



مدیریت آب و آبیاری (نشریه علمی)

دوره ۱۱ ■ شماره ۳ ■ پاییز ۱۴۰۰

صفحه‌های ۵۲۵-۵۱۳

DOI: 10.22059/jwim.2021.326408.898

مقاله پژوهشی:

توسعه مدل بهره‌برداری دستی به منظور بهبود کفایت و پایداری توزیع آب کشاورزی در کانال‌های اصلی آبیاری

جواد پورمحمود^۱، سید مهدی هاشمی شاهدانی^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲. دانشیار، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۶

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۰۸

چکیده

این مطالعه به بررسی میزان تأثیر دو راه‌کار غیرسازه‌ای، «شرایط قابل پیش‌بینی نوسانات ورودی به شبکه» و «توزیع آب براساس نوبت‌دهی» در بهبود فرایند بهره‌برداری کانال آبیاری پرداخته است. برای این منظور مدل شبیه‌ساز هیدرولیک جریان برای کانال اصلی شبکه آبیاری نکوآباد توسعه داده شد و با استفاده از دو شاخص ارزیابی عملکرد، میزان کفایت و پایداری توزیع آب در کانال اصلی ارزیابی شد. جهت بررسی میزان بهبود توزیع آب در هرکدام از راه‌کارها، برنامه‌ریزی توزیع آب روزانه مطابق هر راه‌کار در محیط MATLAB تهیه و با مدل ریاضی شبیه‌سازی لینک شد. جهت تعیین میزان اثرگذاری هر راه‌کار تحت سناریوهای مختلف بهره‌برداری، تحلیل مکانی تغییرات شاخص‌های ارزیابی عملکرد کفایت و پایداری توزیع آب، در GIS صورت گرفت. نتایج نشان داد که با به‌کارگیری راه‌کارهای غیرسازه‌ای وضعیت کلی بهره‌برداری به میزان محدودی بهبود می‌یابد، به‌نحوی که کفایت توزیع آب روزانه در کل شبکه در حدود ۱۰-۱۱ درصد در راه‌کار اول و در حدود ۷-۹ درصد در راه‌کار دوم نسبت به وضع موجود بهره‌برداری، بهبود یافته است. همچنین بهبود پایداری توزیع آب به‌طور میانگین در حدود ۱۳ تا ۱۵ درصد به‌دست آمد. بنابراین با استفاده از راه‌کار دوم، آب کشاورزی با توزیع مناسب‌تری در بخش میانی و پایین‌دست کانال به آبیگرها تحویل داده می‌شود.

کلیدواژه‌ها: ارزیابی عملکرد بهره‌برداری، بهسازی شبکه آبیاری، راه‌کار غیر سازه‌ای، هیدرولیک جریان.

Development of a manual operational model to improve the adequacy and dependability of agricultural water distribution in the main irrigation canals

Javad Pourmahmood¹, Seied Mehdy Hashemy Shahdany^{2*}

1. M.Sc. Student in Water Structure Engineering, Department of Water Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran.

2. Associate Professor, Department of Water Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran.

Received: June 29, 2021

Accepted: September 07, 2021

Abstract

This study investigated the effects of non-structural methods, as practical alternatives for upgrading the operational performance of the irrigation canal. To fulfill this objective, a hydraulic flow simulator model for the Nekoabad irrigation network's main canal was developed, calibrated and then, using two performance evaluation indicators, the adequacy and dependability of water distribution were evaluated. To evaluate water distribution improvement in each one of the non-structural solutions, daily water distribution planning; according to each solution was provided in MATLAB and linked to a simulated mathematical model. To determine the effectiveness of each approach, spatial analysis of changes insecure distribution (sufficient and sustainable) of agricultural water from upstream to downstream of the irrigation network, was done in GIS. The obtained results indicate that the adequacy of surface water distribution was improved 10-11% and 9-7% in the first and second non-structural alternatives, respectively. Besides, the dependability of surface water distribution shows about 13-15% within the application of the alternatives. The results reveal that the second alternatives, fulfilling appropriate water distribution along with the middle and downstream canal reaches, show a more or less good performance.

Keywords: Adequacy of water distribution, Dependability of water distribution, Flow hydraulics, Non-structural solution, Upgrading the irrigation network.

مقدمه

موفقیت آمیزی داشته است. مشکل بزرگ در ارتباط با اعمال مدیریت آب در مقیاس سیستم‌های خارج مزرعه (سیستم‌های انتقال و توزیع آب کشاورزی) است که تلفات قابل ملاحظه‌ای دارند. سیستم‌های انتقال، توزیع و تحویل آب کشاورزی در شبکه‌های آبیاری وظیفه تحویل مناسب منابع تأمین شده آب سطحی را بر عهده 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 پایین دست 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 صورت گرفته 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. 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. 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. بدین ترتیب طی پژوهش‌های انجام شده، میزان تلفات در سامانه‌های توزیع آب کشاورزی در شبکه آبیاری Wonji-Shoa در کشور اتیوپی را Kedir et al. (2015)، حدود ۱۲ درصد، Jadhav et al. (2014) در شبکه Panchnadi در هندوستان، حدود ۲۵ درصد، Akkuzu et al.

با رشد فزاینده جمعیت، نیاز به تولید محصولات غذایی بالا رفته و از طرفی دیگر با رشد مصارف شهری و صنعتی، 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، از قبیل احداث سدهای ذخیره‌ای، توسعه روش‌های استحصال آب از باران، پروژه‌های انتقال آب بین حوضه‌ای، توسعه تصفیه‌خانه‌های آب شور به‌منظور شیرین‌سازی آب دریا، احداث تصفیه‌خانه‌های پساب به‌منظور استفاده از آب پساب تصفیه‌شده در بخش کشاورزی و همچنین استفاده تلفیقی از منابع سطحی و زیرزمینی به‌کار برده شده است. نکته قابل تأمل آن است که با توجه به هزینه‌های بالای تأمین، انتقال و توزیع آب کشاورزی در مقایسه با قیمت قابل فروش آب کشاورزی در کشورهای در حال توسعه، راه‌کار تأمین محور نتوانسته پاسخی مطمئن و قابل‌اعتماد برای مشکل مذکور باشد و بنابراین امکان پیاده‌سازی روش‌های تأمین محور برای تأمین آب کشاورزی صرفه اقتصادی ندارد. بنابراین در این شرایط مسأله اصلی متولیان بخش کشاورزی، بهره‌برداری هدفمند از منابع محدود آب تأمین شده با توسعه راهبرد مدیریت تقاضامحور، به‌منظور کاهش تلفات در سیستم‌های انتقال، توزیع، تحویل و کاربرد آب کشاورزی می‌باشد. مدیریت تقاضامحور با به‌کارگیری سیستم‌های نوین در قالب سیستم‌های تحت فشار آبیاری و با هدف کاهش تلفات آب کشاورزی در مقیاس مزرعه نتایج

کنترل به سامانه‌های کنترل خودکار متمرکز و غیرمتمرکز و ۳- بهره‌گیری از روش‌های سازه‌ای مانند استفاده از مخازن ذخیره آب در خارج از مسیر کانال یا مخازن درون مسیر کانال توصیه شده است. در هر سه مورد، از نقطه نظر محدودیت به‌کارگیری توسط گروه بهره‌برداری، نقد جدی وجود دارد.

با در نظر گرفتن تمام محدودیت‌ها و مشکلات پیش روی پروژه‌های بهسازی توزیع آب کشاورزی، توصیه می‌شود در مرحله اول میزان اثرگذاری راه‌کارهای غیر سازه‌ای و صرفاً مدیریتی در بهبود وضعیت فعلی توزیع آب کشاورزی بررسی شود. این راه‌کارها حتی اگر سبب بهبود مختصر توزیع آب شود، مورد استقبال مدیران شبکه قرار می‌گیرد چرا که، نه سرمایه‌گذاری چشم‌گیر می‌خواهد و نه دانش بالایی بهره‌برداری نیاز دارد. هم‌چنین در اهداف اصلی پروژه‌های مدرن‌سازی، بهسازی و نوسازی شبکه‌های آبیاری تأکید شده است که در مرحله اول با کم‌ترین تغییر در ساختار شبکه موجود، عملکرد آن را بهبود بخشند. بهبود بهره‌برداری و فرایند توزیع آب کشاورزی با روش‌های غیرسازه‌ای (روش‌های مبتنی بر اپراتور) به‌عنوان یکی از گزینه‌های کاربردی توسط پژوهش‌گران مطرح شده است. بنابراین به‌منظور تحقق این هدف، پژوهش حاضر اقدام به بررسی تأثیر فنی به‌کارگیری از روش‌های غیر سازه‌ای برای بهره‌برداری شبکه آبیاری نکوآباد اصفهان، به‌عنوان یک شبکه متوسط-بزرگ مقیاس، نمود. بر این اساس میزان بهبود فرایند توزیع آب در کل شبکه آبیاری از نقطه نظر کفایت و پایداری تحویل آب ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

راه‌کارهای غیر سازه‌ای جهت بهبود توزیع آب کشاورزی
انتخاب راه‌کارهای مذکور با تأکید بر کاربردی و عملی بودن پیاده‌سازی آن و پس از بررسی مطالعات صورت‌گرفته،

(2014) 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 ۴۵ درصد، Shahrokhnia & Olyan Ghiasi (2018)، بازده توزیع در کانال‌های آبیاری در شبکه درودزن در حدود ۸۱ درصد، گزارش داده‌اند. 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 ۱۳۹۴ را به ترتیب ۶۷/۵ و ۷۴/۲ گزارش داده‌اند. 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 سیلی ۶۵/۲ و E4 برابر با ۵۶/۸ درصد است. 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 شاور خوزستان را بین ۳۴ تا ۸۳ درصد و بازده شبکه توزیع را بین ۴۵ تا ۸۶/۵ درصد بررسی و گزارش شدند.

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 (Hassani & Hashemy Shahdany, 2019).

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 ۱- بهینه‌سازی فرایند توزیع آب از نظر زمان و میزان توزیع، ۲- ارتقای سامانه‌های

نیمی از زمان بهره‌برداری (در بخشی از بازه زمانی بهره‌برداری) تنها آبگیرهای واقع در نیمه بالادست کانال اصلی اقدام به برداشت آب نموده و آبگیرهای پایین دست به صورت کامل بسته خواهند بود و به طور متوالی آبگیرهای پایین دست باز و بالادستی‌ها اجازه برداشت نخواهند داشت. لذا در این راه کار با مشابه سازی شرایط نوسانات در کانال مورد مطالعه زمان بندی تحویل آب به آبگیرها مدنظر قرار گرفت. شکل (۱) (A2) شمایی از چگونگی عملکرد این روش را نشان می‌دهد.

شبکه آبیاری تکوآباد

شبکه آبیاری نکوآباد (شکل ۲) واقع در حوضه آبریز زاینده رود، در منطقه مرکزی ایران قرار گرفته است. مساحت در حال بهره‌برداری شبکه در حدود ۲۹ هزار هکتار می‌باشد و موقعیت مکانی آن در عرض جغرافیایی ۲۳° تا ۳۲° ۴۶' و ۳۱° شمالی و طول جغرافیایی ۲۱° ۵۱' تا ۴۲° ۵۱' شرقی قرار گرفته است. میانگین بارندگی سالانه در این منطقه ۱۲۰ میلی‌متر است که این میزان بسیار کم تر از متوسط بارندگی سالانه در ایران، در حدود ۲۴۰ میلی‌متر می‌باشد. این در حالی است که در میزان تبخیر و تعرق گیاه مرجع در این منطقه حدود ۱۵۰۰ میلی‌متر در سال برآورد شده است. منبع اصلی تأمین کننده آب این شبکه آبیاری، آب رهائده از سد زاینده رود می‌باشد.

گزارش‌های ارزیابی عملکرد توزیع آب کشاورز در شبکه‌های آبیاری ایران، به اشتراک گذاری نتایج حاصله از پژوهش Hashemy Shahdany et al. (2017) در طی جلسات مصاحبه با مدیران بخش مدیریت آب کشاورزی و جلسات هم‌فکری با دفتر بهره‌برداری چند شبکه در ایران، مشخص شد. لازم به توضیح است که در کل ۲۷ کارشناس در سطوح مختلف مدیریتی در بدنه وزارت نیرو و استادان و پژوهش‌گران دانشگاهی در جلسات طوفان فکری شرکت کردند. بر این اساس دو راه کار غیر سازه‌ای، براساس میزان کاربردی بودن و عملی بودن پیاده سازی در شبکه‌های بزرگ مقیاس کشور، انتخاب شد. در راه کار اول توزیع آب براساس شرایط قابل پیش بینی نوسانات ورودی و با فرض شرایط قابل پیش بینی نوسانات جریان در سراب کانال در نظر گرفته شد. در ارتباط با این راه کار لازم به توضیح است که بلافاصله بعد از اطلاع از زمان نوسانات، دبی آبگیرها (به تناسب میزان کاهش جریان) کاهش داده شد و با اتمام نوسانات در این زمان آبگیرها دوباره مطابق دبی‌های مورد نیاز اولیه تنظیم شود. شکل (۱) (A1) شمایی از چگونگی عملکرد این روش را نشان می‌دهد. راه کار دوم، براساس روش مرسوم توزیع آب براساس نوبت دهی است که این راه کار با الگوبرداری از روش تجربی مرسوم بهره‌برداری کانال اصلی در زمان کم آبی که در برخی از شبکه‌های کشور ایران استفاده می‌شود، برنامه ریزی شده است. در این روش در

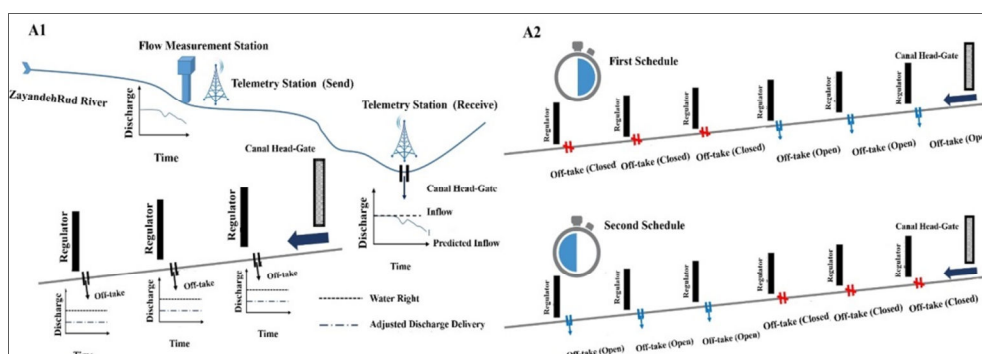


Figure 1. An overview of non-structural solutions used in this research

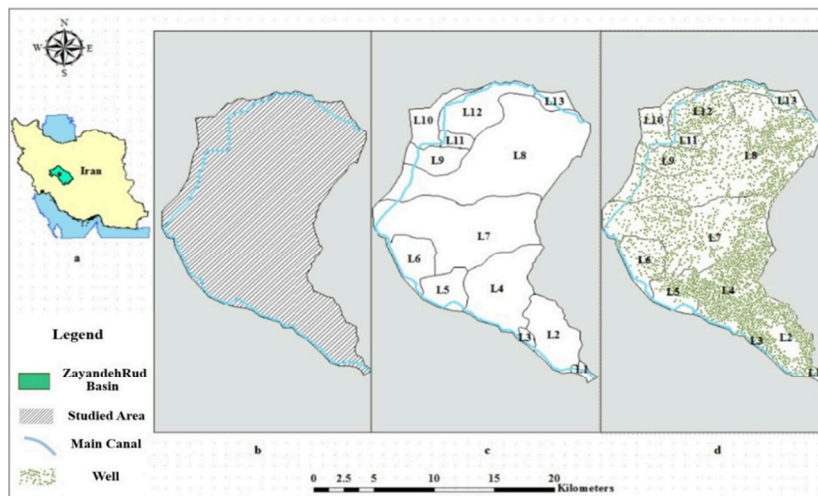


Figure 2. A schematic of the surface water distribution system of Nekoo-Abad irrigation network in the Zayandeh Rud Basin in central Iran included the irrigated units (c), and Tube-wells dispersion (d).

برنامه‌نویسی شد تا امکان تبادل اطلاعات با برنامه‌های زمانی تغییر بازشدگی دریچه‌های آبیگر (در راه‌کارها) به راحتی امکان‌پذیر شد. شایان ذکر است که به‌کارگیری مدل‌های ریاضی باید به نحوی صورت پذیرد که پارامترهای هیدرولیکی جریان (شامل رقوم سطح آب در مجاورت سازه‌های تنظیم سطح آب و دبی تحویلی به هرکدام از آبیگرها) در مدل توسعه داده شده قابل رصد باشد. از بین مدل‌های ریاضی موجود تنها مدل سنت ونانت خطی شده و مدل انتگرالی-تأخیری (ID) در پروژه‌های مدرن‌سازی سامانه‌های آبی جایگاه مناسبی پیدا کرده است. مدل سنت ونانت خطی شده به طور کلی در پروژه‌های چندهدفه مانند کنترل آبی کمی و کیفیت جریان یا خودکارسازی سامانه‌های بزرگ انتقال آب مثل رودخانه‌ها که دقت بالایی از کنترل سطح آب موردنیاز است، مورد استفاده 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 به سبب راحتی محاسبات و تأمین دقت موردنیاز از مدل ID استفاده شده است (Van Overloop *et al.*, 2010).

در طرفین بند انحرافی نکوآباد، در منشأ تأمین آب این شبکه آبیاری، دو رشته کانال اصلی چپ و راست به منظور برداشت آب جهت تحت پوشش قراردادن اراضی به وسعت ۶۵۰۰۰ هکتار (که بنا بر اطلاعات دریافت شده از شرکت آب منطقه‌ای اصفهان در حال حاضر در حدود ۲۹ هزار هکتار در حال بهره‌برداری است) احداث شده است. کنترل و تنظیم سطح آب به دو شیوه کنترل بالادست، با به‌کارگیری ۵۰ سازه خودکار هیدرومکانیکال آمیل و یک سازه ثابت Duck-Bill صورت می‌گیرد. تحویل و توزیع سطح آب در طول کانال‌های اصلی توسط ۶۵ آبیگر انجام می‌گیرد که به صورت دستی بهره‌برداری می‌شوند.

شبیه‌سازی وضعیت بهره‌برداری کانال آبیاری

به منظور ارزیابی عملکرد سیستم بهره‌برداری موجود و نیز میزان بهبود فرایند توزیع آب با به‌کارگیری راه‌کارهای غیر سازه‌ای، لازم است شبیه‌سازی هیدرولیک جریان 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 تهیه

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 به دست 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 پایین دست منتقل می‌شود. هر تغییری در سازه تنظیم‌کننده سطح آب بالادست منجر به تولید یک موج می‌شود، این بخش از کانال فقط به‌عنوان گذار برای عبور این موج عمل می‌کند. شایان ذکر 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 به صورت رابطه (۱) ارائه می‌شود:

(۱) $q_{canal}(t) = q_{in}(t - \tau)$

که در آن q_{in} دبی ورودی به بخش یکنواخت جریان (m^3/s)، q_{canal} دبی ورودی به بخش ذخیره (m^3/s)، t زمان (sec) و τ زمان تأخیر (sec) می‌باشد. بخش منحنی برگشت آب (بخش دوم) مانند یک مخزن عمل می‌کند و بخش انتگرالی مدل را شامل می‌شود. تغییرات مساحت سطح افقی آب در ترازهای مختلف مخزن (A_s) بر اساس دبی‌های ورودی و خروجی از بازه کانال به صورت رابطه (۲) در حوزه زمان و حوزه فرکانس، قابل بیان است (Schuurmans *et al.*, 1997):

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

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

که در آن A_s مساحت سطح ذخیره (m^2)، h عمق آب و

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

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

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

و سناریوی کم‌آبی می‌باشند. در سناریوی بهره‌برداری نرمال، دبی ورودی به کانال اصلی با میزان کل تقاضای آب کشاورزی مطابقت دارد، درحالی‌که در سناریوی کم‌آبی که در این پژوهش دو سناریوی کم‌آبی ۱۵ درصد و ۳۰ درصد در نظر گرفته شده، میزان دبی ورودی به کانال اصلی به میزان مشخص کاهش یافته ولی میزان تقاضای آب کشاورزی تغییر نکرده است. ارزیابی توزیع آب سطحی توسط مدل‌های بهره‌برداری توسعه داده شده این پژوهش توسط شاخص‌های ارزیابی عملکرد «کفایت توزیع آب سطحی» و «پایداری توزیع آب سطحی» انجام شد. شاخص‌های کفایت و پایداری به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود (Molden & Gates, 1990):

$$PA = \frac{1}{T} \sum \left[\frac{1}{R} \sum \left(\frac{Q_D}{Q_R} \right) \right], PD = \frac{1}{R} \sum CV_T \left(\frac{Q_D}{Q_R} \right) \quad (4)$$

که در آن PA شاخص کفایت توزیع آب (درصد)، PD شاخص پایداری توزیع آب (درصد)، T مدت زمان بهره‌برداری (s)، R تعداد کل آبیگری‌های واقع در کانال اصلی، QD دبی تحویلی به هر آبیگر (m^3/s) و QR دبی تقاضای آب کشاورزی (m^3/s) و CV ضریب تغییرات است. هرچه مقدار شاخص کفایت به ۱۰۰ درصد و مقدار شاخص پایداری به صفر درصد نزدیک‌تر باشد، مقدار مطلوب آن‌ها رخ داده است. با این حال، براساس طبقه‌بندی

که در این رابطه $Q_{hg}(k)$ ، $Q_{hg}(k-1)$ ، $Q_{hg}(k-2)$ و $Q_{hg}(k-3)$ به ترتیب دبی‌های کنترلی رهانده از سازه تنظیم سراب کانال در گام‌های زمانی $k-3$ تا k می‌باشد. زمان تأخیر بین ورود آب از سراب تا تغییر ایجاد شده رقوم سطح آب در انتهای پایین دست اولین بازه کانال مورد مطالعه برابر ۳ گام زمانی می‌باشد. $e_1(k)$ خطای محاسبه شده (رقوم سطح آب اندازه‌گیری شده از رقوم هدف) برای بازه اول کانال و $e_1^*(k)$ متغیر حالت اضافه شده 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 می‌شود تا مقدار $e_1^*(k)$ را به وجود آورد. در واقع متغیر $u^*(k)$ تفسیر فیزیکی ندارد و صرفاً یک متغیر فرضی جهت اعمال جریمه بیش‌تر بر تابع هدف در زمانی که سطح آب از محدوده مجاز بین حداکثر و حداقل رقوم سطح آب تجاوز می‌کند، می‌باشد.

سناریوهای بهره‌برداری و شاخص‌های ارزیابی عملکرد بهره‌برداری

در این پژوهش دو سناریوی کلی بهره‌برداری، بر پایه حالت‌های واقعی رخ داده در منطقه مورد مطالعه، در نظر گرفته شده است که عبارت از سناریوی بهره‌برداری نرمال

پرننگ نزدیک باشد نشان از مطلوب بودن تحویل آب دارد که مطابق انتظار محدوده بالادست کانال را پوشش داده است. روند کاهشی کفایت توزیع آب سطحی از آبیگرهای بالادست تا آبیگرهای پایین دست، نشان از ضعف مدیریت صحیح توزیع آب و ناکارآمدی سیستم توزیع آب سنتی در تحویل آب مورد نیاز آبیگرهای واقع در میان دست و پایین دست شبکه دارد. مطابق این شکل بخش محدودی از ناحیه زراعی اول و دوم در وضعیت مطلوب قرار گرفته است و وضعیت توزیع آب تأمین شده از منابع آب سطحی (آب منحرف شده از رودخانه در محل بند تنظیمی نکوآباد) متوسط (در محدوده میان دست شبکه) و ضعیف (در پایین دست شبکه) ارزیابی می شود. نتایج حاکی از آن است حتی در زمان نبود کم آبی (تحت سناریوی نرمال بهره برداری)، مقادیر کفایت تحویل آب، به جز چهار آبیگر ابتدایی کانال، در بیشترین حالت خود مقدار ۸۰ درصد را نشان می دهد. هم چنین آبیگرهای واقع در پایین دست کانال مورد مطالعه (آبیگر شماره ۹ تا ۱۳) به طور متوسط فقط می توانند ۷۰ درصد میزان تقاضای سطح تحت کشت خود را دریافت نمایند. بنابراین، صرف نظر از بررسی نتایج سناریوهای کم آبی با کاهش جریان ورودی، آسیب پذیری در آبیگرهای پایین دست بسیار زیاد بوده و شبکه قادر به تأمین نیاز آبیگرها نیست. در سناریوی کم آبی ۱۵ درصد آبیگرهای واقع در میان دست کانال اصلی مورد مطالعه، آبیگر شماره ۴ تا ۷، به طور متوسط فقط می توانند در حدود ۷۰-۷۵ درصد میزان تقاضای سطح تحت کشت خود را دریافت نمایند. آبیگرهای پایین دستی که مقادیر متناظر شاخص های کفایت و پایداری آن کم تر از ۶۰ درصد آب مورد نیاز خود را دریافت کرده اند، بنابراین با کاهش جریان ورودی، آسیب پذیری در آبیگرهای پایین دست بسیار زیاد بوده و شبکه قادر به تأمین نیاز آبیگرها نیست.

توصیه شده توسط Molden & Gates (1990) سه دسته که بیانگر بهره برداری مطلوب $PA \in (90 - 100), & PD \in (100 - 0)$ ، قابل قبول $PA \in (80 - 90), & PD \in (100 - 20)$ و ضعیف $(PA \leq 80, \text{ and } PD \geq 20)$ سیستم توزیع آب می باشد، قابل ارائه است.

نتایج و بحث

شبیه سازی وضعیت توزیع آب کشاورزی در شرایط فعلی

واسنجی و صحت سنجی مدل ریاضی بهره برداری کانال نکوآباد براساس شبیه سازی دوره بهره برداری ۱۷۵ روزه ای صورت گرفت که داده های بهره برداری، شامل دبی ورودی به کانال اصلی و دبی تحویلی به آبیگرها در طول کانال اصلی، در سطح کانال مورد مطالعه اندازه گیری شده بود. بر این اساس، ۱۰۰ روز برای واسنجی و ۷۵ روز برای صحت سنجی استفاده شد و نتایج این ارزیابی که حاکی از واسنجی و صحت سنجی قابل قبول است، به شرح جدول (۱) می باشد.

Table 1. The evaluation indices for the developed simulation model's calibration and verification

Calibration	Verification	Statistical parameter
0.63	1.14	MAE (%)
0.94	0.9	RMSE (cms)
-0.009	-0.012	CRM

به منظور ارائه تحلیل مکانی از ارزیابی عملکرد توزیع آب سطحی توسط سیستم بهره برداری موجود، پراکنندگی مکانی مقدار متوسط شاخص های محاسبه شده با استفاده از نرم افزار GIS تهیه و در شکل (۳) ارائه شده است. براساس طیف رنگی ارائه شده، در نقشه تحلیل مکانی «کفایت توزیع آب سطحی»، هرچه رنگ واحدهای درجه دو به رنگ آبی پرننگ نزدیک باشد نشان از مطلوب بودن تحویل آب دارد که مطابق انتظار محدوده بالادست کانال را پوشش داده است. هم چنین در نقشه تحلیل مکانی «پایداری توزیع آب سطحی»، هرچه رنگ واحدهای درجه دو به رنگ قرمز

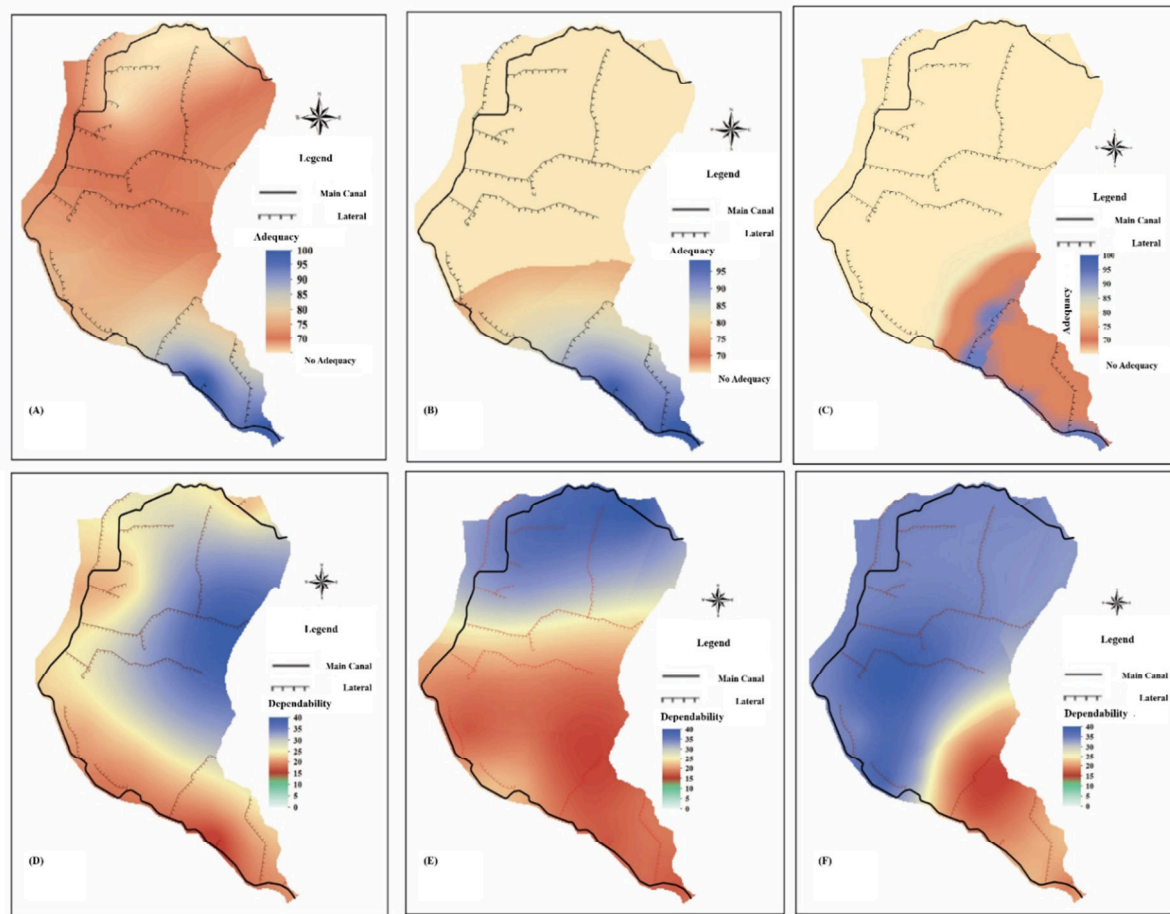


Figure 3. Spatial variation of water distribution adequacy performance evaluation indices ((A)-(C)) and water distribution dependability ((D)-(F)) under the normal operation scenario ((A) and (D)), 15% water scarcity scenario ((B) and (E)), and 30% water scarcity scenario ((C) and (F)) in the status quo.

از آن است که متوسط بهبود کفایت توزیع آب کشاورزی در بالادست، میاندست و پایین‌دست کانال اصلی در حدود (۵-۱۷) درصد، (۳-۷) درصد و (۱-۰) درصد، به ترتیب در سناریوهای ۱ تا ۳ بهره‌برداری بوده است. متوسط بهبود کفایت توزیع آب کشاورزی در بالادست، میاندست و پایین‌دست کانال اصلی در راه‌کار دوم در حدود (۲-۶) درصد، (۷-۱۵) درصد و (۱-۴) درصد، به ترتیب در سناریوهای ۱ تا ۳ بهره‌برداری بوده است. با توجه به این‌که هدف اصلی این پژوهش ارائه پیشنهادها عملی و کاربردی برای گروه‌های بهره‌برداری است، لذا تحلیل نتایج هیدرولیکی به‌دست‌آمده در قالب نحوه کیفیت عملکرد هر

تأثیر راه‌کارهای غیر سازه‌ای توسعه داده‌شده در تغییر وضعیت توزیع آب کشاورزی

تحلیل مکانی نحوه توزیع آب در کل محدوده شبکه آبیاری پس از به‌کارگیری روش‌های بهبود عملکرد، با استفاده از شاخص طیف رنگی در شکل‌های (۴) و (۵) به تصویر کشیده شده است. بررسی نتایج شاخص کفایت در کل شبکه حاکی از آن است که میزان متوسط شاخص کفایت روزانه در کل شبکه در حدود ۱۰-۱۱ درصد، در روش دوم در حدود ۷-۹ درصد در مقایسه شرایط موجود بهبود کفایت توزیع آب دیده شده است. مقایسه مقدار کفایت تحویل آب در روش اول در مقایسه با شرایط بهره‌برداری موجود حاکی

به دو بخش مجزا تقسیم شود و هر بخش برای خود به سه قسمت بالادست، بخش میانی و پایین دست تقسیم شود. با توجه به این که عمده نارضایتی های اجتماعی ناشی از عملکرد ضعیف سامانه های توزیع آب کشاورزی در بخش های پایین دست شبکه است، در راستای رفع این دغدغه راه کار دوم در مقایسه با دو راه کار دیگر تا حدودی بهتر عمل نموده است. نکته قابل تأمل بعدی، میزان تأثیر محدود راه کارهای ارائه شده در شرایط کم آبی است. همان طور که نتایج به وضوح نشان می دهد، دامنه تأثیرات راه کارهای غیر سازه ای برای سناریوی نرمال بهره برداری تا حدودی قابل قبول می باشد ولی برای سناریوهای کم آبی تأثیر قابل ملاحظه ای حاصل نشده است.

آبگیر در کانال اصلی، در جدول (۲) ارائه شده است. مطابق این جدول، میزان تأثیر راه کار اول، صرفاً بخش بالادست کانال اصلی بوده است، به طوری که در سناریوی نرمال بهره برداری عملکرد ۴ آبگیر واقع در بخش بالادست هم از نقطه نظر کفایت و هم از نظر پایداری خوب و متوسط برآورد شده است. راه کار دوم به سبب ماهیت نوبت بندی تأثیراتی متفاوت از دو راه کار دیگر از خود نشان داده است. به نحوی که آبگیرها با بهترین عملکرد توزیع آب (هم از نظر کفایت و هم از نظر پایداری) آبگیرهای اول و دوم واقع در بالادست و بخش میانی شبکه است که با فاصله گرفتن از آنها آبگیرهای با عملکرد متوسط قرار گرفته است. به عبارت دیگر، راه کار دوم سبب شده است که کانال اصلی

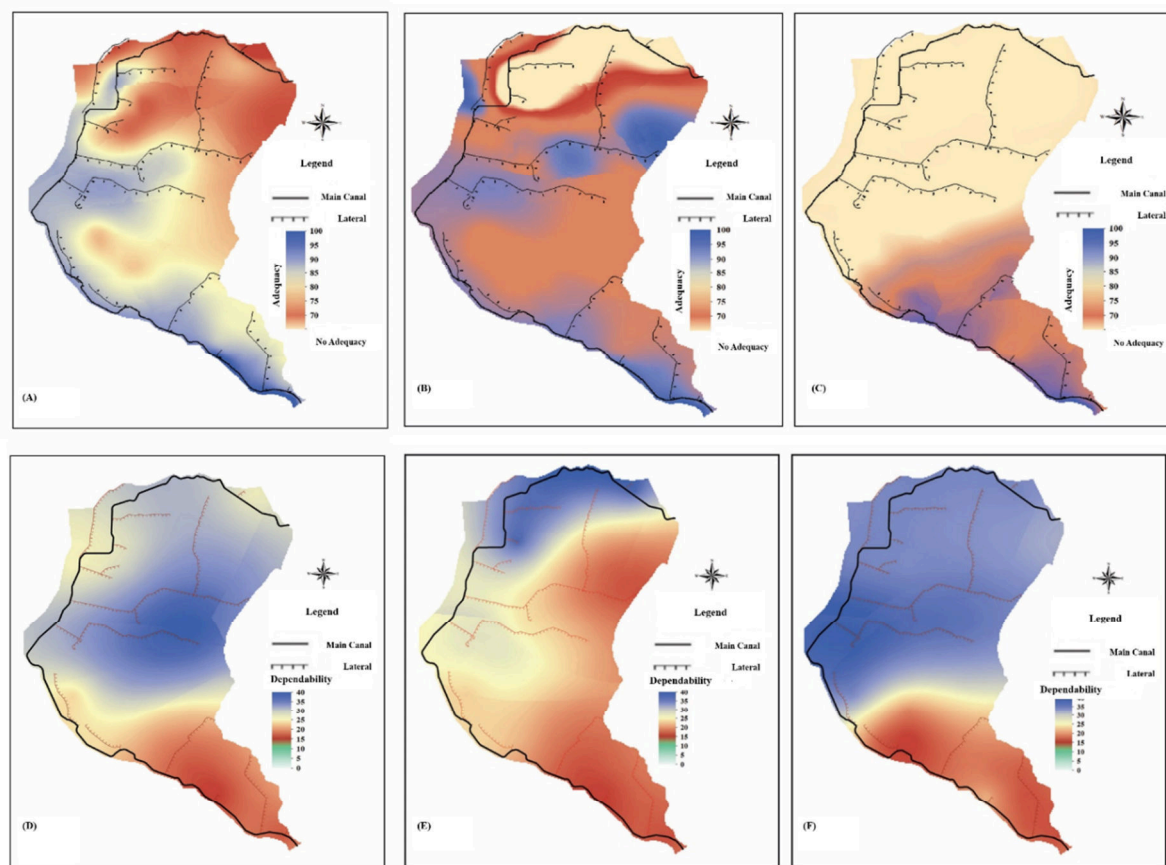


Figure 4. Spatial variation of water distribution adequacy performance evaluation indices ((A)-(C)) and water distribution dependability ((D)-(F)) under the normal operation scenario ((A) and (D)), 15% water scarcity scenario ((B) and (E)), and 30% water scarcity scenario ((C) and (F)) by employing the first approach

توسعه مدل بهره‌برداری دستی به‌منظور بهبود کفایت و پایداری توزیع آب کشاورزی در کانال‌های اصلی آبیاری

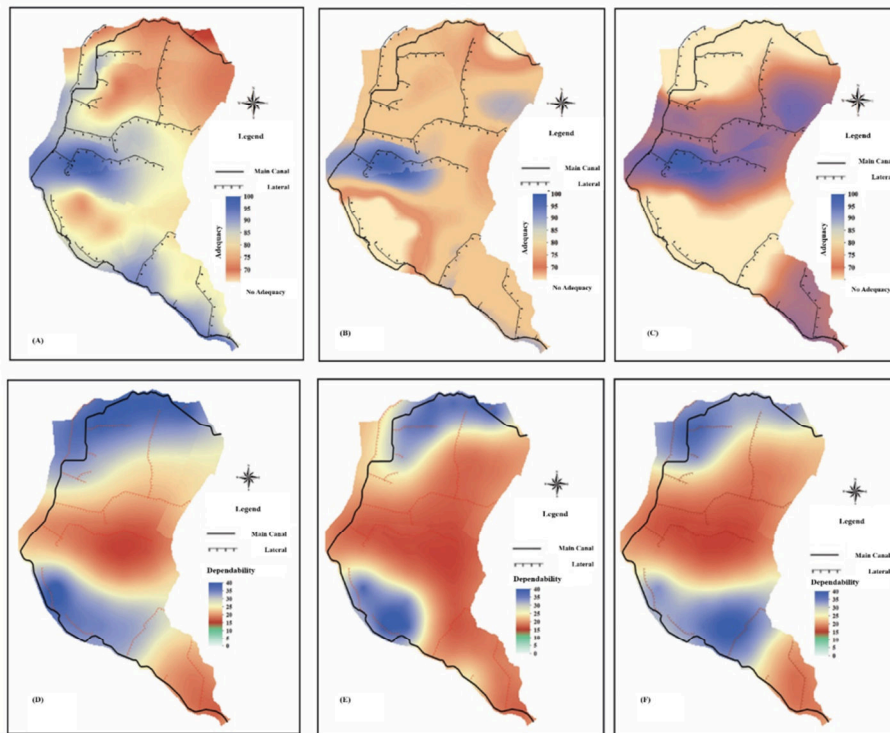


Figure 5. Spatial dispersion of water distribution adequacy performance evaluation indices ((A)-(C)) and water distribution dependability ((D)-(F)) under the normal operation scenario ((A) and (D)), 15% water scarcity scenario ((B) and (E)), and 30% water scarcity scenario ((C) and (F)) by employing the second approach

Table 2. Water distribution in the main canal separately for off-takes located upstream, middle and downstream

		Adequacy			Dependability			Overall performance	
		Good	Moderate	Poor	Good	Moderate	Poor		
Normal scenario	a #1	Upstream	2	2	0	2	2	0	good
		Middle	0	3	2	0	2	3	moderate
		Downstream	0	0	4	0	0	4	poor
	a #2	Upstream	2	2	0	3	1	0	good
		Middle	2	3	0	3	1	1	good
		Downstream	0	2	2	1	2	1	moderate
	a #3	Upstream	1	3	0	1	3	0	moderate
		Middle	0	2	3	0	1	4	moderate /poor
		Downstream	0	0	4	0	0	4	poor
Water shortage scenario (15%)	a #1	Upstream	2	2	0	1	2	0	moderate
		Middle	0	1	4	1	1	4	poor
		Downstream	0	0	4	0	0	4	poor
	a #2	Upstream	2	1	1	3	1	0	good
		Middle	2	3	0	4	1	0	good/ moderate
		Downstream	0	1	3	0	2	2	moderate
	a #3	Upstream	2	2	0	1	3	0	good/ moderate
		Middle	0	1	4	0	1	4	poor
		Downstream	0	0	4	0	0	4	poor
Water shortage scenario (30%)	a #1	Upstream	1	3	0	0	4	0	moderate
		Middle	0	0	5	0	1	4	poor
		Downstream	0	0	4	0	0	4	poor
	a #2	Upstream	1	1	2	1	2	1	moderate /poor
		Middle	1	2	2	1	3	2	moderate /poor
		Downstream	0	0	4	0	2	2	poor
	a #3	Upstream	1	3	0	1	3	0	moderate
		Middle	0	0	5	0	1	4	poor
		Downstream	0	0	4	0	0	4	poor

نتیجه گیری

پژوهش حاضر به بررسی کارایی و میزان اثربخشی راه کارهای غیر سازه‌ای در بهبود توزیع آب کشاورزی که از منابع آب سطحی تأمین می‌شود، پرداخت. به منظور ارزیابی جامع راه کارهای توسعه داده شده، عملکرد آنها تحت سناریوهای بهره‌برداری نرمال و کم‌آبی و از دیدگاه فنی شامل تحلیل مکانی و زمانی توزیع آب کشاورزی بررسی شد. نتایج این پژوهش در مجموع حاکی از بهبود قابل قبول توزیع آب کشاورزی با به کارگیری راه کارهای غیر سازه‌ای تحت سناریوی نرمال و نیز بهبود اندک تحت سناریوی بهره‌برداری کم‌آبی است. نتایج این پژوهش نشان داد که ارتقای مدیریت بهره‌برداری، بسته به امکانات محدود شبکه‌های آبیاری واقع در کشورهای در حال توسعه، صرفاً نیازمند سرمایه‌گذاری‌های کلان جهت نوسازی و مدرن‌سازی شبکه‌ها نمی‌باشد. به ویژه آن‌که محدودیت‌های مالی جهت سرمایه‌گذاری و توسعه شبکه‌های آبیاری تمام یا نیمه خودکار صرفاً نیمی از مقدمات لازم برای ایجاد یک سیستم توزیع آب خودکار می‌باشد. در شبکه آبیاری مورد مطالعه این پژوهش، مانند بسیاری از شبکه‌های آبیاری واقع در کشورهای در حال توسعه، خرابه‌کاری و دزدی تأسیسات الکترونیکی-مخابراتی، عدم وجود نیروهای متخصص کافی جهت تعمیرات دوره‌ای و نگهداری این تأسیسات و کارکنان بهره‌برداری آشنا به مباحث تخصصی هیدرولیک جریان و مهندسی کنترل، معضلات دیگر پیاده‌سازی سامانه‌های هوشمند و خودکار توزیع آب کشاورزی به حساب می‌آید. بنابراین یافته‌های این پژوهش گام مهمی در به کارگیری راه کارهای ساده و غیرسازه‌ای در بهبود عملکرد سامانه‌های سنتی و موجود توزیع آب کشاورزی است.

عامل محدودکننده اصلی این پژوهش که بر پیچیدگی‌های تعیین راه کارهای غیرسازه‌ای افزود، نوع دریچه‌های آبیاری است که از نوع مدول‌های نیرپیک

می‌باشد که در مقایسه با دریچه‌های آبیگر کشویی امکان مانور سازه‌ای (منظور تغییر در میزان بازشدگی یا گشودگی دریچه‌ها که در دریچه‌های کشویی براساس منحنی‌های دبی-اشل استخراج شده برای شرایط مختلف بهره‌برداری کانال صورت می‌گیرد) را برای بهره‌بردار غیرممکن می‌سازد. با توجه به موارد فوق‌الذکر، اقدامات بهره‌برداری روی سازه‌های آبیگر تنها شامل باز و بسته‌نمودن آنها در زمان‌های مناسب معطوف شده است. بنابراین با توجه به این‌که در بسیاری از شبکه‌های آبیاری در کشورهای مختلف از دریچه‌های آبیگری نوع آمریکایی CHO و یا sluice gates استفاده می‌شود. لذا به نظر می‌رسد به کارگیری این راه کارهای سازه‌ای تأثیر مناسب‌تری در مقایسه با نتایج این پژوهش ارایه کند. عامل محدودکننده دیگر در پیاده‌سازی مطلوب راه کارهای غیرسازه‌ای، تعداد تیم‌های بهره‌برداری است که می‌توان برای تناوب تغییرات سازه‌های هیدرولیکی به کار گرفت. در این پژوهش تغییرات برای دو بار در روز مدنظر قرار گرفت که پیشنهاد می‌شود تغییرات برای حالت‌های بیش‌تر به منظور نشان‌دادن توانایی کامل این روش‌ها در پژوهش‌های آتی مورد بررسی قرار گیرد. هم‌چنین پیشنهاد می‌شود که با تحلیل مناسب اقتصادی و با تأکید بر محاسبه ارزش اقتصادی آب کشاورزی و نیز ارزش‌گذاری اقتصادی-زیست‌محیطی ناشی از کاهش برداشت آب از آبخوان، میزان توجیه‌پذیری به کارگیری روش‌های غیرسازه‌ای مورد بررسی قرار گیرد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع

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)

- 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.
- Arwaa, H. M., & Omran I. M. (2016). Compared between the Measured Seepage Losses and Estimation and Evaluated the Conveyance Efficiency for Part of the Hilla Main Canal and Three Distributary Canals (HC 4R, HC 5R and HC 6R) of Hilla-Kifil Irrigation Project. *Civil and Environmental Research*, 8(2), 1-10.
- 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)
- Fipps, G. (2005). Potential Water Savings in Irrigated Agriculture for the Rio Grande Planning Region (Region M) 2005 Update. Texas Water Resources Institute.
- 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)
- Hassani, Y., & Hashemy Shahdany, S. M. (2019). Assigning Appropriate Irrigation Water Price Based on Probable Reaction of Farmers and Intersectoral Effects of the Price (Case Study: Roodasht Irrigation District). *Journal of Water and Soil Conservation*, 26(5), 149-164. (In Persian)
- 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.
- 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)
- 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.
- 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)
- 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.
- 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.
- 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)
- 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)
- Schuurmans, J., Schuurmans, W., Berger, H., Meulenbergh, M., & Brouwer, R. (1997). Control of Water Levels in the Meuse River. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(3), 180-184.
- 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.
- 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)
- 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)
- 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.
- 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)