزیابی شد. مجموعه داده اولیه برای هر چهار متغیر اصلی بدون هرگونه داده گمشده بود و تمام روزهای دوره ۱۶ سال آبی (۵۸۴۴ روز، شامل سال‌های کبیسه) را پوشش می‌داد. سال آبی بنابر تعریف متداول در ایران، از اول مهر تا پایان شهریور سال بعد در نظر گرفته شد تا هم‌راستایی زمانی داده‌ها با چرخه بهره‌برداری سد حفظ شود.

۲-۲- روش‌های آماری و تحلیلی

برای بررسی پایداری ساختاری و شناسایی شواهد احتمالی شکست ایستایی در چرخه ورودی-ذخیره-خروجی سد سفیدرود، از روش‌های آماری فراسنجه‌ای و تجزیه و تحلیل دوره‌های زمانی به‌صورت مکمل استفاده شد. انتخاب این روش‌ها بر اساس توانایی آن‌ها در رویارویی با داده‌های غیرنرمال، وجود همبستگی زمانی و احتمال رفتارهای نالیستا انجام شده است؛ ویژگی‌هایی که در پژوهش‌های انجام شده سامانه‌های مخزنی به‌طور گسترده گزارش شده‌اند.

در گام نخست، آزمون فراسنجه‌ای Pettitt برای شناسایی یک نقطه تغییرپذیری ناگهانی در مکان توزیع سری‌های زمانی (مانند میانه یا سطح مرکزی) به‌کار رفت. اگرچه خود آزمون به‌طور مستقیم میانگین را آزمون نمی‌کند اما پس از شناسایی نقطه تغییرپذیری، اختلاف میانگین قبل و بعد از آن به‌عنوان معیاری از شدت تغییرپذیری فیزیکی گزارش شده است. این آزمون فراسنجه‌ای، که به‌طور گسترده در تحلیل‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شود، امکان آشکارسازی گسست‌های ساختاری بدون نیاز به فرض توزیع خاص را فراهم می‌کند و برای تشخیص گذارهای رژیم‌ی در داده‌های مخزن مناسب است. تأکید می‌شود که آزمون Pettitt یک آزمون فراسنجه‌ای مبتنی بر رتبه است و تغییر در مکان مرکزی توزیع را شناسایی می‌کند، نه به‌طور مستقیم میانگین. گزارش اختلاف میانگین پیش و پس از نقطه تغییر تنها برای تفسیر بهتر شدت تغییر انجام شده است. به‌منظور سنجش وجود روندهای یکنواخت بلندمدت و تعیین اندازه آن‌ها، آزمون Mann-Kendall به‌همراه

برآورد شیب Sen استفاده شد. اگرچه آزمون Mann-Kendall استاندارد به خودهمبستگی زمانی حساس است و می‌تواند در دوره‌های با خودهمبستگی بالا (مانند داده‌های روزانه حجم مخزن) منجر به معناداری دروغین روند شود، در این پژوهش به دلیل ماهیت اکتشافی تجزیه و تحلیل‌ها و هم‌راستایی نتایج با سایر روش‌های مستقل (STL, Pettitt) و موجک)، از نسخه استاندارد آزمون استفاده شده است. با این حال، تأکید می‌شود که مقدارهای مطلق p-value ها باید با احتیاط تفسیر شوند و برای تأیید قطعی، استفاده از نسخه‌های اصلاح‌شده Modified Mann-Kendall پیشنهاد و تأکید می‌شود. لازم به یادآوری است که آزمون Pettitt فرض استقلال مشاهدات را دارد، در حالی که داده‌های روزانه مخزن دارای خودهمبستگی معناداری هستند. بنابراین، نقطه تغییر شناسایی‌شده توسط این آزمون باید به‌عنوان یک برآورد اولیه تلقی شده و در کنار دیگر روش‌های مستقل (STL و همبستگی پویا) تأیید شود. از آنجا که داده‌های روزانه حجم مخزن خودهمبستگی بالایی دارند (ضریب خودهمبستگی مرتبه اول حدود ۰/۹۸)، آزمون Mann-Kendall کلاسیک می‌تواند دچار خطای نوع اول (تشخیص روند دروغین) شود. از آنجا که هدف اصلی پژوهش، اکتشاف و هم‌راستایی با چند روش مستقل دیگر نقطه تغییر، STL، همبستگی پویا و موجک بوده، از نسخه ساده‌ی آزمون استفاده شده است. بنابراین، نباید به مقدارهای p-value به‌عنوان شواهد قطعی نگاه کرد. در پژوهش‌های بعدی، پیشنهاد و تأکید می‌شود از روش‌های اصلاح‌شده (Modified Mann-Kendall) یا pre-whitening استفاده شود.

در گام بعدی، برای تفکیک مؤلفه‌های مختلف سری‌های زمانی و بررسی تغییرپذیری‌های ساختاری در مقیاس‌های متفاوت، از تجزیه فصلی بر مبنای روش STL استفاده شد. این روش دوره زمانی را به سه مؤلفه روند (trend)، فصل (seasonal) و باقیمانده (residual) تفکیک می‌کند و امکان بررسی مستقل تحول روند بلندمدت و تغییرپذیری در دامنه نوسان‌های فصلی را فراهم می‌آورد.

تجزیه و تحلیل STL با دوره فصلی ۳۶۵ روز (period=365) و با رویکرد مقاوم (robust=True) انجام شد تا تأثیر داده‌های

معنی‌داری ۹۵ درصد بر مبنای نویز قرمز (red noise) و با استفاده از توزیع کای‌دو با دو درجه آزادی تعیین شد. این تجزیه و تحلیل امکان شناسایی تقویت یا تضعیف نوسان‌ها در بازه‌های زمانی مختلف و ارتباط آن‌ها با گذارهای ساختاری سامانه را فراهم می‌کند.

این روش‌ها شواهدی از ناپایداری و تغییرپذیری‌های ساختاری ارائه می‌دهند؛ با این حال، اثبات قطعی شکست ایستایی به معنای کلاسیک نیازمند آزمون‌های ایستایی تکمیل مانند ADF، KPSS است و یافته‌های به دست آمده را باید به عنوان نشانه‌هایی از گذار رژیم در نظر گرفت، نه اثبات قاطع ناپایداری.

همه محاسبه‌ها، تجزیه و تحلیل‌های آماری و تولید نمودارها با استفاده از زبان برنامه‌نویسی Python (نسخه ۳.۱۱) انجام شد. کتابخانه‌های تخصصی pymannkendall برای آزمون‌های روند، statsmodels برای تجزیه STL، pywt برای تحلیل موجک و scipy برای پردازش‌های آماری پایه به کار گرفته شدند.

۳- نتایج

۳-۱- آمار توصیفی چهار متغیر کلیدی

جدول ۱ آمار توصیفی ۳ متغیر عملیاتی اصلی سد سفیدرود شامل جریان ورودی (IFR)، حجم ذخیره مخزن (RSV) و جریان خروجی کل (OFR) را در بازه ۱۳۸۸-۱۴۰۴ ارائه می‌دهد. این شاخص‌ها تصویری کلی از دامنه تغییرپذیری‌ها، ناهمگنی و درجه نوسان‌پذیری هر متغیر فراهم می‌کنند و مبنای اولیه‌ای برای تفسیر رفتار پویایی سامانه مخزن به شمار می‌آیند. نتایج نشان می‌دهد که متغیرهای جریان ورودی و خروجی دارای پراکندگی بسیار بالایی هستند؛ به گونه‌ای که ضریب تغییرپذیری‌ها (CV) برای IFR و OFR به ترتیب حدود ۱۴۹ و ۱۶۲ درصد برآورد شده است. این مقدارهای بالا بیانگر نوسان‌های شدید روزانه و ناهمگنی زمانی جریان‌ها بوده و بازتابی از اثر هم‌زمان تغییرات هیدرولوژیکی بالادست و تصمیم‌گیری‌های بهره‌برداری در پایین‌دست است. وجود میانه‌های به نسبت کوچک در مقایسه با میانگین‌ها نیز گویای توزیع‌های چوله به راست و وقوع دوره‌های کوتاه‌مدت با دبی‌های بسیار بالا

نامطلوب کاهش یابد. دوره زمانی اصلی شامل سال‌های کبیسه (با ۳۶۶ روز) نیز با همان $\text{period}=365$ تحلیل شد؛ بررسی حساسیت نشان داد که حذف روزهای ۲۹ فوریه یا نگهداری آن‌ها تغییرپذیری معناداری در مؤلفه‌های روند و فصلی ایجاد نمی‌کند. همچنین مجموعه داده اولیه برای هر سه متغیر اصلی IFR، RSV، OFR بدون هرگونه داده گمشده (missing value) بود و همه روزهای دوره ۱۶ سال آبی (۵۸۴۴ روز) را پوشش می‌داد.

به منظور بررسی دگرگونی رابطه‌های درونی سامانه مخزن، تجزیه و تحلیل همبستگی پویا (Rolling Correlation) بین زوج متغیرهای IFR-RSV، OFR-RSV و OFR-IFR انجام شد. در تحلیل همبستگی پویا از ضریب همبستگی پیرسون (Pearson) (که روش پیش‌فرض در کد پایتون است) و پنجره لغزان ۳۶۵ روزه استفاده شد. تا تغییرات زمانی در ساختار همبستگی‌ها در مقیاس سالانه آشکار شود. لازم به یادآوری است که داده‌های IFR و OFR توزیعی به شدت چوله به راست دارند (جدول ۱). در چنین شرایطی، ضریب همبستگی پیرسون می‌تواند تحت تأثیر رخدادهای حدی قرار گیرد. از این رو، یافته‌های حاصل از این تحلیل باید با احتیاط تفسیر شوند. تضعیف شدید این همبستگی‌ها به عنوان یکی از نشانه‌های کلیدی از ناپایداری ساختاری و شکست ایستایی سامانه در نظر گرفته شده است.

در نهایت، برای شناسایی دوره‌های غالب نوسان و بررسی تغییرپذیری‌های چندمقیاسی در رفتار حجم ذخیره مخزن، تحلیل موجک پیوسته (Continuous Wavelet Transform - CWT) بر روی سری RSV انجام شد. این تحلیل با استفاده از موجک مادر Morlet از خانواده 1.0-1.5 cmor انجام شد که به دلیل توازن مناسب بین تفکیک زمانی و بسامدی (فرکانسی)، در تحلیل‌های هیدرولوژیکی کاربرد فراوانی دارد. مقیاس‌ها در بازه ۸ تا ۵۱۲ (معادل دوره‌های ۱۶ تا ۱۰۲۴ روز با تبدیل $\text{period} = 2 \times \text{scale}$ در نظر گرفته شدند. دوره زمانی RSV پیش از تجزیه و تحلیل با تفریق میانگین و تقسیم بر انحراف معیار، نرمال‌سازی گردید. توان موجک از مجذور قدر مطلق ضریب‌ها محاسبه شد. مخروط نفوذ (COI) با استفاده از آستانه e-folding لحاظ شد تا ناحیه‌های حاشیه‌ای که تحت تأثیر مرزهای دوره زمانی هستند از تحلیل خارج شوند. سطح

در هر دو متغیر است. حجم ذخیره مخزن (RSV) رفتاری بینابینی از خود نشان می‌دهد. اگرچه ضریب تغییرپذیری (CV) کل RSV در کل دوره حدود ۶۱ درصد است، اما بررسی تفکیکی بر مبنای نقطه تغییر ساختاری شناسایی شده توسط آزمون پتیت (ژوئیه ۲۰۲۱) نشان می‌دهد که ضریب تغییرپذیری روزانه RSV در دوره پیش از گسست (پیش از ژوئیه ۲۰۲۱) حدود ۱۸/۲ درصد و در دوره پس از گسست (پس از ژوئیه ۲۰۲۱) حدود ۲۹/۷ درصد است. این افزایش CV (از ۱۸/۲ به ۲۹/۷ درصد) بیانگر تشدید نوسان‌های نسبی ذخیره مخزن در رژیم جدید است. لازم به توضیح است که این اعداد مربوط به CV داده‌های روزانه RSV هستند و با CV میانگین روزانه ارائه شده در جدول ۷ (۵۲/۴ درصد پیش و ۷۰/۴ درصد پس) تفاوت دارند، زیرا پراکندگی لحظه‌ای و پراکندگی میانگین‌ها را نشان می‌دهد. این افزایش CV را می‌توان به‌عنوان یکی از نخستین شواهد کمی از تضعیف پایداری ذخیره مخزن و تشدید نوسان‌های انباشت آب در پاسخ به فشارهای ترکیبی اقلیمی و مدیریتی تفسیر کرد. به‌طور کلی، نتایج آمار توصیفی نشان می‌دهد که اگرچه مخزن تا حدی قادر به تعدیل نوسان‌های جریان بوده است، اما افزایش پراکندگی نسبی حجم ذخیره در طول زمان می‌تواند نشانه‌ای از نزدیک شدن سامانه به یک وضعیت ناپایدار و مستعد گذار رژیمی باشد.

۳-۲- دوره‌های زمانی چهار متغیر کلیدی

شکل ۱ تغییرپذیری‌های روزانه ۳ متغیر RSV، IFR و OFR را در بازه ۱۳۸۸-۱۴۰۴ نشان می‌دهد. بررسی چشمی این دوره‌های زمانی گویای تفاوت معنادار در رفتار بلندمدت و

کوتاه‌مدت متغیرهاست. جریان‌های ورودی و خروجی، همان‌گونه که از آمار توصیفی نیز برمی‌آید، دارای نوسان‌های شدید روزانه و دوره‌های اوج کوتاه‌مدت هستند، در حالی که متغیرهای وابسته به وضعیت مخزن رفتاری هموارتر اما با روند شایان تشخیص‌پذیر از خود نشان می‌دهند. یکی از ویژگی‌های برجسته شکل ۱، کاهش تدریجی سطح پایه حجم ذخیره مخزن (RSV) در طول دوره پژوهش است؛ کاهشی که به‌ویژه از سال آبی ۱۳۸۸-۱۳۹۹ به بعد شدت بیشتری می‌یابد. این افت تدریجی، نه به‌صورت یک گسست ناگهانی، بلکه در قالب یک روند کاهشی پیوسته ظاهر شده و بیانگر تغییرپذیری در تعادل بلندمدت سامانه مخزن است. هم‌زمان با این کاهش سطح پایه، دامنه نوسان‌های روزانه تغییر حجم مخزن (ΔS) و جریان خروجی کل (OFR) افزایش یافته است. این پدیده نشان می‌دهد که مخزن برای پاسخ‌گویی به نیازهای بهره‌برداری، ناچار به تغییرپذیری‌های سریع‌تر و شدیدتر در ذخیره و رهاسازی آب شده است. افزایش هم‌زمان تغییرپذیری‌ها و کاهش سطح پایه ذخیره، ترکیبی از رفتارها را شکل می‌دهد که می‌تواند به‌عنوان نشانه‌ای اولیه از تضعیف قابلیت تنظیمی مخزن و افزایش حساسیت سامانه به تکانه‌های ورودی تفسیر شود. در مجموع، تحلیل دوره‌های زمانی روزانه نشان می‌دهد که رفتار چهار متغیر کلیدی از یک رژیم به نسبت پایدار در سال‌های ابتدایی دوره، به تدریج به سمت وضعیتی با ذخیره کمتر، نوسان‌های بیشتر و عدم قطعیت بالاتر در سال‌های پایانی حرکت کرده است؛ الگویی که در ادامه، با استفاده از آزمون‌های آماری و تجزیه و تحلیل‌های چندمقیاسی، به‌طور کمی بررسی شود.

جدول ۱ آمار توصیفی چهار متغیر کلیدی در دوره ۱۳۸۸-۱۴۰۴

Table 1 Descriptive statistics of four key variables over the period 2009–2025

Variable	Mean	Standard deviation	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	CV (%)
IFR	4.735	7.042	0	0.778	2.333	5.616	79.137	148.73
RSV	491.818	298.09	30.83	242.256	424.674	712.683	1118.523	60.61
OFR	4.691	7.599	0	0.432	0.57	7.171	51.84	161.995

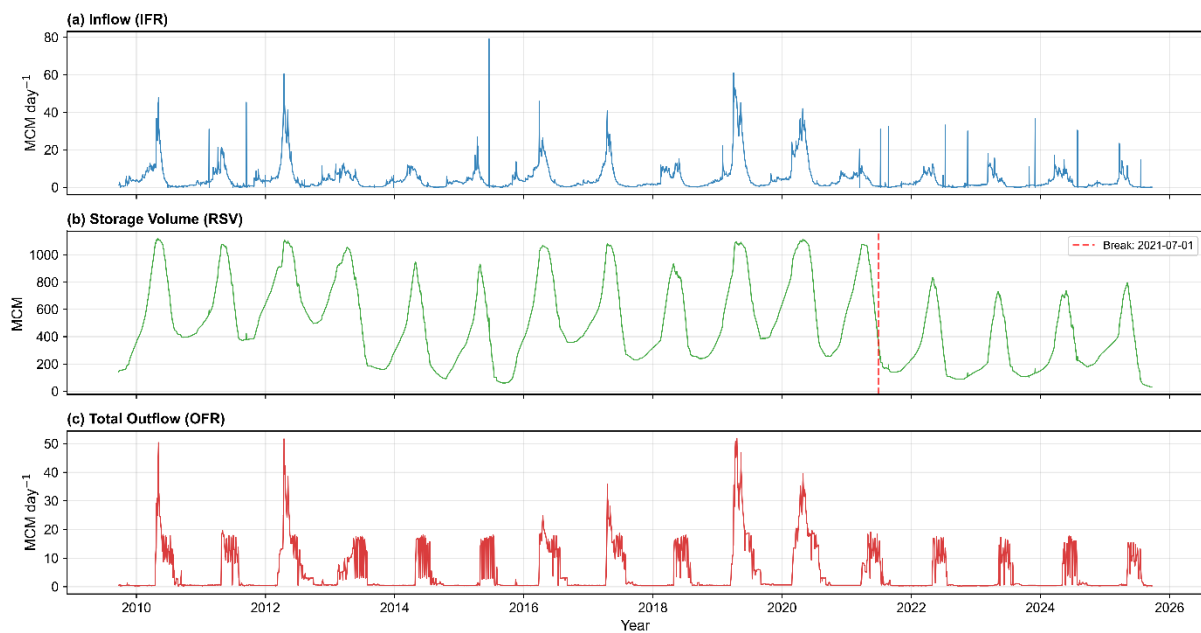


Fig. 1 Daily time series of four key operational variables (2009–2025)

شکل ۱ دوره‌های زمانی روزانه چهار متغیر عملیاتی اصلی (۱۳۸۸–۱۴۰۴)

جدول ۲ نمای کلی مقایسه آماره‌های توصیفی سه متغیر اصلی پیش و پس از نقطه تغییرپذیری ساختاری

Table 2 Comparison of descriptive statistics of the three main variables before and after the structural change point RSV break date

Variable	Pre-break Mean	Post-break Mean	Change (%)	Pre-break Std	Post-break Std	Pre-break CV (%)	Post-break CV (%)
IFR	5.503	2.597	-52.8	7.760	3.711	141.0	142.9
RSV	561.459	298.038	-46.9	294.306	209.743	52.4	70.4
OFR	5.417	2.671	-50.7	8.294	4.632	153.1	173.4

تغییرپذیری در میانگین متغیرها تفاوت قابل توجهی را نشان می‌دهد. جریان ورودی (IFR) نقطه تغییر خود را در تاریخ ۲ ژوئن ۲۰۲۲ (سال آبی ۲۰۲۱–۲۰۲۲) تجربه کرده است، در حالی که حجم ذخیره مخزن (RSV) و جریان خروجی کل (OFR) به ترتیب در تاریخ‌های ۱ ژوئیه ۲۰۲۱ و ۱۳ سپتامبر ۲۰۲۱ (هر دو مربوط به سال آبی ۲۰۲۰–۲۰۲۱) نقطه تغییرپذیری را نشان می‌دهند. در میان متغیرها، حجم ذخیره مخزن (RSV) قوی‌ترین تغییرپذیری ساختاری را داراست؛ به گونه‌ای که مقدار آماره $|U|$ آن (۱۹,۴۶۸,۰۱۹) در مقایسه با سایر متغیرها بیشینه بوده است. این نتیجه گویای آن است که تغییرپذیری در رژیم ذخیره مخزن نسبت به سایر مؤلفه‌های چرخه عملیاتی، هم از نظر شدت و هم از نظر انسجام آماری برجسته‌تر بوده است. بررسی دقیق‌تر سری RSV نشان می‌دهد که نقطه تغییرپذیری معنادار این متغیر در تاریخ ۱ ژوئیه ۲۰۲۱ (۱۰ تیر ۱۴۰۰)

۳-۳- شناسایی نقطه تغییرپذیری ساختاری –

آزمون Pettitt

به‌منظور شناسایی گسست‌های ناگهانی و تغییرپذیری‌های رژیمی بالقوه در رفتار متغیرهای عملیاتی سد سفیدرود، آزمون ناپارامتری Pettitt بر روی سه دوره زمانی RSV, IFR و OFR اعمال شد. این آزمون فراسنجه‌ای مبتنی بر رتبه، تغییرپذیری در مکان توزیع (مانند میانه یا سطح مرکزی) دوره را تشخیص می‌دهد. اگرچه خود آزمون به طور مستقیم میانگین را آزمون نمی‌کند اما پس از شناسایی نقطه تغییرپذیری، می‌توان اختلاف میانگین پیش و پس از آن را به‌عنوان معیاری از شدت تغییرپذیری فیزیکی گزارش کرد. نتایج آزمون Pettitt در جدول ۲ خلاصه شده است. بر مبنای این نتایج، هر سه متغیر مورد بررسی دارای یک نقطه تغییرپذیری آماری معنادار با سطح معنی‌داری بسیار بالا ($p < 0.001$) هستند. با این حال، زمان رخداد و شدت

تأثیر قرار داده است. به طور کلی، نتایج آزمون Pettitt نشان می‌دهد که سامانه مخزن سد سفیدرود از سال آبی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ (اوایل دهه ۲۰۲۰ میلادی) وارد رژیم جدید با سطح ذخیره پایین‌تر و الگوی متفاوتی از تنظیم خروجی شده است. این گسست آماری، یکی از شواهد کمی کلیدی برای بررسی فرض رخداد شکست ایستایی در عملکرد عملیاتی سد به شمار می‌آید و مبنایی برای تحلیل‌های تکمیلی روند و پویایی‌های زمانی در بخش‌های بعدی فراهم می‌آورد.

با توجه به خودهمبستگی بالای دوره‌های روزانه، نتایج آزمون Pettitt به تنهایی کافی نیست. با این حال، هم‌راستایی نقطه تغییرپذیری شناسایی شده (سال آبی ۲۰۲۰-۲۰۲۱ برای RSV و OFR با کاهش شدید مؤلفه روند در تحلیل STL و افت ناگهانی همبستگی IFR-RSV در تحلیل rolling correlation شکل‌های ۴ و ۵، اطمینان از واقعی بودن این گذار ساختاری را افزایش می‌دهد.

رخ داده است (شکل ۲). میانگین حجم ذخیره مخزن در دوره پیش از این تاریخ حدود ۵۶۱ میلیون مترمکعب بوده، در حالی که این مقدار در دوره پس از نقطه تغییرپذیری به حدود ۲۹۸ میلیون مترمکعب کاهش یافته است که معادل افتی حدود ۴۶/۹ درصد (برابر با ۲۶۳/۴ میلیون مترمکعب) می‌باشد. این کاهش شایان توجه، بیانگر یک جابه‌جایی اساسی در تعادل بلندمدت ذخیره مخزن است. هم‌زمانی این نقطه تغییرپذیری با تغییرپذیری‌های معنادار در سایر متغیرها، شواهد بیشتری از یک گذار ساختاری در سامانه مخزن فراهم می‌کند. به طور مشخص، جریان ورودی (IFR) کاهشی معادل ۲/۸۸۱ میلیون مترمکعب در روز (۵۴/۰- درصد) و جریان خروجی کل (OFR) کاهشی معادل ۲/۷۳۷ میلیون مترمکعب در روز (۵۰/۹- درصد) را تجربه کرده‌اند. هم‌راستایی زمانی این تغییرپذیری‌ها، بیانگر آن است که گسست شناسایی شده محدود به یک متغیر منفرد نبوده و بخش عمده‌ای از چرخه ورودی-ذخیره-خروجی را تحت

جدول ۳ نتایج آزمون Pettitt برای چهار متغیر عملیاتی

Table 3 Results of Pettitt test

Variable	Exact date (Gregorian)	p-value	Δ Mean	Change (%)	Max $ U_t (\times 10^6)$
IFR	2022-06-02	0.001	-2.881	-54.0 %	18.25
RSV	2021-07-01	0.001	-263.421	-46.9 %	19.46
OFR	2021-09-13	0.001	-2.737	-50.9 %	18.54

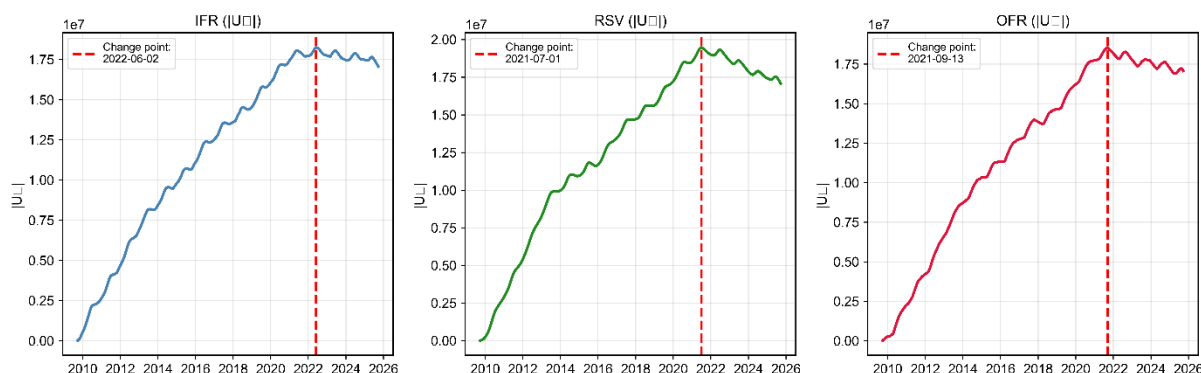


Fig. 2 Pettitt test for structural change point detection ($\alpha = 0.05$)

شکل ۲ نمای کلی آزمون Pettitt برای تشخیص نقطه تغییرپذیری ساختاری در دوره‌های زمانی چهار متغیر عملیاتی ($\alpha = 0.05$)

امکان شناسایی برای تغییرپذیری‌ها و سنجش نرخ تغییرپذیری تدریجی متغیرها را بدون نیاز به فرض نرمال بودن داده‌ها فراهم می‌کند. نتایج آزمون Mann-Kendall و شیب Sen در جدول ۴ ارائه شده است. بنابر این نتایج، بر مبنای آزمون Mann-Kendall، هر سه متغیر

۳-۴- روند خطی و شیب Sen

به‌منظور بررسی وجود روندهای یکنواخت بلندمدت در دوره‌های زمانی سه متغیر عملیاتی سد سفیدرود IFR، RSV و OFR، آزمون فراسنجه‌ای Mann-Kendall به‌همراه برآورد شیب Sen به‌کار گرفته شد. این رویکرد

روند نزولی نشان دادند ($p < 0.001$)، اما به دلیل خودهمبستگی بالای دوره‌های روزانه، این p -value ها را نمی‌توان ملاک قطعی قرار داد. در مقابل، شیب Sen که نسبت به خودهمبستگی مقاوم‌تر است، برای IFR و OFR مقادیرهای بسیار کوچکی (به ترتیب -0.0001 و -2.05×10^{-5} میلیون مترمکعب در روز) نشان می‌دهد، در حالی که شیب Sen برای RSV حدود -0.0483 میلیون مترمکعب در روز است. این واگرایی، حتی با در نظر گرفتن محدودیت خودهمبستگی، نشان می‌دهد که کاهش RSV یک الگوی پایدار بوده است با این حال، مقایسه مقادیرهای آماره Z و شیب Sen نشان می‌دهد که شدت و اهمیت فیزیکی این روندها بین متغیرها یکسان نیست. بیشترین شدت روند کاهشی مربوط به حجم ذخیره مخزن (RSV) است. مقدار آماره Z برابر با -21.28 و شیب Sen معادل -0.0483 میلیون مترمکعب در روز نشان می‌دهد که RSV طی دوره مورد بررسی و ارزیابی با یک کاهش تدریجی اما پایدار روبه‌رو بوده است. این مقدار شیب، در مقیاس زمانی بلندمدت، به کاهش شایان‌توجه ذخیره مخزن منجر شده و با نتایج به دست آمده از آزمون Pettitt و آمار توصیفی هم‌خوانی دارد. در مقابل، اگرچه جریان ورودی (IFR) و جریان خروجی کل (OFR) از نظر آماری دارای روند کاهشی معنادار هستند، مقادیرهای شیب Sen آن‌ها بسیار کوچک است (به ترتیب -0.0001 و -2.05×10^{-5} میلیون مترمکعب در روز). این موضوع نشان می‌دهد که تغییرپذیری‌های بلندمدت در ورودی و خروجی، در مقایسه با تغییرپذیری‌های ذخیره مخزن، از

نظر عملیاتی محدود بوده و نقش تعیین‌کننده‌ای در افت قابل‌توجه RSV ایفا نکرده‌اند. این واگرایی بین رفتار ورودی و ذخیره، نشان می‌دهد که افت ذخیره مخزن تنها ناشی از کاهش ورودی نبوده، بلکه تحت تأثیر تغییرپذیری‌ها در پویایی‌های درونی و الگوی بهره‌برداری سامانه قرار داشته است. بنابراین، اگرچه آزمون Mann-Kendall برای IFR روند کاهش آماری معناداری را نشان می‌دهد، مقدار شیب Sen بسیار کوچک است و مقایسه مقادیرهای سالانه نشان می‌دهد که این کاهش از نظر عملیاتی به‌اندازه افت $46/9$ درصدی RSV تعیین‌کننده نیست.

شیب Sen محاسبه‌شده برای حجم ذخیره مخزن (RSV) معادل -0.0483 میلیون مترمکعب در روز است. این مقدار در مقیاس سالانه به حدود $-17/6$ میلیون مترمکعب در سال تبدیل می‌شود. در طول دوره ۱۶ ساله بررسی ارزیابی‌ها، این کاهش تدریجی به طور بالقوه به افت تجمعی حدود ۲۸۲ میلیون مترمکعب منجر می‌شود که با کاهش $46/9$ درصدی میانگین RSV پس از نقطه تغییرپذیری (از ۵۶۱ به ۲۹۸ میلیون مترمکعب) هم‌خوانی نسبی دارد. هر چند این برآورد تقریبی است، اما تصویر روشنی از مقیاس فیزیکی تغییرپذیری‌ها را ارائه می‌دهد.

شکل ۳ نتایج تجزیه و تحلیل روند متغیرهای IFR، RSV و OFR را بر مبنای شیب Sen به‌صورت نگاره‌ای نمایش می‌دهد و نشان می‌دهد که روند کاهشی RSV از نظر آماری قوی‌تر و از نظر فیزیکی معنادارتر از روندهای مشاهده‌شده در IFR و OFR است.

جدول ۴ نتایج آزمون Mann-Kendall و شیب Sen برای چهار متغیر

Table 4 Results of Mann-Kendall test and Sen's slope for four variables

Variable	Trend direction	p-value	Z	Sen's slope	($\alpha=0.05$) Significant
IFR	decreasing	0.001	-10.64	-0.0001	Yes
RSV	decreasing	0.001	-21.28	-0.0483	Yes
OFR	decreasing	0.001	-10.06	-2.0495e-05	Yes

نکته: به دلیل خودهمبستگی بالای داده‌های روزانه، این مقادیرهای p -value باید با احتیاط تفسیر شوند.

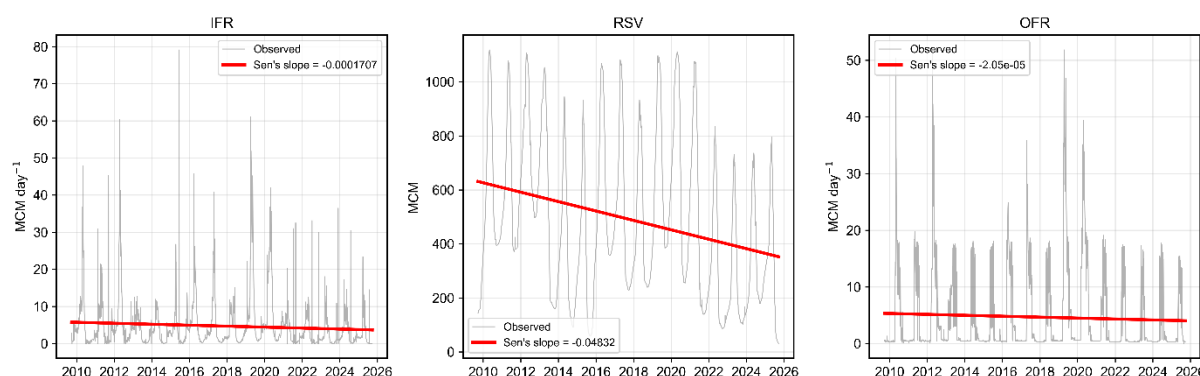


Fig. 3 Sen's slope trend analysis for four key variables

شکل ۳ تحلیل روند با شیب Sen برای چهار متغیر کلیدی

۳-۵- تجزیه STL و تحلیل فصلی

به منظور تفکیک مؤلفه‌های زمانی و بررسی نقش تغییرپذیری‌های فصلی در رفتار متغیرهای کلیدی، تجزیه و تحلیل دوره زمانی بر اساس روش STL برای حجم ذخیره مخزن (RSV) و جریان خروجی کل (OFR) انجام شد. این روش با جداسازی مؤلفه‌های روند (trend)، فصلی (seasonal) و باقیمانده (residual)، امکان ارزیابی مستقل تغییرپذیری‌های بلندمدت و نوسان‌های دوره‌ای را فراهم می‌کند. نتایج تجزیه STL که در شکل ۴ ارائه شده‌اند، نشان می‌دهند که مؤلفه روند RSV تا پیش از سال آبی ۲۰۲۰-۲۰۲۱ رفتاری به نسبت پایدار داشته، اما پس از این دوره کاهش شدیدی را تجربه کرده است. این کاهش نه به صورت یک نوسان گذرا، بلکه به عنوان یک افت پیوسته و فزاینده در مؤلفه روند ظاهر شده و با زمان‌بندی نقطه تغییر ساختاری شناسایی شده توسط آزمون Pettitt (سال آبی ۲۰۲۰-۲۰۲۱) هم‌راستایی دارد. چنین الگویی بیانگر آن است که افت حجم ذخیره مخزن بیشتر ناشی از تغییر در وضعیت تعادلی سامانه بوده است، نه نتیجه نوسان‌های کوتاه‌مدت یا فصلی. در مقابل، مؤلفه فصلی RSV در طول دوره پژوهش تغییر محسوسی در دامنه و الگوی خود نشان نمی‌دهد. ثبات نسبی این مؤلفه بیانگر آن است که چرخه‌های سالانه ورودی و بهره‌برداری، به رغم تغییرپذیری‌های بلندمدت در ذخیره، ساختار زمانی خود را تا حد زیادی حفظ کرده‌اند. البته این مشاهده به تنهایی نمی‌تواند نقش تغییرپذیری‌های فصلی بارش یا الگوی رهاسازی را رد کند. برای بررسی دقیق‌تر، باید داده‌های

بارش یا مؤلفه فصلی جریان ورودی (IFR) نیز به طور جداگانه تجزیه و تحلیل می‌شد که در این پژوهش انجام نشد. با این حال، پایداری مؤلفه فصلی RSV در طول دوره، همراه با کاهش شدید مؤلفه روند آن، دست کم نشان می‌دهد که افت ذخیره مخزن بیشتر ریشه در تغییرپذیری‌های بلندمدت و ساختاری دارد، نه تنها ناشی از نوسان‌های تکرارشونده فصلی. اما برای داوری قطعی درباره نقش بارش، به تجزیه و تحلیل مستقیم‌تری نیاز است. تجزیه و تحلیل STL برای جریان خروجی کل (OFR) نیز رفتاری مشابه را نشان می‌دهد. در حالی که مؤلفه فصلی OFR نوسان‌های به نسبت پایداری را در طول دوره حفظ کرده است، مؤلفه روند آن پس از سال آبی ۲۰۲۰-۲۰۲۱ دچار افت تدریجی شده است. این هم‌زمانی تغییرپذیری در مؤلفه‌های روند RSV و OFR، نشانه‌ای از بازتنظیم الگوی بهره‌برداری مخزن در پاسخ به کاهش ذخیره و محدودیت‌های جدید سامانه است.

در مجموع، نتایج تجزیه و تحلیل STL تأیید می‌کند که تغییرپذیری‌های مشاهده شده در حجم ذخیره مخزن بیشتر از جنس تغییرپذیری‌های ساختاری و بلندمدت بوده و نقش تغییرپذیری‌های فصلی در این فرآیند محدود است. این یافته، شواهد حاصل از آزمون‌های روند و نقطه تغییرپذیری را تقویت کرده و بر ناپیوستگی ذاتی سامانه مخزن در سال‌های اخیر دلالت دارد.

۳-۶- همبستگی پویا بین متغیرها

به منظور بررسی دگرگونی رابطه‌های درونی چرخه عملیاتی

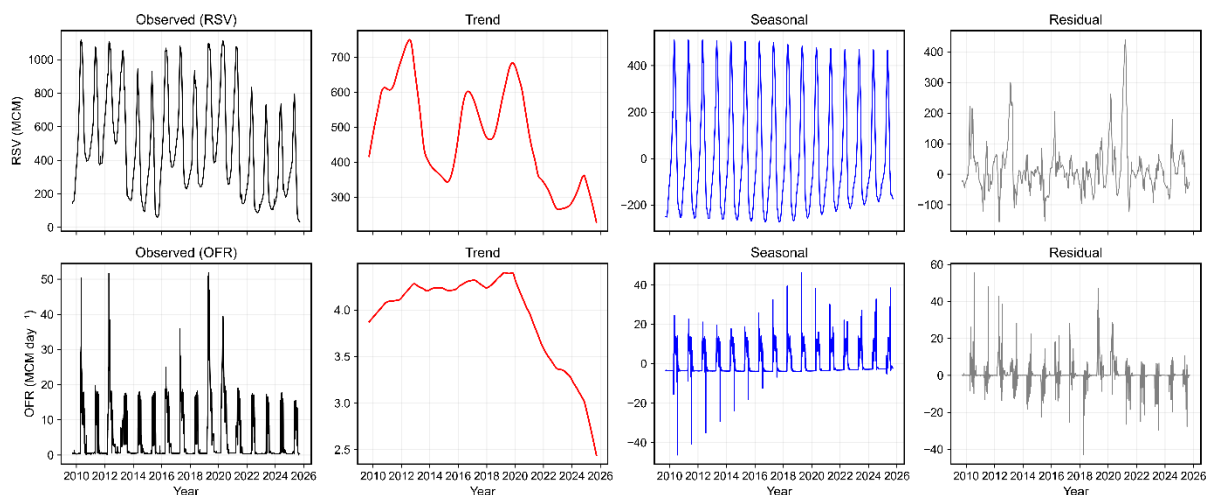


Figure 4 STL decomposition of reservoir storage (RSV) and total outflow (OFR)

شکل ۴ نمای کلی تجزیه و تحلیل STL حجم ذخیره مخزن (RSV) و جریان خروجی کل (OFR) در دوره زمانی ۱۳۸۸-۱۴۰۴

است. این جابه‌جایی هم‌زمان در الگوی همبستگی‌ها، شواهد روشنی از یک بازآرایی عملکردی در سامانه مخزن ارائه می‌دهد؛ به گونه‌ای که سامانه از یک رژیم مبتنی بر «مصرف و تنظیم بر مبنای ورودی» به سمت رژیمی مبتنی بر مصرف و تنظیم بر مبنای ذخیره موجود حرکت کرده است. چنین تغییری بیانگر افزایش فشار بر مخزن برای ایفای نقش بافری و جبرانی در شرایط کاهش یا ناپایداری ورودی‌هاست. به طور مشخص، میانگین همبستگی پنجره‌ای بین RSV و OFR از حدود ۰/۶۸ در دوره پیش از گسست به حدود ۰/۲۲ در دوره پس از آن کاهش یافته است. در مقابل، میانگین همبستگی بین RSV و OFR از حدود ۰/۴۱ به حدود ۰/۷۹ افزایش یافته است. این اعداد میانگین حسابی همه ضریب‌های همبستگی پنجره‌ای هستند که مرکز پنجره آن‌ها به ترتیب در بازه زمانی پیش و پس از ۱ ژوئیه ۲۰۲۱ قرار داشته است.

در مجموع، نتایج همبستگی پویا نشان می‌دهد که پیوندهای کلاسیک چرخه ورودی-ذخیره-خروجی در طول زمان دچار تضعیف و بازتعریف شده‌اند. این دگرگونی در ساختار رابطه‌ها، در کنار شواهد حاصل از آزمون‌های روند، تجزیه STL و آزمون Pettitt، یکی از قوی‌ترین نشانه‌های کمی از گذار سامانه به یک رژیم عملیاتی ناپایدار به شمار می‌آید.

۳-۷- نوسان‌های روزانه حجم مخزن (AS)

به منظور بررسی تغییرپذیری‌های کوتاه‌مدت عملکرد مخزن

سد سفیدرود در طول زمان، تحلیل همبستگی پویا با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون و پنجره لغزان ۳۶۵ روزه انجام شد. این رویکرد امکان ردیابی تغییرپذیری زمانی در شدت و جهت ارتباط بین متغیرها را فراهم می‌کند و برای شناسایی تضعیف یا بازآرایی پیوندهای عملکردی سامانه مخزن مناسب است. نتایج این تجزیه و تحلیل که در شکل ۵ نمایش داده شده‌اند، بیانگر تغییرپذیری معنادار در ساختار همبستگی‌ها طی دوره بررسی و ارزیابی است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، همبستگی بین جریان ورودی و حجم ذخیره مخزن $\rho(RSV, OFR)$ در سال‌های ابتدایی دوره (پیش از ۲۰۲۰) مقدارهای به نسبت بالایی اغلب بالای ۰/۶ داشته که نشان‌دهنده وابستگی قوی ذخیره مخزن به ورودی‌های جاری بوده است. با این حال، پس از نقطه تغییر ساختاری در ژوئیه ۲۰۲۱، این همبستگی به تدریج کاهش یافته و به مقدارهای بسیار پایین‌تر (در برخی بازه‌ها نزدیک به صفر یا منفی) می‌رسد. این افت چشمگیر بیانگر تضعیف نقش ورودی‌های لحظه‌ای در تعیین وضعیت ذخیره مخزن در رژیم جدید است. در مقابل، همبستگی بین حجم ذخیره مخزن و جریان خروجی کل $\rho(RSV, OFR)$ روندی افزایشی را تجربه کرده است. مقدار این همبستگی که در اوایل دوره در محدوده ۰/۴ تا ۰/۵ نوسان داشت، پس از سال ۲۰۲۱ به طور محسوسی افزایش یافته و در برخی سال‌ها به بالای ۰/۸ می‌رسد. این افزایش نشان‌دهنده وابستگی فزاینده تصمیم‌گیری‌های رهاسازی به میزان ذخیره موجود در مخزن

و شدت تنظیم‌های روزانه، تغییرپذیری‌های روزانه حجم ذخیره مخزن (ΔS) در دو دوره زمانی پیش و پس از نقطه تغییر ساختاری (پیش و پس از ۱ ژوئیه ۲۰۲۱) تجزیه و تحلیل قرار شد.

ΔS نشان‌دهنده تغییرپذیری‌های روزانه حجم ذخیره مخزن (Daily Change in Reservoir Storage) است و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta S(t) = S(t) - S(t-1) \quad (1)$$

که در آن $S(t)$ حجم ذخیره مخزن در روز t متغیر RSV در جدول داده‌ها و $S(t-1)$ حجم ذخیره مخزن در روز قبل این متغیر، در واقع همان نرخ تغییرپذیری روزانه ذخیره است و برای بررسی نوسان‌های کوتاه‌مدت و رفتار پویایی مخزن به کار رفته است.

شکل ۶ توزیع این تغییرپذیری‌ها را به صورت جعبه‌نمودار برای دو دوره زمانی نمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که پس از ژوئیه ۲۰۲۱، دامنه نوسان‌های روزانه حجم مخزن به طور محسوسی افزایش یافته است. افزایش فاصله چارکی (IQR) بیانگر تشدید پراکندگی تغییرپذیری‌های روزانه و افزایش شدت تنظیم‌های کوتاه‌مدت مخزن است. افزون بر این، شکل توزیع ΔS از حالتی به نسبت متقارن در دوره پیش از گسست، به توزیعی چوله به چپ در دوره پس از آن تغییر کرده است. چوله‌شدن منفی توزیع ΔS نشان‌دهنده افزایش فراوانی تغییرات منفی بزرگ، یعنی تخلیه‌های سریع و شدید مخزن، در مقایسه با دوره پیشین است. این رفتار بیانگر آن است که مخزن در سال‌های اخیر (پس از ۲۰۲۱) بیش از گذشته در معرض تصمیم‌گیری‌های بهره‌برداری واکنشی و کوتاه‌مدت قرار گرفته و قابلیت تنظیم تدریجی آن تضعیف شده است. افزایش هم‌زمان دامنه نوسان‌ها و عدم تقارن توزیع، یکی از نشانه‌های بارز ناپایداری عملیاتی در مقیاس روزانه به شمار می‌آید.

۳-۸- تجزیه و تحلیل چندمقیاسی با موجک پیوسته (CWT)

برای بررسی دگرگونی الگوهای نوسانی حجم ذخیره مخزن در مقیاس‌های زمانی مختلف، تجزیه و تحلیل

موجک پیوسته (CWT) بر روی دروه زمانی RSV انجام شد. شکل ۷ طیف توان موجک RSV را در طول دوره بررسی و ارزیابی و در بازه‌ای از مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت تا بلندمدت نشان می‌دهد. نتایج این تجزیه و تحلیل بیانگر تفاوت آشکار بین دو دوره پیش و پس از نقطه تغییرپذیری ساختاری (حدود سال ۲۰۲۱) است. در دوره پیش از این سال، بیشترین توان موجک در مقیاس‌های سالانه و نزدیک به ۳۶۵ روز متمرکز بوده که نشان‌دهنده چیرگی تصمیم‌گیری‌ها و تنظیم‌های مبتنی بر چرخه‌های بلندمدت و فصلی در بهره‌برداری از مخزن است. در مقابل، پس از سال ۲۰۲۱، تمرکز توان موجک به طور محسوسی به سمت مقیاس‌های کوتاه‌تر، به‌ویژه در بازه ۶۰ تا ۱۲۰ روز، جابه‌جا شده است. افزایش توان در این مقیاس‌ها نشان می‌دهد که رفتار حجم ذخیره مخزن بیش از گذشته تحت تأثیر نوسان‌های کوتاه‌مدت و تصمیم‌گیری‌های واکنشی قرار گرفته است.

این جابه‌جایی طیفی از مقیاس‌های بلندمدت (سالانه) به مقیاس‌های کوتاه‌تر (۶۰-۱۲۰ روز) نشان می‌دهد که نوسان‌های حجم ذخیره مخزن در دوره پس از گسست، بیشتر تحت تأثیر فرایندهایی با دوره بازگشت کوتاه‌تر قرار گرفته است. اگرچه این الگو می‌تواند ناشی از تغییرپذیری در منطق بهره‌برداری (مانند اولویت‌دهی به پاسخ‌های کوتاه‌مدت) باشد، اما برای نسبت‌دادن قطعی آن به «تصمیم‌گیری‌های اضطراری» یا «واکنشی» به داده‌های تکمیلی مانند قواعد رهاسازی، الگوی تقاضا یا گزارش‌های مدیریتی نیاز است. بنابراین، این یافته تنها به عنوان یک شاهد چندمقیاسی از تغییرپذیری رفتار سامانه گزارش می‌شود، نه اثبات قطعی تغییرپذیری در نوع تصمیم‌گیری. چنین تغییرپذیری واضحی با شواهد ناشی از افزایش نوسانات ΔS و تضعیف همبستگی ورودی-ذخیره سازگار بوده و یکی دیگر از نشانه‌های کلیدی ناپایداری سامانه به شمار می‌آید.

برای بررسی کمی تغییرپذیری توزیع ΔS ، آماره‌های توصیفی آن شامل میانگین، میانه، دامنه بین‌چکلی (IQR)، ضریب چولگی (Skewness)، شمار روزهای با کاهش بیش از ۵ میلیون مترمکعب ($\Delta S < -5 \text{ MCM}$) و درصد این روزها

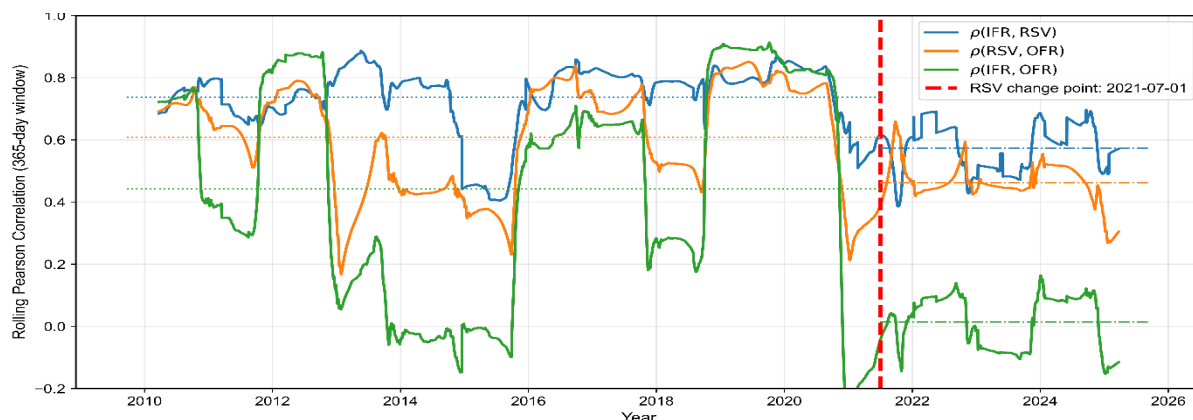


Fig. 5 Rolling Pearson correlation (365-day window) between key operational variables

شکل ۵ نمای کلی همبستگی پویای پنجره‌ای ۳۶۵ روزه بین متغیرهای کلیدی

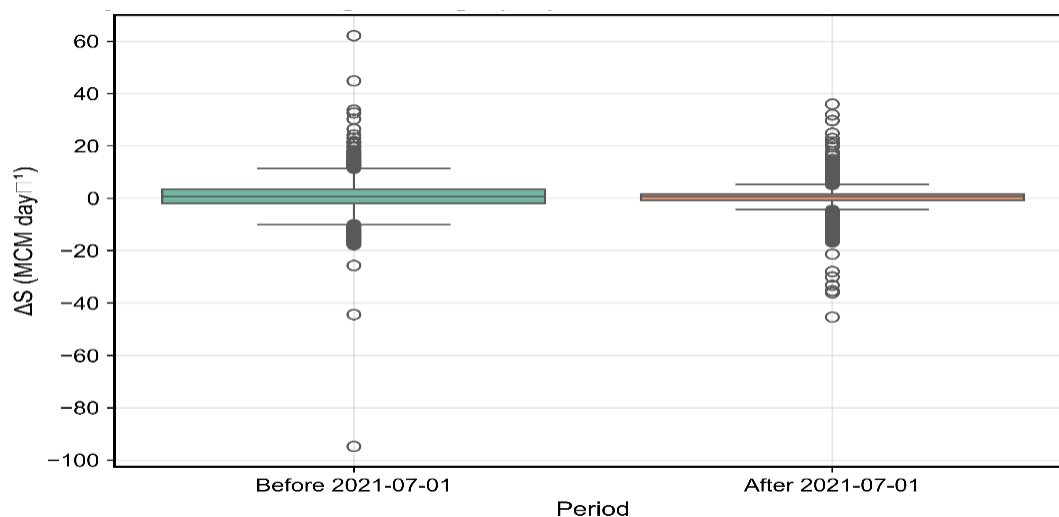


Fig. 6 Daily reservoir storage change (ΔS) before and after the structural break (July 2021)

شکل ۶ نمای کلی جعبه‌نمودار تغییرپذیری روزانه حجم ذخیره مخزن (ΔS) در دو دوره پیش و پس از نقطه تغییرپذیری ساختاری (ژوئیه ۲۰۲۱)

چولگی در دوره پس از گسست کاهش یافته است. درصد روزهای با کاهش شدید ($\Delta S < -5$ MCM) از ۱۷ درصد به ۱۶/۵ درصد کاهش ناچیزی داشته، اما شمار مطلق این روزها از ۷۳۳ به ۲۵۵ روز کاهش یافته که با کوتاه‌تر شدن دوره پس از گسست (حدود ۴ سال در مقابل ۱۲ سال) همخوانی دارد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که اگرچه مخزن در دوره پس از گسست با ذخیره کمتری روبه‌رو است، اما نوسان‌های روزانه آن شدت کمتری داشته و رویدادهای تخلیه شدید نسبت به دوره پیشین کمتر شده است؛ موضوعی که می‌تواند ناشی از مدیریت محتاطانه‌تری در شرایط کمبود آب باشد.

در دو دوره پیش و پس از ژوئیه ۲۰۲۱ محاسبه شد (جدول ۵). نتایج نشان می‌دهد که میانگین ΔS از 0.048 MCM/day در دوره پیش از گسست به -0.206 MCM/day در دوره پس از گسست تغییر یافته است، که بیانگر چیرگی تخلیه خالص مخزن در رژیم جدید است. میانه ΔS از 0.057 به -0.052 MCM/day کاهش یافته اما همچنان مثبت باقی مانده است. دامنه بین‌چکلی (IQR) از 0.05 به 0.0462 MCM/day کاهش یافته که نشان‌دهنده کاهش دامنه تغییرپذیری‌های روزانه در دوره پس از گسست است (بر خلاف انتظار اولیه). ضریب چولگی در هر دو دوره منفی است (به ترتیب -0.951 و -0.675) (که نشان‌دهنده چولگی به چپ و وجود دنباله منفی در توزیع ΔS است، اما شدت

جدول ۵ آماره‌های تغییرپذیری‌های روزانه حجم ذخیره مخزن (ΔS) پیش و پس از نقطه تغییرپذیری ساختاری (ژوئیه ۲۰۲۱)

Table 5 Statistics of daily reservoir storage change (ΔS) before and after the structural break (July 2021)

Period	Mean (MCM/day)	Median (MCM/day)	IQR (MCM/day)	Skewness	Days with $\Delta S < -5$ MCM	Percentage (%)
Before July 2021	0.048	0.657	5.4	-0.951	733	17
After July 2021	-0.206	0.562	2.462	-0.675	255	16.5

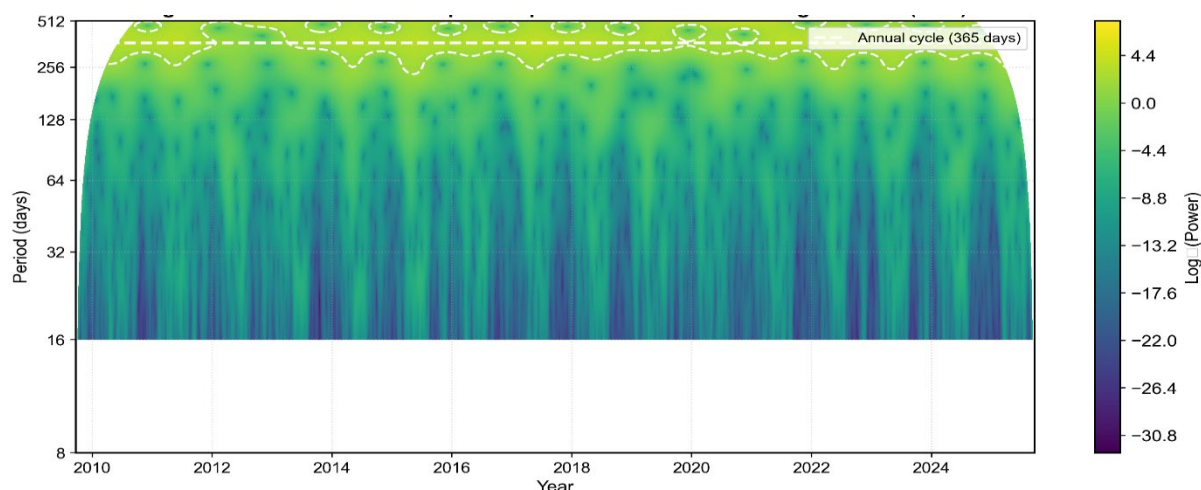


Fig. 7 Continuous wavelet power spectrum of reservoir storage volume (RSV)

شکل ۷ نمای کلی طیف توان موجک پیوسته حجم مخزن (RSV)

۳-۹- جدول‌های توصیفی و سالانه

جدول ۶ آمار سالانه حجم ذخیره مخزن (RSV)، جریان خروجی کل (OFR) و جریان ورودی (IFR) را برای بازه زمانی ۱۶ سال آبی (۱۳۸۸-۱۴۰۴) ارائه می‌دهد. لازم به توضیح است بررسی مقدارهای جدول نشان می‌دهد که میانگین حجم ذخیره سالانه (RSV) در سال‌های ابتدایی دوره (۱۳۸۹ تا ۱۳۹۲) مقدارهای به نسبت بالایی (۵۷۱ تا ۷۲۲ میلیون مترمکعب) داشته است. از سال آبی ۱۳۹۳ به بعد، ذخیره مخزن با نوسان‌های شایان توجهی همراه بوده و به‌ویژه از سال ۱۴۰۰ (۲۰۲۱) به بعد، مقدارهای آن به شدت کاهش یافته و در سطح ۲۶۵ تا ۳۲۶ میلیون مترمکعب قرار گرفته است. حجم ورودی کل سالانه (IFR) و حجم خروجی کل سالانه (OFR) نیز رفتار همانندی دارند؛ هرچند در سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ (۲۰۱۹ و ۲۰۲۰) مقادیر ورودی و خروجی به بیش از ۳۲۰۰ میلیون مترمکعب رسیده است، اما پس از سال ۱۴۰۰، هر دو متغیر کاهش چشمگیری را تجربه کرده‌اند. این الگوها هم‌سو با نتایج آزمون پتیت (جدول ۲) و تجزیه و تحلیل روند (جدول ۳) بوده و کاهش شدید ذخیره مخزن پس از نقطه تغییرپذیری ساختاری در ژوئیه ۲۰۲۱ را تأیید می‌کنند.

به منظور بررسی کمی اثرگذاری‌های گسست ساختاری بر متغیرهای اصلی سامانه، آماره‌های توصیفی سه متغیر جریان ورودی (IFR)، حجم ذخیره مخزن (RSV) و جریان خروجی کل (OFR) در دو دوره «پیش از نقطه تغییرپذیری» (پیش از ۱ ژوئیه ۲۰۲۱، معادل پایان سال آبی ۱۳۹۹) و «پس از نقطه تغییرپذیری» (از ۱ ژوئیه ۲۰۲۱ به بعد) محاسبه و در جدول ۷ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که میانگین همه متغیرها در دوره پس از گسست کاهش شدیدی داشته است. میانگین حجم ذخیره مخزن از ۵۶۱/۴۵۹ به ۲۹۸/۰۳۸ میلیون مترمکعب کاهش یافته (افت ۴۶/۹ درصد). ضریب تغییرپذیری‌های (CV) RSV از ۵۲/۴ به ۷۰/۴ درصد افزایش یافته که بیانگر افزایش نوسان‌های نسبی ذخیره در رژیم جدید است. جریان ورودی (IFR) با کاهش ۵۲/۸ درصدی (از ۵/۵۰۳ به ۲/۵۹۷ میلیون مترمکعب در روز) و جریان خروجی کل (OFR) با کاهش ۵۰/۷ درصدی (از ۵/۴۱۷ به ۲/۶۷۱ میلیون مترمکعب در روز) روبه‌رو شده‌اند. ضریب تغییرپذیری IFR اندکی افزایش یافته (از ۱۴۱/۰ به ۱۴۲/۹) و ضریب تغییرپذیری OFR افزایش محسوس‌تری (از ۱۵۳/۱ به

۱۷۳/۴) داشته است. این یافته‌ها بیانگر رخداد یک گذار رفتاری شایان توجه در چرخه ورودی-ذخیره-خروجی سد سفیدرود از سال آبی ۱۴۰۰ به بعد می‌باشد.

جدول ۶ آمار سالانه حجم ذخیره مخزن (RSV)، جریان خروجی کل (OFR) و جریان ورودی (IFR) در دوره ۱۳۸۸-۱۴۰۴

Table 6 Annual statistics of reservoir storage (RSV), total outflow (OFR), and inflow (IFR) over the period 2009–2025

WY	Annual mean RSV (MCM)	Annual total OFR (MCM)	Annual total IFR (MCM)
2010	571.48	1916.03	2163.4
2011	601.59	1451.68	1509.27
2012	722.56	2630	2748.25
2013	627.49	1710.26	1379.08
2014	380.64	1217.81	1150.6
2015	334.29	1147.05	1191.85
2016	557.11	1945.48	2238.29
2017	560.14	1962.76	1833.17
2018	462.5	1308.8	1320.84
2019	610.04	3478.38	3626.13
2020	678.23	3367.42	3236.09
2021	543.02	1392.89	1343.08
2022	326.52	1057.7	1045.12
2023	265.85	858.51	905.4
2024	306.63	1004.72	1153.58
2025	324.04	961.09	811.72

جدول ۷ آمار سالانه متغیرهای IFR، RSV و OFR در دو دوره قبل و بعد از نقطه تغییر

Table 7 Annual statistics of IFR, RSV, and OFR variables in two periods: before and after change point

Variable	Pre-break Mean	Post-break Mean	Change (%)	Pre-break Std	Post-break Std	Pre-break CV (%)	Post-break CV (%)
IFR	5.503	2.597	-52.8	7.760	3.711	141.0	142.9
RSV	561.459	298.038	-46.9	294.306	209.743	52.4	70.4
OFR	5.417	2.671	-50.7	8.294	4.632	153.1	173.4

آبیاری (اردیبهشت تا شهریور) از دوره زمانی حذف و آزمون Mann-Kendall و شیب Sen مجدداً برای متغیر حجم ذخیره مخزن (RSV) اجرا شد (جدول ۸). این تحلیل تنها بر داده‌های ماه‌های مهر تا فروردین متمرکز است که در آن‌ها فشار مستقیم رهاسازی کشاورزی حداقلی است.

۳-۱۰- آزمون حساسیت با حذف فصل آبیاری کشاورزی

به‌منظور ارزیابی نقش رهاسازی‌های فصلی کشاورزی در شکل‌گیری روندهای مشاهده‌شده، یک آزمون حساسیت تکمیلی انجام شد که در آن داده‌های مربوط به ماه‌های

جدول ۸ آزمون حساسیت من-کندال و شیب سن برای حجم ذخیره مخزن (RSV) در دو حالت: کل داده‌ها و حذف فصل آبیاری (اردیبهشت تا شهریور)

Table 8 Sensitivity test of Mann-Kendall and Sen's slope for reservoir storage (RSV): full data vs. removal of irrigation season (May to September)

Test scenario	Z	p-value	Sen's slope
Full data	-21.28	0.001	-0.04831
Removal of irrigation season	-12.31	0.001	-0.0589

نتایج این آزمون نشان می‌دهد که حتی پس از حذف فصل آبیاری، RSV همچنان دارای روند نزولی آماری معنادار است ($p < 0.001$). در حالت حذف فصل آبیاری، قدر مطلق شیب سن از 0.04831 به 0.0589 افزایش یافته (یعنی شیب تندتر شده) و آماره Z از 21.28 به 12.31 کاهش یافته است. با این حال، در هر دو حالت، روند کاهشی از نظر آماری معنادار باقی می‌ماند ($p < 0.001$). این یافته‌ها نشان می‌دهد که روند کاهشی مشاهده شده در RSV به حضور یا حذف ماه‌های آبیاری حساس نیست و یک ویژگی پایدار دوره زمانی به شمار می‌آید. بنابراین، کاهش بلندمدت ذخیره مخزن تنها بازتاب الگوی تکرارشونده رهاسازی فصلی کشاورزی نیست، بلکه ناشی از تغییرپذیری در رفتار ساختاری سامانه مخزن در مقیاس زمانی فراتر از فصل آبیاری است.

۴- بحث

۴-۱- گذار به رفتار نایستا: تفسیر سیستمی

مفهوم «گذار به رفتار غیرایستا» در این پژوهش به تضعیف معنادار توانایی سامانه مخزن در حفظ یک حلقه بازخورد پایدار بین جریان ورودی، حجم ذخیره و جریان خروجی، در بازه زمانی مورد بررسی و ارزیابی اطلاق می‌شود. لازم به یادآوری است که تشخیص قطعی «شکست ایستایی» به‌عنوان یک تغییرپذیری رژیم دائمی، نیازمند داده‌های بلندمدت‌تر (دست‌کم ۳۰ سال) برای تفکیک از نوسان‌های اقلیمی طبیعی مانند خشکسالی‌های چندساله است. بنابراین، این یافته‌ها را باید به‌عنوان شواهدی قوی از یک گذار رفتاری شایان توجه تفسیر کرد، نه اثبات قطعی یک

رژیم جدید خارج شده از حالت ایستایی آماری. در یک سامانه ایستا، نوسان‌های ورودی حتی در صورت تغییرپذیری بین‌سالی از طریق تنظیم ذخیره و خروجی جذب شده و تعادل بلندمدت سیستم حفظ می‌شود. با این حال، مجموعه شواهد کمی ارائه شده در این مطالعه نشان می‌دهد که این سازوکار تعادلی در سد سفیدرود، به‌ویژه از حوالی سال آبی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ (اوایل دهه ۲۰۲۰ میلادی)، دچار فروپاشی شده است. تجزیه و تحلیل همبستگی پویا نشان داد که پیوند آماری بین IFR و RSV که در دوره ابتدایی بررسی و ارزیابی‌های به نسبت قوی بوده (اغلب بالای 0.6)، پس از سال ۲۰۲۱ به‌طور چشمگیری تضعیف شده و در برخی بازه‌ها به مقدارهای نزدیک به صفر یا منفی رسیده است. فروپاشی همبستگی IFR-RSV در کنار تقویت همبستگی RSV-OFR (از محدوده 0.4 - 0.5 به بالای 0.8)، بیانگر آن است که رفتار ذخیره مخزن دیگر به‌صورت غالب توسط ورودی‌های جاری نظارت و مهار نمی‌شود، بلکه بیش از پیش تابع تصمیم‌گیری‌های رهاسازی و محدودیت‌های داخلی سامانه است. نتایج تجزیه و تحلیل STL و تحلیل موجک پیوسته نشان می‌دهد که افت RSV به میزان حدود $46/9$ درصد ماهیتی بیشتر غیرفصلی و چندمقیاسی دارد. پایداری مؤلفه فصلی در کنار کاهش شدید مؤلفه روند، و جابه‌جایی توان موجک از مقیاس‌های سالانه (365 روز) به مقیاس‌های کوتاه‌تر (60 - 120 روز)، بیانگر این است که پایداری نسبی مؤلفه فصلی، همراه با کاهش شدید مؤلفه روند، به احتمال نشان می‌دهد که افت ذخیره مخزن بیش از آنکه ناشی از تغییرپذیری در الگوی تکرارشونده فصلی باشد، ریشه در تغییرپذیری‌های بلندمدت و ساختاری دارد. البته این تفسیر، جایگزین تحلیل مستقیم داده‌های بارش یا ورودی فصلی نمی‌شود و باید با احتیاط تلقی شود.

در مجموع، شواهد ارائه شده نشان می‌دهد که سد سفیدرود از یک سامانه نسبتاً ایستا با رفتار قابل پیش‌بینی، به سامانه‌ای نایستا با نظارت درون‌زاد و واکنشی گذار کرده است. این گذار سامانه‌ای، چارچوب مفهومی مناسبی برای تفسیر هم‌زمان کاهش ذخیره، افزایش نوسان‌های کوتاه‌مدت و بازآرایی پیوندهای آماری بین متغیرهای

دارند، هم‌راستایی بیشتری دارد. به‌عنوان نمونه، Giuliani et al. (2013) نشان دادند که اینرسی نهادهای «نزدیک‌بینی سیاستی» می‌تواند باعث شود قواعد بهره‌برداری مخزن‌ها در برابر تغییرپذیری شرایط تطبیق‌پذیر نباشد و سامانه به تدریج وارد رژیم‌های پریسک و نایستا شود. همچنین Arena et al. (2016) گزارش کردند که در سامانه‌های تحت فشار بالای منبع‌ها، حتی بهبود پیش‌بینی ورودی‌ها به حتم به بهبود عملکرد بلندمدت مخزن منجر نمی‌شود و تصمیم‌گیری‌های کوتاه‌مدت می‌تواند رفتار سامانه را بی‌ثبات کند.

از منظر تجزیه و تحلیل چندمقیاسی، یافته‌های این پژوهش با نتایج پژوهش‌هایی که تغییرپذیری در مقیاس‌های زمانی غالب را به‌عنوان نشانه‌ای از مداخله انسانی و تغییرپذیری رژیم بهره‌برداری معرفی کرده‌اند، سازگار است. Stratimirović et al. (2020) نشان دادند که احداث و بهره‌برداری سدها می‌تواند منجر به تضعیف یا حذف چرخه‌های سالانه و تقویت نوسان‌های کوتاه‌مدت در دوره‌های تراز و جریان شود. جابه‌جایی توان موجب RSV از مقیاس‌های سالانه به مقیاس‌های ۶۰-۱۲۰ روزه در سد سفیدرود، با این مشاهدات هم‌خوانی دارد و بیانگر افزایش وزن تصمیم‌گیری‌های عملیاتی کوتاه‌مدت است.

در مجموع، این پژوهش ضمن هم‌راستایی با ادبیات مرتبط با ناپایداری و بهره‌برداری تطبیقی مخزن‌ها (Wisser et al., 2012; Giuliani et al., 2013; Arena et al., 2016) با تمرکز بر فروپاشی پیوندهای عملکردی بین RSV, IFR و OFR، مفهوم «شکست ایستایی» را به‌عنوان یک پدیده سامانه‌ای و شایان ردیابی کمی برجسته می‌کند. این رویکرد، پلی میان پژوهش‌های آماری پیشین و تجزیه و تحلیل‌های سامانه‌ای بهره‌برداری مخزن‌ها ایجاد کرده و جایگاه سد سفیدرود را در چارچوب گسترده‌تر ادبیات جهانی مشخص می‌سازد.

۳-۴- محدودیت‌های روش‌شناختی

یکی از محدودیت‌های اصلی این پژوهش، طول به نسبت کوتاه دوره آماری (۱۶ سال آبی) است. در هیدرولوژی و اقلیم‌شناسی، تشخیص تغییرپذیری‌های رژیم دائمی از

کلیدی فراهم می‌کند و بنیان اصلی بحث‌های مدیریتی و سیاستی را شکل می‌دهد. عامل‌های چندی از جمله احداث سدهای بالادست، تغییرپذیری دستورکارهای بهره‌برداری سد سفیدرود در سال ۱۳۹۴، خشکسالی‌های متوالی و افزایش تقاضا برای آب در پایین‌دست می‌توانند در گذار مشاهده‌شده نقش داشته باشند. با این حال، داده‌های این پژوهش امکان تفکیک سهم هر یک را فراهم نمی‌کند و تعیین علت قطعی نیازمند داده‌های بیشتر و تجزیه و تحلیل‌های جداگانه است.

۴-۲- مقایسه با ادبیات

یافته‌های این پژوهش از نظر ماهیت تغییرپذیری‌های مشاهده‌شده و چارچوب تبیینی آن، با بخش شایان توجهی از ادبیات موجود در حوزه بهره‌برداری مخزن‌ها و ناپایداری سامانه‌های منابع آب هم‌راستاست. در پژوهش‌های پیشین، رفتار نایستای مخزن‌ها به‌طور کلی به دو سازوکار اصلی نسبت داده شده است: (۱) کاهش ورودی‌های هیدرولوژیکی ناشی از تغییرپذیری‌های اقلیمی یا خشکسالی‌های بلندمدت، و (۲) فشارهای بهره‌برداری و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی که منجر به برهم‌خوردن تعادل در چرخه ورودی-ذخیره-خروجی می‌شود (Wisser et al., 2012; Giuliani et al., 2013).

با این حال، نتایج این پژوهش با این چارچوب تبیینی هم‌خوانی کامل ندارد؛ زیرا در سد سفیدرود، کاهش شدید و معنادار RSV (۴۶/۹ درصد) در شرایطی رخ داده که روند IFR هرچند از نظر آماری معنادار است (جدول ۳، $p < 0.001$)، اما شیب سن آن (۰/۰۰۱- میلیون مترمکعب در روز) از نظر فیزیکی و عملیاتی ناچیز بوده و نمی‌تواند توجیه‌کننده افت ۴۶/۹ درصدی ذخیره مخزن باشد. در واقع، کاهش سالانه ورودی حدود ۰/۰۳۶ میلیون مترمکعب در سال (بر مبنای شیب Sen) در قیاس با افت ۲۶۳ میلیون مترمکعبی ذخیره پس از گسست، از مرتبه‌ای به طور کامل متفاوت است.

در مقابل، نتایج این پژوهش با دسته‌ای از نتایج پژوهش‌های انجام شده که بر نقش سیاست‌های بهره‌برداری، محدودیت‌های نهادهای و فشار تقاضا تمرکز

روش‌های مستقل (نقطه تغییر، STL و موجک) هم‌راستی خوبی داشت.

۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش با استفاده از داده‌های روزانه سد سفیدرود در بازه ۱۶ سال آبی (۱۳۸۸-۱۴۰۴) شواهد منسجمی از گذار به رفتار ناپایستا در چرخه ورودی-ذخیره-خروجی ارائه می‌دهد. آزمون Pettitt نقطه تغییرپذیری ساختاری معناداری در ژوئیه ۲۰۲۱ (سال آبی ۱۴۰۰-۱۳۹۹) شناسایی کرد که با کاهش ۴۶/۹ درصدی حجم ذخیره (از ۵۶۱ به ۲۹۸ میلیون مترمکعب)، کاهش همبستگی -IFR RSV از ۰/۶۸ به ۰/۲۲ و افزایش نوسان‌های کوتاه‌مدت همراه بود. پیش از این گسست ناگهانی، نشانه‌هایی از تضعیف تدریجی از حوالی سال آبی ۱۳۹۴-۱۳۹۵ شایان مشاهده است، اما نقطه تغییرپذیری‌های غالب در سال‌های ۱۴۰۰-۱۳۹۹ رخ داده است.

تجزیه و تحلیل فصلی و آزمون حساسیت (حذف ماه‌های آبیاری) نشان داد که رهاسازی‌های آب برای کاربردهای کشاورزی عامل اولیه این گذار یا رفتار ناپایستا نیستند. فشارهای درون‌زاد سامانه از جمله الگوی بهره‌برداری، افزایش تقاضا و محدودیت‌های مدیریتی، بازدارنده بازیابی ذخیره حتی در شرایط ورودی یا IFR به نسبت پایدار شده‌اند. آزمون شیب سن، چارچوب تحلیلی تلفیقی Pettitt، Mann-Kendall، STL، همبستگی پویا و موجک می‌تواند ابزاری عمومی برای پایش سلامت دینامیک مخازن باشد.

به دلیل کوتاهی دوره آماری (۱۶ سال)، نمی‌توان شکست ایستایی پیوسته را اثبات کرد؛ بخشی از تغییرپذیری‌ها ممکن است ناشی از خشکسالی چندساله باشد. تأیید نهایی نیازمند داده‌های دست‌کم ۳۰ ساله و تجزیه و تحلیل شاخص‌های اقلیمی است.

پیشنهادها: (۱) بازنگری پویای منحنی‌های بهره‌برداری متناسب با رژیم پس از ۲۰۲۱، (۲) پایش توان موجک در مقیاس ۶۰-۱۲۰ روز به عنوان شاخص هشدار زودهنگام، (۳) استفاده از مدل‌های داده‌محور مانند LSTM با تجزیه و تحلیل SHAP برای بازسازی پیوند ورودی-خروجی یا -IFR

نوسان‌های طبیعی اقلیمی مانند چرخه‌های خشکسالی ۵ تا ۱۰ ساله یا پدیده‌هایی مانند (NAO و ENSO) به طور معمول نیازمند سری‌های زمانی با طول حداقل ۳۰ سال است. بنابراین، امکان دارد برخی از تغییرپذیری‌های مشاهده‌شده در این پژوهش - به‌ویژه کاهش حجم ذخیره و تضعیف همبستگی ورودی-ذخیره - دست‌کم تا حدی ناشی از یک دوره خشکسالی بلندمدت باشد، نه یک شکست ساختاری و خروج از حالت ایستایی آماری. برای رفع این ابهام، پیشنهاد و تأکید می‌شود در آینده با تمدید دوره‌های زمانی داده‌ها تا ۳۰ سال و انجام تجزیه و تحلیل‌های مشابه، پایداری رژیم جدید سامانه ارزیابی شود. همچنین استفاده از شاخص‌های اقلیمی استاندارد (مانند SPI، SPEI، NAO) در کنار داده‌های عملیاتی مخزن می‌تواند به تفکیک تأثیر اقلیم از تأثیر مدیریت کمک کند. خودهمبستگی بالای دوره‌های روزانه حجم مخزن (ضریب خودهمبستگی مرتبه اول $\approx 0/98$) ممکن است بر نتایج آزمون Mann-Kendall تأثیر گذاشته و p-value ها را کوچک‌تر از مقدار واقعی نشان دهد. در پژوهش‌های آینده پیشنهاد و تأکید می‌شود از روش‌های pre-whitening یا Modified Mann-Kendall استفاده شود. افزون بر این، آزمون Pettitt به خودهمبستگی زمانی حساس است. اگرچه نتایج آن با دیگر روش‌های مستقل (STL و rolling correlation) سازگار بود، اما برای تأیید قطعی نقطه تغییرپذیری‌ها در دوره‌های با خودهمبستگی بالا، پیشنهاد و تأکید می‌شود از روش‌های اصلاح‌شده یا آزمون‌های جایگزین (مانند آزمون بوت‌استرپ پتیت) استفاده شود.

همچنین خودهمبستگی بالای داده‌های روزانه، به‌ویژه در دوره RSV، می‌تواند روی نتایج Mann-Kendall اثر بگذارد و p-value ها را کوچک‌تر از مقدار واقعی نشان دهد. با این حال، هم‌راستی روند کاهشی RSV با نتایج دیگر روش‌های مستقل (نقطه تغییرپذیری Pettitt، کاهش میانگین، STL و موجک) اطمینان از واقعی بودن این تغییرپذیری را افزایش می‌دهد.

افزون بر این، توزیع چوله متغیرهای IFR و OFR یکی از محدودیت‌های ذاتی تحلیل همبستگی پیرسون در این پژوهش است، هر چند نتایج به دست آمده از آن با دیگر

hydrological regimes. *Water Resources Management*, 34(6), 1881–1896.

Delleur, J.W. (2014). The handbook of hydrology. McGraw-Hill.

Farmer, J.D. & Coles, S. (2003). Predicting nonlinear time series: The case of reservoir inflows. *Water Resources Research*, 39(4), 1089, <https://doi.org/10.1029/2002WR001510>.

Giuliani, M., Castelletti, A., Pianosi, F., Mason, E. & Reed, P.M. (2013). Curses, tradeoffs, and scalable management: Advancing evolutionary multiobjective direct policy search. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(3), 311–324.

Guariso, G., Rinaldi, S. & Soncini-Sessa, R. (1979). The management of lake Como: A multiobjective analysis. *Water Resources Research*, 15(2), 317–326.

Gul, G.O., Harmancioglu, N.B. & Gul, A. (2013). A combined hydrologic and economic analysis of nonstationarity in water resources planning. *Water Resources Management*, 27(6), 1661–1676.

Hashemi Monfared, S.A., Hosseinzadeh, F. & Pirzadeh, B. (2017). Research Note « Imperialist Competitive Algorithm Application in the Optimization of the Reservoir Operation with the Objective of Maximization for Water Allocation Case Study: Pishin Reservoir. *Journal of Hydraulics*, 12(2), 59-66. (In Persian)

Jiménez García, J. (2012). Trends and nonstationarity in reservoir storage series. *Hydrological Sciences Journal*, 57(6), 1119–1135.

Kam, J. (2021). Nonstationarity in reservoir inflow and storage dynamics. *Journal of Hydrology*, 597, 126189, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126189>.

Lee, T.N., Salas, J.D. & Obeysekera, J. (1987). Modeling of reservoir systems under changing hydrologic conditions. *Water Resources Research*, 23(3), 405–414.

Marton, D., Horváth, Z. & Károlyi, G. (2015). Structural changes in reservoir operation regimes. *Hydrology Research*, 46(3), 385–398.

Melo, D.C.D. & Wendland, E. (2016). Nonstationarity in hydrological time series: A review. *Journal of Hydrology*, 542, 687–698.

Parolari, A.J. & Manoli, G. (2019). Emerging signatures of nonstationarity in water systems. *Water Resources Research*, 55(8), 6401–6418.

RSV، (۴) تحلیل علیت کمی برای تفکیک سهم سدهای بالادست، تغییر قوانین و خشکسالی.

در نهایت، پایش سدها باید بر «سلامت پویایی سامانه‌ها» و پایداری پیوندهای درونی متمرکز شود، نه تنها شاخص‌های کمبود آب.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منفعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسنده (نویسندگان) هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است. مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: تجزیه و تحلیل داده‌ها، نگارش مقاله.

نویسنده دوم: تحلیل نرم افزار، کالبراسیون مدل.

نویسنده سوم: گردآوری داده‌ها، نوشتن متن اولیه.

نویسنده چهارم: تحلیل روابط و فرمول‌ها، اعتبارسنجی.

۶- منابع‌ها

Bonelli, S., De Felice, G. & De Falco, F. (2015). Long-term reservoir behavior under changing hydrological conditions. *Water Resources Management*, 29(9), 3253–3270.

Chalise, S., Kansakar, S.R. & Babel, M.S. (2023). Detecting nonstationarity and regime shifts in regulated river systems. *Journal of Hydrology*, 617, 128987, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.128987>.

Cimorelli, L., Cozzolino, L. & Pianese, D. (2020). Reservoir operation under nonstationary

2921–2934.

Wallington, K. (2021). System resilience and regime shifts in managed water systems. *Water Resources Research*, 57(4), e2020WR028563, <https://doi.org/10.1029/2020WR028563>.

Wisser, D., Frohking, S., Hagen, S. & Bierkens, M.F.P. (2012). Beyond peak reservoir storage? *Water Resources Research*, 48(6), W06503, <https://doi.org/10.1029/2011WR011109>.

Zhou, Y. (2014). Nonstationarity in reservoir operation under changing climate. *Hydrological Processes*, 28(12), 3761–3774.

Zhou, Y., Guo, S. & Xu, C.Y. (2019). Detecting regime shifts in reservoir inflow–outflow systems. *Journal of Hydrology*, 575, 1049–1061.

Salazar, J.Z. & Toledo, F.A. (2020). Reservoir performance under climate and operational stress. *Water Resources Management*, 34(11), 3479–3495.

Serinaldi, F. & Kilsby, C.G. (2015). Stationarity is undead: Uncertainty dominates the distribution of extremes. *Advances in Water Resources*, 77, 17–36.

Sharafati, A. & Zahabiyou, B. (2013). Analysis of Dam Overtopping by Considering Hydraulic and Hydrological Uncertainties. *Journal of Hydraulics*, 8(1), 1-17. (In Persian)

Stratimirović, D., Stanković, M. & Savić, D.A. (2020). Wavelet-based detection of operational shifts in reservoir systems. *Journal of Hydrology*, 584, 124684. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124684>.

Tongal, H., Booi, M.J. & Teuling, A.J. (2016). Detection of trends and change points in reservoir inflow series. *Hydrological Processes*, 30(17),



© 2026 The Author(s). Published by Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.