مدیریت آب و آبیاری
دوره ۹ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۸
صفحه‌های ۱۲۷-۱۰۹

امکان‌سنجی به‌کارگیری روش‌های غیرسازه‌ای و خودکارسازی در ارتقای بهره‌برداری از سامانه‌های توزیع آب (مطالعه موردی: شبکه آبیاری رودشت)

مهدی یلتقیان خیابانی[۱]، سید مهدی هاشمی شاهدانی[۲*]، محمد ابراهیم بنی حبیب[۳]، یوسف حسنی[۴]
۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۲. استادیار، گروه مهندسی آبیاری، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۳. استاد، گروه مهندسی آبیاری، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۴. پژوهش‌گر، دفتر اقتصاد و بهره‌وری آب و آبفا، وزارت نیرو، تهران، ایران.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۱۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۱۰

چکیده
تلفات قابل‌توجه توزیع و تحویل آب آبیاری، ارتقا مدیریت بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری و زهکشی را بیش‌ازپیش گوشزد می‌کند. ارائه راهکارهای مربوطه، نیازمند بررسی طرح‌ها، از جنبه‌های فنی و اقتصادی است. ازین‌رو پژوهش حاضر به بررسی کارایی راهکارهای غیرسازه‌ای و خودکارسازی، از دو دیدگاه فنی، با ارزیابی عملکرد تحویل و توزیع آب، و دیدگاه اقتصاد مهندسی، طبق شاخص‌های نسبت درآمد به هزینه و سود نهایی طی دوره‌های بلند و کوتاه‌مدت می‌پردازد. شبیه‌سازی بهره‌برداری تحت سناریوهای نوسانی و نرمال بهره‌برداری انجام شد. کانال اصلی شبکه آبیاری رودشت که از نوسانات جریان سراب کانال، به‌دلیل وقوع دوره‌های کم‌آبی، رنج می‌برد به‌عنوان مورد مطالعاتی پژوهش انتخاب شد. طبق نتایج راهکارهای غیرسازه‌ای سبب بهبود کفایت تحویل آب به آب‌گیرها، تا حداکثر ۲۲ درصد نسبت به بهره‌برداری موجود شدند. روش خودکارسازی با غلبه بر نوسانات شدید جریان ورودی، تمام نیاز آب‌گیرها را برطرف کرده و با بهبود حداکثری شاخص کفایت تا ۸۵ درصدی همراه بود. ارزیابی اقتصادی در دوره طرح کوتاه‌مدت پنج و بلندمدت ده ساله حاکی از درآمدزایی بیش‌تر راهکار خودکارسازی نسبت به سایر روش‌ها بود. ولی حداکثر سود در سناریوی نرمال و در دوره‌های کوتاه پنج و بلندمدت ده ساله به‌ترتیب ۵۶۸ و ۱۴۴۶ میلیارد تومان برای راهکار غیرسازه‌ای افزایش دبی و کاهش زمان آبیاری به‌دست آمد. بنابراین، در شرایط موجود بهره‌برداری طی بلندمدت گزینه‌های غیرسازه‌ای کارکرد بهتری داشته‌اند.

کلیدواژه‌ها: تحلیل اقتصادی، روش‌های بهره‌برداری، خودکارسازی، شبکه آبیاری رودشت.

Feasibility of employing non-structural and automation approaches to improving operation of water distribution systems (Case study: Roodasht irrigation district)

Mehdi Yaltaghin Khiabani[1], Seyed Mehdy Hashemy Shahedaniu[2*], Mohammad Ebrahim Banihabib[3], Yousef Hasani[4]
1. M.Sc. Graduated in Hydraulic Structures, Department of Irrigation and Drainage Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Iran
2. Assistant Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Iran
3. Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Iran
4. Researcher, Water and Water Economies office, Ministry of Energy, Iran
Received: October 10, 2019 Accepted: December 01, 2019

Abstract
Increasing the losses of water delivery and distribution regarding recent drought events makes necessity to upgrade the irrigation and drainage networks operation with higher transmission and distribution efficiency further than before. Providing solutions to improve water delivery and distribution and evaluating them requires the assessments of the plans from technical and economic views. Therefore, the present study, by giving non-structural and automation options, examines the efficiency of them by assessing the water delivery and distribution function and using the engineering economics under the inflow fluctuations conditions. The main canal of the Roodasht Network, which suffered from inflow fluctuations, was selected as a case study. The results of the simulation carried out by the ICSS hydrodynamic model, showed that the second non-structural strategies were efficient to improve the water delivery to Off-Takes by maximum 22% improvement of adequacy index relative to the present main canal operation. The automation method, by overcoming inflow fluctuations, supplied all the requirements of the crop areas and enhanced the adequacy index by a maximum of 85% than the current operation. Economically evaluation in the short-term of five years and long-term of ten years indicated that the automation method was more generate revenue than other methods. But the second non-structural option could produce a maximum profit in the standard scenario in the short and long periods 568 and 1446 billion Toman, respectively.

Keywords: Automation, Economic Analysis, Operational Approaches, Roodasht Irrigation District.

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

مقدمه

توزیع غیرمطمئن آب کشاورزی استحصال‌شده از منابع آب سطحی سبب افزایش چشم‌گیر برداشت از منابع آب زیرزمینی شده است. امروزه شبکه‌های آبیاری، که وظیفه انتقال و توزیع منابع آب سطحی را به‌عهده دارد، با اختصاص بخش اعظم نواحی آبیاری به خود، مصرف‌کننده عمده آب در بخش کشاورزی به‌شمار می‌رود. از طرفی تأثیرات منفی عواملی چون افزایش جمعیت و تغییر اقلیم و از طرف دیگر، عدم تناسب روش‌های توزیع و تحویل حاضر آب با شرایط کم‌آبی موجود، مدیریت مناسب بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری را با مشکل مواجه کرده است (۲۱). در واقع ناکارآمدی سامانه‌های موجود انتقال، توزیع و تحویل آب کشاورزی در تأمین نیاز درخواستی آب‌گیرهای واقع در کانال‌های آبیاری لزوم به‌کارگیری طرح‌های به‌سازی، نوسازی و خودکارسازی شبکه‌های آبیاری را گوشزد می‌نماید. در این راستا افزایش راندمان انتقال، توزیع و تحویل آب در شبکه‌های اصلی آبیاری نیازمند استفاده از راهکارهای کارآمد و مدرن در فعالیت‌های خارج از مزرعه[1] است (۲۷). خودکارسازی سامانه‌های آبیاری یا همان سامانه‌های خارج مزرعه (یعنی سامانه‌های انتقال، توزیع و تحویل) غالباً در دو شیوه: اعمال روش‌های سازه‌ای شامل باز طراحی کانال‌های آبیاری یا اعمال تغییرات سازه‌ای موردی در کانال (مثل ساخت مخازن درون‌مسیری) (۲۲) و روش‌های غیرسازه‌ای قابل انجام است. خودکارسازی و بهره‌گیری از سامانه‌های کنترل خودکار به‌عنوان دیگر گزینه‌های مؤثر جهت خودکارسازی و افزایش بهره‌وری، می‌تواند موجب انعطاف‌پذیری شبکه در تحویل و توزیع آب شود (۱۶). در این پژوهش سامانه کنترل خودکار متمرکز پیش‌بین (MPC)[2] به‌عنوان یک راهکار خودکارسازی در کنار سایر گزینه‌ها جهت بهبود بهره‌برداری کانال اصلی آبیاری بررسی شده است. تجربه موفق عملکرد این سامانه را می‌توان در پژوهش‌های بسیاری دریافت. ایگرژا و همکاران با استفاده از کنترل‌گر پیش‌بین، عملکرد این سامانه در تحویل آب به آب‌گیرهای بازه‌ای از کانال اصلی را بررسی کردند (۱۵). زفرا- کابز و همکاران با اعمال روش کنترل پیش‌بین در توزیع آب درکانال اصلی آبیاری، میزان شاخص‌های ریسک و عدم قطعیت را برای عملکرد این سامانه ارزیابی کردند (۲۶). بگوویچ و همکاران با استفاده از کنترل خودکار پیش‌بین (MPC) بهره‌برداری از کانال را با چند مخزن درون‌مسیری دارای دریچه که در انتهای کانال قرار دارد جهت تأمین رقوم موردنیاز در انتهای هر مخزن مدل کردند و نتایج حاصل حاکی از ایجاد رقوم آب با خطای مقبول بود (۱۰).

با وجود طرح‌های مختلف برای بهبود بهره‌برداری در شبکه‌های اصلی آبیاری، نهادهای مربوطه همواره برای مقایسه و اتخاذ تصمیم، به بررسی و توجیه‌پذیری اقتصادی، اجرایی و ارزیابی این راهکارها نیاز دارند. بدین معنی که برآورد درآمد حاصل از طرح‌ها، هزینه‌های سرمایه‌گذاری، جهت تعیین توجیه اقتصادی راهکارها در دوره طرح تعیین شده، باید در نظر گفته شود (۱۱). در واقع تدوین یک چارچوب جهت مقایسه و بررسی طرح‌ها از دو دیدگاه بهره‌برداری (فنی) و اقتصادی، ارزیابی راهکارها برای مدیران ارشد را برای مقایسه و اجرای آن‌ها، تسهیل می‌کند. در زمینه توجیه‌پذیری اقتصادی طرح‌های به‌سازی و مدرن‌سازی، حسنی و همکاران (۱۳) در پژوهشی با بررسی قابلیت‌های سامانه خودکار MPC در توزیع و تحویل آب به

1. Off-farm systems

2. Model Predictive Control

واحدهای زراعی سوددهی طرح مذکور را طبق شاخص اقتصادی نسبت درآمد به هزینه[1] توجیه‌پذیر ارزیابی کردند. در تحقیق حاضر با بررسی و مقایسه راهکارهای پیشنهادی براساس شاخص ارزیابی بهره‌برداری و امکان‌سنجی اجرا و مقایسه طرح‌ها طبق ارزیابی اقتصادی، مقادیر هزینه سرمایه‌گذاری (شامل هزینه احداث، بهره‌برداری ونگه‌داری)، درآمد و نهایتاً سود ناخالص حاصل در انتهای دوره‌های معیّن تعیین شده‌اند. چراکه محدودیت‌های مالی نهادهای بالادستی، استفاده از شاخص‌های ارزیابی اقتصادی، برای مقایسه گزینه‌های بهبود تحویل و توزیع آب در شبکه‌های اصلی آبیاری را طبق درآمد، هزینه‌ها و صرفه اقتصادی آن‌ها الزامی می‌کند.

در این پژوهش با استفاده از شاخص ارزیابی کفایت تحویل آب به آب‌گیرها، کارآمدی هر یک از راهکارها در بهبود وضعیت بهره‌برداری کانال اصلی آبیاری مشخص شده است. در ادامه، با در نظر گرفتن مقادیر هزینه‌ها (سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری و نگه‌داری)، درآمد و نهایتاً سود ناخالص هر روش در انتهای دوره طرح‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت، اولویت‌بندی طرح‌ها از نظر اقتصادی انجام می‌شود. راهکارهای پیشنهادی بهبود تحویل و توزیع در شبکه اصلی آبیاری این تحقیق، شامل راهکارهای غیرسازه‌ای و خودکارسازی بوده‌اند. به این صورت که «زمان‌بندی تحویل آب به آب‌گیرها» و «افزایش دبی ورودی با کاهش مدت زمان آب‌گیری» به عنوان راهکارهای غیرسازه‌ای و «بهره‌گیری از سامانه کنترل خودکار MPC» در قالب راهکار خودکارسازی مطرح شده‌اند. یلتقیان خیابانی و هاشمی شاهدانی (۹) پژوهشی با محوریت بررسی کارایی روش‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای در بهبود روند توزیع و تحویل آب در کانال اصلی آبیاری را انجام دادند. روش‌های غیرسازه‌ای «زمان‌بندی تحویل آب» و «افزایش دبی ورودی با کاهش مدت زمان آب‌گیری» از جمله روش‌های مورد بررسی در این تحقیق بوده‌اند که راندمان تحویل آب به آب‌گیرها در سطح قابل‌قبول (بالای ۸۰ درصد) ارزیابی شد. روش‌های بهره‌برداری غیرسازه‌ای مذکور در تحقیق منعم و همکاران (۶) که برای شبکه آبیاری فومنات شبیه‌سازی شد نیز قابل مشاهده است.

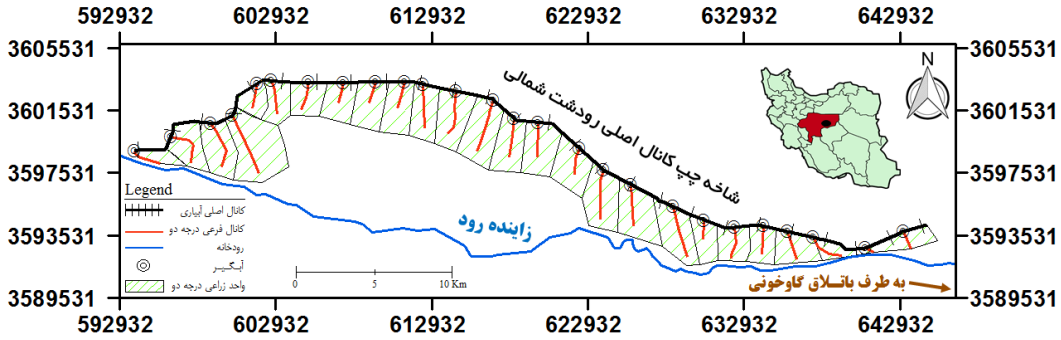
شبکه آبیاری رودشت با ترکیبی از مشکلات بهره‌برداری، اجتماعی و زیست‌محیطی (۸) به‌عنوان نمونه مطالعاتی این پژوهش انتخاب گردید. به‌منظور بررسی عملکرد راهکارهای غیرسازه‌ای در بهبود بهره‌برداری کانال اصلی آبیاری، شبیه‌سازی وضعیت جریان در کانال با مدل شبیه‌ساز هیدرودینامیک ICSS انجام شد. هم‌چنین جهت بررسی میزان تأثیرگذاری راهکارهای بهبود عملکرد در شرایط مختلف، دو سناریوی بهره‌برداری نرمال (براساس شرایط معمول توزیع و تحویل آب) و نوسانات ورودی شدید (که به‌سبب وقوع دوره‌های کم‌آبی شدید حوضه زاینده‌رود در ورودی شبکه ایجاد شده است) انتخاب و ارزیابی فنی و اقتصادی عملکرد شبکه انجام گردید.

مواد و روش‌ها

معرفی شبکه آبیاری مورد مطالعه

شبکه آبیاری رودشت در جنوب‌شرقی استان اصفهان، آخرین شبکه آبیاری است که از زاینده‌رود آب‌گیری می‌کند (شکل ۱). محصولات کشاورزی عمده کشت‌شده در شبکه آبیاری مذکور گندم، جو، یونجه، گلرنگ و چغندرقند هستند. مشکلات ناشی از کم‌آبی دوره‌های خشک‌سالی اخیر، بهره‌برداری این شبکه را با چالش جدی مواجه ساخته است.

1. Benefit to cost ratio



شکل ۱. شمایی از محل قرارگیری کانال اصلی رودشت در مجاورت رودخانه زاینده‌رود

براساس اطلاعات بهره‌برداری جمع‌آوری‌شده این شبکه، نوسانات مداوم و شدید دبی در سراب کانال سبب ایجاد شرایط بهره‌برداری نامناسبی از نقطه‌نظر راندمان، کفایت و عدالت تحویل آب در این شبکه شده است. چراکه خشکسالی‌های پی‌درپی حجم آورد سالانه رودخانه زاینده‌رود را به شدت تحت تأثیر قرار خود داده است و تا ۳۲ درصد کاهش دبی جریان را به همراه داشته است (۷). شبکه آبیاری رودشت با توجه به موقعیت استقرار خود به‌عنوان آخرین مصرف‌کننده آب حوضه زاینده‌رود همواره متضرر اصلی افت شدید جریان‌ها بوده است. بنابراین اجرای طرح‌های علاج‌بخشی جهت کاهش تلفات تحویل و توزیع آب ورودی از زاینده‌رود در شبکه ضروری بوده و نیازمند بررسی طرح‌های مختلف و امکان‌سنجی عملیاتی‌سازی آن‌ها از جنبه‌های فنی و اقتصادی است. به این ترتیب در این مطالعه، ارزیابی فنی و اقتصادی راهکارهای بهبود عملکرد بهره‌برداری برای کانال اصلی شاخه چپ رودشت شمالی بررسی شده است. مشخصات فیزیکی و هیدرولیکی کانال و سازه‌های وابسته کانال موردمطالعه در جدول (۱) ارائه شده است.

معرفی راهکارهای بهبود عملکرد بهره‌برداری

راهکار غیرسازه‌ای اول: زمان‌بندی تحویل آب به آب‌گیرها

این راهکار با الگوبرداری از روش تجربی مرسوم بهره‌برداری کانال اصلی در زمان خشکسالی که در برخی از شبکه‌های کشور (مانند شبکه آبیاری فومنات) استفاده می‌شود، برنامه‌ریزی شده است (۶ و ۱). در این روش در نیمی از زمان بهره‌برداری (یا در بخشی از بازه زمانی بهره‌برداری) تنها آب‌گیرهای واقع در نیمه بالادست کانال اصلی اقدام به برداشت آب نموده و آب‌گیرهای پایین‌دست به صورت کامل بسته خواهند بود و به‌طور متوالی آب‌گیرهای پایین‌دست باز و بالادستی‌ها اجازه برداشت نخواهند داشت. لذا در این راهکار با مشابه‌سازی شرایط نوسانات در کانال مورد مطالعه زمان‌بندی تحویل آب به آب‌گیرها مدنظر قرار گرفت.

راهکار غیرسازه‌ای دوم: افزایش دبی ورودی و کاهش مدت زمان آب‌گیری

براساس تجربه چندین ساله دفتر بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری شرکت آب منطقه‌ای اصفهان این راهکار پیشنهاد گردید. مطابق این روش، با کاهش مدت زمان آب‌گیری دبی بیش‌تری به شبکه وارد می‌شود. یعنی در ابتدا دبی ورودی به سراب کانال دو برابر دبی در شرایط کنونی و در مدت زمان بهره‌برداری نصف زمان بهره‌برداری در شرایط حاضر وارد کانال می‌شود. مطابق این روش حاضر زمان بهره‌برداری کانال مورد مطالعه از ۲۴ ساعت به ۱۲ ساعت تقلیل پیدا کرد.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی، هیدرولیکی و سازه‌های وابسته کانال اصلی آبیاری رودشت

ویژگی سازه‌ای	مقدار
وسعت شبکه تحت کشت کانال اصلی	۱۳۷۱۰ هکتار
شیب کف کانال	۰/۰۰۰۳
شیب جانبی کانال ذوزنقه‌ای	۱/۵
طول کانال اصلی	۵۳ کیلومتر
عمق کانال اصلی	۴/۲ متر
عمق نرمال جریان	۲/۵ متر
جنس کانال	بتن
آب‌گیرهای جانبی	۲۶ آب‌گیر نیرپیک (شامل سری L2 و XX2)
حداقل و حداکثر دبی تحویلی به آب‌گیرها	۰/۰۱۵ و ۰/۱۷۵ مترمکعب بر ثانیه
سازه‌های تنظیم سطح آب درون‌مسیری	۱۴ سازه سرریز ثابت بتنی نوکی‌اردکی

راهکار خودکارسازی: بهره‌گیری از سامانه کنترل خودکار پیش‌بین (MPC)

همان‌طورکه در شکل ۲ مشاهده می‌شود، وظیفه کنترل‌گر رساندن سطح آب پایین‌دست بازه معیّن به سطح آب هدف، با تنظیم سطح آب بالادست و نیز میزان تنظیم بازشدگی دریچه‌های مجهز به موتور بیان می‌شود. طبق شکل ۲ تراز آب توسط اندازه‌گیر الکترونیکی مستقر در کانال به سیستم کنترل ارسال شده و مطابق با تراز هدف موردنیاز در محل آب‌گیر و وضعیت هیدرولیکی بازه کانال، مقدار بازشدگی دریچه در شرایط موجود محاسبه شده و به سازه کنترل خودکار جهت تغییر وضعیت دریچه ارسال می‌شود.

در طراحی این سامانه علاوه بر روش کنترل پسخور[1] و پیشخور[2]، یک روش بهینه‌سازی برای محاسبه متغیر خروجی کنترل‌گر در (رقوم سطح آب) استفاده می‌شود. بنابراین در هر گام زمانی اندازه‌گیری‌های لحظه‌ای کانال انجام و فرمان‌های کنترل براساس وضعیت هیدرولیکی پیش‌بینی می‌شوند. (۲۳). در مدل‌سازی از مدل فضای حالت خطی به‌دست‌آمده از رابطه سنت ونانت گسسته شده جهت تعریف مدل داخلی MPC استفاده شده است (۲۴). در کنترل سیستم آبی به‌روش MPC از مدل فضای حالت[3] که امکان فشرده‌سازی فرمولاسیون چند متغیره مدل‌های خطی را مهیا می‌کنند، جهت بیان مدل داخلی استفاده می‌شود. مدل فضای حالت استفاده‌شده در سیستم کانال‌ها را می‌توان در حالت کلی به فرم زوج رابطه (۱) بیان نمود (۲۳).

$$x(k+1) = A(k).x(k) + B_u.u(k) + B_d.d(k)$$
$$y(k) = C.x(k)$$ رابطه (۱)

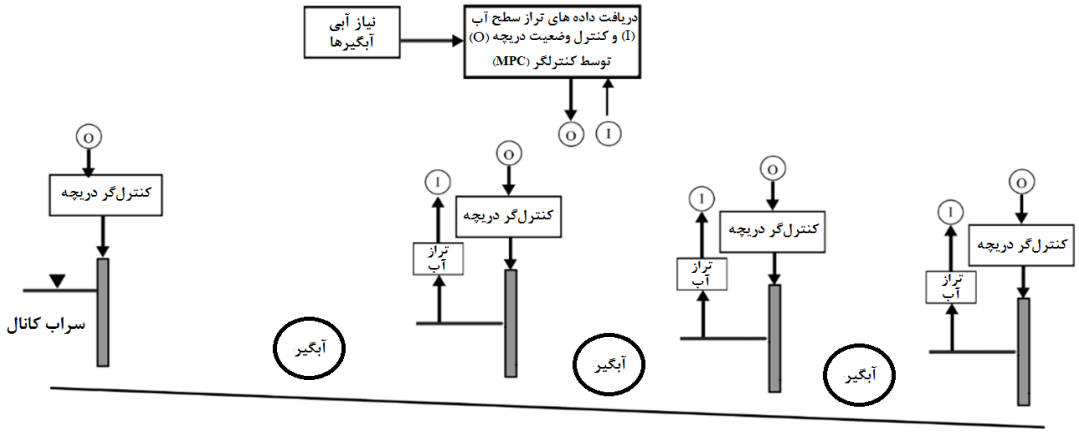
تابع هدف مورد استفاده در کنترل‌گر سراسری پیش‌بین به‌صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود (۲۳).

$$\min J = X^T.Q.X + U^T.R.U$$ رابطه (۲)

که در آن J تابع هدف بوده و می‌بایست حداقل شود، X متغیرهای حالت، U اعمال کنترلی، Q ماتریس وزن برای متغیرهای حالت و R ماتریس وزن برای اعمال کنترلی می‌باشند. با تعریف h_{ref} به‌عنوان مقدار هدف و تعریف خطا به فرم رابطه (۳) و جای‌گذاری آن در معادله (۱) می‌توان رابطه میزان خطا در هر بازه کانال را براساس جریان ورودی و جریان‌های خروجی محاسبه نمود (۲۵).

$$e(k) = h(k) - h_{ref}$$ رابطه (۳)

1. Feedback
2. Feedforward
3. State space model

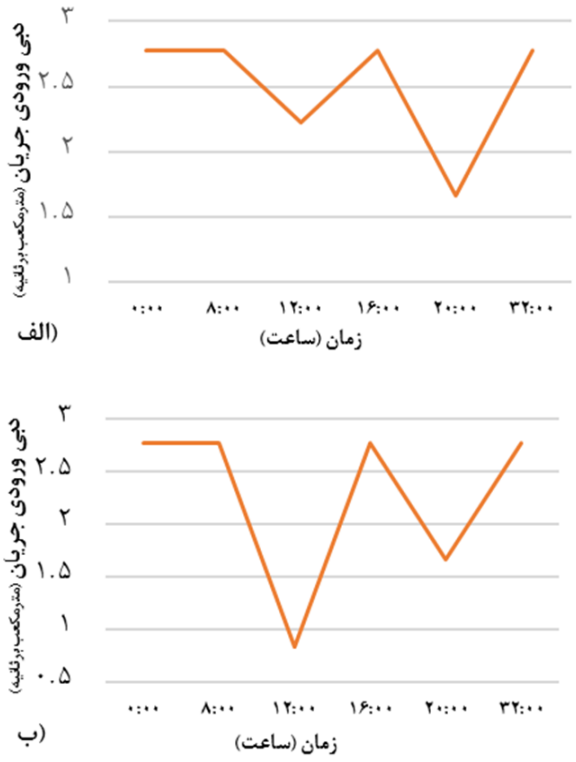


شکل ۲. کارکرد کنترل سطح آب توسط کنترل‌گر خودکار مرکزی

سناریوهای بهره‌برداری کانال آبیاری

جهت بررسی دقیق و نیز مقایسه توانایی راهکارهای بهبود عملکرد بهره‌برداری کانال اصلی آبیاری در این تحقیق، از سناریوهای بهره‌برداری با نوسانات جریان ورودی جهت شبیه‌سازی وضعیت بهره‌برداری کانال موردمطالعه استفاده شده است. بر این اساس، دو سناریوی بهره‌برداری با نوسانات نرمال (که همواره در جریان ورودی به شبکه رودشت وجود داشته و به‌طور معمول کانال موردمطالعه را تحت تأثیر قرار می‌دهد) و نوسانات شدید (که در دوره‌های خشکسالی رخ داده و در زمان‌های تغییر ناگهانی جریان ورودی به شبکه اتفاق می‌افتد) در نظر گرفته شد. در سناریوی بهره‌برداری اول نیاز کل کانال برابر با دبی ۲/۷۸ مترمکعب برثانیه، لحاظ گردید که الگوی نوسان ورودی به کانال (براساس اطلاعات جمع‌آوری‌شده از دفتر بهره‌برداری شبکه آبیاری رودشت) مطابق شکل (۳- الف) با حداکثر مقدار کاهش جریان ۳۸ درصد به مقدار ۱/۷ مترمکعب بر ثانیه تنزل پیدا کرده است. هم‌چنین مطابق شکل (۳- ب)، در سناریوی شدید نوسانات ورودی، مقدار دبی ورودی به کانال در طول ۲۰ ساعت شبیه‌سازی جریان به میزان ۷۵ درصد کاهش داشته و در مدت چهار ساعت به کم‌تر از یک متر مکعب بر ثانیه رسیده است.

شایان ذکر است که مقدار دبی درخواستی در هر یک از ۲۶ آب‌گیر واقع در کانال اصلی در هر دو سناریوی مذکور ثابت در نظر گرفته شد.



شکل ۳. الف) سناریوی نوسانات نرمال در جریان ورودی، ب) سناریوی نوسانات شدید در جریان ورودی

شبیه‌سازی وضعیت بهره‌برداری کانال اصلی آبیاری

به‌منظورشبیه‌سازی هیدرولیک جریان در کانال مورد مطالعه از مدل هیدرودینامیک ICSS استفاده شد. این مدل برای اولین بار توسط مانز در سال ۱۹۸۵ معرفی گردید (۱۷) و قابلیت بهره‌گیری از آن برای کانال آبیاری با سازه‌های مختلف تنظیم و آب‌گیر توسط منعم و مساح (۲۰)، منعم و امامیزاده، (۱۹)، حسین‌زاده و منعم، (۱۴) تکمیل گردید. این مدل می‌تواند جریان‌های ماندگار و غیرماندگار در شبکه‌های آبیاری را با انواع شکل‌های مقطع کانال همراه با طیف قابل‌توجهی از سازه‌ها و امکان بهره‌برداری آنها توأم با جریانات گسترده ورودی و خروجی شبیه‌سازی کند. مدل ریاضی کانال اصلی آبیاری موردمطالعه براساس اطلاعات جمع‌آوری‌شده از دفتر بهره‌برداری شبکه آبیاری رودشت که شامل نقشهٔ مسیر کانال، مشخصات فیزیکی بازه‌های کانال، محل و ابعاد سازه‌های آب‌بند نوک اردکی، نوع و مکان سازه‌های آب‌گیر نیرپیک، شرایط هیدرولیکی مرزی بالادست و پایین‌دست در شبیه‌ساز هیدرودینامیک ICSS است، طراحی شد. هیدروگراف جریان ورودی نوسانی به‌عنوان شرط مرزی بالادست و داده‌های اندازه‌گیری‌شده از سرریز انتهایی کانال اصلی به‌عنوان شرط مرزی پایین‌دست در شبیه‌سازی هیدرولیکی کانال به‌کار گرفته شد.

ارزیابی راهکارهای پیشنهادی

هدف اصلی این تحقیق، بررسی و مقایسه گزینه‌های پیشنهادی بهبود بهره‌برداری کانال اصلی آبیاری به لحاظ توانایی فنی بهره‌برداری و صرفه اقتصادی اجرایی است. لازمه این مهم تعیین وضعیت توجیه‌پذیری اقتصادی اجرای طرح‌ها در دوره‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت است. با مشخص‌شدن مقادیر درآمد و هزینه سرمایه‌گذاری (احداث، بهره‌برداری و نگه‌داری) طرح‌ها، وضعیت توجیه‌پذیربودن هر یک به‌لحاظ صرفه اقتصادی معیّن می‌شود. جهت بررسی میزان صرفه اقتصادی و تعیین وضعیت درآمد در مقابل هزینه سرمایه‌گذاری طرح (هزینه‌های احداث، بهره‌برداری و نگهداری) که توجیه‌پذیربودن طرح را به لحاظ اقتصادی مشخص می‌کنند از رابطه (۴) استفاده می‌شود.

نسبت درآمد به هزینه[1]: حاصل تقسیم درآمد به هزینه است که از رابطه زیر قابل محاسبه است (۱۱).

$$\frac{B}{C}=\frac{\sum B_t/(1+r)^i}{\sum C_t/(1+r)^i} \qquad \text{رابطه (۴)}$$

اگر نسبت درآمد به هزینه طرح (رابطه ۴) بیش‌تر از یک باشد، طرح توجیه‌پذیر، اگر برابر با یک باشد، مقادیر هزینه و درآمد برابر (نقطه سر به سر) و اگر این نسبت کوچک‌تر از یک باشد اجرای طرح دارای توجیه اقتصادی نمی‌باشد. B_t درآمد در سال tام بوده که حاصل از میزان فروش محصولات کشاورزی است. در واقع سطوح تحت کشت (بر پایه منبع آب سطحی جهت آبیاری) هر روش بهره‌برداری، تابع کارایی آن روش در تأمین حقابه مشخص هر آب‌گیر واحد زراعی خواهد بود. هم‌چنین با تعیین میزان آب تحویلی به هر آب‌گیر، میزان نواحی قابل کشت (تأمین‌شده از منبع آب سطحی) مشخص و میزان فروش محصولات (درآمد) در کل شبکه محاسبه می‌شود (۱۱). لازم به توضیح است که منظور از درآمد، درآمد ناشی از فروش محصولات کشاورزان می‌باشد. به این منظور جدول (۲) جهت نمایش قیمت، میزان تولید در واحد سطح (عملکرد تولید) و آب مصرفی هر محصول که مربوط به سال ۱۳۹۵ نمایش داده شده است. شایان ذکر است که اطلاعات ارائه‌شده در جدول (۲) از داده‌های جمع‌آوری‌شده از دفتر بهره‌برداری شبکه آبیاری رودشت و سازمان جهاد کشاورزی جمع‌آوری شده است.

1. Benefit-Cost ratio

جدول ۲. داده‌های موردنیاز محاسبه درآمد و هزینه شبکه در شرایط بهره‌برداری موجود (فصل بهار سال ۱۳۹۵)

نام محصول	سطح زیر کشت (هکتار)	آب مصرفی (مترمکعب در هکتار)	عملکرد (تن در هکتار)	قیمت (تومان بر کیلوگرم)
گندم	۹۲۱	۱۱۱۸۰	۴/۵	۱۱۵۵
جو	۱۷۶	۸۹۵۲	۴/۳	۹۲۰
یونجه	۹۷	۱۹۱۶۹	۱۲	۵۰۰
گلرنگ	۷۱	۱۶۵۹۶	۲	۲۱۵۰
چغندرقند	۲۲	۱۹۶۰۱	۴۵	۲۷۰

ظرفیت کشت برای تولید محصول کل شبکه در شرایط نرمال بهره‌برداری حاضر، ۱۳۷۱۰ هکتار می‌باشد. با بهبود سیستم آب‌رسانی شبکه، متعاقباً حجم آب ورودی از آب‌گیرها بیش‌تر شده و با لحاظ میزان آب مصرفی، نواحی تحت کشت و نهایتاً درآمد فروش محصولات نسبت به حالت بهره‌برداری موجود افزایش می‌یابد. C_t هزینه سرمایه‌گذاری طرح (احداث و بهره‌برداری و نگه‌داری) در سال انتهای سال t ام است. i تعداد سنوات (دوره طرح) و r نرخ بهره می‌باشد (نرخ بهره ۱۲ درصد درنظر گرفته شد). شرح خدمات هزینه‌های سرمایه‌گذاری طرح و مبالغ مربوطه سالانه در جدول ۳ آورده شده است (کلیه مقادیر از دفتر بهره‌برداری شبکه دریافت و مبالغ هزینه‌های سامانه MPC از پژوهش هاشمی شاهدانی و روزبهانی (۱۱) استخراج گردید).

پس از تعیین وضعیت توجیه‌پذیری اجرای طرح‌ها به لحاظ اقتصادی، ارزیابی عملکرد طرح‌های دارای توجیه اقتصادی، از جنبه‌های بهره‌برداری و اقتصادی طبق معیارهای ارزیابی آورده شده روابط (۵) و (۶) در ادامه تحقیق بررسی خواهند شد.

ارزیابی بهره‌برداری

شاخص کفایت تحویل آب به آب‌گیر توسط مولدن و گیتس (۱۸) ارائه شده است و بیان‌کننده میزان توانایی سیستم بهره‌برداری در تأمین حقابه مشخص هر آب‌گیر است که به‌کمک رابطه (۵) قابل‌محاسبه است:

$$P_A = \frac{1}{T}\sum_T [\frac{1}{R}\sum_R (P_a)] \qquad \text{رابطه (۵)}$$

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

در این معادله Q_r و Q_d به‌ترتیب معرف مقدار آب موردنیاز و مقدار آب تحویل‌شده در عمل برای انشعاب X در دوره زمانی t بوده و نمادهای $\frac{1}{T}\sum$ و $\frac{1}{R}\sum$ به‌ترتیب متوسط زمانی و مکانی می‌باشد. جهت تعیین سطح عملکرد توزیع و تحویل آب به هر آب‌گیر طبق شاخص کفایت از استاندارد ارائه‌شده توسط مولدن و گیتس (۱۸) استفاده می‌کنیم. به این ترتیب، محدوده مقادیر کفایت ۰/۹ تا ۱، ۰/۸ تا ۰/۸۹ و کم‌تر از ۰/۸ به‌ترتیب بیانگر کفایت تحویل خوب، متوسط و ضعیف آب به آب‌گیر توسط سیستم تحویل و توزیع آب است.

ارزیابی اقتصادی

این ارزیابی نشان‌دهنده عملکرد اقتصادی راهکار موردنظر در انتهای دوره طرح‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت است، که توسط مقادیر درآمد، هزینه سرمایه‌گذاری (احداث، بهره‌برداری و نگه‌داری) و سود ناخالص هر طرح در انتهای دوره معیّن انجام می‌شود (معادله ۶).

جدول ۳. مقادیر هزینه و درآمد راهکارهای بهبود عملکرد

	سامانه کنترل خودکار MPC	روش غیرسازه‌ای اول	روش غیرسازه‌ای دوم	روش بهره‌برداری موجود
شرح خدمات	احداث، بهره‌برداری و نگهداری (نیروی انسانی)	بهره‌برداری و نگهداری توسط نیروی انسانی	بهره‌برداری و نگهداری توسط نیروی انسانی	بهره‌برداری و نگهداری توسط نیروی انسانی
مقدار (تومان)	۵۳۰۰۰۰۰۰۰۰ احداث (سال اول) + ۵۴۰۰۰۰۰۰ بهره‌برداری و نگهداری (سالانه)	۵۴۰۰۰۰۰۰ سالانه	۵۴۰۰۰۰۰ سالانه	۵۴۰۰۰۰۰ سالانه

مطابق توضیحات ارائه‌شده در رابطه (۴)، هزینه سرمایه‌گذاری هر طرح شامل هزینه‌های احداث، بهره‌برداری و نگه‌داری بوده؛ و درآمد هر روش با توجه به میزان بهبود تحویل و توزیع آب در آن روش، نسبت به حالت بهره‌برداری موجود به‌دست می‌آید. به این صورت که با مشخص‌بودن مساحت‌های تحت کشت محصولات ۲۶ واحد زراعی در بهره‌برداری موجود، تأثیر هر راهکار با بهبود تأمین آب هر آب‌گیر، تا حد نیاز آن که در قالب شاخص کفایت (رابطه ۵) معرفی شد نسبت به حالت پایه (بهره‌برداری حاضر) سنجیده می‌شود. مازاد آب تحویلی با لحاظ میزان آب مصرفی محصولات (و عملکرد ثابت تولید) (جدول ۲) در قالب افزایش سطح کشت محاسبه و درآمد حاصل از فروش کل محصولات به‌دست می‌آید. در نتیجه تفاضل مقدار درآمد فروش محصولات (N.B) از هزینه‌های (C) هر روش، سود ناخالص راهکار موردنظر بوده که به‌صورت رابطه (۶) آورده شده است (۱۱).

رابطه (۶) $$B = N.B - C$$

در دو راهکار غیرسازه‌ای (مدیریتی) نیاز به سخت‌افزار خاصی نبوده و زیرساخت موجود توانایی اجرای آن‌ها را در قالب اقدام‌های مدیریتی فراهم می‌سازد. ولی در راهکار خودکارسازی (بهره‌گیری از سامانه کنترل خودکار MPC) نیاز به احداث تجهیزات و سخت‌افزار خاص وجود دارد. در واقع اگر تصمیم بر استفاده از راهکارهای مدیریتی باشد، هزینه‌ها فقط صرفاً موارد نگهداری و بهره‌برداری (توسط نیروی انسانی) خواهد بود. ولی در صورت استفاده از راهکار مدرن‌سازی که نیازمند بهره‌گیری از تجهیزات خاص است؛ علاوه بر هزینه‌های بهره‌برداری (خودکار) و نگهداری (توسط نیروی انسانی)، هزینه احداث آن‌ها نیز باید درنظر گرفته شود. بنابراین در این پژوهش فقط برای راه‌کار خودکارسازی هزینه احداث در نظر گرفته شده است و برای دو راهکار غیرسازه‌ای و روش بهره‌برداری موجود هیچ هزینه احداثی درنظر گرفته نشده است (جدول ۳).

جهت بررسی کارایی راهکارها از منظر بازگشت سرمایه، دوره طرح‌های مختلف با کوتاه‌مدت ۵ ساله و بلندمدت ۱۰ ساله تعریف شده است. به این ترتیب محاسبه هزینه و درآمدها در انتهای دوره‌طرح‌های مذکور، از روش اقتصادی مهندسی طبق رابطه (۷) به‌دست می‌آید (۲):

رابطه (۷) $$A = P \times (1+i)^n$$

به‌طوری‌که A میزان ارزش در انتهای دوره طرح، P میزان سرمایه اولیه، i نرخ بهره و n طول مدت دوره طرح هستند. هم‌چنین نرخ بهره برابر با ۱۲ درصد (برابر با نرخ بهره وام اعطایی بانک کشاورزی به کشاورزان) در نظر گرفته شد.

هم‌چنین در شبیه‌سازی بهره‌برداری توسط مدل هیدرودینامیک ICSS، از شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) که درصد مجموع اختلافات مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی نسبت به میانگین مقادیر مشاهداتی را نشان می‌دهد، استفاده گردید. پس از واسنجی مدل ریاضی جریان در کانال، فرآیند صحت‌سنجی براساس مقایسه مقدار دبی محاسبه‌شده تحویلی هر کدام از آب‌گیرهای واقع در کانال اصلی و مقدار دبی اندازه‌گیری‌شده توسط شرکت بهره‌برداری انجام گرفت. لازم به توضیح است که صحت‌سنجی مدل ریاضی تهیه‌شده توسط مدل ICSS براساس شرایط فعلی بهره‌برداری کانال آبیاری، شامل سازه‌های تنظیم از نوع نوک اردکی و آب‌گیرهای مدول نیرپیک و دقیقاً مطابق شرایط فیزیکی کانال آبیاری در زمان اندازه‌گیری انجام شده است. مقادیر به‌دست‌آمده برای شاخص ریشه میانگین مربعات خطا به‌ترتیب در واسنجی و صحت‌سنجی مدل ریاضی تهیه‌شده، برابر با ۰/۰۰۳ و ۰/۰۱۵ به‌دست آمد. بنابراین نتایج حاکی از آن است که مدل به‌خوبی واسنجی‌شده و برای شبیه‌سازی سناریوی بهره‌برداری، که هدف اصلی این پژوهش است، دقت خوبی دارد.

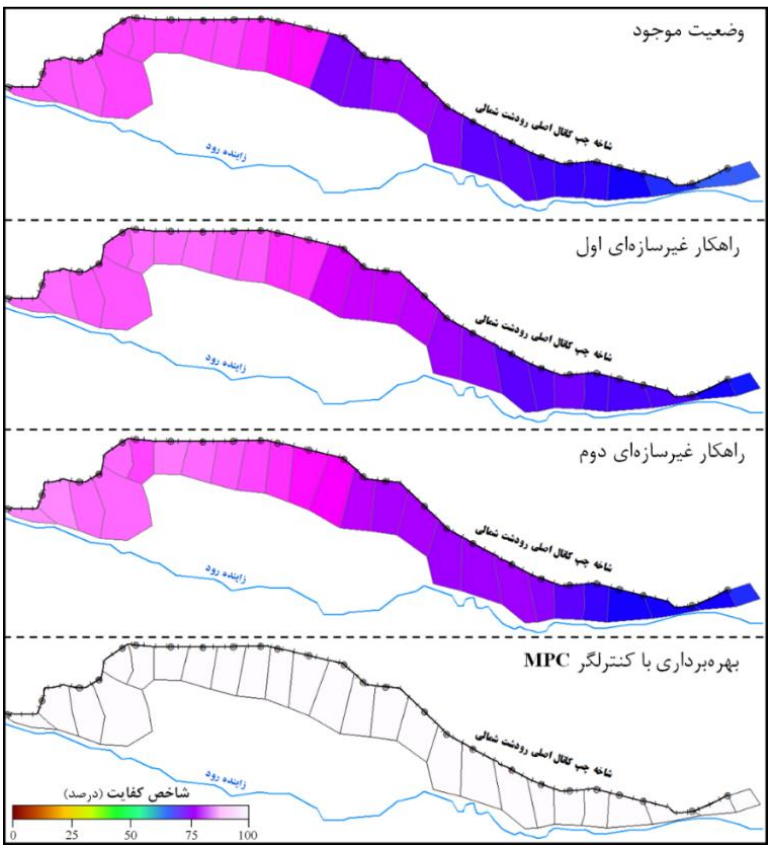
نتایج و بحث

نتایج ارزیابی فنی راهکارهای بهبود عملکرد بهره‌برداری کانال اصلی

راهکارهای پیشنهادی با تأثیر سناریوهای نوسانات ورودی بهره‌برداری، اجرا و شبیه‌سازی شد و نتایج به‌دست‌آمده از آن‌ها با نتایج به‌دست‌آمده از سناریوهای مشابه، برای بهره‌برداری حال حاضر شبکه آبیاری رودشت، مقایسه گردید. نتایج شبیه‌سازی‌ها برای سناریوهای نرمال و حالت نوسانی جریان ورودی در ادامه آورده شده است. در این اشکال از راهنمای طیف رنگی جهت نمایش عملکرد هر روش بهره‌برداری استفاده شده است. به‌طوری‌که طبق آن، هرچه رنگ ناحیه زراعی به رنگ سفید میل کند نشان از دریافت آب در حد نیاز (کفایت) آب‌گیر موردنظر دارد. و هرچه رنگ واحد زراعی به قرمز میل کند، حاکی از کفایت پایین تحویل آب به آب‌گیر آن واحد است. بر این اساس، طبق شکل (۴) که مربوط به حالت بهره‌برداری در شرایط نرمال است، میزان بهبود هر سه راهکار به وضوح قابل مشاهده است.

در روش بهره‌برداری موجود کانال اصلی شبکه رودشت طبق شاخص کفایت، هیچ یک از آب‌گیرها قادر به دریافت آب در سطح خوب نبوده‌اند. به‌طوری‌که آب‌گیرهای واقع در میانه کانال اصلی دارای شاخص کفایت کم‌تر از ۸۰ درصد بوده و در سطح ضعیف ارزیابی می‌شوند. ولی رنگ واحدهای زراعی با اجرای راهکارها، نشان از بهبود تحویل توزیع آب در بین آب‌گیرهای واحدهای زراعی دارد.

در راهکار غیرسازه‌ای اول، طی نیمی از مدت بهره‌برداری ابتدا آب‌گیرهای بالادست کانال آب دریافت کرده و آب‌گیرهای پایین‌دست بسته می‌مانند و بعد از آن آب‌گیرهای پایین‌دست آب برداشت می‌کنند؛ مشاهده می‌شود که کفایت تحویل آب نسبت به حالت بهره‌برداری موجود بهتر شده است. این میزان بهبود برای تمام آب‌گیرها قابل مشاهده است. هم‌چنین، راهکار غیرسازه‌ای دوم، توانایی بیش‌تری در تأمین نیاز آبی آب‌گیرها نسبت به روش غیرسازه‌ای اول دارد. با اجرای روش غیرسازه‌ای دوم، در حالت نرمال کلیه آب‌گیرهای بالادست در سطح خوب (۰/۹۲ تا ۰/۹) ارزیابی شده‌اند و آب‌گیرهای میانی، مقادیر کفایت تحویل در سطح متوسط (۰/۸۹ تا ۰/۸) کسب کردند.

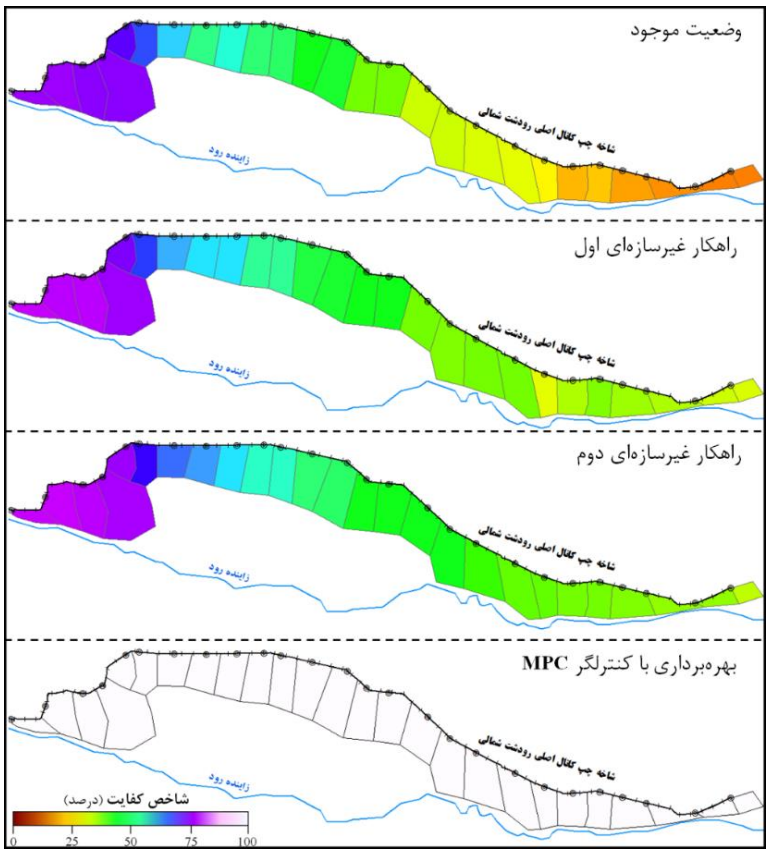


شکل ۴. نتایج عملکرد راهکارهای پیشنهادی در توزیع و تحویل آب در سناریوی نرمال بهره‌برداری

همان‌طورکه در شکل (۴) قابل مشاهده است، واحدهای زراعی درجه دو مستقر در بالادست کانال اصلی در بهره‌برداری حاضر شبکه، نسبت به بهره‌گیری از راهکارهای غیرسازه‌ای دارای مطلوبیت کم‌تری از نظر کفایت تحویل آب است و با اجرای روش‌های پیشنهادی، میزان بهبود کفایت تحویل آب دارای بهبود حداکثری ۸ درصدی بوده است. در راهکار خودکارسازی نیز مشاهده می‌شود کلیه نواحی زراعی، دارای بیش‌ترین مقدار کفایت بوده و رنگ سفید به‌خود گرفته‌اند و تمامی آب‌گیرها کلیه نیاز خود را دریافت می‌کنند. که نشان از توانمندی سامانه کنترل خودکار پیش‌بین در تأمین نیاز آبی واحدهای زراعی را دارد.

شکل (۵)، با لحاظ سناریوی نوسانات شدید جریان ورودی در سراب کانال اصلی، نشان‌دهنده تأثیر هر یک از راهکارهای پیشنهادی در بهبود تحویل و توزیع آب بین واحدهای آبیاری است.

براساس نتایج شبیه‌سازی بهره‌برداری کانال اصلی تحت سناریوی نوسانات شدید جریان ورودی در روش بهره‌برداری موجود حاکی از وضعیت نامناسب تحویل آب به آب‌گیرها است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، تمام آب‌گیرهای میانی و پایین‌دستی دارای شاخص کفایت زیر ۵۰ درصد به‌دست‌آمده و عملاً واحدهای زراعی مناطق مذکور هیچ آبی دریافت نمی‌کنند. با به‌کارگیری راهکار غیرسازه‌ای اول، مقادیر شاخص کفایت در حالت وجود نوسانات جریان سراب کانال، برای آب‌گیرهای میانی و پایین‌دستی، در سطح ضعیف (۰/۳۲ تا ۰/۵۱) ارزیابی می‌شوند.



شکل ۵. نتایج عملکرد راهکارهای پیشنهادی در توزیع و تحویل آب در سناریوی نوسانات ورودی جریان

نتایج نشان از حداکثر بهبود ۱۷ درصدی در تحویل و توزیع آب دارد. هم‌چنین با اجرای راهکار غیرسازه‌ای دوم، بهبود کفایت تحویل آب به آب‌گیرهای واقع در بالادست کانال اصلی تا ۱۳ درصد و برای آب‌گیرهای واقع در پایین‌دست شبکه، بهبود تا ۲۲ درصد بوده است. در شرایط وجود نوسانات ورودی، کشاورزان واقع در پایین‌دست کانال دچار مشکل شده؛ به‌طوری‌که نمی‌توانند بیش‌از ۶۰ درصد نیاز آبی خود را دریافت کنند. نواحی زراعی میانی نیز با وجود نوسانات ورودی دارای مقادیر کفایت نامطلوب (۳۳ تا ۴۹ درصد) است. ولی با این حال، متوسط بهبود این روش برای آب‌گیرهای انتهایی در حد ۱۵ درصد به‌دست آمد که حاکی از تأثیر مثبت این روش در بهبود بهره‌برداری از کانال اصلی است و رنگ سبز به‌خود گرفته است. نتایج مربوط به سامانه کنترل خودکار پیش‌بین (MPC) در بهبود حداکثری وضعیت تحویل و توزیع آب در کانال اصلی مورد مطالعه قابل‌مشاهده است. توانایی این سامانه در توزیع و تحویل آب بین آب‌گیرها به‌صورتی است که در شرایط نوسانی نیز کلیه آب‌گیرها توانسته‌اند کلیه نیازشان را دریافت کنند. بهبود ۸۵ درصدی برای آب‌گیرهای پایین‌دستی در شرایط وجود نوسانات جریان نشان از کارآمدی این سامانه کنترل متمرکز دارد. در واقع این سامانه با به‌کارگیری دریچه‌های کشویی موتوریزه و مدیریت و کنترل متمرکز آن‌ها و هم‌چنین وجود افق پیش‌بین نوسانات آتی سیستم، اقدام به پیاده‌سازی بهینه بهره‌برداری کانال آبیاری نموده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، بهره‌برداری کانال آبیاری با

بهره‌گیری از سامانه کنترل خودکار سبب خواهد شد تا مقدار تلفات ناشی از بهره‌برداری به حداقل ممکن برسد.

با توجه به مقادیر متفاوت شاخص کفایت تحویل آب هر یک از آب‌گیرها در روش‌های مختلف پیشنهادی، جدول (۴) جهت مقایسه کیفیت بهره‌برداری در هر سناریو و براساس تقسیم‌بندی شاخص کفایت تحویل آب ارائه شده است. طبق جدول (۴) میزان بهبود هر دو روش غیرسازه‌ای در حالت بهره‌برداری نرمال به‌چشم می‌خورد. طبق جدول مذکور بین دو روش غیرسازه‌ای، راهکار افزایش دبی و کاهش مدت زمان آب‌گیری نسبت به راهکار اول برای آب‌گیرهای واقع در بالادست در شرایط نرمال عملکرد بهتری از خود نشان داده است. ولی با اجرای دو راهکار غیرسازه‌ای در شرایط وجود نوسانات ورودی بهره‌برداری کانال اصلی در سطح ضعیف ارزیابی می‌شود. این در شرایطی است که با بهره‌گیری از سامانه کنترل خودکار MPC، تمامی آب‌گیرها در طول کانال اصلی در سناریوی بهره‌برداری نرمال و نوسانی دارای عملکرد خوب بوده‌اند.

میزان آب تحویلی از سراب شبکه در روش‌ها و سناریوهای مختلف بهره‌برداری و میزان آب مازاد به‌دست‌آمده ناشی از بهبود سیستم تحویل و توزیع آب در شبکه (نسبت به بهره‌برداری موجود) که موجب افزایش سطح کشت و ایجاد درآمد می‌شود، در جدول (۵) آمده است. براساس جدول (۵)، احجام آب تحویلی با بهبود روش بهره‌برداری کاهش می‌یابد که در این میان، راهکار خودکارسازی با تحویل ۱۵۹ میلیون مترمکعب آب، کم‌ترین میزان آب تحویلی را دارد. در حقیقت با افزایش کارایی سیستم تحویل و توزیع آب در کانال اصلی توسط راه‌کارهای پیشنهادی، مقادیر قابل‌توجهی از آب در شبکه (نسبت به بهره‌برداری موجود) به‌صورت آب صرفه‌جویی‌شده ایجاد شده که می‌توان جهت توسعه سطح کشت آبیاری‌شده با منبع آب سطحی (جایگزینی با آب زیرزمینی) در نظر گرفت. سامانه کنترل پیش‌بین با بهبود بهره‌برداری کانال، توانست حجم آبی بالغ بر ۲۹ میلیون مترمکعب را جهت توسعه سطح کشت با منبع آب سطحی فراهم کند.

جدول ۴. میزان مطلوبیت کفایت تحویل آب به آب‌گیرها

		شرایط نرمال بهره‌برداری			شرایط نوسانات جریان ورودی		
		ضعیف	متوسط	خوب	ضعیف	متوسط	خوب
حالت بهره‌برداری موجود	آب‌گیرهای بالادستی		*		*		
	آب‌گیرهای میانی	*			*		
	آب‌گیرهای پایین‌دستی	*			*		
راهکار اول غیرسازه‌ای	آب‌گیرهای بالادستی		*		*		
	آب‌گیرهای میانی		*		*		
	آب‌گیرهای پایین‌دستی	*			*		
راهکار دوم غیرسازه‌ای	آب‌گیرهای بالادستی			*	*		
	آب‌گیرهای میانی		*		*		
	آب‌گیرهای پایین‌دستی	*			*		
راهکار خودکارسازی	آب‌گیرهای بالادستی			*			*
	آب‌گیرهای میانی			*			*
	آب‌گیرهای پایین‌دستی			*			*

جدول ۵. حجم آب تحویلی و آب صرفه‌جویی‌شده در روش‌ها و سناریوهای مختلف بهره‌برداری (هزار مترمکعب)

سناریو		سامانه کنترل خودکار MPC	روش غیرسازه‌ای دوم	روش غیرسازه‌ای اول	روش بهره‌برداری موجود
نرمال	حجم آب تحویلی	۱۵۸۹۴۴	۱۸۵۰۰۷	۱۸۶۷۹۰	۱۸۸۶۲۶
	حجم آب صرفه‌جویی‌شده	۲۹۶۸۲۰	۳۶۱۹	۱۸۳۶	–
نوسانی	حجم آب تحویلی	۱۵۸۹۴۴	۲۳۱۰۷۲	۲۳۸۱۰۱	۲۴۳۲۷۳
	حجم آب صرفه‌جویی‌شده	۲۹۶۸۲۰	۱۲۲۰۱	۵۱۷۲	–

نتایج ارزیابی اقتصادی

با محاسبه هزینه‌های احداث، بهره‌برداری و نگه‌داری راهکارهای پیشنهادی و درآمد حاصل از آنها، این مقادیر در انتهای دوره‌های کوتاه‌مدت پنج ساله و بلندمدت ده ساله براساس روش اقتصادی مهندسی محاسبه شدند. سپس بررسی توجیه‌پذیری هر یک از طرح‌ها در دوره طرح‌های مذکور براساس رابطه (۴) انجام شد. براین اساس، نسبت درآمد به هزینه‌های (B/C) طرح‌ها در دوره‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت، بزرگ تر از یک و توجیه‌پذیر به‌دست آمدند. سپس مقایسه و ارزیابی اقتصادی راهکارها به‌عنوان یک هدف تحقیق ضروری بوده و در قالب معیارهای درآمد، هزینه و سود ناخالص حاصل از هر طرح در انتهای دوره معین برای هر سناریوی بهره‌برداری بیان می‌شود. طبق آن‌چه مطرح شد، درآمد شبکه ناشی از بهبود سطوح تحت آبیاری هر روش بهره‌برداری بوده که جدول (۶) بیانگر میزان سطوح تحت کشت هر راهکار در سناریوی مورد نظر است.

براساس جدول (۶) با اجرای راهکارهای پیشنهادی، مساحت‌های تحت کشت افزایش یافته که این مهم نتیجه بهبود سیستم تحویل و توزیع آب در طول کانال اصلی بوده است. بیش‌ترین میزان این بهبود مربوط به راهکار مدرن‌سازی بوده که در شرایط بهره‌برداری نرمال و نوسانی به‌ترتیب با افزایش سطح کشت ۱۳۱۸ و ۳۷۶۳ هکتار همراه بوده است.

جدول ۶. مقادیر کل سطوح تحت کشت (آبیاری) با منبع آب سطحی با اجرای راهکارهای پیشنهادی در سناریوهای معیّن (هکتار)

سناریو	MPC	راهکار دوم	راهکار اول	بهره برداری موجود
نرمال	۱۵۰۲۸	۱۳۸۶۶	۱۳۷۹۴	۱۳۷۱۰
نوسانی	۱۵۰۲۸	۱۱۸۳۳	۱۱۵۲۰	۱۱۲۶۵

با درنظرگرفتن دوره طرح کوتاه‌مدت پنج ساله، نتایج معیارهای ارزیابی اقتصادی مذکور در دو سناریوی نرمال و نوسانی به‌صورت شکل (۶) نشان داده می‌شود. براساس شکل (۶- الف)، روش بهره‌برداری موجود در شرایط نرمال در انتهای سال پنجم حدود ۵۶۱ میلیارد تومان درآمد داشته است. که با احتساب هزینه‌های بهره‌برداری و نگه‌داری ۴۳۸ میلیون تومانی، سود حاصل از اجرای طرح کم‌تر از سایر روش‌ها خواهد بود. با درنظرگرفتن هزینه‌های بهره‌برداری و نگه‌داری دو راهکار غیرسازه‌ای مشابه هزینه‌های بهره‌برداری موجود، سود تولیدشده دو راهکار غیرسازه‌ای با حداکثر افزایش سطح کشت ۱۵۶ هکتاری نسبت به حالت موجود، افزایش حداکثری ۷ میلیارد تومانی داشته است. شایان ذکر است که هزینه‌های یادشده در دو راهکار غیرسازه‌ای در مقایسه با وضعیت بهره‌برداری موجود افزایش می‌یابد که مطابق جدول (۳) شامل هزینه بهره‌برداری (به‌واسطه افزایش تعداد اپراتورهای متخصص در تیم‌های بهره‌برداری) و نگه‌داری (شامل تعمیرات دوره‌ای سازه‌ها و کالیبراسیون‌های دوره‌ای) می‌باشد.

شکل ۶. مقادیر درآمد، هزینه و سود ناخالص راهکارها در دوره کوتاه‌مدت پنج ساله.
الف) سناریوی نرمال، ب) سناریوی نوسانی

هم‌چنین با لحاظ هزینه‌های احداث کنترل‌گر MPC علاوه بر هزینه‌های بهره‌برداری و نگه‌داری نسبت به سه روش دیگر، هزینه‌های درنظرگرفته‌شده برای این روش بیش‌از روش‌های دیگر بوده است. و درآمد کم (معادل درآمد بهره‌برداری موجود) سال اول به جهت عملیات یک ساله احداث و استقرار سامانه MPC بر سازه‌های تنظیم سطح آب، عامل کاهش سود این روش نسبت به سه روش دیگر شده است.

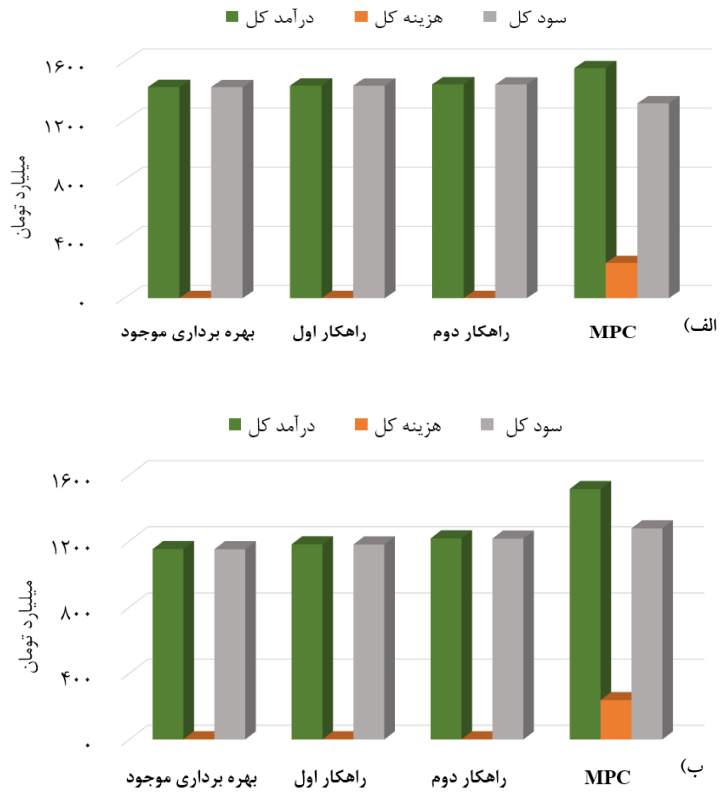
به این ترتیب در دوره کوتاه‌مدت ۵ ساله، بیش‌ترین سود ناخالص متعلق به راهکار غیرسازه‌ای افزایش مدت زمان آب‌گیری و کاهش دبی سراب ورودی است. در شرایط وجود نوسانات ورودی سراب (شکل ۶- ب) نیز به‌طور مشابه نتایج دوره طرح ۵ ساله، نشان از برتری راهکار غیرسازه‌ای دوم دارد. منتهی در این سناریو، اختلاف ۲۸ میلیارد تومانی سود بین دو روش بهره‌برداری با کنترل‌گر پیش‌بین و راهکار غیرسازه‌ای دوم به‌مراتب کم‌تر از شرایط مشابه در حالت نرمال (اختلاف ۱۰۵ میلیارد تومانی) است. به‌طوری‌که راهکار غیرسازه‌ای دوم در شرایط نوسانی با ایجاد سود ۴۷۷ میلیارد تومان در کوتاه‌مدت نسبت به بقیه روش‌ها سودآوری بیش‌تری داشته است. در این شرایط راهکار مدرن‌سازی تحقیق با بهبود ۱۳۱۸ هکتار توانست در کوتاه‌مدت بیش‌ترین درآمد (۵۸۴ میلیارد تومان) را تولید کند. که با توجه به مشابه‌بودن نتایج کفایت تحویل آب توسط راهکار

مدرن‌سازی در دو سناریوی تحقیق، میزان سطح کشت و درآمد تولیدی یکسان به‌دست آمده است.

با درنظرگرفتن دوره طرح بلندمدت ده‌ساله نتایج معیارهای ارزیابی اقتصادی در دو سناریوی نرمال و نوسانی به‌صورت شکل (۷) نشان داده شده است. بر این اساس در حالت بهره‌برداری نرمال (شکل ۷- الف) و با لحاظ دوره بلندمدت ده ساله، روش‌های بهره‌برداری موجود و غیرسازه‌ای توانایی بیش‌تری در سوددهی نسبت به راه‌کار بهره‌گیری از سامانه هوشمند کنترل خودکار دارند.

ولی درآمد حاصل از این سامانه بیش‌تر از سایر روش‌ها بوده است. به این معنی که، اختلاف درآمد دو راهکار غیرسازه‌ای و خودکارسازی در سناریوی بهره‌برداری نرمال، به‌طور متوسط بیش از ۱۰۰ میلیارد تومان بوده است. ولی راهکار غیرسازه‌ای دوم نهایتاً دارای بیش‌ترین سود (۱۴۴۶ میلیارد تومان) نسبت به سایر روش‌ها بوده است.

براساس شکل (۷- ب)، با اعمال شرایط نوسانی در دبی سراب کانال اصلی، روش بهره‌برداری موجود در انتهای سال دهم، درآمدی بالغ بر ۱۱۵۲ میلیارد تومان کسب کرده است. درحالی‌که روش‌های بهبود تحویل و توزیع غیرسازه‌ای اول و دوم با افزایش سطح تحت کشت به‌ترتیب ۲۵۵ و ۵۶۸ هکتاری (طبق جدول ۵)، به‌طور متوسط سود به‌ترتیب ۱۱۷۹ و ۱۲۱۵ میلیارد تومان داشته‌اند. ولی راهکار مدرن‌سازی با بهبود درآمد ۳۶۳ میلیارد تومانی نسبت به‌روش بهره‌برداری موجود دارای حداکثر سود ۱۲۷۷ میلیارد تومانی در بین سایر روش‌ها است.



شکل ۷. مقادیر درآمد، هزینه و سود ناخالص راهکارها در دوره بلندمدت ده ساله. الف) سناریوی نرمال، ب) سناریوی نوسانی

جمع‌بندی ارزیابی اقتصادی انجام‌شده در این تحقیق حاکی از برتری درآمدزایی راه‌کار خودکارسازی در مقایسه با روش‌های غیرسازه‌ای تحت هر دو سناریوی نوسانات نرمال (ملایم) و شدید است. در عین حال به‌خاطر هزینه احداث بالای سامانه کنترل پیش‌بین نسبت به سایر روش‌های بهره‌برداری تحقیق، سوددهی راهکارهای غیرسازه‌ای و بهره‌برداری موجود (به‌جز در دوره بلندمدت شرایط بهره‌برداری نوسانی) بیش از سود راه‌کار خودکارسازی به‌دست آمده است. هم‌چنین در توجیه ضعف سوددهی سامانه کنترل خودکار MPC نسبت به سایر راه‌کارها، می‌توان به عدم کشت محصولات زراعی با لحاظ مساحت‌های بهینه اقتصادی انواع محصولات، جهت حداکثرسازی سود کشاورز اشاره کرد. چراکه کنترل‌گر خودکار پیش‌بین با توانایی کارکرد چندهدفه و ایجاد انعطاف بیش‌تر توزیع آب در شبکه نسبت به بهره‌برداری‌های سنتی، امکان اجرای سیاست‌های مختلف مدیریتی را به‌سهولت عملی می‌سازد. در این شرایط، تخصیص آب طبق معیار ارزش اقتصادی آن بین واحدهای زراعی در زمان وجود نوسانات جریان نیز می‌تواند نقش سامانه‌های کنترل خودکار متمرکز را در افزایش سطوح کشت و درآمدزایی بیش‌تر نسبت به حالت بهره‌برداری موجود (سنتی) برجسته و مثبت نشان دهد. ناگفته نماند که قیمت‌گذاری صحیح آب با درنظرداشتن هزینه‌های سرمایه‌گذاری و ارزش اقتصادی آب در شبکه و واقعی‌سازی قیمت آب، عامل مهمی در ایجاد شرایط ایده‌آل برای افزایش سودآوری شبکه و بروز قابلیت‌های سامانه‌های کنترل خودکار متمرکز خواهند بود. که در تحقیقات آتی موارد مذکور جهت بررسی کارایی روش‌های مختلف بهره‌برداری مورد بحث قرار خواهد گرفت.

نتیجه‌گیری

راندمان‌های پایین توزیع و تحویل آب به واحدهای زراعی و کارکرد نامناسب شبکه‌های اصلی آبیاری، انگیزه‌ای در اجرای طرح‌های نوسازی، به‌سازی و خودکارسازی در شبکه‌های اصلی آبیاری ایجاد کرده است. تصمیم در انتخاب و اجرای طرح‌های برتر از میان گزینه‌های مختلف از سوی نهادهای اجرایی، الزامی جهت ارزیابی این گزینه‌ها از جنبه‌های مختلف بهره‌برداری (فنی)، اقتصادی، اجتماعی و غیره می‌طلبد.

پژوهش حاضر، جهت بررسی کارایی روش‌های بهبود تحویل و توزیع آب، راهکارهای خودکارسازی، غیرسازه‌ای و بهره‌برداری سنتی موجود کانال اصلی شبکه آبیاری رودشت شمالی را در شرایط بهره‌برداری نرمال و وجود نوسانات ورودی موردبررسی قرار داد. راه‌کارهای غیرسازه‌ای اول، دوم و راهکار خودکارسازی به‌ترتیب «زمان‌بندی تحویل آب به آب‌گیرها»، «افزایش دبی ورودی با کاهش مدت زمان آب‌گیری» و «بهره‌گیری از سامانه کنترل خودکار MPC» بودند. شبیه‌سازی راه‌کارهای پیشنهادی مذکور طبق سناریوهای بهره‌برداری نرمال و نوسانی در مدل هیدرودینامیک ICSS انجام شد و نتایج در قالب دو نوع ارزیابی بهره‌برداری و ارزیابی اقتصادی انجام شدند. ارزیابی بهره‌برداری طرح‌ها که توسط شاخص ارزیابی عملکرد کفایت تحویل آب به آب‌گیرها انجام شد، نشان از بهبود بهره‌برداری در طول کانال اصلی مورد مطالعه را داشتند. به‌طوری‌که راه‌کار خودکارسازی و راه‌کارهای غیرسازه‌ای اول و دوم به‌ترتیب کم‌ترین میزان تقاضای آب را جهت بهبود تحویل و توزیع آب نسبت به‌روش بهره‌برداری موجود کانال اصلی داشته‌اند. در سناریوی بهره‌برداری نرمال، راهکار خودکارسازی با بهبود ۳۳ درصدی تحویل آب به واحدهای زراعی و تأمین کلیه نیاز آبی آب‌گیرها نسبت به سایر روش‌های بهره‌برداری، عملکرد بهتری داشت. در سناریوی نوسانات ورودی سراب کانال نیز به‌طور مشابه سامانه کنترل خودکار پیش‌بین با تأمین تمام نیاز آبی واحدهای زراعی و

بهبود ۸۵ درصدی آب‌رسانی به ۲۶ واحد درجه دو، توانایی خود را در مقایسه با بهره‌برداری سنتی اثبات کرد. در واقع برتری سامانه کنترل خودکار متمرکز بر راهکارهای مدیریتی و غیرسازه‌ای نوبت‌بندی تحویل آب و افزایش دبی و کاهش زمان آبیاری در شرایط وجود نوسانات جریان به‌وضوح قابل مشاهده است. چراکه اکثر شبکه‌های آبیاری کشور از وجود نوسانات جریان رنج می‌برند. ارزیابی اقتصادی طرح‌ها نیز در دوره‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت، حاکی از بهبود درآمدزایی و سوددهی راه‌کارها داشت. سامانه کنترل خودکار پیش‌بین با افزایش سطح کشت ۱۳۱۸ و ۳۷۶۳ هکتار به‌ترتیب در سناریوهای نرمال و نوسانی همراه بود که دارای بیش‌ترین میزان سطح کشت و بیش‌ترین درآمد بود. این درحالی است که سوددهی روش‌های بهره‌برداری موجود و دو راه‌کار غیرسازه‌ای به‌جز در شرایط نوسانی دوره بلندمدت تحقیق از راه‌کار خودکارسازی بیش‌تر بوده است. که عواملی چون، عدم کشت محصولات طبق الگوی تراکم کشت بهینه (اقتصادی) و عدم تخصیص آب طبق ارزش اقتصادی آن که نیازمند بهره‌گیری از سیستم آب‌رسانی تقاضامحور (مانند سامانه‌های کنترل خودکار متمرکز) است، سوددهی سامانه MPC را در مقابل سایر گزینه‌ها ضعیف نشان می‌دهد. بااین‌حال تصمیم‌گیری در انتخاب راه‌کارها تابع سیاست‌های کلی حاکمیتی و اسناد بالادستی خواهد بود که کدام یک از مبناهای «بهره‌وری اقتصادی آب» یا «بهره‌وری فیزیکی آب» در گزینش طرح لحاظ شود. براساس سیاست‌های طرح گزینی کشور، مبنای صرفه اقتصادی در انتخاب گزینه‌های با سودآوری بیش‌تر مدنظر بوده که طبق نتایج این تحقیق تحت شرایط نرمال، راه‌کار افزایش دبی و کاهش زمان آبیاری و تحت شرایط نوسانی، راه‌کار خودکارسازی برتری خود را نشان دادند و به‌عنوان راهکار قابل عملیاتی‌سازی در بلندمدت طرح می‌گردند. در نهایت، لزوم ارزیابی طرح‌های عمرانی با معیارهای ارزیابی اقتصادی در دوره طرح‌های معین علاوه بر معیارهای فنی، دید نهادهای تصمیم‌گیر و مدیران ارشد را در انتخاب طرح‌های به‌صرفه از میان گزینه-های موجود، وسیع نموده و موجب کاهش هدررفت ذخایر مالی ملّی خواهد شد.

منابع

۱. استواری دیلمانی، ش. (۱۳۹۶). مدیریت توزیع آب در شبکه‌های آبیاری در شرایط کمبود آب با استفاده از مدل‌های هیدرودینامیکی. رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.

۲. اسدی، ه.، زمانیان، غ. و توکلی، ع. (۱۳۹۴). بررسی اقتصادی تک‌آبیاری و تعیین هزینه تمام‌شده آب آبیاری در مزارع گندم دیم منطقه هنام، استان لرستان. بوم‌شناسی گیاهان زراعی. ۱۱ (۲): ۱-۱۰.

۳. ایران‌پور، م.، ایراندوست، م. و رضایی استخروییه، ع. (۱۳۹۵). تأثیر سطوح مختلف و سامانه‌های آبیاری بر عملکرد، اجزای عملکرد و بهره‌وری آب در ذرت دانه‌ای. مدیریت آب و آبیاری. ۶ (۱): ۶۱-۷۲

۴. حسین‌زاده، ز.، منعم، م. ج. و نهاوندی، ن. (۱۳۹۳). توسعهٔ مدل تصمیم‌گیری چندشاخصه برای انتخاب سامانه‌های اندازه‌گیری خودکار جریان در شبکه‌های آبیاری. مدیریت آب و آبیاری. ۴ (۲): ۱۷۷-۱۹۰

۵. قادری، ک.، زلقی، آ. و بختیاری، ب. (۱۳۹۳). بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم چندمخزنی با استفاده از الگوریتم تکامل رقابتی جوامع (SCE) (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ کرخه). مدیریت آب و آبیاری. ۴ (۲): ۲۱۵-۲۲۸

۶. منعم، م.، ج.، نجفی، م. ر. و خوشنواز، ص. (۱۳۸۶). برنامه ریزی بهینه تحویل آب در کانال های آبیاری با استفاده از الگوریتم ژنتیک، تحقیقات منابع آب ایران. ۳ (۱): ۱۱-۱.

۷. هاشمی شاهدانی، س. م. (۱۳۹۵). بررسی میزان مطلوبیت بهره‌برداری کانال‌های اصلی آبیاری از نقطه‌نظر توزیع عادلانه آب در شرایط کم‌آبی در سامانه کنترل بالادست و کنترل پایین‌دست (مطالعه موردی: کانال اصلی شاخه شمالی شبکه آبیاری رودشت). گزارش تحقیقاتی، شرکت مدیریت منابع آب ایران، وزارت نیرو.

۸. هاشمی شاهدانی، س. م.، فیروزفر، ع.، صادقی، س. و ادیب مجد، ا. (۱۳۹۵). بررسی عملکرد سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز در بهره‌برداری کانال اصلی آبیاری تحت نوسان‌های جریان ورودی. تحقیقات کاربردی مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی. ۶۶ (۱۷): ۱۵۲-۱۳۷.

۹. یلتقیان خیابانی م. و هاشمی شاهدانی س. م. (۱۳۹۶). بررسی کارایی گزینه‌های غیرسازه‌ای و سازه‌ای جهت بهبود بهره‌برداری کانال اصلی آبیاری با نوسانات ورودی. شانزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه محقق اردبیلی. اردبیل. ایران.

10. Begovich O, Ruiz VM, Besancon G, Aldana CI and Georges D (2007) Predictive control with constraints of a multi-pool irrigation canal prototype. *Latin American Applied Research* 37(3): 177-185.
11. Hargreaves G and Samani Z (1984) Economic consideration of deficit irrigation. *Irrigation and Drainage* 110(4): 343-358.
12. Hashemy Shahdany SM and Roozbahani A (2015) Selecting an appropriate operational method for main irrigation canals within multicriteria decision-making methods. *Irrigation and Drainage Engineering* 142(4): 1-9.
13. Hassani Y, Shahdany SMH, Maestre JM, Zahraie B, Ghorbani M, Hennebery SR and Kulshreshtha SN (2019) An economic-operational framework for optimum agricultural water distribution in irrigation districts without water marketing. *Agricultural Water Management* 221(1): 348-361.
14. HoseinZadeh Z and Monem MJ (2012) Development and test of Mathematical Model of Automatic Pivot Weir with PID Algorithm. *Iran Soil and Water Research* 43(3): 87-94.
15. Igreja J, Lemos J, Cadete F, Rato L and Rijo M (2012) Control of a water delivery canal with cooperative distributed MPC. American Control Conference (ACC). Montreal. Canada.
16. Lozano D, Arranja C, Rijo M and Mateos L (2010) Simulation of automatic control of an irrigation canal. *Agricultural Water Management* 97(1): 91-100.
17. Manz DH (1990) Use of the ICSS model for prediction of conveyance system operational characteristics. In Proceedings 14th International Congress on Irrigation and Drainage. Rio de Janeiro. Brazil.
18. Molden DJ and Gates TK (1990) Performance measures for evaluation of irrigation water delivery systems. *Irrigation Drainage Engineering* 116(6): 804-822.
19. Monem MJ and Mamizadeh J (2005) Development the Mathematical Model of BIVAL Downstream Control System. *Hydraulics* 1(2): 1-13.
20. Monem MJ and Massah A (2003) Development of Mathematical Model of Amil Hydraulic Structure. 4th Iranian Hydraulic Conference. Shiraz. Iran.
21. Nam WH, Hong EM and Choi JY (2016) Assessment of water delivery efficiency in irrigation canals using performance indicators. *Irrigation Science* 34(2): 129-143.
22. Schuurmans J, Clemmens AJ, Dijkstra S, Hof, A and Brouwer R (1999) Modeling of irrigation and drainage canals for controller design. *Irrigation & Drainage Eng* 125(6): 338-44.
23. Van Overloop PJ (2006) Model predictive control on open water systems. Delft, the Netherlands: IOS Press.
24. Van Overloop PJ, Schuurmans J, Brouwer R and Burt CM (2005) Multiple-model optimization of proportional integral controllers on canals. *Irrigation and Drainage Engineering* 131(2): 190-196.
25. an Overloop PJ, Weijs S and Dijkstra S (2008) Multiple model predictive control on a drainage canal system. *Control Engineering Practice* 16(5): 531-540.
26. Zafra-Cabeza A, Maestre JM, Ridao MA, Camacho EF and Sánchez L (2011) A hierarchical distributed model predictive control approach to irrigation canals: A risk mitigation perspective. *Process Control* 21(5): 787-799.
27. Zamani S and Parvaresh Rizi A (2015) The Effect of Design Parameters of an Irrigation Canal on Tuning Performance of a PI Controller. *Irrigation and Drainage* 64(4): 519-53.