



University of Tehran Press

ECO HYDROLOGY

Home Page: <https://ije.ut.ac.ir>

Online ISSN: 2423-6101

Regional Assessment of the Canal Performance Using Hydraulic Modeling: A Case Study of Shoeybiyeh Network

Kazem Shahverdi^{1*} 

1. Corresponding Author, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: k.shahverdi@basu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 06 April 2026
Revised 05 May 2026
Accepted 16 June 2026
Available online 22 June 2026

Keywords:
Canal,
HEC-RAS,
Evaluation,
Performance,
Shoeybiyeh.

ABSTRACT

Objective: Water is a critical resource for agricultural development and national food security, particularly in arid and semi-arid regions. Due to increasing water demand and limited availability, equitable and efficient water distribution in irrigation networks has become a major management challenge. Performance evaluation of irrigation canals is essential for optimal water management and improving the performance. To hydraulically model and quantitatively evaluate the performance of the Shuaibiyah irrigation canal, with emphasis on efficiency, adequacy, and equity in water delivery and distribution.

Method: An unsteady-flow hydraulic model was developed in HEC-RAS for the main canal, incorporating nine water-level control structures and fifteen offtakes. After calibration and validation using field data, the model simulated baseline conditions and eight operational scenarios with positive and negative inflow variations. Performance indicators—efficiency, adequacy, and equity—were computed at local and regional scales and classified using standard criteria.

Results: Local assessments showed that efficiency remained within the “good” range for all offtakes across all scenarios, with a network-wide average of 0.998, indicating very high conveyance performance. However, adequacy for some downstream offtakes declined to the “fair” range under certain scenarios, reflecting supply shortfalls despite high efficiency. Equity analysis revealed marked structural imbalance: baseline equity values were 0.005 (upstream), 0.197 (middle), and 0.285 (downstream), demonstrating significant preferential allocation to upstream users.

Conclusions: Although the Shuaibiyah irrigation canal exhibits excellent technical efficiency, it faces pronounced structural inequity that disadvantages middle and especially downstream regions. Achieving sustainable and balanced performance requires revising water allocation strategies and improving operational management to enhance equity throughout the system.

Cite this article: Shahverdi, K. (2026). Regional Assessment of the Canal Performance Using Hydraulic Modeling: a Case Study. *Journal of Ecohydrology*, 13(2), 1369-1387. <https://doi.org/10.22059/ije.2026.411802.1907>



© Kazem Shahverdi.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ije.2026.411802.1907>

Introduction

Water is a critical resource for agricultural development and national food security, particularly in arid and semi-arid regions. Due to increasing water demand and limited availability, equitable and efficient water distribution in irrigation networks has become a major management challenge.

The Shuaibiyah irrigation network in the Khuzestan province, Iran, is one of the largest modern irrigation systems in the country, covering approximately 55000 ha downstream of the Gotvand Dam on the Karun River. Despite the presence of multiple control and offtake gates, concerns exist regarding preferential water access for upstream users and reduced entitlements for downstream farmers. Previous studies have emphasized the importance of quantitative performance assessment using indicators such as adequacy, efficiency, and equity. However, a comprehensive evaluation of the Shuaibiyah network based on standard performance indicators had not yet been conducted. Therefore, this study aimed to hydraulically model the network and evaluate its performance, focusing particularly on efficiency, adequacy, and equity.

Method

The primary objectives of this research were: to simulate unsteady flow behavior in the Shuaibiyah irrigation canal using the HEC-RAS hydraulic model, to evaluate water distribution performance at 15 offtakes using standard indicators (adequacy, efficiency, and equity), to classify each indicator according to established performance ranges, to assess differences in performance among the upstream, middle, and downstream regions of the canal, and to investigate how variations in inflow discharge affect distribution performance through scenario analysis. The study ultimately sought to determine whether the canal operates equitably and efficiently and to identify structural weaknesses in water allocation.

The study was conducted in four main stages: 1. Study Area Characterization: the Shuaibiyah network includes main, secondary, and lateral canals supplied by the Karun River. It contains 9 control gates and 15 intake structures. Canal discharge decreases from upstream (8.311 m³/s) to downstream (0.995 m³/s), with bed slopes designed for gravity flow; 2. Hydraulic Modeling: The HEC-RAS model was used to simulate steady and unsteady flow conditions. The Saint-Venant equations were solved using an implicit finite difference method. Canal geometry, cross-sections, control structures, and boundary conditions (discharge hydrographs, stage hydrographs, gate openings, etc.) were defined. Unsteady simulations were performed by specifying time-varying inflows and operational settings; 3. Performance Indicators: water distribution was evaluated using adequacy, efficiency, and equity indicators. Adequacy and efficiency have optimal values near 1. Equity has optimal values near 0. Performance was classified as good, fair, or poor based on established thresholds; and 4. Scenario Analysis and Regional Evaluation: Eight scenarios were defined: four with incremental discharge increases and four with discharge reductions. Evaluation was performed both locally (for each offtake) and regionally (upstream, middle, downstream zones). This allowed comparison of spatial performance and sensitivity to inflow changes.

Results

Upstream Region: Adequacy values were generally high (0.906–0.997), and most offtakes remained in the “good” category across scenarios. Offtake 5 was more sensitive and dropped into the “fair” category under reduced discharge. Efficiency values were nearly ideal (≈ 1.000) for all scenarios, indicating excellent conveyance performance.

Middle Region: Adequacy ranged from 0.882 to 0.937 under initial conditions. While most offtakes were classified as “good,” Offtake 11 frequently fell into the “fair” category.

Behavior was more complex and nonlinear compared to upstream. Efficiency remained ideal (1.000 in most scenarios), demonstrating high operational stability.

Downstream Region: The most critical issues were observed downstream. Offtake 13 fell into the “poor” adequacy category in most scenarios. Other downstream offtakes barely maintained “good” status or dropped into “fair.” This revealed a clear distributional imbalance. However, efficiency values remained high (≈ 1.000), indicating that physical water delivery was technically efficient despite inadequate allocation.

Regional Comparison: A strong decreasing gradient from upstream to downstream was observed: Adequacy: Highest upstream, lowest downstream. Equity: Upstream in “good” range; middle at boundary; downstream in “fair.” Sustainability: Upstream “good,” middle “fair,” downstream “poor.” Efficiency: Consistently “good” across all regions.

The results indicate that the system performs well technically but suffers from structural inequities in allocation. Interestingly, some reduced-discharge scenarios slightly improved adequacy and equity in middle and downstream regions, suggesting latent potential for more balanced operation.

Conclusions

The HEC-RAS model successfully simulated the hydraulic behavior of the Shuaibiyah irrigation network with acceptable accuracy. The system demonstrates very high efficiency in water conveyance, with minimal physical losses across all regions. However, significant inequities exist in water allocation. A clear upstream-to-downstream gradient favors upstream users, while downstream offtakes suffer from lower adequacy and sustainability. The contradiction between high efficiency and low adequacy downstream indicates that the core problem is not technical inefficiency or water scarcity, but rather unfair allocation and operational policy. To achieve sustainable and equitable water distribution, operational rules must be revised. The system has the technical capability to perform efficiently, but improved allocation strategies are required to ensure fairness and long-term resilience. So, it is recommended the performance evaluation of the studied canal in the filed and managing water more efficiently.

Funding

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

CRedit authorship contribution statement

KS: Investigation, Methodology, Software, Modeling & Simulation, Formal analysis, Validation, Writing-Review & Editing.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

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

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants in the present study.



ارزیابی منطقه‌ای عملکرد کانال با استفاده از مدل‌سازی هیدرولیکی: مطالعه موردی شبکه شعیبه

کاظم شاهوردی^{۱*} 

۱. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: k.shahverdi@basu.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
هدف از این پژوهش، مدل‌سازی هیدرولیکی و ارزیابی کمی عملکرد شبکه آبیاری شعیبه به صورت محلی و منطقه‌ای بود. برای این منظور، مدل هیدرولیکی HEC-RAS برای شبیه‌سازی جریان غیرماندگار، با در نظر گرفتن ۹ سازه آب‌بند آب و ۱۵ سازه آبگیر توسعه داده شد و پس از اعتبارسنجی با داده‌های واقعی برای تحلیل شرایط پایه و ۸ سناریو مختلف بهره‌برداری استفاده شد. نتایج ارزیابی محلی نشان داد سنجه راندمان در کلیه آبگیرها و در تمامی سناریوها در محدوده خوب قرار دارد و میانگین آن در کل شبکه به ۰/۹۹۸ می‌رسد که نشان‌دهنده کارایی بالای سیستم در انتقال و توزیع آب است. در مقابل، سنجه کفایت در آبگیرهای پایین‌دست در برخی سناریوها به محدوده متوسط رسید که نشان می‌دهد با وجود تحویل کارآمد آب، مقدار آن برای برآوردن نیازها در این مناطق کافی نیست. ارزیابی سنجه عدالت نشان‌دهنده توزیع ناعادلانه منابع آب به نفع بهره‌برداران بالادست است به گونه‌ای که این سنجه در شرایط اولیه برای منطقه بالادست ۰/۰۰۵، برای منطقه میانی ۰/۱۹۷ و برای منطقه پایین‌دست ۰/۲۸۵ بود. بنابراین، شبکه آبیاری شعیبه از نظر کارایی در وضعیت مطلوبی قرار دارد، اما از یک بی‌عدالتی در توزیع رنج می‌برد که موجب محرومیت نسبی مناطق پایین‌دست شده است.	نوع مقاله: پژوهشی تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۱۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۶ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱ کلیدواژه‌ها: ارزیابی، شعیبه، کانال، عملکرد، HEC-RAS

استناد: شاهوردی، کاظم (۱۴۰۵). ارزیابی منطقه‌ای عملکرد کانال با استفاده از مدل‌سازی هیدرولیکی: مطالعه موردی شبکه شعیبه. *مجله اکوهیدرولوژی*، ۱۳(۲)، ۱۳۶۹-۱۳۸۷.



<https://doi.org/10.22059/ije.2026.411802.1907>

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران. © کاظم شاهوردی.

مقدمه

آب به عنوان موتور محرکه توسعه کشاورزی، نقش تعیین کننده‌ای در امنیت غذایی و اقتصادی کشورها ایفا می‌کند. با توجه به محدودیت منابع آبی و افزایش تقاضا، مدیریت بهینه و عادلانه توزیع آب در شبکه‌های آبیاری به یکی از چالش‌های اساسی تبدیل شده است. ارزیابی عملکرد شبکه‌های آبیاری به عنوان گام نخست به منظور بهبود مدیریت و بهره‌وری این سیستم‌ها شناخته می‌شود. بدون سنجش کمی عملکرد، تشخیص قوت‌ها و ضعف‌های شبکه ممکن نخواهد بود. سنجش‌های عملکرد که برای ارزیابی میزان موفقیت کانال‌های آبیاری از نظر تأمین آب مصرف‌کنندگان مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل سنجش‌های راندمان، کفایت، عدالت و پایداری است. عدالت در توزیع آب به معنای تخصیص متناسب آب به نقاط مصرف در طول شبکه، بدون در نظر گرفتن موقعیت مکانی آنان است و راندمان تحویل آب، معیاری کلیدی برای سنجش عملکرد شبکه در انتقال آب بدون تلفات محسوب می‌شود.

تا کنون مطالعات متعددی در زمینه ارزیابی عملکرد شبکه‌های آبیاری انجام شده است. در پژوهشی با استفاده از یک مدل هیدرولیکی پیشرفته، سناریوهای مختلف بهره‌برداری تحت محدودیت تأمین آب شبیه‌سازی شد. نتایج پژوهش یادشده نشان داد در شرایط کم‌آبی، استراتژی‌های متداول بهره‌برداری به نابرابری قابل توجهی در طول کانال منجر می‌شود (هاشمی شاهدانی^۱ و همکاران، ۲۰۱۵). در مطالعه‌ای، اثربخشی و رتبه‌بندی سناریوها برای نوسازی کانال‌های آبیاری بررسی شد. کانال آبیاری منطقه نکوآباد واقع در فلات مرکزی ایران به عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب شد. نتایج پژوهش یادشده نشان داد گزینه اتوماسیون کانال‌های آبیاری می‌تواند به عنوان راهکاری عملی و مؤثر در مدیریت آب کشاورزی معرفی شود. سنجش عدالت را در سناریوهای مختلف از ۰/۰۳ تا ۰/۱ گزارش کردند (ترک^۲ و جوادی^۳ و شاهدانی، ۲۰۲۱).

در تحقیقی نوعی رویکرد سیستماتیک برای ارزیابی عملکرد بهره‌برداری کانال‌های آبیاری با استفاده از سیستم استنتاج فازی، شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی، با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در فرایند بهره‌برداری آب، توسعه داده شد. نتایج پژوهش یادشده نشان داد مدل‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی در مقایسه با مدل سیستم استنتاج فازی، خروجی‌ها را با خطای کمتر و تقریباً در سطحی مشابه پیش‌بینی می‌کنند. این مدل تنها قادر به پیش‌بینی شاخص راندمان بود و نتوانست شاخص‌های کفایت و عدالت را با عملکرد مناسبی پیش‌بینی کند. شاخص‌های کفایت، راندمان و عدالت توسط مدل سیستم استنتاج فازی به ترتیب با میانگین درصد خطای مطلق معادل ۰/۱۶، ۰/۰۱ و ۰/۲۳ و پیش‌بینی شدند (شریفی^۴ و روزبهانی^۵ و شاهدانی، ۲۰۲۱).

در پژوهشی، الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری که مبتنی بر شبیه‌سازی سلسله‌مراتب اجتماعی و رفتار شکار گرگ‌ها در طبیعت است، برای زمان‌بندی تحویل آب در کانال‌های آبیاری فرموله، توسعه و به مدل شبیه‌ساز کانال متصل شد. تابع هدف بر اساس شاخص‌های استاندارد عملکرد تحویل آب تعریف و سناریوهای بهره‌برداری در شرایط نرمال و کمبود آب در کانال دز در ایران مورد آزمایش و ارزیابی قرار گرفت. نتایج پژوهش یادشده نشان داد این الگوریتم نوعی روش بهینه‌سازی قدرتمند است و در شرایط نرمال از نقاط بهینه محلی اجتناب می‌کند، اما در شرایط کمبود آب که حجم کافی وجود ندارد، عملکرد نسبتاً ضعیفی دارد. سنجش‌های کفایت، کارایی، برابری و قابلیت اطمینان به ترتیب ۰/۹۹۸، ۰/۹۹۳، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۶ به دست آمد (شاهوردی^۶ و مستر^۷، ۲۰۲۲).

1 Hashemy Shahdany

2 Tork

3 Javadi

4 Sharifi

5 Roozbahani

6 Shahverdi

7 Maestre

طی پژوهشی تحلیل عدم قطعیت کانال آبیاری شرق عقیلی با روش سنتی انجام شد و عملکرد کانال با استفاده از معیارهای کفایت و قابلیت اطمینان مورد بررسی قرار رفت. هدف اصلی مطالعه یادشده، تحلیل عدم قطعیت پارامتر ورودی (بازشدگی دریچه‌های آب‌گیر) در کانال آبیاری شرق عقیلی به عنوان مطالعه موردی، با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو و ارزیابی عملکرد کانال است. نتایج پژوهش یادشده نشان داد با ضریب تغییرات بازشدگی دریچه تا ۱۲/۹ درصد، ضرایب تغییرات جریان، کفایت و قابلیت اطمینان به ترتیب تا ۱۲/۰۴ درصد، ۱۲ درصد و ۳۴/۲ درصد افزایش یافت که بیانگر عدم قطعیت بالا و عملکرد ضعیف کانال است (آقایی^۱ و قدوسی^۲ و شاهوردی، ۲۰۲۴).

در تحقیق دیگری، نوعی مدل خطی برای تخمین جریان سطح آب در کانال‌های با یک کنترل‌کننده کانال آبیاری ادغام شد. مدل یادشده با محاسبه سریع و دقیق تغییرات سطح آب و سرعت در کانال‌های روباز، مزیت قابل توجهی ارائه می‌دهد. اعتبارسنجی مدل از طریق مقایسه تخمین‌های سطح آب تحت اغتشاشات مختلف با نتایج نرم‌افزار مبتنی بر معادلات کامل سنت ونانت انجام شد. اعمال یک اغتشاش ۱۰ درصدی در حرکت دریچه در یک دوره زمانی مشخص، به افزایش بیش از ۱۰ درصدی دبی جریان در هر مورد منجر شد. نتایج در مقایسه با معادلات کامل سنت ونانت، حداکثر خطای مطلق کمتر از ۷ سانتی‌متر، خطای نسبی ۰/۷ درصد، ریشه میانگین مربعات خطا در محدوده ۲/۴ تا ۰/۰۷ سانتی‌متر و مقادیر کارایی نش - ساتکلیف حدود ۰/۹۵ را نشان داد که بیانگر دقت بالای مدل حتی در مواجهه با اغتشاشات قابل توجه است. با این حال، اغتشاشات ناشی از حرکات بزرگ‌تر دریچه (بیش از ۱۰ درصد) باید از پیش برنامه‌ریزی شوند و به صورت لحظه‌ای مدیریت نشوند (بونت^۳ و یوبرو^۴ و بسکمپتا^۵ و همکاران، ۲۰۲۵).

با توجه به محدودیت روزافزون منابع آبی و افزایش تقاضا برای مصرف در بخش کشاورزی، مدیریت بهینه و عادلانه توزیع آب در شبکه‌های آبیاری به یکی از چالش‌های اساسی کشورهای واقع در مناطق خشک و نیمه‌خشک تبدیل شده است. در این راستا، تحقیقات متعددی با رویکردهای مختلف شامل مدل‌سازی هیدرولیکی جریان، بهینه‌سازی با الگوریتم‌های فراکاوشی و ارزیابی عملکرد با استفاده از شاخص‌های کمی صورت پذیرفته است. مرور پیشینه تحقیقات نشان می‌دهد ارزیابی عملکرد شبکه‌های آبیاری به عنوان گام نخست و اساسی در جهت بهبود مدیریت و ارتقای بهره‌وری این سیستم‌ها شناخته می‌شود، زیرا بدون سنجش کمی و دقیق عملکرد، تشخیص قوت‌ها و ضعف‌های شبکه امکان‌پذیر نخواهد بود. پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأ تحقیقاتی در کانال آبیاری شعبیه، به مدل‌سازی هیدرولیکی جریان غیرماندگار در کانال آبیاری شعبیه با استفاده از مدل *HEC-RAS* و ارزیابی عملکرد آن بر اساس شاخص‌های استاندارد کفایت، راندمان، عدالت و پایداری می‌پردازد. نوآوری اصلی این تحقیق در تحلیل منطقه‌ای عملکرد از طریق مقایسه سه ناحیه بالادست، میانی و پایین‌دست کانال، تحلیل محلی عملکرد و بررسی سناریوهای مختلف تغییرات دبی ورودی بر الگوی توزیع آب است تا ضمن شناسایی دقیق ضعف‌های سیستم در شرایط مختلف بهره‌برداری، پتانسیل‌های بهبود مدیریت توزیع آب برای دستیابی به عملکردی متوازن و پایدار تعیین شود.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت، کمی و مبتنی بر شبیه‌سازی عددی است و فرایند آن در پنج گام اجرا شد. در گام اول، داده‌های میدانی و هندسی کانال شامل طول، عرض، شیب بستر، مقاطع عرضی، موقعیت و مشخصات سازه‌های کنترل سطح آب و آبگیرهای جانبی از روی نقشه‌های اجرایی و بازدیدهای میدانی استخراج شد و داده‌های هیدرولیکی مانند دبی و سطح آب از شرکت بهره‌برداری شبکه دریافت شد. در گام دوم، با استفاده از نرم‌افزار *HEC-RAS* نسخه ۶ یک مدل جریان

1 Aghayee

2 Ghodousi

3 Bonet

4 Yubero

5 Bascompta

غیردائمی برای کل کانال اصلی تهیه شد. در گام سوم، هشت سناریو بهره‌برداری شامل چهار سناریو افزایش تدریجی و چهار سناریو کاهش تدریجی دبی ورودی تعریف شد و مدل هیدرولیکی برای هر سناریو اجرا شد و مقادیر دبی عبوری از آبگیرها طی زمان استخراج شد. در گام چهارم، شاخص‌های عملکرد کفایت، کارایی، پایداری و عدالت محاسبه شد. در گام پنجم، کانال اصلی به سه منطقه بالادست، میانی و پایین‌دست تقسیم شد و شاخص‌های عملکرد برای هر منطقه به طور جداگانه محاسبه شد و در پایان قوت‌ها و ضعف‌های سیستم از نظر هر یک از شاخص‌ها شناسایی و راهکارهای بهبود عملکرد ارائه شد.

۱. کانال مورد مطالعه

شبکه آبیاری شعبیه از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین شبکه‌های آبیاری مدرن در استان خوزستان و در محدوده شهرستان‌های اهواز و باوی واقع شده است. منطقه تحت پوشش این شبکه در سمت چپ رودخانه کارون و در پایین‌دست سد گتوند قرار دارد. موقعیت دقیق جغرافیایی آن بین ۳۰ تا ۳۱ درجه عرض شمالی و ۴۸ تا ۴۹ درجه طول شرقی است. شبکه شعبیه یک سیستم گسترده است که آب آن از رودخانه کارون و از طریق کانال انحرافی شعبیه تأمین می‌شود و شامل کانال‌های اصلی، فرعی و مزرعه برای انتقال آب به سراسر منطقه است. وسعت کل اراضی تحت پوشش این شبکه حدود ۵۵ هزار هکتار است. در این منطقه محصولات استراتژیک و باارزشی کشت می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها نیشکر، گندم، ذرت، کلزا و صیفی‌جات هستند. سازه‌های کنترل و توزیع شامل ۹ دریچه کنترل و ۱۵ دریچه آبگیر است (جدول ۱). همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود مقدار دبی کانال از ۸/۵۸ مترمکعب در ثانیه در بالادست تا ۰/۹۹۵ مترمکعب در ثانیه در پایین‌دست تغییر می‌کند. شیب طولی کف کانال برای اطمینان از جریان ثقیل آب و جلوگیری از رسوب‌گذاری یا شست‌وشوی کف کانال طراحی شده و مقدار آن بین ۰/۰۰۰۲ تا ۰/۰۰۰۱۵ است. مقادیر عرض کف کانال و عمق نرمال یا عمق هدف نیز در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات هندسی و هیدرولیکی سازه‌های آب‌بند و آبگیر

دبی (متر مکعب در ثانیه)	شیب (-)	عرض کف (متر)	عمق نرمال (متر)
آبگیر ۱	۸/۵۸	۰/۰۰۰۲	۰/۸
آب‌بند ۱	۸/۳۱۱	۰/۰۰۰۲	۳
آبگیر ۲	۸/۳۱۱	۰/۰۰۰۲	۱
آب‌بند ۲	۶/۳۲۴	۰/۰۰۰۱۱	۳
آبگیر ۳	۷/۶۰۲	۰/۰۰۰۲	۰/۸
آبگیر ۴	۷/۶۰۲	۰/۰۰۰۲	۰/۶
آب‌بند ۳	۵/۷۷۷	۰/۰۰۰۱۱	۳
آبگیر ۵	۶/۳۲۴	۰/۰۰۰۱۱	۰/۸
آب‌بند ۴	۴/۶۲۹	۰/۰۰۰۱۱	۲/۵
آبگیر ۶	۵/۷۷۷	۰/۰۰۰۱۱	۰/۸
آبگیر ۷	۴/۶۲۹	۰/۰۰۰۱۱	۱
آبگیر ۸	۴/۶۲۹	۰/۰۰۰۱۱	۰/۸
آب‌بند ۵	۳/۵۵۷	۰/۰۰۰۱۲	۲
آبگیر ۹	۳/۵۵۷	۰/۰۰۰۱۲	۱
آب‌بند ۶	۲/۷۶۵	۰/۰۰۰۱۳	۱/۵
آبگیر ۱۰	۲/۷۶۵	۰/۰۰۰۱۳	۰/۸
آبگیر ۱۱	۲/۷۶۵	۰/۰۰۰۱۳	۱
آب‌بند ۷	۱/۷۶۱	۰/۰۰۰۱۳	۱/۵
آبگیر ۱۲	۱/۷۶۱	۰/۰۰۰۱۳	۰/۸
آب‌بند ۸	۱/۲۰۲	۰/۰۰۰۱۵	۱/۲
آبگیر ۱۳	۱/۲۰۲	۰/۰۰۰۱۵	۰/۸

ارزیابی منطقه‌ای عملکرد کانال با استفاده از مدل‌سازی هیدرولیکی... کاظم شاهوردی				
۱۳۷۷				
آب‌بند ۹	۰/۹۹۵	۰/۰۰۰۱۵	۱/۲	۰/۸
آبگیر ۱۴	۰/۹۹۵	۰/۰۰۰۱۵	۰/۸	۰/۸
آبگیر ۱۵	۰/۹۹۵	۰/۰۰۰۱۵	۰/۸	۰/۸

۲. مدل‌سازی هیدرولیکی

در این تحقیق، مدل هیدرولیکی *HEC-RAS* برای شبیه‌سازی کانال مورد استفاده قرار گرفت که دارای مؤلفه‌های اصلی محاسبات جریان ماندگار، جریان غیرماندگار، انتقال رسوب و کیفیت آب است. با تعریف مدل‌های هندسی و هیدرولیکی، *HEC-RAS* می‌تواند جریان‌های پایدار و ناپایدار و جریان‌های متغیر تدریجی را تحت شرایط جریان زیربحرانی، فوق بحرانی و مختلط شبیه‌سازی کند. با فرض فشار هیدرواستاتیک و توزیع سرعت یکنواخت در سطح مقطع و شتاب عمودی ناچیز، معادلات انرژی و ممنتوم در *HEC-RAS* مورد استفاده قرار می‌گیرند. در جریان متغیر تدریجی، پروفیل‌های سطح آب را در مقاطع با حل معادله انرژی با روش تکراری گام‌به‌گام استاندارد محاسبه می‌کند. با فرض فشار هیدرواستاتیک و توزیع سرعت یکنواخت در سطح مقطع و شتاب عمودی ناچیز، معادلات انرژی و ممنتوم در *HEC-RAS* به ترتیب به صورت روابط ۱ و ۲ هستند:

$$\frac{\beta_2 Q_2^2}{g A_2} + A_2 \bar{y}_2 + \left(\frac{A_1 + A_2}{2} \right) L S_0 - \left(\frac{A_1 + A_2}{2} \right) L S_f = \frac{\beta_1 Q_1^2}{g A_1} + A_1 \bar{y}_1 \quad (۱)$$

$$z_1 + y_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_e \quad (۲)$$

که در آن β_1 و β_2 ضرایب تصحیح ممنتوم، Q_1 و Q_2 ، g شتاب ثقل، A_1 و A_2 مساحت خیس‌شده، L طول بازه، S_0 شیب کانال، S_f شیب انرژی، z_1 و z_2 ارتفاع کف کانال، y_1 و y_2 عمق، v_1 و v_2 سرعت متوسط، α_1 و α_2 ضرایب تصحیح انرژی جنبشی h_e تلفات انرژی است. اندیس‌های ۱ و ۲ نیز مربوط به دو مقطع متوالی ۱ و ۲ است. مدل *HEC-RAS* از معادلات سنت و نانت برای محاسبات جریان ناپایدار با استفاده از طرح حل اختلاف محدود ضمنی استفاده می‌کند. تلفات اصطکاکی در طول کانال با ضرب کردن میانگین شیب اصطکاک بین دو مقطع، در طول بین مقطع محاسبه می‌شود. تلفات انقباض یا انبساط مقطع به عنوان درصدی از هد سرعت در نظر گرفته می‌شود. معادلات سنت و نانت به صورت روابط ۳ و ۴ است:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0 \quad (۳)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (Q^2/A)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial y}{\partial x} - S_0 + S_f \right) = 0 \quad (۴)$$

که در آن x طول و t زمان است. بقیه پارامترها نیز قبلاً معرفی شده‌اند. برای تهیه مدل *HEC-RAS* ابتدا هندسه مورد نظر در آن تعریف شد. برای تعریف مدل هندسی، گام‌های ایجاد پروژه جدید، تعریف هندسه، تعریف نقاط مرزی، تعریف مقاطع عرضی و تعریف سازه‌ها انجام شد. مدل هندسی کانال شعبیه با در نظر گرفتن موقعیت دقیق سازه‌های کنترل سطح آب و سازه‌های تنظیم‌کننده دبی تهیه شد.

۲. سنجه‌های ارزیابی عملکرد

برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها، از سنجه‌های کفایت (MPA)، راندمان (MPF)، عدالت (MPE) و پایداری (MPD) استفاده شد که به ترتیب در روابط ۵ تا ۸ تعریف شده‌اند (مولدن و گیتس^۱، ۱۹۹۰):

$$MPA = \frac{1}{N} \sum_N \frac{1}{M} \sum_M (PA), \begin{cases} PA = \frac{Q_D}{Q_R} & \text{IF } Q_R > Q_D \\ PA = 1 & \text{IF } 1 < \frac{Q_D}{Q_R} \end{cases} \quad (5)$$

$$MPF = \frac{1}{N} \sum_N \frac{1}{M} \sum_M (PE), \begin{cases} PE = \frac{Q_R}{Q_D} & \text{IF } Q_R < Q_D \\ PE = 1 & \text{IF } \frac{Q_R}{Q_D} > 1 \end{cases} \quad (6)$$

$$MPD = \frac{1}{R} \sum_R CV_T \left(\frac{Q_D}{Q_R} \right) \quad (7)$$

$$MPE = \frac{1}{T} \sum_T CV_R \left(\frac{Q_D}{Q_R} \right) \quad (8)$$

که در آن M تعداد آبیگرها، Q_R دبی مورد نیاز یا دبی درخواست شده در آبیگر M ، Q_D دبی واقعی تحویل شده به آبیگر M و N تعداد گام‌های زمانی مناسب در یک دوره تحویل، R تعداد آبیگرها، T تعداد گام‌های زمانی و CV ضریب تغییرات است. بهترین مقدار برای سنجه‌های کفایت و راندمان برابر با یک و برای سنجه‌های عدالت و پایداری برابر با صفر است.

در این تحقیق، ارزیابی به صورت محلی و منطقه‌ای انجام شد. در ارزیابی محلی، سنجه‌ها برای هر آبیگر به صورت جداگانه بر اساس دبی درخواست شده و دبی تحویل شده بر اساس نتایج شبیه‌سازی، محاسبه شد. در ارزیابی محلی، امکان ارزیابی عملکرد هر آبیگر به صورت جداگانه فراهم شد. در ارزیابی منطقه‌ای، کل کانال به سه قسمت منطقه بالادست شامل سازه‌های آب‌بند ۱-۴ و سازه‌های آبیگر ۱-۵، منطقه میانی شامل سازه‌های آب‌بند ۵-۷ و سازه‌های آبیگر ۶-۱۱ و منطقه پایین‌دست شامل سازه‌های آب‌بند ۸-۹ کنترل سازه‌های آبیگر ۱۲-۱۵ تقسیم شد و سنجه‌ها برای هر منطقه به صورت جداگانه محاسبه شد. شرایط اولیه در کانال به همراه سناریوهای مورد بررسی در جدول ۲ ارائه شده است. در سناریوهای ۱ تا ۴، با افزایش دبی ورودی، مقادیر دبی آبیگرها به تدریج افزایش می‌یابند. به عنوان مثال، دبی ورودی ۸/۵۸ مترمکعب در ثانیه است و دبی آبیگر ۱ مقدار ۰/۱۸ مترمکعب در ثانیه در شرایط اولیه به دبی ورودی ۰/۲۲۴ مترمکعب در ثانیه و دبی آبیگر ۴ به ۰/۱۹۸ مترمکعب در ثانیه می‌رسد. با معرفی این تغییرات به HEC-RAS و اجرای آن، نتایج دریافت و ارزیابی شد.

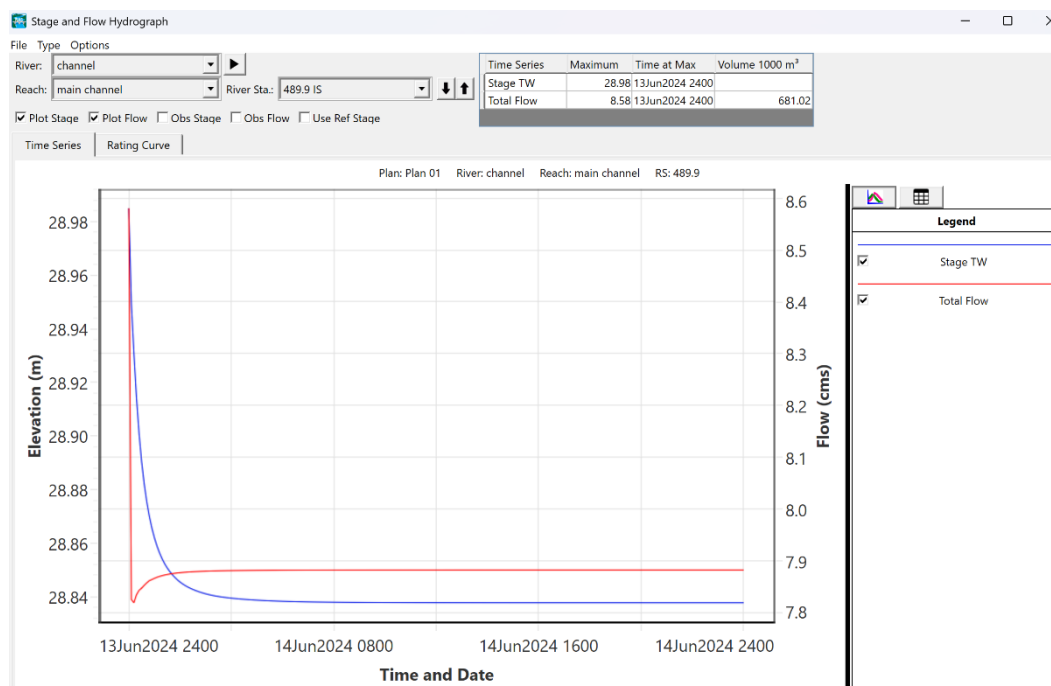
جدول ۲. سناریوهای مورد بررسی برای ارزیابی (مقادیر دبی بر حسب مترمکعب در ثانیه است)

شرایط اولیه	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو ۴	سناریو ۵	سناریو ۶	سناریو ۷	سناریو ۸	
دبی ورودی	۸/۵۸	۸/۷۹۵	۹/۰۰۹	۹/۲۲۴	۹/۴۳۸	۷/۹۳۷	۸/۱۵۱	۸/۳۶۶	۷/۷۲۲
دبی آبگیر ۱	۰/۱۸	۰/۱۸۵	۰/۱۸۹	۰/۱۹۴	۰/۱۹۸	۰/۱۶۷	۰/۱۷۱	۰/۱۷۶	۰/۱۶۲
دبی آبگیر ۲	۰/۳	۰/۳۰۸	۰/۳۱۵	۰/۳۲۳	۰/۳۳	۰/۲۷۸	۰/۲۸۵	۰/۲۹۳	۰/۲۷
دبی آبگیر ۳	۰/۳۳	۰/۳۳۸	۰/۳۴۷	۰/۳۵۵	۰/۳۶۳	۰/۳۰۵	۰/۳۱۴	۰/۳۲۲	۰/۲۹۷
دبی آبگیر ۴	۰/۲	۰/۲۰۵	۰/۲۱	۰/۲۱۵	۰/۲۲	۰/۱۸۵	۰/۱۹	۰/۱۹۵	۰/۱۸
دبی آبگیر ۵	۰/۱۹	۰/۱۹۵	۰/۲	۰/۲۰۴	۰/۲۰۹	۰/۱۷۶	۰/۱۸۱	۰/۱۸۵	۰/۱۷۱
دبی آبگیر ۶	۰/۳۶	۰/۳۶۹	۰/۳۷۸	۰/۳۸۷	۰/۳۹۶	۰/۳۳۳	۰/۳۴۲	۰/۳۵۱	۰/۳۲۴
دبی آبگیر ۷	۰/۲۶	۰/۲۶۷	۰/۲۷۳	۰/۲۸	۰/۲۸۶	۰/۲۴۱	۰/۲۴۷	۰/۲۵۴	۰/۲۳۴
دبی آبگیر ۸	۰/۲۷	۰/۲۷۷	۰/۲۸۴	۰/۲۹	۰/۲۹۷	۰/۲۵	۰/۲۵۷	۰/۲۶۳	۰/۲۴۳
دبی آبگیر ۹	۰/۲۷	۰/۲۷۷	۰/۲۸۴	۰/۲۹	۰/۲۹۷	۰/۲۵	۰/۲۵۷	۰/۲۶۳	۰/۲۴۳
دبی آبگیر ۱۰	۰/۲۸	۰/۲۸۷	۰/۲۹۴	۰/۳۰۱	۰/۳۰۸	۰/۲۵۹	۰/۲۶۶	۰/۲۷۳	۰/۲۵۲
دبی آبگیر ۱۱	۰/۲۲	۰/۲۲۶	۰/۲۳۱	۰/۲۳۷	۰/۲۴۲	۰/۲۰۴	۰/۲۰۹	۰/۲۱۵	۰/۱۹۸
دبی آبگیر ۱۲	۰/۳۵	۰/۳۵۹	۰/۳۶۸	۰/۳۷۶	۰/۳۸۵	۰/۳۲۴	۰/۳۳۳	۰/۳۴۱	۰/۳۱۵
دبی آبگیر ۱۳	۰/۳۲	۰/۳۲۸	۰/۳۳۶	۰/۳۴۴	۰/۳۵۲	۰/۲۹۶	۰/۳۰۴	۰/۳۱۲	۰/۲۸۸
دبی آبگیر ۱۴	۰/۲۳	۰/۲۳۶	۰/۲۴۲	۰/۲۴۷	۰/۲۵۳	۰/۲۱۳	۰/۲۱۹	۰/۲۲۴	۰/۲۰۷
دبی آبگیر ۱۵	۰/۳۲	۰/۳۲۸	۰/۳۳۶	۰/۳۴۴	۰/۳۵۲	۰/۲۹۶	۰/۳۰۴	۰/۳۱۲	۰/۲۸۸

یافته‌های پژوهش

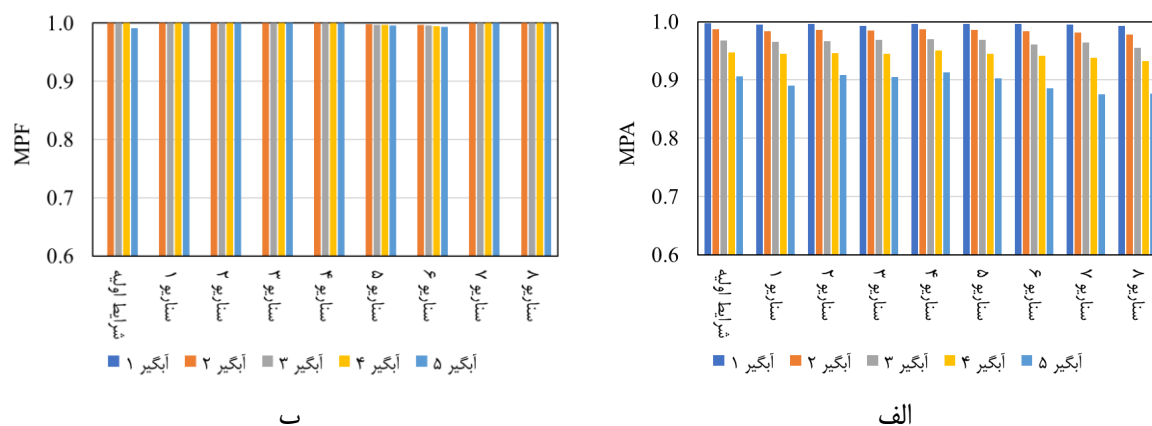
در این پژوهش، هشت سناریو مختلف برای بررسی تأثیر تغییرات دبی ورودی بر عملکرد توزیع و تحویل آب در کانال شعبیه تعریف شد. این سناریوها به دو دسته سناریوهای ۱ تا ۴ که شامل افزایش دبی با گام $0/025$ مترمکعب در ثانیه و سناریوهای ۵ تا ۸ که شامل کاهش دبی با گام $0/025$ - مترمکعب در ثانیه هستند، تقسیم می‌شوند. دبی اولیه به عنوان مبنای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف و همچنین، مبنای مقایسه برای ارزیابی تأثیر تغییرات دبی در سناریوهای مختلف در نظر گرفته شد.

در شکل ۱، تغییرات ارتفاع آب و دبی در سازه آب‌بند اول نشان داده شده است. با کاهش دبی ورودی، تراز ارتفاع آب طی زمان به تدریج کاهش می‌یابد و منحنی آن شیب نزولی ملایمی دارد، به گونه‌ای که مقدار آن از حدود $28/98$ متر ابتدا به نزدیک $28/84$ متر در انتهای دوره می‌رسد. هم‌زمان، دبی کل نیز متناسب با کاهش دبی ورودی افت می‌کند و از حدود $8/58$ به $7/8$ مترمکعب بر ثانیه کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه این است که هر دو منحنی روندی تقریباً موازی و هماهنگ با یکدیگر دارند که نشان می‌دهد مدل هیدرولیکی قادر است هیدروگراف عمق و دبی را در واکنش به کاهش دبی ورودی به خوبی شبیه‌سازی کند.



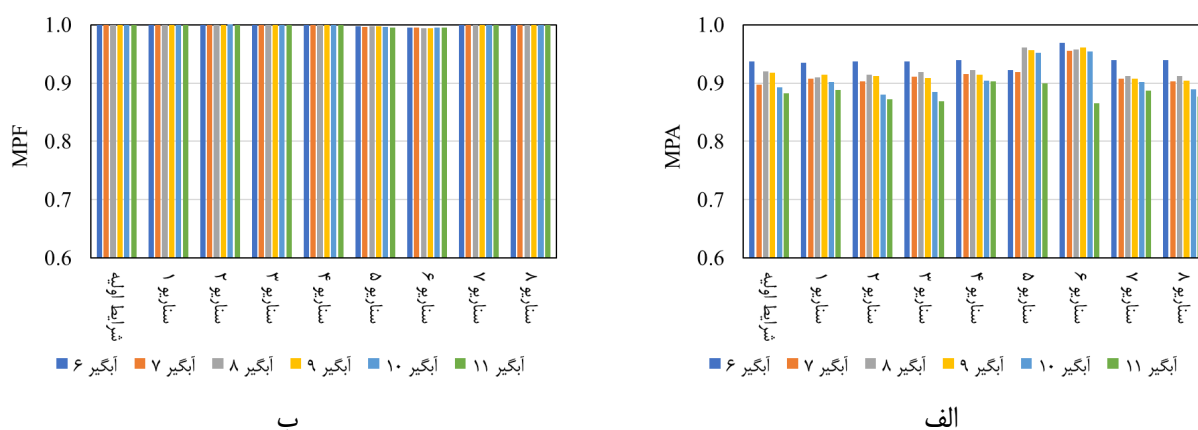
شکل ۱. رفتار تغییرات ارتفاع آب و دبی نسبت به کاهش دبی در بالادست

در شکل‌های ۲ الف و ب، به‌ترتیب نتایج سنجه‌های ارزیابی کفایت و راندمان در آبگیرهای منطقه بالادست ارائه شده است. نتایج سنجه ارزیابی کفایت برای سناریوهای مختلف در آبگیرهای بالادست نشان داد در شرایط اولیه، مقادیر کفایت به‌ترتیب از ۰/۹۹۷ در آبگیر ۱ تا ۰/۹۰۶ در آبگیر ۵ متغیر است که کفایت بالای توزیع آب در این آبگیرها در شرایط اولیه را نشان می‌دهد. بر اساس استانداردهای ارائه‌شده برای سنجه کفایت، آبگیرهای ۱-۴ در تمامی سناریوها در رده خوب قرار دارند. آبگیر ۵ در سناریوهای ۲، ۳ و ۴ در رده خوب قرار دارد، ولی سناریوهای ۱، ۵، ۶، ۷ و ۸ وارد رده متوسط شده‌اند. در سناریوهای افزایش دبی، مقدار افزایش دبی تأثیر مثبت کمی بر سنجه کفایت در آبگیرهای با کفایت بالاتر دارد. در سناریوهای کاهش دبی، کاهش دبی تأثیر منفی و قابل توجه‌تری نسبت به افزایش آن دارد. این اثر به‌ویژه برای آبگیرهای پایین‌دست مشهود است. نتایج سنجه ارزیابی راندمان برای سناریوهای مختلف در آبگیرهای بالادست نشان داد مقادیر سنجه راندمان در تمامی سناریوها و برای تمامی آبگیرها در رده خوب قرار دارند. حتی پایین‌ترین مقدار مشاهده‌شده ۰/۹۹۴ برای آبگیر ۵ در سناریو ۶ نیز به‌وضوح در محدوده ۰/۸۵ تا ۱ است که کارایی بالای سیستم از نظر سنجه راندمان را نشان می‌دهد.



شکل ۲. نتایج سنجه‌های کفایت و راندمان در سناریوهای مختلف در آبگیرهای منطقه بالادست (۱-۵)، الف) کفایت و ب) راندمان

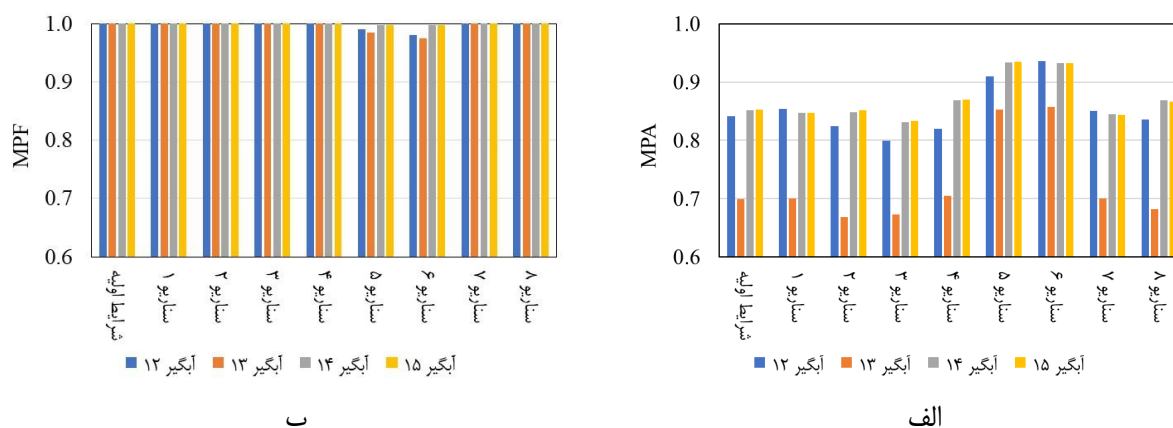
در شکل‌های ۳ الف و ب، به‌ترتیب نتایج سنجه‌های ارزیابی کفایت و راندمان در آبگیرهای منطقه میانی ارائه شده است. مقادیر سنجه کفایت در سناریوهای مختلف برای آبگیرهای ۶ تا ۱۱ در منطقه میانی نشان داد به خلاف آبگیرهای ۱ تا ۵ در منطقه بالادست که روندی قابل پیش‌بینی داشتند، رفتار آبگیرهای ۶-۱۱ پیچیده و غیرخطی است. با تحلیل نتایج، می‌توان آبگیرها را به سه گروه متمایز تقسیم کرد. در گروه اول که آبگیرهای ۶ و ۷ قرار دارند الگوی رفتاری مشابه است و در شرایط عادی، کفایت نسبتاً خوبی دارند. در گروه دوم که آبگیرهای ۸ و ۹ قرار دارند، در اکثر سناریوها، تغییرات بسیار کمی وجود دارد. در گروه سوم که آبگیرهای ۱۰ و ۱۱ قرار دارند، پایین‌ترین سطوح کفایت در اکثر سناریوها مشاهده می‌شود. مقادیر سنجه راندمان در سناریوهای مختلف برای آبگیرهای ۶ تا ۱۱ نشان داد این سنجه در تمامی سناریوها و برای همه آبگیرها در رده خوب قرار می‌گیرند و سیستم در هفت سناریو از نه سناریو به راندمان یک دست یافته است.



شکل ۳. نتایج سنجه‌های کفایت و راندمان در سناریوهای مختلف در آبگیرهای منطقه میانی (۶-۱۱)، الف) کفایت و ب) راندمان

در شکل‌های ۴ الف و ب، به‌ترتیب نتایج سنجه‌های ارزیابی کفایت و راندمان در آبگیرهای منطقه پایین دست ارائه شده است. بررسی داده‌های سنجه کفایت برای آبگیرهای ۱۲ تا ۱۵ در منطقه پایین دست، الگوی عملکردی متفاوتی نسبت به آبگیرهای بالادست دارد. آبگیر ۱۳ در هفت سناریو از نه سناریو (غیر از سناریو ۴) در رده ضعیف قرار گرفته و در بهترین حالت به مرز رده متوسط می‌رسد که نشان‌دهنده عدم تأمین کافی آب است. آبگیرهای ۱۲، ۱۴ و ۱۵ نیز اگرچه وضعیت بهتری دارند، اما در بیشتر

سناریوها در آستانه رده خوب یا رده متوسط قرار می‌گیرند. مقایسه این نتایج با عملکرد عالی آبگیرهای بالادست که راندمانی نزدیک به ۱ داشتند، شکاف عمیق عدالت توزیعی در سیستم را آشکار می‌سازد. به نظر می‌رسد توزیع منابع آب به نفع آبگیرهای بالادست صورت می‌گیرد و آبگیرهای پایین‌دست در اولویت آخر قرار دارند. این نابرابری نه تنها از دیدگاه انسانی قابل انتقاد است، بلکه پایداری کل سیستم را در بلندمدت تهدید می‌کند. در مقابل، بررسی داده‌های سنجه راندمان برای آبگیرهای ۱۲ تا ۱۵ در منطقه پایین‌دست، الگوی عملکردی بسیار مطلوب و متفاوتی نسبت به سنجه کفایت همین آبگیرها نشان داد. بر اساس استانداردهای تعریف‌شده، سنجه راندمان در تمامی سناریوها و برای همه آبگیرها در کلاس خوب قرار می‌گیرند و سیستم در هفت سناریو از نه سناریو به راندمان یک دست یافته است.

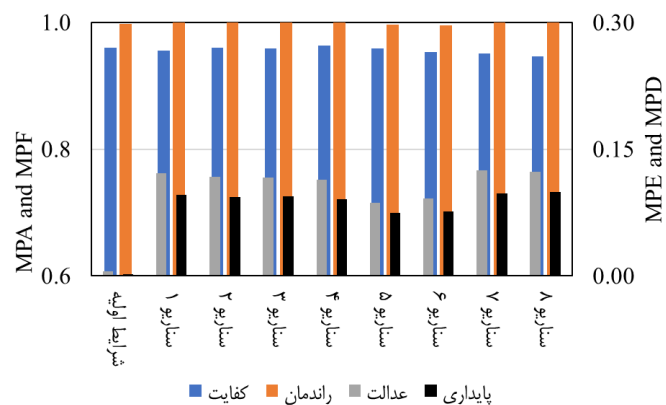


شکل ۴. نتایج سنجه‌های کفایت و راندمان در سناریوهای مختلف در آبگیرهای منطقه میانی (۱۲-۱۵)، الف) کفایت و ب) راندمان

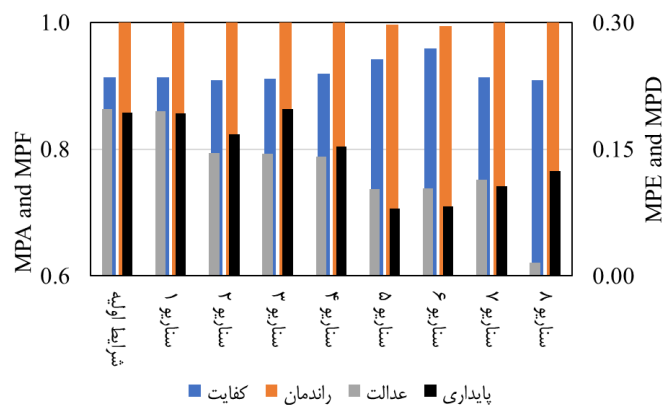
در شکل‌های ۵ - ۷ نتایج سنجه‌های ارزیابی کفالت، راندمان، عدالت و پایداری به‌ترتیب برای مناطق بالادست، میانی و پایین‌دست ارائه شده است. منطقه بالادست در شرایط اولیه با مقدار $0/005$ نزدیک به وضعیت ایده‌آل قرار دارد، در حالی که این سنجه در منطقه میانی $0/197$ و در پایین‌دست به $0/285$ می‌رسد که نشان‌دهنده بی‌عدالتی به زیان مناطق پایین‌دست است. از نظر سنجه کفایت نیز تغییرات کاهشی محسوسی از بالادست به پایین‌دست مشاهده می‌شود، به طوری که در شرایط اولیه، منطقه بالادست با $0/961$ در رده خوب، منطقه میانی با $0/913$ در مرز رده خوب و متوسط و منطقه پایین‌دست با $0/811$ در آستانه رده متوسط قرار دارد. این الگو بیانگر تأمین کامل آب به نفع کاربران بالادست است. سنجه راندمان در تمام مناطق عملکرد مشابه و مطلوبی نشان می‌دهد و در اکثر سناریوها به مقدار ایده‌آل می‌رسد که بیانگر کارایی فنی یکسان در کل سیستم است.

در مقایسه بین منطقه بالادست و میانی، در شرایط اولیه سنجه کفایت در بالادست و در منطقه میانی که تفاوت $0/048$ واحدی را نشان می‌دهد و بیانگر برتری بالادست در تأمین نیازهای آبی است. این شکاف در برخی سناریوها مانند سناریو ۳ به $0/047$ واحد و در سناریو ۴ به $0/044$ واحد می‌رسد که نشان می‌دهد حتی در شرایط افزایش دبی نیز این نابرابری همچنان پابرجاست. از نظر سنجه راندمان، هر دو منطقه در اکثر سناریوها به وضعیت ایده‌آل دست می‌یابند که بیانگر کارایی فنی مشابه در هر دو منطقه است. سنجه عدالت در سناریو ۳، $0/194$ واحد و در سناریو ۸، $0/107$ واحد اختلاف در منطقه بالادست و میانی دارد. به طور مشابه، سنجه پایداری نیز بیانگر پایداری بالاتر سیستم در منطقه بالادست به دلیل ماهیت هیدرولیکی و ساختار توزیع جریان در سیستم دارد. در منطقه بالادست، کلیه آبگیرها به منبع اصلی جریان نزدیک‌تر هستند و فاصله فیزیکی کمتری از

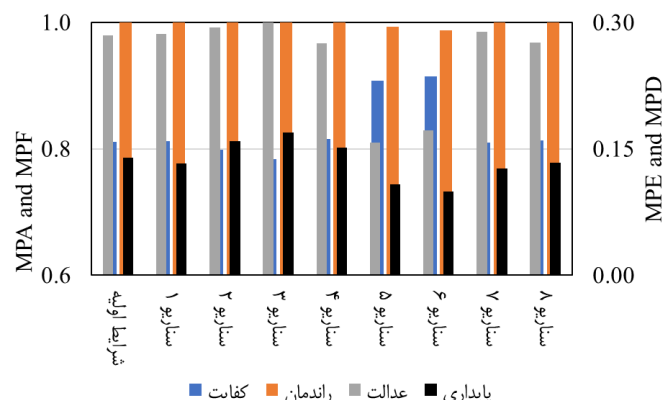
نقطه ورودی آب به سیستم دارند. این نزدیکی باعث می‌شود که نوسانات دبی در مسیر انتقال به آبیگرهای بالادست کمتر باشد، زیرا هنوز جریان افت فشار و تلفات هیدرولیکی قابل توجهی را تجربه نکرده است. به بیان دیگر، در آبیگرهای بالادست، نسبت دبی واقعی تحویلی به دبی درخواستی به مقدار یک نزدیک‌تر است و تغییرات زمانی این نسبت طی گام‌های زمانی مختلف کمتر است. در نتیجه مقدار ضریب تغییرات برای هر آبیگر بالادست کوچک‌تر می‌شود و شاخص پایداری که به صورت معکوس با مجموع این ضرایب تغییرات رابطه دارد، افزایش می‌یابد. در مقابل، در مناطق پایین‌دست، به دلیل برداشت‌های متعدد در طول مسیر، و گاه بیشتر از مقدار درخواست‌شده، تداخل جریان‌های خروجی از آبیگرهای بالادست و افزایش تلفات هیدرولیکی، نوسانات دبی بیشتر شده و انحراف از دبی درخواستی تشدید می‌شود که در نهایت به کاهش شاخص پایداری در این مناطق منجر می‌شود.



شکل ۵. نتایج سنجه کفایت، راندمان، عدالت و پایداری در سناریوهای مختلف در آبیگرهای منطقه بالادست



شکل ۶. نتایج سنجه کفایت، راندمان، عدالت و پایداری در سناریوهای مختلف در آبیگرهای منطقه میانی



شکل ۷. نتایج سنجه کفایت، راندمن، عدالت و پایداری در سناریوهای مختلف در آبیگرهای منطقه پایین دست

در مقایسه بین منطقه بالادست و پایین دست، شکافها به مراتب عمیق تر است. سنجه کفایت در شرایط اولیه در بالادست ۰/۹۶۱ و در پایین دست ۰/۸۱۱ است که تفاوت ۰/۱۵۰ واحدی را نشان می دهد و بیانگر محرومیت منطقه پایین دست از منابع آبی است. این اختلاف در سناریو ۳ به اوج خود یعنی ۰/۱۷۵ واحد می رسد که نشان می دهد در شرایط افزایش تدریجی دبی، شکاف بین دو منطقه بیشتر می شود، زیرا فقط افزایش دبی ورودی بدون بازتوزیع مناسب یا تعدیل ساختار برداشت ها، نمی تواند کفایت توزیعی را در سیستم های طولانی با آبیگرهای متعدد بهبود بخشد. از نظر سنجه راندمن، دوباره هر دو منطقه در اکثر سناریوها به وضعیت مطلوب دست می یابند که بر کارایی فنی یکسان در کل سیستم دلالت دارد. سنجه عدالت در شرایط اولیه، شکاف ۰/۲۸۰ واحدی را بین مناطق بالادست و پایین دست آشکار می سازد و این بالاترین سطح نابرابری در سیستم را نشان می دهد. این اختلاف در سناریو ۳ به ۰/۱۹۴ واحد و در سناریو ۴ به ۰/۱۶۲ واحد می رسد. سنجه پایداری نیز بیانگر آسیب پذیری بیشتر منطقه پایین دست است.

تحلیل روند تغییرات در سناریوهای مختلف نشان می دهد در سناریوهای ۱ تا ۴ که افزایش تدریجی دبی را شبیه سازی می کنند، شکاف بین مناطق عموماً حفظ می شود یا حتی افزایش می یابد. به عنوان مثال، شکاف کفایت بین بالادست و پایین دست از ۰/۱۵۰ در شرایط اولیه به ۰/۱۴۷ در سناریو ۱، ۰/۱۶۳ در سناریو ۲، ۰/۱۷۵ در سناریو ۳ و ۰/۱۴۷ در سناریو ۴ می رسد که نشان می دهد افزایش منابع آب به تنهایی قادر به کاهش نابرابری ها نیست. در مقابل، در سناریوهای ۵ و ۶ که کاهش دبی را مدل می کنند، این شکافها به طور محسوسی کاهش می یابد که نشان از ظرفیت سیستم برای توزیع عادلانه تر در شرایط مدیریت شده دارد. شکاف عدالت بین این دو منطقه از ۰/۲۸۰ واحد در شرایط اولیه به ۰/۰۷۱ واحد در سناریو ۵ و ۰/۰۸۰ واحد در سناریو ۶ تقلیل می یابد.

تحلیل مقایسه ای ارزیابی محلی و منطقه ای نشان می دهد اگرچه نتایج منطقه ای تصویر کلی از عملکرد سیستم ارائه می دهند، اما در سطح محلی، تغییرات و نوسانات قابل توجهی بین آبیگرهای هر منطقه وجود دارد. در منطقه بالادست، آبیگرهای ۱ تا ۵ در شرایط اولیه از کفایت بسیار بالایی برخوردار هستند، به طوری که آبیگر ۱ و آبیگر ۵ در رده خوب قرار دارند. میانگین کفایت منطقه ای ۰/۹۶۱ است که با مقادیر فردی آبیگرها همخوانی دارد. در منطقه میانی، آبیگرهای ۶ تا ۱۱ دامنه وسیع تری از کفایت را نشان می دهند؛ آبیگر ۶ در رده خوب قرار دارد، در حالی که آبیگر ۱۱ در مرز پایینی رده خوب است. میانگین کفایت منطقه ای میانی ۰/۹۱۳ است که با توجه به مقادیر فردی، عددی معقول به نظر می رسد. در منطقه پایین دست، آبیگرهای ۱۲ تا

۱۵ با چالش‌های جدی‌تری مواجه هستند؛ آبگیر ۱۲ و آبگیر ۱۳ به‌ترتیب در رده متوسط و در رده ضعیف قرار دارند. میانگین کفایت این منطقه ۰/۸۱۱ است که بازتابی از مقادیر پایین‌تر آبگیرهای فردی است.

از نظر سنجۀ راندمان محلی، عملکرد تقریباً یکسانی در تمام مناطق مشاهده می‌شود. در منطقه بالادست، آبگیرهای ۱ تا ۴ دارای میانگین ۰/۹۹۸ هستند. در بررسی سنجه‌های عدالت و کفایت محلی، باید توجه داشت که این سنجه عموماً در سطح منطقه‌ای محاسبه می‌شود، اما با تحلیل پراکندگی مقادیر کفایت در هر منطقه می‌توان به درکی از عدالت توزیعی دست یافت. در منطقه بالادست، اختلاف کفایت بین آبگیر ۱ و آبگیر ۵ که حدود ۰/۰۹۱ واحد است توزیع نسبتاً عادلانه درون منطقه‌ای را نشان می‌دهد. در منطقه میانی، اختلاف بین آبگیر ۶ و آبگیر ۱۱ که حدود ۰/۰۵۵ واحد است بیانگر توازن بهتر درون منطقه‌ای است. در منطقه پایین‌دست، اختلاف کفایت بین آبگیر ۱۴ و آبگیر ۱۳ حدود ۰/۱۵۳ واحد است که نشان از نابرابری شدید درون منطقه‌ای دارد.

تحلیل رفتار آبگیرهای فردی در سناریوهای مختلف نشان می‌دهد پاسخ به تغییرات دبی در مقیاس محلی و منطقه‌ای تا حدی متفاوت است. در سناریوهای ۵ و ۶ که کاهش دبی را مدل می‌کنند، در ارزیابی منطقه‌ای شاهد بهبود سنجۀ کفایت در مناطق میانی و پایین‌دست هستیم، اما در ارزیابی محلی، این بهبود به صورت ناهمگون بین آبگیرها توزیع شده است.

منطقه بالادست از نظر ترکیب بهینه سنجه‌ها در بهترین وضعیت قرار دارد، چرا که هم از راندمان کامل برخوردار است و هم با سنجۀ عدالت نزدیک به صفر، بیشترین سود را از توزیع منابع می‌برد. در مقابل، منطقه پایین‌دست اگرچه از راندمانی برابر با بالادست برخوردار است، اما با سنجۀ عدالت کمتری مواجه است که نشان می‌دهد سهم ناچیزی از منابع به این منطقه تخصیص می‌یابد. این تناقض میان راندمان عالی و عدالت ناکافی در پایین‌دست، بیانگر آن است که سیستم اگرچه از نظر فنی کارآمد عمل می‌کند، اما در تخصیص منابع دچار بی‌عدالتی است. مقایسه بین مناطق بالادست و پایین‌دست به‌خوبی وجود بی‌عدالتی سیستماتیک به نفع منطقه بالادست و به زیان مناطق پایین‌دست را آشکار می‌سازد. منطقه میانی نیز وضعیتی بینابین دارد و با وجود راندمان عالی، سنجۀ عدالت آن بالاتر از حد استاندارد قرار گرفته است.

با وجود تفاوت در میزان برخورداری از منابع، هر سه منطقه اشتراکات رفتاری مهمی نشان می‌دهند. نخست آنکه سنجۀ راندمان در تمامی مناطق و در اکثر سناریوها در بالاترین سطح ممکن قرار دارد که نشان‌دهندۀ کارایی فنی مطلوب در کل سیستم بهره‌برداری است. دومین اشتراک مهم، رفتار همسو در سنجه‌های عدالت و پایداری است که در تمام مناطق مقادیری بالاتر از حد استاندارد مطلوب خود نشان می‌دهند و شکاف ایجادشده در این سنجه‌ها در برخی موارد به ۰/۲۸۰ واحد نیز می‌رسد. سومین اشتراک، وابستگی عملکرد تمام مناطق به تغییرات دبی ورودی است، به طوری که در سناریوهای با تغییرات شدید، سنجه‌های عدالت و پایداری در همه مناطق از حد مطلوب فاصله می‌گیرند، در حالی که در شرایط با تغییرات ملایم، عملکرد سیستم متعادل‌تر می‌شود. این ویژگی نشان می‌دهد ثبات در منابع آبی نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد بهینه کل سیستم ایفا می‌کند.

تحلیل جامع عملکرد سیستم توزیع آب در کانال آبیاری شعبیه و ارزیابی منطقه‌ای در سه ناحیه بالادست، میانی و پایین‌دست نشان می‌دهد سیستم بهره‌برداری از منظر فنی در سطح مطلوبی عمل می‌کند، به گونه‌ای که در تمامی مناطق و در اکثر سناریوهای تعریف‌شده، سنجۀ راندمان در رده خوب یا نزدیک به خوب قرار داشته و بیانگر حداقل تلفات فیزیکی در انتقال آب است. این موفقیت فنی در حالی رخ داده که نابرابری در توزیع آب بین آبگیرها قابل مشاهده و به نفع منطقه بالادست و به زیان

مناطق میانی و به‌ویژه پایین‌دست است. شکاف‌های مشاهده‌شده در سنجه‌های کفایت، عدالت و پایداری بین نواحی مختلف، ضرورت بررسی‌های میدانی و اتخاذ راهبردهای مدیریتی هدفمند برای کاهش این نابرابری‌ها را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد. شایان یادآوری است که یافته‌های این پژوهش مبتنی بر داده‌های بهره‌برداری یک دوره مشخص است و برای تعمیم نتایج به تمام دوره‌های بهره‌برداری و دستیابی به اطمینان بیشتر، تحلیل داده‌های بلندمدت‌تر و مدل‌سازی سناریوهای متنوع‌تر ضروری خواهد بود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدل هیدرولیکی *HEC-RAS* با موفقیت و دقت قابل قبولی برای شبیه‌سازی جریان در کانال شعیه به کار گرفته شد. نتایج نشان داد سنجۀ راندمان در سطح تقریباً تمامی آبگیرهای ۱۵ گانه و در تمامی مناطق بالادست، میانی و پایین‌دست در محدوده خوب قرار دارد که بیانگر کارایی بالای سیستم در انتقال و توزیع فیزیکی آب و تلفات پایین است. ارزیابی سنجۀ عدالت یک گرادیان کاهشی واضح را از بالادست به پایین‌دست نشان داد. در حالی که منطقه بالادست با سنجۀ نزدیک به صفر در وضعیت ایده‌آل قرار دارد، در مناطق میانی و به‌ویژه پایین‌دست، توزیع ناعادلانه منابع آب به نفع بهره‌برداران بالادست وجود دارد. ارزیابی سنجۀ پایداری نشان داد منطقه بالادست از پایداری بالایی برخوردار است، در حالی که مناطق میانی و پایین‌دست به ترتیب در رده متوسط و ضعیف قرار دارند. این امر آسیب‌پذیری بیشتر این مناطق در برابر نوسانات و تغییرات شرایط بهره‌برداری را آشکار می‌سازد.

انجام یک مطالعه پایشی برای ارزیابی مستمر و بلندمدت اثرات اجرای راهکارهای مدیریتی پیشنهادی روی سنجه‌های عملکرد، به منظور اصلاح و بهبود این راهکارها در بازه‌های زمانی مختلف توصیه می‌شود. بررسی قابلیت استفاده از فناوری‌هایی مانند سنجش از دور برای پایش سطح زیر کشت و نیاز آبی، و سیستم‌های کنترل هوشمند برای عملیاتی کردن راهکارهای توزیع بهینه آب در زمان واقعی و همچنین توسعه سنجه‌های ترکیبی ارزیابی عملکرد که بتواند به طور هم‌زمان ابعاد مختلف عملکرد را در یک عدد بدون بعد خلاصه کند از دیگر پیشنهادها برای این پژوهش است.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان به طور مساوی در کلیه 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.

تعارض منافع

بنا به اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

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

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسنده قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از کلیه افرادی که در انجام این تحقیق کمک کردند، قدردانی می‌شود.

منابع

- 1 Aghayee, Z., Ghodousi, H. & Shahverdi, K. (2024). Uncertainty Analysis of Irrigation Canals Operation. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 48, 4769-4779. <https://doi.org/10.1007/s40996-024-01628-x>
- 2 Bonet, E., Yubero, M. T., Bascompta, M., & Alfonso, P. (2025). A linear model for irrigation canals operating in real time applied in ASCE test cases. *Water*, 17(9), 1368. <https://doi.org/10.3390/w17091368>
- 3 Hashemy Shahdany, S., Maestre, J. & Van Overloop, P. (2015). Equitable water distribution in main irrigation canals with constrained water supply. *Water Resources Management*, 29, 3315-3328. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1000-4>
- 4 Molden, D. J. & Gates, T. K. (1990). Performance measures for evaluation of irrigation-water-delivery systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 116, 804-823. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1990\)116:6\(804](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1990)116:6(804)
- 5 Shahverdi, K. & Maestre, J. (2022). Gray Wolf Optimization for Scheduling Irrigation Water. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 148, 04022020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.000168](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.000168)
- 6 Shahverdi, K. & Maestre, J. M. (2023). Holistic framework for canal modernization: operation optimization, and economic and environmental analyses. *Water Resources Management*, 37, 6145-6164. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03647-1>
- 7 Sharifi, H., Roozbahani, A. & Shahdany, S. M. H. (2021). Evaluating the Performance of Agricultural Water Distribution Systems Using FIS, ANN and ANFIS Intelligent Models. *Water Resources Management*, 35, 1797–1816. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02810-w>
- 8 Tork, H., Javadi, S. & Shahdany, S. M. H. (2021). A new framework of a multi-criteria decision making for agriculture water distribution system. *Journal of Cleaner Production*, 306, 127178. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127178>