



Adaptive evaluation of Proportional–Integral (PI) automatic controller effects on distribution performance in surface water operation systems under supply instability

Reza Jamali¹ | Mahmoud Mashal^{2✉} | S. Mehdy Hashemy Shahdany³ | Jaber Soltani⁴

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aburihan), University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: r.jamali@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aburihan), University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: mmashal@ut.ac.ir
3. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aburihan), University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: mehdi.hashemy@ut.ac.ir
4. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aburihan), University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: jsoltani@ut.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 8 November 2025

Received in revised form

29 November 2025

Accepted 27 January 2026

Published online 22 August 2026

Keywords:

Irrigation network

Impact analysis

Uncertainty

Water accounting

Spatiotemporal analysis

ABSTRACT

In this study, the performance of the Nekouabad Irrigation Network was evaluated under two operating systems: the conventional manual operation and an automated operation based on a Proportional–Integral (PI) controller, in response to consecutive inflow shortage scenarios. Using a hydraulic simulation model and performance indicators of adequacy and sustainability, the network behavior was analyzed across seven levels of hydrological stress, ranging from normal conditions to inflow deficits exceeding 40%. The results revealed that the PI-based system significantly enhanced the level of water service, reduced temporal and spatial fluctuations, and improved the equity of water distribution. Compared with the manual operation, the PI controller increased mean adequacy by up to 40% and reduced mean variability (instability) by 39%, indicating a higher degree of stability and resilience across the network. Statistical, distributional, and spatial analyses confirmed that the PI control system prevented functional collapse under critical conditions and transformed the network into a more coordinated, predictable, and equitable system. The reduced coefficient of variation, synchronized regulator responses, and spatial uniformity of performance demonstrated the controller's capacity to absorb disturbances and prevent the propagation of fluctuations throughout the network. These features facilitate a transition from reactive management toward predictive regulation, enabling more accurate planning, reduced dependence on groundwater resources, and enhanced resilience to climate variability. The findings support the applicability of comprehensive assessment frameworks—such as sustainability evaluation frameworks based on the Water–Food–Energy Nexus and risk-based system failure assessment—for future studies.

Cite this article: Jamali, R., Mashal, M., Hashemy Shahdany, S. M., & Soltani, J. (2026). Adaptive evaluation of Proportional-Integral (PI) automatic controller effects on distribution performance in surface water operation systems under supply instability. *Journal of Water and Irrigation Management*, 16 (2), 427-446.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2026.405547.1272>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2026.405547.1272>

Publisher: University of Tehran Press.



پایش تطبیقی اثر کنترل خودکار تناسبی-انتگرالی (PI) بر کارایی توزیع در سامانه‌های بهره‌برداری از منابع آب سطحی تحت شرایط ناپایدار تأمین

رضا جمالی^۱ | محمود مشعل^۲ | سید مهدی هاشمی شاهدانی^۳ | جابر سلطانی^۴

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

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

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

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

چکیده	اطلاعات مقاله
در این پژوهش، عملکرد شبکه آبیاری نکوآباد تحت دو سامانه بهره‌برداری دستی و خودکار مبتنی بر کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی (PI) در مواجهه با سناریوهای متوالی کمبود جریان ورودی بررسی شد. با استفاده از مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی و تحلیل شاخص‌های کفایت و پایداری، رفتار شبکه در هفت سطح تنش هیدرولوژیکی از شرایط عادی تا کمبود بیش از ۴۰ درصد ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که سامانه PI به‌طور قابل‌توجهی سطح خدمات آبی را بهبود بخشیده، نوسانات زمانی و مکانی را کاهش داده و عدالت توزیع آب را ارتقاء داده است. در مقایسه با سامانه دستی، کنترل PI میانگین کفایت را تا ۴۰ درصد افزایش و میانگین پایداری را تا ۳۹ درصد کاهش داد که بیانگر ثبات بیش‌تر و تاب‌آوری بالاتر شبکه است. تحلیل‌های آماری، توزیعی و مکانی نشان دادند که کنترل PI از فروپاشی عملکردی در شرایط بحرانی جلوگیری کرده و ساختار شبکه را به سامانه‌ای هماهنگ، قابل پیش‌بینی و منصفانه تبدیل می‌کند. کاهش ضریب تغییرات، هم‌زمانی واکنش تنظیم‌کننده‌ها و حفظ یکنواختی مکانی عملکرد، نشان‌دهنده توانایی کنترل‌کننده در جذب اختلالات و جلوگیری از گسترش نوسانات در شبکه است. این ویژگی‌ها موجب گذار از مدیریت واکنشی به تنظیم پیش‌نگر شده و امکان برنامه‌ریزی دقیق‌تر، کاهش وابستگی به منابع آب زیرزمینی و افزایش تاب‌آوری در برابر تغییرات اقلیمی را فراهم می‌سازد. این نتیجه کاربردی، امکان پیاده‌سازی چارچوب‌های ارزیابی جامع، مانند چارچوب ارزیابی پایدار سامانه‌های بهره‌برداری منطبق بر پیوند آب-غذا-انرژی و چارچوب ارزیابی مبتنی بر ریسک شکست سیستم را برای مطالعات آتی فراهم می‌سازد.	نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۷ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۳۱ کلیدواژه‌ها: شبکه آبیاری تحلیل اثر عدم قطعیت حسابرسی آب تحلیل مکانی-زمانی

استناد: جمالی، رضا؛ مشعل، محمود؛ هاشمی شاهدانی، سیدمهدی و سلطانی، جابر (۱۴۰۵). پایش تطبیقی اثر کنترل خودکار تناسبی-انتگرالی (PI) بر کارایی توزیع در سامانه‌های بهره‌برداری از منابع آب سطحی تحت شرایط ناپایدار تأمین. *نشریه مدیریت آب و آبیاری*، ۱۶ (۲)، ۴۳۷-۴۴۶.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2026.405547.1272>



۱. مقدمه

ایران در زمره کشورهایی قرار دارد که بخش عمده‌ای از تولیدات کشاورزی آن وابسته به آبیاری با منابع آب سطحی است. در چنین شرایطی، شبکه‌های آبیاری به‌عنوان شریان حیاتی کشاورزی، وظیفه انتقال و توزیع آب را بر عهده دارند. این شبکه‌ها با هدف بهره‌برداری بهینه از منابع محدود طراحی شده‌اند، اما شواهد میدانی و مطالعات متعدد نشان می‌دهد که عملکرد موجود، به‌ویژه در بخش توزیع و تحویل آب، با مشکلات جدی روبه‌رو است. افزایش برداشت‌های غیرمجاز از منابع زیرزمینی و رشد تعداد چاه‌ها در محدوده شبکه‌ها، بازتابی از ناکارآمدی سامانه‌های بهره‌برداری دستی در تأمین پایدار و عادلانه آب برای ذی‌نفعان است. روش‌های سنتی بهره‌برداری که متکی بر تنظیم دستی دریچه‌ها توسط اپراتورها هستند، به دلیل وابستگی به تجربه فردی و نبود ابزارهای کنترلی دقیق، اغلب منجر به ناپایداری جریان، بی‌عدالتی در توزیع و کاهش اعتماد کشاورزان شده‌اند. بررسی‌های انجام‌شده در شبکه‌های رودشت، درودزن و نکوآباد اصفهان نشان داده است که این شیوه‌ها در شرایط کم‌آبی قادر به تأمین کفایت لازم نیستند و پایداری عملکرد آن‌ها نیز به شدت متزلزل است (Shahrokhnia & Ghiasi, 2018; Bayat *et al.*, 2022). در سطح بین‌المللی نیز پژوهش‌های متعددی ناکارآمدی روش‌های دستی را تأیید کرده‌اند. برای نمونه، Fipps (۲۰۰۰) در تگزاس، تلفات انتقال را حدود ۳۰ درصد گزارش کرد. هم‌چنین Akkuzu و همکاران (۲۰۰۷) در عراق، میزان تلفات را بین ۱۹ تا ۳۷ درصد برآورد کردند و Kedir (۲۰۱۵) در اتیوپی، بسته به شرایط شبکه، تلفات را بین ۱۲ تا ۷۲ درصد اعلام نمود. در هند، Jadhav و همکاران (۲۰۱۴) این مقدار را ۲۵ تا ۳۶ درصد و در ایران Karimi Avargani *et al.* (۲۰۲۰) در شبکه رودشت حدود ۵۰ درصد گزارش کردند. این ارقام نشان می‌دهد که بدون اصلاح و نوسازی سامانه‌های بهره‌برداری، دستیابی به مدیریت پایدار منابع آب امکان‌پذیر نخواهد بود.

یکی از ابزارهای کلیدی در تحلیل عملکرد شبکه‌ها، مدل‌های هیدرودینامیکی هستند که امکان شبیه‌سازی جریان غیرمماندار و ارزیابی شاخص‌های عملکردی را فراهم می‌کنند. از MODIS در بنگلادش (Monem & Shuurmans, 1992) و MIKE-II در هند (Mishra *et al.*, 2001) گرفته تا HEC-RAS در ایران (Shahrokhnia & Javan, 2005) و SOBEK در شبکه درودزن (Afrasiabikia *et al.*, 2017)، این مدل‌ها به‌طور گسترده برای بررسی کفایت، عدالت و راندمان توزیع آب به‌کار رفته‌اند. در سال‌های اخیر، توسعه مدل‌های هوشمند مانند مدل بیزین ترکیبی توسط Kaghazchi و همکاران (۲۰۲۱) نیز نشان داده است که می‌توان با دقت بالا عملکرد سامانه‌های توزیع را شبیه‌سازی و ارزیابی کرد. Hashemy و همکاران (۲۰۱۳، ۲۰۱۶) در شبکه دز با استفاده از کنترلگرهای PI و CMPC موفق شدند نوسانات جریان را کاهش دهند و شاخص‌های خطا را بهبود بخشند و Shahdany و همکاران (۲۰۱۹) در شبکه Altus آمریکا، سامانه‌ای مبتنی بر MPC توسعه دادند که حتی در شرایط نوسانات غیرقابل پیش‌بینی نیز توانست پایداری جریان و کفایت تحویل آب را تضمین کند و Hosseini و همکاران (۲۰۲۰) در شبکه قزوین نشان دادند که ارتقای سامانه‌ها به حالت خودکار، برداشت از آبخوان را تا ۷۱ درصد و مصرف انرژی را تا ۶۳ درصد کاهش می‌دهد.

در پژوهشی Rahparast & Shahdany (۲۰۲۴) در شبکه آبیاری نکوآباد اصفهان نشان دادند که کنترلگرهای غیرمتمرکز موجب بهبود قابل توجه شاخص‌های کفایت و پایداری در شرایط کم‌آبی می‌شوند. در پژوهشی دیگر، Bayat و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از تکنیک AHP-Entropy-WASPAS، سه روش بهره‌برداری دستی، خودکار PI و MPC را از منظر پیوند آب-غذا-انرژی ارزیابی کردند و عملکرد برتر روش PI را در شرایط بحرانی تأیید نمودند. هم‌چنین، Zhu و همکاران (۲۰۲۳) توسعه کنترلگرهای MPC یکپارچه برای کانال‌های فرعی متصل به کانال‌های اصلی را بررسی کردند و نشان دادند که ترکیب PI و MPC می‌تواند عملکرد توزیع آب را بهینه کند. هم‌چنین، Ranjbar و همکاران (۲۰۲۵) نیز

تلفیق کنترلگر پیش‌بین با ربات‌های اندازه‌گیری متحرک را برای تنظیم دقیق جریان در کانال‌ها تحت عدم قطعیت تأمین آب پیشنهاد دادند و Aiswarya و همکاران (۲۰۲۴) نقش خودکارسازی را در افزایش قابلیت اطمینان تحویل آب و کاهش تلفات بررسی کردند. ورود الگوریتم‌های هوش مصنوعی به حوزه مدیریت شبکه‌های آبیاری، افق‌های جدیدی گشوده است. در این راستا، Barkhordary & Shahdany (۲۰۲۲) یک سامانه هوشمند شامل خوشه‌بندی بدون نظارت و کنترل خودکار را در شبکه رودشت آزمایش کردند. Shahverdi & Maestre (۲۰۲۳) نیز با ترکیب انرژی تجدیدپذیر (توربین پیچ ارشمیدس) و الگوریتم Fuzzy Sarsa، چارچوبی جامع برای مدرن‌سازی کانال‌ها ارائه دادند که علاوه بر بهبود شاخص‌های کفایت و عدالت، کاهش انتشار کربن و سود اقتصادی را نیز به همراه داشت.

در پاسخ به این چالش‌ها، توسعه و به‌کارگیری سامانه‌های کنترل خودکار، به‌ویژه کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی (PI)، به‌عنوان راه‌کاری نوین در مدیریت بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری مطرح شده‌اند. کنترلگر PI با تنظیم جریان خروجی براساس خطای سیستم، امکان واکنش سریع و دقیق به تغییرات ورودی و تقاضا را فراهم می‌سازد. با وجود پیشرفت‌های فنی در طراحی و پیاده‌سازی سامانه‌های کنترل خودکار، خلأ پژوهشی مهمی در زمینه تحلیل اثرات این سامانه‌ها بر جامعه بهره‌برداران، به‌ویژه از منظر شاخص‌های کفایت و پایداری، همچنان باقی‌مانده است. اغلب مطالعات، تمرکز خود را بر ارزیابی فنی کنترلگرها یا تحلیل منطقه‌ای شاخص‌های عملکرد محدود کرده‌اند و ردپای پیاده‌سازی دقیق به تفکیک بهره‌برداران در سطح شبکه کم‌تر دیده می‌شود. هدف این پژوهش، تحلیل اثر به‌کارگیری سامانه کنترل خودکار مبتنی بر روش PI بر کفایت و پایداری توزیع حقابه در شبکه آبیاری نکوآباد اصفهان، تحت شرایط عدم قطعیت در تأمین آب سطحی است. نوآوری این پژوهش در ارزیابی دقیق عملکرد سامانه بهره‌برداری خودکار در مقایسه با روش دستی، با تمرکز بر شاخص‌های کفایت و پایداری و تحلیل مکانی توزیع آب در سطح شبکه نهفته است.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

شبکه آبیاری نکوآباد در قلب حوضه آبریز زاینده‌رود و در بخش مرکزی ایران واقع شده است. این شبکه با وسعتی بالغ بر ۲۹ هزار هکتار، در محدوده جغرافیایی ۳۱:۴۶ تا ۳۲:۲۳ عرض شمالی و ۵۱:۲۱ تا ۵۱:۴۲ طول شرقی گسترده شده و یکی از مهم‌ترین زیرسامانه‌های آبیاری وابسته به سد زاینده‌رود به‌شمار می‌رود. اقلیم منطقه خشک و کم‌باران بوده و میانگین بارندگی سالانه آن حدود ۱۲۰ میلی‌متر است؛ رقمی که کم‌تر از نصف میانگین کشوری است. در مقابل، میزان تبخیر و تعرق سالانه در این ناحیه حدود ۱۵۰۰ میلی‌متر برآورد شده که نشان‌دهنده فشار شدید اقلیمی بر منابع آبی منطقه است. تأمین آب این شبکه از طریق رهاسازی‌های کنترل‌شده از سد زاینده‌رود صورت می‌گیرد. در دو سوی بند انحرافی نکوآباد، دو کانال اصلی (چپ و راست) احداث شده‌اند که وظیفه انتقال آب به اراضی تحت پوشش را بر عهده دارند. کنترل سطح آب در این شبکه به شیوه بالادستی انجام می‌شود و برای این منظور، ۵۰ سازه خودکار هیدرومکانیکی از نوع آمیل و یک سازه ثابت Duck-Bill در نقاط کلیدی شبکه نصب شده‌اند. با این حال، تنظیمات سازه‌های آبیگر در طول کانال‌های درجه یک و دو، شامل ۱۳ سازه در کانال اصلی و ۱۴۹ سازه در کانال‌های فرعی، به‌صورت دستی و توسط اپراتورهای محلی انجام می‌شود. بررسی‌های انجام‌شده توسط شرکت آب منطقه‌ای اصفهان نشان می‌دهد که میزان تلفات در سامانه انتقال، توزیع و تحویل آب این شبکه بین ۳۰ تا ۴۰ درصد جریان ورودی تخمین زده می‌شود. هرچند این مقادیر در برنامه‌ریزی روزانه تحویل آب لحاظ می‌شوند، اما مستندات علمی قابل اتکایی در خصوص نحوه اندازه‌گیری، ابزار مورد استفاده، یا شرایط ثبت این داده‌ها در دسترس نیست. در نتیجه، کشاورزان منطقه به‌طور فزاینده‌ای

به منابع آب زیرزمینی وابسته شده‌اند. در حال حاضر، حدود ۱۵ هزار حلقه چاه در محدوده شبکه آبیاری نکوآباد فعال هستند که سالانه بالغ بر ۳۷۰ میلیون مترمکعب آب از آن‌ها برداشت می‌شود. روند حفر چاه‌های دارای مجوز در بازه زمانی ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۷ نشان‌دهنده رشد ۳/۸ درصدی در چاه‌های نیمه‌عمیق و افزایش چشم‌گیر ۲۲۵/۸ درصدی در چاه‌های عمیق است. این وضعیت، منطقه نکوآباد را به یکی از دشت‌های بحرانی کشور تبدیل کرده و پیامدهای زیست‌محیطی قابل توجهی از جمله انتشار سالانه هزاران تن گازهای گلخانه‌ای به همراه داشته است. شکل (۱) موقعیت قرارگیری شبکه آبیاری نکوآباد را در تقسیمات کشوری و جانمایی کانال‌ها و چاه‌های آب داخل محدوده شبکه را نمایش می‌دهد. شرایط بحرانی منابع آب سطحی و زیرزمینی، در کنار افزایش تقاضا برای تولیدات کشاورزی، مدیران منابع آب منطقه را ناگزیر به جستجوی راه کارهای نوین برای ارتقای بهره‌برداری و کاهش تلفات کرده است. پژوهش حاضر نیز در پاسخ به همین نیاز، به بررسی اثر خودکارسازی بهره‌برداری بر شاخص‌های کفایت و پایداری در این شبکه می‌پردازد.

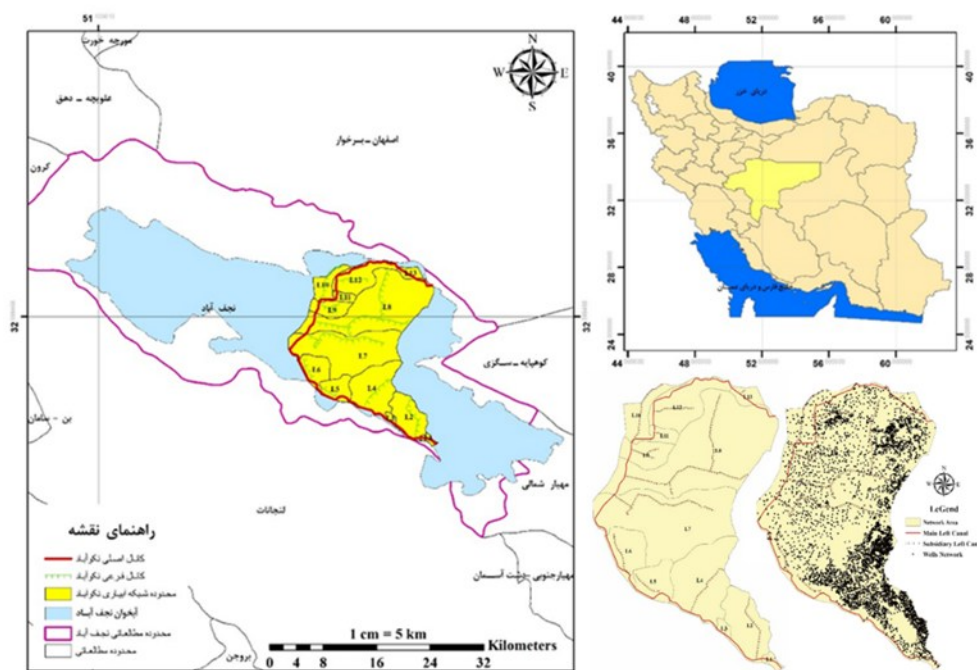


Figure 1. Geoposition of the Nekouabad irrigation network in central Iran, showing canal alignments and well distribution

۲.۲. شبیه‌سازی توزیع و تحویل آب در کانال آبیاری

در این پژوهش، به منظور شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان در شبکه آبیاری نکوآباد و ارزیابی عملکرد سامانه بهره‌برداری دستی موجود، از مدل ریاضی انتگرالی-تأخیری (ID) در محیط Python به عنوان مدل شبیه‌سازی هیدرولیک جریان استفاده شد. روش بهره‌برداری دستی (روش موجود-پایه) در قالب تنظیمات روزانه و متأثر از دستورالعمل‌های بهره‌برداری دستی این شبکه کدنویسی شد و با مدل ID توسعه داده شد تا امکان ارتباط با برنامه زمان‌بندی باز و بسته‌شدن دریچه‌های آبگیر فراهم گردد. این مدل قابلیت تبادل اطلاعات با برنامه‌های زمان‌بندی بازشدگی دریچه‌های آبگیر را داراست و امکان تحلیل دینامیکی جریان در بازه‌های مختلف سامانه انتقال را فراهم می‌سازد. ساختار مدل بر پایه روندیابی جریان در فاصله بین دو سازه تنظیم سطح آب بنا شده و به دلیل سادگی محاسبات و دقت قابل قبول، در مطالعات ارزیابی و مدرن‌سازی سامانه‌های بهره‌برداری مورد توجه قرار گرفته است. در مدل ID، هر بازه از کانال اصلی به

دو بخش مجزا تقسیم می‌شود؛ ۱- بخش جریان یکنواخت و ۲- بخش منحنی برگشت آب؛ که در بخش اول فرض می‌شود موج جریان ورودی تنها به سمت پایین دست منتقل می‌شود. هر تغییر در سازه تنظیم سطح آب بالادست موجب تولید موجی می‌شود که بدون تغییر در تراز سطح آب، از این بخش عبور می‌کند. پارامتر کلیدی در این بخش، زمان تأخیر انتقال موج (τ) است که معادله آن به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود (Bayat et al., 2022).

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

که در آن، q_{in} دبی ورودی به بخش یکنواخت جریان (m^3/s)، q_{canal} دبی ورودی به بخش ذخیره t زمان (m^3/s) و τ زمان تأخیر (sec) می‌باشد. همچنین بخش دوم مانند یک مخزن عمل کرده و تغییرات تراز سطح آب را در پاسخ به دبی‌های ورودی و خروجی مدل‌سازی می‌کند. مشخصه اصلی این بخش، سطح ذخیره افقی (A_s) است که معادله آن در حوزه زمان و فرکانس به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود (Isapoor et al., 2011):

$$A_s \cdot \frac{dh(t)}{dt} = q_{canal}(t) - q_{out}(t) \quad \text{رابطه (۲)}$$

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

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) می‌باشد. ترکیب این دو بخش، مدل کامل انتگرالی-تأخیری را برای هر بازه از کانال تشکیل می‌دهد و امکان تحلیل دقیق رفتار دینامیکی جریان در پاسخ به تغییرات بهره‌برداری را فراهم می‌سازد.

۳.۲. سامانه‌های بهره‌برداری شبکه آبیاری نکوآباد

در راستای ارتقای سامانه بهره‌برداری دستی موجود در شبکه آبیاری نکوآباد، یک مدل کنترلی مبتنی بر روش کنترل پس‌خور طراحی و پیاده‌سازی شد. این مدل با هدف تنظیم دقیق دبی عبوری از سازه‌های تنظیم سطح آب، در پاسخ به نوسانات جریان ورودی و برداشت‌های متغیر در محل آبیگرها توسعه یافته است. کنترلگر طراحی شده از نوع تناسبی-انتگرالی (PI) بوده و در محیط نرم‌افزار Python با مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی شبکه یکپارچه گردید. در این روش، متغیر کنترل‌شونده یعنی خطای رقوم سطح آب در بالادست هر سازه تنظیم اندازه‌گیری می‌شود و به کنترلگر بازگردانده می‌شود تا اقدام اصلاحی مناسب محاسبه گردد. هدف از این فرایند، بازگرداندن سطح آب به مقدار هدف در حضور اغتشاشاتی نظیر برداشت‌های لحظه‌ای و نوسانات دبی ورودی به کانال اصلی است. براساس الگوریتم PI، تغییرات دبی عبوری از سازه‌های تنظیم در هر گام زمانی با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$\Delta Q_{(k)} = K_i \cdot e_{(k)} + K_p \cdot [e_{(k)} - e_{(k-1)}] \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن، $\Delta Q_{(k)}$ مقدار تغییرات دبی عبوری از سازه‌های تنظیم بر حسب مترمکعب بر ثانیه در گام زمانی جاری، e برابر مقدار انحرافات تراز سطح آب از رقوم هدف، اندیس‌های k و $k-1$ به ترتیب نشان‌دهنده گام زمانی جاری و گام زمانی قبلی، K_p برابر ضریب تناسبی و K_i برابر ضریب انتگرالی است. این کنترلگر به صورت غیرمتمرکز در هر سازه قابل پیاده‌سازی بوده و با دریافت داده‌های لحظه‌ای از سطح آب، قادر است به صورت خودکار میزان بازشدگی دریچه‌ها را تنظیم کند. استفاده از کنترلگر PI در شبکه نکوآباد، با هدف افزایش دقت در تنظیم سطح آب، کاهش تلفات، و ارتقاء پایداری توزیع آب در شرایط بهره‌برداری متغیر صورت گرفته است.

۴.۲. شاخص ارزیابی عملکرد کفایت توزیع آب سطحی در شبکه‌های آبیاری

یکی از دغدغه‌های اساسی در سامانه‌های تحویل آب، اطمینان از تأمین آب موردنیاز محصولات زراعی در زمان و مقدار

مناسب است. تعیین نیاز آبی در هر منطقه بر پایه سیاست‌های کلان کشاورزی صورت می‌گیرد و به عوامل متعددی از قبیل وسعت اراضی تحت پوشش آبیاری، نوع و نیاز آبی محصولات زراعی، میزان تلفات در مسیر انتقال، عملیات زراعی نظیر آماده‌سازی زمین و آبیویی و فرهنگ و الگوی بهره‌برداری محلی بستگی دارد. در این چارچوب، کفایت تحویل آب به آبگیرها تابعی از میزان تأمین آب، برنامه‌ریزی تحویل، ظرفیت سازه‌های هیدرولیکی و نحوه بهره‌برداری و نگهداری آنهاست. به‌منظور سنجش این کفایت، از شاخصی استفاده می‌شود که نسبت دبی تحویلی به هر آبگیر (براساس خروجی مدل شبیه‌ساز ID) به دبی مورد تقاضا یا حقا به تعیین‌شده را در طول دوره بهره‌برداری محاسبه می‌کند. این شاخص به‌صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود:

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

که در آن، PA شاخص کفایت توزیع آب (درصد)، T مدت‌زمان بهره‌برداری (sec)، R تعداد کل آبگیری‌های واقع در کانال اصلی، Q_D دبی تحویلی به هر آبگیر (m³/s) و Q_R دبی تقاضای آب کشاورزی (m³/s) است. مقدار این شاخص در بازه صفر تا ۱۰۰ درصد قرار دارد. هرچه مقدار آن به ۱۰۰ درصد نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده تطابق بهتر بین تحویل و تقاضای آب است. با این حال، براساس طبقه‌بندی ارائه شده در مراجع، از دیدگاه مدیریتی شاخص مذکور به سه دسته که بیانگر بهره‌برداری مطلوب (PA ∈ (90 – 100))، قابل قبول (PA ∈ (80 – 90)) و ضعیف (PA ≤ 80) سامانه توزیع آب می‌باشد، قابل تقسیم‌بندی است. این شاخص به‌عنوان ابزاری کلیدی برای تحلیل کیفیت عملکرد سامانه‌های بهره‌برداری در شرایط مختلف آبی و مدیریتی مورد استفاده قرار می‌گیرد و مبنایی برای تصمیم‌گیری در بهینه‌سازی توزیع آب در شبکه‌های آبیاری فراهم می‌سازد.

۵.۲. شاخص ارزیابی عملکرد پایداری توزیع آب سطحی در شبکه‌های آبیاری

پایداری در تحویل آب به معنای یکنواختی و ثبات در تأمین آب طی دوره بهره‌برداری است. در واقع، سامانه‌ای پایدار تلقی می‌شود که بتواند در طول زمان، بدون نوسانات شدید یا تغییرات ناگهانی، آب مورد نیاز بهره‌برداران را مطابق با برنامه‌ریزی مصوب تأمین کند. در این پژوهش، پایداری تحویل آب به آبگیرها با توجه به تغییرات زمانی نسبت دبی تحویلی (شبیه‌سازی‌شده توسط مدل ID) به دبی مورد نیاز براساس الگوی کشت مصوب (حقا به تعیین‌شده) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای سنجش این ویژگی، از شاخص پایداری توزیع آب استفاده شد که براساس ضریب تغییرات زمانی نسبت دبی تحویلی به دبی مورد نیاز تعریف می‌شود. این شاخص به‌صورت رابطه (۵) محاسبه می‌گردد (Molden & Gates, 1990):

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

که در آن، PD شاخص پایداری توزیع آب (درصد)، T مدت‌زمان بهره‌برداری (sec) که مجموع کل گام‌های زمانی شبیه‌سازی است. R تعداد کل آبگیری‌های واقع در کانال اصلی، Q_D دبی تحویلی به هر آبگیر (m³/s) در هر گام زمانی شبیه‌سازی شده و Q_R دبی تقاضای آب کشاورزی (m³/s) است. لازم به توضیح است که در این پژوهش، پایداری براساس میزان نوسانات دبی تحویلی تعریف شده است، به‌طوری‌که درصد تغییرات و تعداد دفعات تغییر دبی، میزان یکنواختی و در نتیجه پایداری سامانه را مشخص می‌کند. هرچه مقدار شاخص پایداری به صفر نزدیک‌تر باشد، عملکرد سامانه در تأمین پایدار آب مطلوب‌تر ارزیابی می‌شود. با این حال، براساس طبقه‌بندی ارائه‌شده، از دیدگاه مدیریتی شاخص مذکور به سه دسته که بیانگر بهره‌برداری مطلوب (PD ∈ (0 – 10))، قابل قبول (PD ∈ (11 – 25)) و ضعیف (PD ≤ ۲۵) سامانه توزیع آب می‌باشد، قابل تقسیم‌بندی است. این شاخص به‌ویژه در تحلیل سناریوهای مختلف بهره‌برداری (دستی / خودکار) کاربرد دارد و می‌تواند به‌عنوان معیاری کلیدی برای بهینه‌سازی سامانه‌های کنترلی در شبکه‌های آبیاری مورد استفاده قرار گیرد.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

شکل (۲) مقایسه‌ای جامع از رفتار آماری و توزیعی دو شاخص کلیدی عملکرد کفایت و پایداری در دو سامانه بهره‌برداری دستی و خودکار PI را در هفت سناریوی کمبود جریان ورودی از شرایط عادی تا $WS > 40\%$ ارائه می‌دهد. این شکل با ترکیب دیدگاه‌های توصیفی و احتمالی از طریق ترسیم میانگین سناریو به سناریو، توزیع چگالی احتمال و هیستوگرام‌های سناریویی، نه تنها گرایش‌های مرکزی بلکه دامنه پراکندگی، چولگی و رفتار دُم توزیع را نیز نمایش می‌دهد. مجموعه نتایج نشان می‌دهد که کنترل‌کننده PI چگونه هم سطح و هم نوسانات عملکرد شبکه آبیاری را بازپیکربندی می‌کند.

مولفه کفایت (شکل‌های ۲-a, c, e) بیانگر افزایش آشکار و پیوسته‌ای در عملکرد ناشی از استفاده از سامانه PI در تمام سناریوهای کمبود است. در شرایط عادی میانگین کفایت در هر دو سامانه بیش از ۸۰ درصد است، اما با آغاز کمبود ($WS < 10\%$) واگرایی به سرعت نمایان می‌شود. در بهره‌برداری دستی، میانگین کفایت حدود ۲۰ درصد کاهش یافته و از ۸۲ به حدود ۶۲ درصد می‌رسد، در حالی که سامانه PI سطحی بالاتر از ۸۰ درصد را حفظ می‌کند. در سناریوی $WS 15 - 20\%$ اختلاف چشم‌گیر است؛ میانگین دستی به ۴۵ درصد سقوط می‌کند، در حالی که PI در محدوده ۷۵-۷۸ درصد باقی می‌ماند. حتی در شدیدترین کمبودها ($WS 30 - 40\%$)، PI حدود ۶۰ درصد کفایت را حفظ می‌کند که بیش از دو برابر حالت دستی (حدود ۲۵ درصد) است. میانه نیز همین روند را نشان می‌دهد و بیانگر آن است که بهبود عملکرد محدود به چند نقطه خاص نبوده بلکه شامل اکثریت آب‌گیرها می‌شود. به صورت کمی، افزایش میانگین $+40/8$ درصد و افزایش میانه $+51$ درصد نشان می‌دهد که کنترل‌کننده، کل توزیع را به سمت سطوح بالاتر انتقال داده است. منحنی‌های چگالی احتمال این بهبود را تأیید می‌کنند. در سامانه دستی، توزیع کفایت با افزایش کمبود پهن‌تر و مسطح‌تر می‌شود و چولگی راست با دُم‌های بلند به سمت صفر دارد. در مقابل، توزیع‌های PI باریک، متقارن و در محدوده ۷۵ تا ۹۰ درصد متمرکز هستند. ضریب تغییرات (CV) کفایت از $0/36$ به $0/25$ کاهش یافته است، که بیانگر کاهش ۳۰ درصدی پراکندگی نسبی است. هیستوگرام‌های سناریو به سناریو (شکل ۲-e) فروپاشی غیرخطی عملکرد دستی را نشان می‌دهند. میانه $WS 10 - 15\%$ و $WS 20 - 30\%$ ، سهم آب‌گیرهای زیر ۴۰ درصد کفایت از ۲۲ درصد به بیش از ۶۰ درصد می‌رسد، در حالی که کنترل‌کننده PI این سهم را حتی در همان بازه به زیر ۱۰ درصد محدود می‌کند. از دیدگاه مهندسی قابلیت اعتماد، این رفتار به معنای کاهش واریانس است. کنترل‌کننده PI انتشار نوسانات بالادست را از طریق بازخورد بالادرنگ و اصلاح تناسبی کاهش می‌دهد. زیرا موقعیت دریاچه‌ها به صورت پیوسته برای جبران انحراف سطح آب تنظیم می‌شود، پروفیل جریان در پایین‌دست یکنواخت‌تر باقی مانده و احتمال تجمعی در کلاس‌های کفایت بالا افزایش می‌یابد. باریک‌شدن منحنی PDF نشان‌دهنده کاهش آنتروپی سامانه و افزایش قابلیت پیش‌بینی تحویل آب است.

شاخص پایداری (شکل‌های ۲-b, d, f) بیانگر ثبات زمانی تحویل آب است، به طوری که مقادیر پایین‌تر نشانه عملکرد پایدارتر هستند. در سامانه دستی، پایداری با افزایش شدت کمبود به طور پیوسته بدتر می‌شود؛ میانگین آن از ۵۸ درصد در شرایط عادی به ۸۲ درصد در $WS > 40\%$ می‌رسد (افزایش ۴۱ درصدی در نوسان). در مقابل، سامانه PI میانگین پایداری ۳۰ تا ۳۵ درصد را تا $WS 30 - 40\%$ حفظ کرده و تنها در کمبود شدید به ۴۵ درصد می‌رسد. کاهش میانگین $-38/7$ درصد و کاهش میانه $-44/5$ درصد نشان می‌دهد که اتوماسیون دامنه نوسانات زمانی را به نصف کاهش می‌دهد. منحنی‌های PDF پایداری تقریباً تصویر آینه‌ای منحنی‌های کفایت هستند. در حالت دستی، توزیع‌ها پهن و به سمت مقادیر بالا چوله شده‌اند که نشان‌دهنده ناپایداری است. در سامانه PI، این توزیع‌ها به فرم فشرده و چپ‌چوله با قله‌ای در محدوده ۲۰-۳۰ درصد تبدیل می‌شوند. سهم آب‌گیرهای با پایداری بزرگ‌تر یا مساوی ۴۰ درصد (پایدار) از ۲۲ درصد به ۸۵ درصد افزایش می‌یابد، در حالی که دم ناپایدار (کوچک‌تر یا مساوی ۸۰ درصد) از ۴۸ درصد به کم‌تر از ۵ درصد کاهش

می‌یابد؛ یعنی کاهش ۹۰ درصدی احتمال خرابی. ضریب تغییرات از ۰/۴۴ به ۰/۲۳ رسیده و ثابت می‌کند که نه تنها میانگین قابلیت اعتماد بیش‌تر شده بلکه پراکندگی مکانی آن نیز بسیار کم‌تر است.

بررسی هم‌زمان دو شاخص، ابعاد مکملی از کیفیت عملکرد سامانه را آشکار می‌سازد. کفایت میزان تحویل را می‌سنجد و پایداری ثبات آن را. در کنترل دستی، رابطه‌ای معکوس و شدید بین آن‌ها وجود دارد (شیب حدود ۰/۸۸، R^2 حدود ۰/۹۶)؛ افت جزئی در کفایت باعث افزایش سریع پایداری می‌شود و نشان می‌دهد که نوسانات به سرعت در شبکه گسترش می‌یابند. در کنترل PI، این رابطه ملایم‌تر شده (شیب حدود ۰/۳۵، R^2 حدود ۰/۸۸) و نشان می‌دهد که تغییرات کفایت دیگر به افزایش ناپایداری منجر نمی‌شود. به عبارت دیگر، کنترل‌کننده PI کارایی و قابلیت اعتماد را از یکدیگر تفکیک می‌کند و پاسخ سیستم را در برابر اختلالات پایدار می‌سازد. دستاوردهای کمی در شکل (۲) نشانگر تغییری بنیادی در دینامیک شبکه است. کنترل PI، شبکه باز دستی، مستعد خطاهای زمانی، مازاد دبی و بی‌عدالتی، را به سامانه‌ای بازخوردی و تنظیم‌پذیر تبدیل می‌کند. اصلاح پیوسته انحرافات باعث می‌شود هر بخش در دامنه‌ای باریک از عملکرد هدف باقی بماند.

شکل (۳) دو دیدگاه تحلیلی مکمل را برای ارزیابی عملکرد سامانه تحویل آب در شرایط بهره‌برداری دستی و خودکار PI ترکیب می‌کند؛ دیدگاه اول توابع توزیع تجمعی تجربی (CDF) که قابلیت اطمینان احتمالی شاخص‌های تحویل آب را در بین تمامی تعاونی‌های کشاورزان و سناریوها توصیف می‌کند؛ و دیدگاه دوم نقشه‌های حرارتی مبتنی بر میانه که تغییرات مکانی شاخص‌ها را در محور «شماره تعاونی کشاورزان» در سناریوهای متوالی کمبود جریان نشان می‌دهد. مجموعه این نمودارها هم ثبات آماری و هم عدالت مکانی دو روش بهره‌برداری را کمی‌سازی می‌کنند.

منحنی‌های CDF کفایت (شکل‌های a, b-۳) نمایش احتمالی سطح خدمات شبکه هستند. در بهره‌برداری دستی، منحنی صاف و گسترده است؛ ۵۰ درصد مشاهدات زیر ۵۰ درصد قرار دارند، بدین معنا که نیمی از آب‌گیرها کم‌تر از نصف نیاز آبی خود را دریافت می‌کنند. در سناریوی $WS\ 15 - 20\%$ ، میانه منحنی به حدود ۴۰ درصد منتقل می‌شود و در $WS\ 30 - 40\%$ بیش از ۷۰ درصد مشاهدات زیر ۵۰ درصد قرار می‌گیرند. شیب منحنی به تدریج کاهش می‌یابد که بیانگر ناهمگونی زیاد و پیش‌بینی‌ناپذیری عملکرد است. در مقابل، بهره‌برداری PI الگوی کاملاً متفاوتی ایجاد می‌کند. منحنی‌های CDF به‌طور محسوسی به سمت راست منتقل و شیب آن‌ها بسیار تندتر می‌شود که نشانه یکنواختی بیش‌تر است. حتی در $WS\ 20 - 30\%$ ، حدود ۸۰ درصد از آب‌گیرها کفایت بیش‌تر یا مساوی ۷۰ درصد دارند و در $WS > 40\%$ بیش از نصف آن‌ها هنوز بالای ۶۰ درصد هستند. فاصله بین دو منحنی در سطح احتمال ۰/۵ بیانگر افزایش میانه حدود ۵۱ درصد است. شیب تند منحنی PI (افزایش df/dx) به معنی کاهش واریانس حدود ۴۰ درصد کم‌تر از حالت دستی است. نقطه تقاطع دو منحنی از x حدود ۵۵ درصد در کمبود خفیف به x حدود ۶۵ درصد در $WS\ 30 - 40\%$ منتقل می‌شود، که نشان می‌دهد مزیت PI با شدت تنش افزایش می‌یابد. منحنی‌های CDF پایداری (شکل‌های c, d-۳) رفتار زمانی را تکمیل می‌کنند، مقادیر پایین‌تر نشان‌دهنده قابلیت اطمینان بیش‌تر است. در سامانه دستی، منحنی‌ها کم‌شیب و تا مقادیر نزدیک ۱۰۰ درصد گسترش دارند، بدین معنا که نوسانات زمانی شدید در بسیاری از آب‌گیرها رخ می‌دهد. در $WS\ 10 - 15\%$ ، حدود ۴۰ درصد مشاهدات بالاتر از ۶۰ درصد پایداری دارند و در $WS\ 30 - 40\%$ این نسبت به ۷۰ درصد می‌رسد. در سامانه PI، توزیع‌ها فشرده و به سمت مقادیر پایین متمرکز می‌شوند. میانه پایداری از ۷۵ درصد (دستی) به ۳۱ درصد (PI) کاهش یافته و دامنه چارکی از ۳۵ درصد به ۱۲ درصد کاهش یافته است. این فشردگی آماری نشان می‌دهد که کنترل PI انحرافات زمانی را از طریق بازخورد تناسبی-انتگرالی کاهش می‌دهد. کنترل مداوم خطا بین سطح هدف و سطح اندازه‌گیری‌شده باعث تضعیف نوسانات شده و دُم بالایی توزیع را کوتاه می‌کند. شیب تند منحنی بین ۲۰ درصد تا ۳۵ درصد بیانگر باند عملکرد پایدار شبکه است.

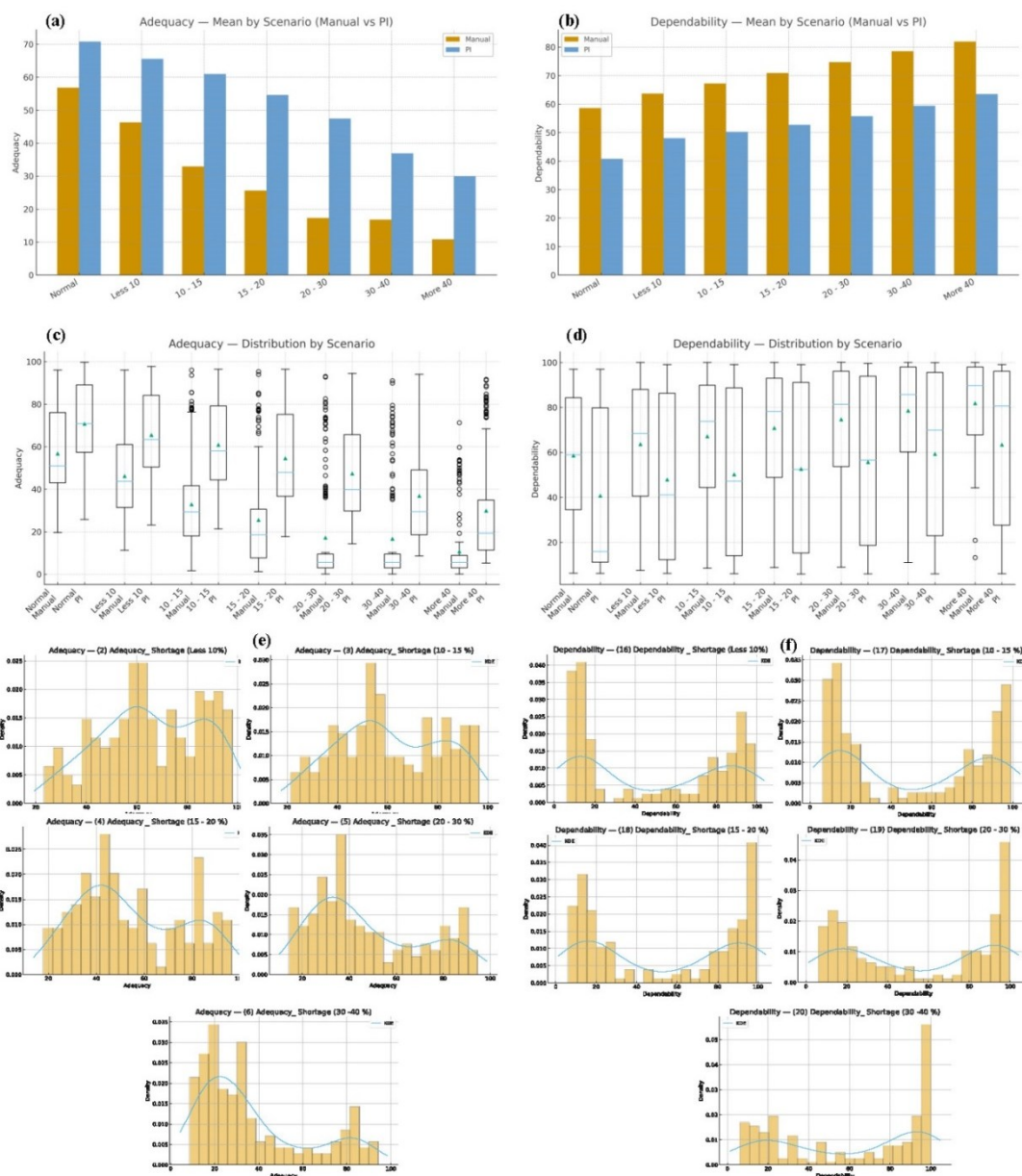


Figure 2. Statistical and Distributional Behavior of Adequacy and Dependability under Manual and Automatic-PI Operations

درحالی که CDFها پراکندگی آماری را توصیف می کنند، نقشه های حرارتی (شکل های e، f-۳) ساختار مکانی عملکرد را نشان می دهند. در حالت دستی، بخش بالادست شبکه (FCN 1-4) دارای کفایت نسبتاً بالا (۷۰-۸۰ درصد) و پایداری پایین (۲۰-۴۰ درصد) است، اما بخش پایین دست (FCN 9-13) به سرعت دچار افت می شود و کفایت به زیر ۴۰ درصد و پایداری به بالای ۷۰ درصد می رسد. این گرادیان سر تا ته، نشانه کاهش تدریجی جریان و خطاهای زمانی در سیستم باز دستی است. در مقابل، نقشه های PI تقریباً یکنواخت هستند. میانه کفایت برای اغلب FCNها تا 30% W/S بیش از ۷۰ درصد باقی می ماند و پایداری زیر ۴۰ درصد حفظ می شود. گرادیان بین سر و ته کمتر از ۱۰ درصد است که یک سوم مقدار مشاهده شده در حالت دستی است.

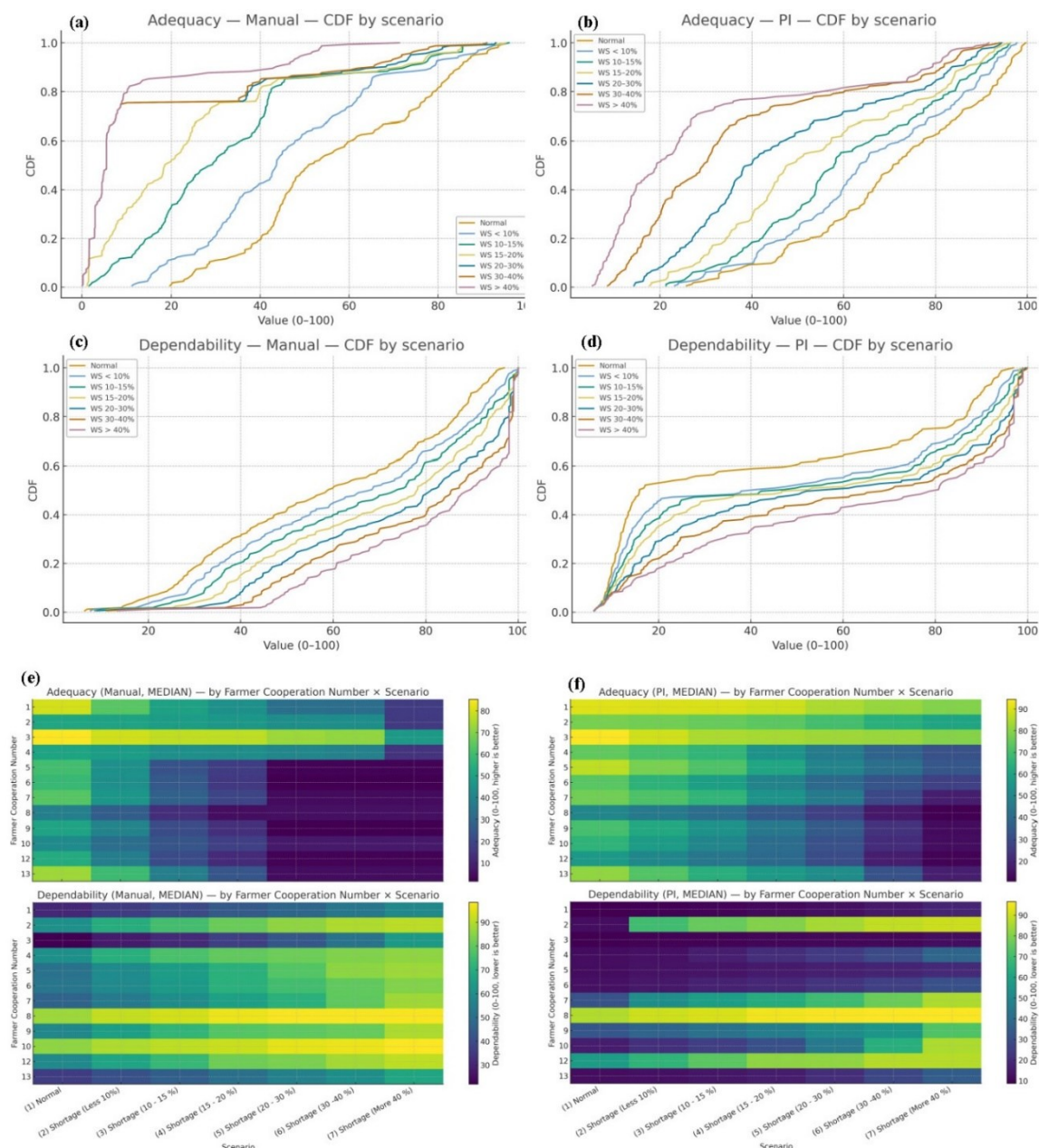


Figure 3. Empirical Cumulative Distribution and Median-Based Spatial Analysis of Adequacy and Dependability

ضریب تغییرات مکانی کفایت از ۰/۴۱ به ۰/۱۹ و پایداری از ۰/۴۴ به ۰/۲۲ کاهش یافته است که بیانگر نصف شدن نابرابری مکانی در اثر کنترل PI است. بررسی همزمان CDF و نقشه حرارتی، تصویری چندبعدی از عملکرد PI ارائه می‌دهد. از نظر کمی، سامانه PI افزایش ۴۰-۵۰ درصدی در میانگین کفایت و کاهش ۳۹ درصدی در میانگین پایداری نسبت به حالت دستی دارد. از دید احتمالی، سهم آب‌گیرهای کم‌تحويل (کم‌تر یا مساوی ۴۰ درصد) حدود ۵۹ درصد کاهش یافته و سهم مناطق پایدار (پایداری کم‌تر یا مساوی ۴۰ درصد) حدود ۶۳ درصد افزایش یافته است. از دید مکانی، گرادیان شدید بین درصدهای بالادست و پایین‌دست حذف شده است. این هم‌زمانی بهبود، که معمولاً دستیابی به آن

دشوار است، نشان می‌دهد کنترل PI محدودیت میان کفایت و پایداری را از بین می‌برد. از دید بهره‌برداری، یافته‌های شکل (۳) نشان می‌دهد که کنترل PI تنها باعث افزایش کارایی نمی‌شود بلکه ساختار مدیریت ریسک شبکه را نیز بهبود می‌دهد. کاهش واریانس پایداری موجب کاهش عدم اطمینان در برنامه‌ریزی آبیاری می‌شود و توزیع یکنواخت کفایت از عدالت در حقوق آبی پشتیبانی می‌کند. در مقیاس حوضه، این ثبات هماهنگی میان رهاسازی سد و تحویل کانالی را افزایش می‌دهد. از منظر سیاست‌گذاری، شواهد کمی مبنی بر افزایش ۴۰ درصدی کفایت و کاهش ۳۹ درصدی پایداری در هفت سناریو، توجیه اقتصادی و فنی روشنی برای سرمایه‌گذاری در اتوماسیون فراهم می‌کند. به طور خلاصه، شکل (۳) نشان می‌دهد که کنترل PI به‌طور هم‌زمان سه هدف را محقق می‌کند: هدف اول قابلیت اعتماد احتمالی (منحنی‌های CDF تندتر)، هدف دوم عدالت مکانی (نقشه‌های حرارتی مسطح‌تر) و هدف سوم کاهش عدم قطعیت سامانه. در نتیجه شبکه از یک سیستم شکننده و وابسته به عرضه به زیرساختی پایدار و پاسخ‌گو به نیاز تبدیل می‌شود که قادر است در برابر تغییرات اقلیمی تاب‌آور باقی بماند.

شکل (۴) تحول مکانی عملکرد شبکه آبیاری را تحت کنترل خودکار PI از طریق نقشه‌های جفتی کفایت (شکل‌های i, g, e, c, a-۴) و پایداری (j, h, f, d, b-۴) در پنج سناریوی پی‌درپی کمبود جریان ($WS < 10\%$ ، $WS 10 - 15\%$ ، $WS 15 - 20\%$ ، $WS 20 - 30\%$ و $WS 30 - 40\%$) نشان می‌دهد. این ۱۰ شکل، تصویری کمی و کیفی از واکنش شبکه در برابر تنش هیدرولوژیکی هنگام بهره‌برداری با کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی (PI) ارائه می‌کنند. برخلاف بهره‌برداری دستی که در شرایط کمبود به‌سرعت دچار فروپاشی عملکردی می‌شود، شبکه کنترل‌شده با PI پایداری مکانی، افت تدریجی و انسجام عملکردی خود را حتی در شرایط کمبود شدید حفظ می‌کند. نقشه‌های کفایت، الگوی روشن و منظم واکنش شبکه را با افزایش شدت کمبود نشان می‌دهند. در شرایط کمبود خفیف ($WS < 10\%$)، تقریباً کل شبکه در کلاس کفایت بالا (بیش‌تر یا مساوی ۸۰ درصد) قرار دارد. یکنواختی رنگ‌ها در این شکل‌ها بیانگر آن است که نوسانات ورودی با تنظیمات جزئی در پیچ‌ها جبران می‌شود و یکنواختی تقریباً کامل در تحویل آب برقرار است. ضریب تغییرات مکانی کفایت در این مرحله کمتر از ۰/۱۵ است. در $WS 10 - 15\%$ نخستین نشانه‌های تفکیک مکانی ظاهر می‌شود، عمدتاً در شاخه‌های انتهایی کانال‌های فرعی، میانگین کفایت کمی به حدود ۸۵ درصد کاهش می‌یابد، اما این افت گسترده نیست. سامانه PI کاهش تدریجی و منظم را حفظ کرده و تنها ۱۲ درصد از آب‌گیرها به زیر ۷۰ درصد سقوط می‌کنند. در $WS 15 - 20\%$ ، فشار متوسط سبب ظهور آسیب‌پذیری‌های موضعی می‌شود؛ خوشه‌های کوچکی از سلول‌ها در انتهای کانال‌ها به ۶۰-۷۰ درصد می‌رسند، اما همچنان ۷۸ درصد شبکه در محدوده بیش‌تر یا مساوی ۸۰ درصد باقی می‌ماند. در گذار از $WS 20 - 30\%$ به $WS 30 - 40\%$ ، میانگین کفایت به حدود ۷۰ درصد کاهش می‌یابد اما تکه‌تکه‌شدن مکانی هنوز کم است. نواحی با کفایت زیر ۶۰ درصد محدود به بخش‌های کم‌اولویت هستند. حتی در $WS 30 - 40\%$ ، بیش از ۶۰ درصد شبکه بالاتر از ۷۰ درصد کفایت دارد و تنها ۸-۱۰ درصد منطقه مقادیری زیر ۵۰ درصد نشان می‌دهد. این پایداری مکانی در مقایسه با نقشه‌های دستی (که در آن مناطق کم‌کفایت به‌سرعت بیش از نیمی از شبکه را فرا می‌گیرند) نشان می‌دهد که کنترل PI آستانه فروپاشی مکانی را حدود دو سطح سناریو (معادل ۱۰-۱۵ درصد کاهش ورودی) به تأخیر می‌اندازد.

شکل‌های پایداری این تاب‌آوری را به‌صورت معکوس نشان می‌دهند. در حالت کنترل PI، پایداری پایین (صفر-۳۰ درصد، وضعیت مطلوب) در کمبودهای خفیف غالب است. با کاهش بیش‌تر جریان، پایداری افزایش می‌یابد اما این افزایش تدریجی است نه ناگهانی. در $WS < 10\%$ و $WS 10 - 15\%$ بیش از ۸۵ درصد سلول‌ها پایداری کم‌تر یا مساوی ۴۰ درصد دارند. در $WS 15 - 20\%$ این سهم به ۷۶ درصد کاهش می‌یابد و در $WS 30 - 40\%$ هنوز بالای ۶۰ درصد

باقی می‌ماند. از نظر مکانی، الگوی افزایش پایداری بسیار منظم است. به‌جای لکه‌های تصادفی ناپایداری، شبکه کنترل‌شده با PI نوارهای باریکی از پایداری متوسط (۵۰-۶۰ درصد) در انتهای کانال‌ها ایجاد می‌کند، درحالی‌که بخش‌های میانی و بالادست در محدوده پایدار باقی می‌مانند. نبود مناطق وسیع با پایداری بالا (بیش‌تر از ۷۰ درصد) حتی در سخت‌ترین شرایط نشان می‌دهد که PI از گسترش نوسانات در شبکه جلوگیری می‌کند. میانگین پایداری شبکه از ۳۱ درصد در $WS < 10\%$ به ۴۵ درصد در $WS 30 - 40\%$ می‌رسد (افزایش ۱۴ درصدی با وجود کاهش ۳۰ درصدی ورودی، درحالی‌که در حالت دستی این افزایش حدود ۴۰ درصد است)، این بدان معناست که کنترل بازخوردی رشد واریانس را به یک‌سوم مقدار حالت باز کاهش می‌دهد.

یکی از نتایج مهم شکل (۴)، هم‌بستگی واضح بین کفایت و پایداری است. نواحی با کفایت بالا همواره با پایداری پایین هم‌راستا هستند، اما این رابطه در مقایسه با حالت دستی بسیار منظم‌تر و پیوسته‌تر است. ضریب هم‌بستگی بین دو شاخص در کنترل PI به‌طور میانگین -0.78 است، درحالی‌که در حالت دستی -0.92 گزارش شده است. کاهش شدت هم‌بستگی نشان می‌دهد که افت جزئی در کفایت لزوماً به افزایش شدید پایداری منجر نمی‌شود؛ کنترل‌کننده حساسیت قابلیت اطمینان را در برابر کمبود کاهش می‌دهد، ویژگی‌ای که اساس تاب‌آوری هیدرولیکی محسوب می‌شود. از دید نظریه تاب‌آوری، یکنواختی مکانی عملکرد به اندازه میانگین آن اهمیت دارد. تداوم الگوی منسجم کفایت و پایداری در تمام شکل‌ها نشان می‌دهد که سامانه PI حافظه مکانی دارد؛ اختلالات در یک ناحیه به‌صورت محلی جذب شده و به پایین‌دست منتقل نمی‌شوند. این پدیده حاصل اصلاح انتگرالی در الگوریتم PI است که خطاهای تجمعی بلندمدت را کاهش می‌دهد. بنابراین، حتی با نوسان ورودی بالادست، شبکه مانند یک سامانه یکپارچه و خوداصلاح‌گر رفتار می‌کند. شکل (۴) نشان می‌دهد که کنترل PI رفتار مکانی شبکه آبیاری را از تکه‌تکه‌شدن واکنشی به تنظیم پیش‌نگر تبدیل می‌کند. در حالت دستی، توزیع آب وابسته به توالی کانال‌هاست و اغتشاشات بالادست در پایین‌دست تشدید می‌شوند. در کنترل PI، بازخورد باعث می‌شود همه تنظیم‌کننده‌ها تقریباً هم‌زمان و براساس شرایط محلی واکنش نشان دهند و شبکه به‌طور هماهنگ عمل کند. این هم‌زمانی مکانی در یکنواختی رنگ‌ها و نبود پرش‌های ناگهانی بین کلاس‌های بالا و پایین آشکار است. از نظر عملی، کنترل PI نابرابری بین کشاورزان را با حفظ کیفیت خدمات یکنواخت صرف‌نظر از موقعیت کاهش می‌دهد. کانالی در بخش انتهایی که قبلاً تنها ۳۰-۴۰ درصد از حقاچه خود را دریافت می‌کرد اکنون ۶۰-۷۰ درصد دریافت می‌کند و شکاف خدمات به نصف کاهش یافته است. این بهبود به‌طور مستقیم به افزایش عدالت در تولید محصول و کاهش مصرف انرژی منجر می‌شود، زیرا نیاز به پمپاژ و آب زیرزمینی کم‌تر می‌شود. از دید مدیریتی، نقشه‌ها نشان می‌دهند که اتوماسیون شفافیت عملیاتی را افزایش می‌دهد. واکنش یکپارچه تنظیم‌کننده‌ها عملکردی قابل ردیابی ایجاد می‌کند و مدیران می‌توانند ناکارایی‌های محلی را بدون تأثیر سیستماتیک شناسایی کنند. پایداری مکانی قابل اندازه‌گیری (یعنی توانایی حفظ یکنواختی مکانی در برابر فشار خارجی) پیامد مستقیم راهبردهای سازگاری با اقلیم است. به‌صورت کمی، حفظ بیش از ۶۰ درصد کفایت برای ۸۰ درصد از منطقه در کاهش ۳۰-۴۰ درصدی جریان ورودی به معنای شاخص تاب‌آوری بالاتر از 0.8 است که بسیار بیش‌تر از مقادیر معمول در شبکه‌های غیرکنترلی است. در مجموع، شکل (۴) شواهد دیداری و عددی روشنی ارائه می‌دهد که کنترل PI هم ثبات و هم عدالت مکانی را تضمین می‌کند. کفایت بالا و یکنواخت توزیع می‌شود، پایداری پایین و محدود باقی می‌ماند و افت مکانی به‌جای ناگهانی‌بودن، تدریجی و قابل پیش‌بینی است. کنترل‌کننده PI بازخورد زمانی را به ثبات مکانی تبدیل می‌کند، تحولی بنیادین که پایداری بلندمدت شبکه‌های تحویل آب سطحی را تضمین می‌کند.

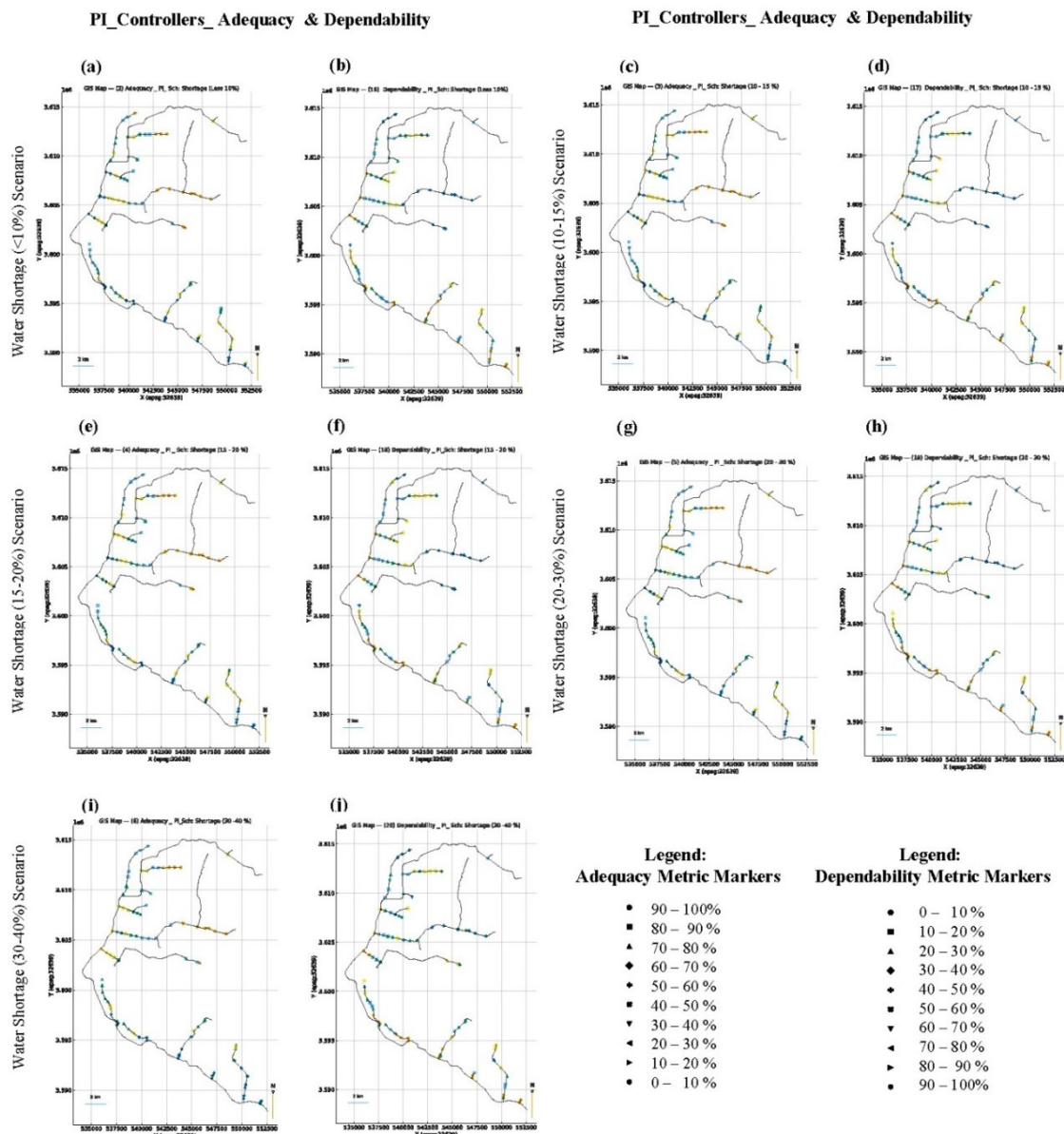


Figure 4. Spatial Distribution of Adequacy and Dependability under Automatic-PI Control across Water-Shortage Scenarios

شکل (۵) نمایی یکپارچه از چگونگی تغییر شاخص کفایت در ۱۳ کانال فرعی شبکه آبیاری در سناریوهای مختلف تأمین آب ارائه می‌دهد. هر کانال، مسیر تغییر کفایت خود را در هفت سناریوی کمبود جریان (شرایط عادی، $WS < 10\%$ ، $WS 10 - 15\%$ ، $WS 15 - 20\%$ ، $WS 20 - 30\%$ ، $WS 30 - 40\%$ و $WS > 40\%$) نمایش می‌دهد. با کنار هم قراردادن این مسیرها، شکل نشان می‌دهد که سامانه خودکار PI چگونه پایداری عملکرد و عدالت مکانی را با افزایش تنش هیدرولوژیکی حفظ می‌کند. الگوی نوارهای کفایت درواقع ابزاری تشخیصی برای ارزیابی تاب‌آوری، حساسیت بین‌سناریویی و توان شبکه در حفظ عملکرد در شرایط کاهش ورودی است. در کنترل PI، تمام ۱۳ کانال سطح بالایی از کفایت را در تمام سناریوها حفظ می‌کنند، اما دامنه و سرعت افت در میان کانال‌ها متفاوت است. میانگین کفایت شبکه در شرایط عادی حدود ۸۷ درصد است و در کمبودهای خفیف ($WS < 10\%$) به حدود ۷۸ درصد کاهش می‌یابد. در $WS 20 - 30\%$

میانگین به ۷۰ درصد و در $WS > 40\%$ به حدود ۵۸ درصد می‌رسد، که بیانگر توانایی سیستم در جبران پویای کسری ورودی است. کانال‌های بالادست (C1-C4) بالاترین سطح کفایت را دارند (بیش‌تر یا مساوی ۸۰ درصد تا $WS 30 - 40\%$). کانال‌های میانی (C5-C9) افت متوسطی را تجربه می‌کنند (حدود ۷۰ درصد در $WS 20 - 30\%$ و ۶۰ درصد در $WS > 40\%$). کانال‌های پایین‌دست (C10-C13) بیش‌ترین حساسیت را دارند، اما افت آن‌ها کنترل شده است (کفایت از حدود ۷۵ درصد در حالت عادی به حدود ۵۰ درصد در $WS > 40\%$ کاهش می‌یابد). شیب افت کفایت در کانال‌ها بین ۰/۵- تا ۰/۹- درصد به‌ازای هر درصد کمبود است، درحالی‌که در حالت دستی این مقدار بین ۱/۶- تا ۲/۰- گزارش شده است؛ یعنی کنترل PI شدت افت را بیش از ۶۰ درصد کاهش می‌دهد. از نظر مکانی، یکنواختی چشم‌گیری بین کانال‌ها دیده می‌شود. ضریب تغییرات مکانی کفایت از ۰/۰۹ در شرایط عادی به ۰/۲۲ در $WS > 40\%$ می‌رسد، درحالی‌که در حالت دستی بیش از ۰/۵۵ بود. این کاهش چشم‌گیر در نابرابری مکانی نشان می‌دهد که کنترل بازخوردی، جریان ورودی را به‌صورت متناسب بین کانال‌ها توزیع می‌کند و از نابرابری متداول ابتدا به انتها در سیستم‌های باز جلوگیری می‌نماید.

منحنی‌های بین‌سناریویی کفایت دو ناحیه رفتاری مشخص دارند: یک ناحیه تاب‌آور (Resilient zone) شامل سناریوهای عادی تا $WS 20 - 30\%$ که کفایت در آن بالا و تقریباً ثابت (بیش‌تر از ۷۰ درصد) است. دو ناحیه افت تطبیقی (Adaptive degradation) شامل $WS 30 - 40\%$ تا $WS > 40\%$ که کفایت با شیبی ملایم کاهش می‌یابد و در محدوده ۵۵-۶۵ درصد تثبیت می‌شود. در ناحیه تاب‌آور، کنترل‌کننده PI با تنظیم جزئی درپچه‌ها تغییرات ورودی را جبران می‌کند. واریانس بین کانالی بسیار اندک است و انحراف معیار کفایت کمتر از هفت درصد باقی می‌ماند. در کمبودهای شدیدتر از $WS 30\%$ ، ظرفیت اصلاح تناسبی اشباع می‌شود، اما جزء انتگرالی الگوریتم PI از انباشت خطا جلوگیری کرده و مانع افت ناگهانی عملکرد می‌شود. افت کفایت در نتیجه، غیرخطی اما پیوسته است، برخلاف فروپاشی ناگهانی در سیستم دستی که در $WS 15 - 20\%$ اتفاق می‌افتد. آستانه گذار حدود $WS 30\%$ است، زمانی‌که تمام ظرفیت کنترل فعال می‌شود. با این حال، حتی فراتر از این نقطه نیز هماهنگی عملکرد حفظ می‌شود و هیچ کانالی رفتار واگرا ندارد. ضریب هم‌بستگی بین کانال‌ها در تمام سناریوها بالای ۰/۹۳ باقی می‌ماند که بیانگر واکنش هم‌زمان و منسجم کل شبکه است. نزدیکی نوارهای کفایت بین کانال‌ها نشان‌دهنده عدالت مکانی بالای سیستم PI است. در حالت دستی، کانال‌های بالادست حدود ۹۰ درصد کفایت و پایین‌دست کمتر از ۳۰ درصد داشتند (اختلاف بیش از ۶۰ درصد). سیستم PI این شکاف را حتی در $WS > 40\%$ به کمتر از ۲۰ درصد کاهش داده است. این فشردگی نابرابری صرفاً عددی نیست بلکه نشانگر توانایی خودمتعادل‌سازی سیستم از طریق بازخورد است. از دید تاب‌آوری، حفظ کفایت متوسط (بیش‌تر یا مساوی ۶۰ درصد) در تمام کانال‌ها در شرایط کمبود شدید نشانه تاب‌آوری ساختاری است. نسبت میانگین کفایت در $WS 30 - 40\%$ به شرایط عادی حدود ۰/۸ است که برای سیستم‌های آبیاری کانالی مقدار بالایی محسوب می‌شود. یکنواختی واکنش کانال‌ها نیز بیانگر پایداری ساختاری است؛ یعنی افزایش عدم قطعیت هیدرولوژیکی باعث گسترش نابرابری نمی‌شود. جزء انتگرالی کنترل PI با توزیع تدریجی جبران در زمان، از نوسانات بیش از حد جلوگیری کرده و ثبات بلندمدت را تضمین می‌کند.

مقایسه نتایج با حالت دستی سه تغییر اساسی را نشان می‌دهد؛ ۱- پایداری: افت کفایت تدریجی و قابل کنترل است، نه ناگهانی؛ ۲- عدالت: واریانس بین کانال‌ها بیش از نصف کاهش یافته است و ۳- پیش‌بینی‌پذیری: الگوی واکنش در همه سناریوها مشابه است، که بیانگر کنترل‌پذیری بالا و کاهش عدم قطعیت مدیریتی است. این ویژگی‌ها ساختار تاب‌آوری شبکه را بازتعریف می‌کنند. برخلاف اپراتورهای دستی که واکنش خطی به تغییر ورودی دارند، کنترل PI تعدیل غیرخطی و تدریجی ایجاد می‌کند. پیامد مدیریتی آن این است که شبکه می‌تواند دوره‌های خشک‌سالی طولانی‌تری را پیش از رسیدن به سطح بحرانی کفایت (کمتر از ۴۰ درصد) تحمل کند. از نظر عملی، این پایداری از رهاسازی بیش‌ازحد سدها جلوگیری کرده، نیاز به

مداخلات اضطراری را کاهش داده و وابستگی به آب زیرزمینی را کم می‌کند. همچنین شفافیت مدیریتی را افزایش می‌دهد، زیرا می‌توان الگوی کفایت را براساس سناریوی ورودی پیش‌بینی کرد و برنامه‌ریزی دقیق‌تری انجام داد. شکل (۵) هم‌افزایی مکانی-زمانی ایجادشده توسط کنترل PI را به‌خوبی نشان می‌دهد. نوارهای کفایت در ۱۳ کانال فرعی گواه آن هستند که کنترل‌کننده نه‌تنها میانگین عملکرد را افزایش می‌دهد بلکه فرصت آبی برابر را نیز برقرار می‌سازد. ترکیب هم‌بستگی بالا ($r > 0.93$)، کاهش پراکندگی ($CV < 0.22$) و حفظ میانه کفایت بالای ۶۰ درصد در کمبود ۴۰ درصد ورودی نشان‌دهنده سامانه‌ای بسیار تاب‌آور و عادلانه است. از دید هیدرولوژیکی و سیاستی، این وضعیت گذار از مدیریت واکنشی به تنظیم پیش‌نگر را نشان می‌دهد. سامانه PI با استفاده از بازخورد پیوسته، خودبه‌خود تعادل شبکه را حفظ می‌کند و اجازه نمی‌دهد کمبودها به بی‌نظمی تبدیل شوند. این تغییر بنیادی، سامانه آبیاری را از یک ساختار شکننده به زیرساختی پایدار، منصفانه و قابل اعتماد تبدیل می‌کند که آماده مواجهه با تغییرات اقلیمی و کم‌آبی‌های آینده است.

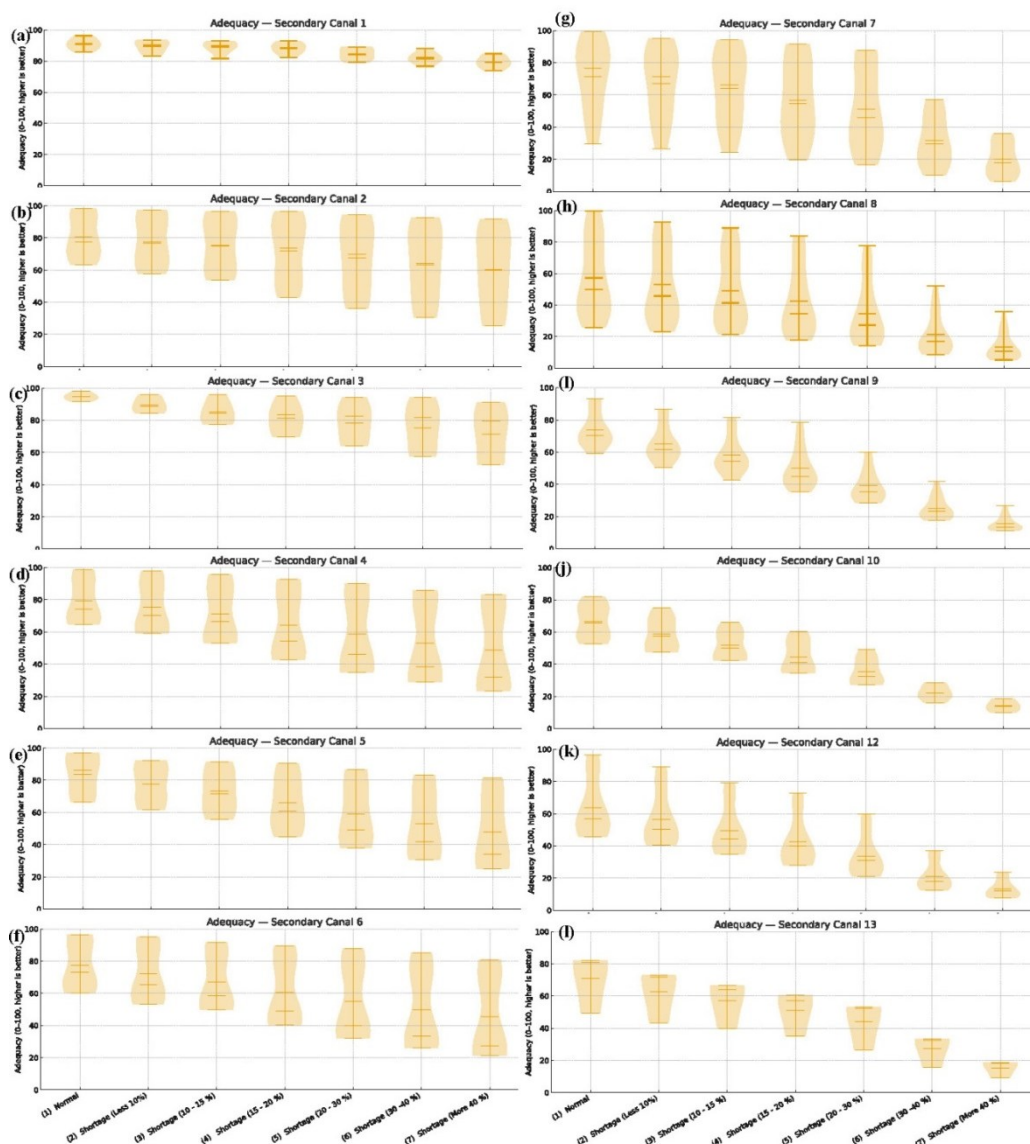


Figure 5. Inter-Scenario Variation of Adequacy across Thirteen Secondary Canals under Automatic-PI Operation

جدول (۱) مقایسه‌ای جامع و کمی از عملکرد دو سامانه بهره‌برداری دستی و خودکار PI را در هفت سناریوی کمبود جریان از شرایط عادی تا کمبود بیش از ۴۰ درصد نشان می‌دهد. شاخص‌های موردبررسی شامل کفایت (میزان تحویل آب؛ هرچه بیش‌تر بهتر) و پایداری (ثبات زمانی؛ هرچه کم‌تر بهتر) هستند که به‌صورت آماری با میانگین، میانه، انحراف معیار، ضریب تغییرات و صدک‌های P10 و P90 ارائه شده‌اند. این داده‌ها تصویری کمی از سطح عملکرد و پراکندگی خدمات آبی در سراسر شبکه آبیاری فراهم می‌کنند. در سامانه دستی، کفایت به‌شدت و به‌صورت غیرخطی با افزایش کمبود کاهش می‌یابد. میانگین کفایت از ۵۶/۸ درصد در حالت عادی به ۱۰/۸ درصد در کمبود بیش از ۴۰ درصد می‌رسد (کاهش ۸۱ درصدی). میانه از ۵۰/۹ به ۵/۶ درصد افت کرده و نشان می‌دهد اغلب بهره‌برداران دچار کم‌تحویلی شدید هستند. ضریب تغییرات از ۰/۳۶ به ۱/۴۲ افزایش یافته است، یعنی پراکندگی مکانی چهار برابر شده است. صدک پایین (P10) از ۲۸/۹ به ۱/۷ درصد و صدک بالا (P90) از ۸۴/۹ به ۴۳/۴ درصد کاهش یافته است، حتی بهترین مناطق نیمی از کارایی خود را از دست می‌دهند. این الگو نشان می‌دهد کنترل دستی قادر به جبران تغییرات ورودی یا تلفات انتقال نیست. در مقابل، سامانه PI سطح کفایت را در همه سناریوها در سطح بالاتری حفظ کرده است. میانگین از ۷۰/۸ درصد در حالت عادی به ۲۹/۹ درصد در $WS > 40\%$ کاهش می‌یابد (کاهش ۴۱ درصدی)، که تقریباً نصف مقدار حالت دستی است. میانه نیز از ۷۰/۸ به ۱۹/۲ درصد افت می‌کند که همچنان بسیار بالاتر از حالت دستی است. ضریب تغییرات از ۰/۲۸ به ۰/۸۶ افزایش یافته اما زیر ۱ باقی مانده است. صدک بالا (P90) در محدوده بالا (۹۵/۸ به ۷۹/۲ درصد) باقی می‌ماند و نشان می‌دهد نواحی برتر همچنان نزدیک به هدف آبی عمل می‌کنند. به‌طور میانگین، سامانه PI در مقایسه با حالت دستی ۴۰ درصد کفایت بیش‌تری دارد و این اختلاف در سناریوی $WS 20 - 30\%$ به حدود ۴۷ درصد می‌رسد. بهبود میانه نیز حدود ۴۵ درصد است. بهبود صدک پایین (P10 حدود ۲۷ درصد) و کاهش CV (۰/۶-) حاکی از کاهش ناهمبندی و حفظ حداقل خدمات در سراسر شبکه است.

Table 1. Comprehensive Interpretation of Results Table (Manual vs Automatic-PI Systems)

Operating Systems	Operational Scenarios	Co-ops Number	Mean	Median	Std	CV	P10	P90
Manual Adequacy Metric	Normal	163	56.83	50.91	20.41	0.36	28.87	84.90
	WS < 10%	163	46.29	43.66	20.44	0.44	19.13	78.66
	WS_10 - 15 %	163	32.93	29.25	21.89	0.66	8.04	72.79
	WS_15 - 20 %	163	25.61	18.54	23.82	0.93	1.54	71.47
	WS_20 - 30 %	163	17.29	5.56	25.07	1.45	1.67	67.38
	WS_30 - 40 %	163	16.79	5.56	24.09	1.43	1.67	64.84
	WS > 40 %	163	10.83	5.56	15.36	1.42	1.67	43.37
PI Adequacy Metric	Normal	163	70.83	70.82	19.81	0.28	45.09	95.78
	WS < 10%	163	65.57	63.42	20.13	0.31	40.44	92.67
	WS_10 - 15 %	163	60.99	57.95	20.60	0.34	34.97	89.43
	WS_15 - 20 %	163	54.62	47.93	22.15	0.41	28.76	86.66
	WS_20 - 30 %	163	47.45	39.78	23.24	0.49	21.73	83.54
	WS_30 - 40 %	163	36.94	29.47	24.46	0.66	13.26	81.67
	WS > 40 %	163	29.95	19.24	25.84	0.86	7.87	79.22
Manual Dependability Metric	Normal	163	58.63	58.96	25.80	0.44	25.52	90.71
	WS < 10%	163	63.72	68.38	25.70	0.40	29.28	95.10
	WS_10 - 15 %	163	67.24	73.83	24.91	0.37	33.17	97.94
	WS_15 - 20 %	163	70.93	78.20	23.92	0.34	36.90	98.00
	WS_20 - 30 %	163	74.73	81.31	22.79	0.30	41.06	98.80
	WS_30 - 40 %	163	78.59	85.69	21.28	0.27	46.47	99.00
	WS > 40 %	163	81.97	89.67	19.19	0.23	52.32	99.00
PI Dependability Metric	Normal	163	40.82	15.85	34.42	0.84	9.04	90.12
	WS < 10%	163	48.02	41.09	35.92	0.75	9.38	93.77
	WS_10 - 15 %	163	50.26	47.14	36.12	0.72	9.84	95.80
	WS_15 - 20 %	163	52.73	52.43	36.47	0.69	10.21	97.00
	WS_20 - 30 %	163	55.76	56.53	35.91	0.64	11.04	97.36
	WS_30 - 40 %	163	59.40	69.91	35.26	0.59	11.89	97.77
	WS > 40 %	163	63.50	80.70	34.25	0.54	13.31	98.00

به طور مشابه نتایج ارائه شده در جدول (۱) نشان می دهد که در بهره برداری دستی، میانگین پایداری از $58/6\%$ درصد در شرایط عادی به 82% درصد در کمبود شدید افزایش می یابد (افزایش 23% درصدی) و بیانگر دو برابر شدن نوسانات زمانی است. میانه از 59 به $89/7$ درصد افزایش می یابد و بیش تر درصدها ناپایدار می شوند. CV از $0/44$ به $0/23$ کاهش یافته، اما نه به دلیل بهبود بلکه به علت تخریب یکنواخت؛ کل شبکه به وضعیت ناپایدار نزدیک می شود. در کنترل PI، میانگین پایداری از $40/8$ درصد در حالت عادی به $63/5$ درصد در $WS > 40\%$ می رسد (افزایش 23% درصدی). این مقدار در کمبود شدید تقریباً معادل مقدار اولیه در حالت دستی است. میانه از $15/9$ به $80/7$ درصد افزایش می یابد، اما در هر سناریو پایین تر از حالت دستی باقی می ماند. CV از $0/84$ به $0/54$ کاهش یافته و یکنواختی عملکرد را نشان می دهد. صدک پایین حدود $9-13$ درصد ثابت می ماند، یعنی بخشی از شبکه تحویل بسیار پایدار دارد. رشد تدریجی پایداری در مقابل افزایش سریع در حالت دستی، واکنش متناسب سیستم PI را نشان می دهد. به طور میانگین، PI نسبت به دستی 39 درصد پایداری کمتری (یعنی ثبات بیش تر) دارد و تفاوت میانه نیز حدود 45 درصد است. این الگو با نتایج کفایت هم راستا بوده و بیانگر اثر تثبیت کننده در کل شبکه است. افزایش کفایت و کاهش پایداری به طور هم زمان بیانگر عملکرد پایدار و منسجم کنترل PI است. شیب رابطه بین دو شاخص از $-0/88$ در حالت دستی به $-0/35$ در حالت PI کاهش یافته است، یعنی وابستگی بین کارایی و ثبات کمتر شده است. به زبان ساده، افت جزئی در کفایت دیگر به بی ثباتی شدید منجر نمی شود. کاهش CV در هر دو شاخص بیانگر کاهش انتشار نوسانات در طول شبکه است، بدین معنا که اختلالات محلی به پایین دست منتقل نمی شوند و سطح آب کانال ها یکنواخت تر باقی می ماند. بهبودهای عددی حاصل از کنترل PI پیامدهای کیفی گسترده ای دارند. اول، نرخ افت عملکرد کنترل شده است؛ شاخص ها تدریجی تغییر می کنند و مدیر می تواند پیش از بحران مداخله کند. دوم، عدالت مکانی به طور چشم گیری افزایش یافته است؛ فاصله صدک ها و CV کمتر شده و تفاوت بین بهره برداران کاهش یافته است. سوم، تاب آوری شبکه افزایش یافته است؛ سیستم در کمبود 40 درصد همچنان بیش از 60 درصد کفایت دارد.

۴. نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که بهره برداری از شبکه آبیاری نکوآباد با استفاده از سامانه کنترل خودکار مبتنی بر الگوریتم تناسبی-انتگرالی (PI)، موجب بهبود چشم گیر عملکرد شبکه در ابعاد مختلف از جمله کفایت، پایداری، عدالت مکانی و تاب آوری ساختاری می شود. تحلیل های آماری، مکانی و توزیعی در سناریوهای متوالی کمبود جریان ورودی، سه تحول اساسی را در ساختار بهره برداری شبکه آشکار ساخت؛ اول افزایش کفایت تحویل آب: سامانه PI توانست حتی در شرایط کمبود شدید، سطح قابل قبولی از کفایت را برای اغلب آب گیرها حفظ کند، درحالی که سامانه دستی دچار افت شدید و نابرابر عملکرد شد، دوم کاهش نوسانات زمانی و مکانی: شاخص پایداری در سامانه PI به صورت تدریجی و کنترل شده افزایش یافت، درحالی که در سامانه دستی نوسانات شدید و ناگهانی مشاهده شد. کاهش ضریب تغییرات و فاصله صدک ها در هر دو شاخص، بیانگر کاهش پراکندگی و افزایش یکنواختی عملکرد بود و سوم ارتقای عدالت و تاب آوری شبکه: کنترل کننده PI با ایجاد هم زمانی در واکنش تنظیم کننده ها، از گسترش نابرابری مکانی جلوگیری کرده و ساختار شبکه را به سامانه ای منسجم، قابل پیش بینی و مقاوم در برابر تنش های هیدرولوژیکی تبدیل نمود. از منظر مدیریتی، این دستاوردها نشان می دهند که اتوماسیون بهره برداری نه تنها موجب افزایش کارایی و قابلیت اعتماد می شود، بلکه زمینه ساز گذار از مدیریت واکنشی به تنظیم پیش نگر در سامانه های آبیاری است. کنترل PI با استفاده از بازخورد پیوسته، تعادل شبکه را حفظ کرده و امکان برنامه ریزی دقیق تر، کاهش وابستگی به منابع آب زیرزمینی، و افزایش تاب آوری در برابر

تغییرات اقلیمی را فراهم می‌سازد. این نتیجه کاربردی، امکان پیاده‌سازی چارچوب‌های ارزیابی جامع، مانند چارچوب ارزیابی پایدار سامانه‌های بهره‌برداری منطبق بر پیوند آب-غذا-انرژی و چارچوب ارزیابی مبتنی بر ریسک شکست سیستم را برای مطالعات آتی فراهم می‌سازد.

۵. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۶. منابع

- Afrasiabikia, M., Akram, A. A., & Mendelsohn, R. (2017). Agricultural water allocation efficiency in a developing country canal irrigation system. *Environment and Development Economics*, 22(5), 574-595.
- 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
- Akkuzu, E., Ünal, H. B., & Karataş, B. S. (2007). Determination of water conveyance loss in the Menemen open canal irrigation network. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 31(1), 11-22.
- Barkhordari, S., & Shahdany, S. M. H. (2022). A systematic approach for estimating water losses in irrigation canals. *Water Science and Engineering*, 15(2), 161-169.
- 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.
- Fipps, G. (2000). Potential water savings in irrigated agriculture for the Rio Grande Planning Region (Region M). Texas Cooperative Extension, Texas A&M University System.
- Hosseini Jolfan, M., Hashemy Shahdany, S. M., Javadi, S., Mallakpour, I., & Neshat, A. (2020). Effects of canal automation on reducing groundwater extraction within irrigation districts: Case study of Qazvin irrigation district. *Irrigation and Drainage*. 11-24, (1)69.
- Jolfan, M. H., Shahdany, S. M. H., Javadi, S., Milan, S. G., Neshat, A., Berndtsson, R., & Tork, H. (2023). Modernization in agricultural water distribution system for aquifer storage and recovery—A case study. *Agricultural Water Management*. 108270, 282.
- Isapoor, S., Montazer, A., Van Overloop, P. J., & Van De Giesen, N. (2011). Designing and evaluating control systems of the Dez main canal. *Irrigation and Drainage*, 60(1), 70-79.
- Jadhav, P. B., Thokal, R. T., Mane, M. S., Bhange, H. N., & Kale, S. R. (2014). Improving conveyance efficiency through canal lining in command area: A Case Study. *International Journal of Engineering Innovation & Research*, 3(6), 820-826. doi: 10.30482/jeir.2014.51001.10045
- Kaghazchi, A., Shahdany, S. M. H., & Roozbahani, A. (2021). Simulation and evaluation of agricultural water distribution and delivery systems with a Hybrid Bayesian network model. *Agricultural Water Management*, 245(2), 106578. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106578
- Karimi Avargani, H., Hashemy Shahdany, S. M., Hashemi Garmdareh, S. E., & Liaghat, A. (2020). Determination of water losses through the agricultural water conveyance, distribution, and delivery system: Case study of Roodasht Irrigation District, Isfahan. *Water and Irrigation Management*, 10(1), 143-156. (In Persian).
- Kedir, Y. (2015). Estimation of conveyance losses of Wonji-Shoa sugar cane irrigation scheme in Ethiopia. *Journal of Environment and Earth Science*, 5(17), 2224-3216. doi: 10.30482/jeesj.2015.424501.3141
- Monem, M. J., & Schuurmans, W. (1992). Performance of canal delivery strategies and control systems. *IWMI Books, Reports H022428*. International Water Management Institute. <https://ideas.repec.org/p/iwt/bosers/h022428.html>
- Rahparast, D., & Hashemy Shahdany, S. M. (2024). Ensuring reliable water distribution in water shortages: Analyzing the dependability of manual operation system in NekoAbad irrigation network, Isfahan. *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, 58(2), 75-90. (In Persian).
- Ranjbar, R., Ghasemi, N., & Hashemy Shahdany, S. M. (2025). Stochastic model predictive control of an irrigation canal. *Journal of Hydroinformatics*, 27(4), 740-754.

- Shahrokhnia, M. A., & Javan, M. (2005). Seepage estimation and efficiency evaluation in Doroodzan irrigation system. *Journal of Water Management in Agriculture*, 1(2), 45-54. (In Persian).
- Shahrokhnia, M. A., & Olyan Ghiasi, A. (2018). Methods of seepage estimation in canals and evaluation of seepage and distribution efficiency in Doroodzan irrigation system. *Journal of Water Management in Agriculture*, 4(2), 27-36. (In Persian).
- Shahverdi, K., & Maestre, J. M. (2023). Holistic framework for canal modernization: Operation optimization, and economic and environmental analyses. *Water Resources Management*, 30(1), 1-20.
- 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.