



Spatio-Temporal Evaluation of Surface Water Adequacy and Dependability After Modernizing an Operating System Using a Decentralized Control Approach

A Case Study of the Abshar Irrigation District

Seyyed Mohammad Ahmadi¹ | Seied Mehdy Hashemy Shahdany^{2*} | Jaber Soltani³ | Maryam Varavipour⁴

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, smahmadi2020@ut.ac.ir

2. Department of Water Engineering, Aburaihan Faculty of Agricultural Technology, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, mehdi.hashemy@ut.ac.ir

3. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, jsoltani@ut.ac.ir

4. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, mvaravi@ut.ac.ir

Article History

Received January 04, 2024

Revised February 01, 2024

Accepted March 08, 2024

Abstract

This research investigates the impact of automating the Abshar irrigation network's main canal on the adequacy and stability of surface water distribution. To achieve this, the study analyzes 30 years of historical discharge data at the Abshar diversion dam and selects seven representative operational scenarios. It then employs the Integral-Delay (ID) hydraulic simulation model to simulate surface water distribution in the main canal under each scenario (a total of 540 simulations). These simulations are compared with results obtained using a simplified Integral-Delay (ID) mathematical model. Additionally, the research develops a decentralized PI automatic control system model for the network. This control system model is then integrated with the Integral-Delay (ID) hydraulic simulation model within the MATLAB environment. By utilizing system identification techniques, the study determines the proportional and integral gains for each controller in the control system. Finally, the performance of the automated control system is evaluated by analyzing the simulated surface water distribution results for the chosen scenarios using performance indices related to water distribution adequacy and stability. This allows for a comparison of the automated control system's effectiveness with the pre-automation scenario.

Keywords

Efficiency, Automation, Decentralized Operating systems, drought, agricultural water management



ارزیابی زمانی-مکانی کفایت و پایداری توزیع آب سطحی پس از خودکارسازی سامانه بهره‌برداری با بهره‌گیری از روش کنترل خودکار غیر متمرکز مطالعه موردی شبکه آبیاری آبشار اصفهان

سید محمد احمدی^۱ | سید مهدی هاشمی شاهدانی^{۲*} | جابر سلطانی^۳ | مریم وراوی پور^۴

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی

دانشگاه تهران، ۲۰۲۰ smahmadi@ut.ac.ir

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی

دانشگاه تهران، mehdi.hashemy@ut.ac.ir

۳. گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی (ابوریحان)، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی

دانشگاه تهران jsoltani@ut.ac.ir

۴. گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی (ابوریحان)، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی

دانشگاه تهران mvaravi@ut.ac.ir

تاریخ‌های مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۸

چکیده

این پژوهش در راستای ارتقای بهره‌وری در بخش انتقال، توزیع و تحویل آب سطحی، اقدام به ارزیابی عملکرد سامانه کنترل خودکار (PI) در توزیع کافی و پایدار آب سطحی تحت سناریوهای بهره‌برداری متأثر از کم‌آبی کرد. در این ارتباط، کانال اصلی شبکه آبیاری آبشار اصفهان به عنوان نمونه مطالعاتی انتخاب شد. هدف اصلی از انجام این پژوهش، بررسی تغییرات زمانی-مکانی کفایت و پایداری توزیع آب سطحی قبل و بعد از خودکارسازی در شرایط بهره‌برداری متأثر از کم‌آبی است. بررسی داده‌های تاریخی سامانه تأمین آب این شبکه به تعیین هفت سناریوی غالب بهره‌برداری منجر شد. در ادامه فرایند توزیع آب سطحی در کانال اصلی تحت هر سناریو در بهره‌برداری موجود و به کارگیری سامانه بهره‌برداری PI توسط شاخص‌های ارزیابی عملکرد کفایت و پایداری توزیع بررسی و مقایسه شد. نتایج تحقیق بیانگر آن بود که در آبگیرهای بالادستی میزان بهبود هر دو شاخص کفایت و پایداری توزیع آب سطحی پس از خودکارسازی مشهود است. در آبگیرهای میان‌دستی و پایین‌دستی میزان بهبود کفایت پس از خودکارسازی برای شاخص کفایت اندک و برای شاخص پایداری قابل توجه بود، ولی با شدت گرفتن کم‌آبی در دو سناریوی آخر عملاً تأثیر خودکارسازی از نظر کفایت توزیع منفی، ولی از نظر پایداری توزیع آب سطحی قابل دفاع بود.

کلیدواژگان

بهره‌وری، خودکارسازی، سامانه بهره‌برداری غیرمتمرکز، خشکسالی، مدیریت آب کشاورزی

مقدمه

تغییر الگوهای بارش و تغییرات دما به دلیل تغییر اقلیم، افزایش جمعیت و نیاز روزافزون به موارد غذایی، تغییر الگوی سبک زندگی و در نتیجه تشدید تقاضای مصرف آب در بخش‌های مختلف و عوامل دیگر سبب افزایش تقاضا برای مصرف آب در جهان شده و توجه محققان به استفاده بهینه از منابع آب موجود جلب شده است. در این میان، بخش کشاورزی به عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب عملکرد ضعیفی را در بهره‌وری بهینه از آب داشته است. در این بخش، حدود ۲/۷ میلیون کیلومتر مربع از زمین‌های کشاورزی جهان تحت آبیاری هستند که براساس اطلاعات موجود، آب مصرفی در بخش کشاورزی تقریباً ۸۵ درصد از منابع آب در دسترس را مصرف می‌کند. منبع تأمین آب آبیاری در این مناطق عمدتاً در دو قالب برداشت مستقیم از آب زیرزمینی یا توزیع آب سطحی. به صورت برداشت مستقیم از آب رودخانه یا انحراف آب از بند انحرافی که منبع تأمین آن آب رها شده از سد مخزنی. توسط شبکه‌های مجاری انتقال و توزیع آب (شبکه‌های آبیاری) آبیاری است [۱].

توسعه شبکه‌های آبیاری و زهکشی در پایین دست سدهای مخزنی عمدتاً با هدف بهبود کارایی انتقال، توزیع و تحویل آب سطحی و کاهش برداشت آب زیرزمینی در مناطق کشاورزی دنیا انجام می‌گیرد. در این زمینه درخور یادآوری است که یک شبکه آبیاری شامل کانال‌ها، مجاری بسته (لوله)، سازه‌های انتقال آب (شامل فلوم‌ها، کالورت، شیب‌شکن‌ها، شوت، سیفون معکوس و سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی)، جاده‌های ارتباطی و جاده‌های سرویس برای بهره‌برداری و نگهداری از شبکه، سازه‌ها تنظیم‌کننده سطح آب (آب‌بند)، سازه‌های آبیگیر، سازه‌های حفاظتی و سازه‌های اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به تعدد سازه‌های هیدرولیکی در یک شبکه آبیاری، مفهوم بهره‌برداری مؤثر از اهمیت خاصی برخوردار است. در اصل، تفسیر فیزیکی بهره‌برداری به این معناست که اپراتورهای تیم بهره‌برداری چگونه و تحت چه نوع برنامه ریزی زمانی فرایند تنظیم، باز و بسته کردن سازه‌های تنظیم سطح آب و سازه‌های تحویل آب (آبیگیرها) را در امتداد مسیر جریان در کانال‌های آبیاری انجام می‌دهند. به بیان دیگر، مفهوم بهره‌برداری در راستای تعیین یک برنامه زمان‌بندی حرکت جریان در کانال بر پایه نیاز آبیاری کانال پایین دست یا بر پایه تأمین آب از بالادست به کار برده می‌شود [۲]. بنابراین با توجه به توضیحات یاد شده، می‌توان این فرضیه را در نظر گرفت که شبکه‌های آبیاری با بهره‌گیری از مجموعه سازه‌های هیدرولیکی مختلف در مقایسه با سایر گزینه‌های مرسوم کشاورزی (شامل برداشت از آب‌های زیرزمینی، برداشت‌های مستقیم آب از رودخانه‌ها و انهار سنتی) قابلیت مدیریت دقیق‌تر تحویل حجمی آب بین کشاورزان را مهیا می‌کنند. لذا یک انگیزه قوی در زمینه بهبود عملکرد بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری با به‌کارگیری سامانه‌های کنترل خودکار. در قالب طرح‌های مدرن سازی. به عنوان یکی از راهکارهای اصلی بهبود کارایی شبکه‌ها در سطح دنیا معرفی شده است.

در این بین، با توجه به تعدد شبکه‌های آبیاری در آسیا و آمریکا [۳]، مطالعات و تحقیقات متنوعی در این زمینه روی شبکه‌های آبیاری این مناطق متمرکز شده‌اند. خودکارسازی سازه‌های تنظیم و آبیگیرها یکی از موضوعات پژوهش‌های یاد شده بوده است که در این راستا محققان برای توسعه الگوریتم‌های کنترل کارآمدتر تحقیقات متنوعی انجام داده‌اند. در واقع این الگوریتم‌های کنترل بر تنظیم سازه‌های هیدرولیکی کانال‌های آبیاری، متناسب با تک هدف یا اهداف متصور از بهره‌برداری مدرن این کانال‌ها متمرکز شده‌اند. دامنه وسیعی از الگوریتم‌های کنترل از تکنیک‌های طراحی بر پایه روش‌های کنترل کلاسیک تناسبی (P)، تناسبی-انتگرالی (PI) و PID تا روش‌های کنترل مدرن LQR، MPC، Fuzzy control [۴-۷] و همچنین روش‌های یادگیری ماشین با این هدف مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. [۲، ۸-۱۲]. بی‌شک توانایی الگوریتم‌های کنترل مدرن، روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین و هوش مصنوعی [۴] و نیز الگوریتم‌های کنترل مبتنی بر بهینه‌سازی در پیاده‌سازی اهداف فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی در بهره‌برداری مدرن شبکه‌های آبیاری، در مقایسه با روش‌های کنترل کلاسیک به آسانی قابل مشاهده است.

به رغم مطالعات پژوهشی متعدد صورت‌گرفته در این بخش، توجیه اقتصادی پیاده‌سازی سامانه‌های کنترل خودکار با در نظر گرفتن ضرورت سرمایه‌گذاری کلان در این بخش و محدودیت‌های شدید بودجه‌ای بخش دولتی، تاکنون در کشور ایران

محقق نشده است. لذا پیش فرض احتمال پیاده‌سازی سامانه‌های کنترل خودکار غیر متمرکز (تکنیک‌های کنترل کلاسیک) که هزینه پیاده‌سازی، نگهداری و بهره‌برداری به مراتب کمتری در مقایسه با سامانه‌های کنترل خودکار متمرکز (تکنیک‌های کنترل مدرن) دارند، در کشوری مثل ایران می‌تواند پیش فرض نزدیک به واقعیتی باشد. در بین روش‌های مختلف کنترل غیر متمرکز، الگوریتم کنترل خودکار PI به عنوان پرکاربردترین الگوریتم مورد استفاده در تحقیقات داخلی و بین‌المللی خودکارسازی بهره‌برداری کانال‌های آبیاری عملکرد قابل قبولی از خود نشان داده است. در میان کنترل‌کننده‌های مختلف، این الگوریتم به عنوان ساده‌ترین، سریع‌ترین و محبوب‌ترین الگوریتم شناخته شده و پیاده‌سازی موفقی در کانال‌های آبیاری نشان داده است [۱۳]. در این ارتباط می‌توان به الگوریتم کنترل PI طراحی شده برای بهره‌برداری کانال‌های آبیاری، با استفاده از روش نابرابری‌های ماتریس خطی^۱، اشاره کرد که قابلیت حفظ سطح آب در بالادست هر سازه کنترل تنظیم سطح آب در مجاورت عمق هدف دارد تا آبگیرهای واقع در پایین دست هر بازه کانال به صورت ثقلی آب را برداشت کنند [۱۴]. همچنین در تحقیق مشابهی با تلفیق روش هوش مصنوعی با سامانه کنترل خودکار کلاسیک، اقدام به توسعه الگوریتم ابتکاری به نام Double Q-PI (DQ-PI) با هدف مدیریت آب در کانال‌های آبیاری با کنترل عمق آب شد. در واقع تنظیم ضرایب کنترلگر PI با استفاده از الگوریتم یادگیری Q برای کنترل میزان تنظیم بازشدگی سازه‌های تنظیم انجام می‌شود که کنترلگر عملکرد خود را با استفاده از بازخورد دریافتی از مدل شبیه‌ساز هیدرولیک جریان در کانال آبیاری بهبود می‌بخشد. این رویکرد با استفاده از چندین سناریو مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج بیانگر دقت قابل قبول و توانایی معقول در کنترل عمق آب در محدوده کانال بود [۱۵].

این پژوهش به ارزیابی و مقایسه عملکرد دو سامانه بهره‌برداری، شامل سامانه بهره‌برداری موجود و سامانه کنترل خودکار غیر متمرکز شبکه آبیاری آبشار تحت سناریوهای متعدد کم‌آبی (شامل سناریوهای کم‌آبی ملایم تا شدید) از نظر شاخص‌های اصلی بهره‌برداری شامل شاخص کفایت و پایداری توزیع آب سطحی پرداخته است. در این راستا نوآوری تحقیق حاضر عبارت از ارزیابی جامع مبتنی بر شاخص‌های بهره‌برداری کفایت و پایداری دو سامانه مختلف بهره‌برداری برای کانال اصلی شبکه آبیاری آبشار تحت محتمل‌ترین سناریوهای بهره‌برداری مستخرج شده از داده‌های تاریخی این شبکه آبیاری است. در همین راستا هدف اصلی که از انجام این پژوهش در نظر گرفته شده، عبارت از ارزیابی نحوه تغییرات کفایت و پایداری توزیع آب سطحی در کانال اصلی شبکه آبیاری آبشار قبل و بعد از خودکارسازی است. در راستای تحقق این مهم، اطلاعات سی ساله اخیر دبی انحرافی در محل بند انحرافی آبشار بررسی و هفت سناریوی بهره‌برداری به عنوان محتمل‌ترین سناریوها انتخاب شد. در ادامه با به‌کارگیری مدل شبیه‌ساز هیدرولیک جریان انتگرالی-تأخیری (ID) کانال اصلی شبکه آبیاری آبشار شبیه‌سازی فرایند توزیع آب سطحی در کانال اصلی تحت هر سناریو و در مجموع به تعداد ۵۴۰ مرتبه انجام شد. در ادامه شبیه‌سازی یاد شده به صورت مشابه با استفاده از مدل سامانه بهره‌برداری خودکار غیر متمرکز PI انجام شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی توزیع آب سطحی برای سناریوهای محتمل توسط شاخص‌های ارزیابی عملکرد کفایت و پایداری توزیع آب بررسی و مقایسه شد. نتایج این تحقیق، شامل ارزیابی فنی و کمی سامانه بهره‌برداری موجود و سامانه بهره‌برداری خودکار در توزیع کافی و پایدار آب سطحی در طول کانال اصلی شبکه آبشار تحت سناریوهای محتمل بهره‌برداری، می‌تواند به ارتقای دقت تصمیم‌گیری مجموعه تصمیم‌گیر و مدیریت این شبکه آبیاری در انتخاب مناسب گزینه‌های بالقوه مدرن سازی بهره‌برداری منجر شود.

مواد و روش‌ها

مدل ریاضی شبیه‌سازی جریان آب در کانال آبیاری

امروزه با ظهور و گسترش کاربرد علوم کامپیوتری در مهندسی آب، توسعه علوم مرتبط سرعت بیشتری گرفته است. در این

میان، نقش مدل‌های هیدرودینامیک به لحاظ رفع مشکلات ساخت مدل‌های فیزیکی علاوه بر کاهش هزینه‌های زمانی، موجب کاهش هزینه‌های مالی شده است. مدل‌های هیدرودینامیک ابزار مناسب شبیه‌سازی هستند، این مدل‌ها شامل حل عددی معادلات اساسی حاکم بر جریان هستند. در سه دهه گذشته مدل‌های متعددی توسط مؤسسه‌های تحقیقاتی مرتبط، شرکت‌های مهندسی مشاور و دانشگاه‌ها به این منظور توسعه یافته است. در این میان، می‌توان به مدل‌های HEC-آبیاری که از روش‌های مهندسی کنترل در قالب گزینه‌های خودکارسازی (اتوماسیون) استفاده می‌کنند، آن است که شبیه‌ساز هیدرولیک جریان توسعه داده شده لازم است قابلیت تلفیق (لینک شدن) با مدل‌های/پروتوتایپ کنترلگر انتخاب شده داشته باشد. به بیان دیگر، در روش یکپارچه طراحی کنترلگر، لازم است یک مدل ریاضی مناسب از سامانه در حال کنترل به سامانه کنترل تلفیق شود. این مدل ریاضی باید رفتار هیدرولیک جریان در کانال را به خوبی و با دقت مناسب شبیه‌سازی کرده و در عین حال سرعت عمل بالایی در انجام محاسبات داشته باشد تا فرایند کنترل دچار تأخیر نشود. تنظیم عوامل الگوریتم‌های کنترل و بررسی پاسخ سامانه کنترل شونده در زمان با استفاده از همین مدل ریاضی صورت می‌گیرد. شورمانز در سال ۱۹۹۷ برای طراحی الگوریتم‌های کنترل هر بازه از کانال آبیاری را به دو بخش تقسیم کرد و مدلی تقریبی آن را به شرح ذیل ارائه کرد [۱۶]:

قسمتی از کانال که بین دو سازه تنظیم قرار گرفته باشد، بازه نامیده می‌شود. هر بازه شامل دو بخش است؛ این دو بخش عبارت هستند از: بخش جریان یکنواخت و بخش منحنی برگشت آب. هر بخش یک مشخصه اصلی دارد که از مجموع این دو، مدل ریاضی کانال به نام مدل انتگرالی-تأخیری به دست می‌آید. دو مشخصه اصلی هر بازه عبارت‌اند از: زمان تأخیر (T) و سطح ذخیره (A_s) . در بخش جریان یکنواخت فرض می‌شود که امواج فقط به سمت پایین دست منتقل می‌شوند. هر تغییری در سازه بالادست به تولید یک موج منجر می‌شود، این بخش از کانال فقط به عنوان گذار برای عبور این موج عمل می‌کند. سرعت موج در یک بازه از کانال با عمق نرمال، به سرعت موج سینماتیک نزدیک است. زمان تأخیر ناشی از حرکت موج ایجاد شده در بالادست کانال به بخش منحنی برگشت آب رسیده و موجب تغییر تراز سطح آب می‌شود. تنها پارامتر که در بخش جریان یکنواخت برای تشریح جریان تعریف می‌شود زمان تأخیر است. معادله حاکم بر این بخش به صورت رابطه ۱ بیان شده است:

$$q_{canal}(t) = q_{in}(t - \tau) \quad (1)$$

که در آن = دبی ورودی به بخش یکنواخت جریان (m³/s)؛ = دبی ورودی به بخش ذخیره (m³/s)؛ = زمان (s)؛ = زمان تأخیر (s) است. معمولاً تحلیل پایداری سامانه تحت کنترل (نظیر کانال‌های آبیاری) به دو صورت انجام می‌گیرد: تحلیل زمانی و تحلیل فرکانسی. در تحلیل فرکانسی^۱ معادلات سامانه با استفاده از تبدیلات لاپلاس مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از تبدیل لاپلاس معادله جریان در بخش یکنواخت (رابطه ۱) به فرم رابطه ۲ تبدیل می‌شود:

$$L(q_{canal}(t)) = L(q_{in}(t - \tau)) \Leftrightarrow q_{canal}(s) = e^{-\tau s} \cdot q_{in}(s) \quad (2)$$

که در آن $L =$ عملگر لاپلاس^۲ و $S =$ متغیر لاپلاس است.

بخش منحنی برگشت آب مثل یک مخزن عمل می‌کند و بخش انتگرالی مدل را شامل می‌شود. تغییرات مساحت سطح افقی آب در ترازهای مختلف مخزن (A_s) بر اساس دبی‌های ورودی و خروجی از بازه کانال به صورت رابطه ۳، در حوزه زمان و حوزه فرکانس، قابل بیان است:

$$A_s \cdot \frac{dh(t)}{dt} = q_{canal}(t) - q_{out}(t) \quad (3)$$

که در آن $A_s =$ مساحت سطح ذخیره در بخش منحنی برگشت آب (m²)؛ $h =$ عمق آب (m)؛ $q_{out} =$ دبی خروجی از بخش

1. Frequency Domain

2. Laplace Operator

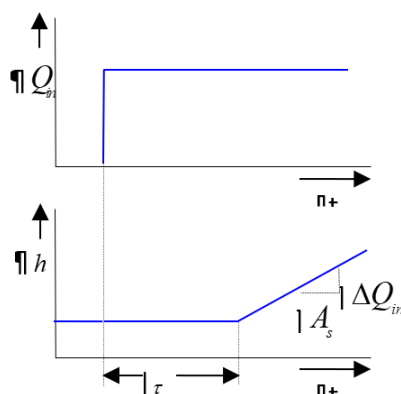
منحنی برگشت آب (m³/s) است.

برای یک بازه از کانال که شامل بخش جریان یکنواخت و بخش منحنی برگشت آب است، مدل کاملی از تلفیق معادلات ارائه شده در بخش‌های قبلی به دست می‌آید. در فضای زمان پیوسته، مدل ID برای تحلیل زمانی و تحلیل فرکانسی به صورت رابطه ۴ ارائه می‌شود:

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{1}{A_s} \cdot [q_{in}(t - \tau) - q_{out}(t)]$$

$$h(s) = \frac{e^{-\tau s}}{A_s \cdot s} \cdot [q_{in}(s) - q_{out}(s)] \quad (4)$$

وقتی شرایط جریان در کانال یکنواخت باشد (برای مثال و ثابت باشد)، واکنش تراز آب (h)، به تغییر پله‌ای مثبت جریان در ورودی بازه به صورت شکل ۱ در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱. پاسخ تراز آب به تغییر پله‌ای دی در مدل انتگرالی-تأخیری

در ادامه، از مدل فضای حالت^۱ که امکان فشرده سازی فرمولاسیون چندمتغیره مدل خطی رامهیا می‌کند، برای بیان مدل ریاضی سیستم کانال استفاده شده است. بر این اساس، رابطه سیستم به صورت معادله ۵ بیان می‌شود:

$$x(k+1) = A(k) \cdot x(k) + B_u \cdot u(k) + B_d \cdot d(k) \quad (5)$$

در این معادله: ماتریس متغیر کنترل شونده، ماتریس اغتشاشات است که شامل مقادیر درخواستی آب است. همچنین نیز شاخص گام زمانی، پارامترهای، ضرایب معادلات هستند که به ترتیب عبارت اند از: ماتریس سیستم (نمایی از ضرایب معادلات جریان)، ماتریس ورودی ضرایب کنترل، ماتریس ورودی ضرایب اغتشاشات. همچنین ماتریس وضعیت سیستم است که به صورت رابطه ۶ بیان می‌شود:

$$X = \begin{bmatrix} q_{in}(k+1) \\ \vdots \\ q_{in}(k - k_d - 1) \\ q_{in}(k - k_d) \\ e_1(k+1) \end{bmatrix} \quad (6)$$

که در این رابطه ماتریس خطای رقوم سطح آب در انتهای هر بازه، میزان دی ورودی به بازه کانال به میزان زمان تأخیر حرکت آب در هر بازه (گام زمانی) است. در نهایت، با تبدیل روابط به دست آمده برای تمامی بازه‌ها به فرم مدل ماتریسی فضای حالت (رابطه ۲)، ماتریس‌های Bu64*40، A64*64، X64*1 و Bd64*20 به دست آمدند. به جهت بزرگ بودن ماتریس‌ها، مدل ماتریسی فضای حالت تنها برای دو بازه اول در ذیل آورده شده است:

$$\begin{bmatrix} q_{in}(k+1) \\ q_{in}(k) \\ q_{in}(k-1) \\ q_{in}(k-2) \\ q_{in}(k-3) \\ e_1(k+1) \\ q_1(k+1) \\ q_1(k) \\ q_1(k-1) \\ e_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{T_c}{A_s} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{T_c}{A_s} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_{in}(k) \\ q_{in}(k-1) \\ q_{in}(k-2) \\ q_{in}(k-3) \\ q_{in}(k-4) \\ e_1(k) \\ q_1(k) \\ q_1(k-1) \\ q_1(k) \\ e_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \nabla q_{in}(k) \\ \nabla q_1(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{T_c}{A_s} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{T_c}{A_s} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_{off-take-1}(k) \\ q_{off-take-2}(k) \end{bmatrix} \quad (7)$$

واسنجی مدل شبیه‌ساز ID بر پایه میزان تطبیق داده‌های دبی تحویلی به کلیه آبگیرهای واقع در کانال اصلی سامانه توزیع آب، به عنوان ضریب واسنجی، انجام گرفت. ضریب واسنجی مدل توسعه داده شده، زمان تأخیر حرکت جریان در هر بازه کانال آبیاری انتخاب شد. برای مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهداتی، از شاخص‌های ارزیابی ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب خطای پس‌ماند (CRM) و میانگین خطای مطلق (MAE)، روابط ۱۰.۸ استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (8)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n X_i - \sum_{i=1}^n Y_i}{\sum_{i=1}^n X_i} \quad (9)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - X_i| \quad (10)$$

که در این روابط X_i و Y_i به ترتیب برابر مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده هستند. RMSE یا همان ریشه میانگین مربعات خطا، درصد مجموع اختلافات مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی نسبت به میانگین مقادیر مشاهداتی را نشان می‌دهد. مقدار بهینه این پارامتر برابر صفر است و انطباق مقادیر شبیه‌سازی مدل با مقادیر مشاهداتی را نشان می‌دهد. ضریب خطای پس‌ماند (CRM) شاخصی است که خطاهای ثابت توزیع شده در تمام مقادیر شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. اگر مقدار این شاخص برابر صفر باشد، نشان دهنده این است که خطای توزیع شده روی مقادیر شبیه‌سازی در ارتباط با مقادیر مشاهداتی وجود ندارد. یکی دیگر از پارامترهای بسیار مهم برای مقایسه مقادیر شبیه‌سازی و مقادیر مشاهداتی، میانگین خطای مطلق یا MAE است. مقدار بهینه این پارامتر برابر صفر است.

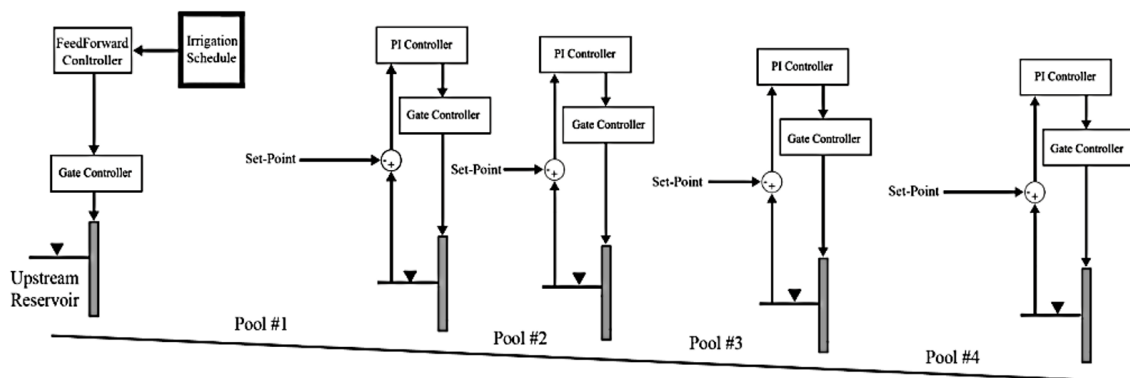
سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز تناسبی-انتگرالی

کنترلر تناسبی-انتگرالی براساس روش کنترل پسخور طراحی می‌شود که در آن متغیر کنترل شونده (خطای رقوم سطح آب) در بالادست سازه تنظیم اندازه‌گیری می‌شود. در این روش، میزان انحراف رقوم سطح آب از رقوم هدف به کنترلر بازگردانده می‌شود تا با محاسبه اقدام تصحیحی متغیر کنترل شونده به سوی مقادیر هدف بازگردانده شود. در این روش اغتشاشات، برداشت آب در محل آبگیر و نوسانات ورودی به کانال اصلی در نظر گرفته می‌شود. براساس الگوریتم PI، تغییرات دبی عبوری از زیر سازه‌های تنظیم به صورت رابطه ۱۱ قابل محاسبه است:

$$\Delta Q(k) = K_i \cdot e(k) + K_p \cdot [e(k) - e(k-1)] \quad (11)$$

در رابطه یادشده مقدار تغییرات دبی عبوری از سازه‌های تنظیم بر حسب مترمکعب بر ثانیه در گام زمانی جاری، برابر مقدار انحرافات تراز سطح آب از رقوم هدف، اندیس‌های و به ترتیب نشان‌دهنده گام زمانی جاری و گام زمانی قبلی، برابر ضریب تناسبی و برابر ضریب انتگرالی است.

اصولاً طراحی سیستماتیک یک کنترلر کلاسیک PI در کانال‌های آبیاری می‌تواند به سه شیوه کنترل بالادست، پایین دست یا ترکیب آن‌ها انجام شود. شکل ۲ نحوه قرارگیری کنترلرهای PI طراحی شده در این تحقیق با استفاده از تلفیق تکنیک پیشخور برای کنترل بالادست (با مشخص بودن سناریوی بهره‌برداری تحقیق) با تکنیک پسخور (اندازه‌گیری خطای رقوم سطح آب در محل هر سازه تنظیم آب در پایین دست هر بازه کانال) را برای چند بازه ابتدایی کانال نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، ورودی هر کنترلر رقوم اندازه‌گیری شده سطح آب در بالادست هر سازه تنظیم است. بر اساس میزان خطای سطح آب اندازه‌گیری شده از رقوم هدف، متغیر کنترلی محاسبه شده و میزان بازشدگی در یچه مشخص می‌شود. در روش‌های کنترل بالادست، سازه تنظیم سراب کانال معمولاً آب مورد نیاز پایین دست را با استفاده از تکنیک پیشخور و بر اساس برنامه تحویل آب آبیاری از قبل تعیین شده، رها می‌کند. در مواردی که از این تکنیک استفاده نمی‌شود، کنترل سازه تنظیم سراب به شیوه کنترل پایین دست موضعی یا فاصله‌دار انجام گیرد. کنترل سایر سازه‌های تنظیم بر اساس کنترل موضعی بالادست و با اندازه‌گیری رقوم سطح آب در بالادست و مجاورت سازه تنظیم انجام می‌پذیرد.



شکل ۲. شمایی از کنترلر طراحی شده به روش کنترل موضعی بالادست در کانال آبیاری

شاخص ارزیابی عملکرد کفایت توزیع آب

یک نگرانی اساسی در سامانه‌های تحویل آب این است که آب به اندازه مورد نیاز در دسترس محصولات زراعی قرار گیرد. میزان مورد نیاز چنان تعیین می‌شود که پاسخ‌گوی سیاست کشاورزی باشد. بر همین اساس، میزان دبی مورد نیاز آبیگرها وابسته به عوامل مختلفی است که از جمله می‌توان به مساحت مناطق کشاورزی تحت آبیاری، میزان نیاز به محصولات کشاورزی، میزان تلفات آب، اقدامات مربوط به فرهنگ کشاورزی در منطقه همچون آماده‌سازی زمین و عملیات آبیاری اشاره کرد. در همین راستا کفایت تحویل آب به آبیگرها تابعی از میزان تأمین آب، برنامه تحویل، ظرفیت سازه‌های هیدرولیکی برای تحویل آب بر اساس برنامه، بهره‌برداری و نگهداری سازه‌های هیدرولیکی است. لازم به توضیح است که هدف ما در این مقاله تعریف کفایت با توجه نسبت آب تحویلی (شبیه‌سازی شده توسط مدل شبیه‌سازی ID) به آب مورد نیاز الگوی کشت مصوب (حقابۀ تعیین شده برای هر آبیگر) است که به صورت رابطه ۱۲ تعریف می‌شود:

$$P_A = \frac{1}{T} \sum_T \left[\frac{1}{R} \sum_R (P_a) \right] \quad (12)$$

که در آن T = فواصل زمانی در نظر گرفته شده برای ارزیابی عملکرد (sec)؛ R = تعداد کل آبیگری‌های اندازه‌گیری شده؛ QD = دبی واقعی تحویلی (m/s)؛ QR = دبی مورد نیاز (m/s)؛ \sum متوسط زمانی و \sum متوسط مکانی؛ و PA = شاخص کفایت است. دامنه تغییرات این شاخص بین صفر و یک است.

شاخص ارزیابی عملکرد پایداری توزیع آب

پایداری در تحویل آب عامل دیگری است که بر عملکرد شبکه‌های آبیاری تأثیرگذار است و در واقع به معنای یکنواختی در تحویل آب نسبت به زمان است. مولدن و گیتز (۱۹۹۰) ضریب تغییرات زمانی معیار کفایت را در قالب رابطه ۱۳ به عنوان پایداری در تحویل آب تعریف کردند:

$$PD = \frac{1}{R} \sum_R CV_T \left(\frac{Q_D}{Q_R} \right) \quad (13)$$

که در آن: T= فواصل زمانی در نظر گرفته شده برای ارزیابی عملکرد (sec)؛ R= تعداد کل آبیگری‌های اندازه‌گیری شده؛ QD= دبی واقعی تحویلی (m/s)؛ QR= دبی مورد نیاز (m/s)؛ CVR ضریب تغییرات زمانی در هر آبیگری؛ PD= شاخص پایداری برای کل سیستم است. دامنه تغییرات این شاخص بین صفر و یک است. در خور یادآوری است که در این پژوهش، مفهوم «خوب» و «متوسط» و «ضعیف» برای شاخص‌های ارزیابی عملکرد بهره‌برداری مطابق استاندارد ارائه شده در [۱۷] ارزیابی شده است. استاندارد یادشده در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. دسته‌بندی شاخص‌های ارزیابی عملکرد توزیع آب سطحی

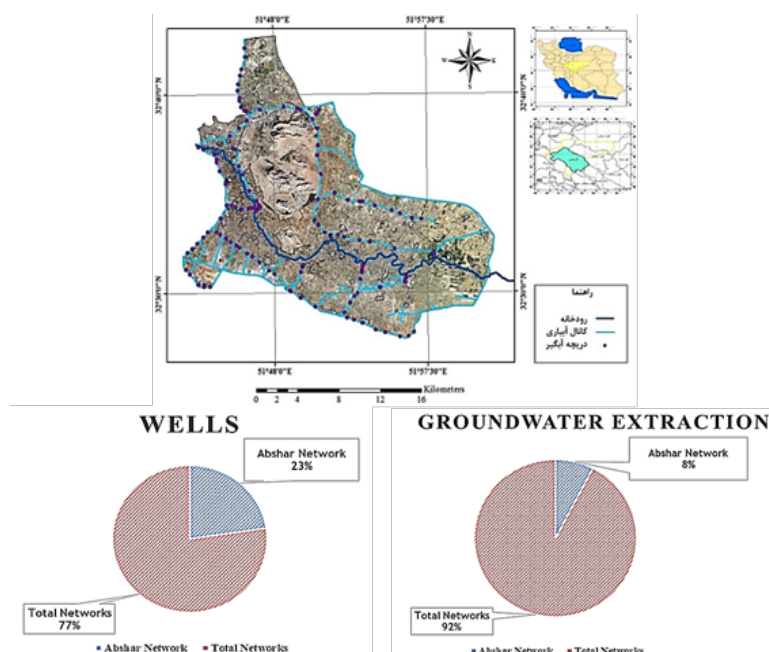
شاخص	محدوده عملکرد		
	ضعیف	متوسط	خوب
کفایت تحویل آب سطحی	< ۰/۸	۰/۸ - ۰/۸۹	۱ - ۰/۹
پایداری تحویل آب سطحی	> ۰/۲۵	۰/۱۱ - ۰/۲۵	۰ - ۰/۱

شبکه آبیاری آبشار

شبکه آبیاری آبشار واقع در حوضه آبریز زاینده‌رود، در منطقه مرکزی ایران، در طول جغرافیایی ۵۲ و عرض جغرافیایی ۳۲/۵ درجه در دشت کوهپایه و سگری در شرق شهر اصفهان و با ارتفاع تقریبی ۱۵۰۰ متر بالاتر از سطح دریا واقع شده است. میانگین بارندگی سالانه در این منطقه ۱۲۰ میلی‌متر است که این میزان بسیار کمتر از متوسط بارندگی سالانه در ایران، حدود ۲۴۰ میلی‌متر است. این در حالی است که در میزان تبخیر و تعرق در این منطقه حدود ۱۵۰۰ میلی‌متر در سال برآورد شده است. منبع اصلی تأمین‌کننده آب این شبکه آبیاری، آب رها شده از سد زاینده‌رود است. در طرفین بند انحرافی آبشار (نوع بتنی با ۴ دریچه قطعی فولادی و ۲ دریچه تخلیه تحتانی)، در منشأ تأمین آب این شبکه آبیاری، دورشته کانال اصلی چپ و راست به منظور برداشت آب جهت تحت پوشش قرار دادن اراضی به وسعت ۳۲ هزار هکتار (که بنا بر اطلاعات اخذ شده از شرکت آب منطقه‌ای اصفهان در سال آبی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ حدود ۲۱ هزار هکتار در حال بهره‌برداری است) احداث شده است. کنترل و تنظیم سطح آب به دو شیوه کنترل بالادست، با به‌کارگیری ۵۰ سازه خودکار هیدرومکانیکال آمیل صورت می‌گیرد. تحویل و توزیع سطح آب در طول کانال‌های اصلی توسط ۳۲ آبیگری انجام می‌گیرد که به صورت دستی بهره‌برداری می‌شوند.

بر اساس اطلاعات جمع‌آوری شده از دفتر شرکت آب منطقه‌ای اصفهان و دفتر بهره‌برداری شبکه آبیاری آبشار، میزان تلفات در سامانه انتقال، توزیع و تحویل آب این شبکه در محدوده ۳۰ تا ۴۰ درصد جریان ورودی اعلام شده است. در ارتباط با میزان تلفات برآورد شده لازم به توضیح مجدد است که این ارقام در محاسبات برنامه‌ریزی تحویل و توزیع روزانه این شبکه آبیاری لحاظ می‌شود، ولی هیچ‌گونه مستندات قابل اتکایی مبنی بر نحوه، ابزار، زمان و شرایط اندازه‌گیری آن در مقالات علمی و گزارش‌ها در دسترس نیست. بنابراین، با فرض صحیح بودن این مقادیر تلفات در سامانه آب سطحی، جهت رفع مشکل تأمین آب، کشاورزی وابسته به منابع آب زیرزمینی گسترش پیدا کرده به گونه‌ای که در حال حاضر برداشت سالانه ۳۷۰ میلیون مترمکعب از حدود ۹ هزار حلقه چاه حفر شده در داخل شبکه آبیاری آبشار، حجم آب برداشتی در محدوده این شبکه حدود ۸ درصد کل برداشت از منابع آب زیرزمینی در محدوده شبکه‌های آبیاری حوضه زاینده‌رود است. تعداد چاه‌های حفر شده به تفکیک نوع چاه (عمیق و نیمه عمیق) در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۶ در شکل ۳ ارائه شده است. در این

بازه زمانی آبخوان این منطقه شاهد افزایش ۳۰۱/۲ درصدی حفر چاه‌های نیمه عمیق و افزایش چشمگیر ۶۶/۴۳ درصدی چاه‌های عمیق است. افزایش روزافزون حفر چاه‌ها و بهره‌برداری از آن برای مصارف کشاورزی نه تنها این منطقه را به یکی از دشت‌های بحرانی کشور تبدیل کرده است، بلکه خسارت‌های جدی به محیط زیست وارد می‌کند، به طوری که سالیانه هزاران تن گازهای گلخانه‌ای به اتمسفر زمین وارد می‌کند. وضعیت نابسامان برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی منطقه از یک سو و از سویی دیگر، افزایش تقاضا برای محصولات کشاورزی، مدیران آبی در این منطقه را به یافتن چاره‌ای جهت حل این مشکل واداشته است.



شکل ۳. شمایی از شبکه آبیاری آبشار؛ تعداد چاه‌های حفرشده عمیق و نیمه عمیق در بازه زمانی ۲۰۰۳-۲۰۱۶ در محدوده آبخوان؛ حجم آب برداشت شده سالانه از آبخوان (میلیون متر مکعب) (مأخذ: شرکت آب منطقه‌ای اصفهان)

نتایج و بحث

تحلیل زمانی دبی انحرافی در محل بند انحرافی آبشار و تعیین سناریوهای بهره‌برداری به منظور تعیین سناریوهای بهره‌برداری در تحقیق حاضر، تحلیل زمانی داده‌های تاریخی دبی تحویل داده شده در محل بند انحرافی آبشار انجام شد. در واقع، الگوهای متناوب دبی تأمین شده در محل بند انحراف استخراج و نماینده هر الگو به عنوان یکی از سناریوهای بهره‌برداری به عنوان شرط اولیه شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در نظر گرفته شد. نتایج تحلیل زمانی شامل سناریوهای منتخب بهره‌برداری به همراه احتمال وقوع رخداد هر کلاس طی ۳۰ سال گذشته بهره‌برداری شبکه آبیاری آبشار در دو دسته کلی ذیل تقسیم می‌شود:

- کلاس نرمال (سناریوی بهره‌برداری نرمال): دبی تحویلی در محل بند انحرافی حدود ۱۰۰ تا ۱۱۰ درصد مجموع تقاضای برآورد شده، تغییرات دبی در ۱۲ ماه سال (به جز دی و بهمن) = $۱۴ - ۳/۸$ مترمکعب بر ثانیه، متوسط دبی سالانه (به استثنای دی و بهمن) = $۴/۵$ مترمکعب بر ثانیه، متوسط احتمال وقوع در دوره آماری: ۲۹/۲۴ درصد.
- کلاس کم‌آبی (سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی): دبی تحویلی در محل بند انحرافی حدود ۵۰ تا ۹۰ درصد مجموع تقاضای برآورد شده، تغییرات دبی در ۱۲ ماه سال (به جز دی و بهمن) = $۱۰/۸ - ۲/۷$ مترمکعب بر ثانیه، متوسط دبی سالانه (به استثنای دی و بهمن) = $۳/۶۱$ مترمکعب بر ثانیه، متوسط احتمال وقوع در دوره آماری: ۷۰/۷۶ درصد.
- لازم به توضیح است که بررسی نحوه پراکندگی ماه‌های واقع در هر کلاس نشان داد بیش از ۷۰ درصد کل ماه‌های بهره‌برداری در ۳۰ سال گذشته و حدود ۸۸ درصد ماه‌های بهره‌برداری طی سال‌های ۱۳۸۸-۱۴۰۱ در کلاس‌های کم‌آبی

قرار گرفته است. بنابراین، به منظور بررسی دقیق‌تر شرایط بهره‌برداری شبکه آبشار در وضعیت کم‌آبی، کلاس کم‌آبی یادشده به کلاس‌های ذیل تقسیم شد:

- کلاس کم‌آبی ملایم (سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی کمتر از ۱۰ درصد): دبی تحویلی در محل بند انحرافی حدود ۹۰ تا ۱۰۰ درصد مجموع تقاضای برآوردشده، تغییرات دبی در ۱۲ ماه سال (به جز دی و بهمن) = $۳/۸ - ۱۰/۸$ مترمکعب بر ثانیه، متوسط دبی سالانه (به استثنای دی و بهمن) = $۴/۲$ مترمکعب بر ثانیه، متوسط احتمال وقوع در دوره آماری: $۱۵/۲۵$ درصد.
- کلاس کم‌آبی (سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی ۱۰ تا ۱۵ درصد): دبی تحویلی در محل بند انحرافی حدود ۸۵ تا ۹۰ درصد مجموع تقاضای برآوردشده، تغییرات دبی در ۱۲ ماه سال (به جز دی و بهمن) = $۳/۰ - ۹/۲$ مترمکعب بر ثانیه، متوسط دبی سالانه (به استثنای دی و بهمن) = $۴/۰$ مترمکعب بر ثانیه، متوسط احتمال وقوع در دوره آماری: $۲۹/۹۰$ درصد.
- کلاس کم‌آبی شدید (سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی ۱۵ تا ۲۰ درصد): دبی تحویلی در محل بند انحرافی حدود ۸۰ تا ۸۵ درصد مجموع تقاضای برآوردشده، تغییرات دبی در ۱۲ ماه سال (به جز دی و بهمن) = $۳/۵ - ۹/۹$ مترمکعب بر ثانیه، متوسط دبی سالانه (به استثنای دی و بهمن) = $۳/۸$ مترمکعب بر ثانیه، متوسط احتمال وقوع در دوره آماری: $۵/۶۱$ درصد.
- کلاس کم‌آبی شدید (سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی ۲۰ تا ۳۰ درصد): دبی تحویلی در محل بند انحرافی حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد مجموع تقاضای برآوردشده، تغییرات دبی در ۱۲ ماه سال (به جز دی و بهمن) = $۳/۳ - ۷/۶$ مترمکعب بر ثانیه، متوسط دبی سالانه (به استثنای دی و بهمن) = $۳/۶$ مترمکعب بر ثانیه، متوسط احتمال وقوع در دوره آماری: ۵ درصد.
- کلاس کم‌آبی شدید (سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی ۳۰ تا ۴۰ درصد): دبی تحویلی در محل بند انحرافی حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد مجموع تقاضای برآوردشده، تغییرات دبی در ۱۲ ماه سال (به جز دی و بهمن) = $۳/۱ - ۶/۴$ مترمکعب بر ثانیه، متوسط دبی سالانه (به استثنای دی و بهمن) = $۳/۴$ مترمکعب بر ثانیه، متوسط احتمال وقوع در دوره آماری: ۵ درصد.
- کلاس کم‌آبی شدید (سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی بیش از ۴۰ درصد): دبی تحویلی در محل بند انحرافی بیش از ۶۰ درصد مجموع تقاضای برآوردشده، تغییرات دبی در ۱۲ ماه سال (به جز دی و بهمن) = $۲/۷ - ۵/۷$ مترمکعب بر ثانیه، متوسط دبی سالانه (به استثنای دی و بهمن) = $۳/۱$ مترمکعب بر ثانیه، متوسط احتمال وقوع در دوره آماری: ۱۰ درصد.

نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل شبیه‌ساز هیدرولیک جریان

واسنجی و صحت‌سنجی مدل شبیه‌ساز توسعه داده شده ID بر اساس اطلاعات اندازه‌گیری شده‌ای که توسط شرکت آب منطقه‌ای اصفهان جمع‌آوری و در اختیار محققان این تحقیق قرار گرفت، انجام شد. این اطلاعات مربوط به دوره‌های بهره‌برداری ده سال اخیر (شامل دوره‌های زمانی ۳۰ تا ۹۰ روز بسته به میزان آب سطحی قابل دسترس در هر سال) است. نیمی از داده‌های هر دوره آماری برای واسنجی و نیم دیگر آن برای صحت‌سنجی مدل مورد استفاده قرار گرفتند. جهت واسنجی مدل، ضریب دبی آبگذری سازه‌های آبگیر به عنوان متغیرهای قابل تغییر جهت انطباق مقادیر شبیه‌سازی با مقادیر مشاهده‌ای استفاده شدند. بعد از واسنجی مدل و تنظیم پارامترهای آن، فرایند صحت‌سنجی اجرا شد. نتایج این فرایند به این صورت است که حدود تغییرات میانگین خطای مطلق (MAE)، برای ده دوره واسنجی منتخب در محدوده $(۰/۰۴, ۰/۱۳)$ و برای ده دوره صحت‌سنجی منتخب در محدوده $(۰/۰۹, ۰/۱۵)$ مترمکعب بر ثانیه است. مقدار بهینه این شاخص برابر صفر است، با توجه به اینکه مقادیر یادشده به مقدار بهینه نزدیک هستند، لذا می‌توان نتیجه گرفت که مدل دقت مناسبی ارائه می‌کند. شاخص ضریب خطای پسماند (CRM)، برای دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی، به ترتیب در محدوده $(-۰/۰۱۸, -۰/۰۰۵)$ و $(-۰/۰۱۷, -۰/۰۰۱)$ تغییر کرد، با توجه به اینکه بهترین میزان برای CRM صفر است، مقادیر کم این شاخص بیانگر دقت قابل قبول مدل در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی است. در نهایت، میزان ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، برای دوره‌های واسنجی منتخب در محدوده $(۰/۰۰۹, ۰/۰۰۶)$ و برای دوره صحت‌سنجی‌های متناظر در محدوده $(۰/۰۱۱, ۰/۰۰۸)$ به دست آمدند. مقادیر مناسب این شاخص نیز دقت مدل را مورد تأیید قرار می‌دهد.

محاسبه ضرایب کنترلگر PI و ارزیابی عملکرد کنترلگر

طراحی و تنظیم کنترلگرهای PI در سامانه کنترل خودکار کانال اصلی شاخه شمالی شبکه آبیاری آبشار نیازمند تعیین و محاسبه مشخصه‌های سیستم، شامل موارد زیر است:

- سطح ذخیره در شرایط بهره‌برداری (A_s)
- گام زمانی کنترل (T_c)
- رزونانس ماکزیمم در جریان حداقل R_p
- بسامد رزونانس ماکزیمم در جریان حداقل بازه کانال (ω_r)

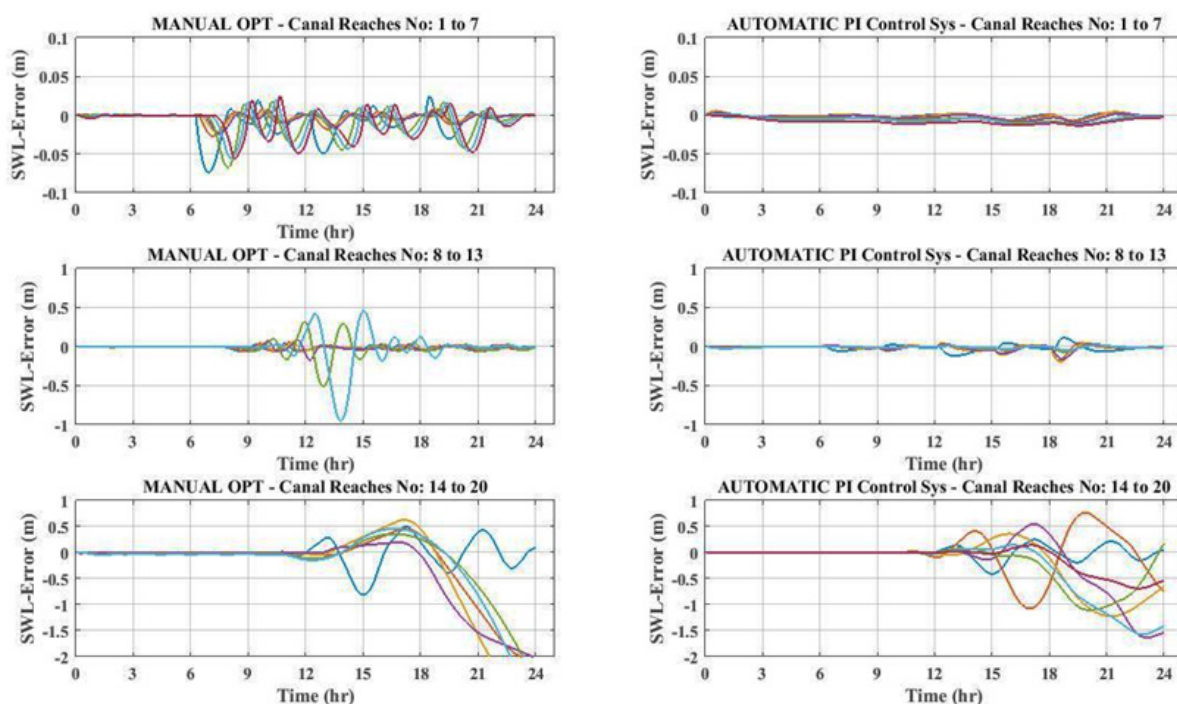
برای رسیدن به هدف یادشده، روش مورد استفاده در این تحقیق استفاده از روش تشخیص سیستم (SI) - مشابه روش مورد استفاده در (Miltenberg, 2008) و با به‌کارگیری جعبه ابزار System Identification نرم افزار محاسباتی Matlab اقدام به محاسبه مشخصه‌های یادشده شد. مدل مورد استفاده مدل Box-Jenkins model که یک مدل ۵ پارامتری است که چهار مشخصه سیستم از آن قابل محاسبه است، استفاده شد و ضرایب تناسبی و انتگرالی کنترلگر PI مطابق جدول ۲ ارائه می‌شود. جدول ۲. مشخصات بازه‌های کانال اصلی آبشار. مشخصه‌های سیستم محاسبه شده برای دبی معادل ۱۵ درصد و ۸۵ درصد و ضرایب تناسبی و انتگرالی بهینه نهایی محاسبه شده در روش SI

بازه کانال	طول بازه	سطح ذخیره (m ²) متناسب با دبی ورودی	تناوب رزونانس rad/sec متناسب با دبی ورودی	رزونانس حداکثر متناسب با دبی ورودی	زمان تأخیر (sec) متناسب با دبی ورودی	بازه زمانی کنترلگر (sec)	ضرایب بهینه از روش SI	Kp	Ki
۱	۱۲۲۱	۴۱۲۴	۱۰۷۲	۰	۰	۱۲۰۰	۶۰۰	۰٫۸۹۸۷۶	۰٫۰۰۳۵۴
۲	۱۱۵۴	۳۸۴۵	۱۱۹۲	۰	۰	۱۲۰۰	۶۰۰	۰٫۶۷۴۰۷	۰٫۰۰۲۲۱
۳	۱۰۴۵	۳۵۵۱	۸۸۸	۰٫۰۱۰۵	۰٫۰۱۰۲	۱۲۰۰	۶۰۰	۰٫۲۲۴۶۹	۰٫۰۰۲۰۶
۴	۹۷۷	۲۸۲۴	۱۰۷۳	۰٫۰۱۱۲	۰٫۰۱۰۸	۹۰۰	۳۰۰	۱٫۳۴۸۱۴	۰٫۰۰۰۸۸
۵	۱۵۳۲	۴۴۳۵	۱۲۸۶	۰	۰	۱۵۰۰	۶۰۰	۰٫۱۳۴۸۱	۰٫۰۰۱۷۷
۶	۱۸۲۱	۴۶۵۳	۱۵۸۲	۰	۰	۱۵۰۰	۹۰۰	۰٫۴۴۹۳۸	۰٫۰۰۰۶۶
۷	۱۷۲۴	۴۶۰۲	۱۱۵۱	۰	۰	۱۵۰۰	۹۰۰	۰٫۲۹۹۵۹	۰٫۰۰۰۱۵
۸	۸۰۵	۲۵۰۱	۸۵۰	۰٫۰۲۰۴	۰٫۰۱۱۶	۹۰۰	۳۰۰	۰٫۱۹۶۶۰	۰٫۰۰۰۱۱
۹	۱۱۲۰	۳۷۷۹	۱۰۲۰	۰	۰	۱۲۰۰	۶۰۰	۰٫۶۷۴۰۷	۰٫۰۰۴۴۲
۱۰	۱۰۷۰	۳۶۰۷	۱۲۲۶	۰	۰	۱۲۰۰	۶۰۰	۰٫۸۹۸۷۶	۰٫۰۰۰۸۸
۱۱	۷۸۸	۲۳۸۰	۷۱۴	۰٫۰۲۰۹	۰٫۰۲۰۱	۶۰۰	۳۰۰	۰٫۶۷۴۰۷	۰٫۰۰۳۵۴
۱۲	۱۴۴۰	۴۲۱۲	۱۱۷۹	۰	۰	۱۵۰۰	۹۰۰	۰٫۳۵۹۵۰	۰٫۰۰۱۴۱
۱۳	۱۴۳۵	۴۲۰۷	۱۴۳۰	۰	۰	۱۵۰۰	۹۰۰	۰٫۲۸۰۸۶	۰٫۰۰۱۵۵
۱۴	۱۲۸۸	۴۳۵۰	۱۵۲۳	۰	۰	۱۲۰۰	۹۰۰	۰٫۲۲۴۶۹	۰٫۰۰۰۸۸
۱۵	۱۲۰۵	۴۱۰۲	۱۱۰۸	۰	۰	۱۲۰۰	۶۰۰	۰٫۳۳۷۰۴	۰٫۰۰۳۵۴
۱۶	۱۲۶۵	۴۱۴۰	۱۱۱۸	۰	۰	۱۲۰۰	۶۰۰	۰٫۳۳۷۰۴	۰٫۰۰۰۵۹
۱۷	۱۵۵۰	۴۴۸۰	۱۷۴۷	۰	۰	۱۵۰۰	۹۰۰	۰٫۷۴۹۰	۰٫۰۰۰۱۰
۱۸	۱۴۸۰	۴۲۹۰	۱۵۴۴	۰	۰	۱۵۰۰	۹۰۰	۰٫۴۴۹۳۸	۰٫۰۰۰۱۸
۱۹	۱۱۲۰	۳۹۰۲	۱۵۲۲	۰	۰	۱۲۰۰	۶۰۰	۰٫۸۹۸۷۶	۰٫۰۰۲۲۱
۲۰	۱۴۵۰	۴۲۳۰	۱۱۸۴	۰	۰	۱۵۰۰	۹۰۰	۰٫۷۸۶۴۲	۰٫۰۰۰۴۴

همان طور که پیش تر توضیح داده شد، هدف اصلی این تحقیق بررسی جامع توانایی سامانه کنترل خودکار غیر متمرکز

PI در بهبود کفایت و پایداری توزیع آب سطحی در طول کانال اصلی شبکه آبیاری آبشار است. لذا قبل از پرداختن به نتایج یاد شده، در ابتدا عملکرد سامانه کنترل توسعه داده شده در مقایسه با سامانه بهره‌برداری دستی (سامانه بهره‌برداری موجود) کانال اصلی تحت یا سناریوی آزمایشی بهره‌برداری ارزیابی و نتایج آن در شکل ۳ ارائه شد. مطابق سناریوی آزمایشی یاد شده (که الگوی تغییرات دبی ورودی برگرفته از یک سناریوی واقعی رخ داده شده در کانال مورد مطالعه بوده) دبی ورودی به کانال طی ۲۴ ساعت شبیه‌سازی ثابت و برابر ۴ مترمکعب بر ثانیه بود. تغییرات پله‌ای کاهشی-افزایشی طی شبیه‌سازی عبارت است از: (۱) افزایش ۵ درصد برداشت آب در آبیگر شماره ۱ به مدت ۱/۵ ساعت (ساعت ۶ تا ۷/۵)، (۲) افزایش ۱۰ درصد برداشت آب در آبیگر شماره ۸ به مدت ۳ ساعت (ساعت ۸ تا ۱۱) و (۳) افزایش ۲۰ درصد دبی برداشتی در آبیگر شماره ۱۴ به مدت ۴ ساعت (۱۱ تا ۱۵). در این ارتباط لازم به توضیح است که میزان تغییرات مجاز رقوم سطح آب برابر ± 5 سانتی متر در محل هر سازه تنظیم تعریف شد. بر این اساس اگر انحراف رقوم سطح آب کنترل شده در بالادست آبیگر از رقوم هدف (یا به بیان دیگر، خطای رقوم سطح آب) از این میزان بیشتر شود، کنترلگر با فرض اختلال در نحوه آبیگری وارد عمل می‌شود.

همان طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، محدوده تغییرات خطای رقوم سطح آب کنترل شده توسط سامانه کنترل خودکار PI در مقایسه با بهره‌برداری دستی، با تشدید نوسان (تغییر دبی برداشتی در آبیگرهای ۸ و ۱۴) ملموس است. مطابق شکل ۴ مقادیر حداکثر خطای محاسبه شده در روش بهره‌برداری دستی در بازه‌های ۱ تا ۷، (آبیگرهای واقع در بالادست کانال)، ۸ تا ۱۳ (آبیگرهای واقع در میان دست کانال) و آبیگرهای ۱۴ تا ۲۰ (آبیگرهای پایین دستی) تحت سه نوسان مورد اشاره در سناریوی بهره‌برداری آزمایشی به ترتیب در محدوده ۴- تا ۷-؛ ۱۲- تا ۹۵- و ۶۰- تا بیش از ۲۰۰- سانتی متر متغیر بوده است. این در حالی است که مقادیر حداکثر خطای محاسبه شده در روش بهره‌برداری خودکار PI در بازه‌های بالادست، میان دست و پایین دستی، تحت سه نوسان مورد اشاره در سناریوی بهره‌برداری آزمایشی، به ترتیب در محدوده صفر تا ۴-، ۱۰- تا ۱۷- و ۵۰- تا حدوداً ۱۵۰- سانتی متر تغییر کرده است. لازم به توضیح است که اعمال سه پله افزایشی-کاهشی با افزایش ناگهانی درخواست در محل یک آبیگر، به ترتیب به میزان ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد و همزمانی آن با عدم تغییر دبی ورودی به کانال اصلی، این سناریوی بهره‌برداری آزمایشی را به یک سناریوی کم‌آبی شدید. نوسانی تبدیل کرده است. لذا، مطابق نتایج به دست آمده عملکرد سامانه بهره‌برداری دستی فقط برای آبیگرهای بالادستی مطلوب و خوب ارزیابی می‌شود و برای آبیگرهای میان دست و پایین دست کانال نامطلوب و ضعیف ارزیابی می‌شود. شایان یادآوری است که پس از اعمال پله سوم در آبیگر شماره ۱۴، سامانه بهره‌برداری دستی قادر به کنترل سطح آب نبوده و آب تحویلی در آبیگرهای پایین دستی کاملاً مختل شده است. در این ارتباط عملکرد سامانه کنترل خودکار PI برای آبیگرهای بالادستی و میان دستی مطلوب و برای آبیگرهای پایین دستی ضعیف و نامطلوب ارزیابی می‌شود. تفاوت رخ داده شده در واکنش PI به تغییرات پله سوم در سناریوی بهره‌برداری آزمایشی نشان می‌دهد، کنترلگر توانسته شرایط تنظیم سازه را به رغم حفظ کند، با این حال در ۴ آبیگر انتهایی کانال تجاوز رقوم سطح آب از عمق هدف قابل ملاحظه است.



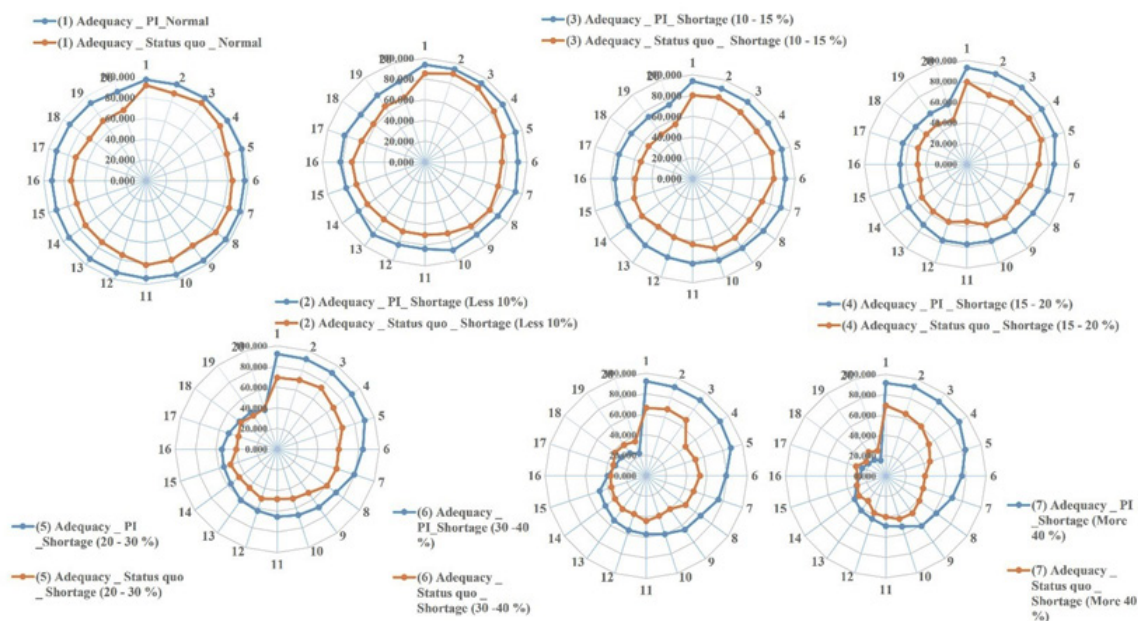
شکل ۴. واکنش سامانه بهره‌برداری دستی (سامانه بهره‌برداری موجود) و سامانه بهره‌برداری کنترل خودکار غیرمتمرکز PI در کنترل خطای رقوم سطح آب در بالادست ۲۰ آبگیر واقع در بازه‌های کانال اصلی آبشار تحت سناریوی بهره‌برداری آزمایشی (نوسانی-کم‌آبی)

ارزیابی بهبود کفایت و پایداری توزیع آب سطحی پس از خودکارسازی

در این بخش، عملکرد دو سامانه کنترل دستی (سامانه بهره‌برداری موجود) و کنترل خودکار (کنترلگرهای PI) در توزیع مطلوب آب سطحی از دو دیدگاه کفایت و پایداری به توزیع آب سطحی مورد مقایسه و تحلیل قرار می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی فرایند توزیع آب سطحی، قبل و بعد از خودکارسازی، تحت سناریوی نرمال و شش سناریوی کم‌آبی منتخب، برای شاخص کفایت در شکل ۵ و برای شاخص پایداری توزیع آب در شکل ۶ ارائه شده است.

مطابق شکل ۵، تنها وجه مشترک در هر دو سامانه بهره‌برداری عبارت است از: الگوی کاهشی میانگین شاخص کفایت، که برای سامانه دستی تحت هر هفت سناریوی بهره‌برداری و برای سامانه خودکار تحت شش سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی از بالادست‌ترین آبگیر (منطقه نزدیک به بند انحرافی آبشار) به سمت پایین‌ترین آبگیر (انتهای کانال‌های اصلی و تخلیه به زهکش انتهایی) روندی نزولی را طی می‌کند. دلیل این امر ماهیت سامانه بهره‌برداری باروش کنترل بالادست (برای هر دو روش بهره‌برداری دستی و کنترل خودکار غیرمتمرکز) در کانال آبشار است. مطابق نتایج شکل ۵، کفایت توزیع آب قبل و بعد از خودکارسازی تحت سناریوی نرمال بهره‌برداری برای ۵۰ درصد آبگیرهای بالادست کانال اصلی به ترتیب در محدوده ۸۰ تا ۹۰ درصد و بالاتر از ۹۰ درصد متغیر بوده است. بنابراین، نتایج نشان می‌دهد حتی در شرایط بدون کم‌آبی متوسط شاخص کفایت برای سامانه بهره‌برداری دستی در محدوده متوسط قرار گرفته، ولی پس از خودکارسازی در محدوده خوب قرار گرفته‌اند. این مقادیر برای ۵۰ درصد آبگیرهای پایین دست کانال اصلی به ترتیب در محدوده ۷۰ درصد تا ۸۰ درصد و بالاتر از ۹۰ درصد متغیر بوده بیانگر ضعیف بودن شاخص کفایت برای سامانه بهره‌برداری دستی و در سوی مقابل و پس از خودکارسازی، در محدوده خوب قرار گرفته‌اند. خلاصه عملکرد کفایت توزیع آب سطحی در سامانه بهره‌برداری دستی به این صورت شد که با آغاز کم‌آبی دامنه تغییرات میانگین روزانه شاخص کفایت توزیع آب سطحی به ترتیب در سناریوی کم‌آبی کمتر از ۱۰ درصد، ۱۵.۱۰ درصد، ۲۰.۱۵ درصد، ۳۰-۲۰ درصد، ۳۰-۴۰ درصد، ۴۰-۳۰ درصد و ۴۰ درصد در محدوده‌های ۸۵.۶۳ درصد، ۸۰.۶۷ درصد، ۸۰.۴۳ درصد، ۶۶.۴۰ درصد، ۶۴.۳۵ درصد و ۶۴.۲۱ درصد به دست آمد. به طور مشابه خلاصه عملکرد کفایت توزیع

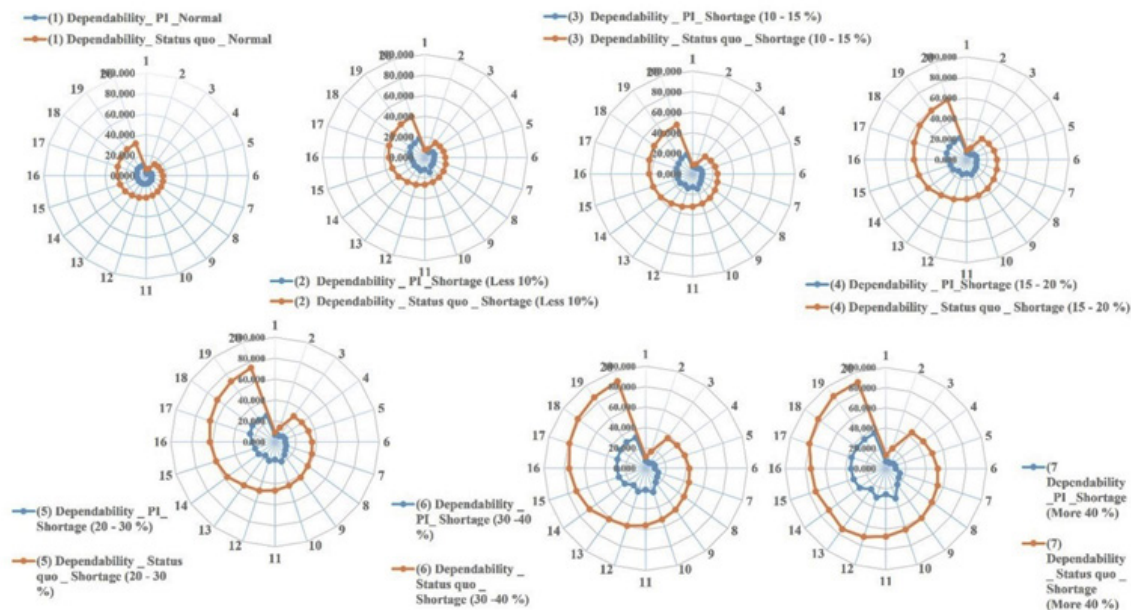
آب سطحی پس از خودکارسازی و با استفاده از سامانه بهره‌برداری کنترل خودکار غیرمتمرکز PI به این صورت شد که با آغاز کم‌آبی دامنه تغییرات میانگین روزانه شاخص کفایت توزیع آب سطحی به ترتیب در سناریوی کم‌آبی کمتر از ۱۰ درصد، ۱۰-۱۵ درصد، ۱۵-۲۰ درصد، ۲۰-۳۰ درصد، ۳۰-۴۰ درصد و >۴۰ درصد در محدوده‌های ۹۶.۸۰ درصد، ۹۳.۷۷ درصد، ۹۲.۶۰ درصد، ۹۰.۲۴ درصد، ۹۰.۲۴ درصد و ۹۱.۲۳ درصد به دست آمد. مقایسه نتایج یادشده بیانگر متوسط بهبود میانگین کفایت توزیع آب سطحی تحت سناریوهای شش‌گانه کم‌آبی منتخب - پس از خودکارسازی - به ترتیب ۱۲ درصد، ۱۳/۵ درصد، ۱۵/۵ درصد، ۲۴ درصد، ۲۶ درصد و ۲۹ درصد است. جمع‌بندی نتایج ارزیابی کفایت توزیع آب سطحی نشان می‌دهد با ظهور کم‌آبی، افت چشمگیر و قابل ملاحظه مقدار مطلوبیت کفایت توزیع آب سطحی در سامانه بهره‌برداری دستی رخ می‌دهد. با محاسبه سطح تحت پوشش آبیگرهای درجه ۲ مشخص شد که حدود ۲/۹ درصد و ۵/۵ درصد از اراضی تحت پوشش شبکه آبشار، میانگین کفایت توزیع آب تحویل داده شده به ترتیب در محدوده ۹۰.۸۵ درصد و ۸۵.۸۰ درصد است. شایان یادآوری است که سطوح یادشده در ملایم‌ترین سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی و زمانی که تنها کاهش دبی ورودی با سامانه بهره‌برداری در محل بند انحرافی کمتر از ۱۰ درصد مقدار تقاضای برآورد شده در کانال رخ داده است. بررسی نتایج خودکارسازی نشان داد پس از به‌کارگیری سامانه کنترل خودکار حدود ۲۶/۶ درصد و ۲۹/۳ درصد از اراضی تحت پوشش شبکه آبشار، میانگین کفایت توزیع آب تحویل داده شده به ترتیب در محدوده ۹۰.۸۵ درصد و ۸۵.۸۰ درصد است. با تشدید کم‌آبی در سناریوی سوم تا هفتم، سطح تحت پوشش با شاخص کفایت بالای ۸۰ درصد برای سامانه بهره‌برداری دستی کمتر از یک درصد، ولی برای سامانه کنترل خودکار برای آبیگرهای بالادستی وضعیت مناسب و برای آبیگرهای میانی و پایین دستی، با تشدید کم‌آبی، وضعیت کمی بهتر از سامانه بهره‌برداری دستی، ولی در حالت نامطلوب به دست آمد. صرف نظر از شرایط حادثه کم‌آبی در سناریوهای ۴ تا ۷ و بر اساس سه سناریوی اول، می‌توان این‌طور استدلال کرد که توانایی سامانه بهره‌برداری اپراتور محور در توزیع کافی آب سطحی در سطح شبکه آبیاری آبشار، حتی در شرایط نرمال بهره‌برداری یا شرایط خفیف کم‌آبی در سامانه تأمین آب، عملکردی نامطمئن داشته و این شرایط پس از خودکارسازی برای نیمه پایین دست آبیگرها همچنان نامطلوب ارزیابی شد.



شکل ۵. میانگین شاخص کفایت تحویل آب به آبیگرهای بالادست تا پایین دست کانال آبیاری شبکه آبشار در هر دوروش کنترل دستی و روش کنترل خودکار PI تحت سناریوی بهره‌برداری نرمال و کم‌آبی

در ادامه نتایج ارزیابی عملکرد هر دو سامانه بهره‌برداری دستی و خودکار نظر شاخص ارزیابی عملکرد پایداری توزیع آب سطحی در کانال اصلی، تحت سناریوهای بهره‌برداری هفت‌گانه، در شکل ۶ ارائه شده است. به خلاف نتایج به دست آمده

از شاخص کفایت، نحوه عملکرد سامانه کنترل خودکار در بهبود پایداری توزیع آب سطحی تحت سناریوهای کم‌آبی ملموس‌تر بوده است. مطابق نتایج شکل ۶، پایداری توزیع آب تحت سناریوی نرمال بهره‌برداری، برای ۵۰ درصد آبیگرهای بالادست کانال اصلی، قبل از خودکارسازی در محدوده ۵ درصد تا ۲۰ درصد و پس از خودکارسازی در محدوده مطلوب زیر ۱۰ درصد متغیر بوده است. بنابراین، نتایج نشان می‌دهد حتی در شرایط بدون کم‌آبی متوسط شاخص پایداری برای سامانه بهره‌برداری دستی در محدوده متوسط قرار گرفته، ولی پس از خودکارسازی در محدوده خوب قرار گرفته‌اند. این مقادیر برای ۵۰ درصد آبیگرهای پایین دست کانال اصلی به ترتیب در محدوده ۲۰ درصد تا ۳۶ درصد و کمتر از ۱۰ درصد متغیر بوده بیانگر متوسط. ضعیف بودن محدوده شاخص پایداری برای سامانه بهره‌برداری دستی و در سوی مقابل و پس از خودکارسازی، در محدوده خوب قرار گرفته‌اند. خلاصه عملکرد پایداری توزیع آب سطحی در سامانه بهره‌برداری دستی به این صورت شد که با آغاز کم‌آبی دامنه تغییرات میانگین روزانه شاخص پایداری توزیع آب سطحی به ترتیب در سناریوی کم‌آبی کمتر از ۱۰، ۱۵، ۲۰-۳۰ درصد، ۳۰-۴۰ درصد و ۴۰-۴۰ درصد در محدوده‌های ۴۰-۱۱ درصد، ۴۸-۱۱ درصد، ۶۱-۱۲ درصد، ۷۷-۱۲ درصد، ۸۴-۱۴ درصد و ۸۶-۱۵ درصد به دست آمد. به طور مشابه خلاصه عملکرد پایداری توزیع آب سطحی پس از خودکارسازی و با استفاده از سامانه بهره‌برداری کنترل خودکار غیرمتمرکز PI به این صورت شد که با آغاز کم‌آبی دامنه تغییرات میانگین روزانه شاخص پایداری توزیع آب سطحی به ترتیب در سناریوی کم‌آبی کمتر از ۱۰ درصد، ۱۵-۱۰-۲۰ درصد، ۲۰-۳۰ درصد، ۳۰-۴۰ درصد و ۴۰-۴۰ درصد در محدوده‌های ۱۸-۵ درصد، ۲۰-۸ درصد، ۲۱-۱۰ درصد، ۲۴-۱۱ درصد، ۳۰-۳۰ درصد و ۴۰-۱۱ درصد به دست آمد. مقایسه نتایج یادشده بیانگر متوسط بهبود میانگین پایداری توزیع آب سطحی تحت سناریوهای شش‌گانه کم‌آبی منتخب - پس از خودکارسازی - به ترتیب ۲۷ درصد، ۱۵/۳ درصد، ۲۱/۳ درصد، ۲۷ درصد، ۲۹/۱ درصد و ۲۹/۴ درصد است. جمع‌بندی نتایج ارزیابی پایداری توزیع آب سطحی نشان می‌دهد با ظهور کم‌آبی، افت چشمگیر و قابل ملاحظه مقدار مطلوبیت پایداری توزیع آب سطحی در سامانه بهره‌برداری دستی رخ می‌دهد. با محاسبه سطح تحت پوشش آبیگرهای درجه ۲ مشخص شد که حدود ۲۷ و ۷۳ درصد از اراضی تحت پوشش شبکه آبخار، میانگین پایداری توزیع آب تحویل داده شده به ترتیب در محدوده ۲۵-۱۰ درصد و بیشتر از ۲۵ درصد است. شایان یادآوری است که سطوح یادشده در ملایم‌ترین سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی وزمانی که تنها کاهش دبی ورودی با سامانه بهره‌برداری در محل بند انحرافی کمتر از ۱۰ درصد مقدار تقاضای برآورد شده در کانال رخ داده است. بررسی نتایج خودکارسازی نشان داد پس از به‌کارگیری سامانه کنترل خودکار حدود ۲۶/۶ درصد و ۲۹/۳ درصد از اراضی تحت پوشش شبکه آبخار، میانگین پایداری توزیع آب تحویل داده شده به ترتیب در محدوده ۲۵-۱۰ درصد و بیشتر از ۲۵ درصد است. با تشدید کم‌آبی در سناریوی سوم تا هفتم، سطح تحت پوشش با شاخص پایداری کمتر از ۲۵٪ برای سامانه بهره‌برداری دستی کمتر از ۱۵٪ ولی برای سامانه کنترل خودکار برای آبیگرهای بالادستی و میانی وضعیت مناسب و برای آبیگرهای پایین دستی، با تشدید کم‌آبی، وضعیت به مراتب بهتر از سامانه بهره‌برداری دستی، با این حال در حالت ضعیف ارزیابی می‌شود.



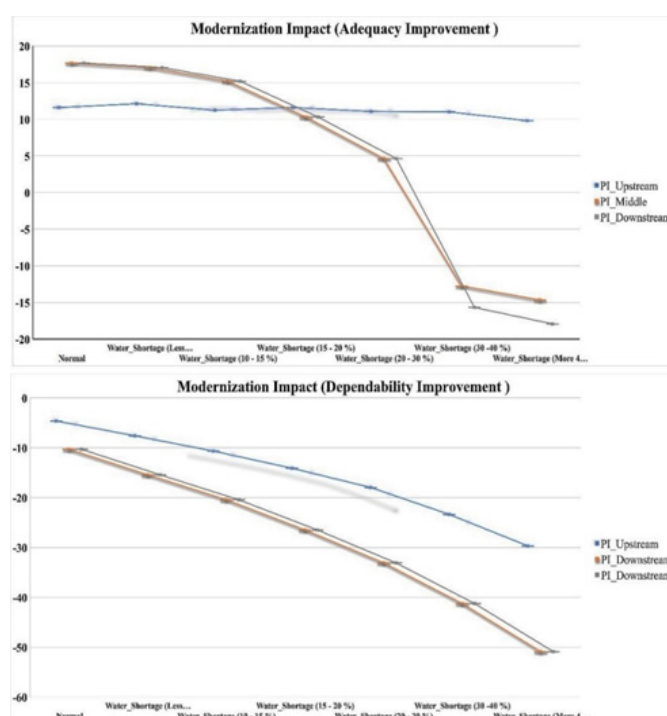
شکل ۶. میانگین شاخص پایداری تحویل آب به آبگیرهای بالادست تا پایین دست کانال اصلی آبیاری شبکه آبشار در هر دو روش کنترل دستی و روش کنترل خودکار PI تحت سناریوی بهره‌برداری نرمال و کم آبی

شکل ۷ مقادیر بهبود هر دو شاخص ارزیابی عملکرد پیش از خودکارسازی را از دیدگاه مدیریتی و به تفکیک آبگیرهای بالادست، میان دست و پایین دست و تحت ۷ سناریوی بهره‌برداری به تصویر می‌کشد. بر این اساس، میزان بهبود شاخص کفایت توزیع آب سطحی پس از خودکارسازی، در آبگیرهای بالادستی تحت هر ۷ سناریوی بهره‌برداری در محدوده ۱۲.۱۰ درصد. به صورت کاملاً مشخص قابل تأیید است. برای آبگیرهای میان دست و پایین دست، در سه سناریوی اول (نرمال و کم آبی های ملایم) تأثیر مثبت خودکارسازی همچنان قابل ردیابی و حدود ۱۷.۱۵ درصد به دست آمده و در دو سناریوی چهار و پنج (کم آبی شدید) بهبود اندک ۱۰.۵ درصد به دست آمده است. نکته جالب، عدم بهبود شرایط و کاهش مطلوبیت در مقایسه با روش بهره‌برداری دستی در دو سناریوی آخر (کم آبی حاد) برای آبگیرهای میان دستی و پایین دستی است که کاهش ۱۵- تا ۱۷- درصد به دست آمده است. بر اساس شکل ۶، میزان بهبود شاخص پایداری توزیع آب سطحی پس از خودکارسازی، در هر سه منطقه شبکه شامل آبگیرهای بالادستی، میان دستی و پایین دستی و تحت هر ۷ سناریوی بهره‌برداری تأثیر مثبت خودکارسازی به دست آمده است. برای آبگیرهای بالادستی، میانگین میزان بهبود در محدوده ۵-۳۰ درصد از سناریوی نرمال تا کم آبی حاد به دست آمده است. برای آبگیرهای میان دست و پایین دست، تحت سناریوهای نرمال و شش گانه کم آبی، دامنه بهبود پایداری توزیع آب سطحی حدود ۱۵-۵۰ درصد به دست آمده است.

در تفسیر و جمع بندی نتایج به دست آمده می‌توان این طور توضیح داد که در بهره‌برداری به شیوه کنترل دستی، تنظیمات آبگیرها در امتداد هر کانال آبیاری منطبق بر مسیر حرکت جریان از بالادست به پایین دست بوده و با اعمال تأخیر زمانی حرکت جریان از یک آبگیر به آبگیر بعدی، زمان تنظیمات آن سازه برآورد می‌شود. در این شیوه بهره‌برداری، میزان تنظیمات روزانه هر سازه آبگیر نیز تابعی از حقا به/دبی فروخته شده/دبی اختصاصی در همان روز است. به طور کلی در روش بهره‌برداری دستی (روش بهره‌برداری موجود) مطلوبیت توزیع آب سطحی (از هر دو منظر کفایت و پایداری توزیع آب) ارتباط مستقیمی با سطح دانش و تخصص مدیر بهره‌برداری در تخمین دقیق زمان تأخیر جریان بین آبگیرها و میزان مهارت و تعهد کاری اکیپ های بهره‌برداری در پیاده سازی برنامه زمانی تنظیمات روزانه سازه ها دارد. همچنین عوامل مشابه ای از جمله مهارت و آشنایی کافی بهره‌برداران در نحوه تنظیمات سازه های آبگیر و انجام کامل و مؤثر بازرسی های دوره ای و واسنجی های دوره ای جهت رفع مشکلات احتمالی پیش آمده برای سازه های فصل آبیاری و اطمینان از دقت (جدول ها) منحنی های دبی- اشل و جدول های میزان بازشدگی - میزان دبی عبوری هر سازه، سبب بهبود هر چه بیشتر فرایند توزیع آب سطحی

می‌شود. ولی نکته حائز اهمیت اینجاست که این سامانه‌های دستی برای شرایط نرمال بهره‌برداری و زمانی که نه تنها آب تأمین شده در محل بند انحرافی جواب‌گویی تقاضا در شبکه آبیاری بود، بلکه میزان آب بیشتری هم جهت تضمین بیشتر به شبکه وارد می‌شد. این شرایط یاد شده با تشدید دوره‌های کم‌آبی و افزایش تقاضا قابل تکرار نیست و همان‌طور که نتایج دو شاخص کفایت و پایداری نشان داد، عملاً عملکرد سامانه بهره‌برداری دستی در شرایط کم‌آبی (مخصوصاً شرایط حادتر) از لحاظ فنی قابل توجیه نیست. پس از خودکارسازی با استفاده از سامانه کنترل خودکار غیر متمرکز PI، مطابق نتایج به دست آمده یاد شده، نمی‌توان عملکرد کنترل‌گرهای PI دراز دیدگاه کفایت توزیع آب سطحی در مناطق پایین دستی (تحت سناریوهای کم‌آبی شدید) و حتی مناطق میان دستی کانال (تحت سناریوهای کم‌آبی حاد) را قابل قبول ارزیابی کرد. نتایج نشان می‌دهد سناریوهای بهره‌برداری کم‌آبی شدید و حاد در این تحقیق که عملاً حدود ۳۵ درصد روزهای بهره‌برداری این شبکه تکرار شده است، وضعیت فوق‌العاده و حادی را در این شبکه آبیاری ایجاد می‌کند که حتی سامانه کنترل خودکار نیز نمی‌تواند در مجموع عملکرد قابل دفاعی ارائه دهد.

شکل ۷. میانگین شاخص کفایت (شکل بالا) و شاخص پایداری (شکل پایین) تحویل آب سطحی به آبگیرهای بالادست، میان دست و پایین دست کانال اصلی



شکل ۷. میانگین شاخص کفایت (شکل بالا) و شاخص پایداری (شکل پایین) تحویل آب سطحی به آبگیرهای بالادست، میان دست و پایین دست کانال اصلی آبیاری شبکه آبشار در هر دو روش‌های دستی و کنترل خودکار PI تحت سناریوی بهره‌برداری نرمال و کم‌آبی

نتیجه‌گیری

این تحقیق با استناد به ضرورت توسعه، بومی‌سازی و پیاده‌سازی فناوری‌های نوین مدیریت آب کشاورزی در سطح کشور و با هدف کاهش تلفات و ارتقای عملکرد سامانه‌های توزیع آب سطحی تحت سناریوهای غیرمتعارف بهره‌برداری متأثر از وقوع دوره‌های کم‌آبی انجام شد. در این راستا، توانایی سامانه کنترل خودکار غیر متمرکز PI در ارتقای کفایت و پایداری توزیع آب سطحی در کانال اصلی شبکه آبیاری آبشار، به عنوان نمونه مطالعاتی، مورد بررسی جامع قرار گرفت. نتایج تحقیق بیانگر آن بود که در آبگیرهای واقع در بالادست شبکه (مناطق کشاورزی نزدیک تر به محل تأمین آب سطحی - بند انحرافی آبشار) میزان بهبود هر دو شاخص کفایت و پایداری توزیع آب سطحی پس از خودکارسازی توسط سامانه کنترل خودکار غیر متمرکز PI مشهود است. در آبگیرهای میان دستی شبکه میزان بهبود شاخص کفایت توزیع آب سطحی پس از خودکارسازی در سناریوهای نرمال تا کم‌آبی شدید بهبود اندک شاخص کفایت و بهبود قابل توجه شاخص پایداری توزیع آب سطحی به دست

آمد. همین روند مشابه در آبیگرهای پایین دستی با شیب کمتر روند بهبود برای کفایت و شیب ملایم تر برای بهبود پایداری حاصل شده است، ولی با شدت گرفتن کم‌آبی در دو سناریوهای آخر (کم‌آبی حاد و وخیم) عملاً تأثیر خودکارسازی از نظر کفایت توزیع منفی ولی از نظر پایداری توزیع آب سطحی قابل دفاع بود. نتایج یاد شده بیانگر آن است که به‌کارگیری سامانه کنترل خودکار غیر متمرکز PI تأثیر انکارناپذیری در بهبود شاخص پایداری توزیع آب سطحی در طول کانال اصلی داشته‌اند و محل قرارگیری آبیگر (بالادست بودن و نزدیک بودن به منبع آب تا پایین دست بودن) تأثیری در روند کنترل پایداری توزیع آب در سامانه‌های کنترل خودکار در همه سناریوهای بهره‌برداری نداشته است. در سوی مقابل، محل قرارگیری آبیگر (بالادست بودن تا پایین دست بودن) در بهبود شاخص کفایت توزیع آب در سامانه کنترل خودکار غیر متمرکز PI به صورت مشهود تأثیرگذار بوده است.

از دیدگاه کاربردی و عملیاتی لازم است رفتار سامانه‌های مختلف بهره‌برداری تحت سناریوهای محتمل برای هر شبکه آبیاری کمی‌سازی شود. در این ارتباط لازم و ضروری است که میزان و سطوح مختلف آسیب‌پذیری هر سامانه کنترل خودکار، تحت هر خطر (طبیعی یا انسان‌ساز)، به صورت کمی مشخص شود. با توجه به نبود سامانه کنترل خودکار در شبکه‌های ایران، برآورد سطوح مختلف آسیب‌پذیری فقط از طریق مدل‌سازی (۱) سامانه توزیع آب سطحی (مدل شبیه‌ساز هیدرولیک جریان) و (۲) سامانه بهره‌برداری بسترسازی می‌شود. در این راستا خروجی تحقیق حاضر که دو مورد یاد شده را پوشش می‌دهد، بستر مناسب برای تحقیقات آتی با هدف ارزیابی ریسک سامانه بهره‌برداری PI را برای خطر خشکسالی و در ادامه مدیریت ریسک سامانه‌های توزیع آب سطحی تحت خطر خشکسالی فراهم می‌آورد. انتخاب سامانه بهره‌برداری مناسب برای شبکه آبیاری آبشار - که معمولاً به صورت ترکیبی از روش‌های مختلف بهره‌برداری است (راهکارهای کوتاه، میان و بلند مدت) - در قالب مطالعات مدیریت ریسک و سازگاری با خشکسالی انجام خواهد شد. بنابراین این تحقیق، به عنوان اولین حلقه از یک زنجیر مطالعات به هم پیوسته است که حلقه‌های آتی آن عبارت‌اند از

- تحلیل زمانی مکانی توزیع آب سطحی در سطح شبکه آبشار پس از جایگزینی سامانه بهره‌برداری فعلی با سامانه جدید با هدف کمی‌سازی زمانی مکانی توزیع آب سطحی در مناطق تحت پوشش و تعیین مناطق آسیب‌پذیر؛
- مطالعات اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی با هدف تعیین میزان مقبولیت سامانه بهره‌برداری جدید از دیدگاه توسعه پایدار؛ و در نهایت
- بررسی توانایی سامانه‌های بهره‌برداری مدرن تر مانند سامانه‌های کنترل خودکار متمرکز به هدف معرفی به عنوان راهکارهای سازگاری با تغییر اقلیم.

منابع

- [1] Rahparast, D. and S.M. Hashemy S, Spatiotemporal Assessment Model for Manual Operation Systems' Technical Performance in Surface Water Distribution Under Water Scarcity Scenarios. *Water Resources Management*, 2024: p. 1-18.
- [2] Kaghazchi, A., et al., Simulation and evaluation of agricultural water distribution and delivery systems with a Hybrid Bayesian network model. *Agricultural Water Management*, 2021. 245: p. 106578.
- [3] Arauz, T., et al., Design of PI controllers for irrigation canals based on linear matrix inequalities. *Water*, 2020. 12(3): p. 855.
- [4] Shahverdi, K. and M.J. Monem, Irrigation canal control using enhanced fuzzy SARSA learning. *Irrigation and Drainage*, 2022. 71(3): p. 766-775.
- [5] Zhu, Z., G. Guan, and K. Wang, The multi-point hydraulic control method for advanced controller design of the open canal irrigation systems. *Journal of Hydroinformatics*, 2023. 25(2): p. 258-274.
- [6] Zhu, Z., et al., The Integrator Dual-Delay model for advanced controller design of the open canal irrigation systems with multiple offtakes. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023. 205: p. 107616.
- [7] Liu, W., et al., Exploiting a real-time self-correcting digital twin model for the middle route of the south-to-north water diversion project of china. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2023. 149(7): p. 04023023.
- [8] Bayat, F., et al., Operation of irrigation canals using intelligent methods. *Environmental Sciences*, 2022. 20(1): p. 57-76.
- [9] Shahverdi, K., et al., Generalizing fuzzy SARSA learning for real-time operation of irrigation canals. *Water*, 2020. 12(9): p. 2407.
- [10] Sharifi, H., A. Roozbahani, and S.M.H. Shahdany, Evaluating the Performance of Agricultural Water Distribution Systems Using FIS, ANN and ANFIS Intelligent Models. *Water Resources Management*, 2021: p. 1-20.
- [11] Lord, S.A., S.M.H. Shahdany, and A. Roozbahani, Minimization of Operational and Seepage Losses in Agricultural Water Distribution Systems Using the Ant Colony Optimization. *Water Resources Management*, 2021. 35(3): p. 827-846.
- [12] Bozorgi, A., et al., Development of multi-hazard risk assessment model for agricultural water supply and distribution systems using bayesian network. *Water Resources Management*, 2021. 35(10): p. 3139-3159.
- [13] Shahverdi, K., et al., Design of Operation Strategy for Canal Structures. *Journal of Hydraulics*, 2023. 18(4): p. 35-48.
- [14] Araúz Pison, M.T., et al. Model-based PI design for irrigation canals with faulty communication networks. in *European Control Conference (ECC)(2022)*, pp. 1236-1242. 2022. IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers).
- [15] Shahverdi, K., et al., Double Q-PI architecture for smart model-free control of canals. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022. 197: p. 106940.

- [16] Schuurmans, J., et al., Control of water levels in the meuse river. Journal of irrigation and drainage engineering, 1997. 123(3): p. 180-184.
- [17] Molden, D.J. and T.K. Gates, Performance Measures for Evaluation of Irrigation- Water-Delivery Systems. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1990. 116(6): p. 804-823.