



Developing a decentralized proportional-integral automatic control system and evaluating its performance in improving the operation of the Abshar irrigation district' main canal

Seyed Mohammad Ahmadi¹ | Seyed Mehdy Hashemy² | Jaber Soltani³ | Maryam Varavi Pour⁴

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: smahmadi2020@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: mehdi.hashemy@ut.ac.ir
3. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: jsoltani@ut.ac.ir
4. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: mvaravi@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Feb. 29, 2024

Revised: May. 1, 2024

Accepted: May. 18, 2024

Published online: July. 2024

Keywords:

Constitutive Model,
Unsaturated Soil,
Numerical Simulation,
Plasticity.

ABSTRACT

In this study, the performance of a Proportional-Integral (PI) automatic control system for the operation of the main channel of the northern branch of the Abshar irrigation network was evaluated under low-water operation scenarios. The actions taken to achieve the research objectives included: 1) Development of a hydraulic flow simulation model in the main channel of the Abshar irrigation network using a simplified Integral-Delay (ID) mathematical model. 2) Development of a decentralized PI automatic control operation model. 3) Coupling the automatic operation control model with the hydraulic simulation model in MATLAB and determining the proportional and integral coefficients of each controller using system identification methods. 4) Simulation of the operation status using the designed automatic system under normal, low-water, and severe low-water operation scenarios with input fluctuations. The simulation results demonstrated that the controller had acceptable capability in implementing desirable operation under normal operation scenarios, with performance evaluation indices MAE, IAE, and STE fluctuating within the ranges of 0.11 to 0.140, 0.0013 to 0.0182, and 0.0001 to 0.0011, respectively. With the emergence of low-water scenarios and their intensification, water distribution conditions were assessed as desirable in upstream intakes but uncertain in downstream intakes. The calculated maximum error values in the lower intervals ranged from -10 to -20 and -35 to -45 centimeters, respectively. The results showed that the controller transferred the effects of low-water conditions and inflow fluctuations downstream, resulting in desirable surface water distribution for upstream intakes but inappropriate distribution for downstream intakes.

Cite this article: Ahmadi, S. M., Hashemy, S. M., Soltani, J., & VaraviPour, M (2024). Developing a decentralized proportional-integral automatic control system and evaluating its performance in improving the operation of the Abshar irrigation district' main canal, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(5), 729-747. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.373316.669671>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.373316.669671>

توسعه سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز تناسبی-انتگرالی و ارزیابی عملکرد آن در بهبود بهره‌برداری کانال اصلی 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 (ابوریحان)، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: smahmadi2020@ut.ac.ir

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

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

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

چکیده

اطلاعات مقاله

در این پژوهش ضمن توسعه الگوریتم کنترل خودکار تناسبی-انتگرالی (PI)، به عنوان سامانه کنترل خودکار بهره‌برداری کانال اصلی شاخه شمالی شبکه آبیاری آبشار، عملکرد آن تحت سناریوهای بهره‌برداری کم‌آبی ارزیابی شد. در این راستا اقدامات صورت گرفته در راستا تحقق اهداف تحقیق عبارتند از (۱) توسعه مدل شبیه‌ساز هیدرولیک جریان در کانال اصلی شبکه آبیاری آبشار با استفاده از مدل ریاضی ساده شده انتگرالی - تاخیری (ID، ۲) توسعه مدل بهره‌برداری کنترل خودکار غیرمتمرکز PI و (۳) کوپل مدل بهره‌برداری خودکار با مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی در محیط MATLAB و تعیین ضرایب تناسبی و انتگرالی هر کدام از کنترل‌گرهای این سامانه با روش تشخیص سیستم، (۴) شبیه‌سازی وضعیت بهره‌برداری با بهره‌گیری از سامانه خودکار طراحی شده تحت سناریوهای بهره‌برداری نرمال، کم‌آبی و کم‌آبی شدید همراه با نوسانات ورودی. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که کنترل‌گر توانایی قابل قبولی در پیاده‌سازی بهره‌برداری مطلوب تحت سناریوی نرمال داشته و شاخص‌های ارزیابی عملکرد MAE، IAE و STE به ترتیب در محدوده ۰/۱۱ تا ۰/۱۴، ۰/۰۱۳ تا ۰/۰۱۸۲ و ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۰۱۱ نوسان داشته است. با ظهور کم‌آبی در سناریوی اول و تشدید آن در سناریوی دوم بهره‌برداری شرایط توزیع آب در آبیگرهای بالادستی شبکه مطلوب ولی در آبیگرهای پایین‌دستی غیرمطمئن ارزیابی شد و مقادیر حداکثر خطای محاسبه شده در بازه‌های پایین‌دستی به ترتیب در محدوده ۱۰- تا ۲۰- و ۳۵- تا ۴۵- سانتی‌متر متغیر بود. نتایج نشان داد کنترل‌گر تاثیر کم‌آبی و نوسانات ورودی را به سمت پایین‌دست منتقل می‌کند و نتیجه آن توزیع آب سطحی مطلوب برای بالادست و توزیع نامناسب در آبیگرهای پایین‌دست بود.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۲/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۲/۲۹

تاریخ انتشار: مرداد ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:

مدل رفتاری،

خاک غیراشباع،

مدل‌سازی عددی،

پلاستیسیته.

استاد: احمدی؛ سید محمد، هاشمی شاهدانی؛ سیدمهدی، سلطانی؛ جابر، وراوی پور؛ مریم، (۱۴۰۳) توسعه سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز تناسبی-انتگرالی و ارزیابی عملکرد آن در بهبود بهره‌برداری کانال اصلی شبکه آبیاری آبشار اصفهان، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۵ (۵)، ۷۲۹-۷۴۷.



<https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.373316.669671>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.373316.669671>

مقدمه

در 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 می‌نماید. منبع تامین 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 تامین آن آب رها شده از سد مخزنی - توسط شبکه‌های مجاری انتقال و توزیع آب (شبکه‌های آبیاری) می‌باشد (Arauz et al., 2020). اصطلاح شبکه آبیاری به مجموعه سامانه‌ها/سازه‌هایی تلقی می‌شود که وظیفه انتقال و توزیع آب کشاورزی از محل تامین (سد، بند انحرافی، رودخانه، ایستگاه پمپاژ و ..) تا محل مصرف (مزارع) به‌عهده دارند. با توجه به تعدد سازه‌های هیدرولیکی در یک شبکه آبیاری، مفهوم بهره‌برداری موثر از اهمیت خاصی برخوردار است. در اصل، تفسیر فیزیکی بهره‌برداری به این معنی است که اپراتورهای تیم بهره‌برداری چگونه و تحت چه برنامه‌ریزی زمانی فرآیند تنظیم، باز و بسته نمودن سازه‌های تنظیم سطح آب و سازه‌های تحویل آب (آبگیرها) را در امتداد مسیر جریان در کانال‌های آبیاری انجام می‌دهند. با تاکید بر تحقق بهره‌برداری موثر، ارتقا روش‌ها و سامانه‌های بهره‌برداری کانال‌های آبیاری با توسعه سامانه‌های کنترل خودکار اهمیت خاصی پیدا کرده است (Marashi et al., 2023).

در این ارتباط، محققین دانشگاهی در ایران نیز دامنه وسیعی از الگوریتم‌های کنترل از تکنیک‌های طراحی بر پایه روش‌های کنترل کلاسیک تناسبی (P) (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۷)، تناسبی-انتگرالی (PI) (سید موسوی و همکاران، ۱۳۹۴) (زمانی و همکاران، ۱۳۹۲) و PID (جمالی و منعم، ۱۳۹۳) تا روش‌های کنترل مدرن MPC، LQR، Fuzzy control (Shahverdi & Monem, 2022) و همچنین روش‌های یادگیری ماشین (Bayat et al., 2022; Shahverdi et al., 2020) را مورد مطالعه قرار داده‌اند. شایان ذکر است که عمده این مطالعات در سطح توسعه مدل‌های ریاضی و برخی در سطح آزمایشگاهی صورت گرفته و تاکنون در سطح هیچ کدام از ۱۲۰ شبکه آبیاری کشور عملیاتی نشده است. به نظر می‌رسد علی‌رغم تحقیقات پژوهشی متعدد صورت گرفته در این بخش که به‌نوعی موید ضرورت ارتقا سامانه‌های بهره‌برداری موجود در محیط‌های آکادمیک مشور می‌باشد ولی تاکنون توجیه اقتصادی پیاده‌سازی آن‌ها با در نظر گرفتن ضرورت سرمایه‌گذاری کلان در این بخش و محدودیت‌های شدید بودجه‌ای بخش دولتی، تا کنون در کشور ایران محقق نشده است. وجه منفی استمرار شرایط موجود کاهش اعتماد مجموعه کشاورزان به عملکرد توزیع آب سطحی در شبکه‌های آبیاری کشور خواهد بود. ولی وجه مثبت آن می‌تواند انجام مطالعات بیشتر بر روی گزینه‌های بالقوه خودکارسازی قابل عملیاتی شدن در بیش از ۱۲۰ شبکه آبیاری - با شرایط اقلیمی، اجتماعی و اقتصادی مختلف - باشد که بیش از ۲ میلیون هکتار از اراضی فاریاب کشور را پوشش می‌دهند. پیش فرض احتمال پیاده‌سازی سامانه‌های کنترل خودکار غیرمتمرکز (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 غیرمتمرکز، الگوریتم کنترل خودکار PI به‌عنوان پرکاربردترین الگوریتم مورد استفاده در تحقیقات داخلی و بین‌المللی خودکارسازی بهره‌برداری کانال‌های آبیاری عملکرد قابل قبولی از خود نشان داده است (Shahverdi et al., 2023). همزمان با توسعه و پیاده‌سازی الگوریتم کنترل خودکار PI در کانال‌های متفاوت، توسعه روش‌های تنظیم ضرائب این کنترل گر - به ترتیب ضریب تناسبی و ضریب انتگرالی - نیز انجام شده است. در این ارتباط تحقیقات برجسته داخلی انجام شده در این زمینه عبارتند از پژوهش Zamani et al (۲۰۱۵) با هدف تنظیم ضرائب PI را با استفاده از الگوریتم تشخیص سیستم در نرم افزار MATLAB و با لحاظ نمودن برخی شرایط هندسی و هیدرولیکی کانال‌ها و سید موسوی و همکاران (۱۳۹۴) با ارتقا روش مرسوم مبتنی بر سعی و خطا با استفاده از روش شناسایی سامانه برای کانال اصلی شبکه آبیاری دوستی اشاره نمود. پژوهش‌های بین‌المللی متعددی در این زمینه انجام شده که از برجسته ترین آن می‌توان به پژوهش (Van Overloop et al., 2008) اشاره نموده که روشی برای اولویت‌بندی مشخصات فیزیکی - هیدرولیکی تاثیرگذار در طراحی کنترلگر و فیلترهای آن بر روی کانال اصلی شبکه آبیاری آریزونا ارائه دادند. در پژوهش دیگری برای کانال اصلی شبکه آبیاری Gignac در کشور فرانسه، یک روش خودکار تنظیم ضرائب انتگرالی و تناسبی (Auto-Tune Variation) با هدف تعیین ضرائب بهینه سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز PI توسعه داده شد (Litrico et al., 2007). همچنین می‌توان به توسعه یک روش تنظیم ضرائب کنترل گر بر پایه سرعت حرکت موتور سازه‌های تنظیم سطح آب بر روی کانال اصلی Grand Valley در کشور آمریکا اشاره نمود (Burt et al., 1998). مطابق موارد مذکور باید در نظر داشت که شرایط طراحی و انتخاب روش مناسب تنظیم ضرائب کنترلگر PI برای هر کانال آبیاری، بسته به مشخصات هندسی-سازه‌ای و اهداف بهره‌برداری متفاوت است.

شایان ذکر است که آزمون عملکرد کنترل گر PI، شبیه به هر سامانه کنترل خودکار دیگری، در ارتقا فرآیند توزیع و تحویل آب سطحی در سه مرحله قابل انجام است. در مرحله اول، مدل ریاضی توسعه داده شده کنترل گر با یک مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی (که شبیه‌سازی وضعیت جریان در کانال‌های آبیاری را پس از اعمال فرامین کنترلی در هر گام زمانی محاسبه می‌کند) تلفیق (کوپل) شده و با استفاده از شاخص‌های ارزیابی عملکرد (مبتنی بر رقوم سطح آب یا دبی تحویلی) عملکرد کنترل گر در طول زمان بررسی خواهد شد. ابزار اصلی انجام پژوهش‌های این مرحله عبارت است از بکارگیری وسیع مدل‌های هیدرودینامیکی که امکان شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در کانال‌های آبیاری را دارند، به عنوان ابزار اصلی محققین جهت ارزیابی عملکرد بهره‌برداری وضع موجود و همچنین بررسی گزینه‌های ارتقا شیوه بهره‌برداری، دیده می‌شود. در این راستا مدل‌های تجاری، کدهای متن باز و مدل‌های توسعه داده شده دانشگاهی مختلفی در دسترس است که در تحقیقات با موضوع بهره‌برداری شبکه آبیاری استفاده شده است. از آن جمله می‌توان توسعه‌ی یک مدل هوشمند توزیع آب کشاورزی با استفاده از شبکه‌های ترکیبی Bayesian برای کانال اصلی شبکه آبیاری رودست اصفهان (Kaghazchi et al., 2021)؛ بکارگیری مدل هیدرودینامیکی CANALMAN برای ارزیابی بهره‌برداری کانال اصلی شبکه Swat پاکستان (Ghumman et al., 2018)؛ استفاده از مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی SOBEK با هدف بررسی پارامترهای هندسی مختلف کانال آبیاری و تاثیر آن در فرآیند تنظیم ضرائب کنترل گر PI (Zamani et al., 2015)؛ استفاده از مدل DUFLOW برای ارزیابی بهره‌برداری کانال اصلی شبکه آبیاری Mahatra اتیوپی (Dejen, 2015)؛ استفاده از مدل HEC-RAS برای شبیه‌سازی جریان غیرماندگار در یک کانال اصلی شبکه آبیاری در اسپانیا (Soler et al., 2015)؛ و تحقیق جمالی و منعم (۱۳۹۳) با استفاده از مدل هیدرودینامیک متن باز ICSS با هدف بهینه‌یابی ضرائب کنترل گر PID برای کانال شماره دو ASCE اشاره نمود. در مرحله دوم و پس از اجرای موفقیت آمیز مرحله اول، مدل آزمایشگاهی کانال آبیاری و کنترل گر در مقیاس یک فلوم در آزمایشگاه هیدرولیک ساخته شده و ارزیابی عملکرد کنترل گر در تکرارهای مختلف و تحت سناریوهای مختلف بهره‌برداری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مرحله سوم که پیش‌نیاز آن اجرای موفقیت آمیز مراحل اول و دوم است، پیاده‌سازی و آزمون عملکرد سامانه کنترل در کانال آبیاری است.

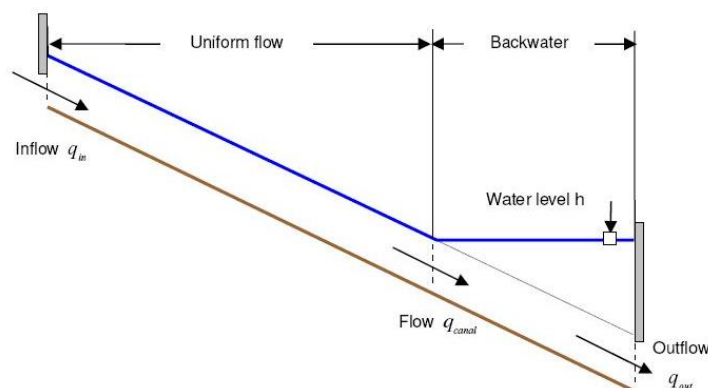
در این پژوهش، با محوریت فلسفه امکان‌پذیری پیاده‌سازی سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز در کشور ایران، الگوریتم کنترل خودکار PI به عنوان سامانه کنترل بهره‌برداری کانال اصلی (شاخه شمالی) شبکه آبیاری آبشار اصفهان انتخاب شد. با در نظر گرفتن مراحل سه‌گانه توسعه یک سامانه بهره‌برداری خودکار در شبکه آبیاری که پیش‌تر توضیح داده شد، اسکوپ مطالعه حاضر محدود به مرحله اول آزمون عملکرد کنترل گر طراحی شده می‌شود که عبارت است از توسعه مدل ریاضی کنترل گر و کوپل آن با مدل شبیه‌ساز هیدرولیک جریان و نهایتاً آزمون عملکرد کنترل گر توسعه داده شده می‌باشد. نوآوری تحقیق حاضر عبارت است از توسعه سامانه کنترل خودکار بهره‌برداری PI برای اولین بار برای کانال اصلی شبکه آبیاری آبشار می‌باشد. با فرض این واقعیت که شرایط سازه‌ای، بهره‌برداری، تامین و تخصیص آب سطحی به هر شبکه آبیاری شرایطی تقریباً منحصر به فرد است، لذا در این پژوهش تلاش شد که سناریوهای بهره‌برداری براساس احتمال وقوع دبی منحرف شده در محل بند انحرافی در دوره آماری سی ساله به کلاس‌های مختلف تقسیم‌بندی شده تا عملکرد سامانه کنترل خودکار تحت محتمل‌ترین سناریوهای بهره‌برداری شبکه آبشار مورد بررسی قرار گیرد. در همین راستا اهدافی که از انجام این پژوهش در نظر گرفته شده است، عبارتند از ۱) توسعه مدل شبیه‌ساز هیدرولیک جریان در کانال اصلی شبکه آبیاری آبشار با استفاده از مدل ریاضی ساده شده انتگرالی - تاخیری (ID)، ۲) توسعه مدل بهره‌برداری کنترل خودکار غیرمتمرکز PI و ۳) کوپل مدل بهره‌برداری خودکار با مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی در محیط MATLAB و تعیین ضرائب تناسبی و انتگرالی هر کدام از کنترل‌گرهای این سامانه با روش تشخیص سیستم، ۴) شبیه‌سازی وضعیت بهره‌برداری با بهره‌گیری از سامانه خودکار طراحی شده تحت سناریوهای بهره‌برداری نرمال، کم‌آبی و کم‌آبی شدید همراه با نوسانات ورودی.

مواد و روش‌ها

مدل ریاضی شبیه‌سازی جریان آب در کانال آبیاری

مدل ریاضی جریان آب در کانال برای محاسبه رقوم سطح آب در انتهای هر بازه و دبی ورودی به بازه بعدی کانال استفاده می‌شود. این دو پارامتر، از مولفه‌های اصلی سیستم کانال هستند که رفتار هیدرولیکی سیستم را توصیف می‌کنند در این تحقیق از مدل انتگرالی - تاخیری^۱

(ID) پیشنهاد شده در تحقیق (Schuurmans et al., 1997) استفاده شد. بر اساس این مدل خطی، هر بازه از کانال به دو بخش، یکی با جریان یکنواخت و دیگری با جریان تحت تاثیر منحنی برگشت آب^۱ تقسیم می‌شود. مشخصه اصلی بخش اول زمان تاخیر ناشی از حرکت موج آب از سراب بازه تا محل اثرگذاری جریان برگشتی است و مشخصه اصلی بخش دوم عبارت است از سطح ذخیره. طرح شماتیک مدل ID در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱). شمای مدل ساده خطی انتگرالی - تاخیری (ID)

بر اساس مدل خطی ID، مدل گسسته شده برای یک بازه از کانال که شامل بخش جریان یکنواخت و بخش منحنی برگشت آب می‌باشد، به فرم رابطه زیر قابل ارایه می‌باشد (Schuurmans et al., 1997):

$$h(k+1) = h(k) + \frac{T_c}{A_s} q_{in}(k - k_d) - \frac{T_c}{A_s} q_{out}(k) - \frac{T_c}{A_s} q_{off-take}(k) \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در این رابطه، h عمق آب در انتهای پایین دست بازه، A_s برابر سطح ذخیره ناشی از منحنی برگشت آب (سطح افقی بالای سطوح جریان) (m^2) ، T_c گام زمانی کنترل (s) ، q_{in} دبی ورودی به بازه کانال (m^3/s) ، q_{out} دبی خروجی از بازه کانال (m^3/s) ، $q_{off-take}$ دبی برداشتی توسط آبگیر (m^3/s) ، k_d برابر تعداد گام‌های تاخیری ناشی از حرکت آب از سراب کانال تا محل تحت تاثیر منحنی برگشت آب می‌باشد و k اندیس گام زمانی می‌باشد. در ادامه، از مدل فضای حالت^۲ که امکان فشرده سازی فرمولاسیون چند متغیره مدل خطی را مهیا می‌کنند، برای بیان مدل ریاضی سیستم کانال استفاده شده است. بر این اساس رابطه سیستم به صورت معادله زیر بیان می‌شود (Schuurmans et al., 1997):

$$x(k+1) = A(k).x(k) + B_u.u(k) + B_d.d(k) \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این معادله: u ماتریس متغیر کنترل شونده، d ماتریس اغتشاشات می‌باشد که شامل مقادیر درخواستی آب می‌باشد. همچنین k نیز شاخص گام زمانی، پارامترهای A ، B_u ، B_d ضرائب معادلات هستند که به ترتیب عبارتند از: ماتریس سیستم (نمائی از ضرائب معادلات جریان)، ماتریس ورودی ضرائب کنترل، ماتریس ورودی ضرائب اغتشاشات. همچنین X ماتریس وضعیت سیستم است که به صورت رابطه ذیل بیان می‌گردد (Van Overloop, 2006):

$$X = \begin{bmatrix} q_{in}(k+1) \\ \vdots \\ q_{in}(k - k_d - 1) \\ q_{in}(k - k_d) \\ e_1(k+1) \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در این رابطه ماتریس e خطای رقوم سطح آب در انتهای هر بازه، q_{in} میزان دبی ورودی به بازه کانال به میزان زمان تاخیر حرکت آب در هر بازه (k_d) گام زمانی است. نهایتاً با تبدیل روابط بدست آمده برای تمامی بازه‌ها به فرم مدل ماتریسی فضای حالت (رابطه ۲)، ماتریس‌های $X_{64 \times 1}$ ، $A_{64 \times 64}$ ، $B_{u64 \times 40}$ و $B_{d64 \times 20}$ بدست آمدند. به جهت بزرگ بودن ماتریس‌ها، مدل ماتریسی فضای حالت تنها برای دو بازه اول در ذیل آورده شده است:

1 - Back water

2 - State space model

$$\begin{bmatrix} q_{in}(k+1) \\ q_{in}(k) \\ q_{in}(k-1) \\ q_{in}(k-2) \\ q_{in}(k-3) \\ e_1(k+1) \\ q_1(k+1) \\ q_1(k) \\ q_1(k-1) \\ e_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{T_c}{A_s} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{T_c}{A_s} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_{in}(k) \\ q_{in}(k-1) \\ q_{in}(k-2) \\ q_{in}(k-3) \\ q_{in}(k-4) \\ e_1(k) \\ q_1(k) \\ q_1(k-1) \\ q_1(k) \\ e_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \nabla q_{in}(k) \\ \nabla q_1(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{T_c}{A_s} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 - \frac{T_c}{A_s} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_{off-take-1}(k) \\ q_{off-take-2}(k) \end{bmatrix} \quad \text{رابطه ۴}$$

سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز تناسبی-انتگرالی^۱

کنترل گر تناسبی - انتگرالی براساس روش کنترل پسخور طراحی می‌گردد که در آن متغیر کنترل شونده (خطای رقوم سطح آب) در بالادست سازه تنظیم اندازه گیری می‌شود. در این روش، میزان انحراف رقوم سطح آب از رقوم هدف به کنترل گر بازگردانده می‌شود تا با محاسبه اقدام تصحیحی متغیر کنترل شونده به سوی مقادیر هدف بازگردانده شود. در این روش اغتشاشات، برداشت آب در محل آبیگر و نوسانات ورودی به کانال اصلی در نظر گرفته می‌شود. بر اساس الگوریتم PI، تغییرات دبی عبوری از زیر سازه‌های تنظیم به صورت زیر قابل محاسبه است (Hashemy & Van Overloop, 2013):

$$\Delta Q(k) = K_i \cdot e(k) + K_p \cdot [e(k) - e(k-1)] \quad \text{رابطه ۵}$$

در رابطه فوق $\Delta Q(k)$ 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 نشانگر گام زمانی جاری و گام زمانی قبلی، K_p برابر ضریب تناسبی و K_i برابر ضریب انتگرالی است. زمانی که کنترل مجموعه‌ای از بازه‌های کانال مدنظر باشد، پدیده تشدید اغتشاش رخ میدهد. این پدیده به علت اتصال پیوسته بازه‌ها به یکدیگر انجام می‌گیرد. برای کاهش اغتشاشات، از یک فیلتر پایین‌گذر مرتبه اول جهت کاهش دامنه نوسانات سیگنال‌های ورودی به کنترل گر برای تمام بازه‌های کانال استفاده شد. استفاده از این فیلتر در مواقعی که امواج رزونانس غیرمیرا در بازه کانال پدیدار شود، به‌خصوص در بازه‌های کوتاه یا بازه‌های کم‌شیب کانال توصیه می‌گردد. با استفاده از فیلتر پایین‌گذر مرتبه اول مقدار تغییرات دبی عبوری از سازه‌های تنظیم به صورت رابطه زیر محاسبه می‌گردد (Van Overloop, 2006):

$$\Delta Q(k) = K_i \cdot e_f(k) + K_p \cdot [e_f(k) - e_f(k-1)] \quad \text{رابطه ۶}$$

که در این رابطه اندیس f نشانگر خطای فیلتر شده است که از رابطه زیر قابل محاسبه است (Van Overloop, 2006):

$$e_f(k) = F_c \cdot e_f(k-1) + (1 - F_c) \cdot e(k) \quad \text{رابطه ۷}$$

در این رابطه F_c ثابت فیلتر (Filter Factor) یک عدد بی‌بعد بوده که در واقع نرمال شده حد فرکانس (normalized cut-off frequency) می‌باشد. لازم به توضیح است که مقدار حد فرکانس مجاز (cut-off frequency)، که ارتباط مستقیمی با دامنه فیلتر

پایین گذر بر اساس توصیه (Ooi & Weyer, 2008) برابر با نصف فرکانس موج در کانال در نظر گرفته می‌شود که برای فیلتر کنترل این پژوهش برابر $0/0019$ rad/sec در نظر گرفته شد. محاسبه ضرایب تناسبی و انتگرالی (K_p و K_i) بر اساس فرمول پیشنهادی (Schuurmans et al., 1997) برای طراحی کنترل گر PI انجام گرفت. براساس قوانین تنظیم ارایه شده توسط شورمانز محاسبه ضرایب تناسبی بر پایه چهار پارامتر سیستم که عبارتند از: سطح ذخیره در شرایط بهره‌برداری (A_s)، گام زمانی کنترل (T_c)، رزونانس ماکزیمم در جریان حداقل (R_p) و بسامد رزونانس ماکزیمم در جریان حداقل بازه کانال (ω_r) و به صورت ذیل قابل محاسبه است که می‌تواند در یک فرآیند سعی و خطا برای هر بازه کانال محاسبه شود و یا با استفاده از جعبه‌ابزار تشخیص سیستم (SI)(System Identification) در MATLAB به راحتی قابل محاسبه است. بر اساس تحقیق (Miltenburg, 2008) می‌توان دبی ورودی به هر بازه کانال را به‌عنوان ورودی قابل اندازه‌گیری و رقوم سطح آب در هر بازه را به‌عنوان خروجی قابل اندازه‌گیری در نظر گرفت.

$$K_p = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{A_s \cdot \omega_r}{R_p}} \quad \text{رابطه ۸}$$

$$K_i = \frac{T_c \cdot \omega_r}{12 \cdot R_p} \quad \text{رابطه ۹}$$

شاخص‌های ارزیابی عملکرد

واسنجی مدل شبیه‌ساز ID بر پایه میزان تطبیق داده‌های دبی تحویلی به کلیه آبیگرهای واقع در کانال اصلی سامانه توزیع آب، به‌عنوان 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 ذیل استفاده شد (Rahparast & Hashemy S, 2024).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n X_i - \sum_{i=1}^n Y_i}{\sum_{i=1}^n X_i} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - X_i| \quad \text{رابطه ۱۲}$$

که در این روابط X_i و Y_i به ترتیب برابر مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده می‌باشند. تقریباً در تمامی سامانه‌های کنترل خودکار هدف اصلی ثابت نگاه داشتن تراز سطح آب در کانال در یک ارتفاع هدف می‌باشد. با حفظ رقوم سطح آب در بازه‌های کانال در این رقوم هدف، آبیگرهای جانبی همواره یک دبی ثابت و یکنواخت را دریافت می‌کنند. با توجه به این موضوع، در اکثر تحقیقات خودکارسازی کانال‌ها قضاوت در مورد عملکرد یک الگوریتم کنترل می‌تواند از روی چگونگی عملکرد آن در ثابت نگاه داشتن سطح آب صورت گیرد. لذا شاخص‌های ارزیابی بر اساس میزان خطای سطح آب از سطح هدف و مدت زمان وقوع این خطا طرح‌ریزی شده‌اند. رایج‌ترین شاخص‌های ارزیابی عملکرد مورد استفاده در پژوهش‌های مختلف عبارتند از حداکثر خطای مطلق^۱ (MAE) و خطای مطلق تجمعی^۲ (IAE) و خطای برگشت به حالت ماندگار^۳ (STE) به شرح ذیل می‌باشند (Hashemy & Van Overloop, 2013):

$$MAE = \frac{\max(|y_t - y_{target}|)}{y_{target}} \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$IAE = \frac{\frac{\Delta t}{T} \sum_{t=0}^T (|y_t - y_{target}|)}{y_{target}} \quad \text{رابطه ۱۴}$$

$$StE = \frac{\Delta t}{(t_0 + \Delta t) \cdot y_t} \sum_{t=T-t_0}^T |y - y_{target}| \quad \text{رابطه ۱۵}$$

که در روابط فوق، y_t تراز سطح آب محاسبه شده توسط مدل شبیه‌سازی جریان در زمان t و y_{target} تراز سطح آب هدف، Δt

1 - Maximum Absolute Error

2 - Integral of Absolute Magnitude of Error

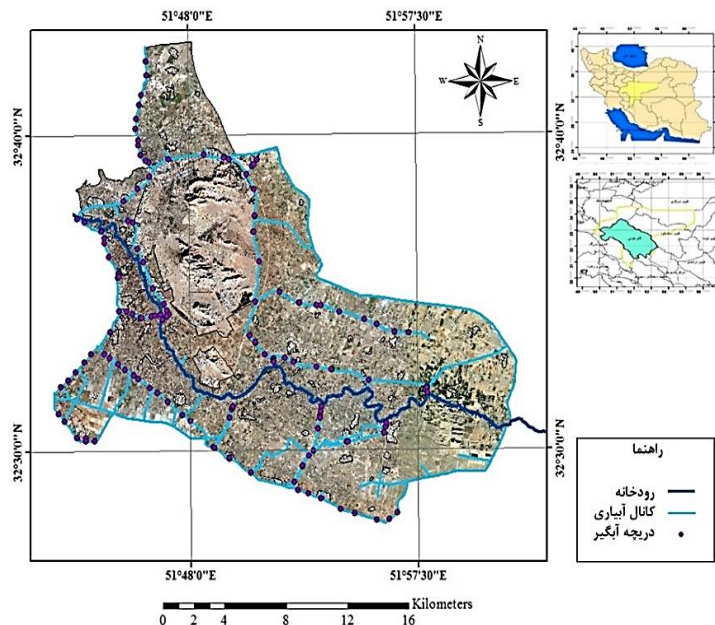
3 - Steady-State Error

فاصله بین گام‌های زمانی اعمال تنظیمات (۹۰۰ ثانیه) و T دوره زمانی اجرای سناریوی بهره‌برداری (۹۶ ساعت)، t_0 برابر ۱ ساعت در نظر گرفته شد.

شبکه آبیاری آبشار

در حوضه آبریز رودخانه زاینده‌رود و در پایاب سد زاینده‌رود، شش شبکه آبیاری موجود است که شبکه آبیاری آبشار، شکل (۲)، به سبب مجاورت با شهر اصفهان چالشی‌ترین دشت کشاورزی است که از رودخانه زاینده‌رود آبیگری می‌نماید. مساحت در حال بهره‌برداری شبکه آبیاری آبشار، که وظیفه انتقال و توزیع آب کشاورزی در این دشت را دارد، در حدود ۲۱ هزار هکتار می‌باشد و موقعیت مکانی آن در عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۲۸ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴۲ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۵۷ دقیقه شرقی قرار گرفته است. میانگین بارندگی سالانه در این منطقه ۱۲۰ میلی‌متر است که این میزان بسیار کمتر از متوسط بارندگی سالانه در ایران، در حدود ۲۴۰ میلی‌متر، می‌باشد. این درحالی است که میزان تبخیر و تعرق در این منطقه حدود ۱۵۰۰ میلی‌متر در سال برآورد شده است.

منبع اصلی تامین‌کننده آب این شبکه آبیاری، آب رها شده از سد انحرافی آبشار می‌باشد. در طرفین سد انحرافی آبشار، در منشأ تامین آب این شبکه آبیاری، دو رشته کانال اصلی چپ و راست به منظور برداشت آب با هدف تحت پوشش قرار دادن اراضی به وسعت ۳۲۰۰۰ هکتار (که بنا بر اطلاعات اخذ شده از شرکت آب منطقه‌ای اصفهان در حال حاضر در حدود ۲۱ هزار هکتار در حال بهره‌برداری است) احداث شده است. در این تحقیق کانال اصلی شاخه شمالی این شبکه آبیاری به عنوان مورد مطالعاتی انتخاب شده است. این بخش از کانال دارای شیب ملایم و شامل ۲۰ سازه آب‌بند (سازه تنظیم‌کننده سطح آب از نوع دریچه‌های هیدرومکانیکال تیپ آمیل) می‌باشد که بر این اساس کانال مورد مطالعه به ۲۰ بازه تقسیم می‌شود. در این کانال تنظیم‌تراز سطح آب در کانال به‌طور معمول برای هر آبیگر (دریچه‌های نریپیک) توسط یک سازه تنظیم انجام می‌شود.



شکل (۲). شمایی از شبکه آبیاری آبشار، کانال‌های اصلی، آبیگرهای واحد درجه دو و درجه سه این شبکه

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 تامین 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 در طول ۳۰ (۱۳۷۱ تا ۱۴۰۱) سال گذشته بهره‌برداری شبکه آبیاری نکوآباد در سه دسته ذیل تقسیم‌بندی

می‌شود:

کلاس نرمال (سناریوی بهره‌برداری نرمال): دبی تحویلی در محل بند انحرافی در حدود ۱۰۰ - ۱۱۰٪ مجموع تقاضای برآورد شده، تغییرات دبی در ۱۲ ماه سال (بجز 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٪

کلاس کم‌آبی (سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی ۱۰ تا ۱۵٪): دبی تحویلی در محل بند انحرافی در حدود ۸۰ - ۹۰٪ مجموع تقاضای برآورد شده، تغییرات دبی در ۱۲ ماه سال (بجز دی و بهمن) = ۱۰/۸-۳/۰ مترمکعب بر ثانیه، متوسط دبی سالانه (به استثنای دی و بهمن) = ۳/۷ مترمکعب بر ثانیه، متوسط احتمال وقوع در دوره آماری: ۱۵/۴۵٪

کلاس کم آبی شدید با نوسانات ورودی (سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی ۱۵ تا ۳۵٪): دبی تحویلی در محل بند انحرافی در حدود ۶۵ - ۸۰٪ مجموع تقاضای برآورد شده، تغییرات دبی در ۱۲ ماه سال (بجز دی و بهمن) = ۹/۹-۲/۷ مترمکعب بر ثانیه، متوسط دبی سالانه (به استثنای دی و بهمن) = ۳/۳ مترمکعب بر ثانیه، متوسط احتمال وقوع در دوره آماری: ۲۵/۶۱٪

نهایتاً پس از جمع‌بندی سناریوهای محتمل بهره‌برداری، علاوه بر سناریوی بهره‌برداری نرمال، دو سناریوی غیر متعارف (شامل سناریوی کم‌آبی و سناریوی کم‌آبی نوسانی - شدید مطابق جدول (۱)) به‌عنوان سناریوهای بهره‌برداری محتمل این مطالعه انتخاب شدند. لازم به توضیح است که هر دو سناریو بهره‌برداری این تحقیق، که با وجود تغییرات دبی ورودی به کانال اصلی، تنظیم آبیگرهای نیربیک در طول مدت زمان بهره‌برداری ثابت بوده بدین معنی که تغییری در میزان کل دبی برداشتی از آبیگرها صورت نمی‌گیرد.

جدول ۱ - تغییرات زمانی میزان دبی ورودی در محل بند انحرافی در سناریوهای بهره‌برداری اول و دوم

سناریوهای بهره‌برداری	زمان تغییر دبی در سراب کانال (hr)	میزان دبی ورودی در سراب کانال m ³ /s	درصد تغییر دبی ورودی از کل تقاضا (%)	میزان کل تقاضا در کانال m ³ /s
سناریوی اول (کم آبی)	۳۰	۳/۹۴	۵ -	۴/۱۵
	۴۰	۴/۱۵	۰	۴/۱۵
	۵۰	۳/۷۳	۱۰ -	۴/۱۵
	۶۴	۴/۱۵	۰	۴/۱۵
	۷۲	۳/۵۲	۱۵ -	۴/۱۵
	۷۶	۴/۱۵	۰	۴/۱۵
سناریوی دوم (کم آبی شدید با نوسانات ورودی)	۶	۳/۳۲	۲۰ -	۴/۱۵
	۲۴	۳/۵۲	۱۵ -	۴/۱۵
	۳۲	۳/۱۱	۲۵ -	۴/۱۵
	۴۰	۳/۵۲	۱۵ -	۴/۱۵
	۵۸	۲/۹۰	۳۰ -	۴/۱۵
	۶۶	۳/۵۲	۱۵ -	۴/۱۵
	۷۲	۲/۹۰	۳۰ -	۴/۱۵
	۷۸	۴/۱۵	۰	۴/۱۵

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 محققین این تحقیق قرار گرفت، انجام شد. این اطلاعات (شامل دبی‌های تحویلی اندازه‌گیری و ثبت شده در محل هر آبیگر و دبی‌های اندازه‌گیری شده در برخی نقاط در طول کانال اصلی) مربوط به دوره‌های بهره‌برداری ده سال اخیر (شامل دوره‌های زمانی ۳۰ تا ۹۰ روز بسته به میزان آب سطحی قابل دسترس در هر سال) می‌باشد. نیمی از داده‌های هر دوره آماری برای واسنجی و نیم دیگر آن برای صحت‌سنجی مدل مورد استفاده قرار گرفتند. جهت واسنجی مدل، ضریب دبی آگذری سازه‌های آبیگر به عنوان متغیرهای قابل تغییر جهت انطباق مقادیر شبیه‌سازی با مقادیر مشاهده‌ای استفاده شدند. بعد از واسنجی مدل و تنظیم پارامترهای آن، فرآیند صحت-سنجی اجرا گردید. نتایج این فرآیند به‌این 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 می‌باشد. مقدار بهینه این شاخص

برابر صفر است، با توجه به اینکه مقادیر مذکور به مقدار بهینه نزدیک می‌باشند، لذا می‌توان نتیجه گرفت که مدل دقت مناسبی ارائه می‌نماید. شاخص ضریب خطای پسماند (CRM)، برای دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی، به ترتیب در محدوده $(-0/005, -0/018)$ و $(-0/001, -0/017)$ تغییر کرد، با توجه به این که بهترین میزان برای CRM صفر می‌باشد، مقادیر کم این شاخص حاکی از دقت قابل قبول مدل در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی است. نهایتاً میزان ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، برای دوره‌های واسنجی منتخب در محدوده $(0/006, 0/009)$ و برای دوره صحت‌سنجی‌های متناظر در محدوده $(0/008, 0/011)$ به دست آمدند. مقادیر مناسب این شاخص نیز دقت مدل را مورد تایید قرار می‌دهد.

محاسبه ضرایب کنترل گر PI

طراحی و تنظیم کنترل گرهای PI در سامانه کنترل خودکار کانال اصلی شاخه شمالی شبکه آبیاری آبشار نیازمند تعیین و محاسبه مشخصه‌های سیستم، شامل (۱) سطح ذخیره در شرایط بهره‌برداری (A_s) ، گام زمانی کنترل (T_c) ، رزونانس ماکزیمم در جریان حداقل R_p و (۴) بسامد رزونانس ماکزیمم در جریان حداقل بازه کانال (ω_r) می‌باشد. برای رسیدن به هدف مذکور، روش مورد استفاده در این تحقیق استفاده از روش تشخیص سیستم (SI) - مشابه روش مورد استفاده در (Miltenberg, 2008) و با بکارگیری جعبه ابزار System Identification نرم افزار محاسباتی Matlab اقدام به محاسبه مشخصه‌های مذکور 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 کنترل گر PI مطابق جدول (۲) ارائه می‌شود.

جدول ۲ - مشخصات بازه‌های کانال اصلی آبشار، مشخصه‌های سیستم محاسبه شده برای دبی معادل ۱۵٪ و ۸۵٪ و ضرایب تناسبی و انتگرالی بهینه نهایی محاسبه شده در روش SI

بازه کانال	طول بازه (m)	سطح ذخیره (متناسب با دبی ورودی (m ²))		تناوب رزونانس متناسب با دبی ورودی (rad/sec)		رزونانس حداکثر متناسب با دبی ورودی (-)		زمان تاخیر متناسب با دبی ورودی (sec)		بازه زمانی کنترل گر (sec)	ضرایب بهینه بدست آمده از روش SI (-)	
		۱۵٪	۸۵٪	۱۵٪	۸۵٪	۱۵٪	۸۵٪	۱۵٪	۸۵٪		Kp	Ki
۱	۱۲۲۱	۴۱۲۴	۱۰۷۲	.	.	.	.	۱۲۰۰	۶۰۰	۹۰۰	-/۸۹۸۷۶	-/۰۰۳۵۴
۲	۱۱۵۴	۳۸۴۵	۱۱۹۲	.	.	.	.	۱۲۰۰	۶۰۰	۹۰۰	-/۶۷۴۰۷	-/۰۰۲۲۱
۳	۱۰۴۵	۳۵۵۱	۸۸۸	-/۰۱۰۵	-/۰۱۰۲	-/۰۴۰۴	-/۰۱۷۲	۱۲۰۰	۶۰۰	۹۰۰	-/۲۲۴۶۹	-/۰۰۲۰۶
۴	۹۷۷	۲۸۲۴	۱۰۷۳	-/۰۱۱۲	-/۰۱۰۸	-/۰۵۱۵	-/۰۹۵۷	۹۰۰	۳۰۰	۹۰۰	۱/۳۴۸۱۴	-/۰۰۰۸۸
۵	۱۵۳۲	۴۴۳۵	۱۲۸۶	.	.	.	.	۱۵۰۰	۶۰۰	۹۰۰	-/۱۳۴۸۱	-/۰۰۱۷۷
۶	۱۸۲۱	۴۶۵۳	۱۵۸۲	.	.	.	.	۱۵۰۰	۹۰۰	۹۰۰	-/۴۴۹۳۸	-/۰۰۰۶۶
۷	۱۷۳۴	۴۶۰۲	۱۱۵۱	.	.	.	.	۱۵۰۰	۹۰۰	۹۰۰	-/۲۹۹۵۹	-/۰۰۰۱۵
۸	۸۰۵	۲۵۰۱	۸۵۰	-/۰۲۰۴	-/۰۱۱۶	-/۰۳۳۵	-/۰۱۷۱	۹۰۰	۳۰۰	۹۰۰	-/۱۹۶۶۰	-/۰۰۰۱۱
۹	۱۱۲۰	۳۷۷۹	۱۰۲۰	.	.	.	.	۱۲۰۰	۶۰۰	۹۰۰	-/۶۷۴۰۷	-/۰۰۴۴۲
۱۰	۱۰۷۰	۳۶۰۷	۱۲۲۶	.	.	.	.	۱۲۰۰	۶۰۰	۹۰۰	-/۸۹۸۷۶	-/۰۰۰۸۸
۱۱	۷۸۸	۲۳۸۰	۷۱۴	-/۰۲۰۹	-/۰۲۰۱	-/۰۵۰۱	-/۰۲۸۸	۶۰۰	۳۰۰	۹۰۰	-/۶۷۴۰۷	-/۰۰۳۵۴
۱۲	۱۴۴۰	۴۲۱۲	۱۱۷۹	.	.	.	.	۱۵۰۰	۹۰۰	۹۰۰	-/۳۵۹۵۰	-/۰۰۱۴۱
۱۳	۱۴۳۵	۴۲۰۷	۱۴۳۰	.	.	.	.	۱۵۰۰	۹۰۰	۹۰۰	-/۲۸۰۸۶	-/۰۰۱۵۵
۱۴	۱۲۸۸	۴۳۵۰	۱۵۲۳	.	.	.	.	۱۲۰۰	۹۰۰	۹۰۰	-/۲۲۴۶۹	-/۰۰۰۸۸
۱۵	۱۲۰۵	۴۱۰۲	۱۱۰۸	.	.	.	.	۱۲۰۰	۶۰۰	۹۰۰	-/۳۳۷۰۴	-/۰۰۳۵۴
۱۶	۱۲۶۵	۴۱۴۰	۱۱۱۸	.	.	.	.	۱۲۰۰	۶۰۰	۹۰۰	-/۳۳۷۰۴	-/۰۰۰۵۹
۱۷	۱۵۵۰	۴۴۸۰	۱۷۴۷	.	.	.	.	۱۵۰۰	۹۰۰	۹۰۰	-/۰۷۴۹۰	-/۰۰۰۱۰
۱۸	۱۴۸۰	۴۲۹۰	۱۵۴۴	.	.	.	.	۱۵۰۰	۹۰۰	۹۰۰	-/۴۴۹۳۸	-/۰۰۰۱۸
۱۹	۱۱۲۰	۳۹۰۲	۱۵۲۲	.	.	.	.	۱۲۰۰	۶۰۰	۹۰۰	-/۸۹۸۷۶	-/۰۰۲۲۱
۲۰	۱۴۵۰	۴۲۳۰	۱۱۸۴	.	.	.	.	۱۵۰۰	۹۰۰	۹۰۰	-/۷۸۶۴۲	-/۰۰۰۴۴

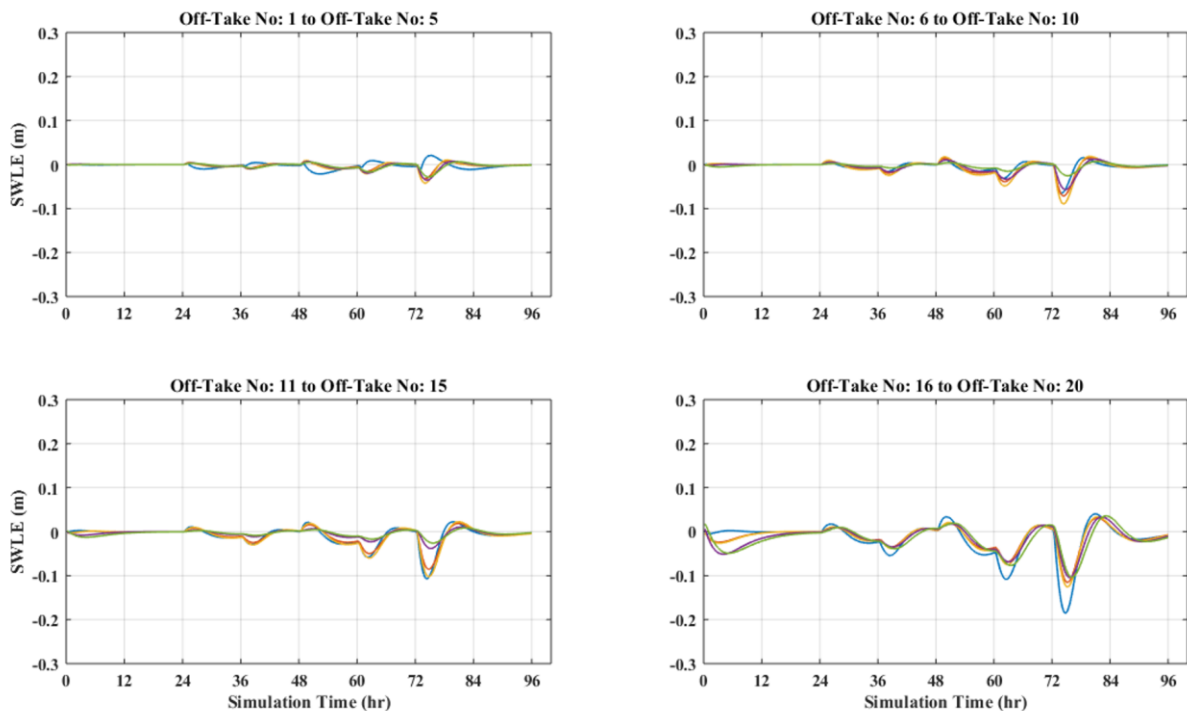
شبیه‌سازی وضعیت بهره‌برداری کانال اصلی مورد مطالعه این تحقیق، توسط مدل ریاضی طراحی شده جریان در کانال (مطابق مدل ID) و سامانه بهره‌برداری طراحی شده برای کانال مورد مطالعه (توسط سامانه کنترل خودکار تناسبی-انتگرالی)، انجام گرفت. نتایج شبیه‌سازی به تفکیک دو سناریوی بهره‌برداری جریان ورودی متاثر از کم‌آبی و کم‌آبی شدید-نوسانی در ادامه ارائه شده است.

سناریوهای بهره‌برداری اول و دوم: سناریوهای کم‌آبی

مطابق سناریوی اول که برگرفته از یک سناریوی واقعی رخ داده شده در کانال مورد مطالعه بوده، در ابتدا دبی ورودی به کانال در مدت زمان ۳۰ ساعت برابر با مقدار کل تقاضا (شامل حقابه‌ها و تلفات ناشی از انتقال و توزیع و تحویل) برابر و مقدار $4/15$ مترمکعب بر ثانیه بوده است. سپس دوره‌های بهره‌برداری ناشی از کمبود آب در محل بند انحرافی به وقوع پیوسته است که به ترتیب کاهش ۵٪ درصد جریان ورودی (کاهش دبی ورودی به $3/94$) به مدت ۱۰ ساعت (ساعت ۳۰-۴۰)، کاهش ۱۰٪ درصد جریان ورودی (کاهش دبی ورودی به $3/73$) به مدت ۱۴ ساعت (ساعت ۶۴-۵۰) و کاهش ۱۵٪ درصد جریان ورودی (کاهش دبی ورودی به $3/52$) به مدت ۴ ساعت (ساعت ۷۶-۷۲) بوده است. در این ارتباط لازم به توضیح است که میزان تغییرات مجاز رقوم سطح آب برابر ± 5 سانتی متر در محل هر سازه تنظیم تعریف گردید. بر این اساس اگر انحراف رقوم سطح آب کنترل شده در بالادست آبیگر از رقوم هدف (یا به عبارت دیگر خطای رقوم سطح آب) از این میزان بیشتر شود، کنترل‌گر با فرض اختلال در نحوه آبیگری وارد عمل می‌شود. ارزیابی عملکرد سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز توزیع آب بین آبیگرهای واقع در ۲۰ بازه انتخابی کانال تحت مطالعه با استفاده از شاخص‌های مرسوم ارزیابی عملکرد پیشینه قدرمطلق خطا (MAE)، انتگرال قدرمطلق بزرگی خطا (IAE) و خطای برگشت به حالت ماندگار (STE)، به عنوان شاخص‌های ارزیابی عملکرد مرسوم در این قبیل تحقیقات انجام شد. نتایج ارزیابی عملکرد بهره‌برداری سامانه تحت سناریوی کم‌آبی در جدول (۳) ارائه شده است. همچنین تغییرات خطای رقوم سطح آب محاسبه شده در محل سازه تنظیم آب (در پایین دست هر بازه کانال) در طول زمان شبیه‌سازی تحت سناریوی نرمال در شکل (۳) و سناریوی اول (کم‌آبی) در شکل (۴) به تصویر کشیده شده است. بر این اساس محاسبه شاخص‌های ارزیابی عملکرد به این صورت انجام شد که با تخطی خطای سطح آب از محدوده مجاز خطا (± 5 در این تحقیق) مقدار شاخص‌ها غیر صفر و در غیر اینصورت صفر اندازه‌گیری شدند.

همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، محدوده تغییرات خطای رقوم سطح آب کنترل شده توسط سامانه کنترل خودکار تناسبی-انتگرالی در سناریوی نرمال - زمانی که میزان دبی ورودی به کانال اصلی در محل بند انحرافی متناسب با میزان کل تقاضا است - در پایین دست ۶ بازه ابتدایی (محل قرارگیری شش آبیگر اول) در محدوده ± 5 بوده و در طول زمان ۹۶ ساعت شبیه‌سازی از این محدوده تجاوز نکرده است. لذا هر سه شاخص ارزیابی عملکرد برابر صفر محاسبه شده است. تجاوز رقوم سطح آب کنترل شده از محدوده مجاز در انتهای بازه ۷ صورت گرفته و این روند تا بازه انتهایی ادامه داشته است. بر این اساس مقادیر هر سه شاخص ارزیابی عملکرد - همان‌طور که در جدول (۳) نیز ارائه شده است - مقادیری غیر صفر بدست آمده است. مطابق شکل (۳) مقادیر حداکثر خطای محاسبه شده در بازه‌های ۶ تا ۱۰، ۱۱ تا ۱۵ و ۱۶ تا ۲۰ به ترتیب در محدوده ۶- تا ۹-، ۱۱- تا ۱۳- و ۱۳- تا ۱۸- سانتی متر متغیر بوده که بر اساس آن مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد MAE، IAE و STE به ترتیب مقادیر $0/11$ تا $0/14$ ، $0/013$ تا $0/0182$ و $0/0001$ تا $0/0011$ بدست آمده است.

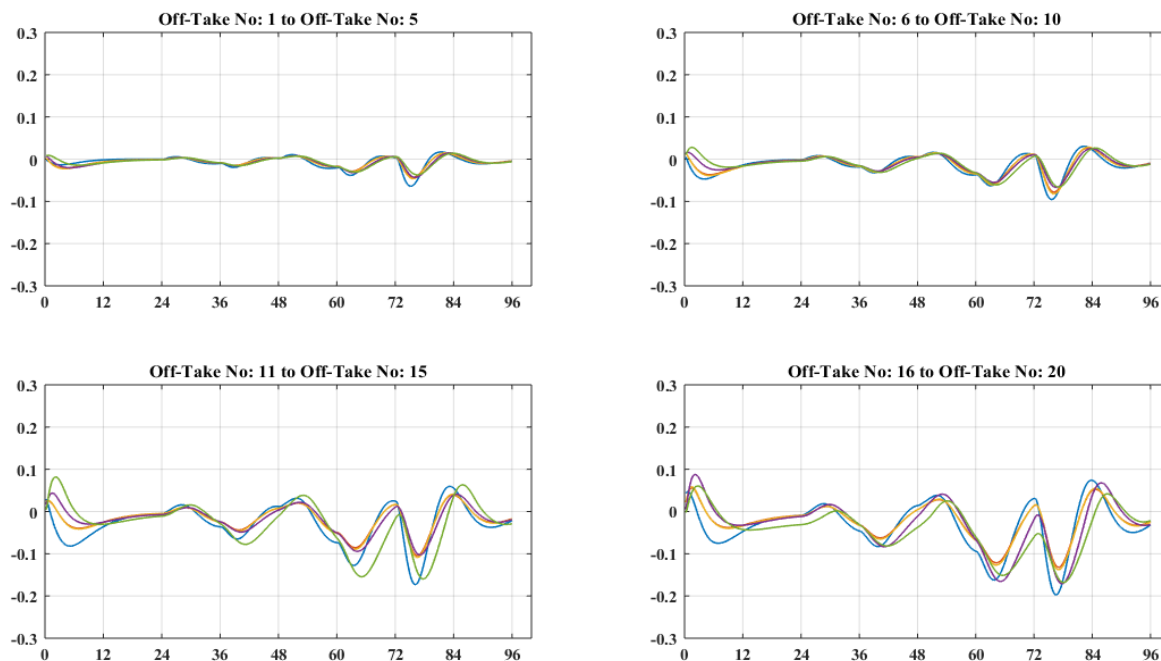
بررسی روند نتایج ارزیابی شاخص‌های ارزیابی عملکرد تا حدودی مطابق انتظارات بوده است به خصوص نشان دادن ماهیت کنترل بالادست بودن سامانه بهره‌برداری غیرمتمرکز، به‌نحویکه آبیگرهای بالادست مطلوب‌ترین وضعیت توزیع آب را داشته‌اند و با فاصله گرفتن از ورودی اصلی، وضعیت آبیگری در آبیگرهای میانی و پایین دست از وضعیت مطلوب فاصله گرفته است. در مورد آبیگرهای واقع در بازه‌های پایین دستی ۱۵ تا ۲۰، همان‌طور که مجموعه نتایج نشان می‌دهد فرآیند توزیع آب بدون خطا انجام نشده است. به عبارت دیگر، علی‌رغم خودکارسازی سامانه بهره‌برداری و همچنین با عنایت به عدم رخداد هر گونه پدیده غیرمتعارف (اعم از نوسان جریان و شرایط کم‌آبی) در طول مدت ۹۶ ساعت شبیه‌سازی، شاخص‌های ارزیابی عملکرد از محدوده مطلوب کمی فاصله گرفته که نتیجه آن اختلال جزئی فرآیند آبیگری در این بازه‌ها بوده است.



شکل (۳). خطای رقوم سطح آب محاسبه شده (ورودی کنترل گر PI) در بالادست ۲۰ آبگیر واقع در بازه‌های کانال اصلی تحت سناریوی بهره‌برداری نرمال (بدون اعمال کم‌آبی)

با ظهور کم‌آبی در محل بند انحرافی، مطابق برنامه زمانی ورود آب به کانال اصلی در جدول (۱)، همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، محدوده تغییرات خطای رقوم سطح آب کنترل شده توسط سامانه کنترل خودکار تناسبی-انتگرالی در مقایسه با سناریوی نرمال تغییرات محسوسی داشته است. این تغییرات در ۵ بازه ابتدایی کانال رخ نداده و در بازه‌های میانی و به‌خصوص انتهایی محسوس‌تر می‌باشد. براین اساس در سناریوی اول - زمانی که میزان دبی ورودی به کانال اصلی در محل بند انحرافی در طول زمان شبیه‌سازی کاهش ۵، ۱۰ و ۱۵ درصدی آب ورودی را تجربه کرده است - در پایین‌دست ۴ بازه ابتدایی (محل قرارگیری چهار آبگیر اول) خطای بدست آمده در محدوده ± 5 بوده و در طول زمان ۹۶ ساعت شبیه‌سازی از این محدوده تجاوز نکرده است. لذا هر سه شاخص ارزیابی عملکرد برابر صفر محاسبه شده است. تجاوز رقوم سطح آب کنترل شده از محدوده مجاز در انتهای بازه ۵ صورت گرفته و این روند تا بازه انتهایی ادامه داشته است. براین اساس مقادیر هر سه شاخص ارزیابی عملکرد - همان‌طور که در جدول (۳) نیز ارایه شده است - مقادیری غیر صفر بدست آمده است. مطابق شکل (۴) مقادیر حداکثر خطای محاسبه شده در بازه‌های ۵ تا ۱۰، ۱۱ تا ۱۵ و ۱۶ تا ۲۰ به ترتیب در محدوده ۶- تا ۱۰-، ۸- تا ۱۷- و ۱۰- تا ۲۰- سانتی‌متر متغیر بوده که بر اساس آن مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد MAE، IAE و STE به ترتیب مقادیر ۰/۰۸ تا ۰/۱۵، ۰/۰۱۳ تا ۰/۰۳۳۰ و ۰/۰۰۰۷ تا ۰/۰۱۹ بدست آمده است.

روند تغییرات نزولی مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد روندی مشابه با سناریوی نرمال داشته به‌طوری‌که آبگیرهای بالادست مطلوب‌ترین وضعیت توزیع آب را داشته و وضعیت آبگیری در آبگیرهای میانی و پایین‌دست از وضعیت مطلوب فاصله گرفته است. علی‌رغم تشابه روند تغییرات، ولی مقادیر تغییرات محسوس بوده و تاثیر کم‌آبی اثر غیرقابل انکاری در فرآیند بهره‌برداری داشته است. در مورد آبگیرهای واقع در بازه‌های میانی و پایین‌دستی (آبگیرهای ۱۱ تا ۲۰)، همان‌طور که مجموعه نتایج نشان می‌دهد فرآیند توزیع آب در هر سه بازه زمانی کاهش جریان ورودی (به ترتیب کاهش ۵٪ درصد جریان ورودی به مدت ۱۰ ساعت (ساعت ۳۰-۴۰)، کاهش ۱۰٪ درصد جریان ورودی به مدت ۱۴ ساعت (ساعت ۶۴-۵۰) و کاهش ۱۵٪ درصد جریان ورودی به مدت ۴ ساعت (ساعت ۷۶-۷۲)) با اختلال همراه بوده است.



شکل ۴. خطای رقوم سطح آب محاسبه شده (ورودی کنترل گر PI) در بالادست ۲۰ آبگیر واقع در بازه‌های کانال اصلی تحت سناریوی اول بهره برداری: سناریوی بهره‌برداری کم آبی

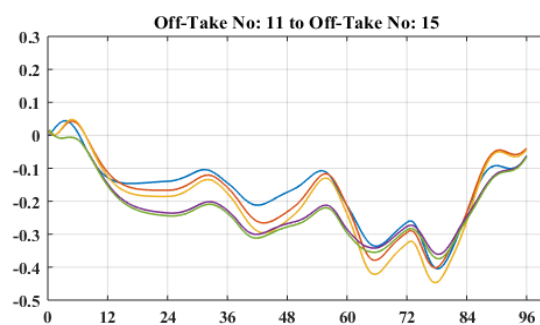
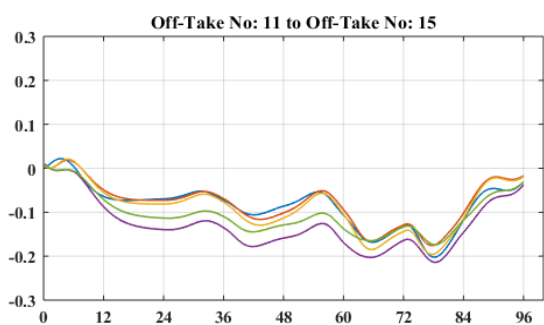
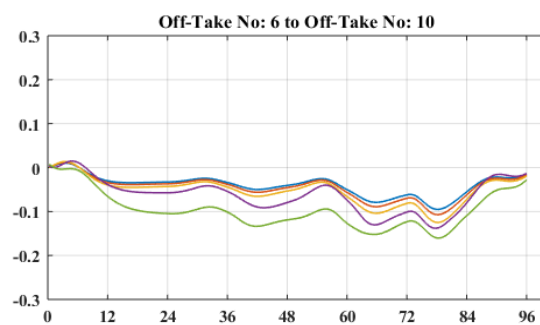
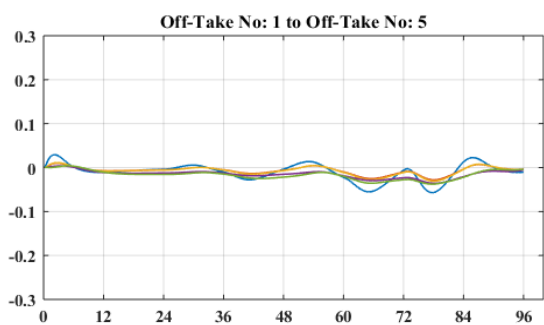
مشابه سناریوی اول، سناریوی دوم بهره‌برداری (سناریوی کم آبی شدید با همراه نوسانات متعدد ورودی) نیز برگرفته از یک سناریوی واقعی رخ داده شده در کانال مورد مطالعه می‌باشد. مطابق این سناریو در ابتدا دبی ورودی به کانال در مدت زمان ۶ ساعت برابر با مقدار کل تقاضا (شامل حقابه‌ها و تلفات ناشی از انتقال و توزیع و تحویل) برابر و مقدار $4/15$ مترمکعب بر ثانیه بوده است. سپس دوره‌های بهره‌برداری ناشی از کمبود آب در محل بند انحرافی به وقوع پیوسته است که به ترتیب کاهش ۱۵٪ درصد جریان ورودی (کاهش دبی ورودی به $3/52$) به مدت ۸ ساعت (ساعت ۳۲-۲۴)، ۱۸ ساعت (ساعت ۴۰-۵۸) و ۶ ساعت (ساعت ۶۶-۷۲)، کاهش ۲۰٪ درصد جریان ورودی (کاهش دبی ورودی به $3/32$) به مدت ۱۸ ساعت (ساعت ۶-۲۴)، کاهش ۲۵٪ درصد جریان ورودی (کاهش دبی ورودی به $3/11$) به مدت ۸ ساعت (ساعت ۳۲-۴۰) و کاهش ۳۰٪ درصد جریان ورودی (کاهش دبی ورودی به $2/90$) به مدت ۸ ساعت (ساعت ۵۸-۶۶) بوده است. با تشدید دوره‌های کم آبی و تعدد نوسانات در آب انحرافی در محل بند انحرافی شبکه آبیاری آبشار، همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، محدوده تغییرات خطای رقوم سطح آب کنترل شده توسط سامانه کنترل خودکار تناسبی-انتگرالی در مقایسه با هر دو سناریوی نرمال و کم آبی تغییرات بسیار محسوسی داشته است.

مشابه روند رخ داده شده در دو سناریوی قبلی، آبگیرهای واقع در بالادست شبکه مصون از تغییرات غیرمتعارف پیش آمده در این سناریوی بهره‌برداری بودند و شاخص‌های ارزیابی عملکرد در ۵ بازه ابتدایی کانال مقدار مطلوب خود و بالتبع آن فرآیند مطلوب توزیع و تحویل آب سطحی را نشان می‌دهند. براین اساس در سناریوی دوم - زمانی که میزان دبی ورودی به کانال اصلی در محل بند انحرافی در طول زمان شبیه‌سازی کاهش ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصدی آب ورودی را تجربه کرده است - در پایین دست ۵ بازه ابتدایی (محل قرارگیری چهار آبگیر اول) خطای بدست آمده در محدوده ± 5 بوده و در طول زمان ۹۶ ساعت شبیه‌سازی از این محدوده تجاوز نکرده است. تجاوز رقوم سطح آب کنترل شده از محدوده مجاز در انتهای بازه ۶ صورت گرفته و این روند تا بازه انتهایی ادامه داشته است. مطابق نتایج ارزیابی عملکرد ارائه شده در جدول (۳) و شکل (۵) مقادیر حداکثر خطای محاسبه شده در بازه‌های ۵، ۱۰، ۱۱ تا ۱۵ و ۱۶ تا ۲۰ به ترتیب در محدوده ۹- تا ۱۶-، ۱۷- تا ۲۲- و ۳۵- تا ۴۵- سانتی متر متغیر بوده که بر اساس آن مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد MAE، IAE و STE به ترتیب مقادیر $0/096$ تا $0/172$ ، $0/123$ تا $0/991$ و $0/089$ تا $0/592$ بدست آمده است. الگوی روند تغییرات نزولی مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد روندی مشابه با سناریوی کم آبی اول داشته ولی شیب تغییرات محسوس‌تر شده است به‌طوری‌که آبگیرهای بالادست مطلوب‌ترین وضعیت توزیع آب را داشته و وضعیت آبگیری در آبگیرهای پایین دست در وضعیت نامطلوب قرار گرفته است. در مورد نیمه پایین دست آبگیرها (آبگیرهای ۱۰ تا ۲۰)، همان‌طور که مجموعه نتایج نشان می‌دهد فرآیند توزیع آب در هر کدام از بازه‌های زمانی کاهش جریان ورودی با اختلال همراه بوده است.

جدول ۳ - نتایج شاخص‌های ارزیابی عملکرد کنترل‌گرهای PI به تفکیک بازه‌های کانال و سناریوهای بهره‌برداری

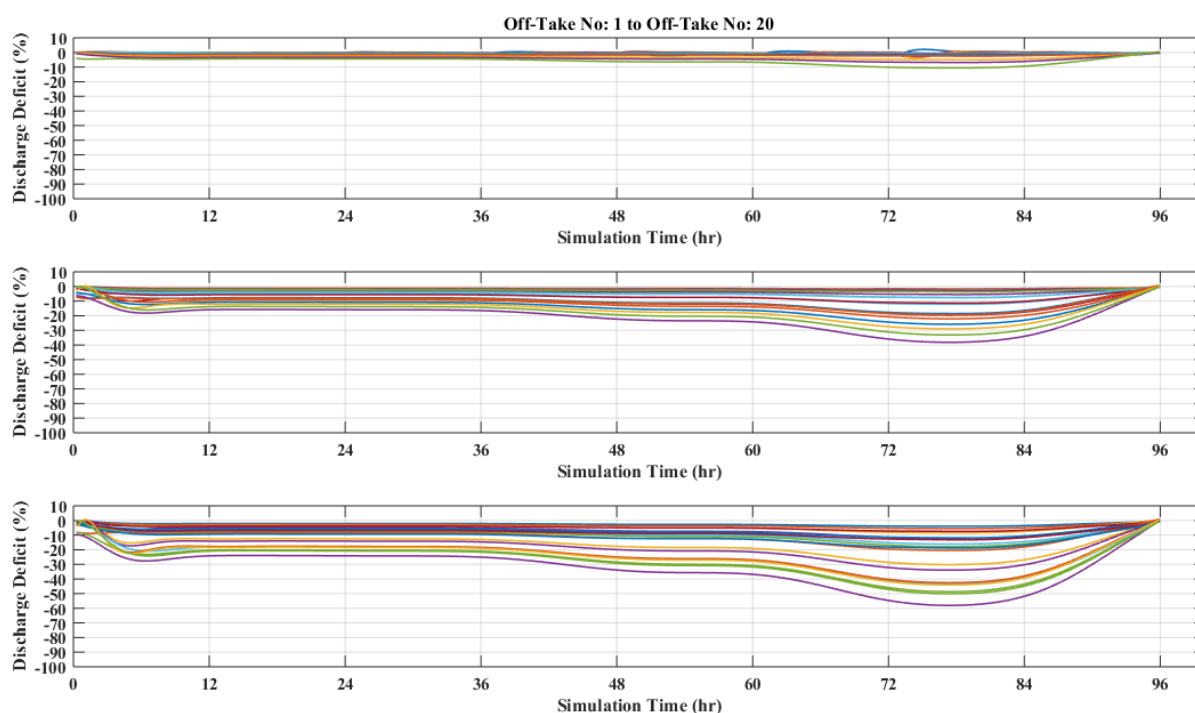
		Abshar Irrigation Canal Reaches									
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
Scenario Normal	MAE	-/۰	-/۰	-/۰	-/۰	-/۰	-/۰	-/۰.۸۱۰	-/۰.۸۱۰	-/۰.۹۰۱	-/۰.۱۱۲۵
	IAE	-/۰	-/۰	-/۰	-/۰	-/۰	-/۰	-/۰.۰۱۳	-/۰.۰۲۲	-/۰.۰۲۴	-/۰.۰۴۱
	STE	-/۰	-/۰	-/۰	-/۰	-/۰	-/۰	-/۰.۰۰۱	-/۰.۰۰۴	-/۰.۰۰۱	-/۰.۰۰۲
First Scenario	MAE	-/۰	-/۰	-/۰	-/۰	-/۰.۰۷۶۰	-/۰.۰۸۰۱	-/۰.۰۸۰۱	-/۰.۰۸۰۱	-/۰.۰۵۰	-/۰.۱۲۶۱
	IAE	-/۰	-/۰	-/۰	-/۰	-/۰.۰۱۳	-/۰.۰۲۹	-/۰.۰۲۹	-/۰.۰۵۳	-/۰.۰۷۷	-/۰.۰۹۵
	STE	-/۰	-/۰	-/۰	-/۰	-/۰.۰۰۷	-/۰.۰۰۹	-/۰.۰۰۹	-/۰.۰۱۲	-/۰.۰۲۴	-/۰.۰۲۸
Second Scenario	MAE	-/۰	-/۰	-/۰	-/۰	-/۰	-/۰.۰۹۶۵	-/۰.۰۵۵	-/۰.۱۱۲۵	-/۰.۱۱۴۱	-/۰.۱۱۲۵
	IAE	-/۰	-/۰	-/۰	-/۰	-/۰	-/۰.۰۱۲۳	-/۰.۰۲۹۳	-/۰.۰۳۱۵	-/۰.۰۳۱۸	-/۰.۰۳۳۹
	STE	-/۰	-/۰	-/۰	-/۰	-/۰	-/۰.۰۰۸۹	-/۰.۰۰۹۶	-/۰.۰۱۴۳	-/۰.۰۱۸۷	-/۰.۰۲۵۱

		Abshar Irrigation Canal Reaches									
		۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰
Scenario Normal	MAE	-/۰.۸۴۵	-/۰.۹۴۲	-/۰.۱۰۵۶	-/۰.۱۲۷۵	-/۰.۱۳۲۵	-/۰.۱۳۹۹	-/۰.۱۴۳۵	-/۰.۱۴۴۷	-/۰.۱۴۵۰	-/۰.۱۴۵۲
	IAE	-/۰.۰۴۸	-/۰.۰۴۹	-/۰.۰۷۱	-/۰.۰۷۱	-/۰.۰۸۱	-/۰.۰۱۰۴	-/۰.۰۱۱۲	-/۰.۰۱۱۲	-/۰.۰۱۶۲	-/۰.۰۱۸۲
	STE	-/۰.۰۰۲	-/۰.۰۰۳	-/۰.۰۰۳	-/۰.۰۰۷	-/۰.۰۰۹	-/۰.۰۰۹	-/۰.۰۰۸	-/۰.۰۰۱۱	-/۰.۰۰۱۱	-/۰.۰۰۱۱
First Scenario	MAE	-/۰.۱۲۸۰	-/۰.۱۳۴۰	-/۰.۱۴۴۰	-/۰.۱۵۰۲	-/۰.۱۵۰۲	-/۰.۱۵۱۲	-/۰.۱۵۲۱	-/۰.۱۵۲۰	-/۰.۱۵۴۰	-/۰.۱۵۰۲
	IAE	-/۰.۰۱۲۰	-/۰.۰۱۷۰	-/۰.۰۱۹۰	-/۰.۰۱۹۰	-/۰.۰۱۹۰	-/۰.۰۲۲۰	-/۰.۰۲۵۰	-/۰.۰۳۱۰	-/۰.۰۳۳۰	-/۰.۰۳۳۰
	STE	-/۰.۰۰۸۰	-/۰.۰۰۳۰	-/۰.۰۰۹۰	-/۰.۰۰۸۰	-/۰.۰۰۹۰	-/۰.۰۱۳۶	-/۰.۰۱۷۰	-/۰.۰۱۷۰	-/۰.۰۱۹۰	-/۰.۰۱۹۰
Second Scenario	MAE	-/۰.۱۱۳۲	-/۰.۱۳۱۳	-/۰.۱۳۱۵	-/۰.۱۴۱۵	-/۰.۱۶۲۰	-/۰.۱۶۶۲	-/۰.۱۶۷۲	-/۰.۱۶۹۲	-/۰.۱۷۰۲	-/۰.۱۷۲۲
	IAE	-/۰.۰۲۵۱	-/۰.۰۴۰۱	-/۰.۰۵۰۱	-/۰.۰۵۱۹	-/۰.۰۶۸۲	-/۰.۰۷۷۲	-/۰.۰۹۱۳	-/۰.۰۹۲۳	-/۰.۰۹۵۷	-/۰.۰۹۹۱
	STE	-/۰.۰۲۸۹	-/۰.۰۳۵۹	-/۰.۰۳۸۹	-/۰.۰۵۵۲	-/۰.۰۵۴۳	-/۰.۰۵۴۹	-/۰.۰۵۳۲	-/۰.۰۵۴۹	-/۰.۰۵۳۳	-/۰.۰۵۹۲



شکل ۵ - خطای رقوم سطح آب محاسبه شده (ورودی کنترل‌گر PI) در بالادست ۲۰ آبگیر واقع در بازه‌های کانال اصلی تحت سناریوی اول بهره‌برداری: سناریوی بهره‌برداری کم آبی

شکل (۶) نتایج شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد بهره‌برداری در کانال اصلی را تحت سناریوی نرمال و دو سناریوی سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی، در قالب درصد کاهش دبی تحویلی به هر آبگیر به تصویر کشیده است. مطابق نتایج مذکور، عملکرد سامانه کنترل غیرمتمرکز PI در تامین شرایط هیدرولیکی پایدار و مناسب جهت آبگیری ثقلی (که همان کنترل سطح آب در بالادست آبگیر در محدوده تغییرات مجاز است) تحت سناریوی نرمال بهره‌برداری قابل قبول است. میزان کمبود دبی تحویل داده شده در طول شبیه‌سازی برای آبگیرهای بالادستی (آبگیر اول تا هفتم) در محدوده یک تا ۳ درصد، برای آبگیرهای میان دستی کانال اصلی (آبگیرهای هشت تا پانزده) در محدوده ۲ تا ۴/۵ درصد و برای آبگیرهای پایین دستی (آبگیر ۱۶ تا ۲۰) در محدوده ۴/۳ تا ۷/۶ درصد در تغییر بوده است. به عبارت دیگر میزان متوسط کمبود دبی تحویلی در کل کانال آبیاری کمتر از ۵ درصد بدست آمده که از نظر بهره‌برداری یک وضعیت مطلوب تلقی می‌شود. با ظهور کم‌آبی در سناریوی اول بهره‌برداری حفظ وضعیت مطلوب بهره‌برداری برای شش بازه ابتدایی حفظ شده است به نحوی که میزان کمبود دبی تحویلی در طول زمان شبیه‌سازی به طور متوسط ۵ درصد و کمتر بدست آمد. میزان کمبود دبی تحویل داده شده در آبگیرهای شماره هفت تا سیزده (آبگیرهای بخش میانی کانال اصلی) در محدوده ۷-۱۰٪ بدست آمد که می‌توان وضعیت بهره‌برداری مناسب را برای این آبگیرها در نظر گرفت. توصیف شرایط بهره‌برداری در وضعیت «مناسب» از آنجا نشأت می‌گیرد که در مجموع کمبود دبی تحویل داده شده در این آبگیرها تقریباً متناسب با میزان کاهش جریان ورودی ناشی از کمبود آب بوده است. اما در بازه‌های انتهایی کانال (آبگیرهای چهارده تا بیست) شرایط متفاوتی رخ داده که وضعیت بهره‌برداری را می‌توان «نامطلوب و نامناسب» ارزیابی نمود. مطابق شکل (۶) مقدار کمبود دبی تحویلی به آبگیرهای مذکور در ۲۵٪ زمان شبیه‌سازی در بازه ۲۰٪ تا ۴۰٪ کاهش دبی تحویل داده شده متغیر بوده در حالیکه حداکثر کاهش جریان ورودی در این سناریو در حدود ۱۵٪ در نظر گرفته شده بود. لذا نحوه عملکرد سامانه کنترل غیرمتمرکز PI برای آبگیرهای پایین دستی «ضعیف» و دور از انتظار بدست آمده است. مشابه همین وضعیت مذکور برای آبگیرهای پایین دستی در سناریوی بهره‌برداری دوم (کم‌آبی شدید با نوسانات در جریان ورودی) بدست آمده به‌نحویکه در ۲۵٪ زمان شبیه‌سازی، مقدار کمبود دبی تحویل داده شده به شش آبگیر انتهایی در محدود ۳۸٪ تا ۶۰٪ بدست آمده و این در حالی است که متوسط کاهش دبی ورودی در این سناریو در حدود ۲۲٪ (حداقل ۱۵ و حداکثر ۳۰٪ کاهش دبی ورودی) بوده است. لذا با نظر در گرفتن نتایج هر دو سناریوی بهره‌برداری می‌توان وضعیت بهره‌برداری «مطلوب» برای آبگیرهای بالادستی، «نامطلوب و ضعیف» برای آبگیرهای پایین دستی و تقریباً «مناسب» برای آبگیرهای واقع در بخش میانی کانال اصلی در نظر گرفت.



شکل ۶. مقادیر کمبود دبی تحویل داده شده به آبگیرهای واقع در بازه‌های کانال اصلی تحت سناریوهای بهره‌برداری نرمال، سناریوی اول (کم‌آبی) و سناریوی دوم (کم‌آبی شدید و نوسانی)

نتیجه‌گیری

مطابق با اسناد بالادستی آب کشور، تحویل‌های حجمی کنترل شده و دقیق به آب‌بران، در شبکه‌های آبیاری مدرن و سنتی کشور، به عنوان یکی از مهم‌ترین اقدامات ضروری در شبکه‌های آبیاری تلقی می‌گردد. بر این اساس نیاز به بومی سازی و پیاده‌سازی فناوری‌های نوین مدیریت آب کشاورزی بیشتر از همیشه احساس می‌گردد. در این راستا، تحقیق پیش‌رو با هدف بررسی توانایی سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز PI در تنظیم رقوم سطح آب در بازه‌های کانال اصلی شبکه آبیاری آبشار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق حاکی از آن بود که در سناریوی بهره‌برداری نرمال، زمانی که جریان انحرافی در محل بند انحرافی با میزان کل تقاضا مطابقت دارد، سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز طراحی شده به نحو مطلوبی تنظیم رقوم سطح آب در انتهای هر بازه کانال را انجام داده و بالتبع آن میزان دبی تحویلی در طول زمان شبیه‌سازی شده تقریباً به نحو مطلوبی با مقدار حبابه هر آبگیر مطابقت دارد. با ظهور کم‌آبی در سناریوی اول این تحقیق، روند مذکور تغییر کرده و سامانه بهره‌برداری خودکار قادر بود که توزیع و تحویل آب سطحی به آبگیرهای واقع در منطقه بالادستی و میان‌دستی کانال اصلی را مناسب و منطبق بر حبابه آبگیرها انجام دهد. ولی داستان برای آبگیرهای واقع در یک سوم پایین دست بازه‌های کانال متفاوت بود و نه تنها سامانه کنترل عملکرد مناسبی نداشت بلکه میزان کمبود آب ورودی اثر تجمعی بر آبگیرهای پایین‌دستی داشت. به عبارت دیگر، کنترل‌گر غیرمتمرکز طراحی شده تاثیر پدیده‌های غیرمتعارف در آبگیر ورودی به شبکه در محل بند انحرافی (در این تحقیق کم‌آبی و نوسانات) را به سمت پایین دست منتقل می‌کند. نتایج شبیه‌سازی توزیع آب سطحی تحت سناریوی دوم این تحقیق (سناریوی کم‌آبی شدید با نوسانات) بر توضیحات فوق صحنه گذاشت به نحویکه عملاً توزیع آب سطحی در آبگیرهای پایین دست شبکه را مختل شده و نامناسب ارزیابی شد.

جمع‌بندی نتایج بدست آمده از پژوهش حاضر به این صورت است که سامانه کنترل غیرمتمرکز تناسبی-انتگرالی توانایی قابل قبولی در پیاده‌سازی بهره‌برداری مطلوب در طول کانال اصلی آبیاری تحت سناریوی نرمال داشته به نحوی که رقوم سطح آب در انتهای هر بازه کانال در مجاورت رقوم هدف تنظیم شده و فرآیند تحویل آب حجمی در آبگیرها با دقت خوبی صورت گرفته است. با ظهور کم‌آبی در سامانه تامین (آب منحرف شده در محل بند انحرافی در ورودی شبکه) شرایط توزیع آب در آبگیرهای بالادستی و میانی شبکه مطلوب و در آبگیرهای پایین‌دستی نامناسب و غیر مطمئن انجام شد. با تشدید کم‌آبی در سامانه تامین آب سطحی، آبگیرهای واقع در نیمه بالادستی کانال اصلی شبکه آبیاری آبشار عملکردی مطمئن و مطلوب و آبگیرهای واقع در نیمه پایین دستی کانال مذکور، عملکردی نامطمئن، ضعیف و غیرقابل قبول از خود نشان داد. پیشنهاد قابل ارایه برای تحقیقات آتی، بر اساس نتایج بدست آمده در این پژوهش، در نظر گرفتن مخازن ذخیره و تنظیم جریان (به صورت افلاین در خارج از مسیر کانال اصلی یا مخازن درون مسیری در بخش میان‌دستی و پایین دست شبکه) به عنوان یک جزء جدید سامانه بهره‌برداری و تلفیق (کوپل) نمودن آن با سامانه بهره‌برداری غیرمتمرکز، با هدف بررسی تاثیر آن در بهبود توزیع آب سطحی تحت سناریوهای کم‌آبی محتمل در شبکه آبیاری، ارایه می‌گردد. همچنین پیشنهاد می‌شود بکارگیری جایگزین‌های بالقوه‌ای مانند روش سرشکن کردن سیگنال‌ها و تحلیل موجک به جای فیلتر پایین‌گذر در سامانه کنترل خودکار PI طراحی شده برای کانال اصلی شبکه آبیاری آبشار برای سناریوهای بهره‌برداری با ماهیت نوسانی مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- جمالی، سارا، منعم، محمد جواد. (۱۳۹۳). تنظیم کنترل‌گر PID با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای کنترل تراز آب، نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۸(۳): ۵۸۱-۵۹۰.
- زمانی شهلا، پرورش ریزی عاطفه، عیسی پور سعید. (۱۳۹۲). اثر پارامتر شیب کف بر تعیین بهینه ضرایب و عملکرد کنترل‌کننده PID در کانال‌های آبیاری. علوم آب و خاک، ۱۷(۶): ۱۸۵-۱۹۷.
- سیدموسوی، سید محمد، پرورش ریزی، عاطفه، عیسی پور، سعید. (۱۳۹۴). بهبود ضرایب کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی بر اساس فرآیند شناسایی سامانه در شبکه آبیاری دوستی، آب و خاک، ۲۹(۴): ۸۵۰-۸۶۰.
- هاشمی، سید مهدی، اروجلو، مهدی، صادقی، سونیا، ادیب مجد، اسماعیل. (۱۳۹۷). مقایسه عملکرد آبگیرهای مدول نیرپیک با سامانه توزیع تناسبی (لت) در فرآیند تحویل آب تحت نوسانات دبی ورودی (مطالعه موردی کانال اصلی شبکه رودشت حوضه زاینده رود)، تحقیقات مهندسی سازه های آبیاری و زهکشی، ۱۹(۷)، ۱-۱۶.

REFERENCES

- Arauz, T., Maestre, J. M., Tian, X., & Guan, G. (2020). Design of PI controllers for irrigation canals based on linear matrix inequalities. *Water*, 12(3), 855 .
- Bayat, F., Ghodousi, H., Shahverdi, K., & (2022). Operation of irrigation canals using intelligent methods. *Environmental Sciences*, 20(1), 57-76 .
- Burt, C. M., Mills, R., Khalsa, R. D., & (1998). Improved proportional-integral (PI) logic for canal automation. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 124(1), 53-57 .
- Dejen, Z. A. (2015). Hydraulic and operational performance of irrigation schemes in view of water saving and sustainability: sugar estates and community managed schemes In Ethiopia. Wageningen University and Research .
- Ghumman, A., Ahmad, S., Rahman, S., & Khan, Z. (2018). Investigating management of irrigation water in the upstream control system of the upper swat canal. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 42, 153-14 .
- Hashemi, S., & Orojloo, M. (2018). Comparing Performance of the Nyrpic Module Off-takes with Proportional Systems (LAT) within Inflow Fluctuations (A Case Study in Roodasht Main Irrigation Canal, Zayanderood Basin). *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 19(70), 1-16 (in persian).
- Hashemy, S., & Van Overloop, P. (2013). Applying decentralized water level difference control for operation of the Dez main canal under water shortage. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(12), 1037-1044 .
- Jamali, S., & Monem, M. J. (2014). PID Controller Tuning Using Genetic Algorithms to Control the Water Level. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 8(3), 581-590 (in persian).
- 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, 106578 .
- Litrico, X., Malaterre, P.-O., Baume, J.-P., Vion, P.-Y., & Ribot-Bruno, J. (2007). Automatic tuning of PI controllers for an irrigation canal pool. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 133(1), 27-37 .
- Marashi, A., Kouchakzadeh, S., Yonesi, H. A., & (2023). Rotary gate discharge determination for inclusive data from free to submerged flow conditions using ENN, ENN-GA, and SVM-SA. *Journal of Hydroinformatics* .
- Miltenburg, I. (2008). Determination of canal characteristics with experimental modeling. *Delft University of Technology* .
- Ooi, S. K., & Weyer, E. (2008). Control design for an irrigation channel from physical data. *Control Engineering Practice*, 16(9), 1132-1150 .
- Rahparast, D., & Hashemy S, S. M. (2024). Spatiotemporal Assessment Model for Manual Operation Systems' Technical Performance in Surface Water Distribution Under Water Scarcity Scenarios. *Water Resources Management*, 1-18 .
- Schuurmans, J., Schuurmans, W., Berger, H., Meulenberg, M., & Brouwer, R. (1997). Control of water levels in the meuse river. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 123(3), 180-184 .
- Seyedmousavi, S. M., parvaresh Rizi, A., & Isapour, S. (2015). Improving the Coefficients of Proportional-Integral Controller Based On System Identification Process on Doosti Irrigation Network. *Water and Soil*, 29(4), 850-860 (in persian).
- Shahverdi, K., Maestre, J., Alamiyan-Harandi, F & ,Tian, X. (2020). Generalizing fuzzy SARSA learning for real-time operation of irrigation canals. *Water*, 12(9), 2407 .
- Shahverdi, K., Mollazeinyali, H., Marofi, M., & (2023). Design of Operation Strategy for Canal Structures. *Journal of Hydraulics*, 18, ۴۸-۳۵, (۴)
- Shahverdi, K., & Monem, M. J. (2022). Irrigation canal control using enhanced fuzzy SARSA learning. *Irrigation and Drainage*, 71(3), 766-775 .
- Soler, J., Gamazo, P., Rodellar, J., & Gómez, M. (2015). Operation of an irrigation canal by means of the passive canal control. *Irrigation science*, 33, 95-106 .
- Van Overloop, P.-J. (2006). *Model predictive control on open water systems*. IOS Press, Delft University of



Technology .

- Van Overloop, P., Miltenburg, I., Clemmens, A., & Strand, R. (2008). Identification of pool characteristics of irrigation canals. World Environmental and Water Resources Congress 2008: Ahupua'A ,
- Zamani, S., Parvaresh Rizi, A., Isapoor, S., & (2015). The effect of design parameters of an irrigation canal on tuning of coefficients and performance of a PI controller. *Irrigation and Drainage*, 64(4), 519-534 .
- Zamani, S., Parvaresh Rizi, A., & Isapour, S. (2014). Effect of Bottom Slope on Determining Optimum Coefficients and Performance of PID Controller in Irrigation Canals [Research]. *Journal of Water and Soil Science*, 17(66), 185-197 (in persian).

Developing a decentralized proportional-integral automatic control system and evaluating its performance in improving the operation of the Abshar irrigation district' main canal

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Given the emergence and intensification of drought periods and the increase in irrigated agricultural land, exacerbating the demand for agricultural products, pressure on surface and groundwater resources has become a similar problem. Upgrading the operation of irrigation channels has become particularly important in many countries. Automation of surface water distribution systems through upgrading water level regulation methods and daily water distribution and delivery planning by automatic control systems is one of the effective solutions to improve agricultural water productivity. In this regard, in this study, while developing a Proportional-Integral (PI) automatic control algorithm, as an automatic control system for the operation of the main channel of the northern branch of the Abshar irrigation network, its performance was evaluated under low-water operation scenarios.

Material and Methods

The first step in developing an automatic control system for the main channel of Abshar was the development of a hydraulic flow simulation model to simulate hydraulic parameters such as water level and flow rate along the channel. In this study, a simplified Integral-Delay (ID) mathematical model for hydraulic flow simulation was developed and calibrated and validated using measured data. Subsequently, a decentralized Proportional-Integral (PI) automatic control operation model was designed for channel segments and coupled with the hydraulic simulation model using MATLAB. Then, the proportional and integral coefficients of each controller in this system were identified using the System Identification method. Finally, the operation status was simulated using the designed automatic system under normal, low-water, and severe low-water operation scenarios with input fluctuations, and the performance was evaluated.

Results and Discussion

Simulation results showed that the decentralized Proportional-Integral (PI) control system demonstrated acceptable capability in implementing desirable operation along the main irrigation channel under normal operation scenarios. The calculated maximum error values in intervals 6 to 10, 11 to 15, and 16 to 20 were variable within the ranges of -6 to -9, -11 to -13, and -13 to -18 centimeters, respectively. Based on these, performance evaluation indices MAE, IAE, and STE obtained values of 0.11 to 0.140, 0.0013 to 0.0182, and 0.0001 to 0.0011, respectively. With the emergence of low-water scenarios, water distribution conditions were assessed as desirable in upstream and midstream water intakes, while downstream intakes were deemed uncertain, with calculated maximum error values in the lower intervals of 16 to 20 ranging from -10 to -20 centimeters. In severe low-water scenarios accompanied by fluctuations, only upstream intakes experienced desirable water delivery conditions, while downstream intakes experienced poor operation. In these conditions, the calculated maximum error values in intervals 11 to 15 and 16 to 20 were variable within the ranges of -17 to -22 and -35 to -45 centimeters, respectively. Based on these, performance evaluation indices MAE, IAE, and STE obtained values of 0.096 to 0.172, 0.0123 to 0.0991, and 0.0089 to 0.0592, respectively.

Conclusion

The results indicated that the designed decentralized controller transfers the effects of non-standard phenomena at the input water intake to the network at the diversion structure location (in this study, low-water conditions and fluctuations) downstream. As a result, disturbed and inappropriate surface water distribution occurs at the downstream water intakes of the network.

Keywords: Constitutive Model, Unsaturated Soil, Numerical Simulation, Plasticity.