Vol 14, No. 2, Summer 2024

University of Tehran Press

Journal of Water and Irrigation Management Online ISSN: 2382-9931

Homepage: https://jwim.ut.ac.ir/

Analysis of adequacy, dependability, and equity of surface water allocation by a decentralized automatic control system under water scarcity conditions: A case study of the nekouabad irrigation network in Isfahan

Dorsa Rahparast[1] | S. Mehdy Hashemy Shahdany[2]✉

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: dorsa.rahparast@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

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 3 April 2024
Received in revised form
14 May 2024
Accepted 10 June 2024
Published online 5 September 2024

Keywords:
Modernization
Irrigation Management System
Irrigation Network
Decentralized Controller
Hydraulic Flow Simulation

ABSTRACT

This research aimed at introducing automatic control systems for surface water irrigation networks as an effective approach to reduce water losses in the agricultural sector. The technical aspects of developing these systems in modern irrigation network modernization projects were considered. Extensive field operations were conducted to collect existing data and perform field measurements in the surface water sector (open channel systems and related hydraulic structures). Subsequently, simulation of the surface water distribution process under normal and drought scenarios was carried out to enable spatio-temporal analysis and evaluation of surface water distribution among tertiary agricultural units. In this context, modeling of intelligent surface water distribution systems using the development of decentralized PI automatic control systems was also performed to investigate the impact of surface water distribution system modernization. The simulation results showed that the improvement in the efficiency index of surface water distribution in the upstream, midstream, and downstream reservoirs of the network for the decentralized PI automatic control system was in the range of 10-7%, 5-15%, and 15-4% under different water scarcity scenarios. Similarly, the improvement in the stability index of surface water distribution was 25-4%, 41-9%, and 42-9%, respectively. The improvement in the equity index of surface water distribution after self-calibration was in the range of 13-3% under different scenarios. The results indicate that under the normal scenario, with the use of the PI automatic control system, the water distribution in all reservoirs of the upstream and midstream reservoirs was in a satisfactory state. The results of the spatio-temporal analysis carried out in this research provided a clear pattern of the inefficiency of the irrigation management system in surface water distribution under water scarcity scenarios and identified the maps of vulnerable areas of the network. It is noteworthy that the methodology developed in this research can be implemented in about 2 million hectares of irrigated lands in the country, which are covered by 120 irrigation and drainage districts.

Cite this article: Rahparast, D., & Hashemy Shahdany, S. M. (2024). Analysis of adequacy, dependability, and equity of surface water allocation by a decentralized automatic control system under water scarcity conditions: A case study of the nekouabad irrigation network in Isfahan. *Journal of Water and Irrigation Management*, 14 (2), 439-462.
DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2024.377591.1165

© The Author(s).
Publisher: The University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2024.377591.1165

دوره چهاردهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۳

انتشارات دانشگاه تهران

مدیریت آب و آبیاری

Homepage: https://jwim.ut.ac.ir/

شاپا الکترونیکی: ۹۹۳۱-۲۳۸۲

تحلیل کفایت، پایداری و عدالت توزیع آب سطحی توسط سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز تحت شرایط بهره‌برداری کم‌آبی: مطالعه موردی شبکه آبیاری نکوآباد اصفهان

درسا رهپرست[۱] | سید مهدی هاشمی شاهدانی[۲]✉

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

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

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱/۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۳/۲۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۶/۱۵

کلیدواژه‌ها:

مدرن‌سازی

سامانه بهره‌برداری

شبکه آبیاری

کنترلگر غیرمتمرکز

شبیه‌سازی هیدرولیک جریان

چکیده

این پژوهش با هدف کلی معرفی خودکارسازی سامانه‌های بهره‌برداری آب سطحی، به‌عنوان یک روش کارآمد در کاهش تلفات آب در بخش کشاورزی انجام شد. در این راستا، وجه فنی مربوط به توسعه سامانه‌های بهره‌برداری مدنظر در پروژه‌های مدرن‌سازی شبکه‌های آبیاری ملاک عمل قرار گرفت. در این راستا عملیات میدانی وسیعی به‌منظور جمع‌آوری اطلاعات موجود و اندازه‌گیری‌های میدانی در بخش آب سطحی (سامانه کانال‌های روباز و سازه‌های هیدرولیکی وابسته آن) انجام شد. در ادامه شبیه‌سازی فرایند توزیع آب سطحی تحت سناریوهای بهره‌برداری نرمال و خشکسالی صورت گرفت تا تحلیل زمانی- مکانی و ارزیابی نحوه توزیع آب سطحی بین واحدهای زراعی درجه سه میسر گردد. در این ارتباط مدل‌سازی سامانه‌های هوشمند توزیع آب سطحی با بهره-گیری از توسعه سامانه‌های کنترل خودکار غیرمتمرکز PI به‌منظور بررسی تأثیر مدرن‌سازی سامانه توزیع آب سطحی نیز انجام شد. نتایج شبیه‌سازی، میزان بهبود شاخص کفایت توزیع آب سطحی در آبگیرهای بالادست، میان‌دست و پایین‌دست شبکه برای سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز PI در محدوده ۱۰-۷ درصد، ۱۵-۵ درصد و ۱۵-۴ درصد در سناریوهای مختلف بهره‌برداری کم‌آبی را نشان داد. به‌طور مشابه، میزان بهبود شاخص پایداری توزیع آب سطحی به‌ترتیب ۲۵-۴ درصد، ۴۱-۹ درصد و ۴۲-۹ درصد به‌دست آمد. میزان بهبود شاخص عدالت توزیع آب سطحی پس از خودکاسازی در محدوده ۱۳-۳ درصد در سناریوهای مختلف حاصل شد. نتایج حاکی از آن است که تحت سناریوی نرمال، با به‌کارگیری سامانه کنترل خودکار PI آبگیرهای بالادستی و میان‌دستی در تمام آبگیرها توزیع آب در وضعیت مطلوب قرار گرفت. نتایج تحلیل زمانی و مکانی صورت گرفته در این پژوهش حاکی از الگوی واضحی از ناکارآمدی سامانه بهره‌برداری در توزیع آب سطحی تحت سناریوهای کم‌آبی ارائه کرده و نقشه‌های پهنه‌بندی مناطق آسیب‌پذیر شبکه را مشخص نمودند. لازم به ذکر است که متدولوژی توسعه داده شده دراین پژوهش قابلیت پیاده‌سازی در حدود دو میلیون هکتار از اراضی فاریاب کشور را دارد که تحت پوشش ۱۲۰ شبکه آبیاری و زهکشی قرار گرفته‌اند.

استناد: رهپرست، درسا و هاشمی شاهدانی، سید مهدی (۱۴۰۳). تحلیل کفایت، پایداری و عدالت توزیع آب سطحی توسط سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز تحت شرایط بهره‌برداری کم‌آبی: مطالعه موردی شبکه آبیاری نکوآباد اصفهان. *نشریه مدیریت آب و آبیاری*، ۱۴ (۲)، ۴۶۲-۴۳۹.

DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2024.377591.1165

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

۱. مقدمه

شبکه‌های آبیاری به‌عنوان شریان‌های اصلی کشاورزی فاریاب کشور می‌باشند و به‌منظور استفاده بهینه از منابع آب و خاک، سرمایه‌گذاری گسترده‌ای در کشور احداث و در حال توسعه هستند. در یک نمای کلی شبکه‌های آبیاری از دو سامانه اصلی (تأمین) و (انتقال و توزیع) آب تشکیل شده است. سامانه کانال‌های روباز اصلی و فرعی و سازه‌های هیدورلیکی وابسته آن، زیرساخت اصلی انتقال، توزیع و تحویل آب سطحی در شبکه‌های آبیاری ایران هستند. بررسی‌های میدانی مختلف صورت گرفته حاکی از کارایی پایین‌تر از انتظار سامانه‌ها/روش‌های بهره‌برداری این سامانه‌های مذکور در توزیع پایدار، کافی، عادلانه و قابل اعتماد آب سطحی میان کشاورزان/تعاونی‌های آب بران بالادست و پایین‌دست شبکه‌های آبیاری بوده است. مفهوم سامانه/روش بهره‌برداری بر این اساس مشخص خواهد شد که اپراتورهای تیم بهره‌برداری چگونه فرایند باز و بسته‌نمودن سازه‌های تنظیم سطح آب و سازه‌های تحویل آب (آبگیرها) را در امتداد مسیر جریان در کانال‌های آبیاری انجام می‌دهند. به‌عبارت دیگر، مفهوم بهره‌برداری در راستای تعیین یک برنامه زمان‌بندی حرکت جریان در کانال بر پایه نیاز آبگیری کانال پایین‌دست یا بر پایه تأمین آب از بالادست به‌کار برده می‌شود. با تشدید دوره‌های کم‌آبی در دو دهه اخیر و فشار مضاعف بر منابع آب سطحی، عملا کارکرد سامانه/روش‌های بهره‌برداری موجود از وضعیت دور از انتظار به حالت نامطلوب و غیرقابل اعتماد تغییر یافته (Orojloo *et al*., 2018; Bozorgi *et al*., 2021) و الگوهای مشخصی از عدم اطمینان کشاورزان به این سامانه‌ها به‌وضوح در اکثر بیش از ۱۲۰ شبکه آبیاری مدرن کشور، مساحتی در حدود دو میلیون هکتار از اراضی کشاورزی فاریاب کشور دیده می‌شود. در این ارتباط لازم به توضیح است که منظور از سامانه/روش‌های بهره‌برداری موجود در شبکه‌های آبیاری مدرن ایران، براساس تعاریف ارائه‌شده در نشریه‌های ضوابط طراحی و مدیریت شبکه‌های آبیاری (MOE, 1994) به‌طور عمده سه الگوی بهره‌برداری دستی می‌باشد شامل ۱- تنظیمات دستی روزانه سازه‌های تنظیم سطح آب و سازه‌های آبگیر توسط اپراتور، ۲- تنظیمات خودکار سازه‌های تنظیم سطح آب توسط دریچه‌های خودکار هیدرولیکی مدول آمیل (و به‌صورت بسیار محدود مدول‌های آویس) و تنظیمات دستی روزانه آبگیرها توسط اپراتور و ۳- تنظیم سطح آب توسط سرریزهای لبه طولانی (مانند سرریزهای نوک‌اردکی) به‌عنوان سازه‌های تنظیم سطح آب فاقد امکان بهره‌برداری و تنظیمات دستی روزانه آبگیرها توسط اپراتور.

در ارتباط با ادعای کارکرد نامطلوب و غیرقابل اعتماد سامانه/روش‌های بهره‌برداری موجود در شبکه‌های آبیاری، می‌توان به افزایش قابل‌توجه تعداد چاه‌های بهره‌برداری مجوزدار (و قطعاً چاه‌های غیرمجوزدار که آمار دقیق و قابل استنادی از آن در دست نیست) در محدوده جغرافیایی شبکه‌های آبیاری کشور در دو دهه اخیر و درنتیجه آن اضافه برداشت آب زیرزمینی اشاره نمود. به‌عنوان مثال و براساس اطلاعات جمع‌آوری پژوهش‌گران این مقاله از شرکت آب منطقه‌ای اصفهان، در سه شبکه آبیاری مدرن استراتژیک استان اصفهان از بین ۲۱۴۵۹ تعداد حلقه چاه مجوزدار در حال بهره‌برداری در محدوده مطالعاتی کوهپایه-سگزی به‌ترتیب تعداد ۴۹۴۱ (در حدود ۲۳ درصد) و ۸۸۹۱ (در حدود ۴۱ درصد) حلقه چاه در محدوده شبکه‌های آبیاری رودشت و آبشار و از بین ۱۶۱۸۱ تعداد حلقه چاه مجوزدار در حال بهره‌برداری در محدوده مطالعاتی نجف‌آباد تعداد ۱۴۴۴۷ (در حدود ۸۹ درصد) حلقه چاه در محدوده شبکه آبیاری نکوآباد قرار گرفته‌اند. لازم به توضیح است که صحت‌سنجی ارقام مذکور با تطبیق لایه اطلاعات چاه‌های بهره‌برداری با لایه محدوده جغرافیایی شبکه‌های آبیاری مذکور در GIS انجام شد.

عدم کارایی سامانه بهره‌برداری دستی در شبکه‌های آبیاری در مطالعات مختلف گزارش شده و پس از تعیین محدوده کارایی عملکرد این سامانه‌های بهره‌برداری، ضرورت ارتقا، به‌روزرسانی یا تغییر آن‌ها در قالب پیاده‌سازی طرح‌های نوسازی یا به سازی در شبکه‌های آبیاری توصیه شده است (Ostovari and Monem, 2022; Khaeez and Shahdany, 2021). این

تجربیات به‌صورت کلی با هدف شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان در سامانه کانال‌های اصلی و ارزیابی عملکرد فرایند توزیع و تحویل آب سطحی بین آب‌بران واقع در امتداد شبکه کانال‌ها، صورت گرفته است. نتایج کلی آن‌ها حاکی از میزان قابل‌توجه تلفات آب در فرایند انتقال، توزیع و تحویل در سامانه‌های بهره‌برداری دستی در کانال‌های آبیاری می‌باشد، به‌نحوی‌که این میزان تلفات در Lower Rio Grande Valley در ایالت تگزاس آمریکا را براساس اندازه‌گیری میدانی در کلان‌تحویل‌ها و مقایسه آن با مقدار نیاز واقعی محصولات تحت کشت آن شبکه، در حدود ۳۰ درصد میزان آب تأمین شده در محل بند انحرافی (Fipps *et al*., 2000)، در دشت Hilla-Kifil در بخش جنوبی کشور عراق در حدود ۳۷–۱۹ درصد و براساس اندازه‌گیری میدانی در دوره‌های متناوب بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری واقع در این دشت محاسبه نمودند، در دشت Wonji-Shoa در کشور اتیوپی حدود ۷۲–۱۲ درصد در سناریوهای کم‌آبی تا پرآبی (Kedir, 2015)، در دشت Panchnadi کشور هندوستان درحدود ۳۶–۲۵ درصد (Jadhav *et al*., 2014)، در دشت‌های مرکزی کشور ترکیه حدود ۲۸–۴۵ درصد آب سطحی تأمین‌شده (Akkuzu *et al*., 2000)، در دشت کشاورزی رودشت واقع در منطقه خشک و نیمه‌خشک ایران در حدود ۵۰ درصد و با استفاده از شبیه‌سازی جریان در کانال‌های اصلی و فرعی با استفاده از مدل توسعه داده شده در نرم‌افزار ICSS و تطابق نتایج شبیه‌سازی با مقادیر ثبت‌شده توسط میراب شبکه، در دشت‌های مرکزی کشور اسپانیا حدود ۴۵درصد براساس اندازه‌گیری‌های میدانی (Serra *et al*., 2016) و در دشت شیراز در ایران (شبکه آبیاری درودزن) براساس محاسبه بازده تولید در حدود ۱۹درصد (Shahrokhnia and Ghiasi, 2016) گزارش داده‌اند. مطالعات اشاره‌شده حاکی از تلفات قابل‌توجه در فرایند بهره‌برداری در سامانه‌های توزیع آب سطحی (شبکه کانال‌های روباز) می‌باشد که لزوم ارتقای این سامانه‌ها به سامانه‌های کنترل خودکار را نشان می‌دهد. خودکارسازی به عملیات یا روش‌هایی اطلاق می‌شود که به‌وسیله آن‌ها سامانه‌های الکترونیکی جای انسان را در مشاهده، تصمیم‌گیری و اجرا می‌گیرند. خودکارسازی کانال عبارت از به‌کارگیری یک سامانه کنترل برای تغییر وضعیت سازه‌های تنظیم (و در برخی موارد آبگیرها) و عدم استفاده از میراب جهت بهره‌برداری کانال می‌باشد. در این ارتباط لازم است که علاوه بر طراحی سامانه کنترل خودکار، از مدل‌های شبیه‌ساز هیدرولیک جریان در کانال‌های روباز جهت بررسی پتانسیل این گونه سامانه‌های بهره‌برداری را فراهم کند.

به‌کارگیری وسیع مدل‌های هیدرودینامیکی که امکان شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در کانال‌های آبیاری را دارند، به‌عنوان ابزار اصلی پژوهش‌گران جهت ارزیابی عملکرد بهره‌برداری وضع موجود و هم‌چنین بررسی گزینه‌های ارتقای شیوه بهره‌برداری دیده می‌شود. کاغذچی و همکاران ۲۰۲۱، با هدف ارائه یک سیستم هوشمند شبیه‌سازی هیدرولیکی و ارزیابی عملکرد سیستم‌های توزیع و تحویل آب کشاورزی که قابلیت جایگزینی با مدل‌های تجاری مانند HEC-RAS و SOBEK را داشته باشد، اقدام به توسعه ی یک مدل هوشمند توزیع آب کشاورزی با استفاده از شبکه‌های ترکیبی Bayesian نموده اند (Kaghazchi *et al*., 2021). Ghumman *et al*. (2018)، در پژوهشی ابتدا روش بهره‌برداری موجود در کانال Swat، واقع در پاکستان را که دارای سیستم کنترل بالادست می‌باشد، مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این ارزیابی نشان داد که روش بهره‌برداری موجود مطلوب نبوده، سپس با استفاده از مدل هیدرودینامیکی CANALMAN، کانال مورد نظر شبیه‌سازی شد و راهکار بستن کانال‌های درجه دو در شب برای جلوگیری از هدررفت آب پیشنهاد شد و مورد ارزیابی قرار گرفت. Dejen (2015)، با هدف بهبود عملکرد هیدرولیکی به‌واسطه بهره‌برداری مؤثر، جریان را در کانال اصلی شبکه آبیاری Mahatra را در کشور اتیوپی با استفاده از مدل DUFLOW شبیه‌سازی نموده و با به‌کارگیری شاخص‌های ارزیابی عملکرد سامانه بهره‌برداری، روش‌های بهبود عملکرد را مورد ارزیابی قرار داد. Soler *et al*. (2015)، مدل HEC-RAS را برای شبیه‌سازی جریان غیرماندگار در کانالی واقع در اسپانیا انتخاب کردند و برای کاهش اختلالات

به‌وجودآمده در دو جهت پایین‌دست و بالادست در اثر تغییرات دبی پمپاژ ورودی، از روش کنترل خودکار، استفاده نمودند. در مطالعه دیگری یک چارچوب جامع برای مدرن‌سازی کانال با توسعه مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی HEC-RAS برای شبیه‌سازی جریان در کانال آبیاری و ادغام روش یادگیری ماشین Fuzzy Sarsa با هدف بهینه‌سازی شاخص‌های ارزیابی عملکرد معرفی گردید (Shahverdi and Maestre, 2023). لازم به توضیح است که مشکل جدی در شرایط غیرمتعارف بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری به‌وجود می‌آید و اصلی‌ترین عامل ایجاد شرایط مذکور، ظهور دوره‌های کم‌آبی منتج از تغییرات اقلیمی است که سامانه‌های تأمین آب سطحی را بسیار آسیب‌پذیر نموده و ریسک شکست سامانه بهره‌برداری را تحت تأثیر خطرات مختلف به طرز قابل‌توجهی افزیش داده است (Orojloo *et al*., 2018; Bozorgi *et al*., 2021).

لذا، خلاصه بیان مسأله که به‌عبارتی فرضیه این پژوهش نیز محسوب می‌شود آن است که روش بهره‌برداری دستی، به‌عنوان متداول‌ترین سامانه توزیع آب سطحی در شبکه‌های آبیاری ایران، در شرایط بهره‌برداری کم‌آبی (منظور شرایطی که میزان آب سطحی تأمین‌شده در محل بند انحرافی کم‌تر از کل تقاضای برآوردشده شبکه باشد) امکان توزیع کافی، پایدار و عادلانه آب سطحی بین کشاورزان یک شبکه آبیاری را ندارد. اهداف کلی و جامع این پژوهش معرفی پروژه‌های خودکارسازی سامانه‌های بهره‌برداری آب سطحی، به‌عنوان یک روش کارآمد در کاهش تلفات ناشی از فرایند انتقال، توزیع و تحویل آب آبیاری و در نتیجه آن بهبود کارایی عملکرد این سامانه‌ها در توزیع کافی، قابل اعتماد و عادلانه آب سطحی بین حقابه‌داران واقع در محدوده یک شبکه آبیاری می‌باشد. در این ارتباط به بررسی فنی کارایی سامانه کنترل خودکار هوشمند غیرمتمرکز با به‌کارگیری روش کنترل کلاسیک تناسبی- انتگرالی به‌عنوان یک راهکار میان‌مدت در مدرن‌سازی برای شبکه‌های آبیاری ایران پرداخته شود. در این ارتباط نوآوری پژوهش عبارت از ارزیابی عملکرد فرایند توزیع آب سطحی در روش بهره‌برداری خودکار غیرمتمرکز در شبکه آبیاری نکوآباد اصفهان، با استفاده از شاخص‌های ارزیابی عملکرد (تحلیل شاخص‌محور) به‌همراه تحلیل مکانی توزیع آب سطحی برپایه کفایت، پایداری و عدالت توزیع آب سطحی در محدوده شبکه آبیاری به‌منظور استخراج نقشه‌های توزیع آب سطحی در محدوده شبکه آبیاری می‌باشد.

۲. مواد و روش‌ها

۲. ۱. روش انجام تحقیق

مراحل طی‌شده در انجام این پژوهش عبارتند از:

- گام اول: توسعه مدل شبیه‌ساز هیدرولیک جریان در کانال‌های اصلی و فرعی شبکه آبیاری نکوآباد- برپایه مجموعه اطلاعات سازه‌ای شامل پلان، پروفیل و مقاطع عرضی کانال، ابعاد و نوع سازه‌های هیدرولیکی انتقال، تنظیم سطح آب و آبگیر- با بهره‌گیری از روش انتگرالی-تأخیری[1] (ID)) در محیط MATLAB و در ادامه واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌های توسعه داده‌شده؛

- گام دوم: تحلیل وضعیت تأمین آب سطحی در طول دوره آماری ۳۰ ساله مربوط به ۱۴۰۰-۱۳۷۰، به‌منظور تعیین سناریوهای بهره‌برداری نرمال و کم‌آبی جهت شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی سامانه توزیع آب سطحی؛

- گام سوم: شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در کانال‌های اصلی و فرعی توزیع آب سطحی براساس سناریوهای بهره‌برداری منتخب و ارزیابی عملکرد سامانه بهره‌برداری دستی براساس شاخص‌های ارزیابی عملکرد پایداری توزیع آب سطحی؛

- گام چهارم: توسعه مدل سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز با بهره گیری از روش کنترل کلاسیک تناسبی-انتگرالی PI (Proportional-Integral) در محیط MATLAB و لینک آن‌ها با مدل شبیه‌ساز هیدرولیک و تحلیل مکانی پایداری، کفایت و عدالت توزیع آب سطحی در شرایط بهره‌برداری خودکار (تحت سناریوهای مشخص‌شده در گام دوم) در محیط GIS.

۲. ۲. شبکه آبیاری و زهکشی نکوآباد اصفهان

شبکه آبیاری نکوآباد واقع در حوضه آبریز زاینده‌رود، در منطقه مرکزی ایران قرار گرفته است. براساس اطلاعات و آمار جمع‌آوری‌شده در مرحله ابتدایی انجام این پژوهش از شرکت آب منطقه‌ای اصفهان اطلاعات شبکه به شرح ذیل ارائه می‌گردد.

مساحت در حال بهره‌برداری شبکه در حدود ۲۹ هزار هکتار می‌باشد و موقعیت مکانی آن در عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۲۳ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۴۶ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۲۱ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۴۲ 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 در میزان تبخیر و تعرق در این منطقه حدود ۱۵۰۰ میلی‌متر در سال برآورد شده است. منبع اصلی تأمین‌کننده آب این شبکه آبیاری، آب رهاشده از سد زاینده‌رود می‌باشد. در طرفین بند انحرافی نکوآباد، در منشأ تأمین آب این شبکه آبیاری، دو رشته کانال اصلی چپ و راست به‌منظور برداشت آب جهت تحت پوشش قراردادن اراضی احداث شده است. کنترل و تنظیم سطح آب به شیوه کنترل بالادست، با به‌کارگیری ۵۰ سازه خودکار هیدرومکانیکال آمیل و یک سازه ثابت Duck-Bill صورت می‌گیرد. تحویل و توزیع سطح آب در طول شبکه اصلی، متشکل از کانال‌های درجه یک و درجه دو، به‌ترتیب ۱۳ و ۱۴۹ سازه آبگیر انجام می‌گیرد که نحوه تنظیمات آن به‌صورت دستی و توسط اپراتور انجام می‌شود.

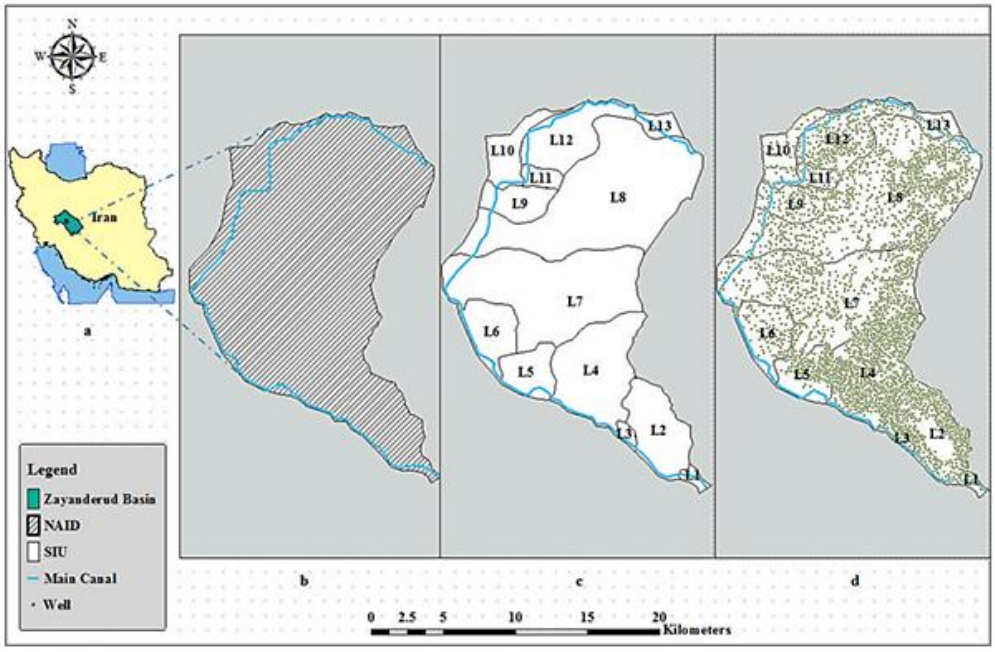

Figure 1. The study area of this research includes thirteen second-grade agricultural units, the main canal, and licensed extraction wells within the NekooAbad District

۲. ۳. شبیه‌سازی توزیع و تحویل آب در کانال آبیاری

به‌منظور ارزیابی عملکرد سامانه بهره‌برداری دستی موجود در شبکه نکوآباد، که برنامه‌ریزی توزیع آب سطحی را در کانال‌های اصلی و فرعی این شبکه پیاده می‌کند، لازم است که شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در مجاری اصلی و فرعی انتقال آب سطحی انجام گیرد. بدین منظور در این پژوهش از مدل ریاضی انتگرالی–تأخیری (ID) در محیط نرم‌افزار

MATLAB استفاده شد تا امکان تبادل اطلاعات با برنامه‌های زمانی تغییر بازشدگی دریچه‌های آبگیر (برنامه‌ریزی روزانه تحویل و توزیع آب) امکان‌پذیر شود. در این نرم‌افزار روند انجام محاسبات بر پایه روش روندیابی جریان در هر بازه سامانه انتقال، در حد فاصل دو سازه تنظیم سطح آب، است و به‌کارگیری مدل ID برای شبیه‌سازی جریان در مجاری اصلی توزیع آب سطحی، با هدف ارزیابی عملکرد سامانه‌های بهره‌برداری موجود یا مدرن‌سازی سامانه‌های مذکور، به سبب راحتی محاسبات و تأمین دقت موردنیاز، مورد استقبال قرار گرفته است (Van Overloop *et al*., 2010).

در مدل مذکور، هر بازه کانال اصلی سامانه توزیع آب به دو بخش، شامل ۱- بخش جریان یکنواخت و ۲- بخش منحنی برگشت آب می‌باشد. هر بخش یک مشخصه اصلی دارد که از مجموع این دو، مدل انتگرالی- تأخیری به‌دست می‌آید. این دو مشخصه اصلی در هر بازه کانال عبارتند از زمان تأخیر (τ) و سطح ذخیره (A_s). در بخش اول (جریان یکنواخت) فرض می‌شود که موج جریان ورودی جریان فقط به سمت پایین‌دست منتقل می‌شود. هر تغییری در سازه تنظیم‌کننده سطح آب بالادست منجر به تولید یک موج می‌شود، این بخش از کانال فقط به‌عنوان گذار برای عبور این موج عمل می‌کند. شایان‌ذکر است که سرعت موج در یک بازه از کانال با عمق نرمال، به سرعت موج سینماتیک نزدیک است. زمان تأخیر ناشی از حرکت موج مذکور به بخش منحنی برگشت آب رسیده و موجب تغییر تراز سطح آب می‌شود. زمان تأخیر تنها پارامتری است که در بخش جریان یکنواخت، برای تشریح جریان، در نظر گرفته می‌شود. معادله حاکم بر این بخش به‌صورت رابطه (۱) ارائه می‌شود (Isapoor *et al*., 2011).

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

ه در آن، q_{in} دبی ورودی به بخش یکنواخت جریان (m^3/s)، q_{canal} دبی ورودی به بخش ذخیره (m^3/s)، t زمان (sec) و τ زمان تأخیر (sec) می‌باشد. بخش منحنی برگشت آب (بخش دوم) مانند یک مخزن عمل می‌کند و بخش انتگرالی مدل را شامل می‌شود. تغییرات مساحت سطح افقی آب در ترازهای مختلف مخزن (A_s) براساس دبی‌های ورودی و خروجی از بازه کانال به‌صورت رابطه (۲)، در حوزه زمان و حوزه فرکانس، قابل‌بیان است (Isapoor *et al*., 2011):

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

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

که در آن، A_s مساحت سطح ذخیره (m^2)، h عمق آب و (m)، q_{out} دبی خروجی از بخش منحنی برگشت آب (m^3/s) می‌باشد. برای یک بازه از کانال که شامل بخش جریان یکنواخت و بخش منحنی برگشت آب می‌باشد، مدل کاملی از تلفیق معادلات ارائه‌شده در بخش‌های قبلی به‌دست می‌آید.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل شبیه‌ساز توسعه داده‌شده ID براساس اطلاعات اندازه‌گیری‌شده‌ای که توسط شرکت آب منطقه‌ای اصفهان جمع‌آوری شده بود، انجام شد. این اطلاعات مربوط به سه دوره ۵۳، ۶۵ و ۷۳ روزه بهره‌برداری از در سال‌های آبی ۱۳۸۱-۱۳۸۰، ۱۳۹۳-۱۳۹۲و ۱۴۰۰-۱۳۹۹ می‌باشد. نیمی از داده‌های هر دوره آماری برای واسنجی و نیم دیگر آن برای صحت‌سنجی مدل مورداستفاده قرار گرفتند. جهت واسنجی مدل، ضریب دبی آبگذری سازه‌های آبگیر به‌عنوان متغیرهای قابل تغییر جهت انطباق مقادیر شبیه‌سازی با مقادیر مشاهده‌ای استفاده شدند. بعد از واسنجی مدل و تنظیم پارامترهای آن، فرایند صحت‌سنجی اجرا گردید و برای مقایسه مقادیر شبیه‌سازی‌شده با مقادیر مشاهده‌شده درهر دو مرحله از شاخص‌های ارزیابی ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب خطای پس‌ماند (CRM) و میانگین خطای مطلق (MAE)، روابط (۳)، (۴) و (۵)، استفاده شد (Daneshfaraz *et al*., 2022).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - Y_i)^2}{n}}$$ رابطه ۳)

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i - \sum_{i=1}^{n} Y_i}{\sum_{i=1}^{n} X_i}$$ رابطه ۴)

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|Y_i - X_i|$$ رابطه ۵)

که در این روابط، Y_i و X_i به‌ترتیب برابر مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده می‌باشند.

با توجه به شرایط سازه‌ای کانال اصلی سامانه توزیع آب محدوده موردمطالعه، فرم مدل ماتریسی فضای حالت، مطابق رابطه (۳)، با ابعاد مختلف ماتریس، به تفکیک کانال‌های آبیاری- دو کانال اصلی و ۱۳کانال فرعی- به‌دست آمد. با تبدیل روابط به‌دست‌آمده برای تمامی بازه‌ها، به‌جهت بزرگ‌بودن ماتریس‌ها، مدل ماتریسی فضای حالت تنها برای بازه اول در رابطه (۶) آورده شده است:

رابطه ۶)

$$\begin{bmatrix} Q_{hg}(k+1) \\ Q_{hg}(k) \\ Q_{hg}(k-1) \\ Q_{hg}(k-2) \\ e_1(k+1) \\ e_1^*(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{T_c}{A_s} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{T_c}{A_s} & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_{hg}(k) \\ Q_{hg}(k-1) \\ Q_{hg}(k-2) \\ Q_{hg}(k-3) \\ e_1(k) \\ e_1^*(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \nabla Q_{hg}(k) \\ u^*(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{T_c}{A_s} \\ -\frac{T_c}{A_s} \end{bmatrix} \cdot [Q_{off-take1}(k)]$$

$$u^*(k) \geq href_{min}$$
$$u^*(k) \leq href_{max}$$

که در این رابطه، $Q_{hg}(k)$، $Q_{hg}(k-1)$، $Q_{hg}(k-2)$ و $Q_{hg}(k-3)$ به‌ترتیب دبی‌های کنترلی (m^3/s) رهاشده از سازه تنظیم سراب کانال در گام‌های زمانی k-3 تا k (sec) می‌باشد. $e_1(k)$ خطای محاسبه‌شده (رقوم سطح آب اندازه‌گیری‌شده از رقوم هدف) برای بازه اول کانال (m) و $e_1^*(k)$ متغیر حالت اضافه‌شده به سامانه است که دربرگیرنده محدودیت نرم ناشی از تجاوز رقوم سطح آب از رقوم حداکثر و حداقل در بازه اول (m) می‌باشد. $u^*(k)$مقداری است که از میزان خطای ناشی از انحراف سطح آب از سطح هدف کم می‌شود تا مقدار $e_1^*(k)$ را به‌وجود آورد. درواقع متغیر $u^*(k)$ تفسیر فیزیکی ندارد و تنها یک متغیر فرضی جهت اعمال جریمه بیش‌تر بر تابع هدف در زمانی که سطح آب از محدوده مجاز بین حداکثر و حداقل رقوم سطح آب تجاوز می‌کند، می‌باشد.

۲. ۴. سامانهٔ کنترل خودکار غیرمتمرکز تناسبی- انتگرالی[۲]

کنترلگر تناسبی- انتگرالی براساس روش کنترل پسخور طراحی می‌شود که در آن متغیر کنترل‌شونده (خطای رقوم سطح آب) در بالادست سازهٔ تنظیم اندازه‌گیری می‌شود. در این روش، میزان انحراف رقوم سطح آب از رقوم هدف به کنترلگر بازگردانده می‌شود تا با محاسبهٔ اقدام تصحیحی متغیر کنترل‌شونده 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 به‌صورت رابطهٔ (۷) قابل محاسبه است:

$$\Delta Q_{(k)} = K_i . e_{(k)} + K_p . [e_{(k)} - e_{(k-1)}]$$ رابطه ۷)

در رابطهٔ یادشده، $\Delta Q_{(k)}$ مقدار تغییرات دبی عبوری از سازه‌های تنظیم برحسب مترمکعب بر ثانیه در گام زمانی جاری، e برابر مقدار انحرافات تراز سطح آب از رقوم هدف، اندیس‌های k و $k-1$ به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ گام زمانی جاری و گام زمانی قبلی، K_p برابر ضریب تناسبی و K_i برابر ضریب انتگرالی است.

۲. ۵. شاخص ارزیابی عملکرد کفایت توزیع آب

شاخص کفایت توزیع آب سطحی با توجه نسبت آب تحویلی (شبیه‌سازی‌شده توسط مدل شبیه‌ساز ID) به آب موردنیاز الگوی کشت مصوب (حقابهٔ تعیین‌شده برای هر آبگیر) و براساس رابطه ذیل محاسبه می‌گردد (Molden and Gates, 1990):

$$P_A = \frac{1}{T}\sum_T[\frac{1}{R}\sum_R(P_a)] \quad \text{رابطه ۸)}$$

$$P_a = \frac{Q_d}{Q_r} \;\; if\; Q_d < Q_r \;\; Otherwise\; P_a = 1$$

که در آن، T: فواصل زمانی درنظرگرفته‌شده برای ارزیابی عملکرد (sec)؛ R: تعداد کل آبگیری‌های اندازه‌گیری‌شده؛ QD: دبی واقعی تحویلی (m/s)؛ QR: دبی موردنیاز (m/s)؛ $\sum_T^1$ متوسط زمانی و $\sum_R^1$ متوسط مکانی و PA: شاخص کفایت است. دامنهٔ تغییرات این شاخص بین صفر و یک است.

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. Molden and Gates (1990) ضریب تغییرات زمانی معیار کفایت را در قالب رابطهٔ (۹) به‌عنوان پایداری در تحویل آب تعریف کردند:

$$PD = \frac{1}{R}\sum_R CV_T\left(\frac{Q_D}{Q_R}\right) \quad \text{رابطه ۹)}$$

که در آن، CVR: ضریب تغییرات زمانی در هر آبگیر؛ PD: شاخص پایداری برای کل سیستم است.

شاخص عدالت نشان‌دهنده عدالت یکنواختی مکانی نسبت مقدار آب تحویل داده‌شده به آب موردنیاز یا آب برنامه‌ریزی‌شده تعریف می‌شود که به‌صورت رابطه (۱۰) تعریف نموده‌اند (Molden and Gates, 1990):

$$P_E = \frac{1}{T}\sum_T \;[CV_R\,(\frac{Q_d}{Q_r})] \quad \text{رابطه ۱۰)}$$

که در آن، CVR: ضریب تغییرات مکانی در طول کانال و PE: شاخص عدالت می‌باشد. قابل ذکر است که در این مقاله، مفهوم «خوب» و «متوسط» و «ضعیف» برای شاخص‌های ارزیابی عملکرد بهره‌برداری مطابق استاندارد ارائه‌شده توسط Molden and Gates (1990) ارزیابی شده است. استاندارد مذکور در جدول (۱) آورده شده است.

Table 1. Classification of Surface Water Distribution Performance Evaluation Indicators (Molden and Gates, 1990)

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

۳. نتایج و بحث

۳. ۱. تحلیل زمانی دبی تحویلی در محل بند انحرافی نکوآباد و تعیین سناریوهای بهره‌برداری

به‌منظور تعیین سناریوهای بهره‌برداری در پژوهش حاضر، تحلیل زمانی داده‌های تاریخی دبی تحویل داده‌شده در محل بند انحرافی نکوآباد انجام شد. در واقع، الگوهای متناوب دبی تأمین‌شده در محل بند انحراف استخراج و نماینده هر الگو به‌عنوان یکی از سناریوهای بهره‌برداری به‌عنوان شرط اولیه شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در نظر گرفته شد. نتایج تحلیل زمانی شامل سناریوهای منتخب بهره‌برداری به‌همراه احتمال وقوع رخداد هر کلاس در طول ۳۰ سال گذشته بهره‌برداری شبکه آبیاری نکوآباد به شرح ذیل ارائه می‌شود:

- کلاس نرمال (سناریوی بهره‌برداری نرمال):
  - دبی تحویلی در محل بند انحرافی در حدود ۱۰۰–۱۱۰ درصد مجموع تقاضای برآورد شده
  - تغییرات دبی در ۱۲ ماه سال (به‌جز دی و بهمن) = ۲۶– ۱/۸ مترمکعب بر ثانیه
  - متوسط دبی سالانه (به‌استثنای دی و بهمن) = ۱/۹ مترمکعب بر ثانیه
  - متوسط احتمال وقوع در دوره آماری: ۲۰/۶ درصد
- کلاس کم‌آبی ملایم (سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی کم‌تر از ۱۰ درصد):
  - دبی تحویلی در محل بند انحرافی در حدود ۹۰– ۱۰۰ درصد مجموع تقاضای برآورد شده
  - تغییرات دبی در ۱۲ ماه سال (به‌جز دی و بهمن) = ۲۴/۵– ۱/۶ مترمکعب بر ثانیه
  - متوسط دبی سالانه (به‌استثنای دی و بهمن) = ۱۰/۷ مترمکعب بر ثانیه
  - متوسط احتمال وقوع در دوره آماری: ۱۲/۵ درصد
- کلاس کم‌آبی (سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی ۱۰ تا ۱۵ درصد):
  - دبی تحویلی در محل بند انحرافی در حدود ۸۵– ۹۰ درصد مجموع تقاضای برآورد شده
  - تغییرات دبی در ۱۲ ماه سال (به‌جز دی و بهمن) = ۲۲/۹– ۱/۴ مترمکعب بر ثانیه
  - متوسط دبی سالانه (به‌استثنای دی و بهمن) = ۹/۵ مترمکعب بر ثانیه
  - متوسط احتمال وقوع در دوره آماری: ۱۸/۷۵ درصد
- کلاس کم‌آبی شدید (سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی ۱۵ تا ۲۰ درصد):
  - دبی تحویلی در محل بند انحرافی در حدود ۸۰– ۸۵ درصد مجموع تقاضای برآورد شده
  - تغییرات دبی در ۱۲ ماه سال (به‌جز دی و بهمن) = ۲۱/۱– ۱/۳ مترمکعب بر ثانیه
  - متوسط دبی سالانه (به‌استثنای دی و بهمن) = ۸/۳ مترمکعب بر ثانیه
  - متوسط احتمال وقوع در دوره آماری: ۱۷/۵ درصد
- کلاس کم‌آبی حاد: (سه سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی ۲۰ تا ۳۰ درصد – ۳۰ تا ۴۰ درصد – <۴۰درصد):
  - دبی تحویلی در محل بند انحرافی کم‌تر از ۸۰ درصد مجموع تقاضای برآورد شده
  - تغییرات دبی در ۱۲ ماه سال (به‌جز دی و بهمن) = ۱۹/۷– ۱/۲ مترمکعب بر ثانیه
  - متوسط دبی سالانه (به‌استثنای دی و بهمن) = ۷/۱ مترمکعب بر ثانیه
  - متوسط احتمال وقوع در دوره آماری: ۳۰/۶ درصد

لازم به توضیح است که بررسی نحوه پراکندگی ماه‌های واقع در هر کلاس نشان می‌دهد که در حدود ۷۰ تا ۹۰ درصد ماه‌های بهره‌برداری سه کلاس کم‌آبی، کم‌آبی شدید و کم‌آبی حاد در حد فاصل سال‌های ۱۳۸۳–۱۴۰۰ قرار گرفته است. لذا به‌منظور بررسی دقیق‌تر شرایط بهره‌برداری شبکه موردمطالعه در وضعیت کم‌آبی، کلاس کم‌آبی حاد به سه سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی مستقل ۲۰ تا ۳۰ درصد – ۳۰ تا ۴۰ درصد و <۴۰ درصد تقسیم شد. بنابراین، در این مقاله هفت سناریوی بهره‌برداری (شامل یک سناریو نرمال و شش سناریوی کم‌آبی) در نظر گرفته شد و ادامه مطالعات بر این اساس انجام شد.

۳. ۲. نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل هیدرودینامیکی

همان‌طورکه پیش‌تر بیان شد، واسنجی و صحت‌سنجی مدل شبیه‌ساز توسعه داده‌شده ID براساس اطلاعات اندازه‌گیری‌شده‌ای که توسط شرکت آب منطقه‌ای اصفهان جمع‌آوری شده بود، انجام شد. این اطلاعات مربوط به سه

دوره ۵۳، ۶۵ و ۷۳ روزه بهره‌برداری از در سال‌های آبی ۱۳۸۱-۱۳۸۰، ۱۳۹۳-۱۳۹۲ و ۱۴۰۰-۱۳۹۹ 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 آبگذری سازه‌های آبگیر به‌عنوان متغیرهای قابل تغییر جهت انطباق مقادیر شبیه‌سازی با مقادیر مشاهده‌ای استفاده شدند. بعد از واسنجی مدل و تنظیم پارامترهای آن، فرایند صحت‌سنجی اجرا گردید. نتایج این فرایند به این‌صورت است که مقدار میانگین خطای مطلق (MAE)، برای دوره واسنجی برابر ۰/۰۰۵ و برای دوره صحت‌سنجی ۰/۰۰۹ 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، به‌ترتیب برابر ۰/۰۰۸- و ۰/۰۱۶- می‌باشند، با توجه به این‌که بهترین میزان برای CRM صفر می‌باشد، مقادیر کم این شاخص حاکی از دقت قابل‌قبول مدل در مراحل واسنجی و صحت-سنجی است. درنهایت میزان ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، برای دوره واسنجی برابر ۰/۰۰۷ و برای دوره صحت‌سنجی ۰/۰۰۸ به‌دست آمدند. مقادیر مناسب این شاخص نیز دقت مدل را مورد تأیید قرار می‌دهد.

۳. ۳. ارزیابی فرایند توزیع آب سطحی شبیه‌سازی‌شده توسط سامانه کنترل خودکار در شبکه آبیاری نکوآباد

به‌منظور ارزیابی عملکرد کفایت، عدالت و پایداری تحویل و توزیع آب سطحی بین آب‌بران و حقابه‌بران توسط سامانه بهره‌برداری خودکار PI در شبکه آبیاری نکوآباد، شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در کانال‌های اصلی و فرعی تحت هفت سناریوی بهره‌برداری منتخب، که پیش‌تر معرفی شد، انجام گرفت. با در دست‌داشتن تقاضای هر آبگیر (مقدار حقابه مشخص) و متوسط دبی تحویلی روزانه به آن آبگیر (که در این پژوهش از مدل شبیه‌ساز بهره‌برداری به‌دست‌آمده)، میانگین شاخص‌های ارزیابی عملکرد توزیع آب، به تفکیک هر آبگیر و تحت هر سناریوی بهره‌برداری، محاسبه شد. لازم به توضیح دوباره است که دبی روزانه موردنیاز آبگیر در این پژوهش براساس اطلاعات حقابه موجود در دفتر بهره‌برداری شبکه آبیاری نکوآباد استفاده شد. در ارتباط با نتایج حاصله از مدل بهره‌برداری خودکار غیرمتمرکز PI لازم به توضیح است که برای هر آبگیر هیدروگراف تحویل آب روزانه، با بازه‌های زمانی دلخواه که در این پژوهش یک‌ساعته در نظر گرفته شد، به‌عنوان خروجی در هر روز شبیه‌سازی بهره‌برداری حاصل شد. شاخص‌های ارزیابی عملکرد کفایت، پایداری و عدالت توزیع آب، که ماهیتاً تناسب نحوه کافی‌بودن، پایداری و عادلانه‌بودن دبی تحویلی در طول شبیه‌سازی را با دبی درخواستی (حقابه مشخص) بررسی می‌کند، برای هر گام زمانی محاسبه و میانگین کلی مقادیر محاسبه‌شده به تفکیک آبگیرهای واقع در کانال اصلی و کانال‌های درجه دو محاسبه و در ادامه ارائه‌شده است. در گام بعدی، نتایج تحلیل مکانی شاخص پایداری در سطح شبکه- که در محیط GIS انجام شده در قالب نقشه‌های پهنه‌بندی ارائه شد.

در این راستا ارزیابی میزان بهبود عملکرد به‌دست آمده در سامانه انتقال و توزیع آب کشاورزی در شبکه مذکور از دیدگاه فنی با تأکید بر چهار مؤلفه کفایت، راندمان، پایداری و عدالت توزیع آب سطحی بین حقابه‌داران شبکه نکوآباد انجام شد. در ادامه تأثیر به‌کارگیری سامانه کنترل خودکار بهره‌برداری غیرمتمرکز توسعه داده‌شده با بهره‌گیری از کنترلگرهای تناسبی-انتگرالی (PI) موردبررسی قرار گرفت. لازم به توضیح است که سامانه بهره‌برداری خودکار بر روی سازه‌های تنظیم سطح آب واقع بر روی کانال‌های اصلی توسعه داده‌شده و کماکان بهره‌برداری در کانال‌های آبیاری درجه دو به روال بهره‌برداری دستی در وضعیت موجود ادامه دارد. دلیل محدودسازی سامانه کنترل خودکار به کانال‌های اصلی عبارت است از ۱- جنبه کاربردی‌بودن پژوهش حاضر است که در نظر دارد میزان بهبود در سامانه توزیع آب سطحی را به‌صورت واقعی و تحت گزینه‌های محتمل مدرن‌سازی که قابلیت پیاده‌سازی در شبکه‌های آبیاری ایران را دارا

باشد، انجام دهد. به این ترتیب که امکان مدرن‌سازی همزمان کانال‌های اصلی و فرعی به‌دلیل محدودیت‌های سرمایه‌گذاری وجود ندارد و ۲- نشان‌دادن ظرفیت واقعی سامانه کنترل خودکار، با تأکید بر پرهیز از بزرگ‌نمایی عملکرد این سامانه‌ها در بهبود فرایند توزیع آب سطحی در شبکه‌های آبیاری کشور، به‌نحوی‌که پس از مدرن‌سازی سامانه بهره‌برداری آب سطحی فرایند توزیع آب بین آب‌بران به‌درستی قابل‌رصد باشد.

۳. ۳. ۱. ارزیابی کفایت توزیع آب سطحی

جدول (۲) مقدار میانگین محدوده تغییرات شاخص ارزیابی عملکرد محاسبه‌شده در طول دوره شبیه‌سازی تحت سناریوهای هفت‌گانه بهره‌برداری (سناریوی نرمال و شش سناریوی کم‌آبی) را به تفکیک هرکدام از آبگیرهای اصلی ۱۳ گانه واقع در کانال اصلی شبکه ارائه نموده است. هم‌چنین نحوه پراکندگی تغییرات میانگین شاخص ارزیابی در مقایسه با مقدار مشابه در وضعیت بهره‌برداری دستی موجود و به‌ترتیب آبگیر بالادست تا انتهایی‌ترین آبگیر در پایین‌دست کانال اصلی در شکل (۲) به تصویر کشیده شده است.

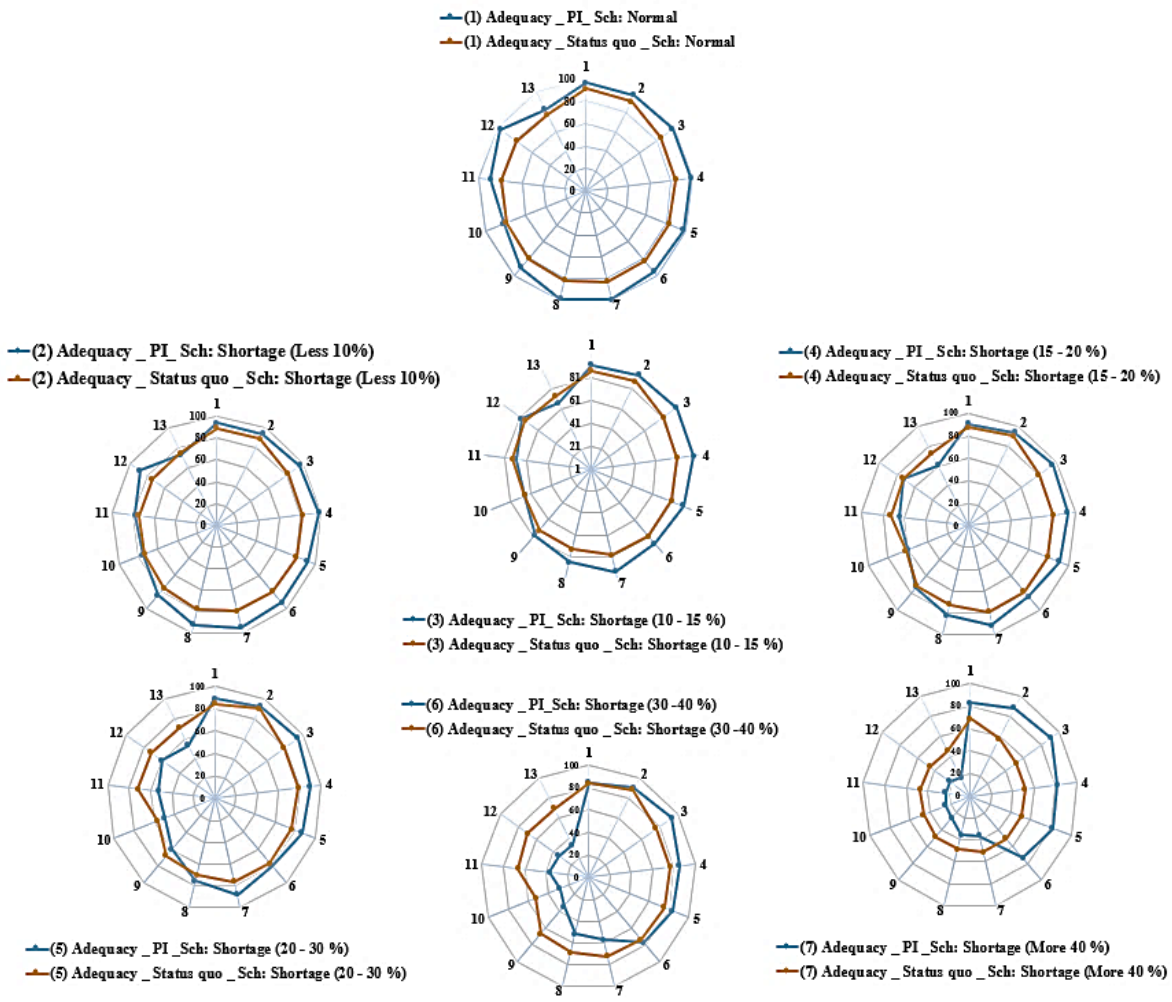

Figure 2. Average adequacy index for water delivery to intakes from upstream to downstream of the main irrigation canal in the NekooAbad District using the PI automatic control method

Table 2. Average variations in the adequacy index values for water delivery to intakes located in the main canal under normal and drought operation scenarios using the PI automatic control method

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Off-takes (FID)	Adequacy _ PI_ Sch: Normal	Adequacy _ PI_ Sch: Shortage (Less 10%)	Adequacy _ PI_ Sch: Shortage (10 - 15 %)	Adequacy _ PI _ Sch: Shortage (15 - 20 %)	Adequacy _ PI _Sch: Shortage (20 - 30 %)	Adequacy _ PI_Sch: Shortage (30 -40 %)	Adequacy _ PI _Sch: Shortage (More 40 %)
12	96.4	93.5	92.5	90.7	88.9	84.4	82.7
120	96.5	94.6	94.6	93.7	92.7	89.9	88.1
90	97.9	96.0	96.0	95.0	94.1	94.1	91.2
91	98.7	97.7	95.8	92.9	89.2	84.7	81.3
92	97.0	92.2	91.3	90.4	86.7	83.3	81.6
93	95.3	93.4	88.7	84.3	80.1	76.9	73.8
94	99.3	95.3	94.3	91.5	87.8	57.1	36.0
108	98.7	92.7	85.3	81.9	75.4	52.0	35.9
0	90.9	84.5	79.5	73.1	59.9	34.8	25.6
16	81.8	75.2	66.2	60.3	49.4	28.7	24.3
109	89.2	78.5	70.6	64.3	52.7	36.9	22.9
15	96.7	89.0	79.2	72.8	59.7	34.0	23.5
14	82.3	73.2	66.7	60.7	53.4	32.6	18.2

خلاصه نتایج نحوه عملکرد تحویل و توزیع آب در طول کانال اصلی به‌همراه مقایسه با وضعیت مشابه در بهره‌برداری موجود دستی در شبکه آبیاری نکوآباد، براساس استاندارد طبقه‌بندی عملکرد شاخص کفایت تحویل آب (Molden and Gates, 1991) به شرح ذیل ارائه می‌شود:

- میانگین کفایت تحویل و توزیع آب در سیزده آبگیر درجه دو واقع در کانال اصلی در سناریوی نرمال
  - تحویل و توزیع خوب: ده آبگیر (بهبود قابل‌ملاحظه در مقایسه با دو آبگیر در بهره‌برداری موجود)
  - تحویل و توزیع متوسط: سه آبگیر (در بهره‌برداری موجود هفت آبگیر در این کلاس قرار گرفتند)
  - تحویل و توزیع ضعیف: صفر (بهبود: در بهره‌برداری موجود چهار آبگیر در این کلاس قرار گرفتند)
- میانگین کفایت تحویل و توزیع آب در سیزده آبگیر درجه دو واقع در کانال اصلی در سناریوی کم‌آبی (کم‌تر از ۱۰ درصد)
  - تحویل و توزیع خوب: هشت آبگیر (بهبود قابل‌ملاحظه در مقایسه با صفر آبگیر در بهره‌برداری موجود)
  - تحویل و توزیع متوسط: دو آبگیر (در بهره‌برداری موجود هفت آبگیر در این کلاس قرار گرفتند)
  - تحویل و توزیع ضعیف: سه آبگیر (در بهره‌برداری موجود شش آبگیر در این کلاس قرار گرفتند)
- میانگین کفایت تحویل و توزیع آب در ۱۳ آبگیر درجه دو واقع در کانال اصلی در سناریوی کم‌آبی (۱۰ تا ۱۵درصد)
  - تحویل و توزیع خوب: شش آبگیر (بهبود قابل‌ملاحظه در مقایسه با صفر آبگیر در بهره‌برداری موجود)
  - تحویل و توزیع متوسط: دو آبگیر (در بهره‌برداری موجود شش آبگیر در این کلاس قرار گرفتند)
  - تحویل و توزیع ضعیف: پنج آبگیر (در بهره‌برداری موجود هفت آبگیر در این کلاس قرار گرفتند)
- میانگین کفایت تحویل و توزیع آب در سیزده آبگیر درجه دو واقع در کانال اصلی در سناریوی کم‌آبی (۱۵ تا ۲۰ درصد)
  - تحویل و توزیع خوب: شش آبگیر (بهبود قابل‌ملاحظه در مقایسه با صفر آبگیر در بهره‌برداری موجود)
  - تحویل و توزیع متوسط: دو آبگیر (در بهره‌برداری موجود شش آبگیر در این کلاس قرار گرفتند)
  - تحویل و توزیع ضعیف: پنج آبگیر (در بهره‌برداری موجود هفت آبگیر در این کلاس قرار گرفتند)

- میانگین کفایت تحویل و توزیع آب در سیزده آبگیر درجه دو واقع در کانال اصلی در سناریوی کم‌آبی (۲۰ تا ۳۰ درصد)
  - تحویل و توزیع خوب: دو آبگیر (بهبود در مقایسه با صفر آبگیر در بهره‌برداری موجود)
  - تحویل و توزیع متوسط: پنج آبگیر (بهبود در مقایسه با دو آبگیر در بهره‌برداری موجود)
  - تحویل و توزیع ضعیف: شش آبگیر (بهبود قابل‌ملاحظه در مقایسه با یازده آبگیر در بهره‌برداری موجود)
- میانگین کفایت تحویل و توزیع آب در سیزده آبگیر درجه دو واقع در کانال اصلی در سناریوی کم‌آبی (۳۰ تا ۴۰ درصد)
  - تحویل و توزیع خوب: یک آبگیر (بهبود جزئی در مقایسه با صفر آبگیر در بهره‌برداری موجود)
  - تحویل و توزیع متوسط: چهار آبگیر (بهبود در مقایسه با دو آبگیر در بهره‌برداری موجود)
  - تحویل و توزیع ضعیف: هشت آبگیر (بهبود در مقایسه با یازده آبگیر در بهره‌برداری موجود)
- میانگین کفایت تحویل و توزیع آب در سیزده آبگیر درجه دو واقع در کانال اصلی در سناریوی کم‌آبی (بیش‌تر از ۴۰ درصد)
  - تحویل و توزیع خوب: یک آبگیر (بهبود جزئی در مقایسه با صفر آبگیر در بهره‌برداری موجود)
  - تحویل و توزیع متوسط: چهار آبگیر (بهبود در مقایسه با صفر آبگیر در بهره‌برداری موجود)
  - تحویل و توزیع ضعیف: هشت آبگیر (بهبود در مقایسه با سیزده آبگیر در بهره‌برداری موجود)

در ادامه نتایج ارزیابی عملکرد سامانه فرعی بهره‌برداری تحت سناریوهای بهره‌برداری هفت‌گانه و از نقطه نظر شاخص ارزیابی عملکرد کفایت در شکل (۳) ارائه شده است. الگوی تغییرات مقدار متوسط شاخص ارزیابی عملکرد کفایت توزیع آب سطحی در هر کانال فرعی درجه دو مشابهت رفتاری قابل‌توجهی با الگوی تغییرات به‌دست‌آمده در کانال اصلی آبیاری نشان می‌دهد. به‌نحوی‌که رفتار تکرارشونده کاهش شاخص از آبگیر بالادستی تا پایین‌دستی (در هر کانال درجه دو) برای هر هفت سناریوی بهره‌برداری منتخب پدید آمده است. صرفاً شیب این تغییرات (الگوی کاهشی) متفاوت بوده است. رخداد رفتار مذکور دور از انتظار هم نبوده و تفسیر این رخداد براساس ماهیت کنترل بالادستی‌بودن روش بهره‌برداری دستی در کانال‌های درجه دو این شبکه آبیاری، قابل انجام است. شایان ذکر است که محدوده این تغییرات در مقایسه با شرایط بهره‌برداری موجود، حاکی از تأثیر غیرقابل انکار ارتقای شیوه بهره‌برداری با استفاده از سامانه کنترل خودکار PI می‌باشد.

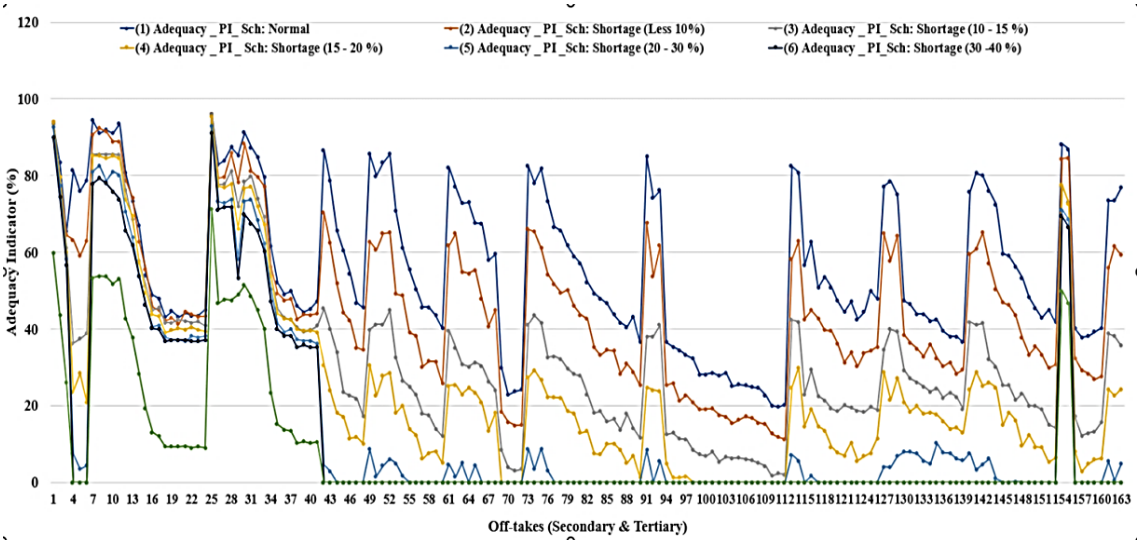

Figure 3. Average adequacy index for water delivery to intakes located in thirteen secondary canals of the NekooAbad district under seven operation scenarios using the PI automatic control method

یکی از مهم‌ترین گام‌ها در پیاده‌سازی طرح‌های نوسازی، بهسازی و مدرن‌سازی با هدف ارتقای شیوه مدیریت تخصیص و توزیع آب در یک شبکه آبیاری، بررسی مکانی نحوه توزیع آب سطحی و در نتیجه تعیین سهم هرکدام از منابع آب سطحی و زیرزمینی در تأمین نیاز کشاورزی آن شبکه می‌باشد. در این راستا، پس از ارزیابی عملکرد سامانه بهره‌برداری خودکار PI در شبکه آبیاری نکوآباد تحت شرایط بهره‌برداری محتمل کم‌آبی، نقشه پهنه‌بندی این تحلیل مکانی براساس دیدگاه کفایت در شکل (۴) ارائه شده است. نتایج تحلیل مکانی، امکان بررسی و مقایسه مکانی پراکندگی مقادیر متوسط شاخص کفایت تحویل آب به آبگیرها تحت سناریوهای مختلف بهره‌برداری را فراهم نموده است. مطابق با این شکل در همه سناریوها، شاخص کفایت از بالادست (منطقه نزدیک به بند انحرافی نکوآباد) به سمت پایین‌دست (انتهای کانال‌های اصلی و تخلیه به زهکش انتهایی) روندی نزولی را طی می‌نماید. دلیل این امر ماهیت سامانه بهره‌برداری با روش کنترل بالادست در کانال‌های موردمطالعه می‌باشد. مقدار شاخص کفایت نشان داده شده در این شکل حاکی از این می‌باشد که به‌طور کلی بهره‌برداری در امتداد کانال اصلی (بخش غربی شبکه) با مقادیر بالاتر، از مطلوبیت بیش‌تری برخوردار است و با فاصله از بخش غربی به بخش‌های مرکزی و شرقی شبکه، وضعیت کفایت توزیع آب غیرقابل‌قبول می‌شود.

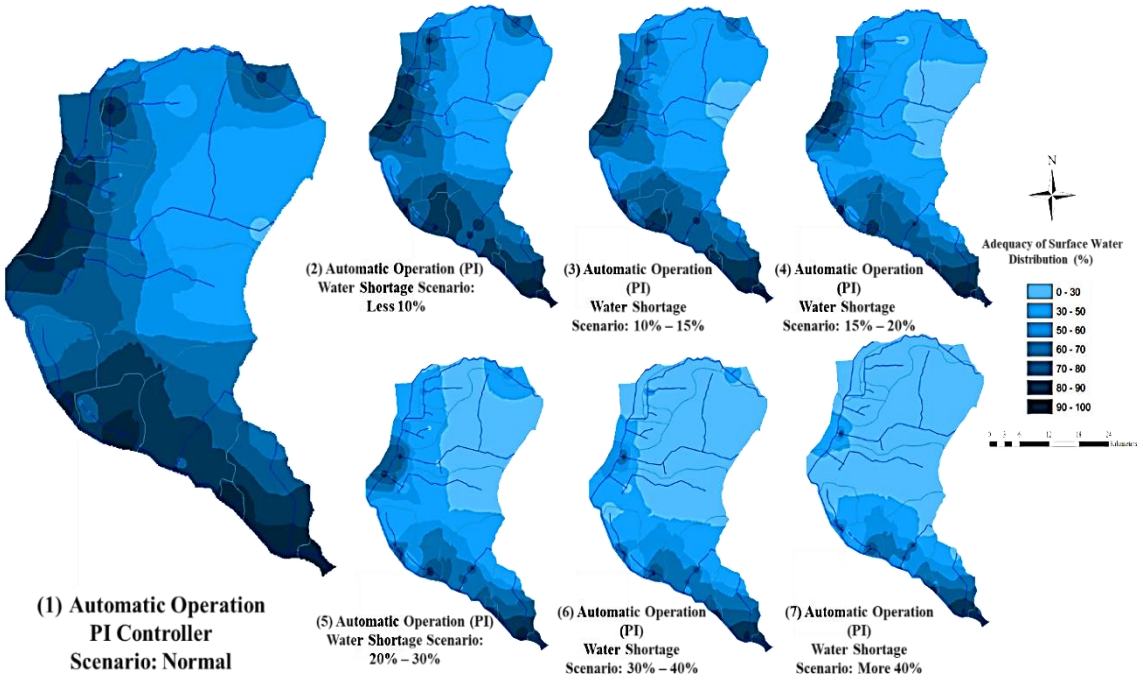

Figure 4. Spatial distribution of surface water distribution adequacy (adequacy contour maps) in the NekooAbad irrigation District under various operation scenarios from normal (Scenario 1) to severe drought (Scenario 7)

۳. ۳. ۲. ارزیابی پایداری توزیع آب سطحی در کانال‌های اصلی

جدول (۳) محدوده تغییرات شاخص ارزیابی عملکرد پایداری توزیع آب محاسبه‌شده، در طول دوره شبیه‌سازی تحت سناریوهای هفت‌گانه بهره‌برداری (سناریوی نرمال و شش سناریوی کم‌آبی) را به تفکیک هرکدام از آبگیرهای اصلی ۱۳ گانه واقع در کانال اصلی شبکه ارائه نموده است. هم‌چنین نحوه پراکندگی تغییرات میانگین شاخص ارزیابی از آبگیر بالادست تا انتهایی‌ترین آبگیر در پایین‌دست کانال اصلی در شکل (۵) به تصویر کشیده شده است.

Table 3. Average variations in the stability index values for water delivery to intakes located in the main canal under normal and drought operation scenarios using the PI automatic control method

	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)
Off-takes (FID)	Dependability_ PI_Sch: Normal	Dependability _ PI_Sch: Shortage (Less 10%)	Dependability _ PI_ Sch: Shortage (10 - 15 %)	Dependability _ PI_Sch: Shortage (15 - 20 %)	Dependability _ PI_ Sch: Shortage (20 - 30 %)	Dependability _ PI_ Sch: Shortage (30 -40 %)	Dependability _PI_Sch: Shortage (More 40 %)
12	6.9	6.7	6.6	6.5	6.6	6.6	6.7
120	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.2	6.2
90	6.2	6.2	6.0	5.9	6.0	6.0	6.0
91	8.4	8.2	8.2	8.1	8.0	8.1	7.9
92	9.4	9.2	9.2	9.1	9.2	9.1	9.1
93	9.0	9.0	9.0	8.9	8.9	8.7	8.7
94	8.4	8.5	8.9	9.5	10.9	12.3	14.3
108	9.1	9.4	10.1	10.7	11.9	13.2	15.2
0	9.8	10.0	10.9	12.4	14.4	16.2	19.1
16	13.4	14.2	14.6	14.9	19.0	24.1	30.3
109	11.5	11.6	12.5	12.8	16.3	20.9	25.3
15	12.5	13.3	14.2	14.8	18.5	23.1	29.3
14	11.3	11.4	12.1	12.7	15.8	20.1	24.5

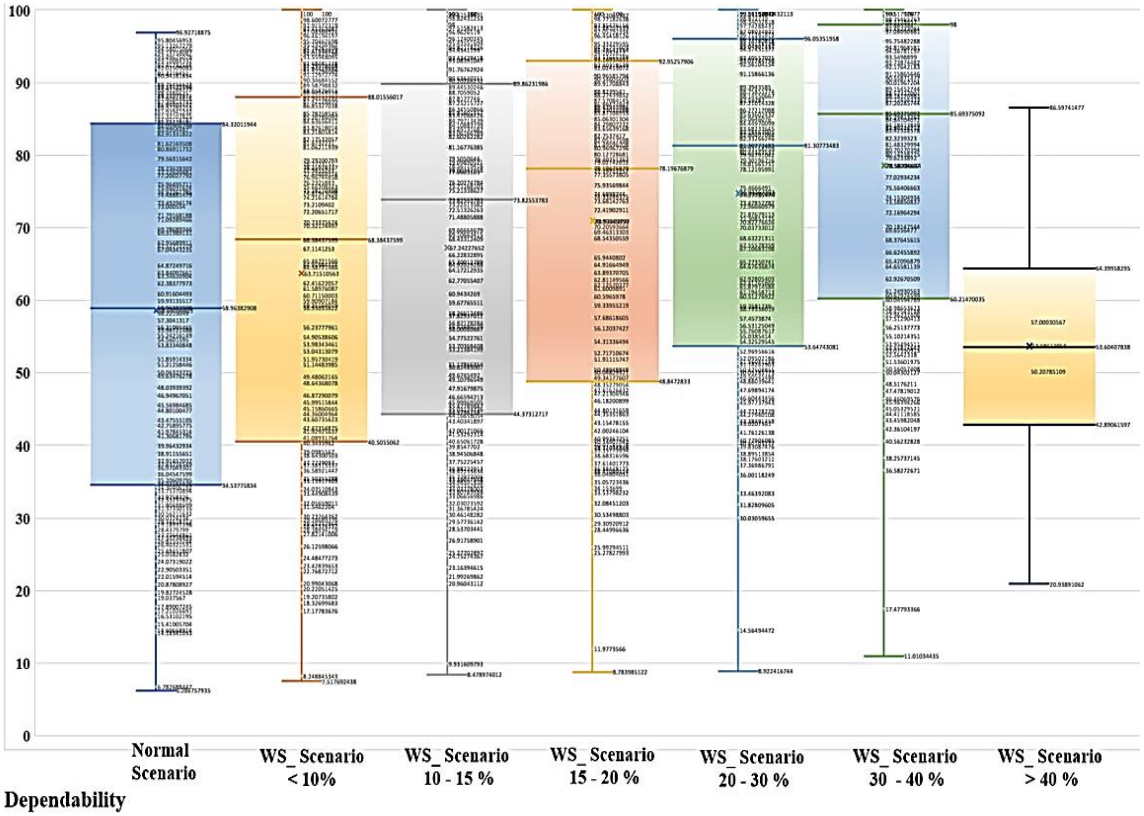

Figure 5. Distribution of the average stability index for water delivery in the secondary distribution network under seven operation scenarios using the automatic control method

خلاصه نتایج نحوه عملکرد تحویل و توزیع آب در طول کانال اصلی به‌همراه مقایسه با وضعیت مشابه در بهره‌برداری موجود دستی در شبکه آبیاری نکوآباد، براساس استاندارد طبقه‌بندی عملکرد شاخص پایداری تحویل آب (Molden and Gates, 1991) به شرح ذیل ارائه می‌شود:

- میانگین پایداری تحویل و توزیع آب در سیزده آبگیر درجه دو واقع در کانال اصلی در سناریوی نرمال
  - تحویل و توزیع خوب: نه آبگیر (بهبود قابل‌ملاحظه در مقایسه با دو آبگیر در بهره‌برداری موجود)
  - تحویل و توزیع متوسط: چهار آبگیر (بهبود: در بهره‌برداری موجود یازده آبگیر در این کلاس قرار گرفتند)
  - تحویل و توزیع ضعیف: صفر (مشابه بهره‌برداری موجود)
- میانگین پایداری تحویل و توزیع آب در سیزده آبگیر درجه دو واقع در کانال اصلی در سناریوی کم‌آبی (کم‌تر از ۱۰ درصد)
  - تحویل و توزیع خوب: نه آبگیر (بهبود قابل‌ملاحظه در مقایسه با دو آبگیر در بهره‌برداری موجود)
  - تحویل و توزیع متوسط: چهار آبگیر (بهبود: در بهره‌برداری موجود هفت آبگیر در این کلاس قرار گرفتند)
  - تحویل و توزیع ضعیف: صفر (بهبود: در بهره‌برداری موجود چهار آبگیر در این کلاس قرار گرفتند)
- میانگین پایداری تحویل و توزیع آب در سیزده آبگیر درجه دو واقع در کانال اصلی در سناریوی کم‌آبی (۱۰ تا ۱۵ درصد)
  - تحویل و توزیع خوب: هفت آبگیر (بهبود قابل‌ملاحظه در مقایسه با دو آبگیر در بهره‌برداری موجود)
  - تحویل و توزیع متوسط: شش آبگیر (بهبود: در بهره‌برداری موجود چهار آبگیر در این کلاس قرار گرفتند)
  - تحویل و توزیع ضعیف: صفر (بهبود: در بهره‌برداری موجود هفت آبگیر در این کلاس قرار گرفتند)
- میانگین پایداری تحویل و توزیع آب در سیزده آبگیر درجه دو واقع در کانال اصلی در سناریوی کم‌آبی (۱۵ تا ۲۰ درصد)
  - تحویل و توزیع خوب: هفت آبگیر (بهبود قابل‌ملاحظه در مقایسه با یک آبگیر در بهره‌برداری موجود)
  - تحویل و توزیع متوسط: شش آبگیر (بهبود: در بهره‌برداری موجود یک آبگیر در این کلاس قرار گرفتند)
  - تحویل و توزیع ضعیف: صفر (بهبود: در بهره‌برداری موجود یازده آبگیر در این کلاس قرار گرفتند)
- میانگین پایداری تحویل و توزیع آب در سیزده آبگیر درجه دو واقع در کانال اصلی در سناریوی کم‌آبی (۲۰ تا ۳۰ درصد)
  - تحویل و توزیع خوب: شش آبگیر (بهبود قابل‌ملاحظه در مقایسه با یک آبگیر در بهره‌برداری موجود)
  - تحویل و توزیع متوسط: هفت آبگیر (بهبود در مقایسه با یک آبگیر در بهره‌برداری موجود)
  - تحویل و توزیع ضعیف: صفر (بهبود قابل‌ملاحظه در مقایسه با یازده آبگیر در بهره‌برداری موجود)
- میانگین پایداری تحویل و توزیع آب در سیزده آبگیر درجه دو واقع در کانال اصلی در سناریوی کم‌آبی (۳۰ تا ۴۰ درصد)
  - تحویل و توزیع خوب: شش آبگیر (بهبود قابل‌ملاحظه در مقایسه با صفر آبگیر در بهره‌برداری موجود)
  - تحویل و توزیع متوسط: هفت آبگیر (بهبود در مقایسه با دو آبگیر در بهره‌برداری موجود)
  - تحویل و توزیع ضعیف: صفر (بهبود قابل‌ملاحظه در مقایسه با یازده آبگیر در بهره‌برداری موجود)
- میانگین پایداری تحویل و توزیع آب در سیزده آبگیر درجه دو واقع در کانال اصلی در سناریوی کم‌آبی (بیش‌تر از ۴۰ درصد)
  - تحویل و توزیع خوب: شش آبگیر (بهبود قابل‌ملاحظه در مقایسه با صفر آبگیر در بهره‌برداری موجود)
  - تحویل و توزیع متوسط: هفت آبگیر (بهبود در مقایسه با دو آبگیر در بهره‌برداری موجود)
  - تحویل و توزیع ضعیف: صفر (بهبود قابل‌ملاحظه در مقایسه با یازده آبگیر در بهره‌برداری موجود)

نتایج فوق حاکی از بهبود چشم‌گیر وضعیت پایداری توزیع آب سطحی در کانال‌های اصلی است به‌نحوی‌که تحت سناریوهای کم‌آبی شدید نیز پایداری توزیع آب سطحی در وضعیت مطلوب (خوب و متوسط) قرار گرفته است. در مقایسه با نتایج شاخص کفایت، می‌توان تأثیر غالب پس از مدرن‌سازی با استفاده از سامانه کنترل خودکار PI را

در بهبود وضعیت پایداری توزیع آب در محل آبگیرها اشاره کرد. در ادامه نتایج تحلیل مکانی ارزیابی عملکرد سامانه فرعی بهره‌برداری تحت سناریوهای بهره‌برداری هفت‌گانه و از نقطه نظر شاخص ارزیابی عملکرد پایداری در شکل (۶) ارائه شده است.

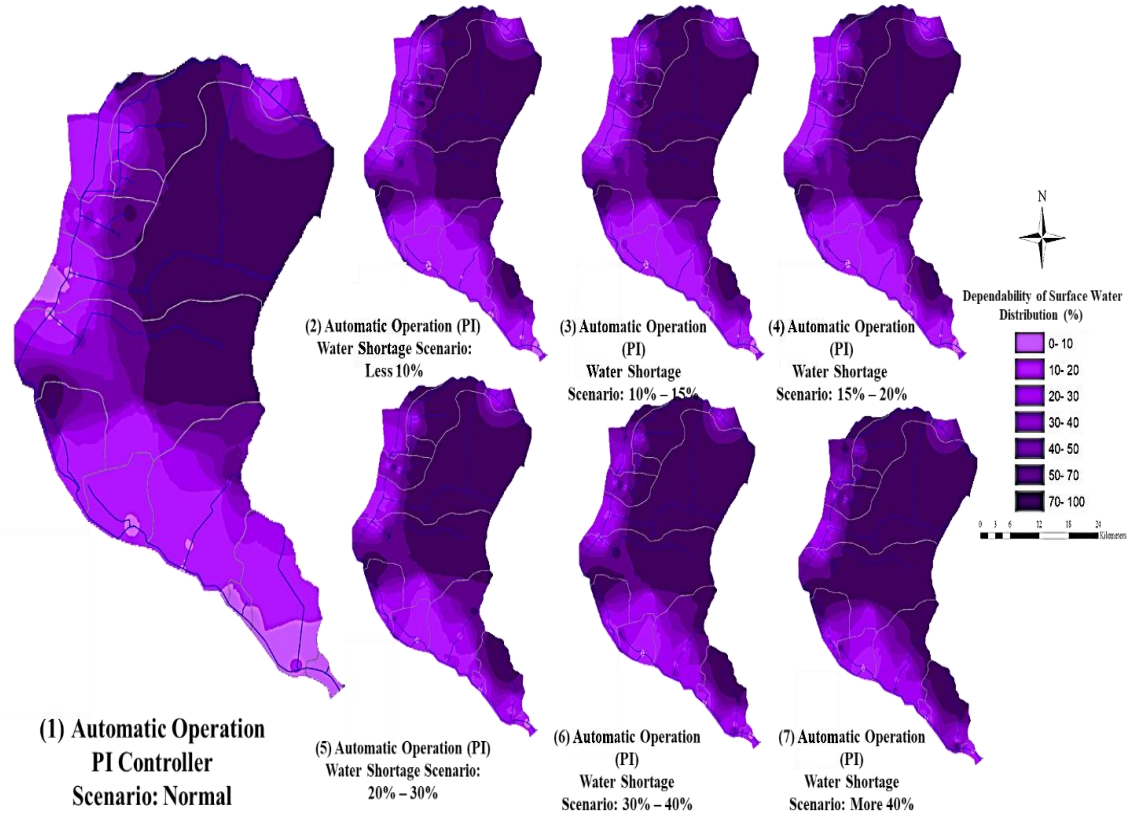

Figure 6. Spatial distribution of surface water distribution stability (stability contour maps) in the NekooAbad irrigation network under various operation scenarios from normal (Scenario 1) to severe drought (Scenario 7)

۳. ۳. ۳. ارزیابی عدالت توزیع آب سطحی

همان‌طورکه پیش‌تر نیز اشاره شد، منظور از عدالت تحویل آب در هر بازه کانال، میزان تحویل متناسب آب با درصد تقاضای آبگیرهای واقع در آن بازه مکانی است. به‌عبارت دیگر، اگر سامانه بهره‌برداری به‌نحوی عمل نماید که تمام آبگیرها واقع در یک بازه کانال از بالادست تا پایین‌دست، همه به یک میزان متأثر از وقوع یک پدیده کم‌آبی یا پرآبی شوند، می‌توان این نحوه توزیع آب را در بازه مکانی مدنظر عادلانه نامید. جدول (۴) مقدار میانگین محدوده تغییرات شاخص ارزیابی عملکرد محاسبه‌شده در طول دوره شبیه‌سازی تحت سناریوهای هفت‌گانه بهره‌برداری (سناریوی نرمال و شش سناریوی کم‌آبی) را به تفکیک هرکدام از آبگیرهای اصلی ۱۳ گانه واقع در کانال اصلی شبکه ارائه نموده است. لازم به توضیح است که در ارتباط با شاخص ارزیابی عدالت، منظور از میانگین شاخص در محل آبگیر در واقع میانگین شاخص محاسبه‌شده عدالت در بازه پایین‌دستی آن آبگیر است که وظیفه تأمین آب آن بازه را به‌عهده دارد. هم‌چنین نحوه پراکندگی تغییرات میانگین شاخص ارزیابی از آبگیر بالادست تا انتهایی‌ترین آبگیر در پایین‌دست کانال اصلی در شکل (۷) به تصویر کشیده شده است.

Table 4. Average variations in the equity index values for water delivery to intakes located in the main canal under normal and drought operation scenarios using the PI automatic control method

Off-takes (FID)	(22) Equity_ PI _ Sch: Normal	(23) Equity _ PI _Sch: Shortage (Less 10%)	(24) Equity _ PI_Sch: Shortage (10 - 15 %)	(25) Equity _ PI_Sch: Shortage (15 - 20 %)	(26) Equity _ PI _ Sch: Shortage (20 - 30 %)	(27) Equity _ PI_ Sch: Shortage (30 -40 %)	(28) Equity _ PI_ Sch: Shortage (More 40 %)
12	9.9	9.8	9.8	9.7	9.6	9.7	9.8
120	7.2	7.3	7.4	7.2	7.3	7.3	7.2
90	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.4	4.3
91	8.9	8.9	8.8	8.8	8.7	8.6	8.4
92	14.3	14.3	14.4	14.6	14.6	14.3	14.3
93	16.4	16.2	16.2	16.4	16.4	16.2	15.9
94	17.7	17.7	17.5	17.3	17.3	17.3	17.0
108	16.4	16.1	16.1	15.8	15.6	15.7	15.9
0	18.8	19.0	19.0	19.2	18.8	19.0	19.1
16	28.9	29.2	28.6	28.0	27.4	26.9	26.9
109	17.9	17.9	17.7	17.3	17.2	17.2	16.8
15	17.9	18.1	18.1	17.9	17.5	17.2	16.8
14	19.1	18.9	19.1	18.9	18.7	18.5	18.7

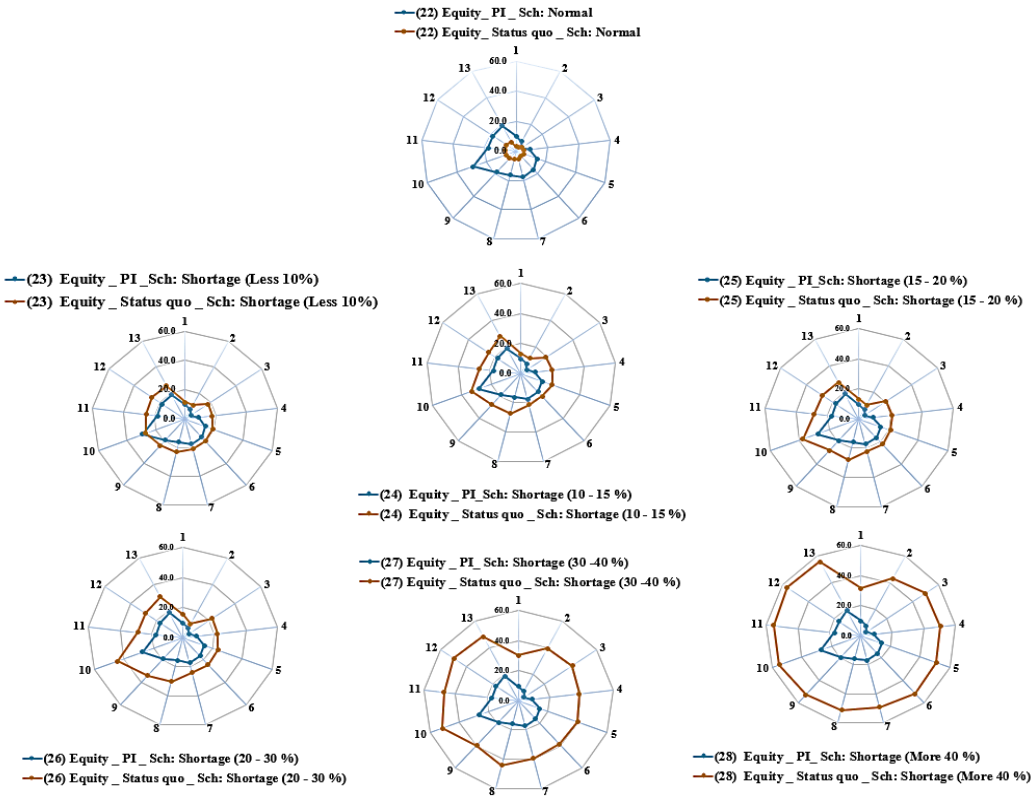

Figure 7. Average equity index calculated at each intake location in the main canal (equity of water distribution among intakes located in secondary canals)

خلاصه نتایج نحوه عملکرد تحویل و توزیع آب در طول کانال اصلی به‌همراه مقایسه با وضعیت مشابه در بهره‌برداری موجود دستی در شبکه آبیاری نکوآباد، براساس استاندارد طبقه‌بندی عملکرد شاخص عدالت تحویل آب (Molden and Gates, 1991) به شرح ذیل ارائه می‌شود:

- میانگین عدالت تحویل و توزیع آب در سیزده آبگیر درجه دو واقع در کانال اصلی در سناریوی نرمال
  - تحویل و توزیع خوب: چهار آبگیر (کاهش قابل‌ملاحظه در مقایسه با سیزده آبگیر در بهره‌برداری موجود)
  - تحویل و توزیع متوسط: هشت آبگیر (کاهش: در بهره‌برداری موجود صفر آبگیر در این کلاس قرار گرفتند)
  - تحویل و توزیع ضعیف: یک آبگیر (کاهش: در بهره‌برداری موجود صفر آبگیر در این کلاس قرار گرفتند)
- میانگین عدالت تحویل و توزیع آب در سیزده آبگیر درجه دو واقع در کانال اصلی در سناریوی کم‌آبی (کم‌تر از ۱۰ درصد)
  - تحویل و توزیع خوب: چهار آبگیر (بهبود قابل‌ملاحظه در مقایسه با صفر آبگیر در بهره‌برداری موجود)
  - تحویل و توزیع متوسط: هشت آبگیر (بهبود:در بهره‌برداری موجود نه آبگیر در این کلاس قرار گرفتند)
  - تحویل و توزیع ضعیف: یک آبگیر (بهبود: در بهره‌برداری موجود چهار آبگیر در این کلاس قرار گرفتند)
- میانگین عدالت تحویل و توزیع آب در سیزده آبگیر درجه دو واقع در کانال اصلی در سناریوی کم‌آبی (۱۰ تا ۱۵ درصد)
  - تحویل و توزیع خوب: چهار آبگیر (بهبود قابل‌ملاحظه در مقایسه با صفر آبگیر در بهره‌برداری موجود)
  - تحویل و توزیع متوسط: هشت آبگیر (بهبود: در بهره‌برداری موجود شش آبگیر در این کلاس قرار گرفتند)
  - تحویل و توزیع ضعیف: یک آبگیر (بهبود قابل‌ملاحظه: در بهره‌برداری موجود هفت آبگیر در این کلاس قرار گرفتند)
- میانگین عدالت تحویل و توزیع آب در سیزده آبگیر درجه دو واقع در کانال اصلی در سناریوی کم‌آبی (۱۵ تا ۲۰ درصد)
  - تحویل و توزیع خوب: چهار آبگیر (بهبود قابل‌ملاحظه در مقایسه با صفر آبگیر در بهره‌برداری موجود)
  - تحویل و توزیع متوسط: هشت آبگیر (بهبود: در بهره‌برداری موجود شش آبگیر در این کلاس قرار گرفتند)
  - تحویل و توزیع ضعیف: یک آبگیر (بهبود قابل‌ملاحظه: در بهره‌برداری موجود هفت آبگیر در این کلاس قرار گرفتند)
- میانگین عدالت تحویل و توزیع آب در سیزده آبگیر درجه دو واقع در کانال اصلی در سناریوی کم‌آبی (۲۰ تا ۳۰ درصد)
  - تحویل و توزیع خوب: چهار آبگیر (بهبود قابل‌ملاحظه در مقایسه با صفر آبگیر در بهره‌برداری موجود)
  - تحویل و توزیع متوسط: هشت آبگیر (بهبود: در بهره‌برداری موجود شش آبگیر در این کلاس قرار گرفتند)
  - تحویل و توزیع ضعیف: یک آبگیر (بهبود قابل‌ملاحظه: در بهره‌برداری موجود هفت آبگیر در این کلاس قرار گرفتند)
- میانگین عدالت تحویل و توزیع آب در سیزده آبگیر درجه دو واقع در کانال اصلی در سناریوی کم‌آبی (۳۰ تا ۴۰ درصد)
  - تحویل و توزیع خوب: چهار آبگیر (بهبود قابل‌ملاحظه در مقایسه با صفر آبگیر در بهره‌برداری موجود)
  - تحویل و توزیع متوسط: هشت آبگیر (بهبود: در بهره‌برداری موجود صفر آبگیر در این کلاس قرار گرفتند)
  - تحویل و توزیع ضعیف: یک آبگیر (بهبود قابل‌ملاحظه: در بهره‌برداری موجود سیزده آبگیر در این کلاس قرار گرفتند)
- میانگین عدالت تحویل و توزیع آب در سیزده آبگیر درجه دو واقع در کانال اصلی در سناریوی کم‌آبی (بیش‌تر از ۴۰ درصد)
  - تحویل و توزیع خوب: چهار آبگیر (بهبود قابل‌ملاحظه در مقایسه با صفر آبگیر در بهره‌برداری موجود)
  - تحویل و توزیع متوسط: هشت آبگیر (بهبود: در بهره‌برداری موجود صفر آبگیر در این کلاس قرار گرفتند)
  - تحویل و توزیع ضعیف: یک آبگیر (بهبود قابل‌ملاحظه: در بهره‌برداری موجود سیزده آبگیر در این کلاس قرار گرفتند)

به‌منظور ارائه تحلیل مکانی عدالت توزیع آب در سطح شبکه، مقدار متوسط شاخص محاسبه شده با استفاده از نرم‌افزار GIS در شکل (۸)، به تفکیک سناریوهای بهره‌برداری ارائه شد. نتایج تحلیل مکانی، امکان بررسی و مقایسه مکانی پراکندگی مقادیر متوسط شاخص عدالت تحویل آب به آبگیرها تحت سناریوهای مختلف بهره‌برداری را فراهم نموده است.

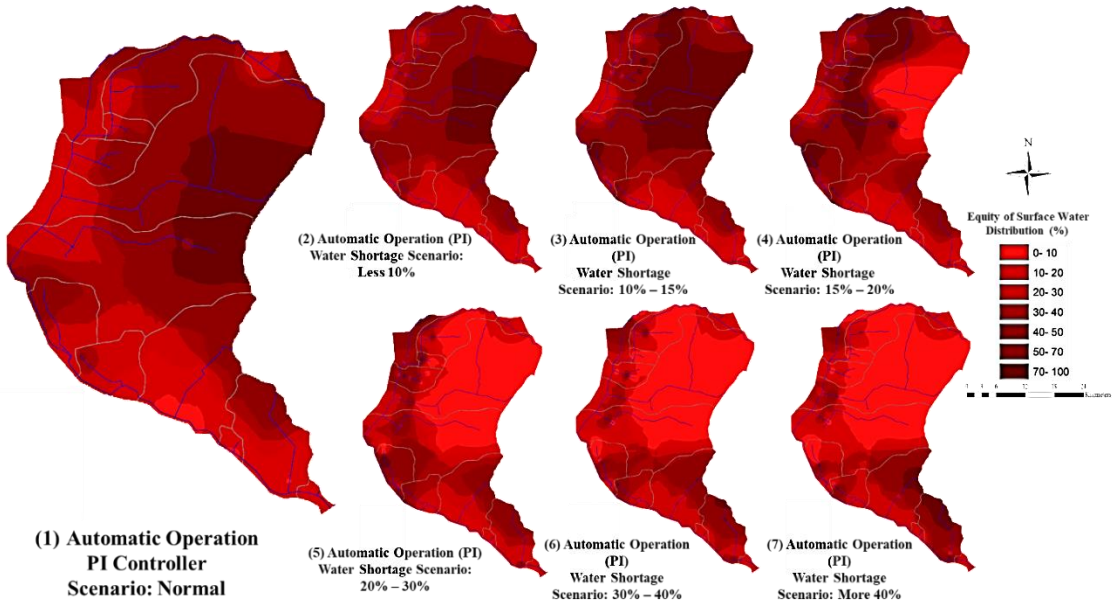

Figure 8. Spatial distribution of surface water distribution equity (equity contour maps) in the NekooAbad irrigation District under various operation scenarios from normal (Scenario 1) to severe drought (Scenario 7)

نتایج فوق حاکی از کاهش عملکرد سامانه بهره‌برداری از نقطه‌نظر عدالت توزیع آب سطحی تنها در سناریوی نرمال بهره‌برداری و در عین حال بهبود چشم‌گیر وضعیت عدالت توزیع آب سطحی در سناریوهای کم‌آبی شدیدتر می‌باشد. در مقایسه با نتایج شاخص کفایت و پایداری می‌توان نتیجه گرفت که به‌کارگیری سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز PI بیش‌ترین تأثیر را در پایداری توزیع آب سطحی و کم‌ترین تأثیر را در عدالت توزیع آب سطحی در سناریوی نرمال بهره‌برداری گذاشته است. با شروع کم‌آبی و با تشدید کم‌آبی در سناریوهای شش‌گانه کم‌آبی منتخب این پژوهش، با وجود تأثیر غالب‌تر مدرن‌سازی در پایداری توزیع آب سطحی، بهبود کفایت و عدالت توزیع آب سطحی در طول کانال اصلی نیز واضح است.

۴. نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی تأثیر مدرن‌سازی سامانه انتقال و توزیع آب سطحی با هدف ارتقای شیوه مدیریت تخصیص و توزیع آب در شبکه آبیاری نکوآباد اصفهان پرداخت. ارزیابی عملکرد بهره برداری هر سامانه بهره‌برداری بستری را ایجاد می‌کند که جنبه‌های مختلف سازه‌ای، هیدرولیکی و مدیریتی و هم‌چنین تعیین عوامل مؤثر در بهره‌برداری از شبکه، به‌منظور ارائه اقدامات لازم جهت بهبود وضعیت بهره‌برداری در صورت لزوم، انجام شود. در این راستا، ارزیابی عملکرد به‌دست‌آمده در سامانه انتقال و توزیع آب کشاورزی (شامل کانال‌های اصلی و فرعی) در شبکه آبیاری نکوآباد از دیدگاه کفایت، پایداری و عدالت تحویل و توزیع آب سطحی توسط سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز تناسبی–انتگرالی صورت گرفت و نتایج حاصل از شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد بهره‌برداری کانال اصلی شبکه آبیاری نکوآباد شامل شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد وضعیت بهره‌برداری موجود در سامانه انتقال و توزیع، در شرایط مختلف بهره‌برداری به‌صورت مشروح در قالب ارزیابی در کانال‌های اصلی و فرعی ارائه شد. نتایج کاربردی به‌دست‌آمده از فرایند شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد سامانه بهره‌برداری خودکار در این پژوهش به شرح ذیل خلاصه می‌گردد:

▪ **در آبگیرهای بالادست شبکه:** میزان بهبود شاخص کفایت توزیع آب سطحی پس از به‌کارگیری سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز PI در محدوده ۱۰-۷ درصد در سناریوهای مختلف اتفاق افتاده است. بررسی این نتایج حاکی از تأثیر مطلوب روش PI در مقایسه با شرایط موجود است. میزان بهبود شاخص پایداری توزیع آب سطحی برای سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز PI در محدوده ۲۵-۴ درصد در سناریوهای مختلف اتفاق افتاده است که حاکی از تأثیر مطلوب روش PI می‌باشد.

▪ **در آبگیرهای میان‌دست شبکه:** میزان بهبود شاخص کفایت توزیع آب سطحی برای سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز PI در محدوده ۱۵-۵ درصد در سناریوهای نرمال تا کم‌آبی شدید و با شدت گرفتن کم‌آبی در سه سناریوهای آخر (کم‌آبی وخیم) کاهش مطلوبیت شاخص کفایت در محدوده صفر-۱۵ درصد به‌دست آمده است. بررسی این نتایج حاکی از تأثیر مناسب سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز PI تحت سناریوی نرمال و کم‌آبی ملایم-شدید در مقایسه با شرایط موجود در سناریوهای کم‌آبی شدید و وخیم می‌باشد. میزان بهبود شاخص پایداری توزیع آب سطحی برای سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز PI در محدوده ۴۱-۹ درصد در سناریوهای مختلف اتفاق افتاده که حاکی از تأثیر مطلوب سامانه PI می‌باشد.

▪ **در آبگیرهای پایین‌دست شبکه:** میزان بهبود شاخص کفایت توزیع آب سطحی پس از به‌کارگیری سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز PI در محدوده ۱۵-۵ درصد در سناریوهای نرمال تا کم‌آبی متوسط و با تشدید کم‌آبی در سناریوهای کم‌آبی وخیم کاهش مطلوبیت شاخص کفایت در محدوده صفر-۱۶ درصد به‌دست آمده است. مشابه رفتار توصیف‌شده در آبگیرهای میانی، بررسی نتایج به‌دست آمده برای آبگیرهای پایین‌دستی حاکی از تأثیر مناسب سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز PI تحت سناریوی نرمال و کم‌آبی ملایم-شدید می‌باشد. میزان بهبود شاخص پایداری توزیع آب سطحی برای سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز PI در محدوده ۴۲-۹ درصد در سناریوهای مختلف اتفاق افتاده که مجددا حاکی از تأثیر مطلوب خودکارسازی می‌باشد.

▪ نتایج تحلیل مکانی حاکی از آن است که سامانه کنترل خودکار تأثیر غیرقابل انکاری در بهبود شاخص پایداری توزیع آب سطحی در طول کانال اصلی داشته‌اند و محل قرارگیری آبگیر (بالادست‌بودن و نزدیک بودن به منبع آب تا پایین‌دست‌بودن) تأثیری در روند کنترل پایداری توزیع آب در سامانه‌های کنترل خودکار در همه سناریوهای بهره‌برداری نداشته است. در سوی مقابل، محل قراگیری آبگیر (بالادست بودن تا پایین‌دست‌بودن) در بهبود شاخص کفایت توزیع آب در سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز PI تأثیرگزار بوده است.

▪ میزان بهبود شاخص عدالت توزیع آب سطحی برای سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز PI در محدوده ۱۳-۳ درصد در سناریوهای مختلف اتفاق افتاده است. بررسی این نتایج حاکی از تأثیر مناسب و (البته نه مظلوب) روش PI می‌باشد.

در ادامه محدودیت‌های انجام این پژوهش در ارتباط با فرض‌های در نظر گرفته‌شده در این پژوهش ارائه می‌گردد. در این پژوهش فرض شده بود که مدل انتگرالی- تأخیری (Integrator-Delay)، مدلی قابل‌اطمینان در شبیه‌سازی یک‌بعدی هیدرولیک جریان در کانال‌های آبیاری است. محدودیت اصلی به‌کارگیری این مدل شبیه‌ساز، عبارت است از عدم امکان محاسبه پارامترهای هیدرولیکی (از جمله رقوم سطح آب و سرعت جریان) در محدوده‌های بالادست و میانی کانال‌های آبیاری است. لازم به توضیح است که محدودیت مذکور به‌دلیل قرارگیری سازه‌های آبگیر در انتهای بازه‌های کانال‌های آبیاری (در بالادست سازه‌های تنظیم سطح آب) در شبکه‌های آبیاری ایران، مانعی در تحلیل و ارزیابی صورت‌گرفته در این پژوهش نداشته است. هم‌چنین در این پژوهش فرض شد که سناریوهای بهره‌برداری محتمل (هیدروگراف ورودی به شبکه در محل بند انحرافی) بر پایه تحلیل آماری داده‌های تاریخی (اندازه‌گیری‌شده توسط تیم بهره‌برداری) در محل بند

انحرافی نکوآباد قابل‌حصول است. با این‌حال، محدودیت اصلی عدم تطابق سناریوهای محتمل به‌دست‌آمده با سناریوهای حدی رخ داده‌شده در زمان‌های کم‌آبی شدید به دلیل عدم وجود یک سامانه دیسپاچینگ اندازه‌گیری جریان ورودی در محل بند انحرافی است. در این پژوهش فرض شد که سطح خودکارسازی در بخش مدرن‌سازی سامانه بهره‌برداری، برای روش خودکار غیرمتمرکز تناسبی–انتگرالی (PI)، سطح اول خودکارسازی است که عبارت است از خودکارسازی سازه‌های تنظیم سطح آب (رگولاتورها) در کانال‌های اصلی. در واقع با عنایت به ماهیت کاربردی‌بودن این مقاله، گزینه محتمل‌تر که امکان اجرای آن در کشور ایران وجود دارد، ملاک در نظر گرفته شد. بر این اساس دو محدودیت اصلی رخ می‌دهد ۱– نتایج به‌کارگیری سامانه کنترل خودکار کم‌تر از توانایی واقعی آن نشان داده می‌شود (اصطلاحاً underestimation رخ می‌دهد) که ممکن است نظرات مدیران و تصمیم‌گیران را تحت تأثیر قرار دهد و ۲– وابستگی عملکرد سامانه کنترل خودکار به میزان مهارت و دقت بهره‌برداران (اکیپ‌های بهره‌برداری) به‌دلیل عدم خودکارسازی سازه‌های آبگیر کماکان تأثیر خودکارسازی را تحت الشعاع قرار می‌دهد. پیشنهاد کاربردی در راستای تکمیل فعالیت صورت گرفته در این تحقیق و با هدف افزایش دقت و سطح ارزیابی صورت‌گرفته، ارزیابی جامع حقابه‌های سنتی، توافقی و فروش آب موجود در محل هر آبگیر درجه دو و درجه سه می‌باشد. منظور از افزایش دقت ارزیابی در اینجا، تدقیق مقدار نیاز آب روزانه هر آبگیر می‌باشد که به‌عنوان یک متغیر اصلی در هر سه شاخص ارزیابی عملکرد توزیع و تحویل آب مورداستفاده قرار می‌گیرد. هم‌چنین منظور از افزایش سطح ارزیابی، واردکردن پارامترهای بیش‌تری شامل نیاز آبی الگوی کشت مشخص در شبکه، میانگین راندمان‌های کاربرد آب در مزارع و راندمان‌های انتقال و توزیع آب در کانال‌های فرعی و لترال‌ها به فرایند ارزیابی است. این مهم با استفاده از دامنه وسیعی از روش‌ها و مدل‌سازی‌های مرتبط با مدیریت آب در سطح مزرعه قابل پیاده‌سازی است.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Integrator-Delay
2. Proportional Integral controller

۶. تشکر و قدردانی

این اثر تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) برگرفته‌شده از طرح شماره «۴۰۲۲۰۷۹» انجام شده است.

۷. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافعی توسط نویسندگان وجود ندارد.

۸. منابع

Akkuzu, E., Ünal, H. B., & Karataş, B. S. (2007). Determination of water conveyance loss in the Menemen open canal irrigation network. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 31(1), 11-22.

Bozorgi, A., Roozbahani, A., Hashemy Shahdany, S. M., & Abbassi, R. (2021). Development of multi-hazard risk assessment model for agricultural water supply and distribution systems using Bayesian network. *Water Resources Management*, 35(10), 3139-3159. doi: 10.1007/s11269-021-02865-9

Daneshfaraz, R., Norouzi, R., Abbaszadeh, H., & Azamathulla, H. M. (2022). Theoretical and experimental analysis of applicability of sill with different widths on the gate discharge coefficients. *Water Supply*, 22(10), 7767-7781. doi: 10.2166/ws.2022.354

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.

Fipps, G. (2000). Potential water savings in irrigated agriculture for the Rio Grande Planning Region (Region M). Texas Cooperative Extension, Texas A&M University System.

Ghumman, A. R., 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, 153-164. doi: 10.1007/s40996-018-0097-0

Isapoor, S., Montazar, A., Van Overloop, P. J., & Van De Giesen, N. (2011). Designing and evaluating control systems of the Dez main canal. *Irrigation and Drainage*, 60(1), 70-79. doi: 10.1002/ird.545

Jadhav, P. B., Thokal, R. T., Mane, M. S., Bhange, H. N., & Kale, S. R. (2014). improving conveyance efficiency through canal lining in command area: A Case Study. *International Journal of Engineering Innovation & Research*, 3(6), 820-826. doi: 10.30482/jeir.2014.51001.10045

Kaghazchi, A., Shahdany, S. M. H., & Roozbahani, A. (2021). Simulation and evaluation of agricultural water distribution and delivery systems with a Hybrid Bayesian network model. *Agricultural Water Management*, 245(2), 106578. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106578

Kedir, Y. (2015). Estimation of conveyance losses of Wonji-Shoa sugar cane irrigation scheme in Ethiopia. *Journal of Environment and Earth Science*, 5(17), 2224-3216. doi: 10.30482/jeesj.2015.424501.3141

Khaeez, S., & Shahdany, S. M. H. (2021). Non-structural modification of agricultural water distribution systems in large scale irrigation districts. *Computers and Electronics in Agriculture*, 184, 106102. doi: 10.1016/j.compag.2021.106102

Ministry of Energy (MOE). (1994). General Design Criteria of Irrigation and Drainage System (Bulletin 281). Iranian Management and Planning Organization. Publication No.107, Tehran, Iran

Molden, D. J., & Gates, T. K. (1990). Performance measures for evaluation of irrigation-water-delivery systems. Journal of irrigation and drainage engineering, 116(6), 804-823. doi: 0.1061/(ASCE)0733-9437(1990)116:6(804)

Orojloo, M., Shahdany, S. M. H., & Roozbahani, A. (2018). Developing an integrated risk management framework for agricultural water conveyance and distribution systems within fuzzy decision-making approaches. *Science of the Total Environment*, 627(4), 1363-1376. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.01.324

Ostovari, S., & Monem, M. J. (2022). Management and performance improvement of irrigation canals in water-scarce conditions considering hydraulic drawbacks: A case study for the Eastern Aghili secondary canal, Iran. *Irrigation and Drainage*, 71(5), 1294-1303. Doi: 10.1002/ird.2744

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. doi: 0.1061/(ASCE)0733-9437(1997)123:3180

Serra, P., Salvati, L., Queralt, E., Pin, C., Gonzalez, O., & Pons, X. (2016). Estimating water consumption and irrigation requirements in a long-established mediterranean rural community by remote sensing and field data. *Irrigation and Drainage*, 65(5), 578-588. doi: 10.1002/ird.1978

Shahverdi, K., & Maestre, J. M. (2023). Holistic Framework for Canal Modernization: Operation Optimization, and Economic and Environmental Analyses. *Water Resources Management*, 1-20. doi: 10.1007/s11269-023-03647-1

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. doi: 10.1007/s00271-014-0450-4

Van Overloop, P. J., Negenborn, R. R., Schutter, B. D., & Van De Giesen, N. C. (2010). Predictive control for national water flow optimization in The Netherlands. *Intelligent Infrastructures*, 42 (3) 439-461. doi: 10.1007/978-90-481-3598-1_17