


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 Rahparast¹  | S. Mehdy Hashemy Shahdany² 

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: dorsa.rahparast@ut.ac.ir
2. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: mehdi.hashemy@ut.ac.ir

Article Info	ABSTRACT	
Article type: Research Article	<p>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.</p>	
Article history: Received 24 March 2024 Received in revised form 14 May 2024 Accepted 10 June 2024 Published online ?? ?? 2024		
Keywords: Modernization, Irrigation Management System, Irrigation Network, Decentralized Controller, Hydraulic Flow Simulation		
Cite this article: Author, A. A., Author, B. B., & Author, C. C. (year). Article title. <i>Journal Title</i> , 56 (1), 1-20. DOI: http://doi.org/000000000000000000		
		© The Author(s). Publisher: University of Tehran Press. DOI: http://doi.org/00000000000000000000

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: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۰۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۳/۲۲

این پژوهش با هدف کلی معرفی خودکارسازی سامانه‌های بهره‌برداری آب سطحی، به عنوان 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 به منظور جمع‌آوری اطلاعات موجود و اندازه‌گیری‌های میدانی در بخش آب سطحی (سامانه کانال‌های روباز و سازه‌های هیدرولیکی وابسته آن) انجام شد. در ادامه شبیه‌سازی فرآیند 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 بهره‌گیری از توسعه سامانه‌های کنترل خودکار غیرمتمرکز PI به منظور بررسی تاثیر مدرن‌سازی سامانه توزیع آب سطحی نیز انجام شد. نتایج شبیه‌سازی، میزان بهبود شاخص کفایت توزیع آب سطحی در آبیگرهای بالادست، میان‌دست و پایین‌دست شبکه برای سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز PI در محدوده ۱۰-۷٪، ۵-۱۵٪ و ۴-۱۵٪ در سناریوهای مختلف بهره‌برداری کم‌آبی را نشان داد. به‌طور مشابه، میزان بهبود شاخص پایداری توزیع آب سطحی به ترتیب ۲۵-۴٪، ۴۱-۹٪ و ۴۲-۹٪ بدست آمد. میزان بهبود شاخص عدالت توزیع آب سطحی پس از خودکارسازی در محدوده ۱۳-۳٪ در سناریوهای مختلف حاصل شد. نتایج حاکی از آن است که تحت سناریوی نرمال، با بکارگیری سامانه کنترل خودکار PI آبیگرهای بالادستی و میان‌دستی در تمام آبیگرها توزیع آب در وضعیت مطلوب قرار گرفت. نتایج تحلیل زمانی و مکانی صورت گرفته در این تحقیق حاکی از الگوی واضحی از ناکارآمدی سامانه بهره‌برداری در توزیع آب سطحی تحت سناریوهای کم‌آبی ارایه کرده و نقشه‌های پهنه‌بندی مناطق آسیب‌پذیر شبکه را مشخص نمودند. لازم به ذکر است که متدولوژی توسعه داده شده در این پژوهش قابلیت پیاده‌سازی در حدود ۲ میلیون هکتار از اراضی فاریاب کشور را دارد که تحت پوشش ۱۲۰ شبکه آبیاری و زهکشی قرار گرفته‌اند.

کلیدواژه‌ها:

مدرن‌سازی، سامانه بهره‌برداری، شبکه آبیاری، کنترل‌گر غیرمتمرکز، شبیه‌سازی هیدرولیک جریان

استناد: نام خانوادگی، نام؛ نام خانوادگی، نام؛ و نام خانوادگی، نام (سال). عنوان مقاله، عنوان مجله، ۲ (۴)، ۲۰-۱.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.341492.669243>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

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 (تامین) و (انتقال و توزیع) آب تشکیل شده است. سامانه کانال‌های روباز اصلی و فرعی و سازه‌های هیدرولیکی 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 پایین دست شبکه‌های آبیاری بوده است. مفهوم سامانه/روش بهره‌برداری بر این اساس مشخص خواهد شد که اپراتورهای تیم بهره‌برداری چگونه فرآیند باز و بسته نمودن 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 آبیاری کانال پایین دست یا بر پایه تامین آب از بالادست به کار برده می‌شود. با تشدید دوره‌های کم آبی در دو دهه اخیر و فشار مضاعف بر منابع آب سطحی، عملاً کارکرد سامانه/روشهای بهره‌برداری موجود از وضعیت دور از انتظار به حالت نامطلوب و غیرقابل اعتماد تغییر یافته (Orojloo و همکاران، ۲۰۱۸؛ Bozorgi و همکاران، ۲۰۲۱) و الگوهای مشخصی از عدم اطمینان کشاورزان به این سامانه‌ها به وضوح در اکثر بیش از ۱۲۰ شبکه آبیاری مدرن کشور، مساحتی در حدود ۲ 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، بر اساس تعاریف ارائه شده در نشریه‌های ضوابط طراحی و مدیریت شبکه‌های آبیاری (MOE, 1994) عمدتاً 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 درپچه‌های خودکار هیدرولیکی مدول آمیل (و به صورت بسیار محدود مدول‌های آویس) و تنظیمات دستی روزانه آبگیرها توسط اپراتور و (۳) تنظیم سطح آب توسط سرریزهای لبه طولانی (مانند سرریزهای نوک‌اردکی) به عنوان 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 قابل توجه 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 بالتبع آن اضافه برداشت آب زیرزمینی اشاره نمود. به‌عنوان مثال و بر اساس اطلاعات جمع‌آوری محققین 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-سگری به ترتیب تعداد ۴۹۴۱ (در حدود ۲۳٪) و ۸۸۹۱ (در حدود ۴۱٪) 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٪) 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 به‌سازی در شبکه‌های آبیاری توصیه شده است. (Monem و Ostovari, ۲۰۲۲؛ Khaeez و Shahdany, ۲۰۲۱). این تجربیات به‌صورت کلی با هدف شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان در سامانه کانال‌های اصلی و ارزیابی عملکرد فرآیند توزیع و تحویل آب سطحی بین آب‌بران واقع در امتداد شبکه کانال‌ها، صورت گرفته است. نتایج کلی آن‌ها حاکی از میزان قابل توجه تلفات آب در فرآیند 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 بر اساس اندازه‌گیری میدانی در کلان‌تحویل‌ها و مقایسه آن با مقدار نیاز واقعی محصولات تحت کشت آن شبکه، در حدود ۳۰ درصد میزان آب تامین شده در محل بند انحرافی (Fipps و همکاران، ۲۰۰۰)، در دشت Hilla-Kifil در بخش جنوبی کشور عراق در حدود ۳۷-۱۹ درصد و بر اساس 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، ۲۰۱۵)، در دشت Panchnadi کشور هندوستان در حدود ۳۶-۲۵ درصد (Jadhav و همکاران، ۲۰۱۴)، در دشت‌های مرکزی کشور ترکیه حدود ۲۸-۴۵ درصد آب سطحی تامین شده (Akkuzu و همکاران، ۲۰۰۰)، در دشت کشاورزی رود دشت واقع در منطقه خشک و نیمه خشک ایران در حدود ۵۰ درصد و با استفاده از شبیه‌سازی جریان در کانال‌های اصلی و فرعی با استفاده از مدل توسعه داده شده در نرم افزار ICSS و تطابق نتایج شبیه‌سازی با مقادیر ثبت شده توسط میراب شبکه، در دشت‌های مرکزی کشور اسپانیا حدود ۴۵ درصد بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی (Serra و همکاران، ۲۰۱۶)، و در دشت شیراز در ایران (شبکه آبیاری درودزن) بر اساس محاسبه بازده تولید در حدود ۱۹ درصد (Shahrokhnia و Ghiasi، ۲۰۱۶)، گزارش داده‌اند. مطالعات اشاره شده حاکی از تلفات قابل توجه در فرآیند بهره‌برداری در سامانه‌های توزیع آب سطحی (شبکه کانال‌های روباز) می‌باشد که لزوم ارتقا این سامانه‌ها به سامانه‌های کنترل خودکار را نشان می‌دهد. خودکارسازی به عملیات یا روش‌هایی اطلاق می‌شود که بوسیله آنها سامانه‌های الکترونیکی جای انسان را در مشاهده، تصمیم‌گیری و اجرا می‌گیرند. خودکار سازی کانال عبارت از به کارگیری 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.

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. کاغذچی و همکاران ۲۰۲۱، با هدف ارزیابی عملکرد 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 یک مدل هوشمند توزیع آب کشاورزی با استفاده از شبکه‌های ترکیبی Bayesian نموده‌اند (Kaghazchi و همکاران، ۲۰۲۱). Ghumman و همکاران (۲۰۱۸)، در تحقیقی 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 هدر رفت آب پیشنهاد شد و مورد ارزیابی قرار گرفت. Dejen (۲۰۱۵)، با هدف بهبود عملکرد هیدرولیکی به واسطه‌ی بهره‌برداری موثر، جریان را در کانال اصلی شبکه آبیاری Mahatra را در کشور اتیوپی با استفاده از مدل DUFLOW شبیه‌سازی نموده و با به کارگیری شاخص‌های ارزیابی عملکرد سامانه بهره‌برداری، روش‌های بهبود عملکرد را مورد ارزیابی قرار داد. Soler و همکاران در سال ۲۰۱۵، مدل HEC-RAS را برای شبیه‌سازی جریان غیرمماندگار در کانالی واقع در اسپانیا انتخاب کردند و برای کاهش اختلالات به وجود آمده در دو جهت پایین‌دست و بالادست در اثر تغییرات دبی پمپاژ ورودی، از روش کنترل خودکار، استفاده نمودند. در مطالعه‌ی 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 و Maestre، ۲۰۲۳). لازم به توضیح است که مشکل جدی در شرایط غیرمتعارف بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری به وجود می‌آید و اصلی‌ترین عامل ایجاد شرایط مذکور، ظهور دوره‌های کم‌آبی منتج از تغییرات اقلیمی است که سامانه‌های تامین آب سطحی را بسیار آسیب‌پذیر نموده و ریسک شکست سامانه بهره‌برداری را تحت تاثیر خطرات مختلف به طرز قابل توجهی افزایش داده است (Orojloo و همکاران، ۲۰۱۸؛ Bozorgi و همکاران، ۲۰۲۱).

لذا خلاصه بیان مساله که به عبارتی فرضیه این تحقیق 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 تامین شده در محل بند انحرافی کمتر از کل تقاضای برآورد شده 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، به عنوان یک روش کارآمد در کاهش تلفات ناشی از فرآیند انتقال، توزیع و تحویل آب آبیاری و بالتبع آن بهبود کارایی عملکرد این سامانه‌ها در توزیع کافی، قابل اعتماد و عادلانه آب سطحی بین حقبه‌داران واقع در محدوده یک شبکه آبیاری می‌باشد. در این ارتباط به بررسی فنی کارایی سامانه کنترل خودکار هوشمند غیرمتمرکز با بکارگیری روش کنترل کلاسیک تناسبی-انتگرالی به عنوان یک راهکار میان مدت در مدرن سازی برای شبکه‌های آبیاری ایران پرداخته شود. در این ارتباط نوآوری تحقیق عبارت از ارزیابی عملکرد فرآیند توزیع آب سطحی در روش بهره‌برداری خودکار غیرمتمرکز در شبکه آبیاری نکوآباد اصفهان، با استفاده از شاخص‌های ارزیابی عملکرد (تحلیل شاخص محور) به همراه تحلیل مکانی توزیع آب سطحی برپایه کفایت، پایداری و عدالت توزیع آب سطحی در محدوده شبکه آبیاری به منظور استخراج نقشه‌های توزیع آب سطحی در محدوده شبکه آبیاری می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- روش انجام تحقیق

مراحل طی شده 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-تاخیری^۱ (ID) در محیط MATLAB و در ادامه واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌های توسعه داده شده
- گام دوم: تحلیل وضعیت تامین 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 بر اساس سناریوهای بهره‌برداری منتخب و ارزیابی عملکرد سامانه بهره‌برداری دستی بر اساس شاخص‌های ارزیابی عملکرد پایداری توزیع آب سطحی
- گام چهارم: توسعه مدل سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز با بهره‌گیری 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 مشخص شده 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. بر اساس اطلاعات و آمار جمع‌آوری شده در مرحله ابتدایی انجام این تحقیق 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 ۳۲:۲۳ تا ۳۱:۴۶ شمالی و طول جغرافیایی ۵۱:۲۱ تا ۵۱:۴۲ 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 تامین‌کننده آب این شبکه آبیاری، آب رها شده از

^۱ - Integrator-Delay

سد زاینده رود می‌باشد. در طرفین بند انحرافی نکوآباد، در منشا تامین آب این شبکه آبیاری، دو رشته کانال اصلی چپ و راست به منظور برداشت آب جهت تحت پوشش قرار دادن اراضی احداث شده است. کنترل و تنظیم سطح آب به شیوه کنترل بالادست، با به کارگیری 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، به ترتیب ۱۳ و ۱۴۹ سازه آبگیر انجام می‌گیرد که نحوه تنظیمات آن به صورت دستی و توسط اپراتور انجام می‌شود.

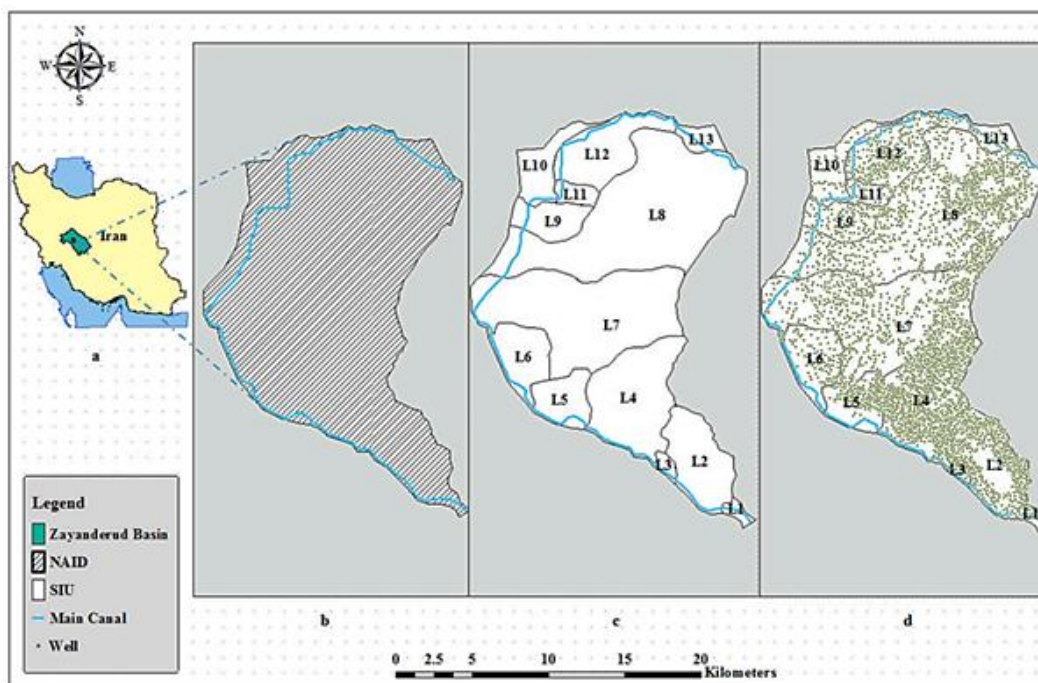


Figure (1). The study area of this research includes thirteen second-grade agricultural units, the main canal, and licensed extraction wells within the NekooAbad District.

شکل (۱). محدوده مورد مطالعه این پژوهش شامل سیزده واحد زراعی درجه دو، کانال اصلی و چاه‌های بهره‌برداری مجوز دار در سطح شبکه نکوآباد

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

به منظور 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 پایه‌ی روش روندیابی جریان در هر بازه سامانه انتقال، در حد فاصل دو سازه تنظیم سطح آب، است و بکارگیری 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 و همکاران، ۲۰۱۰).

در مدل مذکور، هر بازه کانال اصلی سامانه توزیع آب به دو بخش، شامل i- بخش جریان یکنواخت و ii- بخش منحنی برگشت آب می‌باشد. هر بخش یک مشخصه اصلی دارد که از مجموع این دو، مدل انتگرالی-تأخیری به دست می‌آید. این دو مشخصه اصلی در هر بازه کانال عبارتند از زمان تأخیر (T) و سطح ذخیره (A_s). در بخش اول (جریان یکنواخت) فرض می‌شود که موج جریان ورودی

جریان فقط به سمت پایین دست 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 و همکاران، ۲۰۱۱).

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

که در آن q_{in} دبی ورودی به بخش یکنواخت جریان (m^3/s)، q_{canal} دبی ورودی به بخش ذخیره (m^3/s)، t زمان (sec) و τ زمان تأخیر (sec) 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) بر اساس دبی‌های ورودی و خروجی از بازه کانال به‌صورت رابطه (۲) ، در حوزه زمان و حوزه فرکانس، قابل بیان است (Isapoor و همکاران، ۲۰۱۱):

$$A_s \cdot \frac{dh(t)}{dt} = q_{\text{canal}}(t) - q_{\text{out}}(t) \quad (2)$$

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

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 ارائه شده در بخش‌های قبلی به‌دست می‌آید.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل شبیه‌ساز توسعه داده شده ID بر اساس اطلاعات اندازه‌گیری شده‌ای 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، ۱۳۹۲-۱۳۹۳ 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، فرآیند صحت‌سنجی اجرا گردید و برای مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهده‌شده در هر 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 و همکاران، ۲۰۲۲).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n X_i - \sum_{i=1}^n Y_i}{\sum_{i=1}^n X_i} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - X_i| \quad (5)$$

که در این روابط X_i و Y_i به ترتیب برابر مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده می‌باشند.

با توجه به شرایط سازه‌ای کانال اصلی سامانه توزیع آب محدوده مورد مطالعه، فرم مدل ماتریسی فضای حالت، مطابق رابطه (۳)، با ابعاد مختلف ماتریس، به تفکیک کانال‌های آبیاری - دو کانال اصلی و ۱۳ کانال 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:

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

$$\begin{aligned} u^*(k) &\geq href_{\min} \\ u^*(k) &\leq href_{\max} \end{aligned} \quad (6)$$

که در این رابطه $Q_{hg}(k)$ ، $Q_{hg}(k-1)$ ، $Q_{hg}(k-2)$ و $Q_{hg}(k-3)$ به ترتیب دی‌های کنترلی (m^3/s) رها شده از سازه تنظیم سراب کانال در گام‌های زمانی $k-3$ تا k (sec) می‌باشد. $e_1(k)$ خطای محاسبه شده (رقوم سطح آب اندازه‌گیری شده از رقوم هدف) برای بازه اول کانال (m) و $e_1^*(k)$ متغیر حالت اضافه شده 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 به وجود آورد. در واقع متغیر $u^*(k)$ تفسیر فیزیکی ندارد و صرفاً 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- سامانه کنترل خودکار غیر متمرکز تناسبی-انترگالی^۲

کنترلگر تناسبی-انترگالی براساس روش کنترل پس‌خور طراحی می‌شود که در آن متغیر کنترل شونده (خطای رقوم سطح آب) در بالادست سازه تنظیم اندازه‌گیری می‌شود. در این روش، میزان انحراف رقوم سطح آب از رقوم هدف به کنترلگر 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 دی عبوری از زیر سازه‌های تنظیم به صورت رابطه ۷ قابل محاسبه است:

$$\Delta Q(k) = K_i \cdot e(k) + K_p \cdot [e(k) - e(k-1)] \quad (7)$$

در رابطه یادشده $\Delta Q(k)$ مقدار تغییرات دی عبوری از سازه‌های تنظیم بر حسب مترمکعب بر ثانیه در گام زمانی جاری، e برابر مقدار انحرافات تراز سطح آب از رقوم هدف، اندیس‌های k و $k-1$ به ترتیب نشان‌دهنده گام زمانی جاری و گام زمانی قبلی، K_p برابر ضریب تناسبی و K_i برابر ضریب انترگالی است.

۲-۵- شاخص ارزیابی عملکرد کفایت توزیع آب

شاخص کفایت توزیع آب سطحی با توجه نسبت آب تحویلی (شبیه‌سازی شده توسط مدل شبیه‌ساز ID) به آب مورد نیاز الگوی کشت مصوب (حقیقتاً تعیین شده برای هر آبیگر) و بر اساس رابطه ذیل محاسبه می‌گردد (Molden and Gates, 1990):

$$\begin{aligned} P_A &= \frac{1}{T} \sum_T \left[\frac{1}{R} \sum_R (P_a) \right] \\ P_a &= \frac{Q_d}{Q_r} \text{ if } Q_d < Q_r \quad \text{Otherwise } P_a = 1 \end{aligned} \quad (8)$$

که در آن T = فواصل زمانی در نظر گرفته شده برای ارزیابی عملکرد (sec)؛ R = تعداد کل آبیگری‌های اندازه‌گیری شده؛ QD = دبی واقعی تحویلی (m/s)؛ QR = دبی مورد نیاز (m/s)؛ $\sum \frac{1}{T}$ متوسط زمانی و $\sum \frac{1}{R}$ متوسط مکانی؛ و PA = شاخص کفایت است. دامنه 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. مولدن و گیتز (۱۹۹۰) ضریب تغییرات زمانی معیار کفایت را در قالب رابطه ۹ به عنوان پایداری در تحویل آب تعریف کردند (Molden and Gates, 1990):

$$PD = \frac{1}{R} \sum_R CV_T \left(\frac{QD}{QR} \right) \quad (9)$$

که در آن: CVR ضریب تغییرات زمانی در هر آبیگر؛ PD = شاخص پایداری برای کل سیستم است. شاخص عدالت نشان دهنده عدالت یکنواختی مکانی نسبت مقدار آب تحویل داده شده به آب مورد نیاز یا آب برنامه ریزی شده تعریف می‌شود که به صورت رابطه (۱۰) تعریف نموده‌اند (Molden and Gates, 1990):

$$P_E = \frac{1}{T} \sum_T [CV_R \left(\frac{Q_d}{Q_r} \right)] \quad (10)$$

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 ارایه شده توسط (Molden and Gates, 1990) ارزیابی شده است. استاندارد مذکور در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. دسته‌بندی شاخص‌های ارزیابی عملکرد توزیع آب سطحی (Molden & Gates, 1990)

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

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

به منظور تعیین سناریوهای بهره‌برداری در تحقیق حاضر، تحلیل زمانی داده‌های تاریخی دبی تحویل داده شده در محل بند انحرافی نکوآباد 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 سال گذشته بهره‌برداری شبکه آبیاری نکوآباد به شرح ذیل ارایه 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) = ۱.۸-۲۶ مترمکعب بر ثانیه
- متوسط دبی سالانه (به استثنای دی و بهمن) = ۱.۹ مترمکعب بر ثانیه
- متوسط احتمال وقوع در دوره آماری: ۲۰.۶٪

✚ کلاس کم آبی ملایم (سناریوی بهره‌برداری کم آبی کمتر از ۱۰٪):

- دبی تحویلی در محل بند انحرافی در حدود ۹۰ - ۱۰۰٪ مجموع تقاضای برآورد شده
- تغییرات دبی در ۱۲ ماه سال (بجز دی و بهمن) = ۲۴.۵ - ۱.۶ مترمکعب بر ثانیه
- متوسط دبی سالانه (به استثنای دی و بهمن) = ۱۰.۷ مترمکعب بر ثانیه
- متوسط احتمال وقوع در دوره آماری: ۱۲.۵٪

✚ کلاس کم آبی (سناریوی بهره‌برداری کم آبی ۱۰ تا ۱۵٪):

- دبی تحویلی در محل بند انحرافی در حدود ۸۵ - ۹۰٪ مجموع تقاضای برآورد شده
- تغییرات دبی در ۱۲ ماه سال (بجز دی و بهمن) = ۲۲.۹ - ۱.۴ مترمکعب بر ثانیه
- متوسط دبی سالانه (به استثنای دی و بهمن) = ۹.۵ مترمکعب بر ثانیه
- متوسط احتمال وقوع در دوره آماری: ۱۸.۷۵٪

✚ کلاس کم آبی شدید (سناریوی بهره‌برداری کم آبی ۱۵ تا ۲۰٪):

- دبی تحویلی در محل بند انحرافی در حدود ۸۰ - ۸۵٪ مجموع تقاضای برآورد شده
- تغییرات دبی در ۱۲ ماه سال (بجز دی و بهمن) = ۲۱.۱ - ۱.۳ مترمکعب بر ثانیه
- متوسط دبی سالانه (به استثنای دی و بهمن) = ۸.۳ مترمکعب بر ثانیه
- متوسط احتمال وقوع در دوره آماری: ۱۷.۵٪

✚ کلاس کم آبی حاد: (سه سناریوی بهره‌برداری کم آبی ۲۰ تا ۳۰٪ - ۳۰ تا ۴۰٪ - > ۴۰٪):

- دبی تحویلی در محل بند انحرافی کمتر از ۸۰٪ مجموع تقاضای برآورد شده
- تغییرات دبی در ۱۲ ماه سال (بجز دی و بهمن) = ۱۹.۷ - ۱.۲ مترمکعب بر ثانیه
- متوسط دبی سالانه (به استثنای دی و بهمن) = ۷.۱ مترمکعب بر ثانیه
- متوسط احتمال وقوع در دوره آماری: ۳۰.۶٪

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 کم آبی، کم آبی شدید و کم آبی حاد در حد فاصل سال‌های ۱۳۸۳-۱۴۰۰ قرار گرفته است. لذا به منظور بررسی دقیق تر شرایط بهره‌برداری شبکه مورد مطالعه در وضعیت کم آبی، کلاس کم آبی حاد به سه سناریوی بهره‌برداری کم آبی مستقل ۲۰ تا ۳۰٪ - ۳۰ تا ۴۰٪ و > ۴۰٪ تقسیم شد. بنابراین در این مقاله ۷ سناریوی بهره‌برداری (شامل یک سناریو نرمال و شش سناریوی کم آبی) در نظر گرفته شد و ادامه مطالعات بر این اساس انجام شد.

۳-۲- نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل هیدرودینامیکی

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، واسنجی و صحت‌سنجی مدل شبیه‌ساز توسعه داده شده ID بر اساس اطلاعات اندازه‌گیری شده‌ای 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 به عنوان متغیرهای قابل تغییر جهت انطباق مقادیر شبیه‌سازی با مقادیر مشاهده‌ای استفاده شدند. بعد از واسنجی مدل و تنظیم پارامترهای آن، فرآیند صحت‌سنجی اجرا گردید. نتایج این فرآیند به این صورت 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، به ترتیب برابر ۰.۰۰۸- و ۰.۱۶- می‌باشند، 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 دوره واسنجی برابر ۰.۰۰۷ و برای دوره صحت‌سنجی ۰.۰۰۸ به دست آمدند. مقادیر مناسب این شاخص نیز دقت مدل را مورد تایید قرار می‌دهد.

۳-۳- ارزیابی فرآیند توزیع آب سطحی شبیه‌سازی شده توسط سامانه کنترل خودکار در شبکه آبیاری نکوآباد

به منظور 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 دست داشتن تقاضای هر آبیگیر (مقدار حقابه مشخص) و متوسط دبی تحویلی روزانه به آن آبیگیر (که در این پژوهش از مدل شبیه‌ساز بهره‌برداری بدست آمده)، میانگین شاخص‌های ارزیابی عملکرد توزیع آب، به تفکیک هر آبیگیر و تحت هر سناریوی بهره‌برداری، محاسبه شد. لازم به توضیح مجدد است که دبی روزانه مورد نیاز آبیگیر در این پژوهش بر اساس 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 آبیگیر هیدروگراف تحویل آب روزانه، با بازه‌های زمانی دلخواه که در این پژوهش یک ساعته در نظر گرفته شد، به عنوان خروجی در هر روز شبیه‌سازی بهره‌برداری حاصل شد. شاخص‌های ارزیابی عملکرد کفایت، پایداری و عدالت توزیع آب، که ماهیتاً تناسب نحوه کافی بودن، پایداری و عادلانه بودن دبی تحویلی در طول شبیه‌سازی را با دبی درخواستی (حقابه مشخص) بررسی می‌کند، برای هر گام زمانی محاسبه و میانگین کلی مقادیر محاسبه شده به تفکیک آبیگیرهای واقع در کانال اصلی و کانال‌های درجه دو محاسبه و در ادامه ارایه شده است. در گام بعدی، نتایج تحلیل مکانی شاخص پایداری در سطح شبکه- که در محیط GIS انجام شده- در قالب نقشه‌های پهنه‌بندی ارایه شد.

در این راستا ارزیابی میزان بهبود عملکرد بدست آمده در سامانه انتقال و توزیع آب کشاورزی در شبکه مذکور از دیدگاه فنی با تاکید بر چهار مولفه کفایت، راندمان، پایداری و عدالت توزیع آب سطحی بین حقابه‌داران شبکه نکوآباد انجام شد. در ادامه تاثیر بکارگیری سامانه کنترل خودکار بهره‌برداری غیرمتمرکز توسعه داده شده با بهره‌گیری از کنترلگرهای تناسبی-انتگرالی (PI) مورد بررسی قرار گرفت. لازم به توضیح است که سامانه بهره‌برداری خودکار بر روی سازه‌های تنظیم سطح آب واقع بر روی کانال‌های اصلی توسعه داده شده و کماکان بهره‌برداری در کانال‌های آبیاری درجه دو به روال بهره‌برداری دستی در وضعیت موجود ادامه دارد. دلیل محدود سازی سامانه کنترل خودکار به کانال‌های اصلی عبارت است از: (۱) جنبه کاربردی بودن پژوهش حاضر است که در نظر دارد میزان بهبود در سامانه توزیع آب سطحی را به صورت واقعی و تحت گزینه‌های مختلف مدرن‌سازی که قابلیت پیاده‌سازی در شبکه‌های آبیاری ایران را دارا باشد، انجام دهد. به این ترتیب که امکان مدرن‌سازی همزمان کانال‌های اصلی و فرعی به دلیل محدودیت‌های سرمایه‌گذاری وجود ندارد و (۲) نشان دادن ظرفیت واقعی سامانه کنترل خودکار، با تاکید بر پرهیز از بزرگ‌نمایی عملکرد این سامانه‌ها در بهبود فرآیند توزیع آب سطحی در شبکه‌های آبیاری کشور، به‌نحویکه پس از مدرن‌سازی سامانه بهره‌برداری آب سطحی فرآیند توزیع آب بین آب‌بران به درستی قابل رصد باشد.

۳-۳-۱- ارزیابی کفایت توزیع آب سطحی

جدول ۲ مقدار میانگین محدوده تغییرات شاخص ارزیابی عملکرد محاسبه شده در طول دوره شبیه‌سازی تحت سناریوهای هفتگانه بهره‌برداری (سناریوی نرمال و شش سناریوی کم‌آبی) را به تفکیک هر کدام از آبیگیرهای اصلی ۱۳ گانه واقع در کانال اصلی شبکه ارایه نموده است. همچنین نحوه پراکندگی تغییرات میانگین شاخص ارزیابی در مقایسه با مقدار مشابه در وضعیت بهره‌برداری دستی موجود و به ترتیب آبیگیر بالادست تا انتهایی ترین آبیگیر در پایین دست کانال اصلی در شکل ۲ به تصویر کشیده شده است.

جدول (۲). میانگین تغییرات مقادیر شاخص کفایت تحویل آب به آبیگرهای واقع در کانال اصلی تحت سناریوهای نرمال و کم‌آبی بهره‌برداری در روش کنترل خودکار PI

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.

Off-takes (FID)	(1) Adequacy _ PI_Sch: Normal	(2) Adequacy _ PI_Sch: Shortage (Less 10%)	(3) Adequacy _ PI_Sch: Shortage (10 - 15 %)	(4) Adequacy _ PI_Sch: Shortage (15 - 20 %)	(5) Adequacy _ PI_Sch: Shortage (20 - 30 %)	(6) Adequacy _ PI_Sch: Shortage (30 - 40 %)	(7) 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

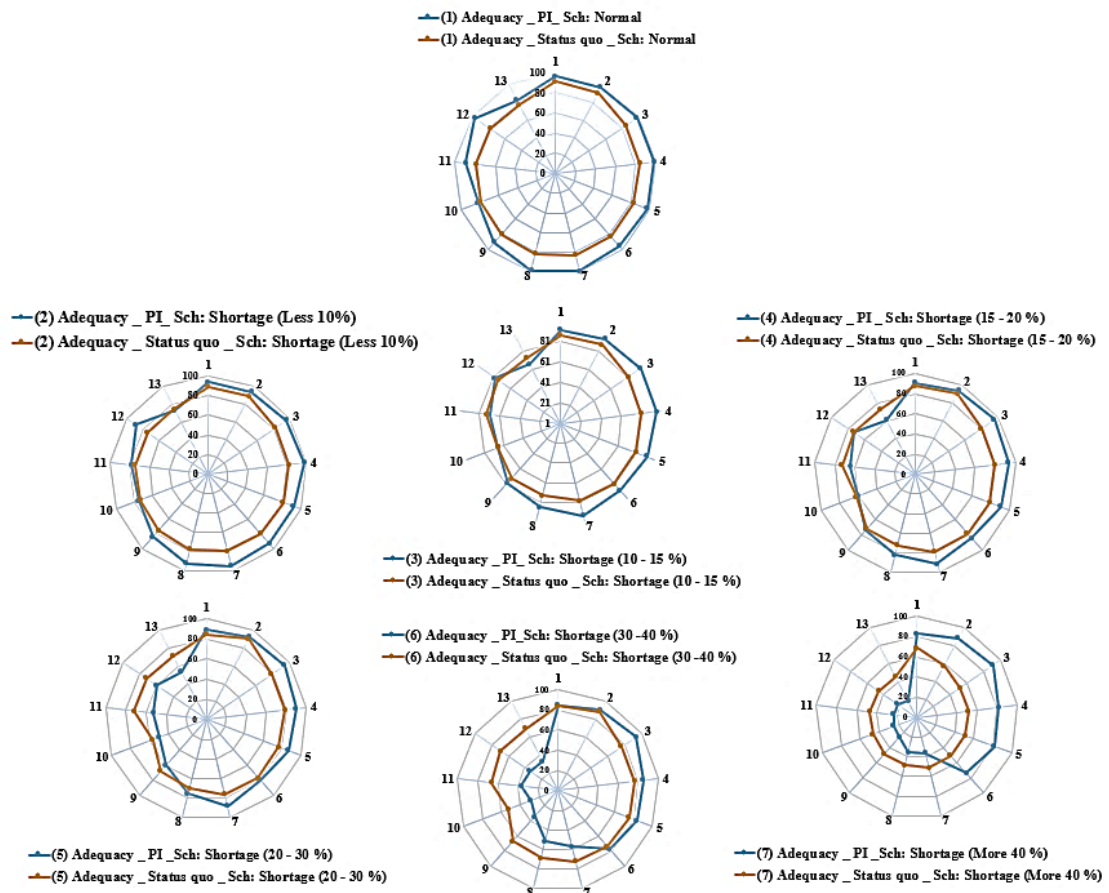


Figure (2). Average adequacy index for water delivery to intakes from upstream to downstream of the main irrigation canal in the NekooAbad District using the PI automatic control method

شکل (۲). میانگین شاخص کفایت تحویل آب به آبیگرهای بالادست تا پائین‌دست کانال اصلی آبیاری شبکه نکوآباد در روش کنترل خودکار PI

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

- میانگین کیفیت تحویل و توزیع آب در سیزده آبگیر درجه دو واقع در کانال اصلی در سناریوی نرمال
 - تحویل و توزیع خوب: ده آبگیر (بهبود قابل ملاحظه 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 کیفیت تحویل و توزیع آب در سیزده آبگیر درجه دو واقع در کانال اصلی در سناریوی کم‌آبی (کمتر از ۱۰٪)
 - تحویل و توزیع خوب: هشت آبگیر (بهبود قابل ملاحظه 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 کیفیت تحویل و توزیع آب در سیزده آبگیر درجه دو واقع در کانال اصلی در سناریوی کم‌آبی (۱۰٪ تا ۱۵٪)
 - تحویل و توزیع خوب: شش آبگیر (بهبود قابل ملاحظه 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 کیفیت تحویل و توزیع آب در سیزده آبگیر درجه دو واقع در کانال اصلی در سناریوی کم‌آبی (۱۵٪ تا ۲۰٪)
 - تحویل و توزیع خوب: شش آبگیر (بهبود قابل ملاحظه 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 کیفیت تحویل و توزیع آب در سیزده آبگیر درجه دو واقع در کانال اصلی در سناریوی کم‌آبی (۲۰٪ تا ۳۰٪)
 - 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 قابل ملاحظه در مقایسه با یازده آبگیر در بهره‌برداری موجود)
- میانگین کیفیت تحویل و توزیع آب در سیزده آبگیر درجه دو واقع در کانال اصلی در سناریوی کم‌آبی (۳۰٪ تا ۴۰٪)
 - 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 کیفیت تحویل و توزیع آب در سیزده آبگیر درجه دو واقع در کانال اصلی در سناریوی کم‌آبی (بیشتر از ۴۰٪)
 - 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 کیفیت در شکل ۳ ارائه شده است. الگوی تغییرات مقدار متوسط شاخص ارزیابی عملکرد کیفیت توزیع آب سطحی در هر کانال فرعی درجه دو مشابهت رفتاری قابل توجهی با الگوی تغییرات بدست آمده در کانال اصلی آبیاری نشان می‌دهد. به‌نحویکه رفتار تکرار شونده 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 بالادستی بودن 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 تاثیر غیرقابل انکار ارتقا شیوه بهره‌برداری با استفاده از سامانه کنترل خودکار PI می‌باشد.

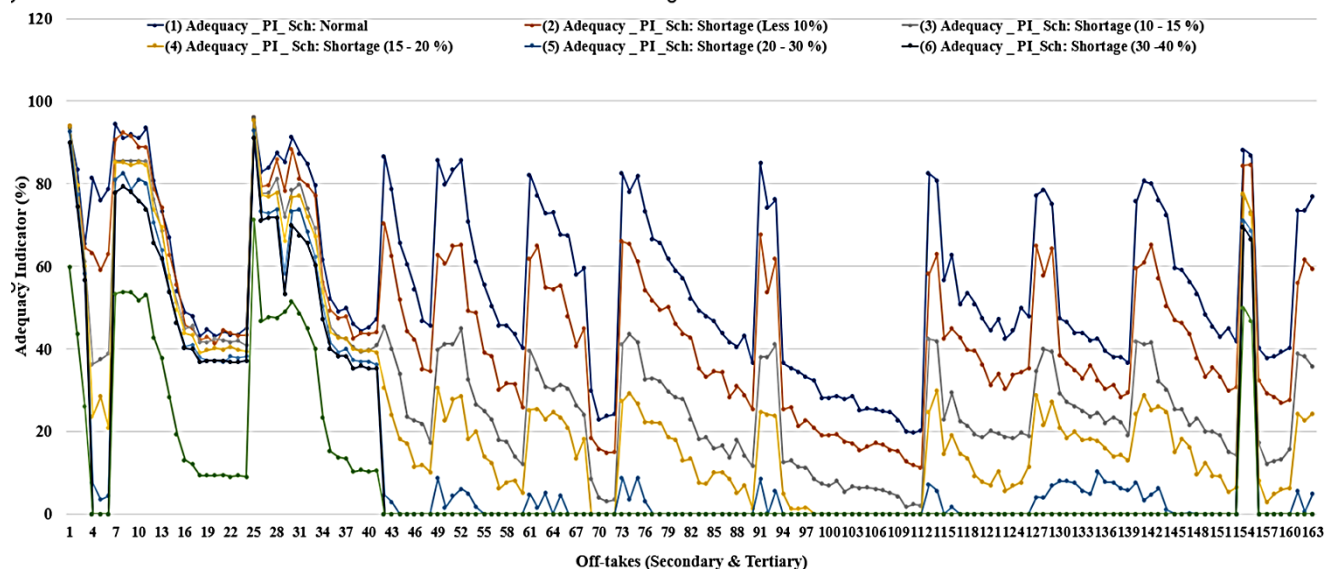


Figure (3). Average adequacy index for water delivery to intakes located in thirteen secondary canals of the NekooAbad district under seven operation scenarios using the PI automatic control method.

شکل (۳). میانگین شاخص کفایت تحویل آب به آبگیرهای واقع در سیزده کانال درجه دو شبکه نکوآباد تحت سناریوهای بهره‌برداری هفتگانه در روش کنترل خودکار PI

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 هر کدام 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 بر اساس 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 مورد مطالعه می‌باشد. مقدار شاخص کفایت نشان داده شده در این شکل حاکی از این می‌باشد که به طور 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 غیرقابل قبول می‌شود.

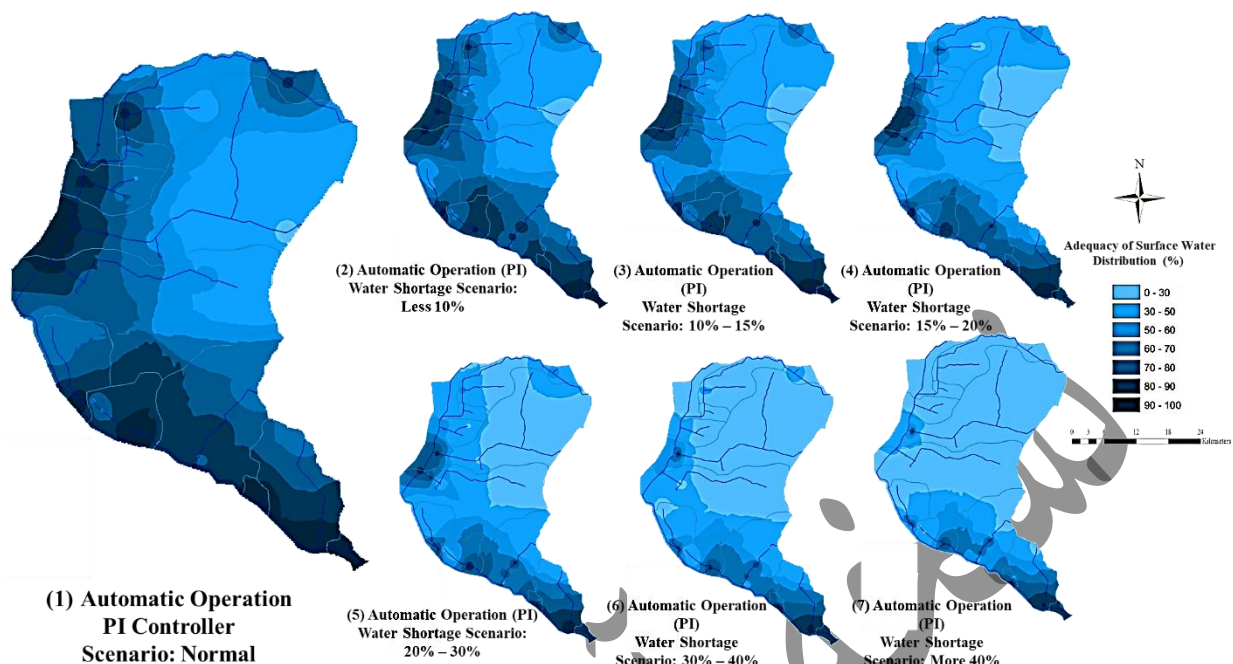


Figure (4). Spatial distribution of surface water distribution adequacy (adequacy contour maps) in the NekooAbad irrigation District under various operation scenarios from normal (Scenario 1) to severe drought (Scenario 7).

شکل (۴). پراکنندگی مکانی کفایت توزیع آب سطحی (نقشه‌های هم کفایت) در شبکه آبیاری نکوآباد تحت سناریوهای مختلف بهره‌برداری از نرمال (سناریوی ۱) تا کم‌آبی حاد (سناری هفت)

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

جدول (۳) محدوده تغییرات شاخص ارزیابی عملکرد پایداری توزیع آب محاسبه شده، در طول دوره شبیه‌سازی تحت سناریوهای هفتگانه بهره‌برداری (سناریوی نرمال و شش سناریوی کم‌آبی) را به تفکیک هر کدام از آبیگرهای اصلی ۱۳ گانه واقع در کانال اصلی شبکه ارایه نموده است. همچنین نحوه پراکنندگی تغییرات میانگین شاخص ارزیابی از آبیگر بالادست تا انتهای ترین آبیگر در پایین دست کانال اصلی در شکل (۵) به تصویر کشیده شده است.

جدول (۳). میانگین تغییرات مقادیر شاخص پایداری تحویل آب به آبیگرهای واقع در کانال اصلی تحت سناریوهای نرمال و کم‌آبی بهره‌برداری در روش کنترل خودکار PI

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.

Off-takes (FID)	(15) Dependability_PI_Sch: Normal	(16) Dependability_PI_Sch: Shortage (Less 10%)	(17) Dependability_PI_Sch: Shortage (10 - 15 %)	(18) Dependability_PI_Sch: Shortage (15 - 20 %)	(19) Dependability_PI_Sch: Shortage (20 - 30 %)	(20) Dependability_PI_Sch: Shortage (30 - 40 %)	(21) 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

Off-takes (FID)	(15) Dependability_PI_Sch: Normal	(16) Dependability_PI_Sch: Shortage (Less 10%)	(17) Dependability_PI_Sch: Shortage (10 - 15 %)	(18) Dependability_PI_Sch: Shortage (15 - 20 %)	(19) Dependability_PI_Sch: Shortage (20 - 30 %)	(20) Dependability_PI_Sch: Shortage (30 - 40 %)	(21) Dependability_PI_Sch: Shortage (More 40 %)
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

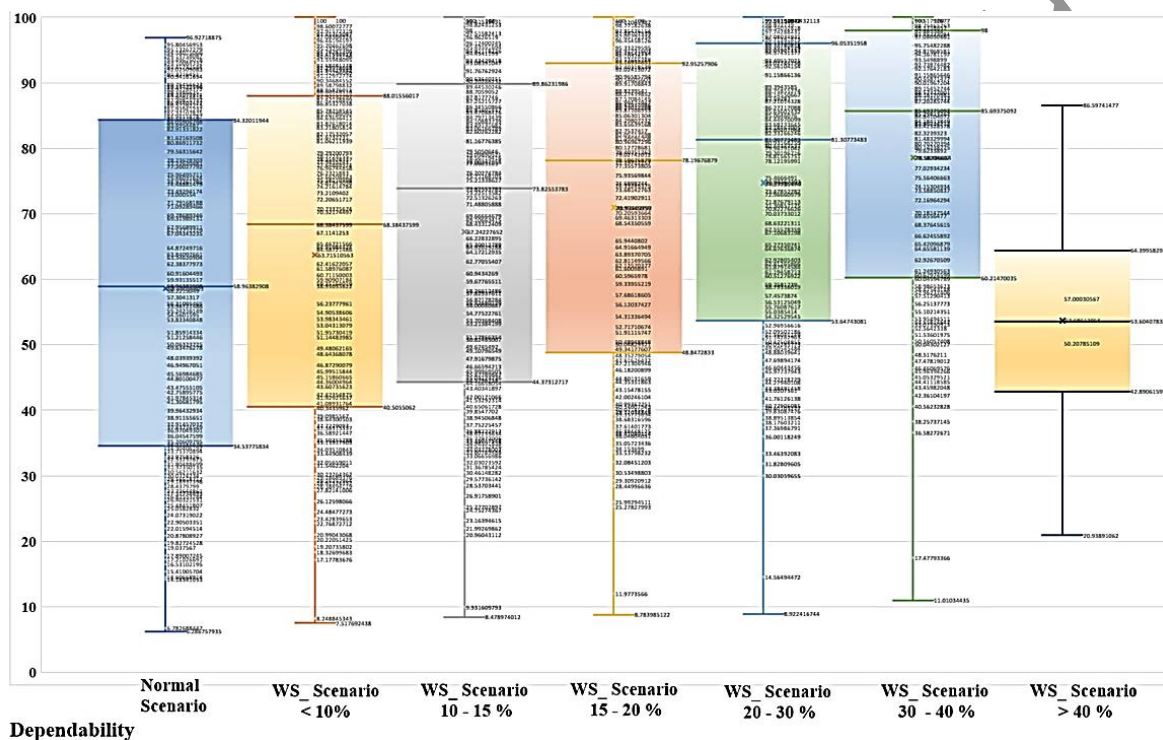


Figure (5). Distribution of the average stability index for water delivery in the secondary distribution network under seven operation scenarios using the automatic control method.

شکل (۵). پراکندگی میانگین شاخص پایداری تحویل آب در شبکه فرعی توزیع آب تحت سناریوهای بهره‌برداری هفتگانه در روش کنترل خودکار

خلاصه نتایج نحوه عملکرد تحویل و توزیع آب در طول کانال اصلی به همراه 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 (بهیود قابل ملاحظه در مقایسه با دو آبگیر در بهره‌برداری موجود)
- تحویل و توزیع متوسط: چهار آبگیر (بهیود: 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٪)
 - تحویل و توزیع خوب: نه آبگیر **(بهبود قابل ملاحظه)** 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٪)
 - تحویل و توزیع خوب: هفت آبگیر **(بهبود قابل ملاحظه)** 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٪)
 - تحویل و توزیع خوب: هفت آبگیر **(بهبود قابل ملاحظه)** 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٪)
 - تحویل و توزیع خوب: شش آبگیر **(بهبود قابل ملاحظه)** 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 قابل ملاحظه)** 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٪)
 - تحویل و توزیع خوب: شش آبگیر **(بهبود قابل ملاحظه)** 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 قابل ملاحظه)** 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٪)
 - تحویل و توزیع خوب: شش آبگیر **(بهبود قابل ملاحظه)** 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 قابل ملاحظه)** در مقایسه با یازده آبگیر در بهره‌برداری موجود

نتایج فوق حاکی از بهبود چشمگیر وضعیت پایداری توزیع آب سطحی در کانال‌های اصلی است به نحویکه 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 تاثیر غالب پس از مدرن سازی 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.

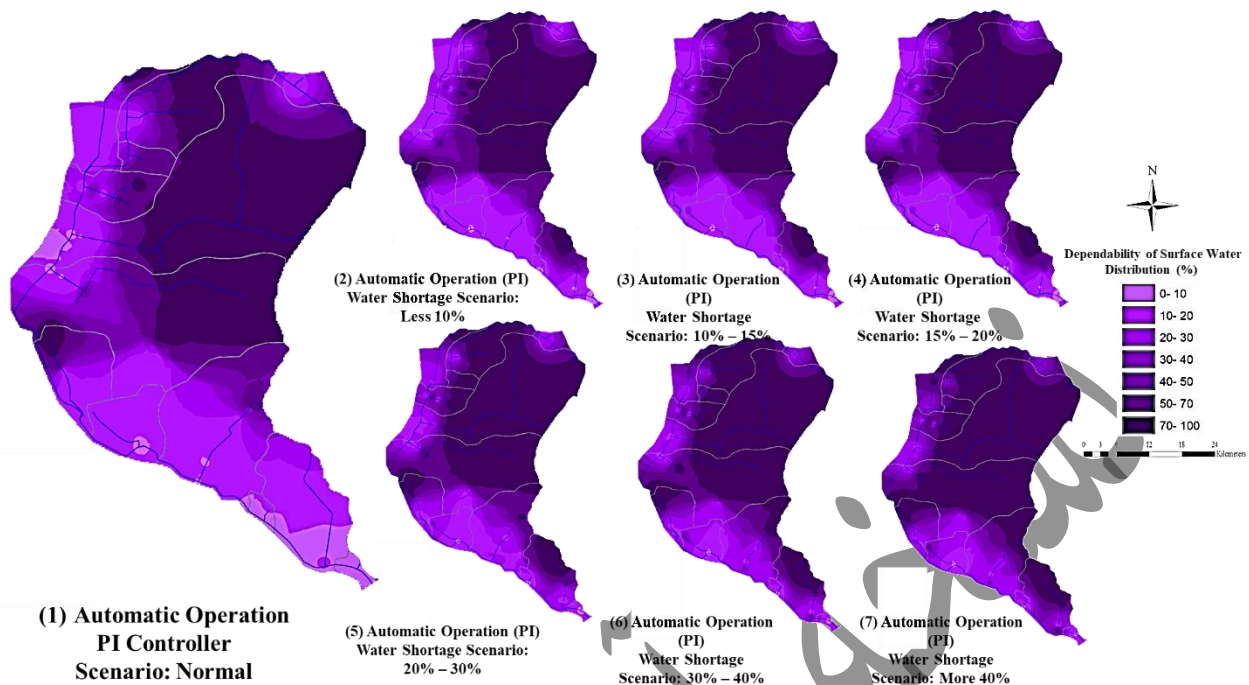


Figure (6). Spatial distribution of surface water distribution stability (stability contour maps) in the NekooAbad irrigation network under various operation scenarios from normal (Scenario 1) to severe drought (Scenario 7).

شکل (۶). پراکندگی مکانی پایداری توزیع آب سطحی (نقشه‌های هم پایداری) در شبکه آبیاری نکوآباد تحت سناریوهای مختلف بهره‌برداری از نرمال (سناریوی ۱) تا کم‌آبی حاد (سناریی هفت)

۳-۳-۳- ارزیابی عدالت توزیع آب سطحی

همان‌طور که پیشتر نیز اشاره شد، منظور از عدالت تحویل آب در هر بازه کانال، میزان تحویل متناسب آب با درصد تقاضای آبیگرهای واقع در آن بازه مکانی است. به عبارت دیگر اگر سامانه بهره‌برداری به نحوی عمل نماید که تمام آبیگرها واقع در یک بازه کانال از بالادست تا پایین دست، همه به یک میزان متأثر از وقوع یک پدیده کم‌آبی یا پراپی شوند، می‌توان این نحوه توزیع آب را در یازده مکانی مدنظر عادلانه نامید. جدول (۴) مقدار میانگین محدوده تغییرات شاخص ارزیابی عملکرد محاسبه شده در طول دوره شبیه‌سازی تحت سناریوهای هفتگانه بهره‌برداری (سناریوی نرمال و شش سناریوی کم‌آبی) را به تفکیک هر کدام از آبیگرهای اصلی ۱۳ گانه واقع در کانال اصلی شبکه ارایه نموده است. لازم به توضیح است که در ارتباط با شاخص ارزیابی عدالت، منظور از میانگین شاخص در محل آبیگر در واقع میانگین شاخص محاسبه شده عدالت در بازه پایین‌دستی آن آبیگر است که وظیفه تامین آب آن بازه را به عهده دارد. همچنین نحوه پراکندگی تغییرات میانگین شاخص ارزیابی از آبیگر بالادست تا انتهایی ترین آبیگر در پایین دست کانال اصلی در شکل (۷) به تصویر کشیده شده است.

جدول (۴). میانگین تغییرات مقادیر شاخص عدالت تحویل آب به آبیگرهای واقع در کانال اصلی تحت سناریوهای نرمال و کم‌آبی بهره‌برداری در روش کنترل خودکار PI

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

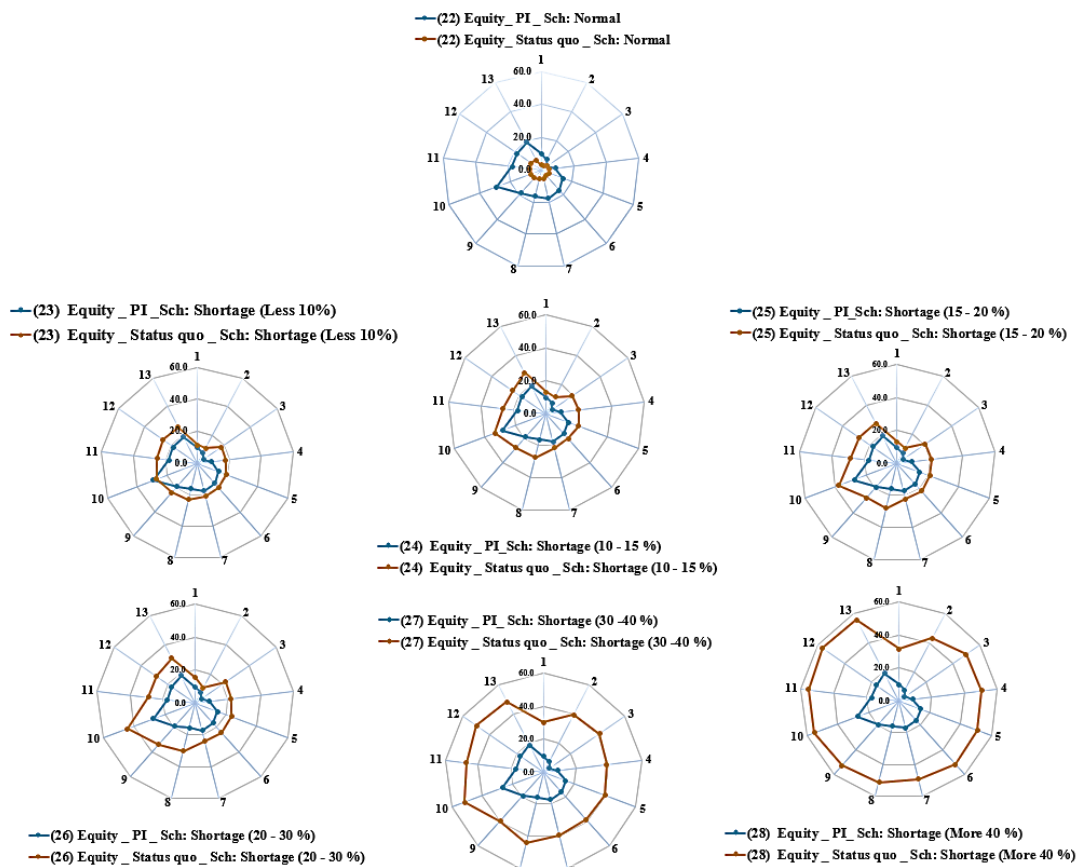


Figure (7). Average equity index calculated at each intake location in the main canal (equity of water distribution among intakes located in secondary canals).

شکل (۷). میانگین شاخص عدالت تحویل آب محاسبه شده در محل هر آبیگر واقع در کانال اصلی (عدالت توزیع آب بین آبیگرهای واقع در کانال درجه دو)

خلاصه نتایج نحوه عملکرد تحویل و توزیع آب در طول کانال اصلی به همراه 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 قابل ملاحظه** 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٪)
- تحویل و توزیع خوب: چهار آبگیر (**بهبود قابل ملاحظه** 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٪)
- تحویل و توزیع خوب: چهار آبگیر (**بهبود قابل ملاحظه** 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 قابل ملاحظه**: 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٪)
- تحویل و توزیع خوب: چهار آبگیر (**بهبود قابل ملاحظه** 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 قابل ملاحظه**: 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٪)
- تحویل و توزیع خوب: چهار آبگیر (**بهبود قابل ملاحظه** 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 قابل ملاحظه**: 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٪)
- تحویل و توزیع خوب: چهار آبگیر (**بهبود قابل ملاحظه** 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 قابل ملاحظه**: 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٪)
- تحویل و توزیع خوب: چهار آبگیر (**بهبود قابل ملاحظه** 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 قابل ملاحظه**: در بهره‌برداری موجود سیزده آبگیر در این کلاس قرار گرفتند)

به منظور 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.

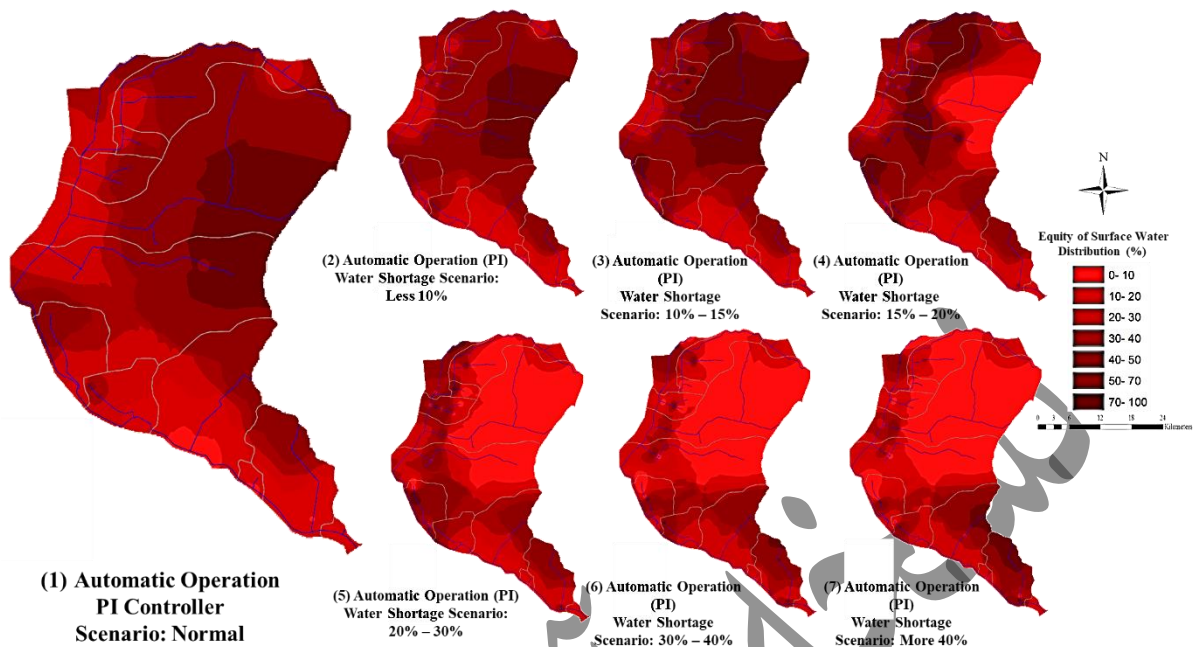


Figure (8). Spatial distribution of surface water distribution equity (equity contour maps) in the NekooAbad irrigation District under various operation scenarios from normal (Scenario 1) to severe drought (Scenario 7).

شکل (۸). پراکندگی عدالت توزیع آب سطحی (نقشه‌های هم عدالت) در شبکه آبیاری نکوآباد تحت سناریوهای مختلف بهره‌برداری از نرمال (سناریوی ۱) تا کم آبی حاد (سناریوی هفت)

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 کم آبی شدیدتر می‌باشد. در مقایسه با نتایج شاخص کفایت و پایداری می‌توان نتیجه گرفت که به کارگیری سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز PI بیشترین تاثیر را در پایداری توزیع آب سطحی و کمترین تاثیر را در عدالت توزیع آب سطحی در سناریوی نرمال بهره‌برداری گذاشته است. با شروع کم آبی و با تشدید کم آبی در سناریوهای شش گانه کم آبی منتخب این تحقیق، غلی رغم تاثیر غالب تر مدرن سازی در پایداری توزیع آب سطحی، بهبود کفایت و عدالت توزیع آب سطحی در طول کانال اصلی نیز واضح است.

۴- نتیجه گیری

این پژوهش به بررسی تاثیر مدرن سازی 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، به منظور ارائه اقدامات لازم جهت بهبود وضعیت بهره‌برداری در صورت لزوم، انجام شود. در این راستا ارزیابی عملکرد بدست آمده 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 شبیه سازی و ارزیابی عملکرد بهره‌برداری کانال اصلی شبکه آبیاری نکوآباد شامل شبیه سازی و ارزیابی عملکرد وضعیت بهره‌برداری موجود در سامانه انتقال و توزیع، در شرایط مختلف

بهره‌برداری به صورت مشروح در قالب ارزیابی در کانال‌های اصلی و فرعی ارایه شد. نتایج کاربردی بدست آمده از فرآیند 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 غیرمترکز PI در محدوده ۷-۱۰٪ در سناریوهای مختلف اتفاق افتاده است. بررسی این نتایج حاکی از تاثیر مطلوب روش PI در مقایسه با شرایط موجود است. میزان بهبود شاخص پایداری توزیع آب سطحی برای سامانه کنترل خودکار غیرمترکز PI در محدوده ۴-۲۵٪ در سناریوهای مختلف اتفاق افتاده است که حاکی از تاثیر مطلوب روش PI می‌باشد.

- در **آبگیرهای میان‌دست شبکه**: میزان بهبود شاخص کفایت توزیع آب سطحی برای سامانه کنترل خودکار غیرمترکز PI در محدوده ۵-۱۵٪ در سناریوهای نرمال تا کم‌آبی شدید و با شدت گرفتن کم‌آبی در سه سناریوهای آخر (کم آبی وخیم) کاهش مطلوبیت شاخص کفایت در محدوده ۰-۱۵٪ بدست آمده است. بررسی این نتایج حاکی از تاثیر مناسب سامانه کنترل خودکار غیرمترکز 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 غیرمترکز PI در محدوده ۹-۴۱٪ در سناریوهای مختلف اتفاق افتاده که حاکی از تاثیر مطلوب سامانه PI می‌باشد.

- در **آبگیرهای پایین‌دست شبکه**: میزان بهبود شاخص کفایت توزیع آب سطحی پس از بکارگیری سامانه کنترل خودکار غیرمترکز PI در محدوده ۵-۱۵٪ در سناریوهای نرمال تا کم‌آبی متوسط و با تشدید کم‌آبی در سناریوهای کم آبی وخیم کاهش مطلوبیت شاخص کفایت در محدوده ۱۶-۲۰٪ بدست آمده است. مشابه رفتار توصیف شده در آبگیرهای میانی، بررسی نتایج بدست آمده برای آبگیرهای پایین‌دستی حاکی از تاثیر مناسب سامانه کنترل خودکار غیرمترکز PI تحت سناریوی نرمال و کم‌آبی ملایم-شدید می‌باشد. میزان بهبود شاخص پایداری توزیع آب سطحی برای سامانه کنترل خودکار غیرمترکز PI در محدوده ۹-۴۲٪ در سناریوهای مختلف اتفاق افتاده که مجدداً حاکی از تاثیر مطلوب خودکارسازی می‌باشد.

- نتایج تحلیل مکانی حاکی از آن است که سامانه کنترل خودکار تاثیر غیرقابل انکاری در بهبود شاخص پایداری توزیع آب سطحی در طول کانال اصلی داشته‌اند و محل قرارگیری آبگیر (بالادست بودن و نزدیک بودن به منبع آب تا پایین دست بودن) تاثیری در روند کنترل پایداری توزیع آب در سامانه‌های کنترل خودکار در همه سناریوهای بهره‌برداری نداشته است. در سوی مقابل، محل قرارگیری آبگیر (بالادست بودن تا پایین‌دست بودن) در بهبود شاخص کفایت توزیع آب در سامانه کنترل خودکار غیرمترکز PI تاثیرگذار بوده است.

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

در ادامه محدودیت‌های انجام این تحقیق در ارتباط با فرض‌های در نظر گرفته شده در این پژوهش ارایه می‌گردد. در این پژوهش فرض شده بود که مدل انتگرالی-تاخیری (Integrator-Delay)، مدلی قابل اطمینان در شبیه‌سازی یک بعدی هیدرولیک جریان در کانال‌های آبیاری است. محدودیت اصلی بکارگیری 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 به دلیل قرارگیری سازه‌های آبگیر در انتهای بازه‌های کانال‌های آبیاری (در بالادست سازه‌های تنظیم سطح آب) در شبکه‌های آبیاری ایران، مانعی در تحلیل و ارزیابی صورت گرفته 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 (اندازه‌گیری شده توسط تیم بهره‌برداری) در محل بند انحرافی نکوآباد قابل حصول است. با این حال محدودیت اصلی عدم تطابق سناریوهای محتمل بدست آمده با سناریوهای حدی رخ داده شده در زمان‌های کم‌آبی شدید به دلیل عدم وجود یک سامانه دیسپاچینگ اندازه‌گیری جریان ورودی در محل بند انحرافی است. در این تحقیق فرض شد که سطح خودکارسازی در بخش مدرن‌سازی سامانه بهره‌برداری، برای روش خودکار غیرمترکز 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 کاربردی بودن 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 بکارگیری سامانه کنترل خودکار کمتر از توانایی واقعی آن نشان داده می‌شود (اصطلاحاً *underestimation* رخ می‌دهد) که ممکن است نظرات مدیران و تصمیم‌گیران را تحت تاثیر قرار دهد و (۲) وابستگی عملکرد سامانه کنترل خودکار به میزان مهارت و دقت بهره‌برداران (اکیپ‌های بهره‌بردار) به دلیل عدم خودکارسازی سازه‌های آبیگر کماکان تاثیر 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 صورت گرفته، ارزیابی جامع حقایق‌های سنتی، توافقی و فروش آب موجود در محل هر آبیگر درجه دو و درجه سه می‌باشد. منظور از افزایش دقت ارزیابی در اینجا، تدقیق مقدار نیاز آب روزانه هر آبیگر می‌باشد که به عنوان یک متغیر اصلی در هر سه شاخص ارزیابی عملکرد توزیع و تحویل آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین منظور از افزایش سطح ارزیابی، وارد کردن 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 فرآیند ارزیابی است. این مهم با استفاده از رنج وسیعی از روش‌ها و مدل‌سازی‌های مرتبط با مدیریت آب در سطح مزرعه قابل پیاده‌سازی است.

۵- تشکر و قدردانی

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

۶- 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
- Khaez, 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

کتابخانه آماده انتشار