مدیریت آب و آبیاری

دوره ۱۲ ■ شماره ۲ ■ تابستان ۱۴۰۱

صفحه‌های ۴۰۴-۳۸۹

DOI: 10.22059/jwim.2022.342002.984

مقاله پژوهشی:

ارزیابی عملکرد توزیع آب آبیاری در کانال‌های اصلی و فرعی شبکه آبیاری آبشار اصفهان تحت سناریوهای بهره‌برداری نرمال و کم‌آبی

سروش برخورداری[۱]، ملیکا ابراهیم نجاری[۲]، سید مهدی هاشمی شاهدانی[۳*]

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکدگان ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکدگان ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۳. دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکدگان ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۲/۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۱۰

چکیده

این مطالعه با توسعه مدل شبیه‌ساز هیدرولیک جریان در کانال آبیاری، اقدام به ارزیابی مکانی کفایت توزیع آب در محدوده شبکه آبیاری آبشار اصفهان نمود. برای این منظور شبیه‌سازی توزیع آب بین آبگیرهای کانال اصلی و فرعی، در طول یک فصل آبیاری، براساس تحلیل مکانی شاخص ارزیابی عملکرد کفایت توزیع آب، انجام شد. برنامه‌ریزی توزیع و تحویل روزانه، مطابق با آن‌چه در واقعیت انجام می‌شود، براساس اطلاعات حقابه، فروش آب و سهم مشخص‌شده برای هر دریچه آبگیر درجه دو و درجه سه، تهیه و با مدل ساده‌شده ریاضی انتگرالی-تأخیری در محیط MATLAB لینک شد. پنج سناریوی بهره‌برداری، نماینده شرایط نرمال، پرآبی و کم‌آبی، مطابق با الگوهای غالب تخصیص آب سطحی در نظر گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی در کانال‌های اصلی و فرعی، حاکی از روند غالباً کاهشی کفایت تحویل آب از آبگیرهای بالادست تا پایین‌دست، بوده به‌طوری‌که تحت سناریوهای کم‌آبی پنج، ۱۵ و ۳۰ درصد شاخص کفایت به‌ترتیب در محدوده‌های ۶۹-۴۱ درصد، ۹۵-۲۹ درصد و ۶۵-۱۹ درصد متغیر بوده است. توجیه این پدیده علاوه بر ماهیت کنترل بالادستی‌بودن بهره‌برداری، به ناکارآمدی روش سنتی بهره‌برداری دستی و هم‌چنین عدم انعطاف‌پذیری کافی سازه‌های تنظیم سطح آب و آبگیرها، در توزیع قابل اعتماد آب آبیاری تحت سناریوهای کم‌آبی می‌باشد. با کاهش جریان ورودی، به سبب کم‌آبی، آسیب‌پذیری فرایند توزیع آب در آبگیرهای پایین‌دست افزایش یافته و شرایط مطلوب تحویل آب تنها در تعداد محدودی از آبگیرها واقع شده در ابتدای کانال‌های اصلی و فرعی دیده می‌شود.

کلیدواژه‌ها: تحلیل مکانی توزیع آب، شبکه آبیاری آبشار، شبیه‌سازی هیدرولیک جریان، کفایت توزیع آب آبیاری، کم‌آبی.

Performance Appraisal of Irrigation Water Distribution within the Abshar Irrigation Districts' Main and Lateral Canals in Normal and Water Shortages Operational Scenarios

Soroush Barkhordari[1], Melika Ebrahim Najari[2], S. Mehdy Hashemy Shahdany[3*]

1. M.Sc. Graduated in Water Structure, Department of Water Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran.
2. M.Sc. Student of Water Resources, Department of Water Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran.
3. Associate Professor, Department of Water Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran.

Received: April 23, 2022 Accepted: July 01, 2022

Abstract

By developing a hydraulic simulator model of flow in irrigation canals, this study proceeded to spatially evaluate the adequacy of irrigation water distribution in the main and secondary canals of the waterfall irrigation network located in Isfahan province. For this purpose, a water distribution simulation between main and secondary canal catchments was performed during an irrigation season, based on spatial analysis of the water distribution performance adequacy index. According to what is done, daily distribution and delivery planning based on the information of water supply, water sales, and specified share for each second and third-degree intake valve, and with a simplified integral-delay mathematical model in MATLAB environment was linked. Five exploitation scenarios, representing normal conditions, waterlogging, and water scarcity, were considered following the prevailing patterns of surface water allocation - based on information collected in the last ten years from the irrigation network operation office. The simulation results in the main and secondary canals indicate a frequently decreasing trend of water delivery adequacy from upstream to downstream catchments, so that the adequacy index under water deficit scenarios of five, 15 and 30 percent in the range of 41-69 percent, respectively, 95-29 percent and 65-19 percent. The required water has reservoirs located downstream of the main canals. In addition to the nature of upstream control of the operation, the justification for this phenomenon is the inefficiency of the traditional manual operation method and the insufficient flexibility of water level adjustment structures and reservoirs in the reliable distribution of irrigation water under water scarcity scenarios. With the decrease in inlet flow due to water shortage, the vulnerability of the water distribution process in the downstream catchments has increased, and the favorable water delivery conditions can be seen only in a limited number of catchments located at the beginning of the main and secondary canals.

Keywords: Abshar Irrigation District, Adequacy of water distribution, Flow hydraulic simulation, Water deficit, Water distribution spatial analysis.

* نویسنده مسئول Email: mehdi.hashemy@ut.ac.ir

مقدمه

افزایش جمعیت و تغییر سبک زندگی از سنتی به مدرن، سبب نیاز روزافزون و تنوع بیش‌تر محصولات غذایی شده، اما رشد مصارف شهری و صنعتی، موجب شده که آب کم‌تری نسبت به گذشته به بخش کشاورزی، به‌عنوان عمده‌ترین مصرف‌کننده آب اختصاص داده می‌شود. این در حالی است که تغییرات اقلیمی، وقوع خشک‌سالی‌های متواتر و مستمر در دهه‌های اخیر و کاهش محسوس منابع آب تجدیدپذیر در مناطق خشک و نیمه‌خشک، امکان تأمین به‌موقع و مناسب آب، متناسب با کل تقاضای کشاورزی را با یک مشکل چالش‌برانگیز مواجه ساخته است. در این ارتباط دامنه وسیعی از راه‌کارهای مدیریت تأمین محور با تمرکز بر شناسایی و ایجاد منابع جدید آب برای مصارف کشاورزی به‌کار برده شده است. نکته دارای اهمیت آن است که با توجه به هزینه‌های بالای تأمین و توزیع آب کشاورزی در مقایسه با قیمت قابل‌فروش آب کشاورزی در کشورهای در حال توسعه، راه‌کار تأمین محور نتوانسته پاسخی مطمئن و قابل‌اعتماد برای مشکل مذکور باشد. بنابراین در این شرایط مسأله اصلی متولیان بخش کشاورزی، بهره‌برداری هدفمند از منابع محدود آب تأمین‌شده با توسعه راهبرد مدیریت تقاضامحور، به‌منظور کاهش تلفات در سیستم‌های انتقال، توزیع، تحویل و کاربرد آب کشاورزی می‌باشد. مدیریت تقاضامحور با به کارگیری سیستم‌های نوین در قالب سیستم‌های تحت فشار آبیاری و با هدف کاهش تلفات آب کشاورزی در مقیاس مزرعه نتایج موفقیت‌آمیزی داشته است. مشکل بزرگ در ارتباط با اعمال مدیریت آب در مقیاس سیستم‌های خارج مزرعه (سیستم‌های انتقال و توزیع آب کشاورزی) است که تلفات قابل‌ملاحظه‌ای دارند. سیستم‌های انتقال، توزیع و تحویل آب کشاورزی در شبکه‌های آبیاری وظیفه تحویل مناسب منابع تأمین‌شده آب سطحی را برعهده دارند. مطالعات و بررسی‌های مختلف در مورد نحوه عملکرد سامانه‌های توزیع آب کشاورزی حاکی از عملکرد ضعیف مدیریت بهره‌برداری این شبکه کانال‌های روباز در تحویل ناکافی، غیرمطمئن و ناعادلانه آب کشاورزی به کشاورزان واقع در بالادست و پایین‌دست این شبکه‌ها دارند (Orojloo *et al*., 2017; Yaltaghian Khiabani & Hashemy Shahdany, 2018) پژوهش‌های مختلفی در ارتباط با تخمین میزان تلفات در سامانه‌های توزیع آب کشاورزی در شبکه‌های آبیاری انجام شده و محدوده متفاوتی از تلفات آب در این سامانه‌ها گزارش شده است (Azargashb *et al*., 2020).

Fipps (2005) در پژوهشی که انجام داده‌اند، میزان تلفات در سیستم انتقال و توزیع آب کشاورزی واقع در Lower Rio Grande Valley در تگزاس را ۳۰ درصد گزارش نمودند. Akkuzu *et al*. (2007) پژوهشی را با هدف تعیین میزان تلفات انتقال آب در شبکه Hilla-Kifil در کشور عراق انجام دادند. نتایج نشان داد میزان تلفات ۱۹ درصد بوده و به‌طورکلی، کارهای تعمیر و نگهداری و تعمیر کانال‌های انتقال کافی نبوده است. طی پژوهش‌های انجام‌شده، میزان تلفات در سامانه‌های توزیع آب کشاورزی در شبکه آبیاری Wonji-Shoa در کشور اتیوپی را Kedir (2015)، حدود ۱۲ درصد، Jadhav *et al*. (2014) در شبکه Panchnadi در هندوستان، حدود ۲۵ درصد، Akkuzu *et al*. (2007) در برخی از شبکه‌های آبیاری در کشور ترکیه حدود ۳ درصد در هر ۱۰۰۰ متر، Karimi Avargani *et al*. (2020) در شبکه آبیاری رودشت واقع در منطقه خشک مرکزی ایران در حدود ۵۰ درصد، Serra *et al*. (2016) در شبکه‌های آبیاری کشور اسپانیا حدود ٤٥ درصد، Shahrokhnia & Olyan Ghiasi (2018)، بازده توزیع در کانال‌های آبیاری در شبکه درودزن در حدود ۸۱ درصد، گزارش داده‌اند. براساس پژوهش Riahi *et al*. (2013)، میزان بازده انتقال آب در

کانال‌های بتنی استان کرمان بین ۵۷ تا ۸۱ درصد و پژوهش Maroufi & Soltani (2006)، بازده‌های انتقال آب در شبکه آبیاری شاوور خوزستان را بین ۳٤ تا ۸۳ درصد و بازده شبکه توزیع را بین ٤۵ تا ۸٦/۵ درصد بررسی و گزارش شدند. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش Sheyni *et al.* (2015) با هدف ارزیابی میزان توزیع آب در شبکه آبیاری دز در استان خوزستان نشان داد متوسط بازده انتقال در کانال‌های اصلی و فرعی سبیلی ٦۵/۲ و E4 برابر با ۵٦/۸ درصد است. هم‌چنین Abbasi *et al.* (2017) با بررسی‌های میدانی در شبکه‌های مختلف آبیاری کشور حاکی از بازده انتقال و توزیع در سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۰ و سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۳۹٤ را به‌ترتیب ٦۸/۵ و ۷٤/۲ گزارش داده‌اند. Mohammadi *et al.* (2019) با هدف ارزیابی انتقال آب در شبکه ورامین واقع در منطقه نیمه‌خشک مرکزی ایران، میزان تلفات را حدود ۱۲ درصد برآورد کردند.

بنابراین، یکی از اقدام‌های اساسی و کاربردی در این زمینه بهبود برنامه‌ریزی توزیع آب کشاورزی در شبکه کانال‌های به‌هم‌پیوسته است تا بتوان علاوه بر کاهش تلفات ناشی از مدیریت ناصحیح توزیع آب کشاورزی، افزایش رضایت کشاورزان از تأمین به‌موقع، کافی و عادلانه آب را به‌همراه داشت. بر پایه این نیاز پروژه‌های مدرن‌سازی، بهسازی و نوسازی این سامانه‌ها در شبکه‌های آبیاری مختلف در اقصی نقاط دنیا در اولویت قرار گرفته‌اند. بررسی مطالعات نشان داد که پروژه‌های مذکور در قالب الف- بارزیابی عملکرد فرایند توزیع و تحویل آب از نظر زمان و میزان توزیع تحت سناریوهای مختلف بهره‌برداری، ب- ارتقای سامانه‌های کنترل به سامانه‌های کنترل خودکار متمرکز و غیرمتمرکز و ج- بهره‌گیری از روش‌های سازه‌ای مانند استفاده از مخازن ذخیره آب در خارج از مسیر کانال یا مخازن درون مسیر کانال توصیه‌شده است. با درنظرگرفتن تمام محدودیت‌ها و مشکلات پیش رویِ پروژه‌های بهسازی توزیع آب کشاورزی، توصیه می‌شود در گام نخست، ارزیابی عملکرد سامانه توزیع آب کشاورزی- که از منابع آب سطحی تأمین می‌شود- تحت شرایط بهره‌برداری مختلف- که منشأ تغییر شرایط بروز پدیده کم‌آبی در اکثر نقاط کشور است- به نحو مناسبی انجام شود. انتخاب و میزان اثرگذاری راه‌کارهای بهبود عملکرد در پروژه‌های بهسازی و نوسازی، در گرو ارزیابی دقیق اولیه عملکرد سازه‌های هیدرولیکی موجود در شبکه و نیز تشخیص نقاط ضعف و قوت سامانه بهره‌برداری در شبکه آبیاری خواهد بود. بنابراین به‌منظور تحقق این هدف، پژوهش حاضر، برای اولین‌بار اقدام به ارزیابی نحوه کارکرد سیستم کنونی بهره‌برداری شبکه آبیاری آبشار اصفهان از نقطه‌نظر کفایت توزیع آب در سطح شبکه نموده است. شبیه‌سازی نحوه توزیع آب کشاورزی در کانال‌های اصلی (دو کانال) و کانال‌های فرعی (نه کانال) با توسعه مدل شبیه‌ساز هیدرودینامیک صورت گرفت و تحلیل مکانی توزیع آب در سطح شبکه انجام شد.

مواد و روش‌ها

شبکه آبیاری و زهکشی آبشار

شبکه آبیاری آبشار واقع در حوضه آبریز زاینده‌رود و دشت کوهپایه و سگزی (شرق استان اصفهان) و با ارتفاع تقریبی ۱۵۰۰ متر بالاتر از سطح دریا، در منطقه مرکزی ایران واقع شده است. مساحت در حال بهره‌برداری شبکه در حدود ۲۱ هزار هکتار می‌باشد و موقعیت مکانی آن در عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۲۸ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ٤۲ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۵۷ دقیقه شرقی قرار گرفته است. میانگین بارندگی سالانه در این منطقه ۱۲۰ میلی‌متر است که این میزان بسیار کم‌تر از متوسط بارندگی سالانه در ایران، در حدود ۲٤۰ میلی‌متر می‌باشد. این درحالی است که میزان تبخیر و تعرق در این منطقه حدود ۱۵۰۰ میلی‌متر در سال برآورد شده است.

منبع اصلی تأمین‌کننده آب این شبکه آبیاری، آب رهاشده از سد انحرافی آبشار می‌باشد. در طرفین سد انحرافی آبشار، در منشأ تأمین آب این شبکه آبیاری، دو رشته کانال اصلی چپ و راست به‌منظور برداشت آب جهت با هدف تحت پوشش قراردادن اراضی به وسعت ۳۲۰۰۰ هکتار (که بنابر اطلاعات اخذشده از شرکت آب منطقه‌ای اصفهان در حال حاضر در حدود ۲۱ هزار هکتار در حال بهره‌برداری است) احداث شده است. عملیات ساخت سد انحرافی آبشار با هدف افزایش تراز سطح آب رودخانه و هم‌چنین انحراف آب به کانال‌های راست و چپ آبشار در سال ۱۳۴۹ آغاز و در سال ۱۳۵۲ به بهره‌برداری رسیده است. سد انحرافی آبشار از نوع بتنی با چهار دریچه قطاعی فولادی و دو دریچه تخلیه تحتانی می‌باشد.

از جمله ویژگی‌های این شبکه مجهزبودن به سیستم دریچه‌های برداشت آب نیرپیک می‌باشد. این دریچه‌ها امکان برداشت کنترل شده و اندازه‌گیری حجمی آب را فراهم می‌آورند. شبکه آبیاری آبشار دارای دو رشته کانال اصلی درجه یک به طول حدود ٦٩ کیلومتر و با ظرفیت حدود ١٦ مترمکعب در ثانیه و ١٠ رشته کانال فرعی درجه دو به طول حدود ٦١ کیلومتر با ظرفیت حدود ٣٠٠ تا ٢٤٠٠ لیتر در ثانیه و نیز حدود ١٨٠ کیلومتر جمع‌کننده و زهکش سطحی روباز است. دریچه‌های برداشت آب از نوع نیرپیک تیپ XX2، L2 و C2 می‌باشند. سازه‌های تنظیم سطح آب دینامیک از نوع نیرپیک و تیپ آمیل می‌باشند که به‌دلیل برخورداری از دقت بالا، امکان مدیریت مؤثر بهره‌برداری در شبکه را فراهم می‌آورند. کنترل و تنظیم سطح آب به دو شیوه کنترل بالادست، با به‌کارگیری ٣٢ سازه خودکار هیدرومکانیکال آمیل و یک سازه بتنی ثابت Duck-Bill صورت می‌گیرد. تحویل و توزیع سطح آب در طول کانال‌های اصلی توسط ٦٠ آبگیر انجام می‌گیرد که به‌صورت دستی بهره‌برداری می‌شوند. براساس اطلاعات جمع‌آوری‌شده از دفتر بهره‌برداری شبکه آبیاری آبشار، عملکرد ضعیف بهره‌برداری این شبکه منجر به هدررفت در حدود ٣٠ تا ٤٠ درصد جریان ورودی در سامانه‌های انتقال، توزیع و تحویل آب کشاورزی می‌شود. از این‌رو، جهت رفع این مشکل، کشاورزی وابسته به منابع آب زیرزمینی گسترش پیدا کرده است، به‌نحوی‌که در حال حاضر با برداشت سالانه حدود ١٠٢ میلیون مترمکعب از حدود ٩٠٠٠ حلقه چاه حفرشده در داخل شبکه آبیاری آبشار، حجم آب برداشتی در محدوده این شبکه در حدود ٨ درصد کل برداشت از منابع آب زیرزمینی در محدوده شبکه‌های آبیاری حوضه زاینده‌رود می‌باشد. شکل (٢) شمایی از پراکندگی انبوهی از چاه‌های کم‌عمق، نیمه‌عمیق و عمیق در داخل محدوده شبکه آبیاری آبشار را نشان می‌دهد. تعداد و موقعیت چاه‌های حفرشده به تفکیک نوع چاه (عمیق و نیمه‌عمیق) در سال‌های ٢٠٠٣ الی ٢٠١٩ بر روی آبخوان این منطقه شاهد افزایش چشم‌گیر ٣٠١/٢ و ٦٦/٤٣ درصدی به‌ترتیب برای حفر چاه‌های نیمه‌عمیق و چاه‌های عمیق می‌باشد. افزایش روزافزون حفر چاه‌ها و بهره‌برداری از آن برای مصارف کشاورزی این منطقه را به یکی از دشت‌های بحرانی کشور تبدیل کرده است.

شبیه‌سازی توزیع و تحویل آب در کانال آبیاری

به‌منظور ارزیابی عملکرد سیستم بهره‌برداری فعال در شبکه آبیاری آبشار، لازم است که شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در کانال‌های اصلی و فرعی شبکه انجام گیرد. با توجه به تعداد محدود این شبیه‌سازها و هم‌چنین هزینه بالای خریداری مجوز قانونی این قبیل نرم‌افزارهای تجاری، در این پژوهش مدل ریاضی هیدرولیک جریان در کانال اصلی سیستم توزیع آب در محیط نرم‌افزار MATLAB برنامه‌نویسی شد تا امکان تبادل اطلاعات با برنامه‌های زمانی تغییر بازشدگی دریچه‌های آبگیر (برنامه‌ریزی روزانه تحویل و توزیع آب) به‌راحتی امکان‌پذیر شد.

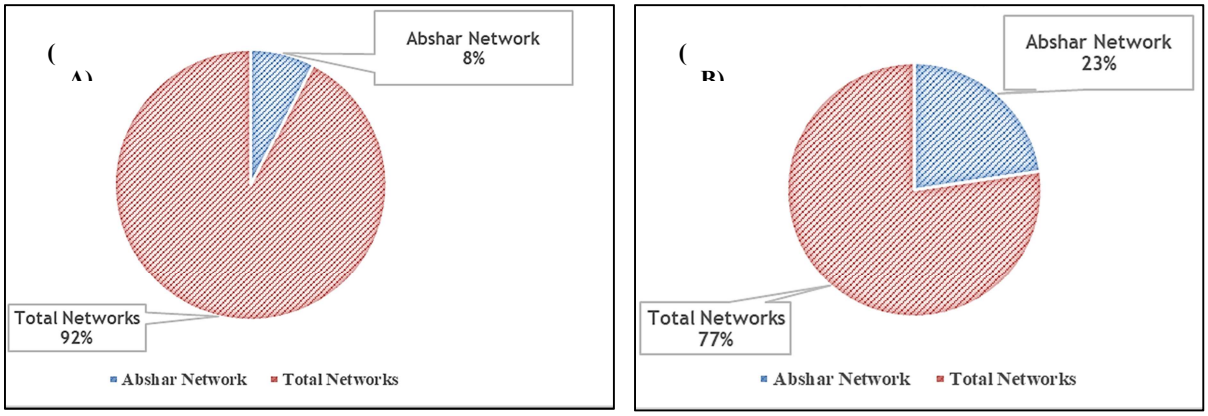

Figure 1. (A) Groundwater extraction ratio within the Abshar irrigation district to the Zayandeh-Rud basin, (b): Legal drilled tube-wells ration within the Abshar irrigation district to the Zayandeh-Rud basin

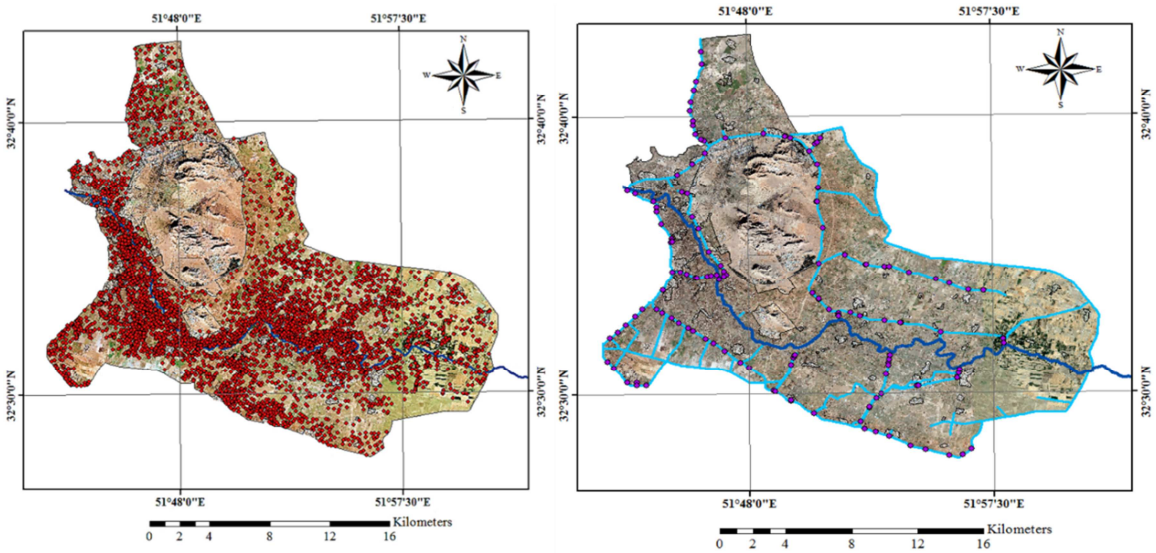

Figure 2. Schematic of the drilled shallow, semi-deep, and deep tube-wells within the Abshar Irrigation District territory, extracting water from the aquifer and the main and lateral canals

شایان ذکر است که به‌کارگیری مدل‌های ریاضی باید به‌نحوی صورت پذیرد که پارامترهای هیدرولیکی جریان (شامل رقوم سطح آب در مجاورت سازه‌های تنظیم سطح آب و دبی تحویلی به هرکدام از آبگیرها) در مدل توسعه داده‌شده قابل رصد باشد. از بین مدل‌های ریاضی موجود تنها مدل سنت ونانت خطی‌شده و مدل انتگرالی-تأخیری[1] (ID) در پروژه‌های مدرن‌سازی سامانه‌های آبی جایگاه مناسبی پیدا کرده است. مدل سنت ونانت خطی‌شده، به‌طورکلی در پروژه‌های چندهدفه مانند کنترل آنی کمیت و کیفیت جریان یا خودکارسازی سامانه‌های بزرگ انتقال آب مثل رودخانه‌ها که دقت بالایی از کنترل سطح آب موردنیاز است، مورداستفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش از مدل ریاضی ID برای شبیه‌سازی جریان در کانال اصلی سیستم توزیع آب استفاده شده است. در پروژه‌های پژوهشی و عملی خودکارسازی در کانال‌های آبیاری در اکثر موارد به‌سبب راحتی محاسبات و تأمین دقت موردنیاز از مدل ID استفاده شده است (Van Overloop *et al.*, 2010).

در مدل مذکور، هر بازه کانال اصلی سیستم 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 به‌دست می‌آید. این دو مشخصه اصلی در هر بازه کانال عبارتند از زمان تأخیر (τ) و سطح ذخیره (A_s). در بخش اول (جریان یکنواخت) فرض می‌شود که موج جریان ورودی جریان فقط به سمت پایین‌دست منتقل می‌شود. هر تغییری در سازه تنظیم‌کننده سطح آب بالادست منجر به تولید یک موج می‌شود، این بخش از کانال فقط به‌عنوان گذار برای عبور این موج عمل می‌کند. شایان‌ذکر است که سرعت موج در یک بازه از کانال با عمق نرمال، به سرعت موج سینماتیک نزدیک است (Schuurmans *et al.*, 1997). 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:

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

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) می‌باشد. بخش منحنی برگشت آب (بخش دوم) مانند یک مخزن عمل می‌کند و بخش انتگرالی مدل را شامل می‌شود. تغییرات مساحت سطح افقی آب در ترازهای مختلف مخزن (A_s) براساس دبی‌های ورودی و خروجی از بازه کانال به‌صورت رابطه (۲)، در حوزه زمان و حوزه فرکانس، قابل‌بیان است (Schuurmans *et al.*, 1997):

(رابطه ۲)

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

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

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

واسنجی و صحت‌سنجی مدل بهره‌برداری کانال موردمطالعه این پژوهش که با استفاده از مدل ریاضی ساده‌شده ID توسعه داده شد، براساس اطلاعات اندازه‌گیری‌شده در محل (در دوره زمان بهره‌برداری سال‌های ۱۳۹۰-۱۴۰۰) انجام گرفت. لازم به توضیح است که به‌دلیل کمبود آب، در برخی از سال‌های اخیر دوره توزیع آب محدود به چند هفته شد که به‌منظور عدم تأثیر این شرایط در نتایج پژوهش، سعی شد بازه زمانی کاملی از توزیع آب در کانال‌ها براساس آمار ده‌ساله جمع‌آوری‌شده از شرکت آب منطقه‌ای اصفهان انجام گیرد. با واسنجی مدل بر پایه میزان تطبیق داده‌های دبی تحویلی به کلیه آبگیرهای واقع در کانال اصلی سیستم توزیع آب، به‌عنوان ضریب واسنجی، انجام گرفت. برای مقایسه مقادیر شبیه‌سازی‌شده با مقادیر مشاهداتی از شاخص‌های ارزیابی ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب خطای پس‌ماند (CRM) و میانگین خطای مطلق (MAE) استفاده شد. مدل تهیه‌شده براساس داده‌های دبی تحویلی به کلیهٔ آبگیرهای کانال، برای کشت بهاره بازه ده‌ساله واسنجی شد که مقادیر شبیه‌سازی‌شده با مقادیر مشاهده‌شده مقایسه شدند. مدل، با تغییر زمان تأخیر در بازه و بررسی انطباق مقادیر شبیه‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری‌شده دبی تحویلی به آبگیرها واسنجی شد. تحویل و توزیع سطح آب در طول کانال‌های اصلی توسط ۳۸ آبگیر- کانال اصلی شاخه جنوبی (چپ)- و ۲۰ آبگیر- کانال اصلی شاخه شمالی (راست) و در کانال‌های

فرعی ده‌گانه توسط ۷۷ آبگیر انجام می‌گیرد که به‌صورت دستی بهره‌برداری می‌شوند. در این مطالعه سیستم توزیع آب بخش شمالی شبکه آبیاری، شامل ۵۸ منطقه زراعی که توسط ۵۸ آبگیر واقع در کانال اصلی تأمین می‌شود. با توجه به شرایط سازه‌ای کانال اصلی سیستم توزیع آب محدوده موردمطالعه، فرم مدل ماتریسی فضای حالت، مطابق رابطه (۳)، با ابعاد مختلف ماتریس، به تفکیک کانال‌های آبیاری- دو کانال اصلی و ۱۰ کانال فرعی- به‌دست آمد. با تبدیل روابط به‌دست‌آمده برای تمامی بازه‌ها، به‌جهت بزرگ‌بودن ماتریس‌ها، مدل ماتریسی فضای حالت تنها برای بازه اول در رابطه (۳) آورده شده است.

(رابطه ۳)

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

$$u^*(k) \geq h_{\min}(k) - h_{ref},$$
$$u^*(k) \leq h_{\max}(k) - h_{ref},$$

که در این رابطه، $Q_{hg}(k)$، $Q_{hg}(k-1)$، $Q_{hg}(k-2)$ و $Q_{hg}(k-3)$ به‌ترتیب دبی‌های کنترلی رهاشده از سازه تنظیم سراب کانال در گام‌های زمانی *k-3* تا k می‌باشد. زمان تأخیر بین ورود آب از سراب تا تغییر ایجادشده رقوم سطح آب در انتهای پایین‌دست اولین بازه کانال موردمطالعه برابر سه گام زمانی می‌باشد. $e_1(k)$ خطای محاسبه‌شده (رقوم سطح آب اندازه‌گیری‌شده از رقوم هدف) برای بازه اول کانال و $e_1^*(k)$ متغیر حالت اضافه‌شده به سیستم است که دربرگیرنده محدودیت نرم ناشی از تجاوز رقوم سطح آب از رقوم حداکثر و حداقل در بازه اول می‌باشد. $u^*(k)$ مقداری است که از میزان خطای ناشی از انحراف سطح آب از سطح هدف کم می شود تا مقدار $e_1^*(k)$ را به‌وجود آورد. درواقع 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.

شاخص ارزیابی عملکرد توزیع آب در کانال‌های آبیاری و سناریوهای بهره‌برداری

در این پژوهش پنج سناریوی کلی بهره‌برداری، بر پایه حالت‌های واقعی رخ‌داده در منطقه موردمطالعه که از الگوهای مختلف تخصیص آب به شبکه آبیاری (در محل بند انحرافی) در طول ده سال گذشته، در نظر گرفته شده است که به‌صورت کلی از عبارت سناریوی بهره‌برداری نرمال، پرآبی و کم‌آبی یاد می‌شود. در سناریوی بهره‌برداری نرمال، دبی ورودی به کانال اصلی با میزان کل تقاضای آب کشاورزی- منظور حقابه کشاورزی مشخص یا سهم مشخص‌شده برای هر دریچه آبگیر- مطابقت دارد، درحالی‌که در سناریوی پرآبی میزان آب ورودی به

شبکه ۲۰ درصد افزایش و در سناریوهای کم‌آبی، میزان آب ورودی به شبکه آبیاری به‌ترتیب پنج، ۱۵ و ۳۰ درصد کاهش کاهش‌یافته اما در عین‌حال میزان تقاضای آب کشاورزی در محل هر آبگیر تغییر نکرده است.

ارزیابی توزیع آب سطحی توسط مدل‌های بهره‌برداری توسعه داده‌شده این پژوهش توسط شاخص ارزیابی عملکرد «کفایت توزیع آب سطحی» انجام شد. شاخص‌های کفایت و پایداری به‌صورت رابطه (٤) تعریف می‌شود (Molden & Gates, 1990):

$$PA=\frac{1}{T}\sum_{T}\left[\frac{1}{R}\sum_{R}\left(\frac{Q_D}{Q_R}\right)\right], \quad \text{(رابطه ٤)}$$

که در آن PA شاخص کفایت توزیع آب (درصد)، T مدت‌زمان بهره‌برداری (s)، R تعداد کل آبگیری‌های واقع در کانال اصلی، QD دبی تحویلی به هر آبگیر (m^3/s) و QR 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 توصیه‌شده توسط Molden & Gates (1990) سه دسته که بیانگر بهره‌برداری مطلوب ($PA\in(90-100)$)، قابل‌قبول ($PA\in(80-90)$) و ضعیف ($PA\leq 80$) سیستم توزیع آب می‌باشد، قابل‌ارائه است.

نتایج و بحث

واسنجی و صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی جریان در کانال‌های آبیاری

به‌منظور واسنجی و صحت‌سنجی مدل ریاضی بهره‌برداری سامانه انتقال و توزیع شبکه آبشار با استفاده از شبیه‌ساز هیدرولیک جریان توسعه داده‌شده در این پژوهش، شاخص‌های آماری RMSE، CRM و MAE محاسبه و موردارزیابی قرار گرفت. این ارزیابی براساس شبیه‌سازی دوره بهره‌برداری ۱۵۰ روزه‌ای صورت گرفت که داده‌های بهره‌برداری، شامل دبی ورودی به کانال اصلی و دبی تحویلی به آبگیرها در طول کانال اصلی، در سطح کانال موردمطالعه اندازه‌گیری شده بود. بر این اساس، ۷۵ روز از این ۱۵۰ روز برای واسنجی و ۷۵ روز برای صحت سنجی استفاده شد. همان‌طورکه پیش‌تر گفته شد، واسنجی مدل به‌صورت آزمون و خطای دبی تحویلی به هر سازه آبگیر واقع در کانال اصلی آبشار انجام شد. نتایج واسنجی نشان داد که MAE، برای دوره واسنجی برابر ۰/۸۷ و برای دوره صحت‌سنجی۱/۲۳ 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 CRM، برای دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی، به‌ترتیب برابر ۰/۰۰۲- و ۰/۰۰۷- می‌باشند، با توجه به این‌که بهترین میزان برای CRM صفر می‌باشد، مقادیر کم این شاخص حاکی از دقت قابل‌قبول مدل در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی است. درنهایت میزان شاخص RMSE، برای دوره واسنجی برابر ۰/۹۱ و برای دوره صحت‌سنجی ۱/۰۹ مترمکعب بر ثانیه به‌دست آمدند. مقادیر مناسب این شاخص نیز دقت مدل را مورد تأیید قرار می‌دهد.

نتایج شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد تحویل و توزیع آب در شبکه آبیاری آبشار

ارزیابی عملکرد موضعی (نقطه‌ای) در محل هر آبگیر

به‌منظور بررسی وضع موجود بهره‌برداری سامانه انتقال و توزیع آبیاری در این پژوهش، شبیه‌سازی بهره‌برداری وضع موجود به تفکیک هرکدام از کانال‌های اصلی (شاخه شمالی (راست) و شاخه جنوبی (چپ)) و فرعی توسط مدل کالیبره‌شده، انجام گرفت و نتایج استخراج شدند. سپس ارزیابی تحویل و توزیع آب به‌صورت نقطه‌ای (به

تفکیک هر سازه آبگیر)، منطقه‌ای (در سه ناحیه بالادست، میان‌دست و پایین‌دست) و کلی (منظور کل آبگیرهای واقع در امتداد هر کانال) با بهره‌گیری از شاخص کفایت تحویل و توزیع آب و به‌ازای سناریوهای مختلف انجام شد. بدین صورت که در ارزیابی نقطه‌ای، شاخص ارزیابی عملکرد کفایت توزیع و تحویل آب برای آبگیرهای واقع در طول کانال اصلی محاسبه شد. هم‌چنین به‌منظور بررسی منطقه‌ای تحویل و توزیع آب در هر کانال، شاخص موردنظر در بالادست، میان‌دست و پایین‌دست برآورد شد. شایان ذکر می‌باشد که در ارزیابی شاخص کفایت با استفاده از این روش، تعداد آبگیرها در هر بازه (بالادست، میان‌دست و پایین‌دست) حتی‌الامکان یکسان انتخاب شده و ارزیابی کفایت تحویل و توزیع آب در امتداد هر بازه براساس متوسط شاخص‌های کفایت توزیع و تحویل آب برای آبگیرهای واقع در امتداد آن بازه محاسبه می‌شود. از طرفی دیگر به جهت ارائه دیدگاه جامع برای مدیر شبکه، شاخص کفایت با استفاده از روش مذکور در کل کانال نیز محاسبه شدند و تحویل و توزیع آب با توجه به سناریوهای مختلف بررسی شده است. با توجه به تعداد زیاد کانال‌های این شبکه، که شبیه‌سازی توزیع آب همه آن‌ها توسط مدل توسعه داده‌شده انجام و تحلیل شده است، صرفاً نتایج شبیه‌سازی‌شده طولانی‌ترین کانال که ظرفیت عبوری بیش‌تر و تعداد آبگیر بیش‌تری دارد، ارایه شده است. در این راستا، نتیج شبیه سازی و ارزیابی برای کانال اصلی شاخه شمالی (راست)- به‌عنوان نماینده کانال اصلی- و کانال فرعی پنج- به‌عنوان نماینده کانال‌های فرعی- در ادامه ارائه و بحث خواهد شد.

هرکدام از نمودارهای ارائه‌شده در شکل‌های (3A-E) میانگین شاخص کفایت توزیع آب- که نمایانگر میزان متوسط تحویل آب آبیاری به هر آبگیر واقع‌شده در کانال اصلی شاخه شمالی (راست) در طول دوره شبیه‌سازی است- را به‌ازای سناریوهای بهره‌برداری مختلف نشان می‌دهد. مطابق با نتایج ارائه‌شده، با کاهش جریان ورودی به کانال اصلی موردنظر در شبکه آبشار، در تمامی سناریوهای بهره‌برداری مربوطه (سناریوهای کم‌آبی ۵-، ۱۵- و ۳۰- درصد)، میزان متوسط شاخص کفایت در کل امتداد مسیر کانال به‌طور مستقیم تحت تأثیر قرار گرفته که باعث کاهش مطلوبیت بهره‌برداری سیستم متناسب با هر سناریو شده است.

روند کاهشی کفایت تحویل آب از آبگیرهای بالادست تا آبگیرهای پایین‌دست در سناریو نرمال و سایر سناریوهای مربوط به کم‌آبی، نشان از ضعف مدیریت صحیح توزیع آب و ناکارآمدی شبکه در تحویل آب موردنیاز آبگیرهای واقع در میان دست و به‌ویژه پایین-دست این کانال دارد. توجیه این پدیده علاوه بر ماهیت کنترل بالادستی‌بودن بهره‌برداری، به نحوه سازوکار و تنظیم‌کردن سازه‌های تنظیم سطح آب و نیز سازه‌های آبگیر این سیستم که به‌صورت دستی (روش سنتی و متکی بر اپراتور) است، برمی‌گردد. نتایج حاکی از آن است حتی در زمان نبود کم‌آبی (تحت سناریوی نرمال بهره‌برداری)، مقادیر کفایت تحویل آب، به‌جز چهارده آبگیر ابتدایی کانال (حدود ٤٠ درصد از آبگیرهای ابتدایی کانال)، در بیش‌ترین حالت خود مقدار۸۰ درصد را تجربه می‌کنند و با کاهش این شاخص برای ٦٠ درصد باقی‌مانده آبگیرها (واقع در میانه و انتهای کانال) آسیب-پذیری در آبگیرهای پایین‌دست افزایش یافته و بنابراین شبکه قادر به تأمین نیاز آبگیرها نیست. این روند کاهشی در سایر سناریوهای بهره‌برداری مربوط به کم‌آبی نیز به‌طور واضحی قابل‌مشاهده است. به‌طوری‌که به‌ازای کاهش جریان ورودی متناسب با سناریوهای مربوط به شرایط کم‌آبی، میزان متوسط شاخص کفایت به همان

نسبت از میزان مطلوب فاصله گرفته است و شرایط مطلوب تحویل آب تنها در تعداد محدودی از آبگیرها (بالاخص آبگیرهای واقع‌شده در ابتدای کانال) مشاهده خواهد شد. به‌عبارت دیگر، مقدار موردنظر برای شاخص کفایت (حداقل ۸۰ درصد) برای هرکدام از سناریوهای کم‌آبی ۵-، ۱۵- و ۳۰- درصد به‌ترتیب و تنها در ۱۰، هفت و چهار آبگیر ابتدایی کانال (یعنی تنها برای ۲۸، ۱۹ و ۱۱ درصد آبگیرها) مشاهده می‌شود و برای سایر آبگیرها مقادیر بسیار کم‌تری از کفایت تحویل را نشان می‌دهد.

از طرفی با افزایش دبی در سناریوی بهره‌برداری مربوط به ۲۵+ درصد جریان مازاد، اگرچه میزان متوسط شاخص کفایت در ۸۶ درصد آبگیرها بالاتر از ۸۰ درصد به‌دست‌آمده که بیانگر مطلوبیت بهره‌برداری است، اما ذکر این نکته بسیار دارای اهمیت است که وقوع شرایط موردنظر خطر تشدید نوسانات در بازه‌های کانال را به‌همراه داشته و سبب بالازدگی آب از کانال می‌شود. از طرفی دیگر با توجه به محدودیت زمانی در ایجاد این سناریو، وقوع شرایط موردنظر بسیار ناپایدار می‌باشد. بنابراین با وجود مطلوبیت بهره‌برداری در این سناریو، نمی‌توان از عملکرد بهره‌برداری کانال موردنظر در سایر سناریوها چشم‌پوشی کرد.

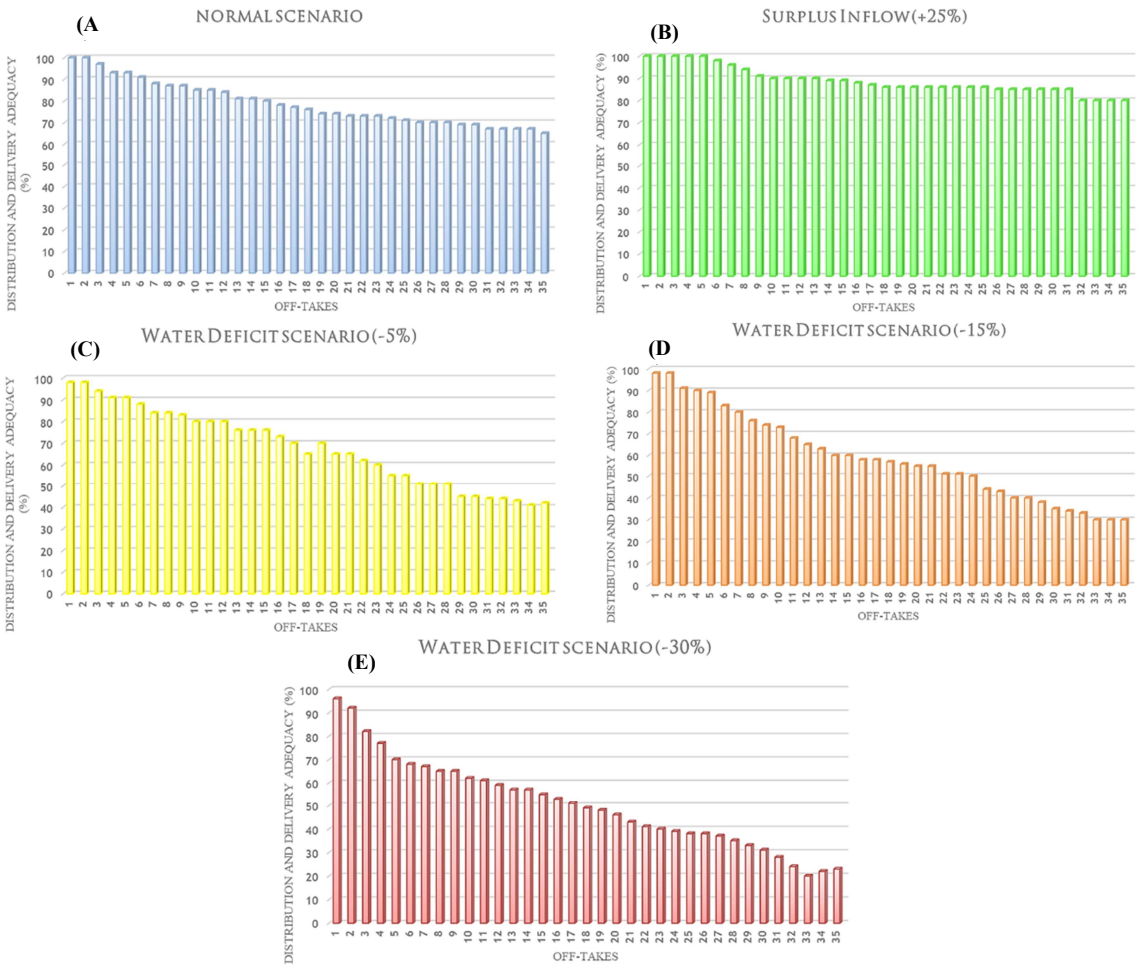

Figure 3. Average values of the simulated water delivery in off-takes #1-#35 located in along with the North main irrigation canal (Right Canal), Abshar Irrigation District under (A) Normal operational scenario with no track of water shortages at the canal head-source; (B): Scenario of extra inflow about 25%; (C) - (E): Water shortages at the head-gate about 5%, 15%, and 30%

در ادامه این بخش، نتایج شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد آبگیرهای واقع در کانال فرعی پنج- به‌عنوان نماینده کانال‌های فرعی- ارائه می‌شود. لازم به توضیح است که کانال فرعی پنج شبکه آبشار دارای ۱۸ آبگیر درجه سه است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، با کاهش جریان ورودی به کانال فرعی موردنظر در شبکه آبشار، در تمامی سناریوهای بهره‌برداری مربوطه (سناریوهای کم‌آبی ۵-، ۱۵- و ۳۰- درصد)، میزان متوسط شاخص کفایت در کل امتداد مسیر کانال تحت‌تأثیر قرار گرفته که باعث کاهش تدریجی مطلوبیت بهره‌برداری سیستم متناسب با هر سناریو شد. تأمین کفایت ۱۰۰ درصدی تحویل آب تحت سناریوی جریان مازاد ۲۵+ درصد حاکی از مطلوبیت عملکرد بهره‌برداری در تمامی آبگیرهای واقع در امتداد کانال موردنظر از نقطه‌نظر شاخص کفایت تحویل آب می‌باشد. در سناریو نرمال، اگرچه تأمین ۱۰۰ درصدی کفایت تحویل آب تنها در دو آبگیر ابتدایی کانال موردنظر حاصل شده است، اما حداقل کفایت ۹۳ درصدی تحویل آب در سایر آبگیرهای واقع شده در این امتداد نیز، آبگیرهای شماره سه تا هفت، با اختلاف کمی (نسبت به حالت ۱۰۰ درصدی)، مطلوبیت بهره‌برداری در این آبگیرها را تأمین نموده است. عملکرد بهره‌برداری در هرکدام از سناریوهای کم‌آبی ۵- و ۱۵- درصد نیز با تأمین حداقل شاخص کفایت ۹۰ درصدی در آبگیرهای بالادستی و میان‌دستی، شرایط مطلوبی را در بهره‌برداری مهیا نموده است. این در حالی است که در سناریو کم‌آبی ۳۰- درصد، میزان شاخص کفایت تحویل آب از آبگیرهای بالادست تا پایین‌دست تحت‌تأثیر بیش‌تر شرایط به‌وجودآمده قرار گرفته و مقادیر کفایت تحویل آب به‌جز در دو آبگیر ابتدایی کانال، در بیش‌ترین حالت خود مقدار حدود ۷۲ درصد را تجربه می‌کنند و با کاهش این شاخص برای حدود ۶۹ درصد باقی‌مانده آبگیرها (واقع در بخش میانی و انتهای کانال) آسیب‌پذیری در آبگیرهای پایین‌دست افزایش یافته و بنابراین شبکه در تأمین نیاز آبگیرها با چالش روبه‌رو می‌شود. خلاصه نتایج این بخش در قالب جدول (۱) و براساس طبقه‌بندی عملکرد شاخص کفایت تحویل آب (Molden & Gates, 1990)، ارائه شده است.

ارزیابی عملکرد منطقه‌ای توزیع آب در کانال‌های آبیاری

جهت بررسی تحویل و توزیع آب در بخش‌های بالادست، میان‌دست و پایین‌دست کانال اصلی شاخه شمالی (راست)، شاخص کفایت در بخش‌های مذکور موردمحاسبه قرار گرفتند. شکل (٤)، نمودارهای ستونی مستخرج از داده‌ها را در سناریوهای مختلف بهره‌برداری به نمایش گذاشته است. همان‌طورکه از این اشکال نمایان است، در همه سناریوها الگوی روند نزولی کفایت تحویل آب از آبگیرهای بالادست تا آبگیرهای پایین‌دست کاملاً مشهود است که ماهیت کنترل بالادست‌بودن روش بهره‌برداری و هم‌چنین دستی‌بودن سازوکار سازه‌های تنظیم و آبگیرها در کانال را به‌خوبی نشان می‌دهد. همان‌طورکه در ارزیابی نقطه‌ای نیز نتیجه گرفته شد، نتایج به‌دست‌آمده از ارزیابی عملکرد بهره‌برداری شبکه حاکی از ضعف مدیریت توزیع آب و ناکارآمدی شبکه در تحویل آب موردنیاز به‌ویژه در آبگیرهای واقع در میان‌دست و پایین‌دست شبکه و به‌ازای سناریوهای مختلف بهره‌برداری نرمال و کم‌آبی است.

Table 1. The water delivery adequacy indicators - of off-takes #1 to #18 located in the lateral canal No. 5 - dispersion within the Good, Medium, and Poor classes

		Operational Scenarios				
		Normal	Surplus	Deficit -5%	Deficit -15%	Deficit -30%
Performance Category	Good	No.1 - No. 13	No.1 - No. 18	No.1 - No. 11	No.1 - No. 11	No.1 - No. 6
	Medium	No.14-No.18		No.12-No.15	No.12-No.15	No.7-No.11
	Poor	-		No.16-No.18	No.16-No.18	No.12-#18

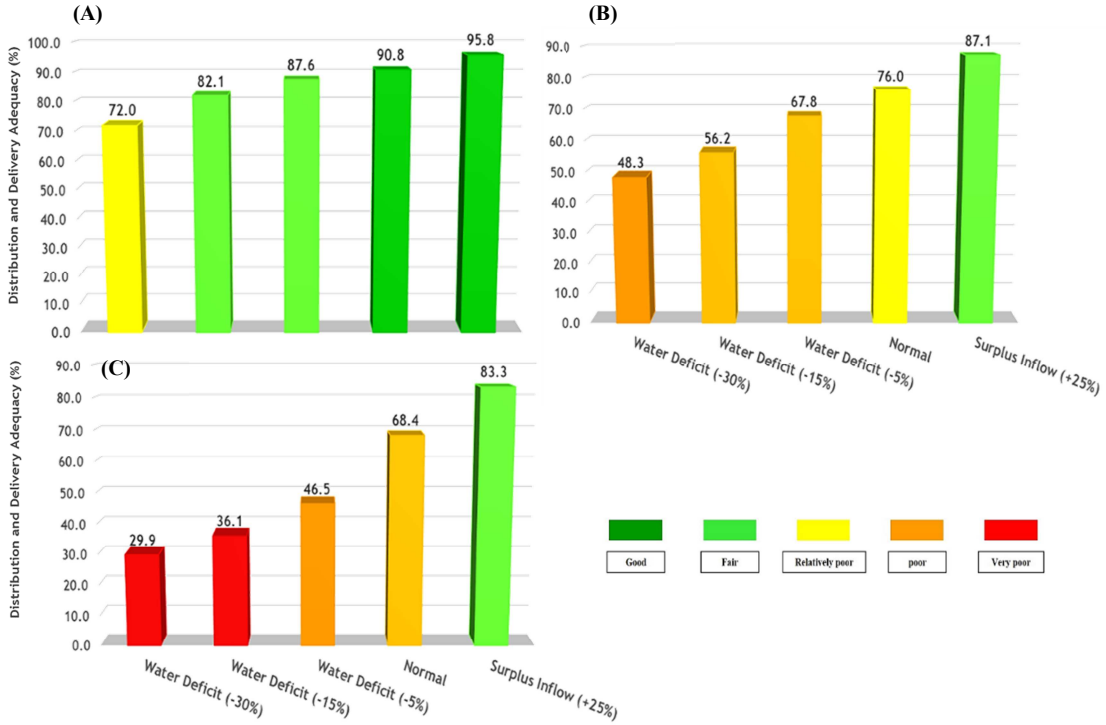

Figure 4. Regional operational appraisal results for the off-takes located at the (A) upstream, (B) midstream, and (C) downstream regions of the North main irrigation canal (Right Canal), Abshar Irrigation District

سناریوی ورود جریان مازاد با افزایش ۲۵+ درصد دبی ورودی در سراب کانال، به‌ترتیب در بالادست، میان‌دست و پایین‌دست دارای کفایت ۹۵/۸، ۸۷/۱ و ۸۲/۸ درصد می‌باشد که به‌ترتیب نشان از وضعیت عملکرد خوب، متوسط و متوسط از حیث شاخص مذکور دارد. در باقی سناریوها به‌ویژه در بازه‌های میان‌دست و پایین‌دست شاخص کفایت در محدوده ضعیف برآورد شده است که ضعیف‌ترین آن مربوط به سناریو ۳۰- درصد کم‌آبی و با حدود ۳۰ درصد کفایت در پایین‌دست کانال موردنظر می‌باشد. به‌عنوان مثال، در سناریوی نرمال حداکثر کفایت تحویل آب آبیاری تنها به آبگیرهای واقع در امتداد بازه بالادستی، آبگیرهای شماره یک تا ۱۲، به میزان ۹۰/۸ درصد اختصاص یافته است که حاکی از تحویل و توزیع مناسب (خوب) در این بازه می‌باشد. مشابه چنین الگویی نیز در سناریوهای کم‌آبی ۵- و ۱۵- درصد به‌ترتیب با شاخص کفایت ۸۷/٦ و ۸۲/۱ درصد در بازه بالادستی مشاهده شده است. در سناریوهای کم‌آبی ۵-، ۱۵- و ۳۰- درصد (همان‌طورکه پیش‌تر نیز توضیح داده شد؛ این شرایط به معنی آن است که میزان دبی ورودی به کانال اصلی به‌ترتیب به میزان ۵، ۱۵ و ۳۰ درصد کاهش یافته در صورتی‌که تقاضا در طول کانال اصلی بدون تغییر و مانند سناریوی نرمال است)، مطابق نتایج ارائه‌شده در این نمودارها، آبگیرهای واقع در میان‌دست کانال اصلی موردمطالعه، آبگیر شماره ۱۳ تا ۲٤، به‌ترتیب و به‌طور متوسط فقط می‌توانند در حدود ٦۷/۸، ٥٦/۲ و ٤۸/۳ درصد میزان تقاضای سطح تحت کشت خود را دریافت - نمایند. این در حالی است که در آبگیرهای پایین‌دستی، آبگیر شماره ۲۵ تا ۳۵، متناظر با سناریوهای مذکور، این شاخص به کم‌تر از ۵۰ درصد رسیده و بنابراین با قرارگیری در وضعیت ناپایدار (ضعیف) تحویل و توزیع،

می‌توان گفت آبگیرهای واقع در این بازه عملاً آبی دریافت نمی‌کنند. بنابراین با کاهش جریان ورودی، آسیب‌پذیری در آبگیرهای پایین‌دست بسیار زیاد بوده و شبکه قادر به تأمین نیاز آبگیرها نیست.

ارزیابی عملکرد کلی توزیع آب در کانال‌های اصلی و فرعی آبیاری

شکل (A-۵)، ارزیابی کلی تحویل و توزیع آب در کانال اصلی شاخه شمالی (راست) را به‌صورت نمودارهای ستونی به نمایش گذاشته است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بهترین عملکرد تحویل و توزیع آب آبیاری براساس متوسط شاخص کفایت محاسبه‌شده در امتداد این کانال، به‌ازای سناریوی جریان مازاد ۲۵+ درصد و به میزان حدود ۹۰ درصد حاصل شده است. با کاهش جریان ورودی، چه در سناریوی نرمال و چه در سایر سناریوهای مربوط به کم‌آبی، به‌تدریج از میزان این شاخص و بنابراین از مطلوبیت تحویل و توزیع در این امتداد کاسته می‌شود. به‌طوری‌که شاخص موردنظر در سناریوی مربوط به ۳۰ درصد کمبود آب، با کسب ضعیف‌ترین عملکرد به میزان حدود ۵۰ درصد رسیده است. در سناریوی نرمال نیز میانگین شاخص کفایت در امتداد این کانال به میزان حدود ۷۹ درصد رسیده است. به‌عبارتی دیگر، بدون اعمال هیچ‌گونه محدودیت (کاهش) جریان، استراتژی بهره‌برداری موجود در امتداد این کانال توانایی لازم در تأمین آب موردنیاز آبگیرهای خود را ندارد. این در حالی است که با وجود هرگونه عامل کاهش جریان به میزان پنج الی ۱۵ درصد، مطابق با سناریوهای مربوطه، با تأمین متوسط کفایت حداکثری ۵۹ الی ۷۰ درصدی، شرایط بهره‌برداری ضعیف‌تری نسبت به سناریوی نرمال به‌وجودآمده و بنابراین باعث تحویل و توزیع نامطمئن و هم‌چنین ناعادلانه در بین آبگیرهای این کانال می‌شود.

شکل (B-۵)، ارزیابی کلی تحویل و توزیع آب در کانال فرعی پنج را به‌صورت نمودارهای ستونی به نمایش گذاشته است. بهترین عملکرد تحویل و توزیع آب آبیاری براساس متوسط شاخص کفایت محاسبه‌شده در امتداد این کانال، به‌ازای سناریوی جریان مازاد ۲۵+ درصد و به میزان ۸۶/۵ درصد حاصل شده است. با کاهش جریان ورودی، چه در سناریوی نرمال و چه در سایر سناریوهای مربوط به کم‌آبی، به‌تدریج از میزان این شاخص و بنابراین از مطلوبیت تحویل و توزیع در این امتداد کاسته می‌شود. به‌طوری‌که شاخص موردنظر در سناریوی مربوط به ۳۰ درصد کمبود آب، با کسب ضعیف‌ترین عملکرد به میزان ۴۰ درصد رسیده است. در سناریوی نرمال نیز میانگین شاخص کفایت در امتداد این کانال به میزان حدود ۷۵ درصد رسیده است. به‌عبارتی دیگر، بدون اعمال هیچ‌گونه محدودیت (کاهش) جریان، استراتژی بهره‌برداری موجود در امتداد این کانال توانایی لازم در تأمین آب موردنیاز آبگیرهای خود را ندارد. این در حالی است که با وجود هرگونه عامل کاهش جریان به میزان پنج الی ۱۵ درصد، مطابق با سناریوهای مربوطه، با تأمین متوسط کفایت حداکثری ۵۲ الی ۶۲ درصدی، شرایط بهره‌برداری ضعیف‌تری نسبت به سناریوی نرمال به‌وجودآمده و بنابراین باعث تحویل و توزیع نامطمئن و هم‌چنین ناعادلانه در بین آبگیرهای این کانال می‌شود. به‌طورکلی می‌توان گفت که شاخص کفایت در این بخش از کانال در شبکه آبشار برای سناریوی جریان مازاد، سناریوی نرمال و کم‌آبی، به‌ترتیب نامناسب (متوسط)، ناپایدار (ضعیف) و ناپایدار (ضعیف) می‌باشد. به‌عبارتی دیگر، نتایج به‌دست‌آمده حاکی از عدم توانایی وضعیت بهره‌برداری موجود در برقراری شرایط مطلوب بهره‌برداری تحت سناریوهای مذکور می‌باشد.

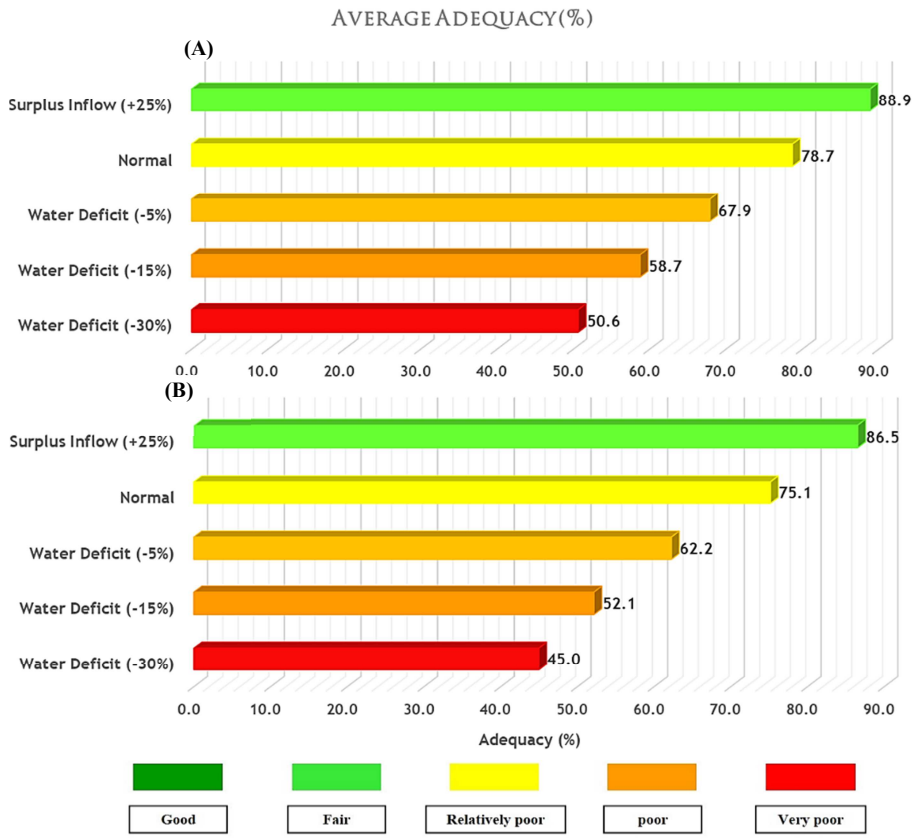

Figure 5. Overall operational appraisal results for the (A) the North main irrigation canal (Right Canal), (B), lateral canal No. 5 in Abshar Irrigation District

نتیجه‌گیری

با توجه به عملکرد ضعیف شبکه‌های آبیاری بهبود عملکرد آن‌ها گامی ضروری در راستای افزایش بهره‌وری آب محسوب می‌شود. نخستین مرحله بدین منظور، ارزیابی وضع موجود بهره‌برداری می‌باشد. روش‌های کمی و کیفی متعددی به‌جهت ارزیابی شبکه‌های آبیاری موجود می‌باشد، که یکی از این روش‌ها، شبیه‌سازی بهره‌برداری در کانال‌های آبیاری و استفاده از اطلاعات آن به‌منظور کمی‌سازی شاخص‌های ارزیابی می‌باشد. ارزیابی تحویل و توزیع آب به‌صورت نقطه‌ای، منطقه‌ای و کلی، با درنظرگرفتن نظرات متخصصین امر بهره‌برداری، می‌تواند دیدگاه واقع‌بینانه‌تری را در اختیار مدیر شبکه قرار دهد و امکان بررسی عملکرد تیم‌های مختلف بهره‌برداری را نیز میسر سازد. لذا در پژوهش حاضر، کانال‌های اصلی و فرعی شبکه آبیاری آبشار در شهر اصفهان با بهره‌گیری از مدل شبیه‌ساز هیدرودینامیک انتگرالی- تأخیری ایجاد شد. پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل، دقت آن مورد تأیید قرار گرفت. مدل کالیبره‌شده به‌ازای سناریوهای مختلف بهره‌برداری اجرا شده و از خروجی‌های آن برای ارزیابی تحویل و توزیع آب در محل آبگیرها (نقطه‌ای)، مناطق بالادست، میان‌دست و پایین‌دست کانال (منطقه‌ای)، در کل کانال (کلی) و ارائه تحلیل مکانی مطلوبیت تحویل و توزیع آب، استفاده شد. نتایج ارزیابی تحویل و توزیع آب با استفاده از شاخص کفایت توزیع آب آبیاری نشان داد که تحویل و توزیع آب در کانال موردمطالعه در ارزیابی‌های نقطه‌ای، منطقه‌ای و کلی مطلوب نبوده و نیازمند ارائه

راه‌کارهایی به‌منظور بهبود عملکرد کانال می‌باشد. تحلیل روند زمانی توزیع آب در هر آبگیر- نشان داد آبگیرهای ابتدایی (آبگیرهای یک و دو) تقریباً تحت سناریوهای مختلف پرآبی تا کم‌آبی کفایت توزیع آب را مطلوب و در محدوده ۹٤ الی ۱۰۰ درصد تأمین می‌نمایند. روند کاهشی ملایم شاخص کفایت تحویل آب در آبگیرهای بالادست (آبگیرهای شماره سه تا ۱۰) دیده می‌شود، به‌طوری‌که تحت سناریوهای کم‌آبی پنج، ۱۵ و ۳۰ درصد شاخص کفایت به‌ترتیب در محدوده‌های ۸۰ الی ۹۱، ۷۳ الی ۹۰ و ٦۱ الی ۸۱ درصد متغیر بوده است. از آبگیر شماره ۱۱ تا انتهای کانال روند نامطلوب توزیع آب سطحی نمایان می‌شود. به‌طوری‌که، به‌عنوان مثال برای آبگیرهای انتهایی کانال (آبگیر شماره ۳۰ تا ۳۵) میزان کفایت توزیع آب تحت سناریوهای کم‌آبی پنج، ۱۵ و ۳۰ درصد شاخص کفایت به‌ترتیب در محدوده‌های ٤۱ الی ٤٤، ۳۰ الی ۳۵ و ۲۱ الی ۳۱ درصد متغیر بوده است. با توجه به وضعیت بهره‌برداری حال حاضر شبکه آبیاری آبشار، پروژه‌های مدرن‌سازی، بهسازی و نوسازی راه‌کارهای مناسبی به‌منظور ارتقای عملکرد این شبکه محسوب می‌شوند. در این راستا بهره‌گیری از روش‌هایی چون کنترل دستی بهبودیافته با استفاده از گوشی هوشمند (۱۵)، کنترل خودکار محلی (۱٦) و کنترل خودکار مرکزی(۱٤) می‌توانند مؤثر واقع شوند.

پی‌نوشت‌ها

1. Integrator-Delay (ID) Model

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع

1. Abbasi, F., Sohrab, F., & Abbasi, N. (2017). Evaluation of Irrigation Efficiencies in Iran. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 17(67), 113-120. (In Persian)
2. 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.
3. Azargashb, S., Hashemy, M., & Roozbahani, A. (2020). Estimation of the minimum amount of Seepage and Operational Losses in the Earthen Canals using Ant Colony Optimization Algorithms. *Journal of Water and Soil Conservation, Online Published*, 27(6), 67-84. (In Persian)
4. Fipps, G. (2005). Potential Water Savings in Irrigated Agriculture for the Rio Grande Planning Region (Region M) 2005 Update. Texas Water Resources Institute.
5. Hashemy Shahdany, S. M., Sadeghi, S., & Adib Majd, E. (2017). Assessing the Performance of Nonstructural Operational Solutions for Main Irrigation Canal under Inflow Fluctuations (Case Study of Roodasht Main Irrigation Canal Zayanderood Basin). *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 18(68), 33-50. (In Persian)
6. Hassani, Y., & Hashemy Shahdany, S. M. (2019). Assigning Appropriate Irrigation Water Price Based on Probable Reaction of Farmers and Inter-sectoral Effects of the Price (Case Study: Roodasht Irrigation District). *Journal of Water and Soil Conservation*, 26(5), 149-164. (In Persian)
7. 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.
8. Karimi Avargani, H., Hashemy Shahdany, S. M., Hashemi Garmdareh, S. E., & Liaghat, A. (2020). Determination of Water Losses through the Agricultural Water Conveyance, Distribution, and Delivery System, Case Study of Roodasht Irrigation District, Isfahan. *Water and Irrigation Management*, 10(1), 143-156. (In Persian)
9. 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.
10. Maroufi, S., & Soltani, H. (2006). Estimations of Conveyance and Distribution Efficiencies in Shawour Irrigation and Drainage Network Using an Exponential Equation. *Journal of Agricultural Research*, 6(1), 36-47. (In Persian)

11. Mohammadi, A., Rizi, A. P., & Abbasi, N. (2019). Field measurement and analysis of water losses at the main and tertiary levels of irrigation canals: *Varamin Irrigation Scheme, Iran. Global Ecology and Conservation*, 18, e00646.
12. 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.
13. Orojloo, M., Hashemy Shahdany, S. M., & Roozbahani, A. (2017). Risk Assessment of main transmission line in Irrigation Networks with Application of Fuzzy Hierarchical method. *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(5), 25-47. (In Persian)
14. Riahi, H., Abbasi, N., & Mollaei, A. (2013). Evaluation of Operational and Maintenance Problems in Kerman Irrigation Canals. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 7(2), 167-177. (In Persian)
15. 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.
16. 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), 578-88.
17. Shahrokhnia, M. A., & Olyan Ghiasi, A. (2018). Methods of Seepage Estimation in Canals and Evaluation of Seepage and Distribution Efficiency in Doroodzan Irrigation System. *Journal of Water Management in Agriculture*, 4(2), 27-36. (In Persian)
18. Sheyni, A., Noori, M., & Minaei, S. (2015). Investigation of Water Losses and Providing Guidelines to Reduce Water in DEZ Irrigation Network (Case Study: Sabili and E4 Channels). *Journal on Water Engineering*, 3(2), 87-98. (In Persian)
19. Van Overloop, P. J., Negenborn, R. R., De Schutter, B., & Van De Giesen, N. C. (2010). Predictive Control for National Water Flow Optimization in The Netherlands. *Intelligent Infrastructures*, 42, 439-461.
20. Yaltaghian Khiabani, M., & Hashemy Shahdany, S. M. (2018). Design of Automatic Control System to Equitable Water Distribution under Water Shortages and Inflow Fluctuation Operational Conditions, Case study of Roodasht Irrigation district. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(5), 185-200. (In Persian)