University of Tehran Press

ECO HYDROLOGY

Home Page: https://ije.ut.ac.ir

Online ISSN: 2423-6101

Spatio-Temporal Analysis of the Operator-Centered Manual Operational System in Surface Water Distribution under Water Supply Shortage: A Case Study of the NekooAbad Irrigation District, Isfahan

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

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Iran. Email: dorsa.rahparast@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Iran. Email: mehdi.hashemy@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received October 03, 2023
Revised November 02, 2023
Accepted December 02, 2023
Published online 14 February 2024

Keywords:
Water Distribution system,
Water Scarcity Management,
Regionalization,
Technical Evaluation,
Operational System.

ABSTRACT

The research conducted was aimed at developing a comprehensive method to evaluate the technical performance of an operator-centered Operation. The study was conducted under different water supply shortage conditions. The NekooAbad irrigation District was selected for simulation purposes using the Integral-Delay model to simulate flow distribution in the canals. The boundary conditions were based on historical statistics of surface water supply at the source. Seven scenarios were created, ranging from normal to severe water shortage. The technical assessment was based on two aspects: temporal analysis of the daily average water distribution adequacy in 13 main and 149 secondary off-takes. The second aspect included spatial analysis of the distribution of the mentioned index throughout the district. The study classified water distribution adequacy under each scenario. The results showed a pattern of reduced water distribution adequacy from the source to the downstream in all 13 secondary and the main canal. The daily average of the surface water distribution adequacy index ranged from over 10% in the normal scenario to less than 40% in the water scarcity scenarios. The percentage changes ranged from -95% to 64%, 90% to 56%, 89% to 54%, 89% to 50%, 86% to 49%, 86% to 46%, and 33% to 77%. The study also revealed a clear pattern of the operational system's inefficiency in the adequate distribution of surface water under water scarcity scenarios. Furthermore, it identified the vulnerable areas of the district through spatial regionalization maps of water distribution adequacy.

Cite this article: Rahparast, D. & Hashemy Shahdany, S. M. (2024). Spatio-Temporal Analysis of the Operator-Centered Manual Operational System in Surface Water Distribution under Water Supply Shortage: A Case Study of the NekooAbad Irrigation District, Isfahan. *ECO HYDROLOGY*. 10 (4), 493-510. Doi: doi.org/10.22059/ije.2024.369510.1779

© Dorsa Rahparast, S. Mehdy Hashemy Shahdany
DOI: http//doi.org/10.22059/ije.2024.369510.1779

Publisher: University of Tehran Press.

انتشارات دانشگاه تهران

آب و هیدرولوژی

سایت نشریه: https://ije.ut.ac.ir/

شاپا الکترونیکی: ۶۱۰۱-۲۴۲۳

تحلیل زمانی‌ـ مکانی عملکرد سامانهٔ بهره‌برداری اپراتورمحور در توزیع آب سطحی در شرایط کمبود تأمین آب، مطالعهٔ موردی شبکهٔ آبیاری نکوآباد اصفهان

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

۱. گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ فناوری کشاورزی (ابوریحان)، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران. رایانامه: dorsa.rahparast@ut.ac.ir

۲. نویسندهٔ مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ فناوری کشاورزی (ابوریحان)، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران. رایانامه: mehdi.hashemy@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۱
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۲/۲۵

کلیدواژه:
سامانهٔ توزیع آب،
مدیریت کم‌آبی،
پهنه‌بندی،
ارزیابی فنی،
سامانهٔ بهره‌برداری.

چکیده

این پژوهش به ارائهٔ نوعی روش جامع کاربردی در ارزیابی عملکرد فنی سامانهٔ بهره‌برداری اپراتورمحور در توزیع آب سطحی تحت شرایط مختلف کمبود تأمین آب در یک شبکهٔ آبیاری می‌پردازد. برای این منظور، از مدل شبیه‌ساز انتگرالی‌ـ تأخیری برای شبیه‌سازی توزیع جریان در کانال‌های اصلی و فرعی شبکهٔ آبیاری نکوآباد اصفهان بهره‌گرفته شد. شرایط مرزی مدل شبیه‌ساز بر اساس تحلیل آمار تاریخی از سامانهٔ تأمین آب سطحی در محل بند انحرافی و در قالب ۷ سناریوی منتخب شامل شرایط نرمال تا شرایط کم‌آبی ملایم تا حاد انتخاب شد. ارزیابی فنی سامانه بهره‌برداری شامل: ۱) تحلیل زمانی دبی تحویلی به آبگیرها و محاسبهٔ میانگین روزانه کفایت توزیع آب در محل ۱۳ آبگیر درجهٔ ۲ و ۱۴۹ آبگیر فرعی و ۲) تحلیل مکانی پراکندگی شاخص یادشده در سطح شبکه در قالب نقشه‌های پهنه‌بندی کفایت توزیع آب تحت هر سناریوی بهره‌برداری بود. نتایج از الگوی غالب و تکرارشوندهٔ کاهش کفایت توزیع آب از محل منبع به سمت پایین‌دست در کانال اصلی و در هر ۱۳ کانال درجهٔ ۲ بود. دامنهٔ تغییرات میانگین روزانهٔ شاخص کفایت توزیع آب سطحی به‌ترتیب در سناریوی نرمال تا سناریوهای کم‌آبی ۱۰٪>، ۱۰-۱۵٪، ۱۵-۲۰٪، ۲۰-۳۰٪، ۳۰-۴۰٪ و ۴۰٪< برابر با ۹۵-۶۴٪، ۵۶-۹۰٪، ۵۴-۸۹٪، ۵۰-۸۹٪، ۴۹-۸۶٪، ۴۶-۸۶٪ و ۷۷-۳۳٪ به دست آمد. همچنین نقشه‌های پهنه‌بندی مکانی کفایت توزیع آب حاکی از الگوی واضحی از ناکارآمدی سامانهٔ بهره‌برداری در توزیع کافی آب سطحی تحت سناریوهای کم‌آبی ارائه کرده و مناطق آسیب‌پذیر شبکه را مشخص کرد.

استناد: ره‌پرست، درسا و هاشمی شاهدانی، سید مهدی (۱۴۰۲). تحلیل زمانی‌ـ مکانی عملکرد سامانهٔ بهره‌برداری اپراتورمحور در توزیع آب سطحی در شرایط کمبود تأمین آب، مطالعهٔ موردی شبکهٔ آبیاری نکوآباد اصفهان. *آب و هیدرولوژی*، ۱۰ (۴) ۴۹۳-۵۱۰.

DOI: http//doi.org/10.22059/ije.2024.369510.1779

© درسا ره‌پرست، سید مهدی هاشمی شاهدانی. **ناشر:** مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: http//doi.org/10.22059/ije.2024.369510.1779

۱. مقدمه

سامانهٔ کانال‌های روباز اصلی و فرعی و سازه‌های هیدورلیکی وابستهٔ آن، زیرساخت اصلی انتقال، توزیع و تحویل آب سطحی در شبکه‌های آبیاری ایران هستند. بررسی‌های میدانی مختلف صورت‌گرفته بیانگر کارایی پایین‌تر از انتظار سامانه‌ها/روش‌های بهره‌برداری این سامانه‌های یادشده در توزیع کافی، عادلانه و قابل اعتماد آب سطحی میان کشاورزان/تعاونی‌های آب بران بالادست و پایین‌دست شبکه‌های آبیاری بوده است [۱]. با تشدید دوره‌های کم‌آبی در دو دههٔ اخیر و فشار مضاعف بر منابع آب سطحی، کارکرد سامانه/روش‌های بهره‌برداری موجود از وضعیت دور از انتظار به حالت نامطلوب و غیرقابل اعتماد تغییر یافته [۲ و ۳] و الگوهای مشخصی از عدم اطمینان کشاورزان به این سامانه‌ها به‌وضوح در اکثر بیش از ۱۲۰ شبکهٔ آبیاری مدرن کشور، مساحتی 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 عمدتاً سه الگوی بهره‌برداری دستی است شامل: ۱) تنظیمات دستی روزانهٔ سازه‌های تنظیم سطح آب و سازه‌های آبگیر توسط اپراتور؛ ۲) تنظیمات خودکار سازه‌های تنظیم سطح آب توسط دریچه‌های خودکار هیدرولیکی مدول آمیل (و به صورت بسیار محدود مدول‌های آویس) و تنظیمات دستی روزانهٔ آبگیرها توسط اپراتور و ۳) استفاده از سریزهای لبه طولانی مانند سریزهای نوک‌اردکی به عنوان سازه‌های تنظیم سطح آب فاقد امکان بهره‌برداری و تنظیمات دستی روزانهٔ آبگیرها توسط اپراتور [۲ و ۳]. در ارتباط با ادعای کارکرد نامطلوب و غیرقابل اعتماد سامانه/روش‌های بهره‌برداری موجود در شبکه‌های آبیاری، هنوز پژوهشی در مقیاس کشوری در سابقهٔ تحقیق یافت نمی‌شود، ولی مطالعات موردی روی شبکه‌های آبیاری منتخب [۲ و ۳] در سطح کشور مؤید این ادعا است.

عدم کارایی سامانهٔ بهره‌برداری اپراتورمحور، به عنوان متداول‌ترین سامانهٔ بهره‌برداری در شبکه‌های آبیاری کشور زمانی محرز می‌شود که فلسفهٔ وجودی احداث یک شبکهٔ آبیاری – که نیازمند سرمایه‌گذاری قابل توجهی از بودجهٔ عمومی کشور است – تأمین تمام/حداکثر تقاضای آب کشاورزان واقع در محدودهٔ آن شبکه از منابع آب سطحی است. این تأمین آب به صورت برداشت مستقیم از رودخانه‌های بزرگ و یا برداشت کنترل‌شده از محل بند انحرافی واقع در پایین‌دست یک سد مخزنی صورت می‌گیرد. سامانهٔ بهره‌برداری شبکهٔ اصلی، وظیفهٔ انتقال، توزیع و تحویل آب سطحی را از محل بند انحرافی تا محل تحویل آب به آبگیرهای درجهٔ ۳ به عهده دارد. افزایش روند صعودی تعداد چاه‌های بهره‌برداری مجوزدار با گذشت زمان، خود گواه روشنی از عملکرد نامطمئن و غیرقابل اطمینان سامانهٔ بهره‌برداری شبکهٔ آبیاری در توزیع مطمئن آب سطحی بین کشاورزان بوده است.

تجربیات مختلف گزارش‌شده از عملکرد شیوهٔ بهره‌برداری اپراتورمحور [۴ و ۵] با هدف تعیین محدودهٔ کارایی عملکرد این سامانه‌های بهره‌برداری، بیانگر ضرورت ارتقا، به‌روزرسانی یا تغییر آن‌ها در قالب پیاده‌سازی طرح‌های نوسازی یا بهسازی در شبکه‌های آبیاری است [۶]. این تجربیات به صورت کلی با هدف شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان در سامانهٔ کانال‌های اصلی و ارزیابی عملکرد فرایند توزیع و تحویل آب سطحی بین آب‌بران واقع در امتداد شبکهٔ کانال‌ها، صورت گرفته است. نتایج کلی آن‌ها بیانگر میزان قابل توجه تلفات آب در فرایند انتقال، توزیع و تحویل در سامانه‌های بهره‌برداری اپراتورمحور در کانال‌های آبیاری است، به نحوی که این میزان تلفات در Lower Rio Grande Valley در ایالت تگزاس آمریکا را بر اساس اندازه‌گیری میدانی در کلان‌تحویل‌ها و مقایسهٔ آن با مقدار نیاز واقعی محصولات تحت کشت آن شبکه، حدود ۳۰ درصد میزان آب تأمین‌شده در محل بند انحرافی [۷]، در دشت Hilla-Kifil در بخش جنوبی کشور عراق حدود ۱۹ـ ۳۷ درصد و بر اساس اندازه‌گیری میدانی در دوره‌های متناوب بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری واقع در این دشت محاسبه کردند [۸]، در دشت Wonji-Shoa در کشور اتیوپی حدود ۱۲ـ ۷۲ درصد در سناریوهای کم‌آبی تا پرآبی [۹]، در دشت Panchnadi کشور هندوستان حدود ۲۵ـ ۳۶ درصد [۱۰]، در دشت‌های مرکزی کشور ترکیه حدود ۲۸–۴۵ درصد آب سطحی تأمین شده [۱۱]، در دشت کشاورزی رودشت واقع در منطقهٔ خشک و نیمه‌خشک ایران حدود ۵۰ درصد و با استفاده از شبیه‌سازی جریان در کانال‌های اصلی و فرعی با استفاده از مدل توسعه‌داده‌شده در نرم‌افزار ICSS و تطابق نتایج شبیه‌سازی با مقادیر ثبت‌شده توسط میراب شبکه [۱۱]، در دشت‌های مرکزی کشور اسپانیا حدود ۴۵درصد بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی [۱۲] و در دشت شیراز در ایران (شبکهٔ آبیاری درودزن) براساس محاسبهٔ بازده تولید حدود ۱۹ درصد [۱۳] گزارش داده‌اند.

به‌کارگیری وسیع مدل‌های هیدرودینامیکی که امکان شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در کانال‌های آبیاری را دارند، به عنوان ابزار اصلی محققان برای ارزیابی عملکرد بهره‌برداری وضع موجود و همچنین بررسی گزینه‌های ارتقای شیوهٔ بهره‌برداری، دیده می‌شود. کاغذچی و همکاران (۲۰۲۱) با هدف ارائهٔ 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 توسعهٔ یک مدل هوشمند توزیع آب کشاورزی با استفاده از شبکه‌های ترکیبی Bayesian کرده‌اند [۱۴]. قومان و همکاران (۲۰۱۸) در تحقیقی ابتدا روش بهره‌برداری موجود در کانال Swat، واقع در پاکستان را که دارای سیستم کنترل بالادست است، مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج ارزیابی آن‌ها نشان داد روش بهره‌برداری موجود مطلوب نبوده، سپس با استفاده از مدل هیدرودینامیکی CANALMAN، کانال مورد نظر شبیه‌سازی شد و راهکار بستن کانال‌های درجهٔ ۲ در شب برای جلوگیری از هدررفت آب پیشنهاد شد و مورد ارزیابی قرار گرفت [۱۵]. دجن (۲۰۱۵) با هدف بهبود عملکرد هیدرولیکی به واسطهٔ بهره‌برداری مؤثر، جریان را در کانال اصلی شبکهٔ آبیاری Mahatra را در کشور اتیوپی با استفاده از مدل DUFLOW شبیه‌سازی کرد و با به‌کارگیری شاخص‌های کفایت، راندمان، عدالت و پایداری، روش‌های بهبود عملکرد را مورد ارزیابی قرار داد [۱۶]. سولر و همکاران (۲۰۱۵) 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 بر اثر تغییرات دبی پمپاژ ورودی، از روش کنترل خودکار، استفاده کردند [۱۷]. شاهوردی و مائستره (۲۰۲۳) مطالعه‌ای با هدف معرفی یک چارچوب جامع برای مدرن‌سازی کانال با توسعهٔ مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی HEC-RAS برای شبیه‌سازی جریان در کانال آبیاری و ادغام روش یادگیری ماشین Fuzzy Sarsa با هدف بهینه‌سازی شاخص‌های ارزیابی عملکرد کارایی، کفایت و عدالت انجام دادند [۱۸]. همچنین تحقیقات متنوعی با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین به منظور ارزیابی عملکرد سازه‌های مختلف هیدرولیکی واقع در کانال آبیاری انجام شده که به عنوان نمونه به مطالعهٔ مرعشی و همکاران (۲۰۲۳) اشاره می‌شود که در آن از شبکهٔ عصبی ENN و دو مدل هیبرید ENN-GA و SVM-SA برای شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد دبی عبوری از دریچهٔ دوار در شرایط جریان آزاد و مستغرق و همچنین تشخیص شرایط آستانهٔ استغراق بهره گرفته شد [۱۹].

با توجه به موارد یادشده و با در نظر گرفتن سابقهٔ تحقیق ارائه‌شده، سؤالی که می‌تواند در ذهن مطرح شود این است که چرا با وجود شواهد انکارناپذیر مطرح‌شده و با گذشت حدود ۳۰ تا ۵۰ سال از قدمت بسیاری از شبکه‌های آبیاری کشور هنور اقدام اساسی و جامعی برای نوسازی و مدرن‌سازی سامانه‌های بهره‌برداری در سطح کشور انجام نشده است؟ صرف‌نظر از دلایل تأثیرگذار اساسی مانند کمبود بودجهٔ تخصیصی، موانع قانونی در احیا و به‌روزرسانی قیمت فروش آب کشاورزی و دلایل دیگر قانونی و اقتصادی، پاسخ به این سؤال از دیدگاه فنی می‌تواند عملکرد تا حدودی قابل قبول سامانه‌های بهره‌برداری در شرایط نرمال یا پرآبی سامانهٔ تأمین آب سطحی باشد. به بیان دیگر، شرایطی که میزان آب سطحی تأمین‌شده روزانه در محل بند انحرافی (نقطهٔ ورودی آب سطحی به شبکهٔ آبیاری) متناسب با مجموع کل تقاضای برآوردشده، شامل نیاز آبی الگوی کشت به علاوهٔ تلفات انتقال، توزیع و تحویل در محدودهٔ شبکه باشد. این موضوع به صورت مستقیم یا غیرمستقیم در استانداردها و نشریات مورد استناد شرکت‌های مهندسان مشاور، از جمله نشریهٔ شمارهٔ ۲۸۱ [۴] سازمان برنامه و بودجه به چشم می‌خورد، به طوری که سبب شده است با در نظر گرفتن راندمان‌های انتقال و توزیع دور از واقعیت، به عنوان فرض‌های اولیه طراحی، عملکرد سامانه‌های بهره‌برداری اپراتورمحور از نظر کفایت توزیع آب عموماً در مجاورت محدودهٔ قابل قبول جهانی قرار گیرد.

اما معضل اساسی و مشکل جدی در شرایط غیرمتعارف بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری به وجود می‌آید و اصلی‌ترین عامل ایجاد شرایط یادشده، ظهور دوره‌های کم‌آبی منتج از تغییرات اقلیمی است که سامانه‌های تأمین آب سطحی را بسیار آسیب‌پذیر کرده و ریسک شکست سامانهٔ بهره‌برداری را تحت تأثیر خطرات مختلف به طرز قابل توجهی افزیش داده است [۲ و ۳]. شایان یادآوری است که در این ارتباط قبول یک فرض (نزدیک به شرایط واقعی) الزامی است و آن عدم امکان توسعهٔ اراضی برنامه‌ریزی نشده و نیز عدم امکان کشت غیرمصوب (منظور تغییر دلخواه الگوی کشت و کاشت محصولات آب‌بر) توسط کشاورزان در محدودهٔ شبکه‌های آبیاری ایران است.

لذا خلاصهٔ بیان مسئله که به عبارتی فرضیهٔ این تحقیق نیز محسوب می‌شود آن است که روش بهره‌برداری اپراتورمحور، به

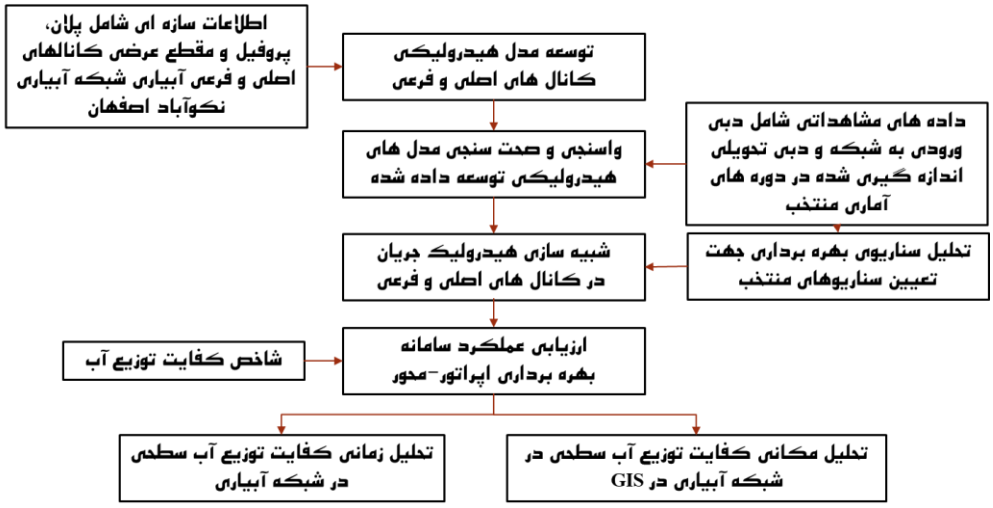
عنوان متداول‌ترین سامانهٔ توزیع آب سطحی در شبکه‌های آبیاری ایران، در شرایط بهره‌برداری کم‌آبی (منظور شرایطی که میزان آب سطحی تأمین‌شده در محل بند انحرافی کمتر از کل تقاضای برآوردشده شبکه باشد) امکان توزیع کافی آب سطحی بین کشاورزان یک شبکهٔ آبیاری را ندارد. در این شرایط واکنش طبیعی کشاورزان تأمین آب از منبع آب زیرزمینی است. این تحقیق تلاش کرد که با در نظر گرفتن فرضیهٔ یادشده، اقدام به ارزیابی فنی عملکرد سامانهٔ بهره‌برداری اپراتورمحور شبکهٔ آبیاری نکوآباد اصفهان در توزیع کافی آب سطحی- بر پایهٔ شاخص‌های ارزیابی عملکرد کفایت توزیع آب سطحی- تحت شرایط نرمال و کم‌آبی تأمین آب سطحی کند. بر این اساس نوآوری این تحقیق عبارت از تحلیل زمانی- مکانی شاخص ارزیابی عملکرد کفایت توزیع آب در دو سطح آبگیرهای واقع در کانال‌های درجهٔ ۱ و درجهٔ ۲ و ارائهٔ نقشه‌های پهنه‌بندی کفایت توزیع آب سطحی در شبکهٔ آبیاری نکوآباد اصفهان است. شبکهٔ آبیاری نکوآباد با بیشترین تعداد و تراکم چاه بهره‌برداری کشاورزی مجوزدار حفر شده و در حال بهره‌برداری واقع درون محدودهٔ شبکهٔ آبیاری بین سایر شبکه‌های آبیاری حوضهٔ زاینده‌رود می‌تواند انتخاب درستی برای بررسی چالش مطرح‌شده در این مقاله باشد. لازم به شفاف‌سازی است که منظور از چاه بهره‌برداری مجوزدار، چاه نیمه‌عمیق یا عمیق حفرشده توسط یک یا چند کشاورز است که بهره‌برداری آن توسط خود کشاورزان صورت می‌گیرد.

۲. روش کار

۲. ۱. روش انجام تحقیق

مراحل طی‌شده در انجام این پژوهش در روندنمای شکل ۱ ارائه شده است. بر این اساس، گام‌های اصلی عبارت‌اند از:

- **گام اول:** توسعهٔ مدل شبیه‌ساز هیدرولیک جریان در کانال‌های اصلی و فرعی شبکهٔ آبیاری نکوآباد- بر پایهٔ 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 (ID)[1] در محیط MATLAB و در ادامه واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌های توسعه داده شده.
- **گام دوم:** تحلیل وضعیت تأمین آب سطحی طی دورهٔ آماری ۳۰ ساله مربوط به ۱۳۷۰- ۱۴۰۰، به منظور تعیین سناریوهای بهره‌برداری نرمال و کم‌آبی برای شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی سامانهٔ توزیع آب سطحی.
- **گام سوم:** شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در کانال‌های اصلی و فرعی توزیع آب سطحی بر اساس سناریوهای بهره‌برداری منتخب و ارزیابی عملکرد سامانهٔ بهره‌برداری اپراتورمحور بر اساس شاخص‌های ارزیابی عملکرد کفایت توزیع آب سطحی.
- **گام چهارم:** تحلیل مکانی توزیع آب سطحی در شرایط بهره‌برداری موجود در محیط GIS



شکل ۱. مراحل انجام پژوهش

1. Integrator-Delay

۲. ۲. شبکهٔ آبیاری و زهکشی نکوآباد اصفهان

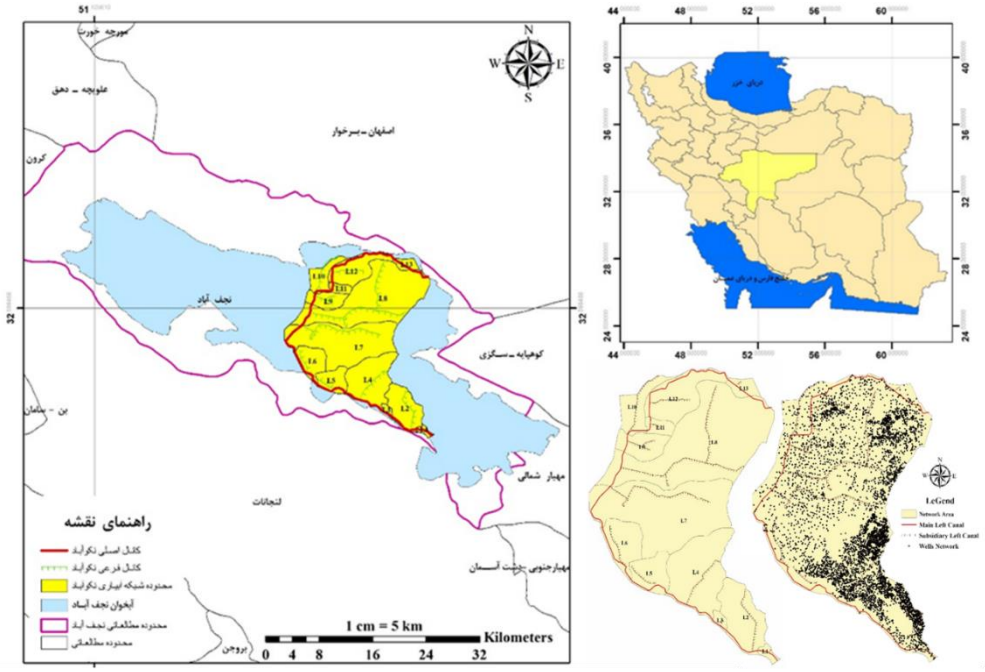
شبکهٔ آبیاری نکوآباد واقع در حوضهٔ آبریز زاینده‌رود، در منطقهٔ مرکزی ایران، قرار گرفته است. بر اساس اطلاعات و آمار جمع‌آوری‌شده در مرحلهٔ ابتدایی انجام این تحقیق از شرکت آب منطقه‌ای اصفهان اطلاعات شبکه به شرح ذیل ارائه می‌شود:

مساحت در حال بهره‌برداری شبکه حدود ۲۹ هزار هکتار است 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، حدود ۲۴۰ میلی‌متر است. این در حالی است که در میزان تبخیر و تعرق در این منطقه حدود ۱۵۰۰ میلی‌متر در سال برآورد شده است. منبع اصلی تأمین‌کنندهٔ آب این شبکهٔ آبیاری، آب رهاشده از سد زاینده‌رود است. در طرفین بند انحرافی نکوآباد، در منشأ تأمین آب این شبکهٔ آبیاری، دو رشته کانال اصلی چپ و راست به منظور برداشت آب برای تحت پوشش قرار دادن اراضی احداث شده است. کنترل و تنظیم سطح آب به شیوهٔ کنترل بالادست، با به‌کارگیری ۵۰ سازه خودکار هیدرومکانیکال آمیل و یک سازهٔ ثابت Duck-Bill صورت می‌گیرد. تحویل و توزیع سطح آب در طول شبکهٔ اصلی، متشکل از کانال‌های درجهٔ ۱ و درجهٔ ۲، به‌ترتیب ۱۳ و ۱۴۹ سازه آبگیر انجام می‌گیرد که نحوهٔ تنظیمات آن به صورت دستی و توسط اپراتور انجام می‌شود.

بر اساس اطلاعات جمع‌آوری‌شده از دفتر شرکت آب منطقه‌ای اصفهان و دفتر بهره‌برداری شبکهٔ آبیاری نکوآباد، میزان تلفات در سامانه در سامانهٔ انتقال، توزیع و تحویل آب این شبکه در محدودهٔ ۳۰ تا ۴۰ درصد جریان ورودی اعلام شده است. در ارتباط با میزان تلفات برآوردشده لازم به توضیح مجدد است که این ارقام در محاسبات برنامه‌ریزی تحویل و توزیع روزانه این شبکهٔ آبیاری لحاظ می‌شود، ولی محققان این تحقیق هیچ‌گونه مستندات قابل اتکایی مبنی بر نحوه، ابزار، زمان و شرایط اندازه‌گیری آن در مقالات علمی و گزارش‌های در دسترس به دست نیاوردند. بنابراین، با فرض صحیح بودن این مقادیر تلفات در سامانهٔ آب سطحی، به منظور رفع مشکل تأمین آب، کشاورزی وابسته به منابع آب زیرزمینی گسترش پیدا کرده به نحوی که در حال حاضر با برداشت سالانه ۳۷۰ میلیون مترمکعب از حدود ۱۵ هزار حلقه چاه حفرشده در داخل شبکهٔ آبیاری نکوآباد، حجم آب برداشتی در محدودهٔ این شبکه حدود ۷۲ درصد کل برداشت از منابع آب زیرزمینی در مقایسه با پنج شبکهٔ آبیاری دیگر حوضهٔ زاینده‌رود است. علاوه بر این، بررسی اطلاعات جمع‌آوری‌شده از شرکت آب منطقه‌ای اصفهان بیانگر آن است که تعداد چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق حفرشده دارای مجوز در بازهٔ زمانی ۱۳ ساله، از ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۷، شاهد افزایش ۳/۸ درصدی حفر چاه‌های نیمه‌عمیق و افزایش چشمگیر ۲۲۵/۸ درصدی چاه‌های عمیق بوده است. افزایش روزافزون حفر چاه‌ها و بهره‌برداری از آن برای مصارف کشاورزی نه تنها این منطقه را به یکی از دشت‌های بحرانی کشور تبدیل کرده است، بلکه خسارت‌های جدی به محیط زیست وارد می‌کند، به طوری که سالیانه هزاران تن گازهای گلخانه‌ای به اتمسفر زمین وارد می‌کند. وضعیت نابسامان برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی منطقه از یک سو و از سویی دیگر، افزایش تقاضا برای محصولات کشاورزی، مدیران آبی در این منطقه را به یافتن چاره‌ای برای حل این مشکل واداشته است.

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

به منظور ارزیابی عملکرد سامانهٔ بهره‌برداری اپراتورمحور موجود در شبکهٔ 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. به این منظور، در پژوهش حاضر از مدل ریاضی انتگرالی- تأخیری (ID) در محیط نرم‌افزار MATLAB استفاده شد تا امکان تبادل اطلاعات با برنامه‌های زمانی تغییر بازشدگی دریچه‌های آبگیر (برنامه‌ریزی روزانهٔ تحویل و توزیع آب) امکان‌پذیر شود. در این نرم‌افزار روند انجام محاسبات بر پایهٔ روش روندیابی جریان در هر بازهٔ سامانهٔ انتقال، در حد فاصل دو سازهٔ 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 یادشده، به سبب راحتی محاسبات و تأمین دقت مورد نیاز، مورد استقبال قرار گرفته است [۲۱].



شکل ۲. محدودهٔ مورد مطالعه این پژوهش شامل پراکندگی شبکهٔ مجاری روباز به‌هم‌پیوسته انتقال آب سطحی و پراکندگی چاه‌های بهره‌برداری مجوزدار در سطح شبکهٔ نکوآباد

در مدل یادشده، هر بازه کانال اصلی سامانهٔ توزیع آب به دو بخش، شامل i- بخش جریان یکنواخت و ii- بخش منحنی برگشت آب است. هر بخش یک مشخصهٔ اصلی دارد که از مجموع این دو، مدل انتگرالی- تأخیری به دست می‌آید. این دو مشخصهٔ اصلی در هر بازهٔ کانال عبارت‌اند 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 سازهٔ تنظیم‌کنندهٔ سطح آب بالادست به تولید یک موج منجر می‌شود، این بخش از کانال فقط به عنوان گذار برای عبور این موج عمل می‌کند. شایان یادآوری است که سرعت موج در یک بازه از کانال با عمق نرمال، به سرعت موج سینماتیک نزدیک است [۲۲]. زمان تأخیر ناشی از حرکت موج یادشده به بخش منحنی برگشت آب می‌رسد و موجب تغییر تراز سطح آب می‌شود. زمان تأخیر تنها پارامتری است که در بخش جریان یکنواخت، برای تشریح جریان، در نظر گرفته می‌شود. معادلهٔ حاکم بر این بخش به صورت رابطهٔ ۱ ارائه می‌شود [۲۳]:

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

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) است. 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 به صورت رابطهٔ ۲، در حوزهٔ زمان و حوزهٔ فرکانس، قابل بیان است [۲۳]:

$$A_s \cdot \frac{dh(t)}{dt} = q_{canal}(t) - q_{out}(t)$$
$$A_s \cdot s \cdot h(s) = q_{canal}(s) - q_{out}(s) \Leftrightarrow h(s) = \frac{1}{A_s \cdot s} \cdot \left[q_{canal}(s) - q_{out}(s)\right] \qquad (۲)$$

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) است. برای یک بازه از کانال که شامل بخش جریان یکنواخت و بخش منحنی برگشت آب است، مدل کاملی از تلفیق معادلات ارائه‌شده در بخش‌های قبلی به دست می‌آید.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل شبیه‌ساز توسعه‌داده‌شده ID بر اساس اطلاعات اندازه‌گیری‌شده‌ای که توسط شرکت آب منطقه‌ای اصفهان جمع‌آوری شده بود، انجام شد. این اطلاعات مربوط به سه دورهٔ ۵۳، ۶۵ و ۷۳ روزه بهره‌برداری در سال‌های آبی ۱۳۸۰ـ ۱۳۸۱، ۱۳۹۳-۱۳۹۲ و ۱۳۹۹ـ ۱۴۰۰ است. نیمی از داده‌های هر دورهٔ آماری برای واسنجی و نیم دیگر آن برای صحت‌سنجی مدل مورد استفاده قرار گرفتند. برای واسنجی مدل، ضریب دبی آبگذری سازه‌های آبگیر به عنوان متغیرهای قابل تغییر به منظور انطباق مقادیر شبیه‌سازی با مقادیر مشاهده‌ای استفاده شدند. بعد از واسنجی مدل و تنظیم پارامترهای آن، فرایند صحت‌سنجی اجرا شد و برای مقایسهٔ مقادیر شبیه‌سازی‌شده با مقادیر مشاهده‌شده در هر دو مرحله از شاخص‌های ارزیابی ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب خطای پس‌ماند (CRM) و میانگین خطای مطلق (MAE)، روابط ۳ـ ۵ استفاده شد.

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

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

$$\mathrm{MAE}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|Y_i-X_i\right| \quad (۵)$$

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

با توجه به شرایط سازه‌ای کانال اصلی سامانهٔ توزیع آب محدودهٔ مورد مطالعه، فرم مدل ماتریسی فضای حالت، مطابق رابطهٔ ۳، با ابعاد مختلف ماتریس، به تفکیک کانال‌های آبیاری- دو کانال اصلی و ۱۳ کانال فرعی- به دست آمد. با تبدیل روابط به‌دست‌آمده برای تمامی بازه‌ها، به جهت بزرگ بودن ماتریس‌ها، مدل ماتریسی فضای حالت تنها برای بازهٔ اول در رابطهٔ ۶ آورده شده است:

$$\begin{bmatrix} Q_{hg}(k+1)\\ Q_{hg}(k)\\ Q_{hg}(k-1)\\ Q_{hg}(k-2)\\ e_1(k+1)\\ e_1^*(k+1)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1&0&0&0&0&0\\ 1&0&0&0&0&0\\ 0&1&0&0&0&0\\ 0&0&1&0&0&0\\ 0&0&0&\frac{T_c}{A_s}&1&0\\ 0&0&0&\frac{T_c}{A_s}&1&0\end{bmatrix}.\begin{bmatrix} Q_{hg}(k)\\ Q_{hg}(k-1)\\ Q_{hg}(k-2)\\ Q_{hg}(k-3)\\ e_1(k)\\ e_1^*(k)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix} 1&0\\ 0&0\\ 0&0\\ 0&0\\ 0&0\\ 0&-1\end{bmatrix}.\begin{bmatrix}\nabla Q_{hg}(k)\\ u^*(k)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix} 0\\ 0\\ 0\\ 0\\ -\frac{T_c}{A_s}\\ -\frac{T_c}{A_s}\end{bmatrix}.\left[Q_{off-take1}(k)\right] \quad (۶)$$

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

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

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 سازهٔ تنظیم سراب کانال در گام‌های زمانی k-3 تا k (sec) است. $e_1(k)$ 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 دربرگیرندهٔ محدودیت نرم ناشی از تجاوز رقوم سطح آب از رقوم حداکثر و حداقل در بازهٔ اول (m) است. $u^*(k)$ 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. درواقع متغیر $u^*(k)$ تفسیر فیزیکی ندارد و فقط یک متغیر فرضی برای اعمال جریمهٔ بیش‌تر بر تابع هدف در زمانی که سطح آب از محدودهٔ مجاز بین حداکثر و حداقل رقوم سطح آب تجاوز می‌کند، است.

۲. ۴. شاخص ارزیابی عملکرد کفایت توزیع آب سطحی در شبکه‌های آبیاری

یک نگرانی اساسی در سامانه‌های تحویل آب این است که آب به اندازهٔ مورد نیاز در دسترس محصولات زراعی قرار گیرد. میزان مورد نیاز چنان تعیین می‌شود که پاسخ‌گوی سیاست کشاورزی باشد. بر همین اساس، میزان دبی مورد نیاز آبگیرها وابسته به

عوامل مختلفی است که از جمله می‌توان به مساحت مناطق کشاورزی تحت آبیاری، – میزان نیاز به محصولات کشاورزی، میزان تلفات آب، اقدامات مربوط به فرهنگ کشاورزی در منطقه همچون آماده‌سازی زمین و عملیات آبشویی اشاره کرد. در همین راستا کفایت تحویل آب به آبگیرها تابعی از میزان تأمین آب، برنامهٔ تحویل، ظرفیت سازه‌های هیدرولیکی برای تحویل آب بر اساس برنامه، بهره‌برداری و نگهداری سازه‌های هیدرولیکی است. لازم به توضیح است که شاخص ارزیابی کفایت توزیع آب سطحی عبارت از نسبت آب تحویل‌داده‌شده در هر آبگیر (بر اساس هیدروگراف دبی شبیه‌سازی‌شده توسط مدل شبیه‌ساز ID) به مقدار تقاضای آب (حقابهٔ تعیین‌شده برای هر آبگیر) است، که به صورت رابطهٔ ۷ تعریف می‌شود [۲۴]:

$$PA = \frac{1}{T}\sum_{T}\left[\frac{1}{R}\sum_{R}\left(\frac{Q_D}{Q_R}\right)\right] \quad (۷)$$

که در آن PA شاخص کفایت توزیع آب (درصد)، T مدت‌زمان بهره‌برداری (sec)، R تعداد کل آبگیری‌های واقع در کانال اصلی، Q_D دبی تحویلی به هر آبگیر (m^3/s) و Q_R دبی تقاضای آب کشاورزی (m^3/s) است. هرچه مقدار شاخص کفایت به ۱۰۰ درصد نزدیک‌تر شود، مقدار مطلوب آن رخ داده است. با این‌حال، براساس طبقه‌بندی طبقه‌بندی ارائه‌شده در [۲۳]، از دیدگاه مدیریتی شاخص یادشده به سه دسته که بیانگر بهره‌برداری مطلوب $(PA \in (90-100))$، قابل قبول $(PA \in (80-90))$ و ضعیف $(PA \leq 80)$ سامانهٔ توزیع آب است، قابل تقسیم‌بندی است.

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 تحویل‌داده‌شده در محل بند انحرافی نکوآباد انجام شد. در واقع، الگوهای متناوب دبی تأمین‌شده در محل بند انحراف استخراج و نمایندهٔ هر الگو به عنوان یکی از سناریوهای بهره‌برداری به عنوان شرط اولیهٔ شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در نظر گرفته شد. نتایج تحلیل زمانی شامل سناریوهای منتخب بهره‌برداری به همراه احتمال وقوع رخداد هر کلاس طی ۳۰ سال گذشته بهره‌برداری شبکهٔ آبیاری نکوآباد (دورهٔ آماری ۱۳۷۰_ ۱۴۰۰) در پنج دستهٔ ذیل تقسیم می‌شود:

- **کلاس نرمال (سناریوی بهره‌برداری نرمال):** دبی تحویلی در محل بند انحرافی حدود ۱۰۰ – ۱۱۰ درصد مجموع تقاضای برآوردشده، تغییرات دبی در ۱۲ ماه سال (به‌جز 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 دورهٔ آماری: ۲۰/۶ درصد
- **کلاس کم‌آبی ملایم (سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی کمتر از ۱۰ درصد):** دبی تحویلی در محل بند انحرافی حدود ۹۰ – ۱۰۰ درصد مجموع تقاضای برآوردشده، تغییرات دبی در ۱۲ ماه سال (به‌جز دی و بهمن) = ۱/۶_ ۲۴/۵ مترمکعب بر ثانیه، متوسط دبی سالانه (به استثنای دی و بهمن) = ۱۰/۷ مترمکعب بر ثانیه، متوسط احتمال وقوع در دورهٔ آماری: ۱۲/۵ درصد
- **کلاس کم‌آبی (سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی ۱۰ تا ۱۵ درصد):** دبی تحویلی در محل بند انحرافی حدود ۸۵ – ۹۰ درصد مجموع تقاضای برآوردشده، تغییرات دبی در ۱۲ ماه سال (به‌جز دی و بهمن) = ۱/۴_ ۲۲/۹ مترمکعب بر ثانیه، متوسط دبی سالانه (به استثنای دی و بهمن) = ۹/۵ مترمکعب بر ثانیه، متوسط احتمال وقوع در دورهٔ آماری: ۱۸/۷۵ درصد
- **کلاس کم‌آبی شدید (سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی ۱۵ تا ۲۰ درصد):** دبی تحویلی در محل بند انحرافی حدود ۸۰ – ۸۵ درصد مجموع تقاضای برآوردشده، تغییرات دبی در ۱۲ ماه سال (به‌جز دی و بهمن) = ۱/۳_ ۲۱/۱ مترمکعب بر ثانیه، متوسط دبی سالانه (به استثنای دی و بهمن) = ۸/۳ مترمکعب بر ثانیه، متوسط احتمال وقوع در دورهٔ آماری: ۱۷/۵ درصد

- **کلاس کم‌آبی حاد: (سه سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی ۲۰ تا ۳۰ درصد – ۳۰ تا ۴۰ درصد – <۴۰ درصد):** دبی تحویلی در محل بند انحرافی کمتر از ۸۰ درصد مجموع تقاضای برآوردشده، تغییرات دبی در ۱۲ ماه سال (به‌جز دی و بهمن) = ۱/۲ـ ۱۹/۷ مترمکعب بر ثانیه، متوسط دبی سالانه (به استثنای دی و بهمن) = ۷/۱ مترمکعب بر ثانیه، متوسط احتمال وقوع در دورهٔ آماری: ۳۰/۶ درصد

لازم به توضیح است که بررسی نحوهٔ پراکندگی ماه‌های واقع در هر کلاس نشان می‌دهد حدود ۷۰ تا ۹۰ درصد ماه‌های بهره‌برداری سه کلاس کم‌آبی، کم‌آبی شدید و کم‌آبی حاد طی سال‌های ۱۳۸۳–۱۴۰۰ قرار گرفته است. لذا به منظور بررسی دقیق‌تر شرایط بهره‌برداری شبکهٔ مورد مطالعه 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 پژوهش ۷ سناریوی بهره‌برداری (شامل یک سناریو نرمال و شش سناریوی کم‌آبی) در نظر گرفته شد و ادامهٔ مطالعات بر این اساس انجام شد.

۳. ۲. نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل هیدرودینامیکی

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، واسنجی و صحت‌سنجی مدل شبیه‌ساز توسعه‌داده‌شده ID بر اساس اطلاعات اندازه‌گیری‌شده‌ای که توسط شرکت آب منطقه‌ای اصفهان جمع‌آوری شده بود، انجام شد. این اطلاعات مربوط به سه دورهٔ ۵۳، ۶۵ و ۷۳ روزه بهره‌برداری از در سال‌های آبی ۱۳۸۰–۱۳۸۱، ۱۳۹۲–۱۳۹۳ و ۱۳۹۹ـ ۱۴۰۰ است. نیمی از داده‌های هر دورهٔ آماری برای واسنجی و نیم دیگر آن برای صحت‌سنجی مدل مورد استفاده قرار گرفتند. برای واسنجی مدل، ضریب دبی آبگذری سازه‌های آبگیر به عنوان متغیرهای قابل تغییر جهت انطباق مقادیر شبیه‌سازی با مقادیر مشاهده‌ای استفاده شدند. بعد از واسنجی مدل و تنظیم پارامترهای آن، فرایند صحت‌سنجی اجرا شد. نتایج این فرایند به این‌صورت است که مقدار میانگین خطای مطلق (MAE)، برای دورهٔ واسنجی برابر ۰/۰۰۵ و برای دورهٔ صحت‌سنجی ۰/۰۰۹ مترمکعب بر ثانیه است. مقدار بهینهٔ این شاخص برابر صفر است، با توجه به اینکه مقادیر یادشده به مقدار بهینه نزدیک هستند، لذا می‌توان نتیجه گرفت که مدل دقت مناسبی ارائه می‌کند. شاخص ضریب خطای پسماند (CRM)، برای دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی، به‌ترتیب برابر ۰٫۰۰۸– و ۰/۰۱۶– هستند، با توجه به اینکه بهترین میزان برای CRM صفر است، مقادیر کم این شاخص حاکی از دقت قابل قبول مدل در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی است. درنهایت، میزان ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE)، برای دورهٔ واسنجی برابر ۰/۰۰۷ و برای دورهٔ صحت‌سنجی ۰/۰۰۸ به دست آمدند. مقادیر مناسب این شاخص نیز دقت مدل را مورد تأیید قرار می‌دهد.

۳. ۳. شبیه‌سازی و ارزیابی فرایند توزیع آب سطحی در شبکهٔ آبیاری نکوآباد اصفهان

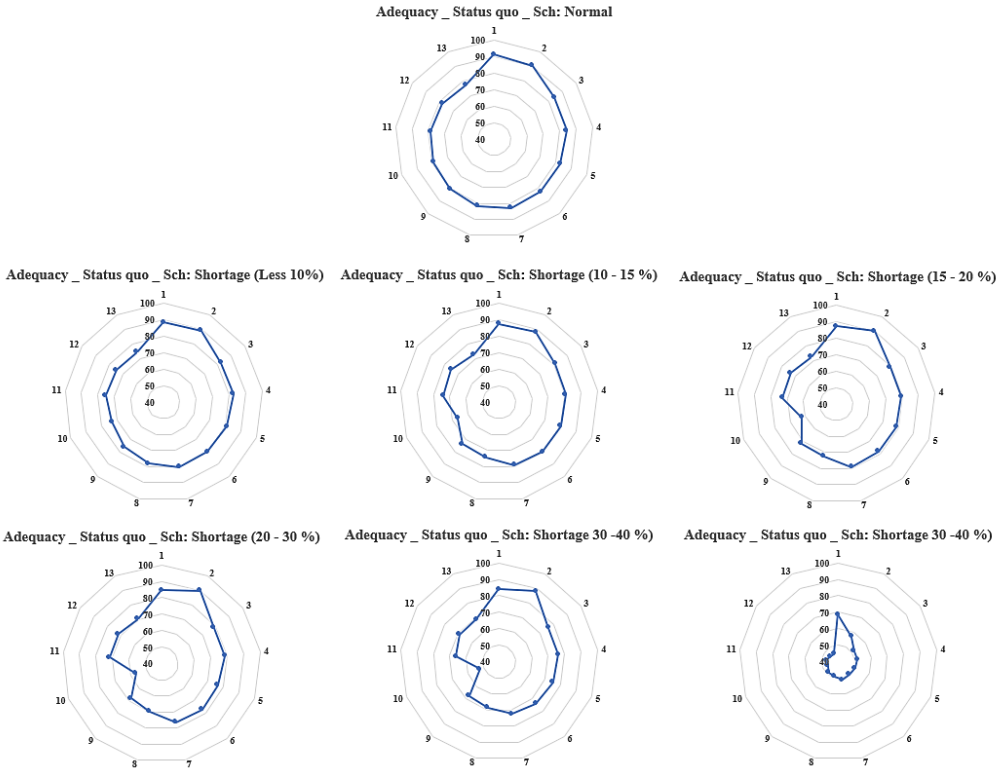
به منظور ارزیابی عملکرد وضعیت تحویل و توزیع آب سطحی بین آب‌بران و حقابه‌بران توسط سامانهٔ بهره‌برداری اپراتورمحور موجود در شبکهٔ آبیاری نکوآباد، شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در کانال‌های اصلی و فرعی تحت هفت سناریوی بهره‌برداری منتخب، که پیش‌تر معرفی شد، انجام گرفت. با در دست داشتن تقاضای هر آبگیر (مقدار حقابهٔ مشخص) و متوسط دبی تحویلی روزانه به آن آبگیر که در این پژوهش از مدل شبیه‌ساز هیدرولیک جریان واسنجی‌شده برای شبیه‌سازی این مقادیر استفاده شد، میانگین شاخص ارزیابی عملکرد کفایت توزیع آب، به تفکیک هر آبگیر و تحت هر سناریوی بهره‌برداری، محاسبه شد. لازم به توضیح مجدد است که دبی روزانهٔ مورد نیاز آبگیر در این پژوهش بر اساس اطلاعات حقابهٔ موجود در دفتر بهره‌برداری شبکهٔ آبیاری نکوآباد استفاده شد. در ارتباط با نتایج به‌دست‌آمده از مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی 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، به عنوان خروجی در هر روز شبیه‌سازی بهره‌برداری حاصل شد. شاخص کفایت توزیع آب، که ماهیتاً تناسب دبی تحویلی با دبی درخواستی (حقابهٔ مشخص) را بررسی می‌کند، برای هر گام زمانی محاسبه و میانگین کلی مقادیر محاسبه‌شده به تفکیک آبگیرهای واقع در کانال اصلی و کانال‌های درجهٔ ۲ محاسبه و در ادامه ارائه شده است. در گام بعدی، نتایج تحلیل مکانی شاخص ارزیابی عملکرد در سطح شبکه– که در محیط GIS انجام شده– در قالب نقشه‌های پهنه‌بندی ارائه شد تا امکان ارزیابی بصری میزان پراکندگی مکانی کفایت توزیع آب در سطح شبکه و در هر سناریوی بهره‌برداری امکان‌پذیر شود.

۳. ۴. ارزیابی کفایت توزیع آب سطحی در کانال‌های اصلی

جدول ۱ محدودهٔ تغییرات شاخص ارزیابی عملکرد کفایت توزیع آب محاسبه‌شده، طی دورهٔ شبیه‌سازی تحت سناریوهای هفتگانه بهره‌برداری (سناریوی نرمال و شش سناریوی کم‌آبی) را به تفکیک هر یک از آبگیرهای اصلی ۱۳گانه واقع در کانال اصلی شبکه ارائه کرده است. همچنین نحوهٔ پراکندگی تغییرات میانگین شاخص ارزیابی از آبگیر بالادست تا انتهایی‌ترین آبگیر در پایین‌دست کانال اصلی در شکل ۳ به تصویر کشیده شده است.

جدول ۱. محدودهٔ تغییرات میانگین روزانهٔ مقادیر شاخص کفایت تحویل آب به آبگیرهای واقع در کانال اصلی

Off-takes ID	Sce_1: Normal Scenario	Water Shortage Scenarios					
		Less than 10%	10 - 15 %	15 - 20 %	20 - 30 %	30 -40 %	More than 40%
12	(85-95)	(84-90)	(83-89)	(78-89)	(75-86)	(70-86)	(70-77)
120	(80-92)	(80-92)	(83-90)	(78-90)	(75-91)	(72-91)	(70-77)
90	(77-91)	(75-86)	(73-84)	(69-81)	(65-80)	(60-80)	(38-56)
91	(77-90)	(75-86)	(73-84)	(69-81)	(65-80)	(60-80)	(38-56)
92	(72-88)	(71-85)	(69-84)	(69-81)	(63-80)	(60-80)	(37-56)
93	(72-87)	(69-84)	(69-84)	(64-81)	(61-79)	(61-79)	(34-56)
94	(71-87)	(69-84)	(65-81)	(64-80)	(60-77)	(60-77)	(34-56)
108	(71-85)	(65-81)	(60-80)	(58-80)	(55-71)	(52-71)	(34-55)
0	(69-85)	(63-79)	(60-76)	(58-75)	(54-71)	(52-71)	(33-54)
16	(66-83)	(63-78)	(60-72)	(57-72)	(50-68)	(47-66)	(33-50)
109	(65-82)	(60-77)	(57-76)	(55-75)	(52-73)	(47-70)	(33-50)
15	(65-82)	(56-76)	(54-76)	(50-75)	(49-72)	(47-70)	(32-49)
14	(64-80)	(56-76)	(54-76)	(50-75)	(49-71)	(46-71)	(33-49)



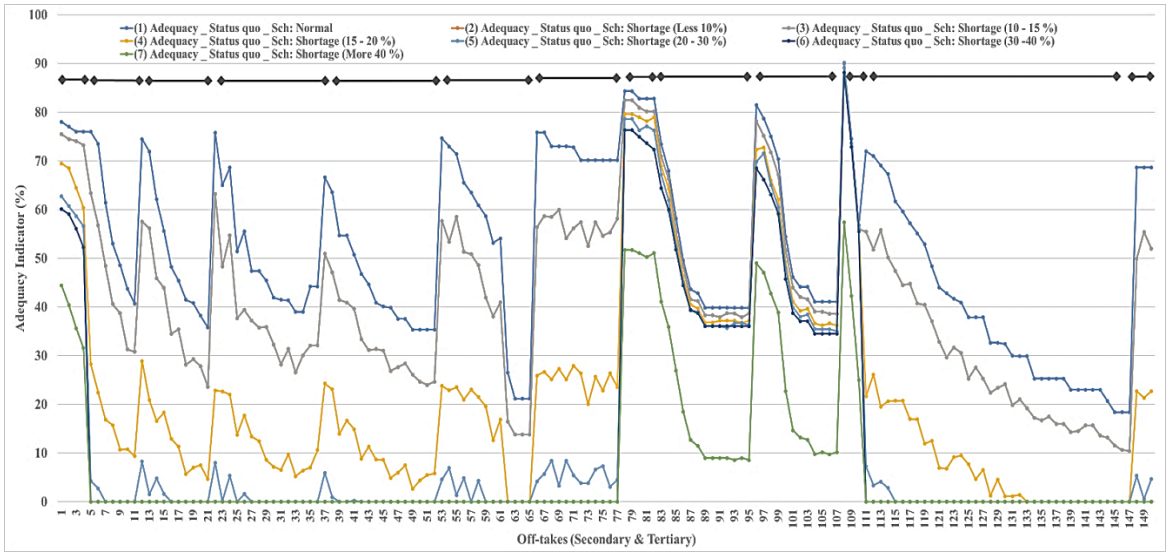
شکل ۳. میانگین کلی شاخص کفایت تحویل آب به آبگیرهای بالادست تا پایین‌دست کانال اصلی آبیاری شبکهٔ نکوآباد

۳. ۵. ارزیابی کفایت توزیع آب سطحی در کانال‌های فرعی

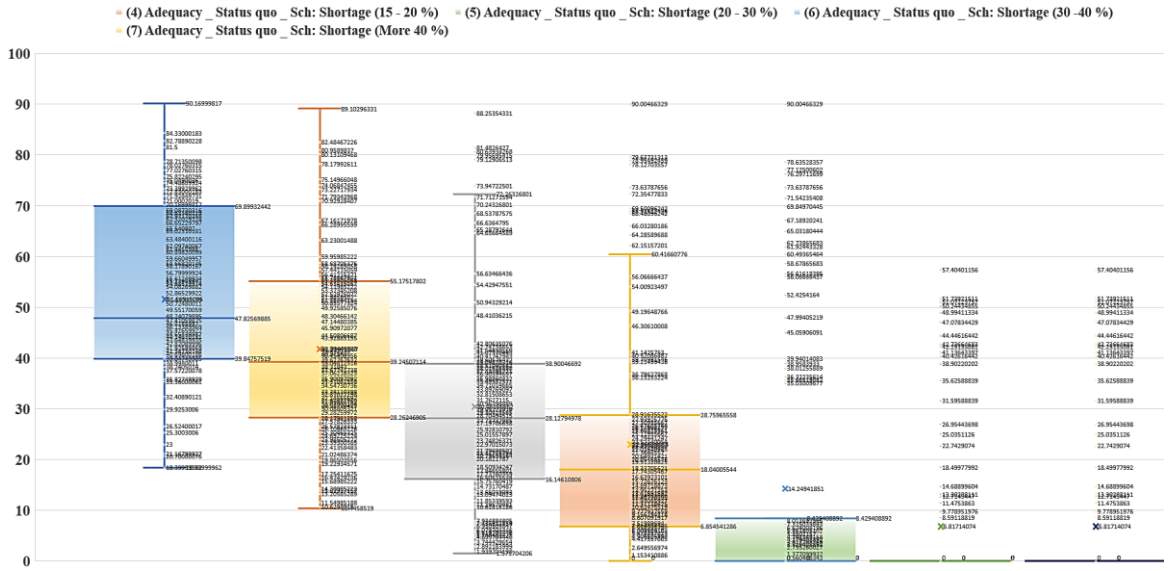
در ادامه نتایج ارزیابی عملکرد سامانهٔ فرعی بهره‌برداری تحت سناریوهای بهره‌برداری هفت‌گانه و از نظر شاخص ارزیابی عملکرد کفایت در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. در شکل ۴ متوسط مقدار شاخص ارزیابی عملکرد محاسبه‌شده طی شبیه‌سازی فصل آبیاری ارائه شده است. مطابق شکل الگوی کاهشی تکرارشونده‌ای در هر چند آبگیر کنار هم قابل رؤیت است که کاهش میانگین کفایت توزیع آب آبگیرهای واقع در در هر کانال آبیاری درجهٔ ۲ (از بالادست به پایین‌دست)، از آبگیر ابتدایی تا پایین‌دستی‌ترین آبگیر نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۵ نمودار پراکندگی مقادیر میانگین شاخص نشان داده شده که بر اساس آن کفایت توزیع آب در شبکهٔ فرعی، نه در شش سناریوی کم‌آبی بلکه در سناریوی نرمال نیز عملکرد دور از انتظاری از خود نشان داده است.

الگوی تغییرات مقدار متوسط شاخص ارزیابی عملکرد کفایت توزیع آب سطحی در هر کانال فرعی درجهٔ ۲ مشابهت رفتاری قابل توجهی با الگوی تغییرات به‌دست‌آمده در کانال اصلی آبیاری نشان می‌دهد. به نحوی که رفتار تکرارشونده کاهش شاخص از آبگیر بالادستی تا پایین‌دستی (در هر کانال درجهٔ ۲) برای هر هفت سناریوی بهره‌برداری منتخب پدید آمده است. فقط شیب این تغییرات (الگوی کاهشی) متفاوت بوده است. رخداد رفتار یادشده دور از انتظار هم نبوده و تفسیر این رخداد براساس ماهیت کنترل بالادستی بودن روش بهره‌برداری دستی شبکهٔ آبیاری مورد مطالعه، هم برای کانال اصلی و هم برای کانال‌های فرعی، قابل انجام است. در بهره‌برداری به شیوهٔ کنترل دستی، تنظیمات آبگیرها در امتداد هر کانال آبیاری منطبق بر مسیر حرکت جریان از بالادست به پایین‌دست بوده و با اعمال تأخیر زمانی حرکت جریان از یک آبگیر به آبگیر بعدی، زمان تنظیمات آن سازه برآورد می‌شود. در این شیوهٔ بهره‌برداری، میزان تنظیمات روزانه هر سازهٔ آبگیر نیز تابعی از حقابه/دبی فروخته‌شده/دبی اختصاصی در همان روز است. به طور کلی و با صرف نظر از عوامل خارجی تأثیرگذار در شیوهٔ بهره‌برداری کانال آبیاری (از جمله وقوع دوره‌های کم‌آبی و محدودیت‌های سامانهٔ تأمین آب) عوامل تأثیرگذار داخلی در یک سامانهٔ کانال‌های روباز انتقال، توزیع و تحویل آب آبیاری عبارت‌اند از: ۱) میزان دانش و تخصص مدیر بهره‌برداری در تخمین دقیق زمان تأخیر جریان بین آبگیرها؛ ۲) میزان مهارت و تعهد کاری اکیپ‌های بهره‌برداری در پیاده‌سازی برنامهٔ زمانی تنظیمات روزانهٔ سازه‌ها؛ ۳) مهارت و آشنایی کافی بهره‌برداران در نحوهٔ تنظیمات سازه‌های آبگیر و ۴) انجام کامل و مؤثر بازرسی‌های دوره‌ای و واسنجی‌های دوره‌ای به منظور رفع مشکلات احتمالی پیش‌آمده برای سازه‌ها طی فصل آبیاری و اطمینان از دقت (جدول‌ها) منحنی‌های دبی- اشل و جدول‌های میزان بازشدگی- میزان دبی عبوری هر سازه.

در شکل ۴ نمودار جعبه‌ای نحوهٔ توزیع نتایج متوسط شاخص کفایت محاسبه‌شده ارائه شده است که بر اساس آن کفایت توزیع آب در سناریوی نرمال بهره‌برداری برای ۵۰ درصد آبگیرها (چارک دوم و سوم در نمودار) در محدودهٔ ۴۰ درصد تا ۷۰ درصد در نوسان است. در چهارک چهارم با حدود متوسط شاخص کفایت ۷۰ تا ۹۰ درصد، آبگیرهای واقع در بالادست هر کانال فرعی و و در چارک اول، با حدود تغییرات شاخص کفایت ۱۸–۴۰ درصد آبگیرهای پایین‌دستی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد حتی در شرایط بدون کم‌آبی و در سناریوی بهره‌برداری نرمال هم متوسط شاخص کفایت در محدودهٔ خوب، مطابق دسته‌بندی شاخص‌های ارزیابی عملکرد توزیع آب سطحی قرار نگرفته است. روند کاهشی قرارگیری چارک‌های دوم و سوم با شروع و سپس تشدید دورهٔ کم‌آبی به طور واضح در این نمودار مشخص است؛ به طوری که با آغاز کم‌آبی در سناریوی کم‌آبی کمتر از ۱۰ درصد، محدودهٔ تغییرات متوسط شاخص کفایت حدود ۱۲–۱۴ درصد کاهش در مقایسه با سناریوی نرمال، به محدودهٔ ۲۸–۵۶ درصد کاهش پیدا کرده است. نتایج بیانگر آن است که در دو سناریوی کم‌آبی شدید و حاد (دبی ورودی ۳۰–۴۰ درصد و بیشتر از ۴۰ درصد کمبود آب کارایی سامانهٔ بهره‌برداری موجود به صفر می‌رسد. به عنوان یک نتیجه‌گیری کلی از نتایج به‌دست‌آمده می‌توان اعتمادپذیر بودن سامانهٔ موجود بهره‌برداری (روش بهره‌برداری دستی اپراتورمحور در شبکهٔ آبیاری نکوآباد) را تحت سناریوی بهره‌برداری نرمال ضعیف و برای دوره‌های کم‌آبی غیرقابل اعتماد ارزیابی کرد.



شکل ٤. میانگین شاخص کفایت تحویل آب به ۱۴۹ آبگیر واقع در سیزده کانال درجهٔ ۲ شبکهٔ نکوآباد تحت سناریوهای بهره‌برداری هفتگانه



شکل ۵. پراکندگی میانگین شاخص کفایت تحویل آب در شبکهٔ فرعی توزیع آب تحت سناریوهای بهره‌برداری هفتگانه

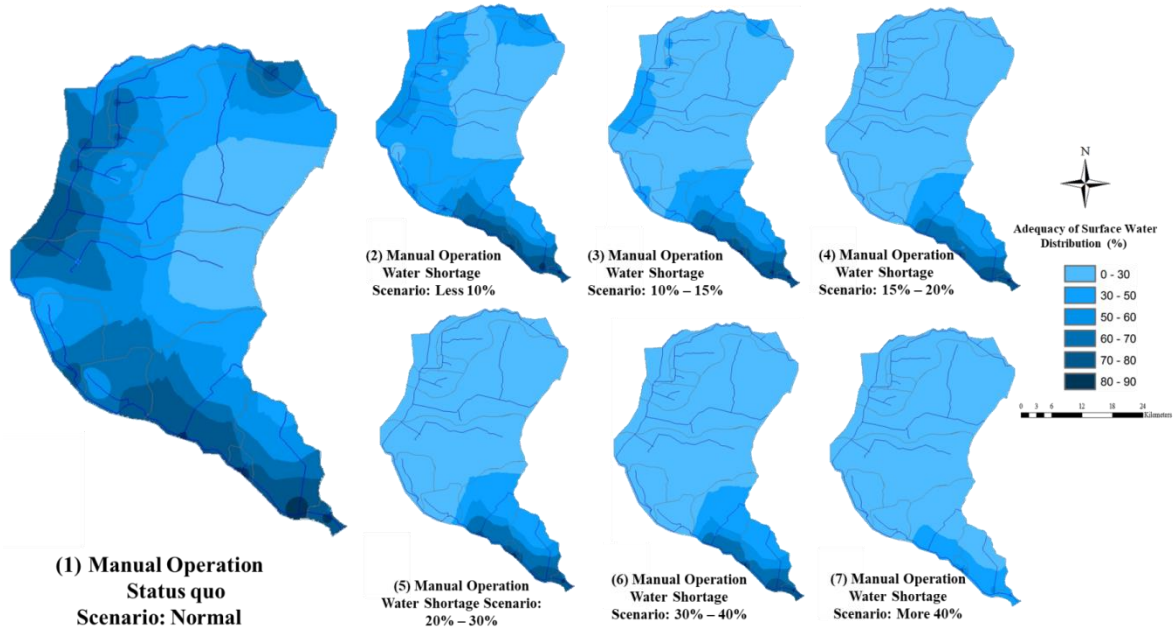
۳. ۶. تحلیل مکانی کفایت توزیع آب سطحی در سطح شبکهٔ آبیاری نکوآباد

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، اولین گام در پیاده‌سازی طرح‌های نوسازی، بهسازی و مدرن‌سازی با هدف ارتقای شیوهٔ مدیریت تخصیص و توزیع آب در یک شبکهٔ آبیاری، بررسی مکانی نحوهٔ توزیع آب سطحی و در نتیجه، تعیین سهم هر یک از منابع آب سطحی و زیرزمینی در تأمین نیاز کشاورزی آن شبکه است. در این راستا، در گام اول اقدام به ارزیابی وضعیت فعلی و عملکرد بهره‌برداری انتقال و توزیع آب شبکهٔ آبیاری نکوآباد در برخورد با شرایط بهره‌برداری محتمل کم‌آبی صورت گرفت. ارزیابی عملکرد بهره‌برداری بستری را ایجاد می‌کند که جنبه‌های مختلف سازه‌ای، هیدرولیکی و مدیریتی و همچنین تعیین عوامل مؤثر در بهره‌برداری از شبکه، به منظور ارائهٔ اقدامات لازم برای بهبود وضعیت بهره‌برداری در صورت لزوم، انجام شود. در این راستا ارزیابی عملکرد به‌دست‌آمده در سامانهٔ انتقال و توزیع آب کشاورزی (شامل کانال‌های اصلی و فرعی) در شبکهٔ آبیاری نکوآباد از دیدگاه کفایت تحویل و توزیع آب آبیاری صورت گرفت و نتایج حاصل از شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد بهره‌برداری کانال اصلی شبکهٔ آبیاری نکوآباد شامل شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد وضعیت بهره‌برداری موجود در سامانهٔ انتقال و توزیع، در شرایط مختلف بهره‌برداری به صورت مشروح در قالب ارزیابی در کانال‌های اصلی و فرعی ارائه شد.

در ادامه، به منظور ارائهٔ تحلیل مکانی کفایت توزیع آب در سطح شبکه، مقدار متوسط شاخص محاسبه‌شده با استفاده از نرم‌افزار GIS در شکل ۵، به تفکیک سناریوهای بهره‌برداری، ارائه شد. نتایج تحلیل مکانی، امکان بررسی و مقایسهٔ مکانی پراکندگی مقادیر متوسط شاخص کفایت تحویل آب به آبگیرها تحت سناریوهای مختلف بهره‌برداری را فراهم کرده است. مطابق با این شکل در همهٔ سناریوها، شاخص کفایت از بالادست (منطقهٔ نزدیک به بند انحرافی نکوآباد) به سمت پایین‌دست (انتهای کانال‌های اصلی و تخلیه به زهکش انتهایی) روندی نزولی را طی می‌کند. دلیل این امر ماهیت سامانهٔ بهره‌برداری با روش کنترل بالادست در کانال‌های مورد مطالعه است. مقدار شاخص کفایت نشان‌داده‌شده در این شکل بیانگر این است 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.

مطابق نقشه‌های پهنه‌بندی کفایت توزیع آب سطحی ارائه‌شده در شکل ۵، با ظهور کم‌آبی (در سناریوی بهره‌برداری ۲) شاهد افت چشمگیر و قابل ملاحظه مقدار مطلوبیت کفایت توزیع آب سطحی هستیم، به نحوی که فقط حدود ۳/۵ و ۶/۲ درصد از اراضی تحت پوشش شبکه، میانگین کفایت توزیع آب تحویل‌داده‌شده به‌ترتیب در محدودهٔ ۸۵ـ ۹۰ و ۸۰ـ ۸۵ درصد است. شایان یادآوری است که سطوح یادشده در ملایم‌ترین سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی و زمانی‌که تنها کاهش دبی ورودی با سامانهٔ بهره‌برداری در محل بند انحرافی کمتر از ۱۰ درصد مقدار تقاضای برآوردشده در کانال رخ داده است. با تشدید کم‌آبی در سناریوی سوم و چهارم — به‌ترتیب با ۱۰ـ ۱۵ درصد و ۱۵ـ ۲۰ درصد کاهش در دبی ورودی به سراب شبکه، سطح تحت پوشش با شاخص کفایت بالای ۸۰ درصد در حدود ۱/۱ و ۰/۳ درصد خواهد شد. صرف‌نظر از شرایط حادتر کم‌آبی در سناریوهای ۴ تا ۷ و بر اساس سه سناریوی اول، می‌توان این‌طور استدلال کرد که توانایی سامانهٔ بهره‌برداری اپراتورمحور در توزیع کافی آب سطحی در سطح شبکهٔ آبیاری نکوآباد، حتی در شرایط نرمال بهره‌برداری یا شرایط خفیف کم‌آبی در سامانهٔ تأمین آب، عملکردی نامطمئن و غیر مؤثر نشان می‌دهد. لذا بر پایهٔ نتایج تحلیل زمانی شاخص‌های ارزیابی عملکرد در آبگیرهای واقع در کانال‌های اصلی و فرعی شبکهٔ آبیاری نکوآباد و همچنین با استناد به نتایج تحلیل مکانی در شکل ۶ می‌توان فرضیهٔ ابتدایی این تحقیق (که عبارت بود از عدم توانایی روش بهره‌برداری اپراتورمحور، به عنوان متداول‌ترین سامانهٔ توزیع آب سطحی در شبکه‌های آبیاری ایران، در توزیع کافی آب سطحی بین آب‌بران در شرایط بهره‌برداری کم‌آبی) را تأیید کرد.

نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش هم‌راستا با نتایج پژوهش کاغذچی و همکاران (۲۰۲۱) بوده که ارزیابی عملکرد سامانهٔ بهره‌برداری در سه سطح نقطه‌ای، منطقه‌ای و کلی برای شبکهٔ آبیاری رودشت اصفهان و توسط یک مدل هوشمند توزیع آب کشاورزی با استفاده از شبکه‌های ترکیبی Bayesian صورت گرفته است [۱۴]. بر اساس نتایج آن تحقیق، متوسط شاخص کفایت توزیع آب در نمایندهٔ آبگیرهای بالادست در سناریوهای بهره‌برداری نرمال، کم‌آبی‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد به‌ترتیب حدود ۶۸، ۶۵، ۶۲، ۵۹، ۵۶، ۵۲ درصد در میان‌دست شبکه به‌ترتیب حدود ۶۷، ۶۳، ۶۰، ۵۶، ۵۳، ۴۹ درصد و در پایین‌دست شبکه به‌ترتیب حدود ۴۹، ۴۵، ۴۲، ۳۸، ۳۴، ۳۱ درصد به دست آمد. مقایسهٔ نتایج یادشده با تحقیق حاضر نشان می‌دهد شبکهٔ آبیاری نکوآباد به‌رغم اینکه در منطقه بالادست شبکهٔ آبیاری رودشت واقع شده و خطر کمبود آب در سامانهٔ تأمین (آب رهاشده از سد مخزنی زاینده‌رود) عواقب کمتری برای این شبکه دارد، ولی متوسط کفایت توزیع آب سطحی تقریباً مشابه در شبکهٔ آبیاری رودشت به دست آمده است. دلایل متعددی می‌تواند این اختلاف را ایجاد کرده باشد که با توجه به عدم امکان بررسی آن‌ها در این پژوهش، فقط می‌توان لیستی از دلایل از جمله تجربه و تخصص ناکافی تیم بهره‌برداری، فرسودگی و ناکافی بودن یا عدم انجام واسنجی دوره‌ای سازه‌های آبگیر در کانال‌های اصلی و فرعی برشمرد. در ارتباط با مقادیر کلی شاخص کفایت توزیع آب نتایج به‌دست‌آمده توسط نتایج مشابه شاخص کفایت محاسبه‌شده در سناریوی نرمال بهره‌برداری ارائه‌شده در دو تحقیق [۲۲ و ۱۸] تأیید می‌شود.



شکل ٦. پراکندگی مکانی کفایت توزیع آب سطحی (نقشه‌های هم‌کفایت) در شبکهٔ آبیاری نکوآباد تحت سناریوهای مختلف بهره‌برداری از نرمال (سناریوی ۱) تا کم‌آبی حاد (سناریوی ۷)

۴. نتیجه‌گیری

نتایج کاربردی به‌دست‌آمده از فرایند شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد سامانهٔ بهره‌برداری دستی یا اپراتورمحور در این پژوهش به شرح ذیل خلاصه می‌شود:

۱. سامانهٔ بهره‌برداری اپراتورمحور از نظر کفایت توزیع آب سطحی در شبکهٔ آبیاری نکوآباد اصفهان، توانایی فنی قابل اتکایی ندارد، به طوری که تحویل و توزیع آب تنها در دو آبگیر واقع در بالادست کانال اصلی عملکرد خوب، در هفت آبگیر بعد از آن عملکرد متوسط و در چهار آبگیر پایین‌دستی عملکرد ضعیفی تحت سناریوی نرمال بهره‌برداری نشان داده است. شایان یادآوری است که در هیچ‌یک از ۱۴۹ آبگیر واقع در ۱۳ کانال فرعی این شبکهٔ آبیاری، میانگین کلی شاخص کفایت توزیع آب سطحی عملکرد خوب تحت شرایط نرمال نداشته است.

۲. با ظهور کم‌آبی در شش سناریوی دیگر بهره‌برداری این تحقیق، میانگین کلی شاخص کفایت توزیع آب در همهٔ آبگیرهای واقع در کانال اصلی و تمام آبگیرهای واقع در کانال فرعی در دو کلاس متوسط و ضعیف دسته‌بندی می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد با تشدید وضعیت کم‌آبی در محل بند انحرافی از میزان ۱۵ درصد (میزان آب ورودی به شبکه حدود ۱۵ درصد کمتر از کل تقاضای برآوردشده) و بیشتر از آن (سناریوی بهره‌برداری چهارم تا هفتم) توزیع آب سطحی کانال‌های درجهٔ ۱ و ۲ شبکهٔ آبیاری نکوآباد مختل شده، به نحوی که به‌ترتیب ۹، ۱۱، ۱۱ و ۱۳ آبگیر از کل ۱۳ آبگیر واقع روی کانال‌های اصلی عملکرد نامطمئن توزیع آب سطحی و شاخص کفایت ضعیف داشته‌اند.

۳. نتایج تحلیل مکانی- نقشه‌های پهنه‌بندی کفایت توزیع آب سطحی نشان داد در بهره‌برداری تحت شرایط نرمال حدود ۳/۵ و ۶/۲ درصد از اراضی تحت پوشش شبکه، میانگین کفایت توزیع آب تحویل‌داده‌شده به‌ترتیب در محدودهٔ ۸۵ـ ۹۰ و ۸۰ـ ۸۵ درصد است. نکتهٔ درخور توجه این است که در همین شرایط بهره‌برداری ۱۴/۸ درصد اراضی واقع در محدودهٔ شبکهٔ آبیاری میانگین کفایت توزیع آب سطحی در محدودهٔ صفر تا ۳۰ درصد به دست آمده است. با ظهور کم‌آبی از سناریوی دوم (کم‌آبی کمتر از ۱۰ درصد) تا هفتم (کم‌آبی بیشتر از ۴۰ درصد)، حدود ۴۶/۷ درصد اراضی تا ۹۱/۳ درصد اراضی تحت پوشش شبکه تنها حدود ۳۰ درصد حقابه مشخص خود را دریافت می‌کند.

۴. در توجیه و تفسیر نتایج کمی به‌دست‌آمده چند عامل تأثیرگذار باید در نظر گرفته شود، اول اینکه میزان تلفات واقع در سامانهٔ انتقال، توزیع و تحویل آب در شبکهٔ آبیاری نکوآباد و به تبع آن در سایر شبکه‌های آبیاری کشور از مقدار

سرانگشتی ۱۰ـ ۱۵ درصد اشاره‌شده در نشریهٔ ۲۸۱ سازمان برنامه و بودجه [۴] که رفرنس مورد شرکت‌ها مهندسی مشاور در پروژه‌های طراحی شبکه‌های آبیاری است، فاصله‌ای معنادار دارد. با مقایسهٔ مقدار یادشده با مقادیر تلفات گزارش‌شده در سامانه‌های توزیع آب سطحی سایر شبکه‌ها- که در سابقهٔ تحقیق همین مقاله به برخی موارد اشاره شد- نیز این موضوع قابل تشخیص است. به مورد یادشده، تخصص، دانش و مهارت تیم بهره‌برداری و اکیپ‌های اپراتورها در تشخیص تغییرات زمانی حرکت جریان در کانال‌های روباز و در نتیجه، تغییرات زمان تأخیر حرکت جریان نیز باید اضافه شود. همچنین تغییرات مقادیر افت جریان تحت شرایط کم‌آبی و تغییرات شدید کاهشی در جریان ورودی و نیز حساسیت سازه‌های آبگیر به تغییرات پایین‌افتادگی رقوم سطح اب در بالادست هر آبگیر نیز باید به صورت جداگانه مورد مطالعه قرار گیرد تا امکان برآورد دقیق مجموع تلفات و افت تحت هر سناریوی بهره‌برداری مشخص شود.

پیشنهاد کاربردی در راستای تکمیل فعالیت صورت‌گرفته 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 درجهٔ ۲ و درجهٔ ۳ است. منظور از افزایش دقت ارزیابی در اینجا، تدقیق مقدار نیاز آب روزانهٔ هر آبگیر است که به عنوان مخرج کسر شاخص کفایت 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 فرایند 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 از طرح شمارهٔ «۴۰۲۲۰۷۹» انجام شده است.

منابع

[1]. Eftekhari SH, Monem MJ. Determination Irrigation Canal Capacity and Achievable Flexibility for Arranged Delivery. Water and Irrigation Management. 2023 Sep 23;13(3):801-16. [Persian]

[2]. Orojloo M, Shahdany SM, Roozbahani A. Developing an integrated risk management framework for agricultural water conveyance and distribution systems within fuzzy decision making approaches. Science of the Total Environment. 2018 Jun 15;627:1363-76.

[3]. Bozorgi A, Roozbahani A, Hashemy Shahdany SM, Abbassi R. Development of multi-hazard risk assessment model for agricultural water supply and distribution systems using bayesian network. Water Resources Management. 2021 Aug;35(10):3139-59.

[4]. Ministry of Energy, Iran Water Resources Management CO. Deputy of Research, Office of Standard and Technical Criteria. General Design Criteria of Irrigation and Drainage System (Bulletin 281). Iranian Management and Planning Organization, 1994. Publication No.107, Tehran, Iran

[5]. Ostovari S, Monem MJ. 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. 2022 Dec;71(5):1294-303.

[6]. Shahverdi K, Mollazeiynali H, Marofi M. Design of Operation Strategy for Canal Structures. Journal of Hydraulics. 2023 Dec 22;18(4).

[7]. Fipps G. Potential water savings in irrigated agriculture for the Rio grande planning region (Region M). Texas Water Resources Institute. 2005.

[8]. Akkuzu E, Ünal HB, Karataş BS. Determination of water conveyance losses in the Menemen open canal irrigation network. Turkish Journal of Agriculture and Forestry. 2014;31(1):11-22.

[9]. Kedir Y. estimation of conveyance losses of Wonji-Shoa Sugar Cane Irrigation Scheme in Ethiopia. Journal of Environment and Earth Science. 2015;5(17):2224-3216.

[10]. Jadhav PB, Thokal RT, Mane MS, Bhange HN, Kale SR. improving conveyance efficiency through canal lining in command area: A Case Study. International Journal of Engineering Innovation & Research. 2014;3(6):820-826.

[11]. Karimi Avargani H, Hashemy Shahdany SM, Hashemi Garmdareh SE, Liaghat A. determination of water losses through the agricultural water conveyance, distribution, and delivery system, Case study of Roodasht Irrigation District, Isfahan. Water and Irrigation Management. 2020;10(1):143-156. [Persian]

[12]. Serra P, Salvati L, Queralt E, Pin C, Gonzalez O, Pons X. estimating water consumption and irrigation requirements in a Long-Established Mediterranean Rural Community by remote sensing and field data. Irrigation and Drainage. 2016;65(5):578-88.

[13]. Shahrokhnia MA, Olyan Ghiasi A. methods of seepage estimation in canals and evaluation of seepage and distribution efficiency in Doroodzan irrigation system. Journal of Water Management in Agriculture. 2018;4(2):27-36. [Persian]

[14]. Kaghazchi A, Shahdany SM, Roozbahani A. Simulation and evaluation of agricultural water distribution and delivery systems with a Hybrid Bayesian network model. Agricultural Water Management; 2021; 28(8):106578.

[15]. Ghumman AR, Ahmad S, Rahman S, Khan Z. 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; 2018; 42(1):153-64.

[16]. Dejen ZA. 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; 2015.

[17]. Soler, J., Gamazo, P., Rodellar, J., and Gómez, M. Operation of an irrigation canal by means of the passive canal control. Irrigation science; 2018; 33(2): 95-106

[18]. Shahverdi K, Maestre JM. Holistic Framework for Canal Modernization: Operation Optimization, and Economic and Environmental Analyses. Water Resources Management. 2023; 30(1):1-20.

[19]. Marashi A, Kouchakzadeh S, Yonesi HA. Rotary gate discharge determination for inclusive data from free to submerged flow conditions using ENN, ENN–GA, and SVM–SA. Journal of Hydroinformatics. 2023; 25(4): 1312–1328.

[20]. Akbari, M. Soil Water Balance and Crop Yield of Winter Wheat Using AquaCrop Simulation Model. Journal of Agricultural Engineering Research. 2012; 12(4):19-34.

[21]. Van Overloop PJ, Negenborn RR., De Schutter B, Van De Giesen NC. Predictive control for national water flow optimization in the Netherlands. Intelligent Infrastructures. 2010; 42(4):439-461.

[22]. Schuurmans J, Schuurmans W, Berger H, Meulenberg M, Brouwer R. Control of water levels in the Meuse river. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 1997;123(3):180-184.

[23]. Isapoor S, Montazer A, Van Overloop PJ, Van De Giesen N. Designing and evaluating control systems of the Dez main canal. Irrig. Drain. 2011;60(1):70-79.
[24]. Molden DJ, Gates TK. Performance measures for evaluation of irrigation-water-delivery systems. Journal of Irrigation and Drainage Engineering.1990;116(6):804-823.
[25]. Daneshfaraz R, Norouzi R, Abbaszadeh H, Azamathulla HM. Theoretical and experimental analysis of applicability of sill with different widths on the gate discharge coefficients. Water Supply. 2022; 22(10):7767-81.
[26]. Hassanzadeh, Yousef, and Hamidreza Abbaszadeh. Investigating Discharge Coefficient of Slide Gate-Sill Combination Using Expert Soft Computing Models. Journal of Hydraulic Structures. 2023; 9(1): 63-80.