Iranian Journal of Soil and Water Research
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir
ISNN: 2423-7833

Scenario-Based Spatial Analysis of Water Distribution System Performance in an Irrigation Network Using an Entropy–PCA Integrated Performance Index, Case study: Irrigation Network of Jarghuyeh, Mahyar

Ali Shahhosseini[1] | Behzad Azadegan[2]✉ | Seied Mehdy Hashemy Shahdany[3] | Mahmoud Mashal[4]

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aborihan), University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: shahhosseini.ali@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aborihan), University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: bazad@ut.ac.ir
3. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aborihan), University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: mehdi.hashemy@ut.ac.ir
4. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aborihan), University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: mmashal@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Aug. 3, 2026

Revised: Aug. 19, 2026

Accepted: Sep. 9, 2026

Published online: Nov. 23, 2026

Keywords:
Irrigation network;
Surface-water distribution;
Integrated Performance Index;
Spatial assessment;
Water shortage;
Entropy;
Principal Component Analysis.

ABSTRACT

Performance assessment of surface-water distribution systems in irrigation networks, particularly under water shortage and reduced water-supply reliability, requires a framework capable of jointly analyzing performance variations across spatial, scenario-based, and multi-indicator dimensions. However, in many operational assessments, the integration of performance indicators and the identification of critical irrigation units are often carried out with limited attention to spatial heterogeneity and changes in water-shortage severity. This study aims to develop and apply a spatial and scenario-based multi-criteria assessment framework for integrating operational performance indicators in the Jarghuyeh–Mahyar irrigation network. For this purpose, the performance of 675 independent irrigation units was evaluated based on adequacy, dependability, and efficiency indicators under eight operational scenarios, including normal conditions and seven water-shortage levels. After directional harmonization and normalization of the indicators, their weights were calculated using the objective Entropy and Principal Component Analysis methods, and an Integrated Performance Index was determined for each unit and scenario. The results showed that the Entropy method was more sensitive to increasing water shortage; the weight of the adequacy indicator increased from 0.44 under the normal scenario to 0.95 under the unprecedented water-shortage scenario, whereas the PCA weights showed more limited variations. The mean IPI decreased from 62.83 to 8.64 under the Entropy method, while it changed from 61.13 to 54.52 under PCA. Spatial zoning also indicated that, under severe scenarios, the Entropy method represented the expansion of the critical class more explicitly, whereas PCA reflected this expansion in a more moderated manner. The proposed framework can be used to identify critical units, prioritize management interventions, and support operational decision-making in irrigation networks.

Cite this article: Shahhosseini, A., Azadegan, B., Hashemy Shahdany, S. M. & Mashal, M. (2026). Scenario-Based Spatial Analysis of Water Distribution System Performance in an Irrigation Network Using an Entropy–PCA Integrated Performance Index, Case study: Irrigation Network of Jarghuyeh, Mahyar., *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (9), 2185-2206. https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.419852.670193

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.419852.670193

EXTENDED ABSTRACT

Background and Objectives

Surface-water distribution systems in irrigation networks play a central role in delivering allocated water to agricultural users, particularly in arid and semi-arid regions where water shortage is a persistent operational constraint. Under such conditions, evaluating the performance of an irrigation network only at the system scale or by using a single indicator may provide an incomplete picture of the actual operational situation. The performance of water delivery systems is inherently multidimensional and may vary substantially from one irrigation unit to another. Therefore, a comprehensive assessment framework should be able to capture not only the overall level of performance, but also its spatial variability and its response to different levels of water-supply limitation. In many irrigation districts, operational decisions are still made based on general experience, fixed delivery rules, or average network-level indicators. Such approaches may overlook local performance deficiencies, spatially clustered weak areas, and the gradual transition of irrigation units from acceptable to critical conditions under increasing water shortage. This limitation is particularly important in networks where surface-water supply at the diversion point is highly variable and where the performance of downstream units may be affected by both hydraulic and operational constraints. The present study aimed to develop and apply a spatial and scenario-based multi-criteria assessment framework for evaluating the operational performance of the Jarghuyeh–Mahyar irrigation network. The proposed framework integrates three key performance indicators, namely adequacy, dependability, and efficiency, using two objective weighting methods: Entropy and Principal Component Analysis. The final output of the framework is an Integrated Performance Index, which allows irrigation units to be ranked and classified under different water-supply scenarios. The main objective was to provide a transparent and repeatable basis for identifying critical units, detecting spatial patterns of performance decline, and supporting operational decision-making under water-shortage conditions.

Materials and Methods

The study was conducted in the Jarghuyeh–Mahyar irrigation network, located in the Zayandeh-Rood Basin in central Iran. The analysis was carried out for 675 independent irrigation units distributed across the service area of the network. To evaluate the response of the system to different levels of water-supply limitation, eight operational scenarios were considered. These scenarios included normal conditions and seven water-shortage levels, representing a gradual intensification of supply reduction from very low to unprecedented shortage conditions. For each irrigation unit and each scenario, three operational performance indicators were calculated: adequacy, dependability, and efficiency. Adequacy was used to represent the degree to which the water requirement or expected delivery was satisfied. Dependability reflected the stability of water delivery over time, while efficiency represented the effectiveness of water delivery in relation to the supplied volume. Since the indicators had different meanings and directions, they were first harmonized and normalized so that higher values consistently represented better performance. Two objective weighting approaches were then applied. The Entropy method assigned weights according to the degree of information dispersion contained in each indicator. In this method, an indicator with greater discriminatory power among irrigation units receives a higher weight. Principal Component Analysis was used as a second weighting approach to account for the variance structure and interrelationships among the indicators. By using both methods, the study was able to compare a more sensitivity-oriented weighting scheme with a more balanced, structure-based weighting scheme. After weighting, the normalized indicators were aggregated into an Integrated Performance Index for each irrigation unit under each scenario. The IPI values were then classified into four performance classes: stable or desirable, transitional, non-conforming, and critical. This classification made it possible to interpret the numerical results in a management-oriented manner. In addition, spatial zoning maps were prepared to illustrate how performance classes were distributed across the network and how critical areas expanded as water shortage became more severe.

Results

The results showed that the Entropy and PCA methods produced two different but complementary interpretations of network performance. In the Entropy-based assessment, the relative importance of the adequacy indicator increased sharply as water shortage intensified. The weight of adequacy increased from 0.4445 under the normal scenario to 0.9500 under the unprecedented shortage scenario. At the same time, the weights of dependability and efficiency decreased considerably. This pattern indicates that, under severe water-supply limitation, differences among irrigation units were mainly controlled by their ability to receive sufficient water. In contrast, PCA produced a more balanced weighting pattern. The weights assigned to adequacy, dependability, and efficiency changed within a narrower range across the scenarios. This result suggests that PCA retained the joint contribution of all three indicators and reduced the dominance of a single

indicator under extreme conditions. Therefore, while Entropy was more responsive to adequacy loss and shortage-driven stress, PCA provided a more moderated representation of multidimensional performance. The Integrated Performance Index confirmed these differences between the two weighting methods. Based on the Entropy method, the mean IPI decreased from 62.83 under normal conditions to 8.64 under the unprecedented shortage scenario, showing a strong decline in overall performance as water shortage intensified. In comparison, the mean IPI obtained from PCA changed from 61.13 to 54.52 over the same range of scenarios. This smaller variation does not indicate that the network performed better under severe shortage conditions; rather, it reflects the different weighting logic of PCA, which maintains the influence of dependability and efficiency alongside adequacy. The spatial classification of IPI values provided further insight into the operational behavior of the network. Under normal conditions, only a very limited number of irrigation units were classified as critical. However, as the shortage level increased, the critical class expanded substantially, especially in the Entropy-based results. The medium shortage scenario appeared to be a key transition point, after which critical performance became much more widespread across the network. Under the most severe scenarios, the Entropy method represented a broad expansion of critical conditions, whereas PCA showed a more gradual and moderated shift from transitional and non-conforming classes toward critical performance. The spatial zoning results also demonstrated that performance decline was not randomly distributed across the network. Certain areas were repeatedly classified as weak or critical across different scenarios, while other units maintained relatively better performance. This spatial heterogeneity indicates that the network cannot be effectively managed through uniform operational interventions. Instead, management actions should be spatially prioritized according to the location, severity, and persistence of performance deficiencies.

Conclusion

This study showed that a spatial and scenario-based multi-criteria framework can provide a more comprehensive understanding of irrigation network performance under water-shortage conditions. By integrating adequacy, dependability, and efficiency into an Integrated Performance Index, the proposed framework made it possible to evaluate each irrigation unit individually and to identify how performance classes changed under different operational scenarios. The comparison between Entropy and PCA highlighted the importance of using more than one objective weighting method. Entropy was more effective in revealing rapid performance deterioration caused by reduced adequacy, and therefore can be considered useful for warning-oriented assessment and identification of critical units. PCA, on the other hand, provided a more balanced interpretation of performance by preserving the role of all indicators. The combined use of both methods can help managers distinguish between units requiring immediate intervention and units showing gradual or multidimensional weakness. From a management perspective, the results indicate that medium water-shortage conditions should be regarded as an operational warning threshold in the Jarghuyeh–Mahyar irrigation network. From this point onward, performance deterioration becomes more spatially extensive and management should shift from routine operation to preventive and targeted intervention. The spatial zoning of IPI can support the prioritization of field inspections, adjustment of delivery schedules, control of water offtakes, and allocation of limited management resources to the most vulnerable areas. Overall, the proposed framework offers a transparent, data-driven, and management-oriented tool for evaluating surface-water delivery performance in irrigation networks. It can assist irrigation managers in identifying critical units, monitoring spatial patterns of performance decline, and improving decision-making under water-supply limitation. Future applications of this framework can be strengthened by incorporating more detailed field observations, polygon-based spatial data, and real-time operational records.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Authorship contribution

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

No artificial intelligence tools were used in the article writing process.

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank anonymous reviewers for their valuable suggestions in manuscript

revision.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۷، شماره ۹ شاپا: ۷۸۳۳-۲۴۲۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

تحلیل سناریومحور و مکانی عملکرد سامانه توزیع آب در شبکه آبیاری با رویکرد تلفیقی Entropy–PCA و شاخص عملکرد یکپارچه (IPI)؛ مطالعه موردی: شبکه آبیاری جرقویه، مهیار

علی شاه حسینی[۱] | بهزاد آزادگان[۲]✉ | سید مهدی هاشمی شاهدانی[۳] | محمود مشعل[4]

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: shahhosseini.ali@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: bazad@ut.ac.ir
۳. گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mehdi.hashemy@ut.ac.ir
۴. گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mmashal@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۵/۱۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۵/۲۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۶/۲۳
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۹/۱

واژه‌های کلیدی:
شبکه آبیاری؛
توزیع آب سطحی؛
شاخص عملکرد یکپارچه؛
ارزیابی مکانی؛
کم‌آبی؛
آنتروپی؛
تحلیل مؤلفه‌های اصلی.

چکیده

ارزیابی عملکرد سامانه‌های توزیع آب سطحی در شبکه‌های آبیاری، به‌ویژه تحت شرایط کم‌آبی و کاهش قابلیت اتکای تأمین آب، نیازمند چارچوبی است که بتواند تغییرات عملکردی را به‌صورت هم‌زمان در ابعاد مکانی، سناریومحور و چندشاخصه تحلیل کند. با وجود اهمیت این موضوع، در بسیاری از ارزیابی‌های بهره‌برداری، تلفیق شاخص‌های عملکردی و شناسایی واحدهای بحرانی عمدتاً بدون توجه کافی به ناهمگنی مکانی و تغییر شدت کم‌آبی انجام می‌شود. هدف این پژوهش، توسعه و به‌کارگیری یک چارچوب ارزیابی چندمعیاره مکانی و سناریومحور برای تلفیق شاخص‌های عملکرد بهره‌برداری در شبکه آبیاری جرقویه–مهیار است. بدین منظور، عملکرد ۶۷۵ واحد آبیاری مستقل بر پایه شاخص‌های کفایت، پایداری و راندمان در هشت سناریوی بهره‌برداری، شامل شرایط نرمال و هفت سطح کم‌آبی، ارزیابی شد. پس از هم‌جهت‌سازی و نرمال‌سازی شاخص‌ها، وزن آن‌ها با روش‌های عینی آنتروپی و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)محاسبه و شاخص عملکرد یکپارچه (IPI)برای هر واحد و هر سناریو تعیین شد. نتایج نشان داد روش آنتروپی نسبت به تشدید کم‌آبی حساسیت بیشتری دارد؛ به‌طوری‌که وزن شاخص کفایت از ۰/۴۴ در سناریوی نرمال به ۰/۹۵ در سناریوی کم‌آبی بی‌سابقه افزایش یافت، در حالی که وزن‌های PCA تغییرات محدودتری نشان دادند. میانگین IPI در روش آنتروپی از ۸۳/۶۲ به ۸/۶۴ کاهش یافت، اما در روش PCA از ۶۱/۱۳ به ۵۴/۵۲ رسید. پهنه‌بندی مکانی نیز نشان داد که در سناریوهای شدید، روش آنتروپی گسترش کلاس بحرانی را آشکارتر، و روش PCA آن را به‌صورت تعدیل‌شده‌تر بازنمایی می‌کند. چارچوب پیشنهادی می‌تواند برای شناسایی واحدهای بحرانی، اولویت‌بندی مداخلات مدیریتی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری بهره‌برداری به‌کار رود.

استناد: شاه حسینی، علی؛ آزادگان، بهزاد؛ هاشمی شاهدانی، سید مهدی و مشعل، محمود (۱۴۰۵). تحلیل سناریومحور و مکانی عملکرد سامانه توزیع آب در شبکه آبیاری با رویکرد تلفیقی Entropy–PCA و شاخص عملکرد یکپارچه (IPI): مطالعه موردی شبکه آبیاری جرقویه–مهیار، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۷ (۹)، ۲۱۸۵-۲۲۰۶. https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.419852.670193

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
© نویسندگان.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.419852.670193

مقدمه

شبکه‌های آبیاری از زیرساخت‌های کلیدی مدیریت آب کشاورزی به شمار می‌روند و نقش مهمی در انتقال، توزیع و تحویل آب سطحی به واحدهای بهره‌بردار دارند. این نقش در مناطق خشک و نیمه‌خشک اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، زیرا افزایش محدودیت منابع آب، رقابت میان مصرف‌کنندگان و کاهش قابلیت اتکای تأمین آب می‌تواند عملکرد سامانه‌های توزیع آب را به‌شدت تحت تأثیر قرار دهد. بر اساس گزارش فائو، کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب شیرین در جهان است و بیش از ۷۰ درصد برداشت‌های جهانی آب را به خود اختصاص می‌دهد؛ از این رو، بهبود مدیریت و بهره‌وری آب در سامانه‌های کشاورزی یکی از محورهای اصلی مقابله با کم‌آبی محسوب می‌شود (FAO, 2020). در نواحی خشک و نیمه‌خشک، کاهش منابع آب در دسترس، نوسانات جریان ورودی، تغییر در برنامه‌های توزیع و افزایش عدم قطعیت در بهره‌برداری، کارایی این شبکه‌ها را با مشکلات جدی، روبه‌رو کرده است. در چنین شرایطی، مدیریت مؤثر شبکه‌های آبیاری، مستلزم بهره‌گیری از ابزارهایی است که بتوانند عملکرد واحدهای مختلف را به‌صورت کمی، قابل مقایسه، تکرارپذیر و با در نظر گرفتن بعد مکانی، ارزیابی کنند. تکیه صرف بر میانگین عملکرد کل شبکه یا قضاوت‌های تجربی بهره‌برداران، اگرچه در مدیریت روزمره کاربرد دارد، اما برای شناسایی دقیق واحدهای دارای مشکل و تعیین اولویت‌های مدیریتی، کافی نیست (Hashemy Shahdany and Rahparast, 2025).

با این حال، ارزیابی عملکرد شبکه‌های آبیاری نباید فقط بر مقدار کل آب تحویلی یا یک شاخص منفرد متکی باشد. عملکرد سامانه توزیع آب ماهیتی چندبعدی دارد و شاخص‌هایی مانند کفایت، پایداری، راندمان و در برخی مطالعات عدالت توزیع، ابعاد متفاوتی از کیفیت بهره‌برداری را بازنمایی می‌کنند. مطالعات جدید در زمینه ارزیابی عملکرد سامانه‌های توزیع آب نشان داده‌اند که ترکیب شاخص‌های عملکردی با مدل‌های شبیه‌سازی می‌تواند شناخت دقیق‌تری از وضعیت بهره‌برداری فراهم کند. برای نمونه، Rahparast and Hashemy Shahdany (2024) عملکرد سامانه بهره‌برداری دستی را بر اساس شاخص‌های کفایت، پایداری، راندمان و عدالت در سناریوهای مختلف کم‌آبی ارزیابی کردند. همچنین Liu and Liu (2026) یک چارچوب تلفیقی مبتنی بر شاخص‌های عملکرد و مدل شبیه‌سازی برای ارزیابی عملکرد سامانه توزیع آب در ناحیه آبیاری ارائه دادند.

یکی از چالش‌های اصلی در تلفیق شاخص‌های مختلف عملکرد، تعیین وزن هر شاخص در محاسبه شاخص نهایی است. در روش‌های مبتنی بر قضاوت کارشناسی، وزن شاخص‌ها ممکن است تحت تأثیر ترجیحات ذهنی و تجربه فردی قرار گیرد؛ در مقابل، روش‌های وزن‌دهی عینی مانند آنتروپی[1] و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA[2])، وزن شاخص‌ها را بر اساس اطلاعات موجود در داده‌ها، میزان پراکندگی و ساختار همبستگی میان شاخص‌ها تعیین می‌کنند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که روش آنتروپی می‌تواند با اتکا بر میزان تغییرپذیری داده‌ها، نقش هر شاخص را در چارچوب ارزیابی چندمعیاره به‌صورت عینی‌تر تعیین کند(Sethi et al., 2026) . همچنین در ارزیابی‌های جدید مدیریت منابع آب، چارچوب‌های داده‌محور مبتنی بر آنتروپی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای افزایش شفافیت، تکرارپذیری و کاهش وابستگی به وزن‌دهی ذهنی مورد استفاده قرار گرفته‌اند(Feng et al., 2026) .

از سوی دیگر، در شرایط کم‌آبی، ارزیابی عملکرد در یک وضعیت ثابت نمی‌تواند رفتار واقعی شبکه را به‌خوبی نشان دهد، زیرا شدت محدودیت تأمین آب می‌تواند نحوه عملکرد واحدهای مختلف را تغییر دهد. بنابراین، تحلیل سناریومحور این امکان را فراهم می‌کند که واکنش شبکه در برابر سطوح مختلف کم‌آبی بررسی شده و آستانه‌هایی که در آن‌ها افت عملکرد از حالت موضعی به حالت گسترده تبدیل می‌شود، شناسایی گردد. Khaeez and Hashemy Shahdany (2021) عملکرد گزینه‌های اصلاح بهره‌برداری را در شرایط نرمال و کم‌آبی ارزیابی کرده و از تحلیل مکانی شاخص‌های عملکرد برای بررسی اثربخشی گزینه‌ها استفاده کردند. همچنین Hashemy Shahdany and Rahparast (2025) با استفاده از سناریوهای کمبود جریان در محل بند انحرافی، چارچوبی مکانی برای تحلیل ریسک سامانه تحویل آب سطحی در شبکه‌های آبیاری ارائه کردند..

در این تحقیق، شبکه آبیاری جرقویه—مهیار به عنوان محدوده مورد مطالعه، انتخاب شده است. این شبکه یکی از سامانه‌های مهم توزیع آب در حوضه زاینده‌رود، محسوب می‌شود و در سال‌های اخیر با چالش‌هایی نظیر محدودیت شدید منابع آب، کاهش قابلیت اطمینان در تحویل، نوسانات برنامه بهره‌برداری و افزایش فشار بر بخش‌های پایین‌دست، مواجه بوده است. این شرایط، این شبکه را به گزینه‌ای

1. Entropy
2Principal Component Analysis

مناسب برای توسعه و ارزیابی یک چارچوب چندمعیاره مکانی و مبتنی بر سناریو، تبدیل کرده است. هدف اصلی این تحقیق، ارائه یک چارچوب تحلیلی منسجم، عینی و قابل تفسیر، برای ارزیابی عملکرد مکانی شیوه توزیع آب سطحی توسط سامانه بهره‌برداری دستی، بین حقابه‌بران، است که در آن از روش‌های Entropy و PCA برای وزن‌دهی شاخص‌ها و از شاخص عملکرد یکپارچه[1](IPI) برای تلفیق آن‌ها استفاده می‌شود. در کنار این هدف، سوالات اصلی تحقیق عبارت‌اند از: چگونه می‌توان شاخص‌های چندگانه عملکرد بهره‌برداری را به‌صورت عینی و داده‌محور در سطح واحدهای مکانی تلفیق کرد؟ رفتار و حساسیت روش‌های Entropy و PCA در شرایط مختلف تأمین آب چگونه است و چه تفاوتی در شناسایی واحدهای دارای ضعف عملکردی، ایجاد می‌کنند؟ عملکرد مکانی حقابه‌بران در مواجهه با سناریوهای مختلف کم‌آبی، چه الگوهایی را نشان می‌دهد؟ با وجود توسعه مطالعات مختلف در زمینه ارزیابی عملکرد شبکه‌های آبیاری، بخش قابل توجهی از پژوهش‌های پیشین بر محاسبه شاخص‌های منفرد، تحلیل میانگین عملکرد شبکه، یا ارزیابی عملکرد در یک شرایط بهره‌برداری مشخص متمرکز بوده‌اند. در نتیجه، هنوز خلأ قابل توجهی در زمینه تلفیق هم‌زمان سه بعد اصلی شامل تغییرات مکانی واحدهای آبیاری، تغییرات سناریومحور ناشی از شدت‌های مختلف کم‌آبی، و وزن‌دهی عینی شاخص‌های عملکردی وجود دارد. نوآوری اصلی پژوهش حاضر، ارائه یک چارچوب ترکیبی Entropy–PCA–IPI برای ارزیابی عملکرد ۶۷۵ واحد آبیاری در هشت سناریوی بهره‌برداری است؛ به‌گونه‌ای که هم حساسیت شاخص‌ها نسبت به تشدید کم‌آبی و هم الگوی مکانی واحدهای بحرانی قابل شناسایی باشد. این چارچوب، برخلاف ارزیابی‌های کلی شبکه، امکان اولویت‌بندی واحدمحور و مکانی را فراهم می‌کند و می‌تواند مبنایی برای تصمیم‌گیری بهره‌برداری در شرایط محدودیت تأمین آب سطحی باشد.

پیشینه پژوهش

ارزیابی عملکرد شبکه‌های آبیاری از موضوعات بنیادی در مدیریت بهره‌برداری سامانه‌های توزیع آب سطحی است. در ادبیات کلاسیک ارزیابی عملکرد، شاخص‌هایی مانند کفایت، پایداری، راندمان و عدالت توزیع آب به‌عنوان معیارهای اصلی سنجش کیفیت تحویل آب معرفی شده‌اند. در این میان، مطالعه (Molden & Gates, 1990) از منابع پایه‌ای در تعریف شاخص‌های عملکرد سامانه‌های تحویل آب آبیاری محسوب می‌شود. با وجود این، شرایط بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری در دهه‌های اخیر به دلیل افزایش نوسان در تأمین آب سطحی در محل بند انحرافی، تشدید کم‌آبی و فشار بر منابع آب کشاورزی، پیچیده‌تر شده است. از این رو، ارزیابی عملکرد صرفاً بر اساس شاخص‌های منفرد یا میانگین کل شبکه، نمی‌تواند نیازهای مدیریتی جدید، به‌ویژه در مقیاس واحدهای آبیاری یا حقابه‌بران را، به‌خوبی پاسخ دهد.

در پژوهش Hoshiyar et al. (2021) ارزیابی عملکرد یک کانال انتقال آب نشان داد که توزیع آب در شبکه‌های آبیاری می‌تواند به‌صورت مکانی ناهمگن باشد؛ به‌گونه‌ای که برخی اراضی با کم‌تحویلی قابل توجه مواجه می‌شوند، در حالی که بخش‌های دیگر بیش از مقدار مورد نیاز آب دریافت می‌کنند. این نتیجه نشان می‌دهد که ارزیابی عملکرد شبکه‌های آبیاری نباید فقط در مقیاس کل شبکه یا بر اساس میانگین شاخص‌ها انجام شود، بلکه لازم است در سطح واحدهای بهره‌بردار و با توجه به تغییرات مکانی عملکرد مورد بررسی قرار گیرد. از سوی دیگر، شاهوردی و همکاران(۱۴۰۳)، نشان دادند که زمان‌بندی صحیح بهره‌برداری از سازه‌های کانال می‌تواند اثر قابل توجهی بر توزیع عادلانه و پایدار آب داشته باشد. بنابراین، عملکرد شبکه تنها تابع مقدار آب ورودی نیست، بلکه به نحوه بهره‌برداری، پاسخ زمانی سازه‌ها و مدیریت تحویل آب در طول شبکه نیز وابسته است. بر این اساس، پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که ارزیابی عملکرد شبکه‌های آبیاری باید هم‌زمان ابعاد هیدرولیکی، زمانی، مکانی و مدیریتی را در نظر گیرد.

در سال‌های اخیر، مدل‌های شبیه‌سازی و چارچوب‌های ترکیبی برای تحلیل عملکرد سامانه‌های آبیاری توسعه بیشتری یافته‌اند. یک مدل ترکیبی برای بهینه‌سازی توزیع آب و کنترل دریچه‌ها در سامانه کانال آبیاری ارائه شد و نتایج نشان داد که مدیریت توزیع آب در شبکه‌های کانالی نیازمند ترکیب اطلاعات هیدرولیکی، برنامه بهره‌برداری و معیارهای عملکردی است (Fan et al., 2026). همچنین با تلفیق شاخص‌های عملکرد و مدل شبیه‌سازی، چارچوبی برای ارزیابی سامانه‌های آبیاری ارائه شد که در آن شاخص‌هایی مانند کفایت، راندمان و قابلیت اطمینان/پایداری به‌صورت هم‌زمان در تحلیل عملکرد به کار رفتند (Liu et al., 2026). این مطالعات نشان می‌دهند که حرکت پژوهش‌های جدید از ارزیابی‌های منفرد به سمت چارچوب‌های تلفیقی و داده‌محور بوده است.

هم‌زمان با توسعه مدل‌های شبیه‌سازی، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در مدیریت آب و کشاورزی به‌طور گسترده مورد استفاده

1. Integrated Performance Index

قرار گرفته‌اند. دلیل اصلی این گسترش آن است که مسائل مدیریت آب معمولاً با معیارهای متعدد، گاه متعارض و با مقیاس‌های متفاوت سروکار دارند. در منطقه آبیاری Hetao، از ترکیب حداقل آنتروپی متقاطع و روش Entropy-weighted TOPSIS[1] برای تخصیص بهینه آب کشاورزی تحت عدم‌قطعیت عرضه و تقاضا استفاده شد. نتایج این مطالعه نشان داد که روش‌های وزن‌دهی عینی و رتبه‌بندی چندمعیاره می‌توانند برای تحلیل گزینه‌های تخصیص آب در مقیاس شبکه آبیاری کاربرد داشته باشند (Zhang & Yang, 2022). همچنین، با استفاده از مدل TOPSIS بهبودیافته و وزن‌دهی آنتروپی ساختاری، ظرفیت منابع آب کشاورزی ارزیابی شد و نشان داده شد که ترکیب شاخص‌های مختلف می‌تواند برای تحلیل پایداری منابع آب کشاورزی و شناسایی وضعیت‌های مدیریتی مفید باشد (Wang et al., 2023).

روش Entropy در بسیاری از مطالعات جدید مدیریت منابع آب به‌عنوان یک روش وزن‌دهی عینی مورد استفاده قرار گرفته است. مزیت اصلی این روش آن است که وزن معیارها را بر اساس پراکندگی و محتوای اطلاعاتی داده‌ها تعیین می‌کند و در نتیجه وابستگی به قضاوت ذهنی را کاهش می‌دهد. در ارزیابی ریسک ظرفیت برد منابع آب، از وزن‌دهی آنتروپی بهبودیافته در کنار مدل خاکستری TOPSIS استفاده شد و نتایج نشان داد که این رویکرد می‌تواند در رتبه‌بندی وضعیت منابع آب و تحلیل ریسک منطقه‌ای مؤثر باشد (Song et al., 2024). همچنین، در ارزیابی ظرفیت برد منابع آب، ترکیبی از روش‌های Entropy و CRITIC[2] برای وزن‌دهی معیارها به کار گرفته شد و بر اهمیت وزن‌دهی عینی در تحلیل کمی و کیفی سامانه‌های منابع آب تأکید شد (Han et al., 2025). این مطالعات نشان می‌دهند که Entropy در سال‌های اخیر به یکی از ابزارهای اصلی وزن‌دهی عینی در مسائل چندمعیاره آب تبدیل شده است. کاربرد روش‌های Entropy و TOPSIS فقط به ارزیابی منابع آب در مقیاس حوضه محدود نیست، بلکه در موضوعات مرتبط با کیفیت آب و تناسب آب برای آبیاری نیز توسعه یافته است.

Song et al. (2024) از روش وزن‌دهی آنتروپی بهبودیافته در کنار مدل خاکستری TOPSIS برای ارزیابی ریسک ظرفیت برد منابع آب استفاده کردند و نشان دادند که این رویکرد می‌تواند در رتبه‌بندی وضعیت منابع آب و تحلیل ریسک منطقه‌ای مؤثر باشد. اهمیت این مطالعه در آن است که روش Entropy را به‌عنوان یک ابزار وزن‌دهی عینی برای استخراج اهمیت نسبی معیارها بر اساس پراکندگی و محتوای اطلاعاتی داده‌ها به‌کار گرفته است. Han et al. (2025) نیز در ارزیابی ظرفیت برد منابع آب، ترکیبی از روش‌های Entropy و CRITIC را برای وزن‌دهی معیارها استفاده کردند و نشان دادند که وزن‌دهی عینی می‌تواند به تحلیل کمی و کیفی دقیق‌تر سامانه‌های منابع آب کمک کند. بر این اساس، این مطالعات نشان می‌دهند که روش Entropy در سال‌های اخیر به‌طور گسترده برای کاهش وابستگی به قضاوت ذهنی و افزایش شفافیت در مسائل چندمعیاره مرتبط با منابع آب استفاده شده است. Sethi et al. (2026) کاربرد روش‌های Entropy و TOPSIS را در ارزیابی کیفیت آب و تناسب آب برای آبیاری بررسی کردند و نشان دادند که ترکیب وزن‌دهی عینی و تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند در رتبه‌بندی و تفسیر وضعیت کیفی منابع آب برای مصارف آبیاری مفید باشد. این مطالعه نشان می‌دهد که کاربرد روش‌های Entropy و TOPSIS فقط به ارزیابی منابع آب در مقیاس حوضه محدود نیست، بلکه در موضوعات مرتبط با کیفیت آب، تناسب آب برای آبیاری و تصمیم‌گیری در مدیریت آب کشاورزی نیز توسعه یافته است. Santos et al. (2024) نیز یک شاخص خشکسالی ترکیبی مبتنی بر PCA و تحلیل وابستگی زمانی ارائه کردند و نشان دادند که PCA می‌تواند برای تلفیق شاخص‌های مختلف خشکسالی در یک چارچوب مکانی توزیع‌شده مفید باشد.

Christelis et al. (2025) از تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای بررسی ویژگی‌های مکانی–زمانی خشکسالی آب زیرزمینی بر پایه شاخص SGI استفاده کردند و نشان دادند که این روش می‌تواند الگوهای مکانی–زمانی خشکسالی را تبیین کرده و تفاوت آن‌ها را با الگوهای حاصل از SPI آشکار سازد. Roy et al. (2024) نیز در مطالعات کیفیت آب، از PCA برای کاهش ابعاد داده‌ها، انتخاب پارامترهای مؤثر و وزن‌دهی متغیرهای کیفیت آب استفاده کردند و نشان دادند که این روش می‌تواند با کاهش سوگیری در محاسبه شاخص‌های کیفیت آب، قابلیت اعتماد ارزیابی را افزایش دهد. این مطالعات نشان می‌دهند که PCA، برخلاف روش‌هایی که فقط وزن معیارها را بر اساس پراکندگی داده‌ها تعیین می‌کنند، ساختار واریانس و همبستگی میان شاخص‌ها را نیز در فرایند ارزیابی وارد می‌کند. بر این اساس، پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که روش‌های Entropy و PCA هر دو ظرفیت قابل توجهی برای وزن‌دهی عینی و تلفیق شاخص‌های چندگانه در مسائل منابع آب دارند. با این حال، بخش قابل توجهی از مطالعات پیشین یا بر ارزیابی منابع آب در مقیاس حوضه، یا بر کیفیت آب، یا بر شاخص‌های خشکسالی متمرکز بوده‌اند. در نتیجه، کاربرد هم‌زمان این دو روش برای ارزیابی مکانی و سناریومحور عملکرد

1. Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
2. Criteria Importance Through Intercriteria Correlation

واحدهای آبیاری در سطح شبکه‌های توزیع آب سطحی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش حاضر با تلفیق Entropy و PCA، محاسبه شاخص عملکرد یکپارچه و پهنه‌بندی عملکرد ۶۷۵ واحد آبیاری در هشت سناریوی بهره‌برداری، تلاش می‌کند این خلأ را پوشش دهد.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه این پژوهش، شبکه آبیاری جرقویه—مهیار است که در حوضه آبریز زاینده‌رود و در مجاورت نواحی خشک مرکزی ایران، قرار دارد. این شبکه از نظر مختصات مکانی تقریباً در بازه UTM X برابر با ۵۳۱۲۵۷ تا ۶۵۱۱۱۴ و UTM Y برابر با ۳۵۸۳۰۴۹ تا ۳۵۸۸۲۶۱ واقع شده است. شبکه آبیاری جرقویه—مهیار حدود ۲۵ سال سابقه بهره‌برداری دارد. تأمین آب سطحی در این شبکه معمولاً از حدود آبان‌ماه تا مردادماه هر سال آبی، انجام می‌شود، اما مقدار واقعی آب قابل انحراف در سال‌های مختلف، به‌شدت تحت تأثیر شرایط خشکسالی و کاهش جریان رودخانه، قرار گرفته است.

اقلیم منطقه گرم و خشک است. میانگین بارندگی سالانه در محدوده شبکه حدود ۱۳۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه حدود ۲۵ درجه سانتی‌گراد، گزارش شده است. ظرفیت طراحی حداکثر انحراف آب در بند انحرافی حدود ۱۲ مترمکعب بر ثانیه است؛ با این حال، به دلیل تداوم خشکسالی و محدودیت منابع آب سطحی، دبی واقعی انحرافی در سال‌های اخیر معمولاً در محدوده حدود ۳ تا ۹ مترمکعب بر ثانیه، قرار داشته است. این اختلاف میان ظرفیت طراحی و شرایط واقعی بهره‌برداری نشان می‌دهد که شبکه در عمل با شرایطی متفاوت از مفروضات اولیه طراحی، مواجه است و همین موضوع ضرورت ارزیابی سناریومحور عملکرد شبکه را، افزایش می‌دهد. در زمان طراحی، سطح ناخالص تحت پوشش شبکه حدود ۲۵۰۰۰ هکتار و سطح خالص اراضی قابل کشت حدود ۲۲۰۰۰ هکتار در نظر گرفته شده بود. با این حال، بررسی اطلاعات جمع آوری شده از شرکت آب منطقه ای اصفهان، نشان می‌دهد که حداکثر سطح زیرکشت فعال در شرایط اخیر به حدود ۹۰۰۰ تا ۱۱۰۰۰ هکتار کاهش یافته است. بر اساس ارزیابی‌های مقدماتی اطلاعات جمع آوری شده در این پژوهش، در اثر تشدید خشکسالی طی دهه اخیر، تحویل آب سطحی در برخی دوره‌ها، فقط حدود ۱۰ تا ۴۰ درصد از اراضی کشت‌شده محدوده شبکه را پوشش داده است.

از نظر مشخصات فنی، طول کل کانال‌های اصلی و درجه دو روباز در شبکه حدود ۱۲۱ کیلومتر است که شامل حدود ۱۱۲ کیلومتر کانال بتنی و حدود ۹ کیلومتر کانال خاکی می‌شود. راندمان متوسط توزیع آب حدود ۵۵ درصد و راندمان متوسط انتقال آب در شبکه حدود ۶۰ درصد در آمار جمع آوری شده گزارش شده است. با فرض صحیح بودن آمار شرکت بهره برداری،این ارقام نشان‌دهنده وجود تلفات قابل توجه در فرآیند توضیع و انتقال آب سطحی هستند و اهمیت بررسی عملکرد مکانی واحدهای مختلف شبکه را بیشتر می‌کنند. سازه‌های هیدرولیکی موجود در شبکه شامل ۲۵ سازه تنظیم هیدرومکانیکی از نوع Amil[1] ، حدود ۴۰ سرریز داکبیل[2](Duckbill) با تاج بلند، حدود ۲۶۲ سازه آبگیر فقط در طول کانالهای اصلی، ۳۸ سازه ریزشی یا آبشار و ۳۵ سیفون معکوس است. وجود این تعداد سازه تنظیم، آبگیر و انتقال نشان می‌دهد که عملکرد نهایی هر واحد آبیاری (حقابه‌بر) فقط به مقدار آب ورودی وابسته نیست، بلکه به نحوه بهره‌برداری، تنظیم سازه‌ها، موقعیت مکانی واحدها و شرایط هیدرولیکی مسیر انتقال نیز بستگی دارد (Bidabadi et al., 2026).

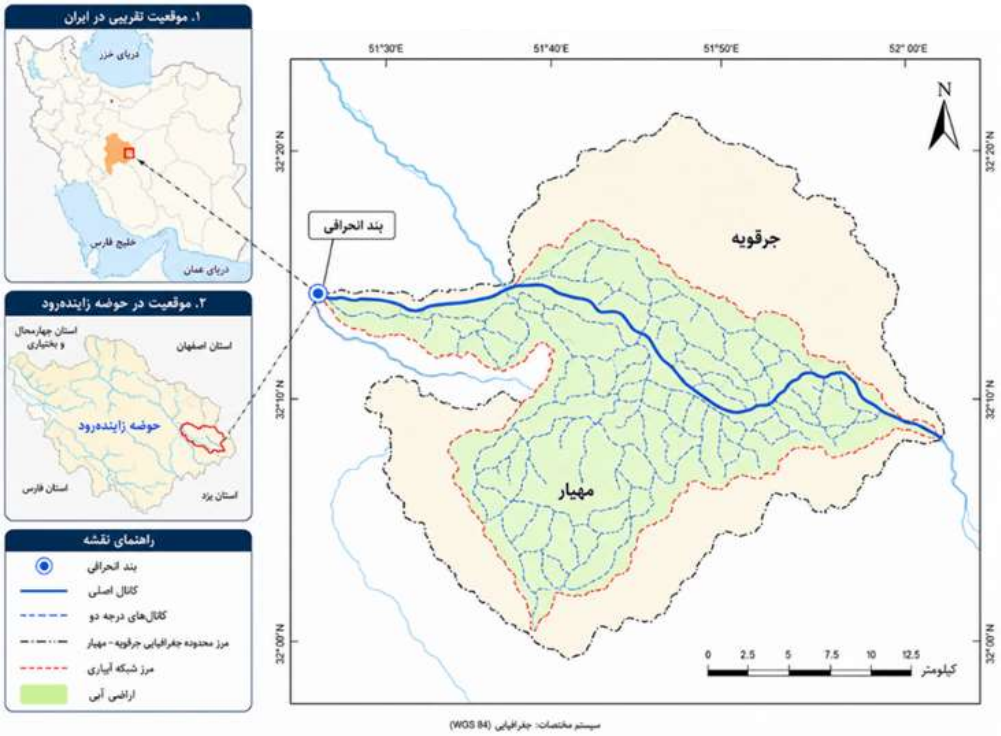
علاوه بر آب سطحی، منابع آب کشاورزی دیگری مانند قنوات، چاه‌های دارای مجوز و چشمه‌ها نیز در شهرستان جرقویه مورد استفاده، قرار گرفته‌اند. با این حال، طی سه دهه گذشته این منابع نیز با افت شدید مواجه شده‌اند. بخش زیادی از قنوات خشک شده یا در معرض تهدید جدی قرار دارند و فقط ۵۱ رشته قنات همچنان فعال، گزارش شده است. در همین دوره، حدود ۷۲۰ مجوز برداشت آب زیرزمینی، صادر شده که از این میان، حدود ۴۵۰ حلقه چاه همچنان فعال هستند و بقیه به دلیل افت سطح آبخوان، از مدار بهره‌برداری، خارج شده‌اند. این وضعیت نشان می‌دهد که محدودیت آب سطحی فقط یک مسئله درون‌شبکه‌ای نیست، بلکه با فشار فزاینده بر منابع آب زیرزمینی و کاهش تاب‌آوری کلی سامانه کشاورزی منطقه، ارتباط دارد.

---

۱. سازه AMIL نوعی سازه تنظیم هیدرومکانیکی خودکار در کانال‌های آبیاری است که با کنترل تراز آب در بالادست، شرایط جریان و تحویل آب را تنظیم می‌کند.
۲. سرریز داکبیل (Duckbill weir) نوعی سرریز با تاج بلند و شکل پلان خمیده (معمولاً V یا U شکل) است که برای تنظیم سطح آب و کنترل دبی در کانال‌های آبیاری به‌کار می‌رود.

در این پژوهش، واحد تحلیل، ۶۷۵ واحد آبیاری (حقابه‌بران) واقع در محدوده شبکه آبیاری جرقویه—مهیار است. هر واحد به‌عنوان یک گزینه مستقل در چارچوب ارزیابی چندمعیاره، در نظر گرفته شد. برای هر واحد، مقادیر شاخص‌های عملکردی شامل شاخص کفایت، پایداری و راندمان توزیع آب سطحی (در مقیاس روزانه) در سناریوهای مختلف بهره‌برداری محاسبه شد. این سناریوها به‌ترتیب، سناریوی نرمال[1] خیلی کم[2] کم[3] متوسط[4] زیاد[5] بسیار زیاد[6] استثنایی[7] و بی‌سابقه[8] هستند. سپس این شاخص‌ها پس از نرمال‌سازی و هم‌جهت‌سازی، با استفاده از روش‌های وزن‌دهی عینی Entropy و PCA در قالب شاخص عملکرد یکپارچه IPI تلفیق شدند.

محدوده مورد مطالعه این پژوهش، شبکه آبیاری جرقویه—مهیار است که در حوضه آبریز زاینده‌رود و در مجاورت نواحی خشک مرکزی ایران قرار دارد. این شبکه از نظر مختصات مکانی تقریباً در بازه UTM X برابر با ۵۳۱۲۵۷ تا ۶۵۱۱۱۴ و UTM Y برابر با ۳۵۸۳۰۴۹ تا ۳۵۸۸۲۶۱ واقع شده است. موقعیت جغرافیایی و محدوده شبکه آبیاری جرقویه—مهیار در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت مکانی و طرح کلی شبکه آبیاری جرقویه - مهیار در حوضه آبریز زاینده‌رود

با توجه به اینکه محاسبه شاخص‌های عملکرد در پژوهش حاضر بر پایه مقادیر شبیه‌سازی‌شده آب تحویلی انجام شده است، دقت مدل هیدرولیکی—بهره‌برداری مورد استفاده از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پژوهش، توسعه، واسنجی و صحت‌سنجی مدل هیدرولیکی به‌صورت مستقل انجام نشده، بلکه از خروجی‌های مدل انتگرالی—تأخیری توسعه‌یافته برای شبکه آبیاری جرقویه—مهیار در مطالعه Bidabadi et al. (۲۰۲۶) استفاده شده است. این مدل برای بازنمایی رفتار هیدرولیکی—بهره‌برداری شبکه، برآورد زمان انتقال جریان و محاسبه دبی تحویلی به آبگیرها توسعه یافته و عملکرد آن در شرایط مختلف بهره‌برداری ارزیابی شده است. در این مطالعه مرجع، عملکرد مدل با مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده زمان انتقال و دبی تحویلی در ۳۴ بازه کانالی و چهار رژیم ظرفیت بهره‌برداری شامل ۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت طراحی بررسی شد. برای ارزیابی دقت مدل، از شاخص‌های آماری مختلف شامل R2، RMSE، NSE، KGE، PBIAS و MAPE استفاده شد. نتایج نشان داد که مقادیر R2 در مرحله واسنجی عموماً در بازه ۰/۹۰۹ تا ۰/۹۹۸ و در

1. Normal
2. Very Low
3. Low
4. Medium
5. High
6. Very High
7. Exceptional
8. Unprecedented

مرحله صحت‌سنجی در بازه ۰/۹۰۵ تا ۰/۹۹۰ قرار دارد که بیانگر همبستگی بسیار قوی میان مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده است. همچنین مقادیر KGE در بیشتر حالت‌ها بالاتر از ۰/۹۰ بوده و در برخی موارد به حدود ۰/۹۹ نزدیک شده است. از سوی دیگر، مقادیر RMSE برای زمان انتقال و دبی تحویلی، در مقایسه با دامنه تغییرات داده‌های مشاهده‌ای، کوچک گزارش شده و مقادیر MAPE نیز عمدتاً در محدوده خطای نسبی پایین قرار داشته است. در مطالعات عددی–آزمایشگاهی، مقدار بالای R2، مقدار پایین RMSE و نزدیک بودن شاخص‌های کارایی مانند KGE به عدد ۱، به‌عنوان نشانه‌های دقت مناسب مدل در بازتولید داده‌های مشاهده‌ای تفسیر شده‌اند (Daneshfaraz et al., 2022; Hassanzadeh et al., 2024; Abbaszadeh et al., 2026). بنابراین، با توجه به مقادیر بالای R2، مقادیر KGE عمدتاً بالاتر از ۰/۹۰، خطای نسبی پایین و کوچک بودن RMSE نسبت به دامنه داده‌های زمان انتقال و دبی تحویلی، می‌توان نتیجه گرفت که مدل هیدرولیکی–بهره‌برداری مورد استفاده در این پژوهش با دقت مناسبی واسنجی و صحت‌سنجی شده است. در نتیجه، خروجی‌های شبیه‌سازی‌شده مدل، شامل دبی تحویلی به واحدهای آبیاری، از قابلیت کافی برای استفاده در چارچوب ارزیابی عملکرد چندمعیاره، مکانی و سناریومحور برخوردار هستند.

معیارهای ارزیابی عملکرد توزیع آب سطحی، روش وزن‌دهی Entropy و رتبه‌بندی TOPSIS

تمامی شاخص‌های ارزیابی عملکرد، روابط نرمال‌سازی، مراحل وزن‌دهی عینی و فرایند محاسبه شاخص عملکرد یکپارچه در (جدول ۱) ارائه شده است. در این جدول، ابتدا روابط مربوط به محاسبه شاخص‌های عملکردی، شامل شاخص کفایت، شاخص راندمان و شاخص پایداری معرفی می‌شوند. سپس، با توجه به متفاوت بودن جهت مطلوبیت شاخص‌ها، روابط نرمال‌سازی و هم‌جهت‌سازی داده‌ها، ارائه می‌شود، به‌گونه‌ای که پس از نرمال‌سازی، مقدار بالاتر هر شاخص نشان‌دهنده عملکرد مطلوب‌تر باشد. در ادامه، روابط مربوط به دو روش وزن‌دهی عینی Entropy و تحلیل مؤلفه‌های اصلی یا PCA آورده می‌شود. روش Entropy وزن شاخص‌ها را بر اساس میزان پراکندگی و محتوای اطلاعاتی داده‌ها، تعیین می‌کند، در حالی که روش PCA با استفاده از ساختار واریانس و همبستگی میان شاخص‌ها، سهم نسبی هر شاخص را در تبیین ساختار کلی عملکرد، مشخص می‌سازد. در نهایت، شاخص عملکرد یکپارچه IPI بر اساس ترکیب وزن‌دار شاخص‌های نرمال‌شده محاسبه می‌شود. این ساختار باعث می‌شود که محاسبه شاخص‌ها، وزن‌دهی و تلفیق نهایی عملکرد واحدهای آبیاری در یک چارچوب شفاف، قابل تکرار و قابل مقایسه میان سناریوهای مختلف، انجام شود.

جدول ۱. روابط ریاضی معیارها، روش Entropy و PCA به همراه تعریف پارامترها

شماره رابطه	نام شاخص	رابطه ریاضی	تعریف متغیرها
(۱)	شاخص کفایت (AI)	$AI = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{Q_{d,i}}{Q_{r,i}}\right)$	**AI:** شاخص کفایت؛ **Qd_i** آب تحویلی به واحد**i** ؛ **Qr_i** نیاز آبی یا حقابه واحد**i** ؛ **n** تعداد دوره‌ها یا واحدها
(۲)	شاخص راندمان (EI)	$EI = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{Q_{b,i}}{Q_{d,i}}\right)$	**EI:** شاخص راندمان؛ **Qb_i** آب مفید مصرف‌شده؛ **Qd_i** آب تحویلی
(۳)	شاخص پایداری (SI)	$SI = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{d,i}-\overline{Q}_d\right)^2}$	**SI:** شاخص پایداری؛ **$\bar{Q}$d** میانگین آب تحویلی؛ **Qd_i** آب تحویلی در دوره یا واحد**i**
(۴)	**Entropy** روابط وزن دهی	$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}}$ $E_j = -k\sum_{i=1}^{m} p_{ij}\ln(p_{ij}), \quad k = \frac{1}{\ln(m)}$ $d_j = 1 - E_j; \quad w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^{n} d_j}$	**x_ij:** مقدار معیار **j** برای گزینه**i** ؛ **p_ij:** مقدار احتمالی؛ **E_j:** آنتروپی معیار؛ **d_j** درجه پراکندگی؛ **w_j** وزن معیار
(۵)	**PCA** روابط وزن دهی	$\mathbf{X}^{(s)} = \left[x_{ij}^{(s)}\right]_{n\times m}$ $z_{ij}^{(s)} = \frac{x_{ij}^{(s)} - \bar{x}_j^{(s)}}{\sigma_j^{(s)}}$ $\mathbf{R}^{(s)} = \frac{1}{n-1}\left(\mathbf{Z}^{(s)}\right)^T\mathbf{Z}^{(s)}$ $\mathbf{R}^{(s)}\mathbf{a}_k^{(s)} = \lambda_k^{(s)}\mathbf{a}_k^{(s)}$	$\mathbf{X}^{(s)}$ ماتریس شاخص‌های نرمال شده در سناریوی **s** $x_{ij}^{(s)}$: مقدار شاخص **j** برای واحد **i** در سناریوی **s** n : تعداد واحدهای آبیاری m : تعداد شاخص‌ها $z_{ij}^{(s)}$:مقدار استاندارد شده شاخص**j** برای واحد **i** در سناریوی **s** $\bar{x}_j^{(s)}$ میانگین شاخص **j** در سناریوی **s** $\sigma_j^{(s)}$انحراف معیار شاخص **j** در سناریوی **s** $\mathbf{Z}^{(s)}$ماتریس استاندارد شده در سناریوی **s**

شماره رابطه	نام شاخص	رابطه ریاضی	تعریف متغیرها
		$EV_k^{(s)} = \frac{\lambda_k^{(s)}}{\sum_{k=1}^{m} \lambda_k^{(s)}}$	$\mathbf{R}^{(s)}$ماتریس همبستگی (یا کوواریانس) $\lambda_k^{(s)}$: مقدار ویژه مولفه $\mathbf{a}_k^{(s)}$: بردار ویژه مولفه
		$L_{jk}^{(s)} = a_{jk}^{(s)} \sqrt{\lambda_k^{(s)}}$	$ka_{jk}^{(s)}$: ضریب شاخص **j** روی مولفه **k** $EV_k^{(s)}$: سهم واریانس تبیین شده توسط مولفه **k** $L_{jk}^{(s)}$: بار عاملی شاخص **j** روی مولفه **k**
		$G_j^{(s)} = \sum_{k=1}^{K} \lvert L_{jk}^{(s)} \rvert EV_k^{(s)};$	K : تعداد مولفه‌های اصلی نگه داشته شده $G_j^{(s)}$: امتیاز مشارکت شاخص **j** در ساختار **PCA**
		$w_{j,PCA}^{(s)} = \frac{G_j^{(s)}}{\sum_{j=1}^{m} G_j^{(s)}}$	$w_{j,PCA}^{(s)}$: وزن نهایی شاخص **j** بر اساس روش **PCA**
(۶)	**IPI** شاخص یکپارچه	$IPI_i^{(s)} = \sum_{j=1}^{m} w_j^{(s)} x_{ij,norm}^{(s)}$	$IPI_i^{(s)}$: شاخص عملکرد یکپارچه برای واحد **i** در سناریوی **s** $w_j^{(s)}$: وزن شاخص **j** در سناریوی **s** که میتواند از روش **PCA** یا **Entropy** به دست آید $x_{ij,norm}^{(s)}$: مقدار نرمال شده و هم‌جهت شده شاخص **j** برای واحد **i** در سناریوی **s** **m** تعداد شاخص‌ها مقدار بالاتر **IPI** نشان دهنده عملکرد مطلوب‌تر واحد آبیاری است

رفرنس روابط: روابط (۱)، (۲) و (۳): Rahparast et al. (2026)، رابطه (۴): Sethi et al. (2026)، رابطه (۵): Hu et al. (2025)، رابطه (۶): (مطالعه حاضر)

برای تفسیر مدیریتی ساده‌تر، مقادیر نرمال‌شده IPI در چهار کلاس عملکردی، طبقه‌بندی شدند. کلاس A بیانگر عملکرد پایدار یا مطلوب، کلاس B بیانگر وضعیت انتقالی، کلاس C بیانگر وضعیت نامنطبق یا نیازمند بهبود، و کلاس D بیانگر وضعیت بحرانی است. دامنه کلاس‌ها به‌ترتیب شامل ۸۰ تا ۱۰۰، ۶۰ تا کمتر از ۸۰، ۴۰ تا کمتر از ۶۰ و کمتر از ۴۰ در مقیاس نرمال‌شده IPI بود. سپس نتایج برای هر سناریو و هر روش وزن‌دهی به‌صورت نقشه مکانی نمایش داده شدند تا الگوی توزیع عملکرد در سطح شبکه، قابل مشاهده باشد.

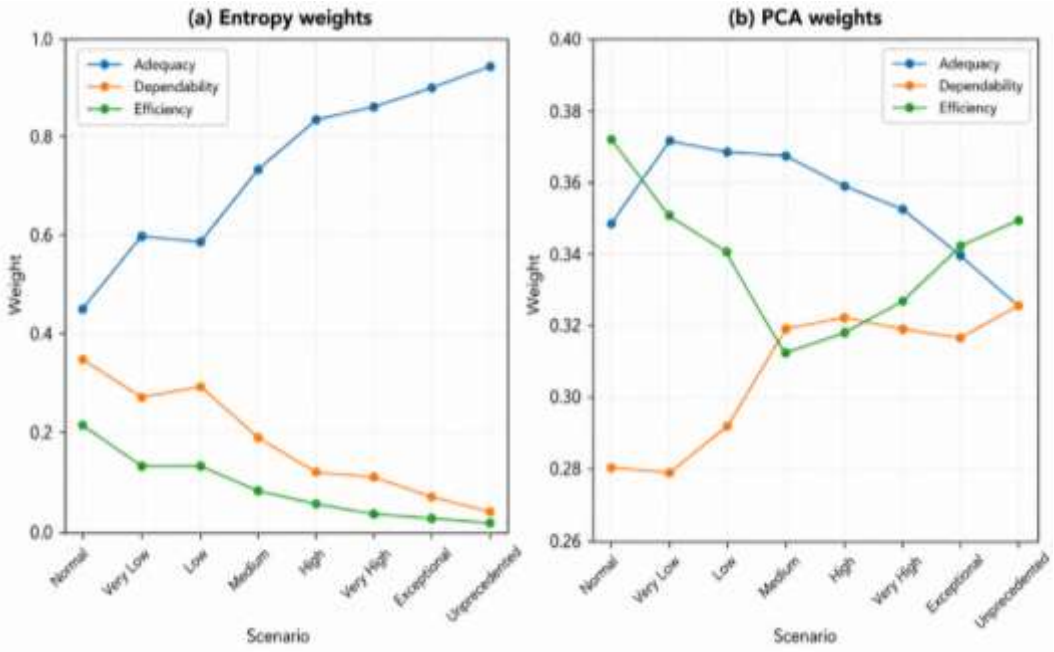
نتایج

نتایج وزن‌دهی شاخص‌ها با روش Entropy وPCA

روند تغییر وزن سه شاخص اصلی عملکرد، یعنی شاخص کفایت، پایداری راندمان را در هشت سناریوی بهره‌برداری و برای دو روش وزن‌دهی عینی Entropy و PCA را نشان می‌دهد(شکل ۲). در بخش مربوط به‌Entropy، با حرکت از سناریوی Normal به سناریوهای شدیدتر کم‌آبی، وزن شاخص کفایت روندی صعودی و بسیار محسوس دارد، به‌طوری که وزن این شاخص از حدود ۰/۴۴۵ در سناریوی نرمال به حدود ۰/۹۵۰۰ در سناریوی Unprecedented می‌رسد. این موضوع بیانگر آن است که در شرایط تشدید کم‌آبی، شاخص کفایت بیشترین قدرت تفکیک را در میان واحدهای آبیاری، پیدا می‌کند و در نتیجه نقش آن در ساخت شاخص ترکیبی بسیار پررنگ‌تر می‌شود. در مقابل، الگوی وزن‌ها در روش PCA متعادل‌تر است و تغییرات کمتری را میان سناریوها، نشان می‌دهد. این رفتار نشان می‌دهد که PCAبه‌جای تمرکز شدید بر یک شاخص خاص، ساختار همبستگی و واریانس مشترک میان شاخص‌ها را، مبنا قرار می‌دهد و از این رو، سهم شاخص‌های پایداری و راندمان نیز در شرایط شدید کم‌آبی تا حد زیادی حفظ می‌شود. از نظر تفسیری (شکل ۲) نشان می‌دهد که Entropyدر آشکارسازی افت ناشی از کمبود آب حساس‌تر است، در حالی که PCA تصویری متوازن‌تر از عملکرد چندشاخصه شبکه، ارائه می‌دهد. این تفاوت بعداً در نتایج IPI و پهنه‌بندی مکانی نیز، بازتاب پیدا می‌کند.

نتایج وزن‌دهی نشان داد که اهمیت نسبی شاخص‌ها در سناریوهای مختلف ثابت نیست و با تغییر شدت کم‌آبی، تغییر می‌کند. وزن‌های حاصل از دو روش Entropy و PCA را برای سه شاخص کفایت، پایداری و راندمان توزیع و تحویل آب در هشت سناریوی بهره‌برداری نشان می‌دهد(جدول ۲). نتایج نشان داد که در روش‌Entropy، شاخص کفایت در همه سناریوها بیشترین وزن را، دریافت کرده است و با تشدید کم‌آبی، وزن آن به‌شدت افزایش می‌یابد. وزن شاخص کفایت از ۰/۴۴۴۵ در سناریوی Normal به ۰/۹۵۰۰ در سناریوی

Unprecedentedرسیده است. این افزایش نشان می‌دهد که در سناریوهای شدید، تفاوت عملکرد واحدها بیش از همه از طریق شاخص کفایت، توضیح داده می‌شود. به بیان دیگر، با تشدید محدودیت تأمین آب، مسئله اصلی شبکه، به میزان تأمین نیاز آبی واحدها، تبدیل می‌شود. در مقابل، وزن شاخص‌های پایداری و راندمان در روش Entropy ، با تشدید کم‌آبی کاهش می‌یابد. وزن شاخص پایداری از ۰/۳۴۷۲ در سناریوی Normal به ۰/۰۳۶۷ در سناریوی Unprecedented کاهش یافته و وزن شاخص راندمان نیز از ۰/۲۰۸۳ به ۰/۰۱۳۳ رسیده است. این کاهش نشان می‌دهد که در شرایط شدید، قدرت تفکیک این دو شاخص نسبت به شاخص کفایت، کمتر می‌شود. در روشPCA، وزن شاخص‌ها متعادل‌تر است. وزن شاخص کفایت در محدوده ۰/۳۲۵۶ تا ۰/۳۶۹۲ تغییر می‌کند، وزن پایداری در محدوده ۰/۲۸۰۰ تا ۰/۳۲۵۶ قرار دارد و وزن راندمان نیز بین ۰/۳۱۳۶ تا ۰/۳۷۰۴ تغییر می‌کند. این نتیجه نشان می‌دهد که PCA نقش هر سه شاخص را در ساختار چندبعدی عملکرد، حفظ می‌کند و برخلافEntropy، یک شاخص را در سناریوهای شدید به‌صورت بسیار غالب، نشان نمی‌دهد.



شکل ۲. تغییرات وزن شاخص‌های کفایت، پایداری و راندمان در سناریوهای مختلف بهره‌برداری بر اساس روش‌های Entropy و PCA

جدول ۲. وزن شاخص‌های عملکردی بر اساس روش‌های Entropy و PCA در سناریوهای مختلف

سناریو	Entropy			PCA		
	کفایت Adequacy	پایداری Dependability	راندمان Efficiency	کفایت Adequacy	پایداری Dependability	راندمان Efficiency
Normal	۰/۴۴۴۵	۰/۳۴۷۲	۰/۲۰۸۳	۰/۳۴۹۶	۰/۲۸۰۰	۰/۳۷۰۴
Very Low	۰/۵۹۵۸	۰/۲۷۱۹	۰/۱۳۲۳	۰/۳۶۹۲	۰/۲۷۹۷	۰/۳۵۱۱
Low	۰/۵۸۴۸	۰/۲۸۶۱	۰/۱۲۹۱	۰/۳۶۷۱	۰/۲۹۱۶	۰/۳۴۱۳
Medium	۰/۷۳۲۲	۰/۱۸۶۱	۰/۰۸۱۷	۰/۳۶۶۹	۰/۳۱۹۵	۰/۳۱۳۶
High	۰/۸۳۳۲	۰/۱۱۵۳	۰/۰۵۱۵	۰/۳۵۹۳	۰/۳۲۱۹	۰/۳۱۸۸
Very High	۰/۸۶۳۱	۰/۱۰۴۵	۰/۰۳۲۴	۰/۳۵۳۷	۰/۳۱۹۱	۰/۳۲۷۲
Exceptional	۰/۹۰۹۳	۰/۰۷۲۵	۰/۰۱۸۲	۰/۳۴۰۴	۰/۳۱۶۹	۰/۳۴۲۷
Unprecedented	۰/۹۵۰۰	۰/۰۳۶۷	۰/۰۱۳۳	۰/۳۲۵۹	۰/۳۲۵۶	۰/۳۴۸۹

نتایج شاخص عملکرد یکپارچه IPI

پس از محاسبه وزن شاخص‌ها، مقدار IPI برای هر یک از ۶۷۵ واحد آبیاری و در هر یک از هشت سناریوی بهره‌برداری محاسبه شد. آمار توصیفی مقادیر نرمال‌شده IPI را برای دو روش Entropy و PCA نشان می‌دهد (جدول ۳). نتایج نشان داد که میانگین IPI_Entropy ، با افزایش شدت کم‌آبی کاهش شدیدی دارد. مقدار میانگین این شاخص از ۶۲/۸۳ در سناریوی Normal به ۸/۶۴ در سناریوی

Unprecedentedکاهش، یافته است. این کاهش نشان‌دهنده افت شدید عملکرد واحدهای آبیاری از شرایط نرمال به شرایط کم‌آبی بی‌سابقه، است. به‌ویژه از سناریوی Medium به بعد، روند افتEntropy –IPI، کاملاً محسوس می‌شود.

در مقابل، میانگین IPI_PCA تغییرات ملایم‌تری نشان می‌دهد. مقدار این شاخص از ۶۱/۱۳ در سناریوی Normal به ۴۲/۳۸ در سناریوی Exceptional کاهش می‌یابد، اما در سناریوی Unprecedented به ۵۴/۵۲ افزایش پیدا می‌کند. این رفتار باید با احتیاط تفسیر شود و به معنی بهبود واقعی عملکرد در شدیدترین سناریو، نیست. این نتیجه بیشتر ناشی از ساختار وزن‌دهی PCA و حفظ نقش نسبی شاخص‌های پایداری و راندمان، در شاخص نهایی است.

از نظر پراکندگی، انحراف معیار IPI _Entropy تا سناریوی High افزایش یافته و سپس در سناریوهای شدیدتر کاهش می‌یابد. این روند نشان می‌دهد که در سناریوهای میانی و شدید، تفاوت میان واحدهای قوی و ضعیف افزایش می‌یابد، اما در شدیدترین سناریوها، بخش بزرگی از شبکه به سمت عملکرد پایین، حرکت می‌کند و پراکندگی نسبی کاهش می‌یابد. در روشPCA، انحراف معیار تغییرات محدودتری دارد و نشان‌دهنده تعدیل بیشتر تغییرات عملکردی، است.

جدول ۳. آمار توصیفی مقادیر نرمال‌شده IPI در سناریوهای مختلف

سناریو	IPI_Entropy		IPI_PCA	
	Mean (0–100) میانگین	SD (0–100) انحراف معیار	Mean (0–100) میانگین	SD (0–100) انحراف معیار
Normal	۶۲/۸۳	۸/۱۴	۶۱/۱۳	۸/۱۴
Very Low	۵۵/۴۸	۱۴/۰۵	۵۷/۸۰	۸/۹۰
Low	۵۵/۵۷	۱۴/۶۱	۵۴/۲۳	۱۰/۷۲
Medium	۴۴/۱۴	۲۱/۵۱	۵۱/۲۹	۱۳/۸۱
High	۲۸/۰۹	۲۲/۱۷	۴۳/۶۲	۱۳/۲۱
Very High	۲۲/۶۵	۲۱/۳۲	۴۳/۰۳	۱۴/۴۷
Exceptional	۱۴/۱۴	۲۰/۴۴	۴۲/۳۸	۱۴/۹۴
Unprecedented	۸/۶۴	۱۶/۴۳	۵۴/۵۲	۱۱/۷۴

برای تفسیر مدیریتی نتایج، مقادیر IPI-Entropy در چهار کلاس عملکردی، طبقه‌بندی شدند و تعداد واحدهای واقع در هر کلاس را، نشان می‌دهد(جدول ۴). نتایج نشان داد که در روشEntropy ، با افزایش شدت کم‌آبی، تعداد واحدهای بحرانی به‌شدت افزایش می‌یابد. در سناریوی Normal فقط یک واحد در کلاس D قرار دارد، اما در سناریوی Medium این تعداد به ۴۲۲ واحد می‌رسد. در سناریوهای شدیدتر، روند بحرانی شدن شبکه، ادامه می‌یابد و در سناریوی Unprecedented تعداد واحدهای کلاس D به ۶۴۸ واحد می‌رسد. این نتیجه نشان می‌دهد که از سناریوی Medium به بعد، بخش بزرگی از شبکه از نظرEntropy - IPI ، وارد وضعیت بحرانی، می‌شود.

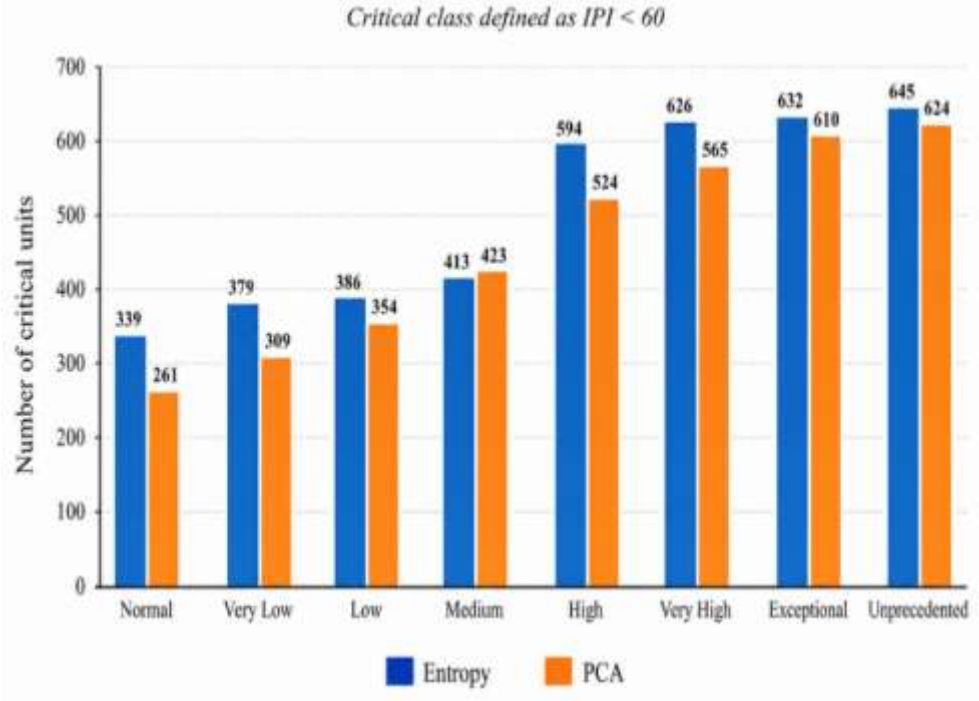
جدول ۴. تعداد واحدهای واقع در کلاس‌های عملکردی بر اساس IPI_Entropy

سناریو	A کلاس Class A (No.)	Bکلاس Class B (No.)	C کلاس Class C (No.)	D کلاس Class D (No.)
Normal	۲۷	۳۸۲	۲۶۵	۱
Very Low	۵۸	۱۴۴	۴۱۶	۵۷
Low	۶۸	۱۳۰	۴۳۲	۴۵
Medium	۷۲	۹۶	۸۵	۴۲۲
High	۴۳	۳۱	۶۳	۵۳۸
Very High	۳۱	۲۸	۴۲	۵۷۴
Exceptional	۲۳	۲۳	۲۷	۶۰۲
Unprecedented	۲۳	۴	۰	۶۴۸

روند افزایش وسعت عملکرد بحرانی، در سطح واحدهای آبیاری نشان داه شده و از این نظر مکمل نتایج جدولی طبقه‌بندی عملکرد است(شکل ۳). تعداد واحدهای واقع در هر کلاس عملکردی، به‌صورت عددی گزارش گردیده است و بر تغییر مقیاس بحران در سطح

شبکه تأکید دارد(جدول ۴). نتایج نشان می‌دهد که وضعیت بحرانی از یک پدیده محدود و موضعی در سناریوهای اولیه، به یک وضعیت گسترده و فراگیر در سناریوهای شدیدتر تبدیل می‌شود(شکل ۳). بر اساس نتایج روشEntropy، تعداد واحدهای بحرانی از مقدار بسیار محدود در سناریوی Normal به بخش غالب شبکه در سناریوهای High، Very High، Exceptionalو Unprecedented افزایش می‌یابد. این روند بیانگر آن است که با تشدید کم‌آبی، افت عملکرد فقط در چند واحد منفرد باقی نمی‌ماند، بلکه به‌تدریج بخش وسیع‌تری از محدوده خدمات‌رسانی شبکه را، درگیر می‌کند. از دیدگاه توزیع مکانی، افزایش تعداد واحدهای بحرانی به معنی گسترش تدریجی پهنه‌های نامطلوب در نقشه‌های عملکردی است(شکل ۳). در سناریوهایNormal، Very Low و Low، واحدهای بحرانی محدودترند و انتظار می‌رود بیشتر به‌صورت لکه‌های پراکنده یا در بخش‌های حساس‌تر شبکه، ظاهر شوند. اما از سناریوی Medium به بعد، افزایش ناگهانی تعداد واحدهای بحرانی نشان می‌دهد که ضعف عملکرد از حالت نقطه‌ای یا محلی خارج شده و به شکل پهنه‌های پیوسته‌تر در سطح شبکه، گسترش می‌یابد. در روش Entropy ، این گذار شدیدتر است، زیرا کاهش شاخص کفایت در شرایط کم‌آبی، نقش غالب‌تری در محاسبه IPI پیدا می‌کند. در مقابل، روش PCA به دلیل حفظ نقش نسبی شاخص‌های پایداری و راندمان، گسترش بحران را تعدیل‌شده‌تر، نشان می‌دهد.

در مقایسه دو روش، Entropy تصویر حساس‌تر و هشداردهنده‌تری از گسترش مکانی بحران، ارائه می‌دهد، در حالی که PCA ، الگوی ملایم‌تر و متعادل‌تری از افت عملکرد را، نشان می‌دهد. این تفاوت از نظر مدیریتی مهم است؛ زیرا نتایج Entropy می‌تواند برای شناسایی سریع نواحی مستعد بحران در شرایط کم‌آبی شدید، استفاده شود، در حالی که نتایج PCA برای تشخیص مناطقی مناسب است که ضعف عملکرد آن‌ها، حاصل ترکیب چند شاخص عملکردی است. بنابراین، (شکل ۳) نقش واسط میان نتایج عددی طبقه‌بندی و نقشه‌های پهنه‌بندی مکانی را دارد و نشان می‌دهد که افزایش شدت کم‌آبی چگونه به گسترش مکانی واحدهای بحرانی در کل شبکه، منجر می‌شود.



شکل ۳. روند گسترش واحدهای دارای وضعیت بحرانی در سناریوهای مختلف بهره‌برداری بر اساس شاخص عملکرد یکپارچه IPI در دو روش PCA.وEntropy

تعداد واحدهای واقع در کلاس‌های عملکردی بر اساس IPI_PCA نشان داده شده است (جدول ۵). در روش PCA نیز با افزایش شدت کم‌آبی، تعداد واحدهای دارای عملکرد ضعیف و بحرانی افزایش می‌یابد، اما شدت این افزایش کمتر از روش Entropy ، است. برای مثال، در سناریوی Exceptional تعداد واحدهای کلاس D در روش PCA برابر با ۳۰۵ واحد است، در درحالی که در روش Entropy این مقدار ۶۰۲ واحد است. این تفاوت نشان می‌دهد که PCA نسبت به Entropy تصویر تعدیل‌شده‌تری از افت عملکرد، ارائه می‌کند.

جدول ۵. تعداد واحدهای واقع در کلاس‌های عملکردی بر اساسIPI_PCA

سناریو	کلاس A Class A (No.)	کلاس B Class B (No.)	کلاس C Class C (No.)	کلاس D Class D (No.)
Normal	**۳**	**۴۱۲**	**۲۵۱**	**۹**
Very Low	۱۵	۲۰۵	۴۵۱	۴
Low	۷	۱۶۴	۴۵۳	۵۱
Medium	۱۹	۱۳۸	۳۷۰	۱۴۸
High	۴	۶۱	۳۴۰	۲۷۰
Very High	۱۶	۳۳	۳۲۶	۳۰۰
Exceptional	۱۳	۳۵	۳۲۲	۳۰۵
Unprecedented	۰	۴۵۷	۱۱۸	۱۰۰

الگوی مکانی تغییرات شاخص عملکرد یکپارچه (IPI) ، در هشت سناریوی بهره‌برداری بر اساس دو روش وزن‌دهی Entropy و PCA نشان داده شده است (شکل ۴). این شکل با ۱۶ زیرشکل، امکان مقایسه هم‌زمان تغییرات عملکرد از سناریوی Normal تا Unprecedented و تفاوت بازنمایی عملکرد توسط دو روش وزن‌دهی را، فراهم می‌کند. این شکل، خروجی اصلی تحلیل مکانی پژوهش است و نشان می‌دهد که چگونه با تشدید کم‌آبی، افت عملکرد از نواحی محدود به پهنه‌های گسترده شبکه گسترش می‌یابد.

در نتایج مبتنی برEntropy، تغییرات مکانی عملکرد با شدت بیشتری آشکار می‌شود. در شرایط Normal، فقط یک واحد، معادل حدود ۰/۱ درصد کل ۶۷۵ واحد، در کلاس بحرانی D قرار دارد و در مقابل، مجموع کلاس‌های A و B شامل ۴۰۹ واحد، یعنی حدود ۶۰/۶ درصد شبکه، است. این وضعیت نشان می‌دهد که در شرایط نرمال، بخش عمده شبکه هنوز در وضعیت عملکردی قابل قبول یا انتقالی قرار دارد و ضعف عملکردی بیشتر در کلاس C و به‌صورت محدودتر در کلاس D مشاهده می‌شود. با ورود به سناریوهای Very Low وLow، سهم کلاس‌های نامطلوب C و D به‌ترتیب به حدود ۷۰/۱ درصد و ۷۰/۷ درصد، افزایش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که حتی در مراحل اولیه کم‌آبی، شبکه از نظر مکانی به‌سرعت از وضعیت غالباً قابل قبول به سمت وضعیت نامنطبق، حرکت می‌کند، هرچند هنوز بخش بحرانی، کاملاً غالب نشده است.

نقطه تغییر اصلی در روش Entropy در سناریوی Medium مشاهده می‌شود. در این سناریو، تعداد واحدهای بحرانی به ۴۲۲ واحد، معادل حدود ۶۲/۵ درصد کل واحدها، افزایش می‌یابد. به بیان دیگر، از سناریوی Medium به بعد، وضعیت بحرانی از حالت لکه‌های محدود یا نواحی پراکنده خارج شده و به بخش غالب شبکه، تبدیل می‌شود. این تغییر در نقشه‌های مکانی نیز به‌صورت گسترش پهنه‌های بحرانی در بخش قابل توجهی از محدوده خدمات‌رسانی شبکه، قابل مشاهده است. در سناریوهای شدیدتر، این روند تشدید می‌شود؛ به‌طوری که تعداد واحدهای بحرانی در سناریوهایHigh، Very High، Exceptional و Unprecedented به‌ترتیب به ۵۳۸، ۵۷۴، ۶۰۲ و ۶۴۸ واحد می‌رسد. این مقادیر معادل حدود ۷۹/۷، ۸۵/۰، ۸۹/۲ و ۹۶/۰ درصد کل شبکه هستند. بنابراین، بر اساسEntropy، در سناریوی Unprecedentedتقریباً کل شبکه در وضعیت بحرانی، قرار می‌گیرد و فقط ۲۷ واحد، معادل حدود ۴/۰ درصد، در کلاس‌های A و B باقی می‌مانند.

از نظر الگوی مکانی، نتایج Entropy نشان می‌دهد که افت عملکرد در سناریوهای اولیه به‌صورت محدودتر ظاهر می‌شود، اما با تشدید کم‌آبی، پهنه‌های بحرانی به‌تدریج به یک ساختار گسترده و پیوسته در سطح شبکه، تبدیل می‌شوند. این رفتار با منطق وزن‌دهی Entropy سازگار است، زیرا در سناریوهای شدید، وزن شاخص کفایت، افزایش چشمگیری پیدا می‌کند و هرگونه افت در تأمین نیاز آبی واحدها با شدت بیشتری در مقدار نهایی IPI منعکس می‌شود. بنابراین، در ردیف Entropy، نقشه‌ها بیشتر نقش هشدار مکانی، دارند و نشان می‌دهند که در صورت کاهش شدید تأمین آب، ضعف عملکردی می‌تواند در سطح بسیار وسیعی از شبکه، گسترش یابد. این ویژگی برای مدیریت کم‌آبی اهمیت زیادی دارد، زیرا نشان می‌دهد که از سناریوی Medium به بعد، مداخله مدیریتی نباید صرفاً به چند نقطه منفرد محدود شود، بلکه باید در قالب مدیریت پهنه‌ای و بازنگری گسترده‌تر در برنامه توزیع آب انجام گیرد.

در نتایج مبتنی بر PCA نیز روند افت عملکرد مشاهده می‌شود، اما شدت گسترش کلاس بحرانی نسبت به Entropy کمتر است. در سناریوی Normal، تعداد واحدهای بحرانی بر اساس PCA برابر با ۹ واحد، معادل حدود ۱/۳ درصد شبکه است و مجموع کلاس‌های Aو B شامل ۴۱۵ واحد، یعنی حدود ۶۱/۵ درصد واحدها، می‌شود. این وضعیت از نظر کلی مشابه Entropy است و نشان می‌دهد که در

شرایط نرمال، هر دو روش تصویر نسبتاً قابل قبولی از عملکرد کلی شبکه، ارائه می‌دهند. با این حال، در سناریوهای Very Low وLow، بیشترین سهم واحدها در روش PCA در کلاس C قرار دارد؛ به‌گونه‌ای که در سناریوی Very Low، ۴۵۱ واحد، معادل ۶۶/۸ درصد، و در سناریوی Low، ۴۵۳ واحد، معادل ۶۷/۱ درصد، در کلاس نامنطبق C قرار می‌گیرند. این نتیجه نشان می‌دهد که PCA در مراحل اولیه کم‌آبی، بیش از آنکه واحدها را مستقیماً به کلاس بحرانی، منتقل کند، آن‌ها را در وضعیت نامنطبق و نیازمند بهبود، نشان می‌دهد.

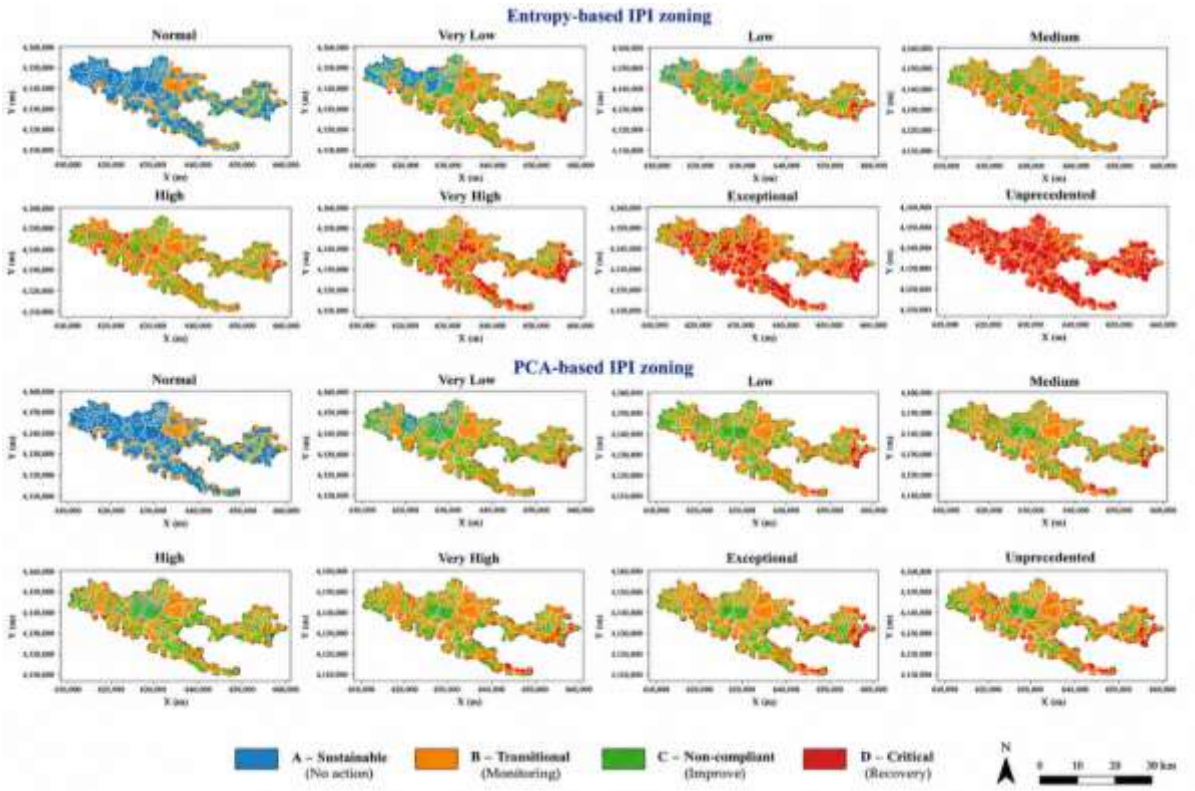
در سناریوهای Medium تاExceptional، سهم کلاس بحرانی در PCA افزایش می‌یابد، اما این افزایش نسبت به Entropy تعدیل‌شده‌تر است. تعداد واحدهای بحرانی در سناریوهای Medium، High، Very Highو Exceptional به‌ترتیب برابر با ۱۴۸، ۲۷۰، ۳۰۰ و ۳۰۵ واحد است که معادل حدود ۲۱/۹، ۴۰,۰، ۴۴,۴ و ۴۵,۲ درصد کل شبکه می‌شود. بنابراین، در روش PCA نیز از سناریوی Mediumبه بعد، گسترش عملکرد بحرانی قابل مشاهده است، اما برخلافEntropy، کلاس C همچنان سهم قابل توجهی از شبکه را حفظ می‌کند. برای مثال، در سناریویHigh، تعداد واحدهای کلاس C برابر با ۳۴۰ واحد، یعنی حدود ۵۰/۴ درصد شبکه است و در سناریوهای Very High و Exceptional نیز به‌ترتیب ۳۲۶ واحد و ۳۲۲ واحد در این کلاس قرار دارند. این موضوع نشان می‌دهد که PCA میان وضعیت نامنطبق و بحرانیف تفکیک بیشتری ایجاد می‌کند و افت عملکرد را به‌صورت تدریجی‌تر، نشان می‌دهد.

یکی از تفاوت‌های مهم میان دو روش در سناریوی Unprecedented دیده می‌شود. در این سناریو، Entropy تعداد ۶۴۸ واحد، معادل ۹۶/۰ درصد شبکه، را در کلاس بحرانی D قرار می‌دهد؛ اما PCA فقط ۱۰۰ واحد، یعنی حدود ۱۴/۸ درصد، را در کلاس D نشان می‌دهد. در مقابل، در روشPCA، ۴۵۷ واحد، معادل حدود ۶۷/۷ درصد، در کلاس B و ۱۱۸ واحد، معادل ۱۷/۵ درصد، در کلاس C قرار گرفته‌اند. این تفاوت به معنی بهبود واقعی عملکرد در شدیدترین سناریو نیست، بلکه ناشی از منطق متفاوت PCA در وزن‌دهی است. PCAبه دلیل حفظ ساختار واریانس و همبستگی میان شاخص‌ها، نقش شاخص‌های پایداری و راندمان را در کنار کفایت نگه می‌دارد و بنابراین شدت افت عملکرد را نسبت به Entropy تعدیل می‌کند. از این رو، نقشه PCA در سناریوی Unprecedented باید به‌عنوان یک تصویر چندشاخصه و متعادل‌تر از عملکرد تفسیر شود، نه به‌عنوان نشانه مطلوب بودن شرایط بهره‌برداری.

در مجموع، الگوهای مکانی نشان می‌دهد که دو روش Entropy و PCA، دو برداشت مکمل از توزیع مکانی عملکرد شبکه ارائه می‌کنند. روش Entropy برای شناسایی سریع پهنه‌های حساس به افت کفایت و تشخیص نواحی بحرانی تحت کم‌آبی شدید، مناسب‌تر است. در این روش، بحران عملکردی از سناریوی Medium به بعد به‌صورت گسترده ظاهر می‌شود و در سناریویUnprecedented تقریباً کل شبکه را دربر می‌گیرد. در مقابل، روش PCA الگوی مکانی افت عملکرد را با شدت کمتر و تفکیک تدریجی‌تر میان کلاس‌هایB ، Cو D نشان می‌دهد. بنابراین، PCA می‌تواند برای تشخیص نواحی انتقالی، نامنطبق و دارای ضعف چندبعدی، مفیدتر باشد. ترکیب این دو روش به مدیران شبکه کمک می‌کند تا هم نواحی دارای بحران آشکار و فوری را شناسایی کنند و هم مناطقی را که هنوز وارد وضعیت بحرانی کامل نشده‌اند، اما در مسیر افت عملکرد قرار دارند، در برنامه پایش و اصلاح بهره‌برداری قرار دهند.

از دیدگاه مدیریتی، مهم‌ترین پیام (شکل ۴) آن است که افت عملکرد شبکه آبیاری جرقویه—مهیار صرفاً یک کاهش میانگین عددی نیست، بلکه دارای الگوی مکانی مشخص و قابل ردیابی است. در سناریوهای خفیف‌تر، ضعف عملکرد بیشتر به‌صورت محدودتر و در قالب کلاس‌های C یا نواحی پراکنده ظاهر می‌شود؛ اما با تشدید محدودیت تأمین آب، این ضعف به پهنه‌های وسیع‌تر و پیوسته‌تری گسترش می‌یابد. بر اساسEntropy، سناریوی Medium را می‌توان نقطه شروع گسترش جدی بحران مکانی در شبکه دانست، زیرا در این سناریو بیش از سه‌پنجم واحدها وارد کلاس بحرانی می‌شوند. بر اساس PCA نیز از سناریوی High به بعد، بیش از ۹۰ درصد واحدها در مجموع کلاس‌های C و D قرار می‌گیرند که نشان‌دهنده غلبه وضعیت نامنطبق یا بحرانی در سطح شبکه است. بنابراین، (شکل ۴) مبنای بصری و تحلیلی مهمی برای تعریف آستانه‌های هشدار، تعیین نواحی اولویت‌دار پایش، و طراحی راهبردهای مداخله در برنامه توزیع آب سطحی محسوب می‌شود.

برای مقایسه مستقیم دو روش، تعداد واحدهای قرارگرفته در کلاس D در ارائه شده است(جدول ۶). نتایج نشان می‌دهد که از سناریوی Medium به بعد، روش Entropy تعداد بسیار بیشتری از واحدها را در کلاس بحرانی، قرار می‌دهد. این تفاوت به‌ویژه در سناریوی Unprecedented بسیار زیاد است؛ به‌طوری که روش Entropy تعداد ۶۴۸ واحد را، بحرانی تشخیص می‌دهد، در حالی که PCAفقط ۱۰۰ واحد را در کلاس D قرار می‌دهد. این تفاوت نشان‌دهنده حساسیت بالاتر Entropy نسبت به افت شدید شاخص کفایت، در سناریوهای کم‌آبی است.



شکل ۴. پهنه‌بندی مکانی شاخص عملکرد یکپارچه (IPI) در هشت سناریوی بهره‌برداری بر اساس روش‌های Entropy و PCA.

از نظر مدیریتی، این تفاوت به معنی برتری مطلق یک روش بر روش دیگر نیست، Entropy برای شناسایی واحدهایی که نسبت به کم‌آبی و افت کفایت بسیار حساس هستند مناسب‌تر است. در مقابل، PCA برای ارائه تصویر متعادل‌تری از عملکرد چند بعدی واحدها، کاربرد دارد. بنابراین، استفاده همزمان از دو روش می‌تواند تصویر کامل‌تری از وضعیت شبکه، فراهم کند.

جدول ۶. مقایسه تعداد واحدهای بحرانی در روش‌های Entropy و PCA

سناریو	Entropy در کلاس D	PCA در کلاس D	اختلاف Entropy_PCA
Normal	۱	۹	−۸
Very Low	۵۷	۴	۵۳
Low	۴۵	۵۱	−۶
Medium	۴۲۲	۱۴۸	۲۷۴
High	۵۳۸	۲۷۰	۲۶۸
Very High	۵۷۴	۳۰۰	۲۷۴
Exceptional	۶۰۲	۳۰۵	۲۹۷
Unprecedented	۶۴۸	۱۰۰	۵۴۸

بحث

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ارزیابی عملکرد شبکه آبیاری در شرایط کم‌آبی، نباید فقط بر یک شاخص منفرد یا یک روش وزن‌دهی، تکیه کند. شاخص‌های کفایت، پایداری و راندمان، هر یک بخشی از وضعیت عملکردی شبکه را، نشان می‌دهند، اما تفسیر جداگانه آن‌ها برای تصمیم‌گیری مدیریتی، کافی نیست. تلفیق این شاخص‌ها در قالب IPI باعث شد که عملکرد واحدهای آبیاری به‌صورت عددی، قابل مقایسه و قابل پهنه‌بندی مکانی، ارزیابی شود. یکی از یافته‌های مهم پژوهش، تغییر ساختار وزن شاخص‌ها، در سناریوهای مختلف، است. در روشEntropy، با افزایش شدت کم‌آبی، شاخص کفایت به معیار غالب، تبدیل شد. این نتیجه از نظر فنی قابل انتظار است، زیرا در

شرایط کم‌آبی شدید، مهم‌ترین عامل تفکیک عملکرد واحدها، میزان تأمین نیاز آبی آن‌ها، است. در چنین شرایطی، شاخص‌هایی مانند راندمان، ممکن است به‌صورت ظاهری، وضعیت بهتری نشان دهند، زیرا کمبود آب، امکان اضافه‌تحویل را، کاهش می‌دهد. بنابراین، کاهش وزن راندمان در سناریوهای شدید، نشان می‌دهد که این شاخص در چنین شرایطی قدرت تفکیک، کمتری دارد. در مقابل، PCA وزن شاخص‌ها را متعادل‌تر، نگه داشت. این رفتار نشان می‌دهد که PCA فقط به پراکندگی یک شاخص، توجه نمی‌کند، بلکه ساختار همبستگی و واریانس مشترک میان شاخص‌ها را در نظر می‌گیرد. از این رو، PCA توانست نقش پایداری و راندمان را در کنار کفایت، حفظ کند. این ویژگی باعث شد IPI-PCA افت عملکرد را با شدت کمتری، نسبت به IPI-Entropy نشان دهد.

مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات مشابه نشان می‌دهد که افت عملکرد در شبکه‌های آبیاری معمولاً ماهیتی مکانی، سناریومحور و وابسته به شرایط بهره‌برداری دارد. در حالی که مطالعات پیشین بر ناهمگنی مکانی تحویل آب، نقش سناریوهای کم‌آبی و اهمیت شاخص‌های عملکردی تأکید کرده‌اند، پژوهش حاضر با تلفیق وزن‌دهی عینی آنتروپی و PCA و محاسبه IPI برای ۶۷۵ واحد آبیاری، امکان شناسایی هم‌زمان نواحی بحرانی، واحدهای انتقالی و الگوی گسترش افت عملکرد را فراهم کرده است. بنابراین، چارچوب پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان ابزار تصمیم‌یار برای اولویت‌بندی مداخلات، بازنگری برنامه توزیع آب و مدیریت سناریومحور شبکه‌های آبیاری مورد استفاده قرار گیرد. نتایج پژوهش حاضر از نظر تأکید بر ناهمگنی مکانی عملکرد شبکه با یافته‌های مطالعات پیشین همخوانی دارد Hoshiyar et al. (2021). در ارزیابی عملکرد یک کانال انتقال آب نشان دادند که توزیع آب در شبکه می‌تواند به‌صورت مکانی نامتوازن باشد؛ به‌گونه‌ای که برخی اراضی با کم‌تحویلی و برخی دیگر با بیش‌تحویلی مواجه شوند. این نتیجه با یافته‌های پژوهش حاضر سازگار است، زیرا پهنه‌بندی مکانی IPI نشان داد که افت عملکرد به‌صورت یکنواخت در کل شبکه رخ نمی‌دهد و برخی واحدها به‌طور مداوم در کلاس‌های نامنطبق یا بحرانی قرار می‌گیرند. بنابراین، همانند نتایج Hoshiyar et al. (2021) ، نتایج این پژوهش نیز نشان می‌دهد که ارزیابی عملکرد شبکه‌های آبیاری باید در مقیاس واحدهای بهره‌بردار و با توجه به تغییرات مکانی انجام شود، نه فقط بر اساس میانگین عملکرد کل شبکه. از سوی دیگر، نتایج این پژوهش با مطالعاتی که بر نقش شرایط بهره‌برداری و سناریوهای کم‌آبی در تغییر عملکرد سامانه‌های توزیع آب تأکید کرده‌اند نیز همسو است Khaeez and Hashemy Shahdany (2021) نشان دادند که ارزیابی سامانه‌های توزیع آب کشاورزی باید با توجه به تغییر شرایط بهره‌برداری و سناریوهای مختلف انجام شود، زیرا عملکرد شاخص‌هایی مانند کفایت، راندمان و عدالت در شرایط مختلف ثابت نمی‌ماند. همچنین Rahparast and Hashemy Shahdany (2024) در ارزیابی مکانی–زمانی عملکرد سامانه بهره‌برداری دستی تحت سناریوهای کم‌آبی نشان دادند که افزایش شدت کم‌آبی می‌تواند موجب افت شاخص‌های عملکرد و آشکار شدن نواحی آسیب‌پذیر در شبکه شود. این الگو با نتایج پژوهش حاضر همخوان است؛ زیرا در این پژوهش نیز با تشدید سناریوهای کم‌آبی، میانگین IPI کاهش یافت و کلاس‌های نامطلوب و بحرانی در سطح شبکه گسترش پیدا کردند. با وجود این همخوانی، پژوهش حاضر نسبت به مطالعات پیشین یک گام تکمیلی ارائه می‌کند. در این پژوهش، ارزیابی عملکرد فقط بر پایه شاخص‌های منفرد یا یک روش وزن‌دهی انجام نشد، بلکه سه شاخص کفایت، پایداری و راندمان با دو روش وزن‌دهی عینی آنتروپی و PCA تلفیق شدند و شاخص عملکرد یکپارچه برای ۶۷۵ واحد آبیاری در هشت سناریوی بهره‌برداری محاسبه گردید. بر این اساس، نتایج نشان داد که روش آنتروپی تصویر حساس‌تری از افت عملکرد در شرایط کم‌آبی ارائه می‌دهد، در حالی که PCA تغییرات را به‌صورت متعادل‌تر بازنمایی می‌کند. بنابراین، تفاوت نتایج دو روش وزن‌دهی نه به‌عنوان تناقض، بلکه به‌عنوان دو برداشت مکمل از ساختار عملکرد شبکه قابل تفسیر است.

از نظر مدیریت بهره‌برداری، تفاوت میان Entropy و PCA اهمیت زیادی دارد. اگر هدف مدیر شبکه، شناسایی سریع نواحی بسیار حساس به کاهش تأمین آب باشد، نتایج Entropy می‌تواند هشداردهنده‌تر و محافظه‌کارانه‌تر باشد. اما اگر هدف، تشخیص وضعیت چندبعدی و متعادل‌تر عملکرد واحدها باشد، نتایج PCA می‌تواند اطلاعات مکملی، فراهم کند. بنابراین، پیشنهاد می‌شود که این دو روش به‌صورت جایگزین یکدیگر تفسیر نشوند، بلکه به‌عنوان دو لایه مکمل در ارزیابی عملکرد، استفاده شوند. نتایج طبقه‌بندی عملکردی نشان داد که سناریوی Medium یک نقطه گذار مهم در شبکه است. در این سناریو، تعداد واحدهای بحرانی در روش Entropy به‌طور ناگهانی، افزایش یافت. این موضوع نشان می‌دهد که واکنش عملکردی شبکه، نسبت به تشدید کم‌آبی، کاملاً خطی نیست. به بیان دیگر، پس از عبور از یک سطح مشخص محدودیت تأمین آب، بخش بزرگی از شبکه به‌سرعت از وضعیت متوسط یا نامنطبق به وضعیت بحرانی، منتقل می‌شود.

پهنه‌بندی مکانی نشان داد که افت عملکرد در شبکه، دارای الگوی فضایی، است. واحدهای ضعیف یا بحرانی به‌صورت پراکنده و تصادفی، ظاهر نمی‌شوند، بلکه در بخش‌هایی از شبکه، تمرکز پیدا می‌کنند. این موضوع برای مدیریت اجرایی اهمیت دارد، زیرا نشان

می‌دهد اقدامات اصلاحی، می‌توانند به‌صورت هدفمندتر، طراحی شوند. به جای آنکه کل شبکه به‌صورت یکنواخت مورد مداخله قرار گیرد، می‌توان نواحی دارای افت عملکرد شدید را در اولویت بررسی میدانی، اصلاح برنامه توزیع یا پایش دقیق‌تر، قرار داد. از نظر کاربردی، چارچوب پیشنهادی، می‌تواند به کاهش تصمیم‌گیری‌های سلیقه‌ای در مدیریت بهره‌برداری، کمک کند. در این چارچوب، وزن شاخص‌ها بر اساس داده‌ها، تعیین می‌شود و خروجی نهایی نیز به‌صورت عددی و مکانی، قابل تفسیر است. بنابراین، مدیر شبکه می‌تواند برای هر سناریوی تأمین آب، فهرست واحدهای دارای عملکرد ضعیف و نقشه پهنه‌بندی عملکرد را در اختیار، داشته باشد. چنین ابزاری می‌تواند برای برنامه‌ریزی توزیع آب، اولویت‌بندی بازدیدهای میدانی، شناسایی نواحی آسیب‌پذیر و تصمیم‌گیری درباره مداخله مدیریتی، مورد استفاده قرار گیرد. با وجود این مزیت‌ها، باید توجه داشت که نتایج این چارچوب جایگزین قضاوت فنی، بازدید میدانی و دانش بهره‌برداری محلی نیست بلکه این چارچوب می‌تواند به‌عنوان ابزار غربالگری و پشتیبانی تصمیم، عمل کند. واحدهایی که در نتایج IPI وضعیت نامطلوب دارند، باید در مرحله بعد از نظر شرایط هیدرولیکی، وضعیت کانال، سازه‌های تنظیم، برنامه بهره‌برداری و داده‌های واقعی تحویل آب، بررسی شوند. همچنین، دقت نتایج به کیفیت داده‌های ورودی و صحت شاخص‌های محاسبه‌شده، وابسته است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، چارچوبی سناریومحور و مکانی برای ارزیابی عملکرد شبکه آبیاری جرقویه—مهیار بر اساس شاخص عملکرد یکپارچه IPI ارائه شد. نتایج نشان داد که ترکیب شاخص‌های کفایت، پایداری و راندمان با روش‌های وزن‌دهی عینی Entropy و PCA می‌تواند تصویری جامع‌تر از وضعیت عملکردی واحدهای آبیاری، فراهم کند. این چارچوب، علاوه بر محاسبه مقدار عملکرد، امکان شناسایی پهنه‌های دارای عملکرد مطلوب، انتقالی، نامنطبق و بحرانی را، در سناریوهای مختلف بهره‌برداری، فراهم ساخت. نتایج طبقه‌بندی عملکردی نشان داد که با تشدید کم‌آبی، سهم واحدهای واقع در کلاس‌های نامطلوب به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. در روش آنتروپی، مجموع واحدهای واقع در کلاس‌های C و D از حدود ۳۹/۴ درصد در سناریوی Normal به ۷۵/۱ درصد در سناریوی Medium و ۹۶/۰ درصد در سناریوی Unprecedented رسید. این روند نشان می‌دهد که از سناریوی Medium به بعد، افت عملکرد از حالت محدود و موضعی خارج شده و به وضعیت غالب در شبکه تبدیل می‌شود. در روش PCA نیز مجموع کلاس‌های C و D از ۳۸/۵ درصد در سناریوی Normal به ۷۶/۷ درصد در سناریوی Medium افزایش یافت و در سناریوهای High، Very High و Exceptional به بیش از ۹۰ درصد رسید. بنابراین، هر دو روش نشان دادند که بخش عمده شبکه در سناریوهای کم‌آبی متوسط تا شدید از وضعیت مطلوب خارج شده و به طبقات نامنطبق یا بحرانی منتقل می‌شود.

نخستین نتیجه کاربردی پژوهش آن است که سناریوی Medium به‌عنوان نقطه آغاز افت جدی عملکرد در شبکه قابل شناسایی است. در این سناریو، بر اساس روشEntropy، تعداد واحدهای بحرانی به‌طور ناگهانی، افزایش یافته و بیش از سه‌پنجم واحدهای آبیاری، وارد کلاس بحرانی شدند. این نتیجه نشان می‌دهد که مدیریت شبکه، نباید فقط در سناریوهای بسیار شدید وارد فاز مداخله شود، بلکه از مرحله کم‌آبی متوسط باید برنامه پایش، اصلاح توزیع و کنترل عملکرد فعال شود.

دومین نتیجه مدیریتی آن است که روش Entropy و PCA دو نقش مکمل در تصمیم‌گیری دارند .روش Entropy نسبت به افت شاخص کفایت و تشدید کم‌آبی، حساس‌تر است و برای شناسایی سریع نواحی بحرانی و هشداردهی مدیریتی مناسب‌تر، عمل می‌کند. در مقابل، روش PCA تصویر متعادل‌تری از عملکرد چندشاخصه، ارائه می‌دهد و برای تشخیص نواحی انتقالی، نامنطبق و دارای ضعف تدریجی، مفیدتر است. بنابراین، استفاده همزمان از این دو روش می‌تواند از تصمیم‌گیری یک‌بعدی جلوگیری کرده و دید کامل‌تری از وضعیت شبکه فراهم کند.

سومین نتیجه کاربردی پژوهش آن است که افت عملکرد شبکه، ماهیتی مکانی، دارد و به‌صورت تصادفی در سطح شبکه توزیع نشده است. پهنه‌بندی مکانی IPI نشان داد که با تشدید کم‌آبی، واحدهای دارای عملکرد ضعیف از حالت محدود و پراکنده خارج شده و به پهنه‌های گسترده‌تر تبدیل می‌شوند. بنابراین، نتایج این پژوهش می‌تواند برای تعیین نواحی اولویت‌دار پایش، بازبینی برنامه توزیع آب، اصلاح بهره‌برداری و هدفمند کردن مداخله مدیریتی، مورد استفاده قرار گیرد.

بر اساس نتایج این پژوهش، پیشنهاد می‌شود در ادامه کار، چارچوب ارائه‌شده با داده‌های مکانی دقیق‌تر واحدهای آبیاری، اطلاعات واقعی بهره‌برداری، و داده‌های میدانی تکمیلی ترکیب شود تا امکان تولید نقشه‌های دقیق‌تر واحدمحور و ارزیابی عملیاتی در مقیاس مدیریتی، فراهم شود. همچنین، توسعه یک سامانه تصمیم‌یار ساده بر پایه خروجی‌های IPI می‌تواند به مدیران شبکه کمک کند تا در هر

سناریوی تأمین آب، واحدهای دارای اولویت مداخله را به‌صورت سریع، شفاف و قابل دفاع، شناسایی کنند.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه تهران، دانشکده فناوری کشاورزی در قالب پژوهانهٔ پایان‌نامه دانشجویی نویسنده اول و همچنین پژوهانهٔ برای سایر نویسندگان انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان به طور مساوی در کلیهٔ مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

نویسندگان از هیچ نوع فناوری مبنی بر هوش مصنوعی در فرآیند نگارش استفاده نکرده اند.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

شاهوردی،کاظم.،قدوسی، حسام و دوستی، فرشاد.(۱۴۰۳). اثر بهره‌برداری به‌هنگام و دیرهنگام سازه‌های کانال بر توزیع عادلانه و پایدار آب: تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۵(۳)،۴۸۱-۴۶۷.

REFERENCES

Abbaszadeh, H., Tarinejad, R., Roushangar, K., & Daneshfaraz, R. (2026). Investigation of the effects of internal structure and material properties on the hydraulic performance of rectangular gabion weirs: Experimental and numerical study. *Water Resources Management, 40(8)*. https://doi.org/10.1007/s11269-026-04667-3

Bidabadi, M., Hashemy, S. M., & Mashal, M. (2026). Historical diversion-shortfall characterization and verified operational modeling for off-farm operational risk zoning in Jarghuyeh Irrigation District, Iran. *Journal of Hydrology: Regional Studies, 65*, 103443. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2026.103443

Christelis, V., Mansour, M. M., & Jackson, C. R. (2025). Characterisation of groundwater drought using distributed modelling, standardised indices, and principal component analysis. *Water Resources Management, 39(8)*, 4227–4241. https://doi.org/10.1007/s11269-024-03997-4

Daneshfaraz, R., Norouzi, R., Abbaszadeh, H., Kuriqi, A., & Di Francesco, S. (2022). Influence of sill on the hydraulic regime in sluice gates: An experimental and numerical analysis. *Fluids, 7(7)*, 244. https://doi.org/10.3390/fluids7070244

Fan, Y., Zhou, K., Gao, Z., Yang, M., Zheng, X., & Zhang, X. (2026). Coupled model for optimizing the water distribution and gate control of the canal system in an irrigation district. *Agricultural Water Management, 324*, 110117. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.110117

Feng, Z., Zhang, W., Zhu, Z., Chi, W., Bian, S., & Wang, X. (2026). Data-driven sustainability assessment of global water management using an Entropy–TOPSIS approach. *Frontiers in Environmental Science, 14*, 1852339. https://doi.org/10.3389/fenvs.2026.1852339

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). The state of food and agriculture 2020:

Overcoming water challenges in agriculture. FAO. https://doi.org/10.4060/cb1447en

Han, L., et al. (2025). Evaluation of water resource carrying capacity and obstacle factors based on entropy weight and CRITIC methods. *Water, 17(16),* 2360.

Hassanzadeh, Y., Abbaszadeh, H., Abedi, A., & Abraham, J. (2024). Numerical simulation of the effect of downstream material on scouring-sediment profile of combined spillway-gate. AQUA—Water Infrastructure, *Ecosystems and Society, 73(12),* 2322–2343. https://doi.org/10.2166/aqua.2024.360

Hashemy Shahdany, S. M., & Rahparast, D. (2025). Assessing and managing risks to strengthen the resilience of surface water delivery systems under drought in irrigation districts. *Environmental Science & Policy, 174*, 104265. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2025.104265

Hoshiyar, S. M. S., Pirmoradian, N., Ashrafzadeh, A., & Parvaresh Rizi, A. (2021). Performance assessment of a water delivery canal to improve agricultural water distribution. *Water Resources Management, 35(8),* 2487–2501. https://doi.org/10.1007/s11269-021-02843-1

Hu, W., Zheng, M., Cheng, J., Wu, L., Yao, J., & Cao, Y. (2025). Enhancing monthly runoff prediction in arid alpine basins of northwestern China by an EMD-PCA-LSTM hybrid model. *Journal of Hydrology: Regional Studies, 61,* 102748. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102748

Khaeez, S., & Hashemy Shahdany, S. M. (2021). Non-structural modification of agricultural water distribution systems in large scale irrigation districts. *Computers and Electronics in Agriculture, 184*, 106102. https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106102

Liu, J., & Liu, Y. (2026). Integrating performance indicators and simulation model for assessing operational performance of water distribution pipe system (WDPS) in irrigation district. *Water, 18(3),* 299. https://doi.org/10.3390/w18030299

Molden, D. J., & Gates, T. K. (1990). Performance measures for evaluation of irrigation-water-delivery systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 116(6),* 804–823. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1990)116:6(804)

Roy, B. N., Roy, H., Rahman, K. S., Mahmud, F., Bhuiyan, M. M. K., Hasan, M., Bhuiyan, A.-A. K., Hasan, M., Mahbub, M. S., Jahedi, R. M., & Islam, M. S. (2024). Principal component analysis incorporated water quality index modeling for Dhaka-based rivers. *City and Environment Interactions, 23*, 100150. https://doi.org/10.1016/j.cacint.2024.100150

Rahparast, D., & Hashemy Shahdany, S. M. (2024). Spatiotemporal assessment model for manual operation systems' technical performance in surface water distribution under water scarcity scenarios. *Water Resources Management, 38(10),* 3639–3656. https://doi.org/10.1007/s11269-024-03832-w

Rahparast, D., Hashemy Shahdany, S. M., & Roozbahani, A. (2026). Innovative Integrated Sustainability Appraisal Approach for Irrigation Water Distribution Automation: A Combined MCDM-Based Food-Energy-Water Nexus. *Water Resources Management, 40(10),* 483. https://doi.org/10.1007/s11269-026-04849-z

Santos, J. F., Carriço, N., Miri, M., & Raziei, T. (2025). Distributed composite drought index based on principal component analysis and temporal dependence assessment. *Water, 17(1),* 17. https://doi.org/10.3390/w17010017

Sethi, R. R., Dandapat, A. K., Srivastava, S. K., Sankalp, S., Ankhila, R. H., Bal, J. S., & Jothimani, M. (2026). Entropy-weighted water quality index and TOPSIS for irrigation suitability assessment in eastern Odisha, India. *Water Science, 40*, 37. https://doi.org/10.1007/s44533-026-00038-4

Song, Q., Wang, Z., & Wu, T. (2024). Risk analysis and assessment of water resource carrying capacity based on weighted gray model with improved entropy weighting method in the central Plains region of China. *Ecological Indicators, 160*, 111907. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111907

Shahverdi, K., Ghodousi, H., & Dosti, F. (2024). Effect of on-time and late operation of canal structures on equitable and sustainable water distribution. Iranian Journal of Soil and *Water Research, 55(3),* 467–481. https://doi.org/10.22059/IJSWR.2024.370600.669637.(In Persian).

Wang, C., Li, Z., Chen, H., & Wang, M. (2023). Comprehensive evaluation of agricultural water resources' carrying capacity in Anhui Province Based on an improved TOPSIS model. *Sustainability*, *15*(18), 13297.https://doi.org/10.3390/su151813297

Zhang, Y., & Yang, P. (2022). Agricultural water optimal allocation using minimum cross-entropy and entropy-weight-based TOPSIS method in Hetao Irrigation District, Northwest China. *Agriculture*, *12*(6), 853. https://doi.org/10.3390/agriculture12060853

Zeng, K., Liu, N., Dong, Y., Deng, M., & Wang, Z. (2025). NSGA-II and Entropy-Weighted TOPSIS for Multi-Objective Joint Operation of the Jingou River Irrigation Reservoir System. *Water*, *18*(1), 36. https://doi.org/10.3390/w18010036