



Assessment of the Impact of Centralized MPC-Based Operational Automation on Adequate and Reliable Distribution of Agricultural Water Rights under Surface-Water Allocation Uncertainty

Reza Jamali,¹ Mahmoud Mashal,^{2*}  S. Mehdy Hashemy Shahdany,³  Jaber Soltani⁴ 

1. PhD. Candidate, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Tehran, Iran. Email: r.jamali@ut.ac.ir
2. Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Tehran, Iran; (Corresponding author). Email: mmashal@ut.ac.ir
3. Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Tehran, Iran. Email: mehdi.hashemy@ut.ac.ir
4. Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Tehran, Iran. Email: jsoltani@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received Received 29 June 2025

Received in revised form 10 August 2025

Accepted 14 September 2025

Available online 23 September 2025

Keywords:

Operation,
Surface-water distribution,
Agricultural water rights,
Water accounting,
Spatiotemporal analysis

ABSTRACT

Research Topic: This research investigates the comparative performance of an automated operation system in improving the reliability of surface-water distribution among water-right holders in an irrigation network.

Objective: The main objective of this study is to analyze the spatial and temporal effects of surface-water operation system modernization on the adequate and reliable distribution of agricultural water rights among water user cooperatives within the Nekoabad irrigation network. The principal analytical outcome is the precise determination of the contribution of surface-water resources-under water-scarcity conditions at the diversion dam-in meeting the water rights of 163 farmer cooperatives within the network.

Method: Operational simulations were performed for two modes: manual operation (baseline condition) and automated operation using a centralized Model Predictive Controller (MPC). The temporal analysis was based on categorizing surface-water availability at the diversion dam into seven scenarios ranging from normal to extreme shortage. Spatial analysis was conducted by simulating the surface-water distribution process among 163 water-right holders located along thirteen secondary canals of the Nekoabad irrigation district.

Results: The results revealed that, compared with the manual system, the MPC-based operation exhibited significantly higher stability, uniformity, and reliability. Under shortage conditions, the manual system showed nonlinear degradation in adequacy and dependability indices, with a pronounced increase in spatial inequality of water delivery. In contrast, the MPC system maintained a higher mean adequacy, reduced temporal fluctuations, and achieved spatial homogenization, extending the shortage-tolerance threshold by up to 25 percentage points. Spatial correlation analysis of performance indices, statistical distribution of operational outcomes, and surface-water delivery shares all confirmed the superiority of the automated system in sustaining equity and resilience across the irrigation network.

Conclusion: Aligned with the main goal of this study, the practical outcome is the accurate quantification of the percentage and variation range of surface-water deliveries allocated to each of the 163 water outlets under different inflow-supply scenarios at the diversion dam.

Cite this article: Jamali, R., Mashal, M., Hashemy Shahdany, M., Soltani, J. (2025). Assessment of the Impact of Centralized MPC-Based Operational Automation on Adequate and Reliable Distribution of Agricultural Water Rights under Surface-Water Allocation Uncertainty. *ECOHYDROLOGY*, 12(3), 927-944. <http://doi.org/10.22059/IJE.2025.405571.1894>



© Reza Jamali, Mahmoud Mashal, S. Mehdy Hashemy Shahdany, Jaber Soltani.
Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/IJE.2025.405571.1894>

Introduction

In the arid and semi-arid regions of Iran, irrigation networks are the backbone of agricultural production and rural livelihood, yet their performance in equitable and reliable surface-water delivery remains a persistent challenge. The Nekoabad irrigation network, located in the central Zayandeh-Rud Basin, is a representative example where traditional manual operation methods-based on operator experience and fixed schedules-have resulted in unstable distribution, inequitable water allocation, and excessive dependence on groundwater resources. These problems have been magnified by prolonged droughts, increased competition among water-use sectors, and growing supply uncertainty. To address these challenges, the study investigates the application of Model Predictive Control (MPC)-a centralized, feedback-feedforward automation approach-to modernize irrigation operation. MPC enables dynamic optimization of gate openings based on real-time data, internal hydraulic modeling, and short-term forecasts of inflow and demand fluctuations. Although the technical potential of MPC-based automation has been explored in previous studies, few have quantitatively analyzed its spatial and temporal impact on the adequacy and dependability of water delivery to every individual water-right holder under uncertainty. The novelty of this research lies in quantifying the share of surface-water contributions for all 163 farmer cooperatives within the Nekoabad irrigation network under seven categorized water-supply scenarios-from normal to extreme drought-while comparing manual and MPC-controlled operation.

Materials and Methods

The Nekoabad irrigation network covers approximately 29,000 hectares with two main canals and 13 secondary canals supplying water through 163 off-takes. The study employed three main datasets: (1) registered water-right allocations for each cooperative, (2) geometric and hydraulic characteristics of gates and structures obtained from the Iranian Water Resources Management Company, and (3) historical inflow data at the diversion dam from 2000 to 2023. A hydraulic simulation model based on the Integrator-Delay (ID) formulation was developed in Python to simulate unsteady flow behavior in the canal system. The model divides each canal reach into two components: uniform flow and backwater storage, governed by delay time (τ) and storage area parameters. The ID model was coupled with an MPC-based centralized controller, optimizing water-level deviations and discharge adjustments across m control structures over an n -step prediction horizon. The objective function minimized deviations from target levels while penalizing excessive control actions. The two key performance indicators were: Adequacy (PA) - the ratio of delivered flow (QD) to required flow (QR) over time, expressed as a percentage, Dependability (PD) - a stability index representing the coefficient of variation in flow delivery. Simulations were performed under seven inflow scenarios (Normal, WS <10%, WS 10–15%, WS 15–20%, WS 20–30%, WS 30–40%, and WS >40%). Both temporal and spatial analyses were applied to quantify how each system performed at every off-take under variable supply conditions.

Results and Discussion

The comparison between manual and MPC operation revealed substantial differences in spatial uniformity, temporal stability, and overall performance. Under manual operation, mean Adequacy declined drastically from 56.8% (Normal) to 10.8% (WS >40%), corresponding to an 81% reduction. Median Adequacy decreased from 50.9% to 5.6%, indicating widespread under-delivery among downstream users. The coefficient of variation (CV) increased from 0.36 to 1.42, reflecting extreme inequality. In contrast, under MPC control, mean Adequacy remained much higher, declining only from 70.8% to 29.9% across all scenarios. Even at WS >40%, 50% of off-takes maintained Adequacy above 60%, and 20% exceeded 70%. CV stayed below 0.9, demonstrating spatial homogeneity. This implies that MPC control mitigates downstream shortages by dynamically reallocating available inflows and minimizing propagation of hydraulic disturbances. Dependability exhibited an inverse trend. For manual operation, mean Dependability rose from 58.6% to 82.0%, indicating increasing instability, while for MPC it rose only from 40.8% to 63.5%, remaining substantially lower at each shortage level. The average reduction in mean Dependability achieved by MPC was –39 points, accompanied by a similar improvement in median values (–45 points). Spatial analysis confirmed that manual operation produced a steep head-to-tail gradient, where downstream cooperatives received

significantly less and more variable flows. MPC, however, flattened this gradient, equalizing performance throughout the network. The correlation slope between Adequacy and Dependability changed from -0.885 ($R^2 = 0.96$) in manual operation-signifying fragile coupling-to -0.355 ($R^2 = 0.88$) under MPC, indicating a more resilient, adaptive relationship. Probability density analyses further revealed that MPC shifted Adequacy distributions from 10–60% (manual) to 60–90% and compressed Dependability distributions from 70–100% to 0–30%, clearly improving both mean and variance. The automated controller thus transforms the network from a reactive, error-amplifying system into a self-regulating, stable one. Scenario-specific evaluation showed that the critical threshold for operational failure under manual operation occurred at WS 15–20%, whereas MPC sustained equitable and reliable performance up to WS 40% or higher-representing an approximate 25 percentage-point increase in drought resilience. The mean difference in Adequacy between the two systems averaged +40 points, while Dependability decreased by 39 points, confirming that modernization enhances both efficiency and reliability simultaneously.

Conclusion

The study conclusively demonstrates that centralized MPC-based operational automation substantially improves both the adequacy and reliability of surface-water distribution within irrigation networks under uncertain supply conditions. Compared to manual operation, MPC yields smoother spatial performance, reduces variance by more than half, and maintains consistent service levels even during severe shortages. By dynamically adjusting control gates in real time and minimizing deviation from target levels, the MPC system prevents downstream deprivation and stabilizes hydraulic conditions across canals. The quantified outputs-percentages and ranges of surface-water delivery for each of the 163 off-takes under seven inflow scenarios-provide a robust empirical foundation for future risk-based performance assessments, water accounting, and policy optimization within irrigation networks. Ultimately, automation transforms the Nekoabad system from a fragile, human-dependent, and inequitable structure into a predictive, adaptive, and resilient operational framework that aligns with modern principles of integrated water resources management and the Water–Food–Energy Nexus.

Authors Contributions

RJ: Investigation, Methodology, Software, Modeling & Simulation, Formal analysis, Writing-original draft. - **MM:** Conceptualization, Supervision, Validation, Writing-Review & Editing. - **SMHS:** Conceptualization, Supervision, Validation, Writing-Review & Editing. **JS:** Conceptualization, Supervision, Validation, Writing-Review & Editing.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgments

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

Ethical considerations

The authors avoided from data fabrication and falsification.

Declaration of generative AI use

All work presented in this manuscript is original and was prepared without the assistance of any generative artificial intelligence.

Funding

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

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

تحلیل اثر خودکار سازی بهره‌برداری مبتنی بر روش کنترل متمرکز MPC بر کفایت و پایداری توزیع حقابه‌های کشاورزی در شرایط عدم قطعیت در تخصیص آب سطحی

رضا جمالی^۱، محمود مشعل^{۲*}، سید مهدی هاشمی شاهدانی^۳، جابر سلطانی^۴

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی (ابوریحان)، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: r.jamali@ut.ac.ir

۲. دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی (ابوریحان)، دانشگاه تهران، تهران، ایران (نویسنده مسئول). رایانامه: mmashal@ut.ac.ir

۳. دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی (ابوریحان)، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mehdi.hashemy@ut.ac.ir

۴. دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی (ابوریحان)، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: jsoltani@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	موضوع: پژوهش حاضر به مقایسه عملکرد سامانه بهره‌برداری خودکار در ارتقا فرایند توزیع قابل اطمینان آب سطحی بین حقابه‌بران در یک شبکه آبیاری پرداخته است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۸	هدف: هدف اصلی این پژوهش، تحلیل مکانی و زمانی مدرن سازی سامانه بهره‌برداری توزیع آب سطحی در توزیع پایدار و کافی حقابه‌های تعاونی‌های آب‌بران واقع در شبکه آبیاری نکوآباد است. خروجی اصلی تحلیل عبارت است از تعیین دقیق سهم منابع آب سطحی، تحت شرایط متأثر از کم‌آبی در محل بند انحرافی، در تأمین حقابه‌های ۱۶۳ تعاونی آب‌بر واقع در این شبکه.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۱۹	روش تحقیق: شبیه‌سازی بهره‌برداری بر پایه روش بهره‌برداری دستی (وضعیت پایه) و خودکار با استفاده از کنترلگر متمرکز پیش‌بین انجام شد. تحلیل زمانی بر پایه دسته‌بندی وضعیت تأمین آب سطحی در محل بند انحرافی، در قالب هفت سناریوی نرمال تا کم‌آبی شدید، و تحلیل مکانی بر پایه شبیه‌سازی فرایند توزیع آب سطحی بین ۱۶۳ واحد دارای حقابه مشخص، واقع در مجاورت سیزده کانال درجه‌دو شبکه نکوآباد صورت گرفت.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۳	یافته‌ها: نتایج نشان داد که سامانه MPC در مقایسه با سامانه دستی، عملکردی به‌مراتب پایدارتر و قابل‌اعتمادتر ارائه می‌دهد. در شرایط کم‌آبی، سامانه دستی دچار افت غیرخطی در شاخص‌های کفایت و پایداری شد و نابرابری مکانی در تحویل آب به‌طور چشمگیری افزایش یافت. در مقابل، سامانه MPC با حفظ میانگین کفایت بالا، کاهش نوسانات زمانی، و همگن سازی مکانی، توانست آستانه تحمل کمبود را تا ۲۵ واحد درصد افزایش دهد. تحلیل همبستگی مکانی شاخص‌ها، توزیع آماری عملکرد، و سهم تحویلی آب سطحی نیز مؤید برتری سامانه خودکار در حفظ عدالت و تاب‌آوری شبکه آبیاری بود.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱	نتیجه‌گیری: در راستای هدف اصلی این پژوهش، نتیجه کاربردی به‌دست‌آمده عبارت است از تعیین دقیق درصد مقادیر آب سطحی تحویل داده شده و بازه تغییرات مشخص آن‌ها به هر کدام از ۱۶۳ آبگیر واقع در شبکه، تحت سناریوهای مختلف تأمین آب در بند انحرافی.

استناد: جمالی، رضا؛ مشعل، محمود؛ هاشمی شاهدانی، سید مهدی؛ سلطانی، جابر. تحلیل اثر خودکار سازی بهره‌برداری مبتنی بر روش کنترل متمرکز MPC بر کفایت و پایداری توزیع حقابه‌های کشاورزی در شرایط عدم قطعیت در تخصیص آب سطحی. *اکوهیدرولوژی*، ۱۲(۳)، ۹۲۷-۹۴۴.

<http://doi.org/10.22059/IJE.2025.405571.1894>



ناشر: انتشارات دانشگاه تهران. © رضا جمالی، محمود مشعل، سید مهدی هاشمی شاهدانی، جابر سلطانی.

مقدمه

در شرایط اقلیمی خشک و نیمه خشک ایران، شبکه‌های آبیاری به عنوان زیرساخت‌های کلیدی در توزیع آب سطحی در بخش کشاورزی، نقشی حیاتی در پایداری تولیدات زراعی ایفا می‌کنند. این شبکه‌ها که متشکل از سامانه‌های تأمین، انتقال و توزیع آب هستند، با هدف بهره‌برداری بهینه از منابع محدود آب و خاک طراحی و اجرا شده‌اند. با این حال، شواهد میدانی و مطالعات موردی متعدد نشان می‌دهند که عملکرد بهره‌برداری این سامانه‌ها، به‌ویژه در بخش توزیع و تحویل آب سطحی، با چالش‌هایی جدی مواجه است (کاماچو^۱ و همکاران، ۲۰۲۵). افزایش چشمگیر مجوزهای حفر چاه‌های جدید و کف‌کنی چاه‌های موجود در محدوده شبکه‌های آبیاری را صرفاً می‌توان بر پایه عملکرد نامطلوب و ناپایدار توزیع آب سطحی توسط سامانه‌های بهره‌برداری توجیه نمود. روش‌های رایج بهره‌برداری در شبکه‌های آبیاری کشور عمدتاً مبتنی بر تنظیمات دستی سازه‌های هیدرولیکی توسط اپراتورها هستند. این رویکرد که وابستگی زیادی به تجربه و حضور انسانی دارد، در بسیاری از موارد منجر به ناپایداری و عدم یکنواختی در توزیع و کاهش اعتماد حقابه‌بران به عملکرد این سامانه‌های توزیع شده است. تشدید خشکسالی‌های متوالی، افزایش رقابت بین بخش‌های مختلف مصرف آب، و فشار مضاعف بر منابع سطحی، این نارسایی‌ها را بیش از پیش نمایان ساخته است (هوش پژوهی طبیعت ۲۰۲۴).

در پاسخ به این چالش‌ها، توسعه و به‌کارگیری سامانه‌های کنترل خودکار پیش‌بین (MPC^۲) به عنوان راهکاری نوین در مدیریت بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری مطرح شده است. این سامانه‌ها با بهره‌گیری از ترکیب کنترلرهای پیش‌خور و پس‌خور، مدل‌سازی داخلی سامانه توزیع، به‌کارگیری داده‌های بلادرنگ و پیش‌بینی کوتاه‌مدت و بلندمدت تغییرات در سامانه تحت کنترل، امکان تنظیم بهینه تحویل آب و افزایش کارایی توزیع را فراهم می‌سازند (فله^۳ و همکاران، ۲۰۲۵). توسعه این روش خودکارسازی در کنار سایر روش‌های کنترل خودکار توسط محققان دانشگاهی در کشور انجام شده و دامنه وسیعی از روش‌های کنترل خودکار توسعه و ارزیابی شده‌اند. با این حال، تمرکز این‌گونه مطالعات بر توانایی‌های کنترلی این سامانه‌ها بوده و خلأ مطالعاتی در این زمینه عدم تحلیل اثر به‌کارگیری این سامانه‌ها بر جامعه هدف نهایی (حقابه‌بران) است.

در این راستا، نوآوری این مقاله برآورد دقیق درصد تأمین حقابه تمام ذی‌نفعان واقع در شبکه تحت شرایط عدم قطعیت در تخصیص آب سطحی به شبکه آبیاری است. شبکه آبیاری نکوآباد اصفهان، به عنوان یکی از شبکه‌های مهم و راهبردی کشور، با ویژگی‌های خاص هیدرولیکی و بهره‌برداری، برای نمونه مطالعاتی انتخاب شده است. بر این اساس، اهداف پژوهش مذکور عبارت است از تحلیل اثر پدیده خودکارسازی سامانه توزیع آب سطحی بر پایه تحلیل آماری مکانی کفایت و پایداری توزیع آب تحت سناریوهای مختلف تأمین آب سطحی در محل بند انحرافی. نتایج این پژوهش امکان پیاده‌سازی چارچوب‌های ارزیابی جامع مانند چارچوب ارزیابی پایداری سامانه‌های بهره‌برداری منطبق بر پیوند آب-غذا-انرژی را مهیا می‌سازد. این مهم بدون تدقیق سهم واقعی منابع آب سطحی در فعالیت روزمره کشاورزی ذی‌نفعان منجر به ارزیابی‌های غیراصولی و همراه با عدم قطعیت قابل توجه خواهد شد.

پیشینه پژوهش

در دهه‌های اخیر، با تشدید نوسانات تأمین آب ناشی از تغییرات اقلیمی، بهره‌برداری مؤثر از شبکه‌های آبیاری به یکی از چالش‌های راهبردی در مدیریت منابع آب کشاورزی تبدیل شده است. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که سامانه‌های بهره‌برداری دستی، به‌ویژه در شرایط کم‌آبی، عملکردی ناکافی در تأمین پایدار، عادلانه و قابل اعتماد آب سطحی برای بهره‌برداران دارند و منجر به افزایش وابستگی به منابع آب زیرزمینی شده‌اند (بیات، روزبهانی و شاهدانی، ۱۴۰۱). در پاسخ به این چالش‌ها، رویکردهای نوین مبتنی بر خودکارسازی سامانه بهره‌برداری کانال‌های آبیاری به عنوان راهکارهایی مؤثر برای ارتقای عملکرد سامانه‌های بهره‌برداری مطرح شده‌اند. دامنه وسیعی از روش‌های کنترل خودکار شامل کنترلگرهای کلاسیک غیرمتمرکز (ژو^۴ و همکاران، ۲۰۲۵)، متمرکز مدرن

1. Camacho
2. Model Predictive Control
3. Fele
4. Zhou

(رنجبر، قاسمی و شاهدانی، ۱۴۰۴) کنترلگرهای فازی (وانگ^۱ و همکاران، ۲۰۲۵) و کنترلگرهای بر پایه یادگیری ماشین (شاهوردی، ۲۰۲۲) به کار گرفته شده است. در این میان توسعه روش‌های بهره‌برداری خودکار بر پایه روش متمرکز پیش‌بین (MPC) با توجه به قابلیت‌های متنوع و قوی خود در طرح‌های مختلف خودکارسازی در سراسر دنیا به کار گرفته شده است. تلفیق به‌کارگیری ربات‌های اندازه‌گیری متحرک با MPC با هدف امکان تنظیم دقیق جریان در کانال‌ها را در مواجهه با عدم قطعیت‌های تأمین آب (رنجبر، قاسمی و شاهدانی، ۱۴۰۴)، ارتقای پیش‌بینی‌های کوتاه تا درازمدت سامانه بهره‌برداری با به‌کارگیری مدل‌های غیرخطی پیش‌بینی و با هدف تدقیق تنظیمات دریچه‌های تنظیم سطح آب در کانال‌های اصلی تحت عدم قطعیت ناشی از برآورد مقادیر دقیق نیاز آبی حقابه‌بران (کنگ^۲ و همکاران، ۲۰۲۴)، توسعه کنترلگرهای MPC یکپارچه جهت خودکارسازی کانال‌های فرعی متعدد متصل به کانال اصلی آبیاری در شبکه‌های آبیاری بزرگ‌مقیاس (ژو، گان و وانگ، ۲۰۲۳) برخی از جدیدترین کاربردهای این سامانه بهره‌برداری خودکار به شمار می‌رود.

به موازات توسعه روش‌های مختلف خودکارسازی در مدرن‌سازی بهره‌برداری در شبکه‌های آبیاری، تحقیقاتی با هدف ارزیابی عملکرد این سامانه‌ها با هدف تعیین میزان کارایی آن‌ها صورت گرفته است. در این مورد، آیسواریا، سورش و کومار^۴ (۲۰۲۴) نقش خودکارسازی بهره‌برداری در افزایش قابلیت اطمینان تحویل آب و کاهش تلفات در شبکه‌های آبیاری را بررسی کرده‌اند. در مطالعه‌ای دیگر، نیگام، شارما و ورما^۵ (۲۰۲۳) با بهره‌گیری از تحلیل پوششی داده‌ها (DEA)، عملکرد سامانه بهره‌برداری در شبکه‌های آبیاری را از منظر بهره‌وری و پایداری ارزیابی کرده‌اند. راجاپوت، تیواری و دشموخ^۶ (۲۰۲۵) نیز در یک مرور نظام‌مند، تلفیق روش‌های فنی، سنجش از دور و هوش مصنوعی برای ارزیابی جامع عملکرد شبکه‌های آبیاری در شرایط اقلیمی متغیر را بررسی نموده‌اند. حسینی، جلفان و روزبهانی (۱۳۹۷) اقدام به بررسی زیست‌محیطی پیاده‌سازی سامانه‌های کنترل خودکار متمرکز و غیرمتمرکز بر کاهش برداشت از آبخوان، مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای نمودند. بیات، روزبهانی و شاهدانی (۱۴۰۱) با استفاده از روش AHP-Entropy-WASPAS، سه روش بهره‌برداری دستی و خودکار بر پایه ارزیابی یکپارچه مبتنی بر پیوند آب-غذا-انرژی مورد ارزیابی مکانی قرار دادند. بررسی پیشینه تحقیق در این زمینه، که موارد جدید آن در بالا اشاره شد، حاکی از ارزیابی‌های عمدتاً فنی (با ماهیت ارزیابی عملکرد کنترلگرها) و گاهی منطقه‌ای (با تمرکز بر کفایت و عدالت توزیع آب بین ذی‌نفعان) است. خلأ مطالعاتی در این زمینه، همان‌طور که در بخش مقدمه نیز اشاره شد، عدم بررسی و تحلیل اثر خودکارسازی بر دامنه تغییرات سهم منابع آب سطحی - قبل و بعد از خودکارسازی - به تفکیک همه ذی‌نفعان و تحت شرایط دسته‌بندی‌شده عدم قطعیت در تأمین آب سطحی در محل ورودی شبکه‌های آبیاری است. بنابراین، به‌رغم بررسی‌های فنی متعدد سامانه‌های کنترل خودکار، ردپای پیاده‌سازی به تفکیک همه ذی‌نفعان مورد بررسی قرار نگرفته است.

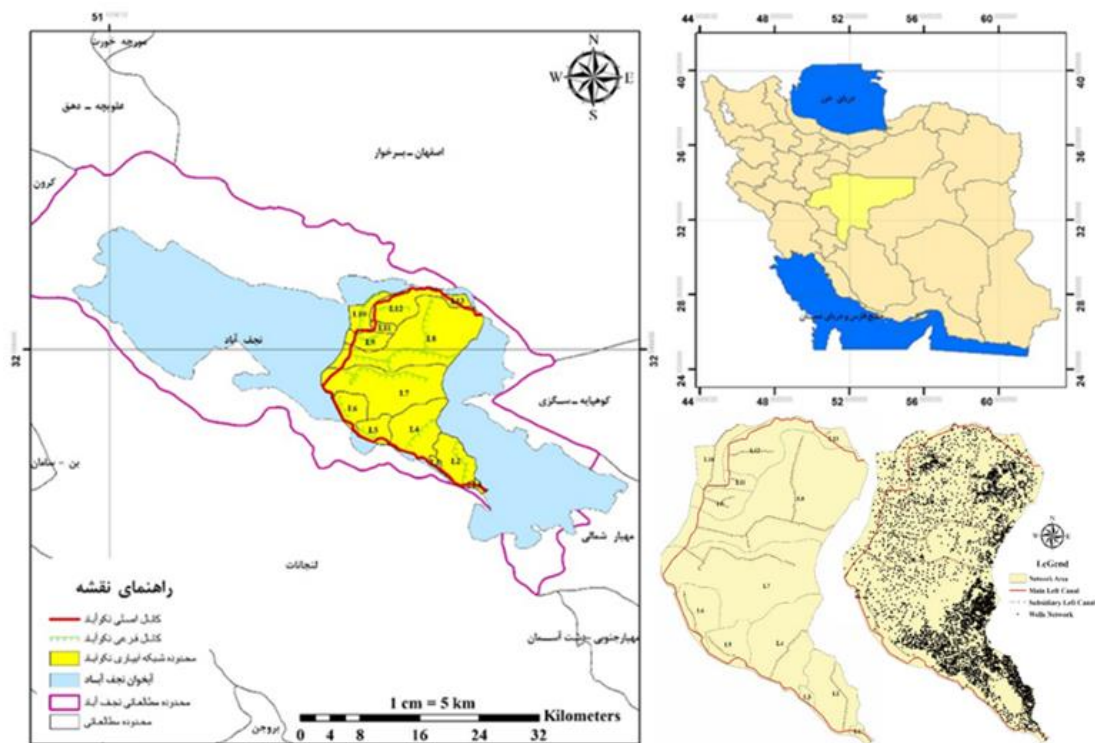
روش‌شناسی پژوهش

شبکه آبیاری نکوآباد

شبکه آبیاری نکوآباد در حوضه آبریز زاینده‌رود و در منطقه مرکزی ایران واقع شده است. این شبکه با مساحت حدود ۲۹۰۰۰ هکتار اراضی تحت آبیاری، بین عرض‌های جغرافیایی ۳۱:۴۶ تا ۳۲:۲۳ شمالی و طول‌های ۵۱:۲۱ تا ۵۱:۴۲ شرقی قرار دارد و شکل (۱) موقعیت قرارگیری شبکه در مرکز ایران و همچنین جانمایی کانال‌های آبیاری و چاه‌های آب موجود را نمایش می‌دهد. منبع اصلی تأمین آب شبکه، آب رهاسازی‌شده از سد زاینده‌رود است. در محل بند انحرافی نکوآباد، دو کانال اصلی چپ و راست برای برداشت آب طراحی شده‌اند. کنترل سطح آب در این شبکه به‌صورت بالادستی و با استفاده از ۵۰ سازه خودکار آمیل و یک سازه ثابت Duck-Bill انجام می‌شود. تحویل آب در طول شبکه از طریق ۱۳ سازه آبگیر در کانال‌های درجه‌یک و ۱۵۰ سازه در کانال‌های

1. Wang
2. Kong
3. Zhu, Guan & Wang
4. Aiswarya
5. Nigam, Sharma & Verma
6. Rajaput, Tiwari & Deshmukh

درجه دو (درمجموع ۱۶۳ آبگیر) صورت می گیرد که تنظیم آن ها به صورت دستی توسط اپراتورها انجام می شود. داده های مورد استفاده در این پژوهش عبارت اند از داده های حقایق مشخص هر کدام از ۱۶۳ آبگیر، اطلاعات سازه های شبکه شامل محل، نوع و ظرفیت سازه های آبگیر و تنظیم سطح آب که در قالب فایل ArcGIS شبکه تهیه شد و داده های تأمین آب سطحی در محل بند انحرافی شبکه که از دفتر بهره برداری شرکت مدیریت منابع آب ایران دریافت شدند.



شکل ۱. موقعیت قرارگیری شبکه آبیاری نکوآباد در مرکز ایران و جانمایی کانال های آبیاری و چاه های آب حفر شده در محدوده شبکه

شبیه سازی فرایند توزیع آب سطحی در شبکه آبیاری نکوآباد

برای ارزیابی عملکرد سامانه بهره برداری دستی شبکه آبیاری نکوآباد، شبیه سازی جریان هیدرولیکی در کانال های اصلی و فرعی ضروری است. در این پژوهش، از مدل ریاضی انتگرالی-تأخیری (ID) در محیط Python به عنوان مدل شبیه سازی هیدرولیک جریان استفاده شد. روش بهره برداری دستی (روش موجود- پایه) در قالب تنظیمات روزانه و متأثر از دستورالعمل های بهره برداری دستی این شبکه کدنویسی شد و با مدل ID توسعه داده شد تا امکان ارتباط با برنامه زمان بندی باز و بسته شدن دریچه های آبگیر فراهم گردد. در مدل انتگرالی-تأخیری (ID)، هر بازه از کانال اصلی به دو بخش تقسیم می شود: جریان یکنواخت و منحنی برگشت آب. این دو بخش به ترتیب با دو پارامتر کلیدی مشخص می شوند: زمان تأخیر (τ) و سطح ذخیره (A_s). زمان تأخیر ناشی از این موج، به بخش دوم منتقل شده و موجب تغییر تراز سطح آب می شود. معادله حاکم بر این بخش به صورت رابطه (۱) تعریف می شود:

$$q_{canal}(t) = q_{in}(t - \tau) \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن، q_{in} دبی ورودی به بخش یکنواخت جریان (m^3/s)، q_{canal} دبی ورودی به بخش ذخیره (m^3/s)، t زمان (sec) و τ زمان تأخیر (sec) است. بخش منحنی برگشت آب به عنوان بخش انتگرالی مدل، عملکردی مشابه یک مخزن دارد و تغییرات سطح آب را در پاسخ به دبی های ورودی و خروجی بازه کانال شبیه سازی می کند. در این بخش، تغییرات عمق آب $h(t)$ براساس مساحت سطح ذخیره (A_s) و اختلاف بین دبی ورودی و خروجی، مدل سازی می شود. این رابطه در حوزه زمان و فرکانس به صورت رابطه (۲) بیان می گردد:

$$A_s \cdot \frac{dh(t)}{dt} = q_{canal}(t) - q_{out}(t)$$

$$A_s \cdot s \cdot h(s) = q_{canal}(s) - q_{out}(s) \Leftrightarrow h(s) = \frac{1}{A_s \cdot s} \cdot [q_{canal}(s) - q_{out}(s)] \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن، A_s مساحت سطح ذخیره (m^2) ، h عمق آب (m) و q_{out} دبی خروجی از بخش منحنی برگشت آب (m^3/s) است. برای یک بازه از کانال که شامل بخش‌های جریان یکنواخت و منحنی برگشت آب است، مدل کاملی از تلفیق معادلات ارائه شده در بخش‌های قبلی به دست می‌آید. فرایند واسنجی و صحت‌سنجی مدل شبیه‌ساز انتگرالی-تأخیری (ID) بر پایه داده‌های اندازه‌گیری شده توسط شرکت آب منطقه‌ای اصفهان انجام گرفت. این داده‌ها مربوط به ده دوره بهره‌برداری در حداث سال‌های آبی ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲ بوده‌اند. در مرحله واسنجی، ضریب دبی عبوری از سازه‌های آبگیر به‌عنوان پارامترهای قابل تنظیم در نظر گرفته شد تا خروجی مدل با داده‌های واقعی تطابق یابد. پس از تنظیم این پارامترها، صحت‌سنجی مدل اجرا شد.

شبیه‌سازی خودکار سازی بهره‌برداری با استفاده از مدل توسعه داده شده بر پایه روش کنترل متمرکز MPC، در محیط Python و تلفیق شده با مدل ID انجام شد. تابع هدف (J) این روش کنترل متمرکز بهینه، مطابق افق پیش‌بینی (n گام زمانی) و تعداد m بازه کانال، به فرم رابطه (۳) است:

$$\min J = \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^m \{e_j(k+i|k) \cdot Q_{e,j} \cdot e_j(k+i|k)\} + \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=1}^1 \{\Delta u_j(k+i|k) \cdot R_{\Delta u,j} \cdot \Delta u_j(k+i|k)\} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این رابطه، e_j انحراف سطح آب از سطح آب هدف در بازه j و $Q_{e,j}$ ماتریس هزینه‌های (وزن‌ها) متغیرهای وضعیت است. Δu_j تغییر در میزان دبی عبوری از سازه تنظیم j و $R_{\Delta u,j}$ ماتریس هزینه‌های (وزن‌ها) متغیر کنترل شونده است. ارزیابی عملکرد سامانه بهره‌برداری از منظر کفایت و پایداری توزیع آب سطحی، که با تحلیل مکانی این دو شاخص، میزان اعتمادپذیری توزیع آب بررسی شده، به ترتیب مطابق رابطه‌های (۴) و (۵) محاسبه شده است:

$$PA = \frac{1}{T} \sum_T \left[\frac{1}{R} \sum_R \left(\frac{Q_D}{Q_R} \right) \right] \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$PD = \frac{1}{R} \sum_R CV_T \left(\frac{Q_D}{Q_R} \right) \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در آن، PA شاخص کفایت توزیع آب (درصد)، T مدت زمان بهره‌برداری (sec)، R تعداد کل آبیگری‌های واقع در کانال اصلی، Q_D دبی تحویلی به هر آبگیر (m^3/s) و Q_R دبی تقاضای آب کشاورزی (m^3/s) و PD شاخص پایداری توزیع آب (درصد) است.

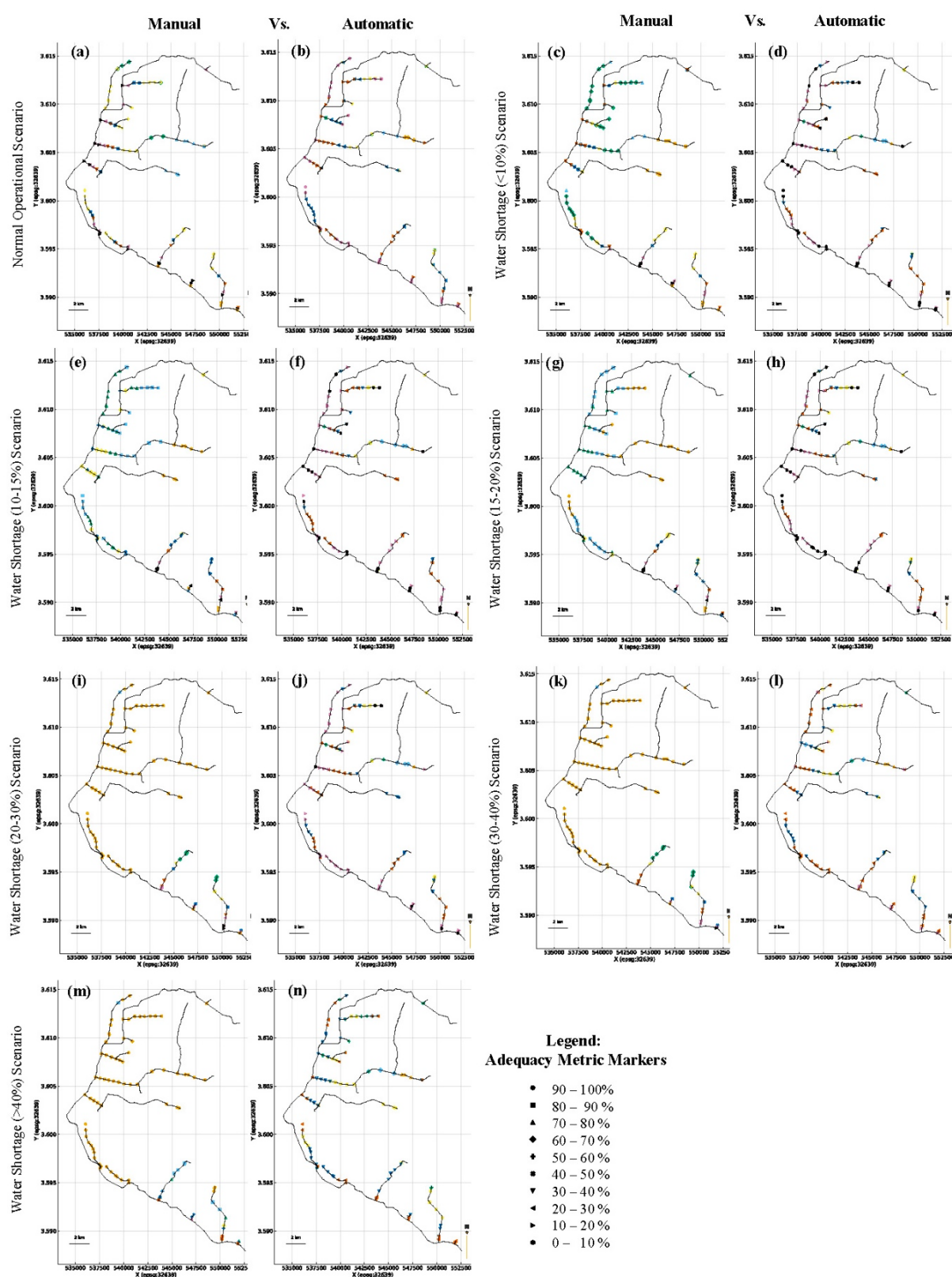
یافته‌های پژوهش

نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی به این صورت خلاصه می‌شود که مقدار میانگین خطای مطلق (MAE)، برای دوره واسنجی برابر $0/009$ و برای دوره صحت‌سنجی $0/014$ متر مکعب بر ثانیه است. مقدار بهینه این شاخص برابر صفر است و با توجه به اینکه مقادیر مذکور به مقدار بهینه نزدیک‌اند، می‌توان نتیجه گرفت که مدل دقت مناسبی ارائه می‌کند. شاخص ضریب خطای پسماند (CRM)، برای دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی، به ترتیب برابر $-0/014$ و $-0/021$ هستند و با توجه به اینکه بهترین میزان برای CRM صفر است، مقادیر کم این شاخص حاکی از دقت قابل قبول مدل در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی است. در نهایت، میزان ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، برای دوره واسنجی برابر $0/011$ و برای دوره صحت‌سنجی $0/017$ به دست آمدند. مقادیر مناسب این شاخص نیز دقت مدل را مورد تأیید قرار می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی بهره‌برداری و ارزیابی نحوه توزیع آب سطحی بین ۱۶۳ آب‌بر واقع در شبکه آبیاری نکوآباد در ادامه این بخش ارائه شده است.

شکل ۲، توزیع مکانی متوسط شاخص کفایت توزیع آب سطحی را برای دو سامانه بهره‌برداری دستی و خودکار MPC در هفت سناریوی مختلف تأمین آب در شرایط عادی (بدون کم‌آبی)، و شش سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی (مشمول بر سناریوهای $WS < 10\%$ ، $WS 10-15\%$ ، $WS 15-20\%$ ، $WS 20-30\%$ ، $WS 30-40\%$ ، $WS > 40\%$) به تصویر می‌کشد. در هر پنل از این شکل، موقعیت آبگیرها (Off-take) براساس طبقه‌بندی ده‌گانه، مقدار شاخص کفایت (از صفر بدترین تا ۱۰۰ بهترین عملکرد) نمایش داده شده است که امکان مقایسه مستقیم سطح خدمت‌رسانی و میزان افت آن بر اثر افزایش شدت کم‌آبی را فراهم می‌سازد. از نقطه نظر برابری پایه و واگرایی اولیه در شرایط عادی (بدون هیچ گونه علائم کم‌آبی در محل بند انحرافی)، هر دو سامانه در سراسر شبکه از سطح مناسبی از کفایت برخوردارند و نقاط آبیگری بیشتری در طبقات بالاتر شاخص $70-80$ تجمع دارند. با بروز نخستین کمبود در سامانه تأمین آب سطحی در محل بند انحرافی ($WS < 10\%$)، سامانه MPC شروع به تفکیک از سامانه دستی می‌کند و بخش بزرگ‌تری از نقاط در طبقات بالا ($80 \leq$) باقی می‌مانند، درحالی که سامانه دستی دچار افت اولیه و تمرکز بیشتر در

طبقات ۶۰-۸۰ درصد می‌شود. این افزایش فشار و گسترش فاصله عملکردی در سناریوهای WS 10-15% و WS 15-20% الگوی کفایت در سامانه دستی پراکنده‌تر می‌شود. نواحی میانی و انتهایی کانال افزایش محسوسی در طبقات میانی/پایین (≥ 60) نشان می‌دهند که بیانگر دشواری در حفظ دبی هدف تحویلی بر اثر پیچیدگی شرایط تلفات است. درمقابل، سامانه MPC با اتکا به کنترل بازخوردی و پیش‌بینی‌کننده، سهم بیشتری از نقاط با کفایت ($\leq 70-80$) را حفظ می‌کند. این اختلاف به‌صورت بصری آشکار می‌شود، زیرا بخش بیشتری از نمادهای آن در طبقات بالاتر باقی می‌مانند. سامانه دستی افتی غیرخطی را در کم‌آبی‌های متوسط تا شدید در سناریوهای WS 20-30% و WS 30-40% تجربه می‌کند و بسیاری از آبیگرها از طبقه (≤ 70) خارج شده و به طبقات ۴۰-۶۰ و حتی ≥ 40 منتقل می‌شوند. درحالی‌که MPC نیز افت دارد، اما این افت ملایم‌تر است و بخش وسیع‌تری را در بازه ۶۰-۸۰ نگه می‌دارد و نقاط با مقادیر متوسط شاخص کفایت بسیار پایین در آن بسیار کمتر است. این امر نشان‌دهنده توانایی MPC در تخصیص مجدد و کاهش انتشار اختلالات در طول مسیر است. مرز کم‌آبی شدید در سناریوی WS > 40% بسیار مشهود است و هر دو سامانه تحت فشار شدید قرار دارند. باین‌حال، نقشه‌های سامانه دستی تجمع بیشتری را در طبقات ≥ 50 نشان می‌دهند. سامانه MPC همچنان توانسته است بخش نسبتاً بیشتری از نقاط را بالاتر از این آستانه نگه دارد که نشانگر تاب‌آوری عملکردی بیشتر آن است. در همه سناریوها، شیب سر تا انتهای کانال در بهره‌برداری دستی واضح‌تر است و نواحی انتهایی زودتر و شدیدتر از شرایط مشابه در سامانه بهره‌برداری خودکار افت می‌کنند. این گرادیان را تاحدی هموار می‌سازد، زیرا با ترکیب دو فرایند پیش‌بینی و بازخورد در سامانه MPC، توزیع مکانی کفایت را یکنواخت‌تر کرده و تحت کم‌آبی مشابه، عملکردی متعادل‌تر ارائه می‌دهد. شکل ۳ نیز به‌طور مشابه با شکل ۲، تغییرات مکانی شاخص پایداری توزیع آب سطحی را به تفکیک دو سامانه‌های بهره‌برداری دستی و خودکار MPC در سراسر شبکه آبیاری، تحت سناریوهای نرمال و کم‌آبی نشان می‌دهد. در هر جفت پنل (دستی در برابر خودکار)، موقعیت آبیگرها براساس طبقه‌بندی ده‌گانه مقدار شاخص پایداری (از صفر بهترین تا ۱۰۰ بدترین عملکرد) نمایش داده شده است تا نشان دهد هر سامانه تا چه اندازه می‌تواند جریان تحویلی را نسبت به مقدار هدف در مواجهه با کاهش منابع آبی حفظ کند.

با استفاده از خروجی‌های آماری به تفکیک هر سناریو، سامانه MPC میانگین پایداری (یعنی ناپایداری جریان) را به‌طور میانگین به میزان ۳۸/۷۲ درصد کاهش داده و دامنه کاهش از ۱۵/۴۶ (در شرایط عادی) تا ۵۰/۵۸ در سناریوی کم‌آبی شدید متغیر است. همچنین، مقدار میانه نیز به‌طور میانگین ۴۴/۵۵ درصد بهبود یافته است که نشان می‌دهد نه تنها مقادیر حدی بلکه بخش اعظم آبیگرها عملکردی باثبات‌تر در حالت MPC دارند. در این میان، سهم پایداری پایین (در سناریوی کم‌آبی شدید) که بیانگر مطمئن‌ترین تحویل جریان است، به‌طور میانگین ۶۲/۸۳ درصد افزایش یافته است، که نشان‌دهنده انتقال بخش عمده شبکه به محدوده با قابلیت اطمینان بالاست. همچنین تحلیل آماری نتایج نشان داد که تجمع نتایج با مقدار پایداری بالا که بیانگر تحویل‌های ناپایدار است، ۵۵/۶۶ درصد کاهش یافته، که تأییدی بر حذف عمده نقاط مستعد شکست در سامانه MPC است. همچنین ضریب تغییرات متوسط شاخص پایداری نشان داد که پس از خودکارسازی سامانه بهره‌برداری شبکه آبیاری نکوآباد، این ضریب به‌طور میانگین ۰/۶۸ کاهش یافته و نشان می‌دهد پایداری در سراسر شبکه یکنواخت‌تر و قابل پیش‌بینی‌تر شده است. مطابق شکل ۲، تحت سناریوی نرمال، هر دو سامانه در مجموع دارای مقادیر پایداری پایین (یعنی عملکرد پایدار) هستند. باین‌حال، MPC متوسط مکانی میانگین پایداری را حدود ۱۵ درصد کاهش داده و ناپایداری‌های محلی جزئی در برخی آبیگرهای انتهایی را تقریباً حذف کرده است. با آغاز کمبودهای ملایم، بهره‌برداری دستی گرادیان واضحی از سر تا انتهای کانال نشان می‌دهد، نواحی انتهایی ۴۰ تا ۶۰ درصد افزایش می‌یابند، درحالی‌که نواحی ابتدایی زیر ۲۰ درصد باقی می‌مانند. درمقابل، MPC پایداری را برای اکثر آبیگرها زیر ۳۰ درصد حفظ کرده و نوسان مکانی را تقریباً به نصف کاهش می‌دهد. در سناریوهای کم‌آبی متوسط، اختلافات تشدید می‌شوند. در سامانه دستی، پایداری بسیاری از کانال‌های فرعی در بازه غیرپایدار ۶۰ تا ۸۰ درصد قرار می‌گیرد، درحالی‌که در MPC اغلب در محدوده ۲۰ تا ۴۰ درصد باقی می‌مانند. این نقطه همان‌جایی است که کنترل بازخوردی MPC آغاز به مهار انتشار نوسانات بالادست می‌کند. در شرایط خشکسالی شدید، نقشه‌های سامانه دستی تحت سلطه مقادیر بالای غیرقابل قبول پایداری (بیش از ۸۰ درصد) هستند، که نشانگر تحویل ناپایدار آب است. در مقابل در سامانه MPC هنوز تقریباً در تمام آبیگرهای شبکه متوسط شاخص پایداری زیر ۵۰ درصد حفظ شده است، به این معنا که بخش اعظم شبکه فقط در حالت MPC در محدوده پایداری قابل قبول باقی می‌ماند.

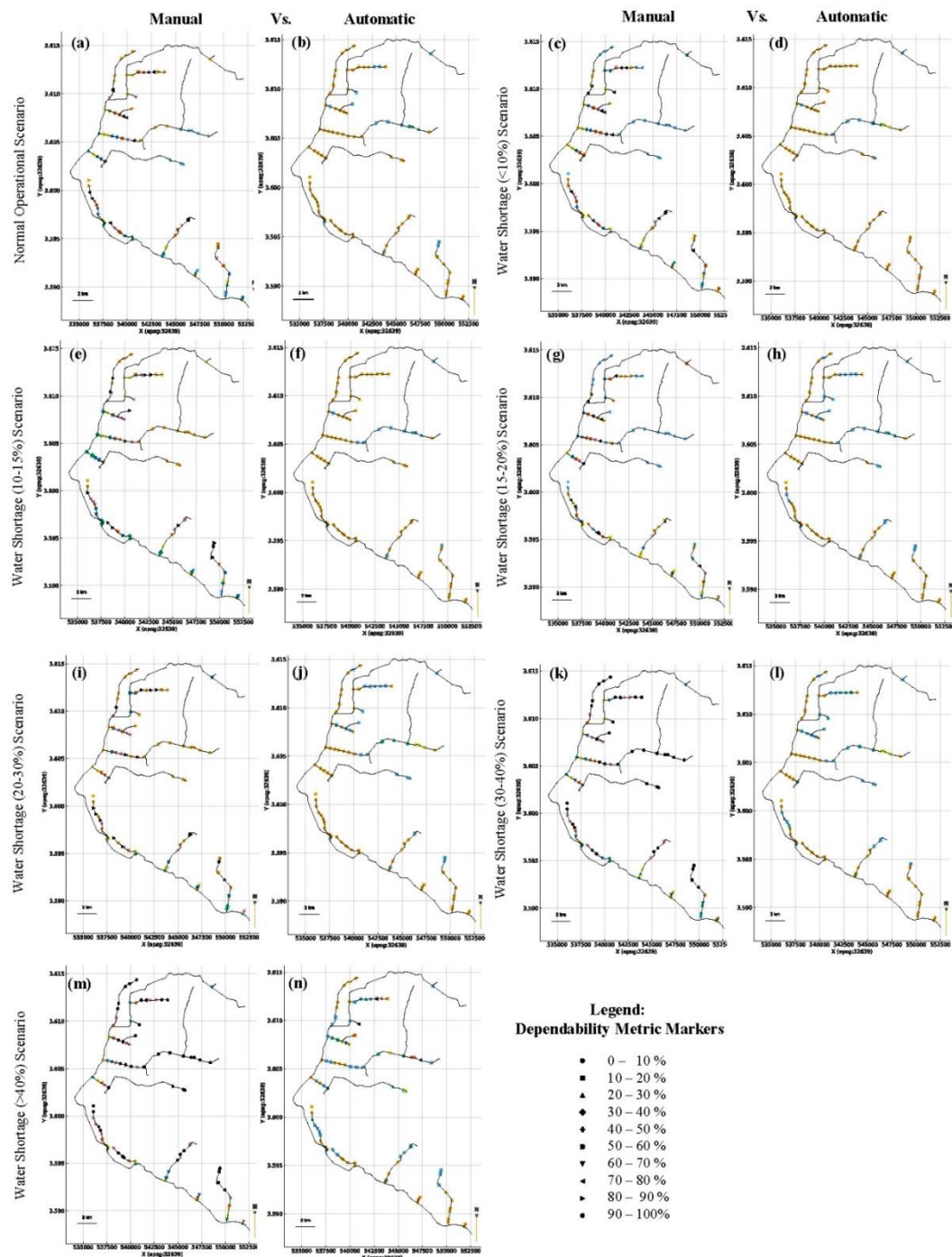


شکل ۲. مقایسه متوسط شاخص کفایت توزیع آب سطحی در هفت سناریوی بهره‌برداری نرمال تا کم‌آبی شدید در روش بهره‌برداری دستی و بهره‌برداری با استفاده از سامانه کنترل خودکار MPC

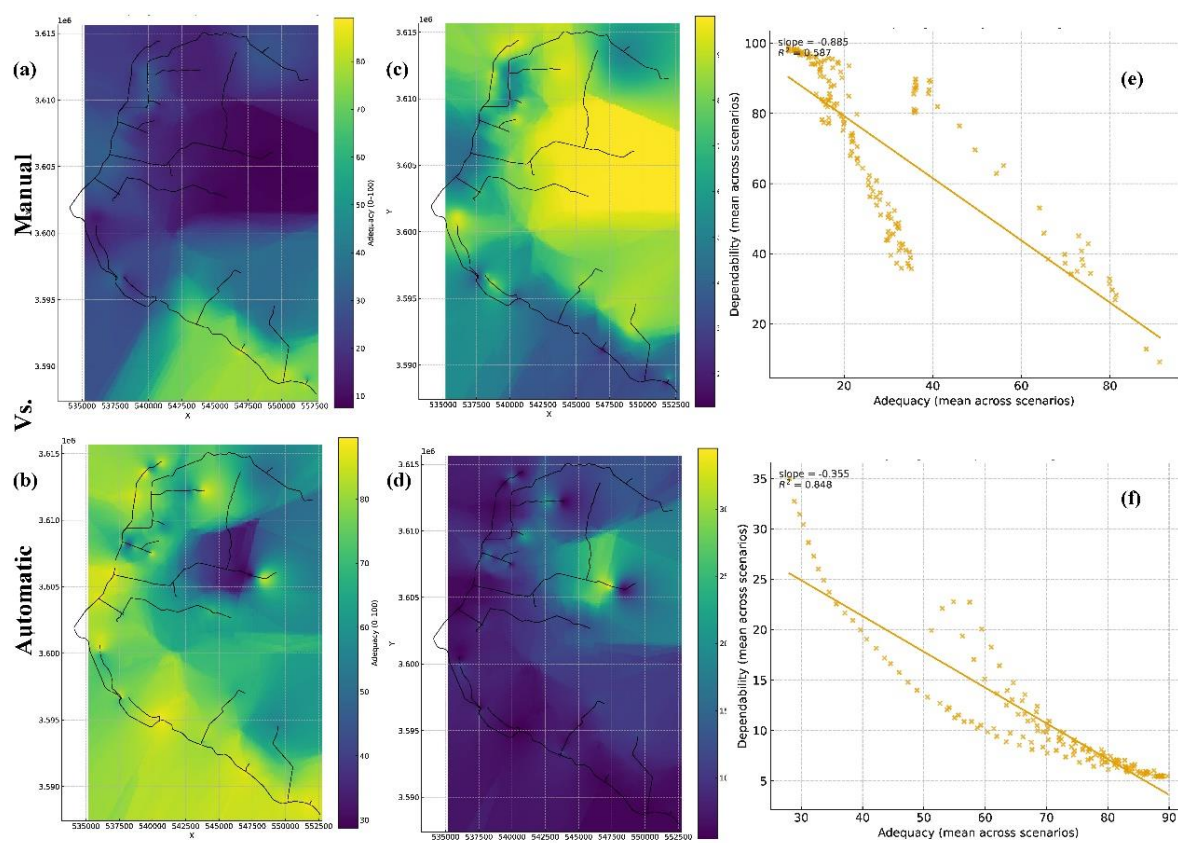
در راستای تحقق هدف اصلی این پژوهش، تدقیق سهم آب سطحی در تأمین حقابه مشخص ۱۶۳ واحد کشاورزی واقع در شبکه آبیاری نکوآباد، لازم است همبستگی مکانی دو شاخص ارزیابی عملکرد کفایت و پایداری مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. بر این اساس، نتایج همبستگی مکانی دو شاخص ارزیابی عملکرد کفایت و پایداری در دو روش بهره‌برداری دستی و خودکار MPC در شکل ۴ ارائه شد. این شکل الگوهای مکانی و همبستگی دو شاخص کلیدی عملکرد کفایت در بازه ۰ تا ۱۰۰ (هرچه بیشتر عملکرد بهتر) و پایداری در بازه ۰ تا ۱۰۰ (هرچه کمتر عملکرد بهتر) را برای دو سامانه بهره‌برداری دستی و خودکار MPC نمایش می‌دهد. در پل‌های (a) و (b) نقشه‌های حرارتی کفایت، و در پل‌های (c) و (d) نقشه‌های حرارتی پایداری برای همان منطقه آبیاری نمایش داده شده‌اند. پل‌های (e) و (f) نمودارهای پراکنش بین پایداری و کفایت را همراه با خطوط رگرسیون و آماره‌های همبستگی نشان می‌دهند که بیانگر شدت و جهت رابطه بین این دو شاخص است. در مجموع، این زیرشکل‌ها نشان می‌دهند که سامانه خودکار MPC نه تنها سطح کفایت را افزایش می‌دهد، بلکه ثبات عملکرد (پایداری پایین‌تر) را نیز از نظر مکانی و آماری بهبود می‌بخشد. در بهره‌برداری دستی، الگوی مکانی کفایت (زیر شکل a) میانگین‌های متوسطی در حدود ۴۰ تا ۷۰ درصد نشان می‌دهد با وجود گرادبان مشخص از سر تا انتهای کانال، نواحی ابتدایی دارای کفایت بالاتر و نواحی انتهایی غالباً با مقادیر زیر ۵۰ درصد مشخص شده‌اند. پایداری (زیر شکل c) الگوی معکوسی دارد؛ در نواحی انتهایی و آبگیرهای میانی مقادیر بالا (۷۰-۹۰ درصد) دیده می‌شود که بیانگر ناپایداری زمانی شدید در تحویل آب است. در بهره‌برداری خودکار کفایت (زیر شکل b) به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته و در محدوده ۶۰ تا ۹۰ درصد قرار دارد، درحالی‌که توزیع مکانی آن بسیار یکنواخت‌تر شده است، به‌ویژه در کانال‌های فرعی که پیش‌تر عملکرد ضعیفی داشتند.

پایداری (زیر شکل d) در سراسر منطقه به‌شدت کاهش یافته و عموماً در بازه ۱۰ تا ۳۰ درصد قرار دارد که بیانگر تحویل بسیار پایدارتر است. تفاوت مکانی میان دو سامانه بازتاب مستقیم وجود کنترل بازخوردی و تنظیمات پیش‌نگرانه در MPC است که کمبودهای موضعی و نوسانات جریان را به حداقل می‌رساند. جمع‌بندی تفسیر کمی از میانگین‌ها و توزیع‌های مکانی به این صورت است که میانگین کفایت از حدود ۴۷/۸ درصد (دستی) به ۸۸/۶ درصد (MPC) افزایش یافته، میانگین پایداری از ۷۳/۱ درصد (دستی) به ۳۴/۴ درصد (MPC) کاهش یافته و ضریب تغییرات از ۰/۸۹ به ۰/۴۲ رسیده است، که نشانگر افزایش یکنواختی و ثبات عملکرد در بهره‌برداری خودکار است. از نقطه‌نظر همبستگی بین کفایت و پایداری (زیر شکل‌های e-f) نمودارهای پراکنش بیان می‌کنند که چگونه افزایش کفایت با کاهش پایداری (یعنی ثبات بیشتر) همراه است. در سامانه دستی (زیر شکل e) شیب رگرسیون $-0/8848$ و مقدار $R^2 = 0.9587$ است که بیانگر رابطه معکوس بسیار قوی میان دو شاخص است، به‌نحوی که با افزایش کفایت، پایداری به‌طور تند کاهش می‌یابد. اما مقدار بالای شیب نشان‌دهنده حساسیت زیاد سیستم است، به‌طوری‌که حتی کاهش اندک در کفایت منجر به افزایش سریع ناپایداری می‌شود. این شیب تند، مشخصه سامانه‌ای شکننده است که عملکرد بهره‌برداری آن در برابر تنش آبی به‌سرعت افت می‌کند. در سوی مقابل، در سامانه خودکار (زیر شکل f) شیب به $-0/355$ و مقدار $R^2 = 0.8848$ است، هنوز رابطه قوی باقی مانده، اما با شیب ملایم‌تر که این موضوع بیانگر ارتباطی مقاوم‌تر میان کفایت و پایداری است. به عبارت ساده‌تر، کاهش‌های جزئی در کفایت دیگر موجب افزایش‌های بزرگ در ناپایداری نمی‌شوند. شیب کمتر به این معناست که بهره‌برداری خودکار MPC تا حدی دو شاخص را از هم تفکیک کرده و عملکرد سامانه را در برابر تغییرات کفایت پایدار نگه می‌دارد. از نقطه‌نظر تلفیق مکانی-آماري، در بهره‌برداری دستی، هم‌مکانی نواحی با کفایت پایین و پایداری بالا (به‌ویژه در نیمه جنوبی منطقه) نشان‌دهنده الگوی تخریب تجمعی معمول در کنترل‌های حلقه‌باز است، خطاهای تحویل آب در پایین دست تقویت می‌شوند. در مقابل، در بهره‌برداری MPC هر دو میدان هموارتر شده‌اند، نقشه پایداری گرادبانی ملایم با قله‌های محلی اندک نشان می‌دهد. این امر تأیید می‌کند که سامانه قادر است اصلاحات کنترلی بالادست را به‌صورت پویا در کل شبکه انتشار دهد و پایداری هیدرولیکی را حفظ کند. هم‌گن‌سازی مکانی توسط روش خودکار از پررنگ‌ترین نتایج به دست آمده است، MPC توانسته اختلافات درون منطقه‌ای را به‌طور چشمگیری کاهش داده و هر دو سطح کفایت و پایداری را هموار کند. به‌صورت عددی، بازه کفایت از ۴۰-۷۰ (دستی) به ۶۰-۹۰ (MPC) و بازه پایداری از ۷۰-۹۰ به ۱۰-۳۰ فشرده شده است. از منظر پیوند بین تاب‌آوری و کارایی، تفاوت میان شیب‌های رگرسیون دو سامانه نشان می‌دهد که پایداری نسبت به نوسانات موضعی کفایت حساسیت کمتری پیدا کرده، که

ویژگی شاخص یک سامانه کنترل مقاوم و تطبیقی است. از منظر عدالت در توزیع در سامانه دستی، کاربران بالادست به‌طور ذاتی در وضعیت بهتری قرار دارند، درحالی‌که سامانه MPC پایداری تحویل تقریباً یکنواختی را در سراسر منطقه فراهم می‌آورد که عاملی حیاتی برای توزیع عادلانه آب و رضایت ذی‌نفعان است. درمجموع، شکل ۴ نشان می‌دهد که کنترل خودکار به‌طور هم‌زمان منجر به افزایش کفایت و کاهش پایداری شده که این امر نه‌تنها عملکرد میانگین را بهبود بخشیده، بلکه تاب‌آوری کل سامانه را نیز ارتقا داده است. رابطه قوی اما با شیب ملایم‌تر بین کفایت و پایداری بازتابی از گذار از سامانه‌ای شکننده و واکنشی (دستی) به سامانه‌ای پیش‌بین و خودپایدار (MPC) است.

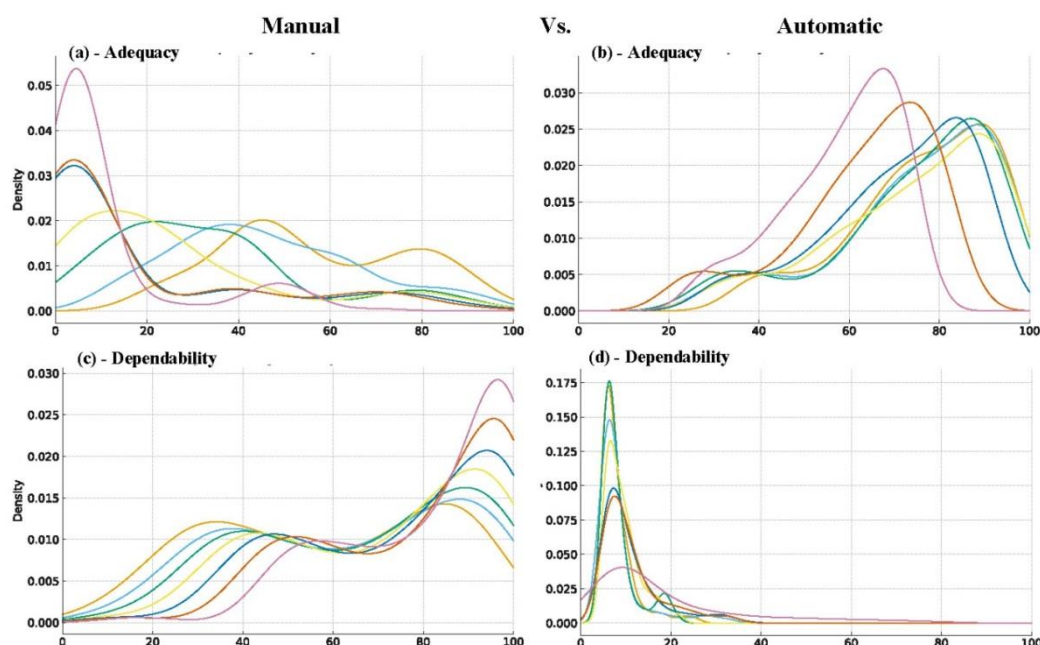


شکل ۳. مقایسه متوسط شاخص پایداری توزیع آب سطحی در هفت سناریوی بهره‌برداری نرمال تا کم‌آبی شدید در روش بهره‌برداری دستی و بهره‌برداری با استفاده از سامانه کنترل خودکار MPC



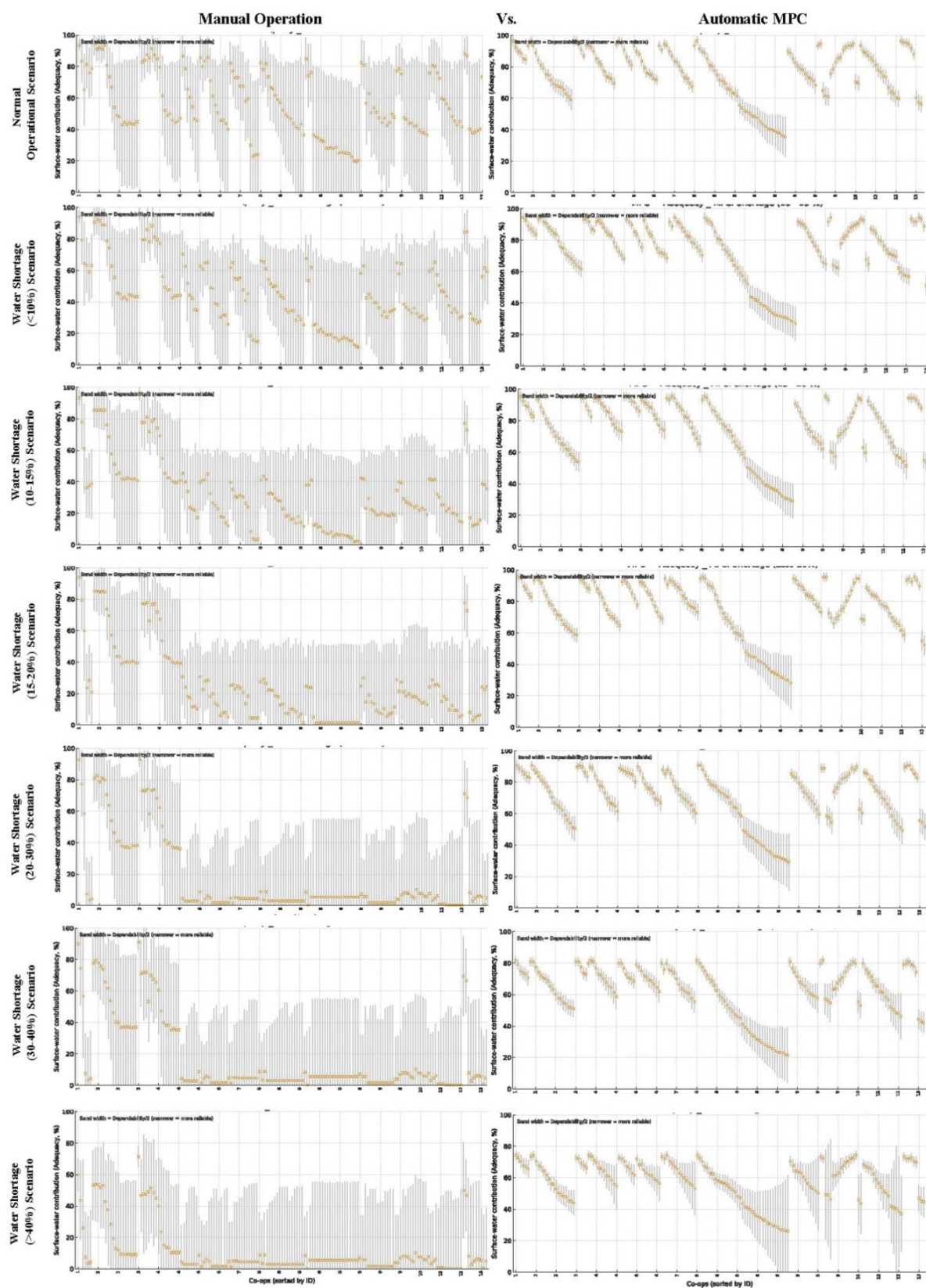
شکل ۴. همبستگی مکانی بین شاخص کفایت (Adequacy) و پایداری (Dependability) در بهره‌برداری دستی و خودکار MPC

شکل ۵. توزیع چگالی احتمال شاخص‌های کفایت و پایداری را در دو سامانه بهره‌برداری دستی (زیر شکل a-c) و خودکار (زیر شکل b-d) نشان می‌دهد. این نمودارها بیانگر نحوه توزیع آماری عملکرد تمامی ۱۶۳ واحد در هفت سناریوی تأمین آب هستند. در حالت دستی، توزیع کفایت (زیر شکل a) گسترده و چندقله‌ای است و عمدتاً در محدوده پایین تا متوسط (۱۰ تا ۶۰) متمرکز می‌باشد که نشان‌دهنده ناپایداری زمانی و مکانی در تحویل آب است. در مقابل، سامانه خودکار (زیر شکل b) این توزیع را به محدوده بالاتر (۶۰ تا ۹۰) منتقل کرده و پراکندگی آن را کاهش داده است؛ به این معنی که بیشتر واحدها به سطح بالایی از کفایت با تغییرپذیری اندک دست می‌یابند. در مورد پایداری، روند معکوس دیده می‌شود: در سامانه دستی (زیر شکل c) توزیع‌ها به سمت مقادیر بالا (۷۰ تا ۱۰۰) متمایل‌اند که بیانگر تحویل ناپایدار و متغیر است. اما در سامانه خودکار (زیر شکل d) توزیع‌ها در محدوده پایین (۰ تا ۳۰) فشرده شده‌اند و واریانس اندکی دارند که نشان‌دهنده سامانه‌ای با عملکرد پایدار و قابل پیش‌بینی است. در مجموع، شکل ۵ تأیید می‌کند که اتوماسیون نه تنها سطح میانگین خدمت‌رسانی را افزایش می‌دهد (کفایت بیشتر)، بلکه پایداری زمانی را نیز بهبود می‌بخشد (پایداری کمتر) و پراکندگی عملکرد را کاهش می‌دهد. این تحول گذار از یک سامانه دستی متغیر و نامطمئن به یک سامانه خودکار، پایدار و منصفانه است که در تمامی شرایط کم‌آبی و جریان متغیر، عملکرد قابل اتکایی دارد.



شکل ۵. توزیع چگالی احتمال شاخص‌های کفایت و پایداری در سامانه‌های بهره‌برداری دستی و خودکار MPC

در بخش انتهایی نتایج این پژوهش، سهم تدقیق‌شده آب سطحی تحویل‌داده‌شده به ۱۶۳ واحد کشاورزی شبکه آبیاری نکوآباد در شکل ۶ و به تفکیک دو سامانه بهره‌برداری دستی و خودکار نشان داده شده است. در این شکل درصد سهم آب سطحی برای تمامی واحدها و تحت سناریوهای بهره‌برداری به تصویر کشیده شده است. هر نقطه در نمودار بیانگر سهم آب سطحی (متوسط درصد کفایت) یک تعاونی است، درحالی‌که ناحیه سایه‌دار پیرامون آن نوار قابلیت اطمینان تحویل آب مبتنی بر پایداری را نشان می‌دهد که باریک‌تر بودن این نوارها به معنای تحویل آب پایدارتر و قابل اعتمادتر است. در تمامی سناریوها، شکل نشان می‌دهد که سامانه خودکار نسبت به سامانه دستی سهم آب سطحی بالاتر و باثبات‌تری فراهم می‌سازد. در حالت دستی، مقادیر سهم آب سطحی بسیار پراکنده‌اند و با تشدید کم‌آبی، پهنای نوارهای قابلیت اطمینان به شدت افزایش می‌یابد که بیانگر نوسانات زیاد در خدمات میان تعاونی‌های بالادست و پایین‌دست است. در مقابل، در بهره‌برداری MPC سهم آب سطحی به‌طور پیوسته در بازه ۶۰ تا ۹۰ درصد باقی می‌ماند و توزیع مکانی یکنواخت‌تری دارد؛ نوارهای قابلیت اطمینان نیز حتی در کمبودهای شدید باریک باقی می‌مانند. در شرایط عادی، هر دو سامانه عملکرد مناسبی دارند. با این حال، در سامانه دستی پراکندگی میان تعاونی‌ها محسوس است و مقادیر سهم آب سطحی در محدوده ۶۰ تا ۹۰ درصد قرار دارند، درحالی‌که سامانه MPC تحویلی تقریباً یکنواخت در بازه ۸۵ تا ۹۵ درصد حفظ می‌کند. نوارهای قابلیت اطمینان در MPC باریک‌ترند که نشان‌دهنده کنترل پایدارتر در پیچ‌ها و جریان در کانال‌ها است.



شکل ۶. مقایسه عملکرد مکانی سهم آب سطحی در بهره‌برداری دستی و خودکار-MPC

با آغاز کمبودهای خفیف $WS < 10\%$ و $WS 10-15\%$ ، عملکرد سامانه دستی رو به افت می‌گذارد، سهم آب سطحی در بسیاری از تعاونی‌های انتهایی به حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد کاهش و پراکندگی بین تعاونی‌ها افزایش می‌یابد. درمقابل، MPC برای اغلب تعاونی‌ها سهم بالای ۸۰ درصد را حفظ می‌کند و تنها اندکی افزایش در پهنای نوارهای قابلیت اطمینان مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده توانایی آن در تخصیص پویای جریان‌های محدود و حفظ یکنواختی تحویل است. در سناریوهای کمبود متوسط $WS 15-20\%$ و $WS 20-30\%$ ، اختلاف بین دو سامانه آشکارتر می‌شود. در حالت دستی، میانگین سهم به حدود ۴۰ تا ۵۵ درصد کاهش یافته و نوارهای قابلیت اطمینان گسترده‌تر می‌شوند (برخی تا $\pm 25\%$ درصد) که بیانگر نوسانات زمانی زیاد در کفایت لحظه‌ای است؛ در نتیجه، تعاونی‌های پایین‌دست با تحویل نامنظم یا کمبودهای مقطعی روبه‌رو می‌شوند. درمقابل، در سامانه MPC میانگین سهم در محدوده ۷۰ تا ۸۵ درصد باقی می‌ماند و نوارهای پایداری باریک‌تر از $\pm 10\%$ درصد دارد که نشان‌دهنده توانایی کنترل‌کننده پیش‌بین در پیش‌بینی تأخیرهای انتشار جریان و جلوگیری از کمبود در پایین‌دست است. در کمبودهای شدید $WS 30-40\%$ و $WS > 40\%$ ، سامانه دستی عملاً از نظر عملیاتی فرومی‌پاشد؛ بسیاری از تعاونی‌ها کمتر از ۳۰ درصد سهم آب سطحی دریافت می‌کنند و نوارهای قابلیت اطمینان تقریباً کل بازه ۰ تا ۱۰۰ درصد را پوشش می‌دهند که نشان‌دهنده تحویلی ناپایدار و نامنظم است. درمقابل، MPC همچنان سهم ۵۰ تا ۶۵ درصد را با حاشیه قابلیت اطمینان متعادل (حدود $\pm 15\%$ درصد) حفظ می‌کند که بیانگر آن است که حتی در شرایط بحرانی ورودی، MPC عدالت و ثبات سیستم را بر انتقال ساده کمبود به پایین‌دست ترجیح می‌دهد. باریکی نوارهای قابلیت اطمینان در سامانه MPC بیانگر کنترل زمانی قوی است؛ نوسان تحویل روزانه یا هفتگی کمتر است و موقعیت درجه‌ها تقریباً ثابت باقی می‌ماند؛ درحالی‌که سامانه دستی بدون بازخورد و اصلاح پیش‌بینانه، به نوسانات جریان و خطاهای زمانی اپراتور حساس است. در تمام سناریوها، MPC گردایان سر تا انتهای کانال را در سهم آب سطحی هموار می‌سازد، درحالی‌که در کنترل دستی، تعاونی‌های بالادست در شرایط $WS \geq 20\%$ تقریباً دوبرابر تعاونی‌های انتهایی آب دریافت می‌کنند که نشانه‌ای از نابرابری شدید مکانی است. MPC این فاصله را به کمتر از ۱۵ درصد کاهش می‌دهد و دسترسی عادلانه‌تری به منابع آب در سراسر شبکه ایجاد می‌کند.

بحث

بررسی آماری نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که در سامانه دستی، کفایت با تشدید کمبودها به‌صورت تدریجی فرومی‌ریزد. میانگین کفایت از ۵۶/۸ در شرایط عادی به ۱۰/۸ درصد در $WS > 40\%$ سقوط کرده که معادل کاهش ۸۱ درصدی است. میانۀ ۵۰/۹ به ۵/۶ افت کرده است که نشان می‌دهد بیشتر حقه‌بران در سناریوهای انتهایی با کم‌تحویلی شدید مواجه‌اند. ضریب تغییرات (CV) بیش از سه برابر شده (۰/۳۶ به ۱/۴۲)، که بیانگر افزایش نابرابری مکانی است. سهم تحویل قابل قبول ($\leq 70\%$) از ۳۳ درصد به نزدیک صفر کاهش یافته و در مقابل سهم شکست ($\geq 40\%$) از ۱۹ درصد به ۸۸ درصد رسیده است. این روند نشان می‌دهد کنترل دستی پس از $WS 15-20\%$ به‌شدت ناپایدار و نامتوازن می‌شود، زیرا خطاهای زمانی و تلفات در کانال‌ها کمبودهای پایین‌دست را تشدید می‌کنند. درمقابل در سامانه MPC، شاخص کفایت در سطحی بالا و یکنواخت باقی می‌ماند. میانگین مقادیر در محدوده ۷۴ تا ۷۶ تا سناریوی $WS 20-30\%$ ثابت می‌ماند و تنها در بدترین شرایط ($WS > 40\%$) به ۵۸ کاهش می‌یابد. مقدار CV بین ۰/۲۱ تا ۰/۲۵ پایدار است که نشان‌دهنده حفظ عدالت مکانی است. حتی در $WS > 40\%$ ، نیمی از آگیرها مقادیر بالای ۶۰ درصد و حدود یک‌پنجم بالای ۷۰ درصد دارند، درحالی‌که در حالت دستی تقریباً هیچ کدام به این سطح نمی‌رسند. بنابراین، سامانه MPC کفایت بالا را با حداقل افت حفظ کرده و در تمام سطوح کمبود، به‌طور میانگین حدود ۴۰ واحد بالاتر از سامانه دستی عمل می‌کند. پایداری نیز روندی معکوس دارد. در سامانه دستی، با افزایش کمبودها عملکرد به‌صورت پیوسته بدتر می‌شود. میانگین پایداری از ۵۸/۶ به ۸۲ افزایش یافته است که نشان‌دهنده دو برابر شدن نوسانات تحویل است. سهم آگیرهای پایدار ($\geq 40\%$ درصد) از ۲۹ درصد به کمتر از ۵ درصد کاهش یافته، درحالی‌که سهم بسیار ناپایدارها ($\leq 80\%$ درصد) از ۱ درصد به بیش از ۶۰ درصد رسیده است. کاهش تدریجی CV از ۰/۴۴ به ۰/۲۳، نشانه بهبود نیست، بلکه بیانگر تخریب یکنواخت است، زیرا تقریباً تمام آگیرها به محدوده پایداری بالا (وضعیت ضعیف) وارد می‌شوند. درمقابل، مقادیر پایداری در سامانه MPC بسیار پایین و پایدار باقی می‌مانند؛ میانگین پایداری بین ۸ تا ۱۱ درصد تا سناریوی $WS 30-40\%$ نوسان دارد و تنها در شدیدترین کمبود ($< 40\%$ درصد) تا حدود ۱۸ درصد افزایش می‌یابد. بیش از

۹۰ درصد از آبیگرها در محدوده $\geq 40\%$ درصد باقی می ماندند و تقریباً هیچ کدام از مقادیر بالاتر از ۴۰ درصد مشاهده نمی شود. حتی در $WS > 40\%$ ، مقدار میانه پایداری پایین (۱۱/۷ درصد) حفظ می شود که بیانگر کنترل زمانی بسیار قوی است. به صورت کمی، سامانه MPC میانگین پایداری را حدود ۳۹ واحد کمتر از سامانه دستی کرده و ناپایداری های انتهایی ($\leq 80\%$ درصد) را از حدود ۵۰ درصد به تقریباً صفر کاهش داده است. از نظر تلفیقی، MPC به طور میانگین کفایت را حدود ۴۰ درصد افزایش و پایداری را حدود ۳۹ درصد کاهش می دهد. مقادیر CV نشان می دهند که MPC پراکندگی مکانی را بیش از نصف کاهش داده و حتی در کمبودهای شدید، خدمات عادلانه تری را حفظ می کند. در بهره برداری دستی، کفایت قابل قبول ($\leq 70\%$) پس از ۲۰-۳۰٪ WS تقریباً از بین می رود، در حالی که در MPC بیش از ۶۰ درصد از آبیگرها تا ۳۰-۴۰٪ WS همچنان این سطح را حفظ می کنند. بازه بین ۱۵-۲۰٪ WS و ۳۰-۴۰٪ WS دوره بحرانی تنش است که در آن عملکرد سامانه دستی فرومی پاشد، اما MPC با افت کنترل شده و پایداری بالا همچنان مؤثر باقی می ماند. به طور کلی، نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که بهره برداری خودکار در مقایسه با روش دستی، عملکرد به مراتب بهتری در تأمین آب سطحی برای واحدهای کشاورزی شبکه آبیاری نکوآباد دارد. این برتری نه تنها در شاخص کفایت تحویل آب، بلکه در شاخص پایداری و یکنواختی مکانی نیز به صورت معناداری قابل مشاهده است. تحلیل توزیع آماری شاخص ها نیز نشان داد که سامانه MPC توانسته است پراکندگی عملکرد را به طور چشمگیری کاهش دهد. در حالی که سامانه دستی دارای توزیع های گسترده و چندقله ای در شاخص کفایت و تمرکز بالا در شاخص پایداری بود، سامانه MPC توزیع هایی فشرده، یکنواخت و در محدوده مطلوب ارائه داد. در نهایت، بررسی سهم آب سطحی تحویلی به تعاونی ها نشان داد که سامانه MPC نه تنها میانگین بالاتری از سهم را فراهم می کند، بلکه نوارهای قابلیت اطمینان باریک تری دارد که بیانگر تحویلی پایدارتر و قابل اعتمادتر است. در شرایط کم آبی شدید، سامانه دستی دچار فروپاشی عملکردی شده و نابرابری مکانی به اوج می رسد، در حالی که MPC با حفظ سهم متعادل و نوسانات محدود، توانسته است عدالت توزیع را در سراسر شبکه برقرار سازد. این ویژگی ها نشان می دهد که سامانه MPC آستانه تحمل کمبود را حدود ۲۰ تا ۲۵ واحد درصد افزایش داده و شبکه را از ساختاری واکنشی و خط پذیر به سامانه ای پیش بین، خوداصلاحگر و پایدار تبدیل کرده است. نتایج به دست آمده از این پژوهش با پژوهش بیات و روزبهانی و شاهدانی (۱۴۰۰) که بر روی شبکه آبیاری رودست اصفهان با رویکرد پیوند آب-غذا-انرژی انجام شد همسو بوده و در پژوهش آن ها نیز روش بهره برداری MPC منجر به بهبود بیش از دوبرابری در شاخص ها به نسبت بهره برداری دستی شده بود. همچنین در پژوهشی که کامرانی و روزبهانی و شاهدانی (۱۳۹۸) در شبکه آبیاری رودست انجام دادند، نتایج این پژوهش نشان داد که روش بهره برداری MPC عملکرد بسیار مطلوب تری نسبت به روش های دستی و دستی بهبود یافته نشان داده و شاخص کفایت را به ویژه در شرایط کم آبی، به طور معناداری بهبود بخشیده است. باید اضافه شود که در سایر تحقیق ها صرفاً تحلیل شاخص صورت گرفته و در تحقیق حاضر مقایسه تحلیل اثر و همچنین تحلیل های آماری نیز انجام شده است.

نتیجه گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد که بهره برداری خودکار در مقایسه با روش دستی، به طور معناداری موجب بهبود عملکرد فرایند توزیع آب سطحی شبکه آبیاری نکوآباد شده است. تحلیل هم زمان شاخص های کفایت و پایداری نشان داد که MPC نه تنها سطح خدمت رسانی به تعاونی های آب بران را افزایش می دهد، بلکه با کاهش نوسانات و پراکندگی، تاب آوری سامانه را نیز ارتقا می دهد. رابطه معکوس میان این دو شاخص در سامانه دستی با شیب تند و حساسیت بالا همراه بود، در حالی که در سامانه MPC این رابطه با شیب ملایم تر و پایداری بیشتر حفظ شد. همچنین، توزیع مکانی عملکرد در سامانه MPC همگن تر بود و اختلاف میان تعاونی های بالادست و پایین دست به حداقل رسید، که نشان دهنده بهبود عدالت در بهره برداری از منابع آب است. با وجود این، هدف اصلی انجام این تحقیق که نتیجه کاربردی این تحقیق محسوب می شود، تعیین بازه های مشخص و دقیق مقدار توزیع و تحویل آب سطحی به هر کدام از ۱۶۳ آبیگر واقع در شبکه تحت شرایط عدم قطعیت در تأمین آب ورودی به شبکه آبیاری است. شرایط مذکور در قالب هفت سناریوی مشخص بهره برداری تعیین شد و بازه های اعتمادپذیری توزیع و تحویل آب سطحی به تفکیک آبیگر-سناریو تعیین شد. این نتیجه کاربردی، امکان پیاده سازی چارچوب های ارزیابی جامع، مانند چارچوب ارزیابی پایدار سامانه های بهره برداری منطبق بر پیوند آب-غذا-انرژی و چارچوب ارزیابی مبتنی بر ریسک شکست سیستم را برای مطالعات آتی فراهم می سازد.

References

- Aiswarya, L., Suresh, M., & Kumar, R. (2024). Canal Automation and Management System to Improve Water Use Efficiency. *Springer*. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-97-2155-9_14
- Bayat, F., Roozbahani, A., & Hashemy Shahdany, S. M. (2022). Performance evaluation of agricultural surface water distribution systems based on water-food-energy nexus using AHP-Entropy-WASPAS technique. *Water Resources Management*, 36(12), 4697-4720.
- Bayat, F., Roozbahani, A., & Hashemy Shahdany, S. M. (2022). Improving the Performance of Agricultural Water Distribution Systems in Irrigation Networks Using Water-Food-Energy Nexus. *Water and Irrigation Management*, 11(4), 949-965. [In Persian].
- Camacho, E. F., Bordons, C., & Maestre, J. M. (2025). *Advances in model predictive control for water distribution systems*. Delft University of Technology & University of Seville. [Manuscript in preparation].
- Fele, F., Maestre, J. M., Hashemy Shahdany, M., Muñoz de la Peña, D., & Camacho, E. F. (2025). *Coalitional model predictive control of an irrigation canal*. arXiv preprint arXiv:2501.17561.
- Hosseini, M., Jolfan, M., & Roozbahani, A. (2019). Effects of canal automation on reducing groundwater extraction within irrigation districts: Case study of Qazvin irrigation district. *Water Resources Management*, 33(5), 1721-1734.
- Kamrani, K., Roozbahani, A., & Hashemy Shahdany, S. M. (2019). The impact of improving surface water delivery and distribution processes on reducing groundwater abstraction in the Roodasht irrigation network. *Agricultural Water Research*, 33(3), 1-15. [In Persian].
- Kong, L., Liu, Y., Li, J., Tian, Y., Yang, Q., & Chen, Z. (2024). Nonlinear model predictive controller for gate control in open canal irrigation systems with flexible water demands. *Computers and Electronics in Agriculture*, 222, 109023.
- Nature Research Intelligence. (2024). *Predictive control in irrigation canal systems*. Nature Research Topic Summary.
- Nigam, J., Sharma, P., & Verma, S. (2023). Performance evaluation of irrigation canals using data envelopment analysis. *Energies*, 16(14), 5490.
- Rajaput, M., Tiwari, R., & Deshmukh, A. (2025). A systematic review of performance assessment in canal irrigation systems. *Modern Methods in Water Systems*, 12(1), 33-49.
- Ranjbar, R., Ghasemi, N., & Hashemy Shahdany, S. M. (2025). Stochastic model predictive control of an irrigation canal. *Journal of Hydroinformatics*, 27(4), 740-754.
- Shahverdi, K., Alamiyan-Harandi, F., & Maestre, J. M. (2022). Double Q-PI architecture for smart model-free control of canals. *Computers and Electronics in Agriculture*, 197, 106940.
- Wang, X., Zhang, Y., Jin, L., Ni, J., Zhu, Y., Cao, W., & Jiang, X. (2025). Design of an integrated gate irrigation system with measurement and control based on Cloud-Edge-End collaboration and fuzzy algorithm. *Computers and Electronics in Agriculture*, 239, 111035.
- Zhou, K., Fan, Y., Gao, Z., Chen, H., & Kang, Y. (2025). Research progress on operation control and optimal scheduling of irrigation canal systems. *Irrigation and Drainage*, 74(2), 861-879.
- Zhu, Z., Guan, G., & Wang, K. (2023). Distributed model predictive control based on the alternating direction method of multipliers for branching open canal irrigation systems. *Agricultural Water Management*, 285, 108372.