تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال چهاردهم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۷
Volume 14, No. 4, Winter 2019 (IR-WRR)
۱۳۲-۱۴۶

ارزیابی اثر بخشی بهبود بهره‌برداری از منابع آب سطحی در کاهش برداشت آب از آبخوان (مطالعه موردی: شبکه آبیاری قزوین)

محسن حسین جلفان[۱]، سیدمهدی هاشمی شاهدانی[۲*]، سامان جوادی[۳] و محمدابراهیم بنی‌حبیب[۴]

چکیده

این تحقیق به بررسی میزان تأثیرگذاری ارتقاء مدیریت بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری بر کاهش برداشت آب از آبخوان، کاهش مصرف انرژی و کاهش تولید گاز دی‌اکسیدکربن پرداخته است. برای این منظور سامانه کنترل غیرمتمرکز تناسبی-انتگرالی و سامانه کنترل خودکار متمرکز پیش‌بین، طراحی و تحت سناریوهای بهره‌برداری نرمال و شدید (کم آبی) کانال اصلی شبکه آبیاری قزوین مورد آزمون قرار گرفت. نتایج برای سناریوی اول نشان داد که میزان بهبود شاخص کفایت با ارتقا بهره‌برداری به سامانه‌های کنترل خودکار غیرمتمرکز برابر ۱۳ درصد و برای سامانه کنترل خودکار متمرکز ۲۸ درصد به‌دست آمد. برهمین اساس میزان کاهش برداشت از آبخوان پس از ارتقا به سامانه‌های کنترل خودکار ۲۶/۳ درصد، میزان کاهش مصرف انرژی برابر ۲۲/۷ درصد و میزان کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای نیز برابر ۲۴/۱ درصد حاصل شد. نتایج حاصل از سناریوی کم‌آبی حاکی از آن است که میزان بهبود شاخص کفایت با ارتقاء بهره‌برداری به سامانه‌های کنترل خودکار غیرمتمرکز برابر ۷۰ درصد و برای سامانه کنترل خودکار متمرکز ۷۷ درصد به‌دست آمد. براین اساس میزان کاهش برداشت از آبخوان برای دو روش مذکور به‌ترتیب ۲۸/۳ و ۶۳/۴ درصد، میزان کاهش مصرف انرژی به ترتیب برابر ۲۱/۳ و ۷۱/۶ درصد و میزان کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای نیز به‌ترتیب برابر ۲۳/۴ و ۷۰/۱ درصد حاصل شد.

کلمات کلیدی: بهره‌برداری کانال اصلی، آبخوان، کنترل‌گر تناسبی-انتگرالی، سامانه کنترل پیش‌بین، صرفه‌جویی انرژی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۹/۱۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۳/۱۶

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.
۲- استادیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.
۳- استادیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.
۴- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

Assessment to Improving Operational Approaches of the Surface Water Resources on Groundwater Extraction Reduction (Case Study: Qazvin Irrigation District)

M. Hosseini Jolfan [1], S. M. Hashemy Shahdany [2], S. Javadi [3] and M.E. Banihabib [4]*

Abstract

The objective of this study is to investigate the effectiveness of upgrading the water distribution and delivery systems within the main irrigation canals, on reducing the water pumping from the aquifer. Consequently, the energy consumption reduction and carbon emission reduction is investigated. To achieve this goal, a set of two practical canal automation alternatives, including a decentralized automatic system and centralized control system are designed and tested under the normal and severe (drought) scenarios of the main canal of Qazvin irrigation network. The results for the first scenario showed that the adequacy indicators are increased 13% and 28% respectively with employing the decentralized automated control systems and the centralized one. Accordingly, the reduction in extracting groundwater is declined about 26.6% and inconsequent the energy preservation due to pumping decrease is equal to 7.27% and the greenhouse gas reduction rate is obtained 24.1%. The results of the second scenario, representing the water shortage conditions, indicate that the improvement of the adequacy index by upgrading the operating system to decentralized systems is obtained 70% and for the centralized automated system is obtained 77%. Accordingly, the reduction in abstracting groundwater from the aquifer for the proposed automation methods are 28.3% and 63.4% respectively. Moreover, the reduction of energy consumption are 21.3% and 71.6%, respectively and the greenhouse gas emission reduction was equal to 23.4 and 70.1 %, respectively.

Keywords: Operation of Main Canal, Aquifer, Proportional--Integral Controller, System Predictive Control, Energy Saving.

Received: December 1, 2017
Accepted: June 6, 2018

1- M.Sc. Hydraulic Structures Student, Department of Irrigation and Drainage, Abouraihan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran.
2- Assistant Prof., Irrigation and Drainage Engineering Department, Abouraihan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: mehdi.hashemy@ut.ac.ir
3- Assistant Prof., Irrigation and Drainage Engineering Department, Abouraihan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran.
4- Associate Prof., Irrigation and Drainage Engineering Department, Abouraihan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran.
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

امروزه خشکسالی و کم آبی در ایران یک واقعیت اقلیمی است که با توجه به افزایش نیاز بخش‌های مختلف به آب، مدیریت مصارف و تأمین منابع آب نیازمند بازنگری جدی است. براساس گزارش مؤسسه بین‌المللی مدیریت آب (IWMI)[1]، کشور ایران برای حفظ وضع فعلی خود تا سال ۲۰۲۵ باید بتواند ۱۱۲ درصد به منابع آب قابل استحصال خود بیافزاید (Abbasi et al., 2016). این در حالی است که ایران بعنوان یکی از کشورهای واقع در کمربند خشک کره زمین با مشکل کم آبی و خشکسالی‌های متناوب مواجه است، به‌طوریکه با متوسط بارندگی ۲۵۰ میلی‌متر در سال نسبت به ۷۵۰ میلی‌متر میانگین جهانی آن، در گروه کشورهای خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته است (Madani, 2014). بنابراین به نظر می‌رسد استحصال منابع جدید آب قابل دسترس، بسیار مشکل و حتی ناممکن است. لذا در چنین شرایطی ارتقا مدیریت مصرف آب می‌تواند به عنوان یکی از مؤثرترین راهکارها در استفاده بهینه از منابع محدود آب کشورمان تلقی شود. در این زمینه، بررسی مطالعات صورت‌گرفته حاکی از آن است که بخش کشاورزی، به‌عنوان بزرگترین مصرف کننده آب در کشور، عملکرد ضعیفی در استفاده بهینه از آب داشته است. به‌طوریکه ارزیابی راندمان کاربرد آب آبیاری در برخی از استانهای کشور در سال ۱۳۸۷ نشان می‌دهد که متوسط راندمان کاربرد آب آبیاری، با احتساب شیوه مدیریت کشاورزان، روش آبیاری و نوع محصول، از حداقل۲۴/۷ درصد تا حداکثر ۵۵/۷ درصد با میانگین ۵۰/۹ درصد است (Abbasi et al., 2016). همچنین تحقیق جامع‌تری از کل شبکه‌های آبیاری کشور که در سال ۱۳۹۵ انجام گرفت حاکی از آن است که با فرض راندمان انتقال و توزیع ۶۰ درصدی، راندمان کل آبیاری در این شبکه‌ها بین ۱۵ تا ۳۶ درصد در نوسان است (Abbasi et al., 2016). شایان ذکر است که در تحقیق مذکور، مقدار راندمان گزارش شده به ترتیب با فرض ۶۵ درصد برای راندمان انتقال و توزیع در شبکه سنتی و ۸۲/۵ درصد برای شبکه مدرن است (Abbasi et al., 2016). این در حالی است که مقادیر اندازه‌گیری شده راندمان انتقال و توزیع در شبکه‌های مدرن مشابه در کشورهای دیگر کمتر از مقادیر مشابه فرض شده در شبکه‌های آبیاری ایران است. به‌عنوان مثال مقدار راندمان در شبکه‌های آبیاری مدرن مناطق کشاورزی مدیترانه برابر با ٪۴۶/۸ (Serra et al., 2016) و شبکه‌های آبیاری مدرن ساخته شده توسط FAO در اتیوپی برابر با ٪۷۴ گزارش شده است (Agide et al., 2016). بنابراین با توجه به این واقعیت که راندمان انتقال و تحویل توزیع آب در شبکه‌های آبیاری مدرن ایران صرفاً مفروضاتی هستند که تقریباً هیچ پشتوانه علمی (بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی یا مدل‌سازی هیدرولیکی) قابل قبولی ندارند، لذا می‌توان ادعا نمود که ارقام فرض شده تخمین‌های بیش از اندازه می‌باشند. عملکرد دور از انتظار شبکه‌های آبیاری سبب شده است تا تقریباً در محدوده‌های عمده‌ای در داخل شبکه‌ها، به‌دلیل عدم کفایت و عدالت در توزیع منابع آب سطحی، کشاورزی بطور فزاینده‌ای وابسته به منابع آب زیرزمینی شده است. سهم بخش کشاورزی در استفاده از منابع زیرزمینی ۹۰ درصد است که در مقایسه با ۸ درصد مصرف شرب و ۲ درصد مصرف صنعت، درصد قابل ملاحظه‌ای است (Madani, 2014). بهره‌گیری از آب زیرزمینی به عنوان یک منبع مکمل در کنار آب سطحی، عملکرد سامانه‌های بهره‌برداری را از نقطه نظر عدالت و اعتمادپذیری در توزیع آب بهبود می‌دهد. با این حال یکی از تأثیرات پمپاژ آب‌های زیرزمینی برای مصارف کشاورزی، اثر سوء آن بر وضعیت آبخوان‌ها می‌باشد. بطوری‌که با توجه به وضعیت بحرانی ۲۷۷ دشت از مجموع ۶۰۹ دشت در سراسر کشور باید توجه داشت که برداشت از منابع آب زیرزمینی باید به حداقل ممکن برسد (Forootan et al., 2014; Joodaki et al., 2014). بیش از ۷۰ درصد کل برداشت آبهای زیرزمینی در ایران از چاه‌های عمیق با عمق ۹۰ متر می‌باشد (Karim et al., 2012). از تأثیرات مخرب پمپاژ منابع آب زیرزمینی، به خصوص پمپاژ از چاه‌های عمیق، از مصرف انرژی‌های مستقیم (چاه‌های با موتورهای دیزلی) و غیرمستقیم (پمپ‌های با الکتروموتور) ایستگاههای پمپاژ است که سبب انتشار دی‌اکسیدکربن می‌شود (Karim et al., 2012). عمق آبهای زیرزمینی بطور مستقیم با نیاز انرژی برای استخراج آب ارتباط دارد. لذا بهره‌برداری از آبهای زیرزمینی در ایران به میزان قابل توجه‌ای انرژی بیشتری نسبت به کشورهای هند و پاکستان دارد، که در آن سطح آب در عمق کمتری است (Karim et al., 2012). برای مثال، مقدار انرژی مصرف شده برای استحصال حدود km^3 ۴۹ آب در ایران، برابر با km^3 ۱۸۰ آب در عمق ۲۰ متری در هند است. بنابراین، اگرچه حجم آبهای زیرزمینی استخراج شده در ایران کمتر از ۲۰ درصد هند است، اما نیاز به انرژی به اندازه ۸۰ درصد بیشتر از آن است (Karim et al., 2012). پمپاژ بیش از حد آب و اتلاف انرژی بطور مستقیم باعث افزایش میزان تخلیه گاز دی‌اکسید کربن یا CO_2 می‌شود. شایان ذکر است که انتشار کربن یکی از دغدغه‌های جدی زیست محیطی در ایران است که نیاز به توجه بیشتری دارد. انتشار کربن در ایران از سال ۱۹۸۰ تقریبا ۴۵۰ درصد افزایش یافته به طوری‌که از ۳۳/۱ میلیون تن در آن سال به ۱۴۶/۸ میلیون تن در سال ۲۰۰۸ رسیده است (Andres et al., 2011). بنابراین استفاده پرحاصل و کارآمد از آبهای زیرزمینی در سطح شبکه‌ها برای تثبیت آبخوان و کاهش انتشار کربن، که یک استراتژی کلیدی کاهش تغییرات اقلیمی به‌شمار می‌رود، سودمند است (Karim et al., 2012). با توجه به توضیحات فوق، لازم است عملکرد سیستم‌های انتقال، توزیع و تحویل منابع آب سطحی (شامل سامانه کانال‌های روباز و سامانه‌های اصلی

انتقال کم فشار و تحت فشار) تا حد امکان بهبود داده شود تا برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، حداقل در داخل محدوده شبکه‌های آبیاری، به حداقل ممکن برسد. بنابراین، با توجه به آن‌چه در بالا تشریح شد، ارتقاء عملکرد مدیریت بهره‌برداری و نگهداری شبکه‌های آبیاری کشورمان، جهت تحقق مدیریت بهینه مصرف آب کشاورزی الزامی است. در این راستا لازم است تا با ارتقاء و به‌روزرسانی سامانه‌های بهره‌برداری در کانال‌های آبیاری بتوان به هدف مذکور دست یافت. با پیشرفت علم کنترل و ورود سیستم‌های کنترلی به صنعت، امکان به‌کارگیری این سامانه‌ها در بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری نیز فراهم شد. یکی از اولین تجربه‌های نصب و راه‌اندازی سامانه کنترل‌خودکار بهره‌برداری مربوط می‌شود به بهره‌گیری از کنترل‌گرهای کلاسیک تناسبی- انتگرالی-دیفرانسیلی (PID2) که توسط شرکت سوگری[3] فرانسه در سال ۱۹۷۰ در کانال اصلی کرکوک در عراق و نیز پروژه کوپاتیتزیو[4] در مکزیک استفاده شد (Rogers and Goussard, 1998). سامانه‌های کنترل خودکار خود شامل سامانه کنترل متمرکز و سامانه کنترل غیرمتمرکز هستند و تحقیقات متعددی در زمینه بکارگیری هر یک از آنها در حال انجام است که نمونه‌هایی از هر یک در زیر آورده شده است. همگام با به‌کارگیری سامانه‌های کنترل خودکار غیرمتمرکز، سامانه‌های خودکار متمرکز نیز توسعه یافته‌اند. با این حال، مطالعات نشان می‌دهد که کنترل‌گر موضعی به‌علت سهـــولت اســـتفاده در کانال‌های آبیاری از محبوبیت خاصی برخوردار است (Zamani et al., 2015). Zamani et al. (2015) طی پژوهشی با استفاده از مدل هیدرودینامیک SOBEK و نرم‌افزار MATLAB به طراحی و ارزیابی سامانه کنترل پایین دست تناسبی- انتگرالی[5] برای یک کانال اصلی پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که شیب کف کانال به عنوان یک فاکتور بیشترین تأثیر را بر روی رفتار جریان و تنظیم کنترل‌گر مورد نظر دارد. همچنین در تحقیقی یک مدل ریاضی از الگوریتم RL[6] برای کنترل عمق آب در بالای سازه‌های چک توسعه دادند. سناریوهای مختلف افزایش و کاهش جریان ورودی شبیه‌سازی شد. نتایج به‌دست آمده نشان دادکه حداکثر مقادیر، حداکثر خطای مطلق و خطای مطلق تجمعی به‌ترتیب ٪ ۳۰/۰۷ و ٪ ۰/۱۵۲ به‌دست آمد (Shahverdi et al., 2015). Hosseinzade et al. (2017) طی پژوهشی روش تحقیق تصمیم‌گیری چند معیاره (MADM) برای ایجاد یک چارچوب تجزیه و تحلیل تصمیم‌گیری (DA) برای ارزیابی، رتبه‌بندی و انتخاب ساختارهای چک و مصرف برای کانال‌های آبیاری ارائه دادند. به‌طور کلی، زمانی که تعداد بازه‌های کانال و نوسانات جریان محدود است، کنترل‌گرهای کلاسیک، مانند روش تناسبی- انتگرالی، در موارد عملی به خوبی عکس‌العمل نشان می‌دهند (Vanoverloop, 2005). اما از آنجایی که سیستم‌های آبیاری شبکه گسترده‌ای از کانال‌ها و سازه‌های متعدد هستند، مجموعه کانال‌های شبکه آبیاری دارای یک سیستم پیچیده با اغتشاشات متفاوت می‌باشند و لازم است از سامانه‌های کنترل خودکار متمرکز استفاده شود (Wagemaker, 2005). در میان الگوریتم‌های کنترل مدرن، سامانه کنترل خودکار متمرکز پیش‌بین[7] توجه محققان را بیشتر از سایر روشها به خود جلب کرده است. قابلیت حل مسائل کنترل چند متغیره، در نظر گرفتن محدودیتهای محرک‌های سیستم، امکان بهره‌برداری نزدیکتر به محدودیتهای فیزیکی و به روز رسانی سریع این روش کنترلی از دلایل اصلی مقبولیت زیاد این روش است (Maciejowski, 2002). Wagemaker (2005) برای اولین بار روش MPC را بر روی یک کانال آبیاری واقعی مورد آزمون قرار داد. کانال مورد آزمایش در این تحقیق، کانال فرعی WM آریزونا در ایالات متحده شامل ۸ بازه می‌باشد. نتایج نشان داد به‌علت آن‌که مدل سنت ونانت خطی‌شده قادر به در نظر گرفتن شرایط مختلف جریان می‌باشد، کنترل‌گر قادر به عکس العمل مناسب در شرایط هیدرولیکی متفاوت جریان بوده است. Van Overloop et al. (2008) از MPC جهت کنترل سیستم‌های بزرگ زهکشی هلند استفاده نمودند. هدف از این تحقیق جلوگیری از تخریب اراضی کشاورزی و مناطق مسکونی مجاور این زهکش‌ها در زمان‌های بارش سنگین معرفی شده است. Hashemy et al. (2016) در تحقیقی، یک مدل کنترل کننده پیش‌بین (MPC) را برای دستیابی به عملکرد بهره‌برداری بهتر با استراتژی ذخیره درون مسیری ترکیب کرد. کنترل کننده در طیف وسیعی از شرایط بهره‌برداری شامل بهره‌برداری در شرایط معمولی، بهره‌برداری تحت نوسانات جریان پیش‌بینی نشده و نیز قابل پیش‌بینی آزمایش شد. در مقایسه با بهره‌برداری معمولی کانال، شاخص‌های ارزیابی عملکرد محاسبه شـــده بهبود تقریباً ٪۲۱ برای حداکثر خطای مطلق (MAE) و افزایش ٪۱۲ بـــرای مقـــدار یکپارچه خطای مطلق (IAE) را نشان دادند. Fele et al. (2014) یک طرح کنترل سلسله مراتبی برای سیستم‌های بزرگ مقیاس ارائه دادند. هر گروه از زیر سیستم‌های مرتبط با پیوستگی بطور مستقل از طریق یک سامانه کنترل خودکار متمرکز پیش‌بین (MPC) که لایه پایین را مدیریت می‌کند، کنترل می‌شود. عملکرد طرح پیشنهادی بر روی مدل کانال آبیاری دز، که شبیه‌سازی دقیق برای سیستم‌های آب (SOBEK) انجام دادند. در نهایت نتایج با استفاده از یک کنترل کننده متمرکز (MPC) مقایسه شدند. Hashemi et al. (2017) در تحقیقی، رویکرد جدید بهره‌برداری اقتصادی شبکه‌های آبیاری در شرایط کم آبی را ارائه داد. برای این منظور، از تلفیق مدل اقتصادی، به منظور تعیین ارزش اقتصادی آب و مدل بهره‌برداری پیش‌بین (MPC)، جهت تحویل آب به واحدهای زراعی درجه ۲ در شبکه آبیاری قزوین استفاده شد. توزیع بهینه آب بر مبنای ارزش اقتصادی محاسبه شده، توسط مدل بهره‌برداری و با

حداقل‌سازی خطای رقوم سطح آب در بالادست آبگیرهای واقع در کانال اصلی انجام شد. نتایج به دست آمده نشان داد که با وجود کم آبی در کانال اصلی، کانال‌های L_4 و L_1، که بیشترین مقدار ارزش اقتصادی آب را داشته‌اند، بدون هیچ‌گونه خللی آب مورد نیاز خود را برداشت نموده‌اند. Shamsai and Foroghani (2011) در تحقیقی، بهره‌برداری تلفیقی در مناطق خشکی که فقط دارای منبع آب سطحی انتقالی بوده و فاقد دیگر منابع آب سطحی می‌باشند، مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور ابتدا آب زیرزمینی منطقه توسط مدل Modflow-PMWIN شبیه‌سازی شد و سپس نتایج حاصل از شبیه‌سازی در تدوین مدل بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک استفاده گردید و گزینه‌های مختلف در جهت بهره‌برداری بهینه از منابع آب بررسی شد. نتایج نشان داد که با انتقال مقادیر آب سطحی (حداکثر ۵۰ میلیون مترمکعب در سال)، تامین آب ٪۱۰۰ در تمامی ماه‌ها، همراه با کاهش افتی در حدود ۲ متر در سطح آب زیرزمینی، در طول ۵ سال می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که، چنانچه سالیانه ۴۰ درصد به حجم آب سطحی انتقالی افزوده شود، علاوه بر تأمین آب در کلیه ماه‌ها، کاهش سالیانه سطح آب در آبخوان منطقه به صفر می‌رسد.

این پژوهش در گام اول به بررسی میزان بهبود بهره‌برداری یک کانال اصلی آبیاری با بهره‌گیری از سامانه کنترل خودکار پرداخته است. برای این منظور سامانه کنترل غیرمتمرکز تناسبی-انتگرالی و سامانه کنترل خودکار سراسری پیش‌بین طراحی شده و تحت سناریوهای بهره‌برداری کانال اصلی شبکه آبیاری قزوین مورد آزمون قرار گرفت. در گام بعدی با استفاده از شاخص‌های ارزیابی عملکرد، میزان بهبود فرایند بهره‌برداری کانال اصلی قبل و بعد از بکارگیری اتوماسیون بررسی گردید. در ادامه میزان تأثیر بهبود بهره‌برداری منابع آب سطحی در کانال اصلی آبیاری بر کاهش آب برداشتی از آبخوان، در محدوده شبکه آبیاری قزوین، بررسی شد. برای این منظور برای هر کدام از روش‌های بهره‌برداری مورد نظر این تحقیق، شاخص ارزیابی کفایت تحویل آب از کانال اصلی به هر کدام از کانال‌های درجه دو به‌دست آمد. میزان عدم برداشت آب از آبخوان به تفکیک محدوده‌های زراعی درجه دو، انرژی صرفه‌جویی شده منتج از عدم پمپاژ و نیز کاهش مقدار CO_2 در اثر بهبود بهره‌برداری سامانه اصلی توزیع و تحویل آب، به تفکیک روش‌های بهره‌برداری معرفی شده در این تحقیق، محاسبه شد. این پژوهش برای اولین بار اقدام به بررسی توانایی سامانه‌های کنترل خودکار در بهره‌برداری از منابع آب سطحی با هدف کاهش برداشت از آبخوان واقع در محدوده شبکه آبیاری نموده است.

۲ – روش تحقیق

۲-۱- معرفی گزینه‌های خودکارسازی

۲-۱-۱- سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز تناسبی-انتگرالی (PI)

کنترل‌گر PI براساس روش کنترل پسخور (کنترل حلقه بسته) طراحی می‌گردد که در آن متغیر کنترل شونده (رقوم سطح آب در این تحقیق) در بالادست سازه تنظیم اندازه‌گیری می‌شود. در این روش، میزان انحراف رقوم سطح آب از رقوم هدف به الگوریتم کنترل بازگردانده می‌شود تا با اندازه‌گیری اقدام تصحیحی، که عبارت است از میزان بازشدگی سازه تنظیم، متغیر کنترل شونده (رقوم سطح آب بالادست سازه تنظیم) به سوی مقادیر هدف بازگردانده شود. در این روش اغتشاشات (میزان آب منحرف شده در محل آبگیرها یا هر رواناب وارد شده به کانال یا منحرف شده از آن) حتی اگر شناخته شده نباشند، به صورت غیرمستقیم و از طریق آثار آن بر خروجی سیستم (رقوم سطح آب هر بازه) در نظر گرفته می‌شود. بر اساس الگوریتم کنترل تناسبی–انتگرالی، تغییرات دبی عبوری از زیر سازه‌های تنظیم به صورت رابطه (۱) قابل محاسبه است (van Overloop et al., 2005):

$$\Delta Q_{(K)} = K_i.e_{(k)} + K_p.\left[e_{(k)} - e_{(k-1)}\right] \qquad (۱)$$

در رابطه فوق $\Delta Q_{(K)}$ مقدار تغییرات دبی عبوری از سازه‌های تنظیم بر حسب مترمکعب بر ثانیه در گام زمانی جاری، e برابر مقدار انحرافات تراز سطح آب از رقوم هدف، اندیس‌های k و $k-1$ به ترتیب نشانگر گام زمانی جاری و گام زمانی قبلی، k_p برابر ضریب تناسبی و k_i برابر ضریب انتگرالی است.

محاسبه ضرایب تناسبی و انتگرالی (k_i و k_p) بر اساس فرمول پیشنهادی (Schuurmans, 1997) برای طراحی کنترل‌گر تناسبی–انتگرالی انجام گرفت. بر اساس قوانین تنظیم ارایه شده توسط شورمانز محاسبه ضرایب تناسبی بر پایه چهار پارامتر سیستم که عبارتند از: سطح ذخیره در شرایط بهره‌برداری (A_s)، گام زمانی کنترل (T_c)، رزونانس ماکزیمم در جریان حداقل (R_p) و بسامد رزنانس ماکزیمم در جریان حداقل بازه کانال (ω_r) و به صورت روابط (۲) و (۳) قابل محاسبه است (Schuurmans, 1997):

$$K_p = \frac{1}{2}.\sqrt{\frac{A_s.\omega_r}{R_P}} \qquad (۲)$$

$$K_i = \frac{T_c.\omega_r}{12.R_P} \qquad (۳)$$

اصولاً طراحی سیستماتیک یک کنترل‌گر کلاسیک در کانال‌های آبیاری می‌تواند به دو شیوه کنترل بالادست یا پایین‌دست آن‌ها انجام شود. در این تحقیق کنترل‌گرهای PI به شیوه بالادست و در دو حالت

کنترل پسخور و ترکیب دو کنترل پسخور و پیشخور طراحی شده است. شکل ۱ کاربرد کنترل‌گر طراحی شده این تحقیق با ترکیب دو کنترل پسخور و پیشخور، در چند بازه ابتدایی کانال را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، ورودی هر کنترل‌گر رقوم اندازه‌گیری شده سطح آب در بالادست هر سازه تنظیم می‌باشد. بر اساس میزان خطای سطح آب اندازه‌گیری شده از رقوم هدف، متغیر کنترلی محاسبه شده و میزان بازشدگی دریچه مشخص می‌شود. وجه تمایز دو شیوه کنترل PI طراحی شده در این تحقیق در کنترل سازه تنظیم سراب کانال است که در شیوه تلفیق آب مورد نیاز پایین‌دست را با استفاده از تکنیک پیشخور و بر اساس برنامه تحویل آب آبیاری از قبل تعیین شده، رها می‌شود. در شیوه دیگر تنظیم دریچه سراب بر اساس رقوم سطح آب در بالادست اولین سازه تنظیم در کانال (و در پایین‌دست سازه سراب) انجام می‌گیرد. شایان ذکر است که در روش کنترل PI با حالت کنترل پسخور، برنامه تحویل و توزیع آب (برنامه آبیاری) ثابت بوده و آب‌بران مجازند هر ۲۴ ساعت یکبار میزان آب مورد نیاز خود را به بهره‌بردار اطلاع دهند. در روش کنترل PI با حالت تلفیق کنترل پسخور و پیشخور، انعطاف‌پذیری بیشتری به واسطه استفاده از کنترل‌گر پیشخور برای مصرف‌کنندگان در نظر گرفته شده و امکان هرگونه تغییر در میزان آب تحویلی در حدود ۱۲ ساعت قبل از شرع آبگیری مهیا می‌گردد. بنابراین برنامه آبیاری در شیوه دوم به‌صورت کنترل شده می‌باشد.

۲-۱-۲- سامانه کنترل خودکار متمرکز پیش بین (MPC)

این روش، یک سامانه‌ی کنترلی است که در تکنیک طراحی آن علاوه بر روش کنترل پسخور[8] و پیشخور[9]، یک روش بهینه‌سازی برای محاسبه متغیر خروجی کنترل‌گر در (رقوم سطح آب) استفاده می‌شود. وظیفه کنترل‌گر رساندن سطح آب پائین‌دست بازه به سطح آب هدف، با تنظیم سطح آب بالادست و نیز میزان تنظیم شدگی دریچه‌ها بیان می‌شود. کنترل‌گر MPC با بهره‌گیری از ترکیب دو عامل افق زمانی و مدل ریاضی کانال تحت کنترل (مدل داخلی سیستم) اقدام به پیش‌بینی متغیرهای هیدرولیکی سیستم در آینده می‌نماید. فرمان‌های کنترل در هر گام زمانی بر اساس وضعیت هیدرولیکی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری‌های لحظه‌ای در کانال مشخص می‌شود (van Overloop, 2006). در شکل ۲ شمای کلی مدل کنترل‌گر MPC در یک سیستم آبی قابل مشاهده است. در این تحقیق از مدل فضای حالت خطی بدست آمده از رابطه سنت ونانت گسسته شده جهت تعریف مدل داخلی MPC استفاده شده است (van Overloop et al., 2005).

در کنترل سیستم آبی به روش MPC از مدل فضای حالت[10] که امکان فشرده‌سازی فرمولاسیون چند متغیره مدل‌های خطی را مهیا می‌کنند، جهت بیان مدل داخلی استفاده می‌شود. مدل فضای حالت استفاده شده در سیستم کانال‌ها را می‌توان در حالت کلی به فرم زوج معادله (۴) بیان نمود (van Overloop, 2006):

$$x(k+1) = A(k).x(k) + B_u.u(k) + B_d.d(k) \qquad (۴)$$
$$y(k) = C.x(k)$$

تابع هدف مورد استفاده برای سیستم کانال به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود (van Overloop, 2006):

$$\min J = X^T.Q.X + U^T.R.U \qquad (۵)$$

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.

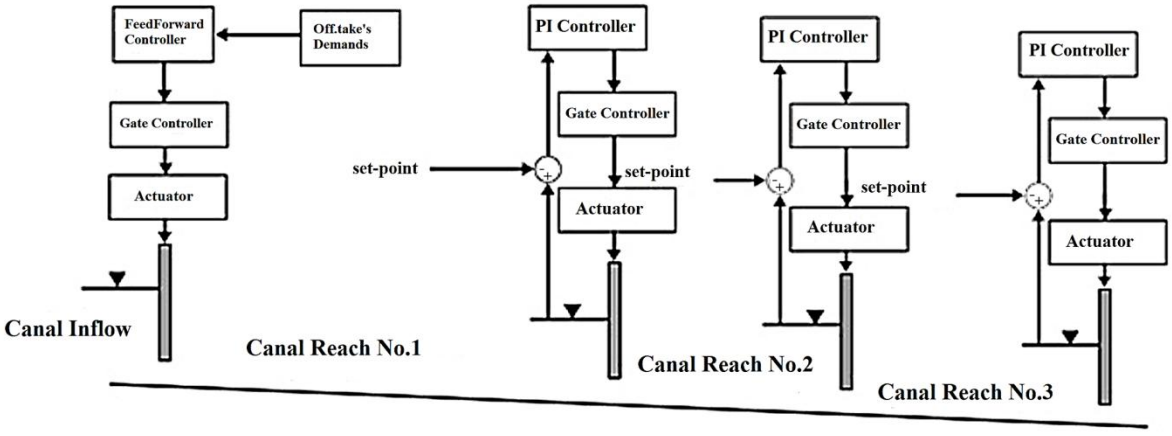

Fig. 1- Schematic of PI controller combining by feedback and feed-forward methods at irrigation canal
شکل ۱- شمایی از کنترل‌گر تناسبی انتگرالی با تلفیق روش‌های پیش‌خور و پس‌خور در کانال آبیاری این تحقیق

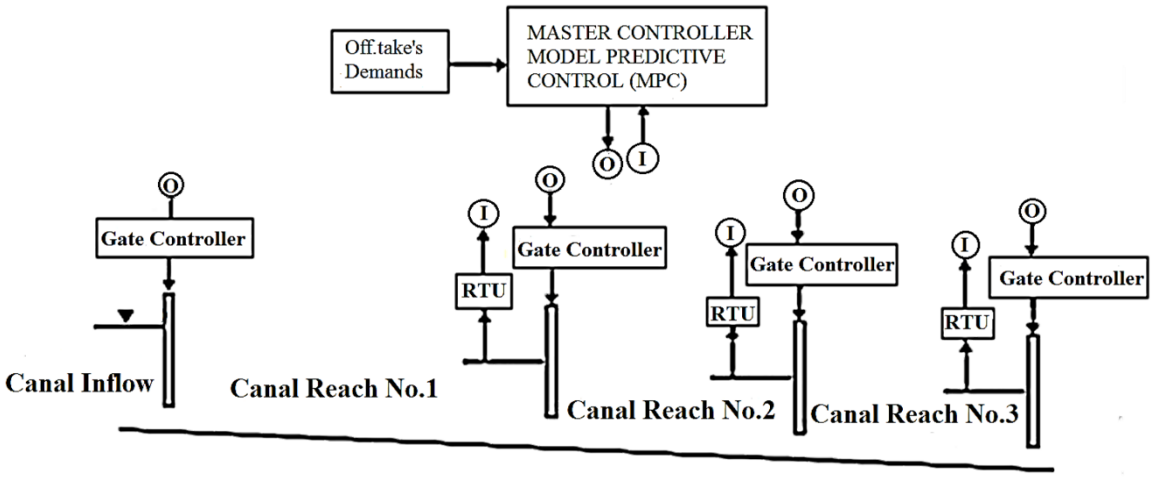

Fig. 2- Schematic of the control system (MPC)
شکل ۲- شمای کلی از سامانه‌ی کنترل MPC

با تعریف h_{ref} به‌عنوان مقدار هدف و تعریف خطا به فرم رابطه (۵) و جایگذاری آن در معادله (۴) می‌توان رابطه میزان خطا در هـــر بازه کانال را بر اساس جریان ورودی و جریان‌های خروجی محاسبه نمود (van Overloop et al., 2008):

$$e(k) = h(k) - h_{ref} \qquad (۶)$$

شکل ۳ روند محاسبات و عملکرد کنترل‌گر MPC در این تحقیق را نشان می‌دهد.

۲-۲- شاخص‌های ارزیابی عملکرد بهره‌برداری

۲-۲-۱- شاخص کفایت تحویل آب

بر اساس تعریف ارایه شده (Molden and Gate, 1990)، شاخص کفایت تحویل آب عبارت است از:

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

که در آن، PA شاخص کفایت برای کل سیستم، T دوره زمانی در نظر گرفته شده برای ارزیابی عملکرد، R پارامتر مکانی (تعداد کل آبگیرهای اندازه‌گیری شده)، Q_D دبی تحویلی، Q_R دبی مورد نیاز.

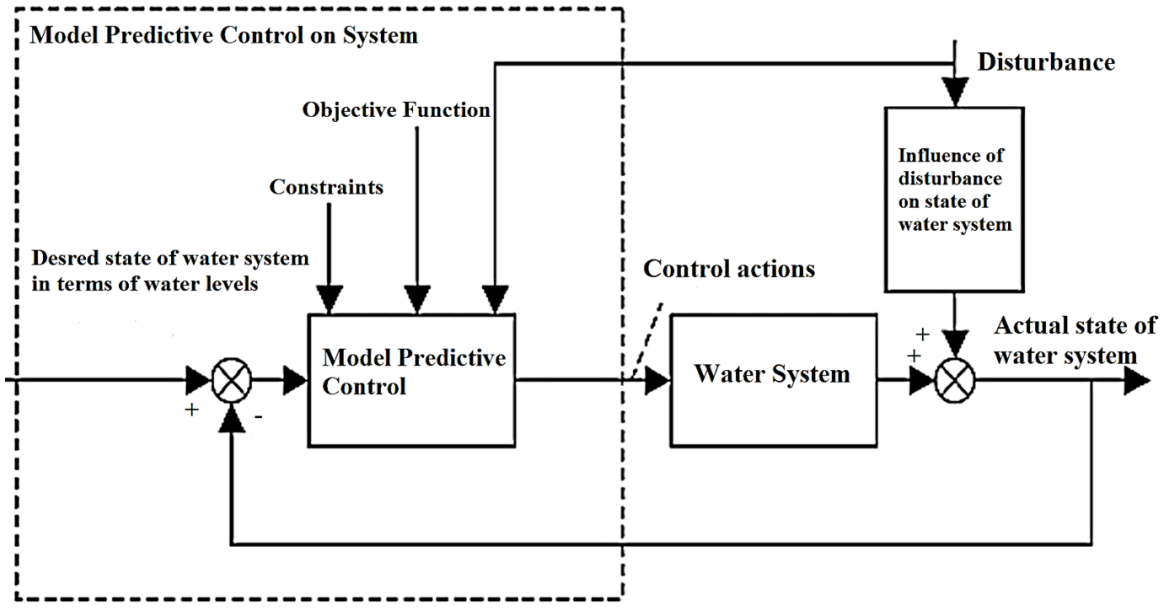

Fig. 3- Schematic view of MPC performance process
شکل ۳- شمایی از روند عملکرد کنترل‌گر MPC

براساس استاندارد ارائه شده توسط (Molden and Gate, 1990)، ارزیابی مطلوبیت بهره‌برداری براساس شاخص مذکور با استفاده از دو مفهوم خوب و ضعیف انجام می‌گیرد. بطوریکه اگر شاخص کفایت تحویل آب عددی بین ۱ تا ۰/۸باشد، مطلوبیت بهره‌برداری خوب و اگر این شاخص کمتر از ۰/۸ باشد، مطلوبیت بهره‌برداری ضعیف است.

۲-۲-۲- شاخص‌های مبتنی بر خطای سطح آب کنترل شده در کانال

رایج‌ترین شاخص‌های ارزیابی عملکرد مورد استفاده در پژوهش‌های مختلف عبارتند از حداکثر خطای مطلق (MAE)[11] و خطای مطلق تجمعی (IAE)[12] (Clemmens and Replogle, 1989; Molden and Gates, 1990) که در روابط ۸ و ۹ ارائه شده‌اند:

$$MAE=\frac{\max\left(\left|y_t-y_{target}\right|\right)}{y_{target}} \quad (۸)$$

که در آن، y_t تراز سطح آب محاسبه شده (محاسبه شده با مدل شبیه‌سازی جریان) در زمان t و y_{target} تراز سطح آب هدف.

$$IAE=\frac{\frac{\Delta t}{T}\sum_{t=0}^{T}\left(\left|y_t-y_{target}\right|\right)}{y_{target}} \quad (۹)$$

که در این رابطه Δt فاصله بین گام‌های زمانی اعمال تنظیمات و T دوره زمانی اجرای آزمون (۲۴ ساعت) می‌باشد.

۲-۳- شاخص مصرف انرژی و تولید CO_2

بر اساس رابطه ارائه شده توسط (Karimi et al., 2012) مصرف انرژی جهت پمپاژ آب آبیاری از آب‌های زیرزمینی، به شرح زیر باشد:

$$EC=\frac{2.73.D.V}{OPE.(1-TL).1000} \quad (۱۰)$$

که در آن، EC کل انرژی مصرفی بر حسب (kwh)، D ارتفاع استخراج ، V حجم استخراج، OPE راندمان پمپ، TL تلفات انتقال و توزیع (فقط برای پمپ‌ها الکتریکی صادق است و برای دیگر پمپ‌ها صفر است).

یکی از مسائل زیست محیطی در ایران که نیاز به توجه دارد انتشار کربن است. تاکنون توجه کمتری به انتشار کربن بر اثر آبیاری با استفاده از آب زیرزمینی شده است. براساس مطالعات (Shah, 2009)، تولید ۱ کیلو وات ساعت برق در ایران منجر به انتشار ۰/۶۲ کیلوگرم کربن‌دی‌اکسید می‌شود. بنابراین با در نظر گرفتن کسری از کربن، شدت کربن از تولید الکتریسیته در ایران ۰/۱۱ $(\frac{kgc}{kwh})$ است. این رقم برای پمپ‌ها دیزل ۰/۰۷۳ $(\frac{kgc}{kwh})$ است (Shah, 2009).

۲-۴- معرفی منطقه مورد مطالعه

شبکه آبیاری و زهکشی قزوین در استان قزوین و در فاصله ۱۵۰ کیلومتری غرب شهر تهران بین ´۲۰ °۳۶ عرض شمالی و ´۴۰ °۴۹ طول شرقی و ´۰۰ °۳۶ عرض شمالی و ´۳۵ °۵۰ طول شرقی واقع شده است. شبکه آبیاری و زهکشی با هدف انتقال آب رودخانه طالقان از محل سد انحرافی زیاران به دشت قزوین احداث شده و در حدود ۸۰۰۰۰ هکتار ناخالص از اراضی دشت را زیر پوشش قرار می‌دهد. کانال اصلی شبکه به طول ۹۴ کیلومتر با ظرفیت ۳۰ مترمکعب بر ثانیه در ابتدا تا ۳ مترمکعب بر ثانیه در انتها ساخته شده است. شبکه دارای ۱۲ رشته کانال درجه ۲ به ظرفیت ۰/۶ تا ۷/۴ مترمکعب در ثانیه می‌باشد که طول آن‌ها در مجموع بالغ بر ۲۱۴ کیلومتر می‌گردد. در شکل ۴ سیمای عمومی شبکه آبیاری قزوین ارائه شده است.

با بررسی‌ها و مطالعات صورت گرفته در جریان این تحقیق (Tehrani et al., Monem and Hashemy Shahdany, 2011; 2012; Monem et al., 2012) خلاصه وضع موجود شبکه آبیاری قزوین به قرار زیر می‌باشد:

۱- سطح تحت پوشش شبکه از ۵۲۰۰۰ هکتار در طرح اولیه به حدود ۵۹۰۰۰ هکتار در شرایط فعلی به دلیل آب‌بری اراضی حاشیه پایین دست شبکه افزایش یافته است. کاهش منابع آب سطحی به واسطه دوره‌های کم آب اخیر و مسأله مذکور سبب شده است که تقاضای آب افزایش یافته و تامین و تقاضای آب با یکدیگر همخوانی نداشته باشند.

۲- در حال حاضر تامین آب کشاورزی دشت قزوین از منابع آب سطحی انتقالی از رودخانه طالقان و با ترکیب منابع آب زیرزمینی صورت می‌گیرد. عدم هماهنگی لازم در تلفیق بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی و آب انتقالی از رودخانه طالقان و در نتیجه عدم امکان تأمین آب مورد تقاضای کشت‌ها، موجب برداشت بیش از حد مجاز از آب زیرزمینی شده است (شکل ۴). به این ترتیب روند افت سطح آبخوان در وضعیت فعلی به دلیل برداشت بیش از آبدهی مطمئن[13] سفره ادامه دارد.

۳- پایین بودن راندمان آبیاری (انتقال و توزیع و کاربرد آب در مزرعه) استفاده بهینه از منابع آب در دسترس را با مشکل مواجه نموده است.

با توجه به موارد مذکور، محدودیت تأمین آب، راندمان پایین، تغییر الگوی کشت، مشارکت نداشتن آب‌بران در نگهداری شبکه برخی از مشکلات شبکه می‌باشد که لازم است نحوه بهره‌برداری شبکه مذکور مورد بازبینی کامل قرار گیرد.

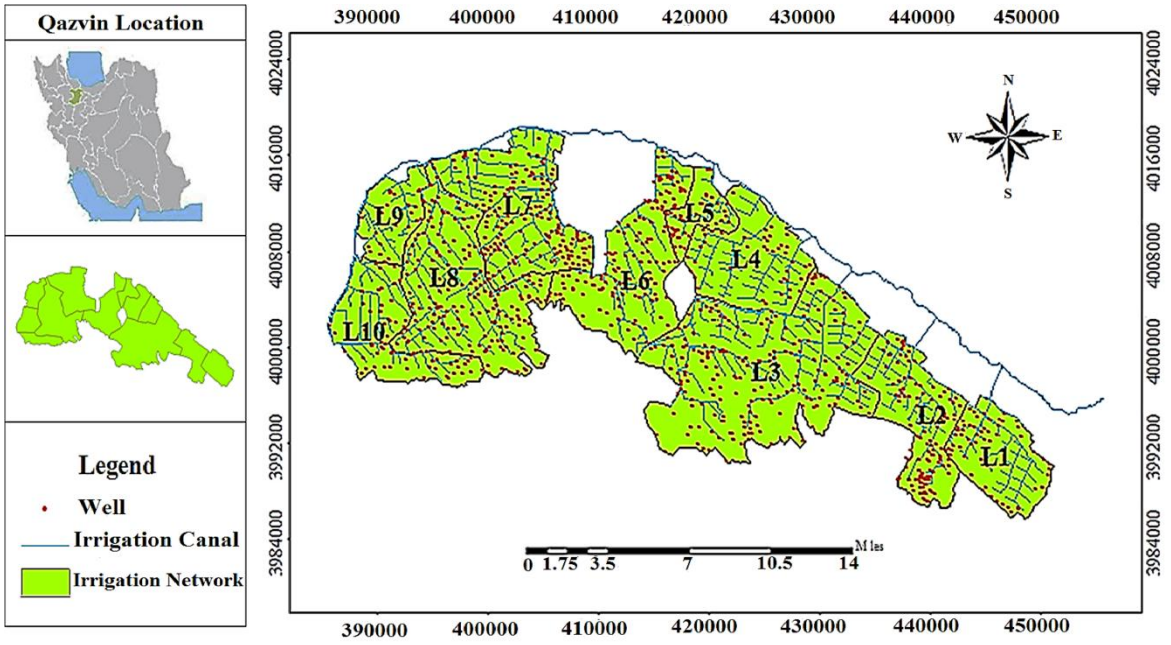

Fig. 4 - Geographical location of Qazvin irrigation network

شکل ۴- موقعیت جغرافیایی شبکه آبیاری قزوین

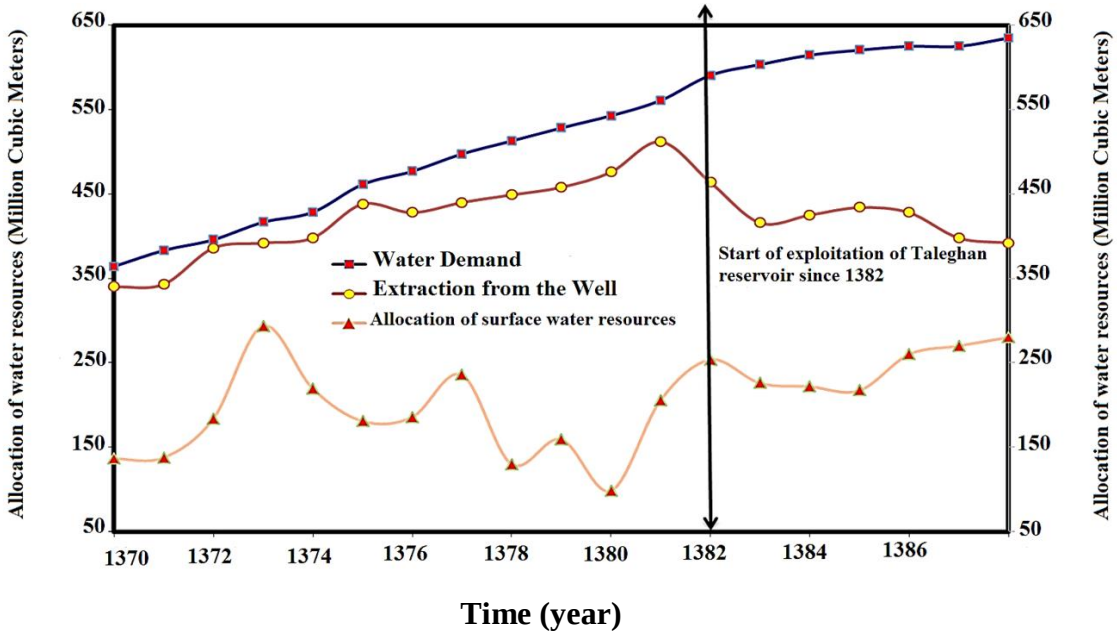

Fig. 5 - Water demand, surface water allocation, groundwater extraction through wells in Qazvin Irrigation Network (Vaez Tehrani, 2012)

شکل ۵- تقاضای آب، تخصیص آب سطحی، برداشت از آب زیرزمینی از طریق چاه‌های بهره‌برداری در شبکه آبیاری قزوین (واعظ تهرانی، ۱۳۹۱)

۲-۵- سناریوهای بهره‌برداری

آزمون سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز تناسبی-انتگرالی و سامانه کنترل خودکار پیش‌بین طراحی شده در این تحقیق، توسط دو سناریو انجام گرفت. به جهت بررسی کارایی سامانه‌های کنترل‌گر تناسبی-انتگرالی و سامانه کنترل پیش‌بین در مقایسه با شرایط حال حاضر بهره‌برداری کانال اصلی شبکه آبیاری قزوین (دریچه‌های آمیل)،

سناریوی اول طراحی شد. هدف اصلی در سناریوی اول بررسی وضعیت موجود بهره‌برداری کانال اصلی در شرایط بهره‌برداری نرمال می‌باشد. منظور از بهره‌برداری نرمال زمانی است که کانال اصلی آبیاری تنها وظیفه انتقال آب به کانال‌های درجه دو را بدون هیچ محدودیتی بر میزان آب ورودی به کانال اصلی به عهده دارد. برداشت آب در آبگیرها با یک برنامه زمانی مشخص و به دور از هرگونه شوک ناگهانی و تغییرات شدید به سیستم کانال انجام می‌گیرد. شبیه‌سازی سناریوی بهره‌برداری در شرایط نرمال براساس داده‌های واقعی بهره‌برداری شبکه آبیاری قزوین در سال آبی ۱۳۹۱-۱۳۹۲ در نظر گرفته شده است. هدف اصلی در سناریوی دوم، بررسی وضعیت بهره‌برداری کانال اصلی در شرایط کمبود آب (خشکسالی) می‌باشد. بنابراین در سناریوی دوم، مقدار دبی ورودی به کانال اصلی ۲۰ درصد کاهش یافت که این الگو براساس شرایط خشکسالی سال ۱۳۸۸ در شبکه در نظر گرفته شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج حاصل از شبیه‌سازی سناریوی اول

سناریوی اول بهره‌برداری با هدف بررسی توانایی‌های سامانه‌های کنترل خودکار طراحی شده در بهبود وضعیت کنونی بهره‌برداری کانال اصلی شبکه آبیاری قزوین در نظر گرفته شد. برای تحقق این مهم، شبیه‌سازی بهره‌برداری کانال اصلی به‌طور جداگانه برای هر کدام از چهار شیوه بهره‌برداری طراحی شده در این تحقیق انجام شد. میزان مطلوبیت بهره‌برداری کانال اصلی بر اساس شاخص‌های ارزیابی عملکرد معرفی شده در بخش ۲-۲ مورد آزمون قرار گرفت و نتایج در جدول ۱ ارایه شد. با توجه به جدول ۱ می‌توان بیان کرد که در شیوه بهره‌برداری معمول، که وظیفه کنترل و تنظیم سطح آب را سازه‌های هیدرومکانیکال آمیل به عهده دارند، حداکثر مقدار شاخص‌های ارزیابی محاسبه شده خطای مطلق و خطای مطلق تجمعی عملکرد در ده بازه کانال اصلی به‌ترتیب برابر ۱۴/۳۲ و ۹/۳۴ درصد به‌دست آمده است. همچنین نتایج حاصل شده حاکی از آن است که میانگین شاخص کفایت تحویل آب از ۱۰۰ درصد در بازه اول به ۷۲ درصد در بازه آخر رسیده است. بنابر تقسیم‌بندی ارایه شده شاخص کفایت توسط (Molden and Gate, 1990)، کفایت تحویل آب برای بازه‌های مطلوب بوده در حالیکه بازه‌های ۸ تا ۱۰ با وجود اینکه مقدار آب تامین شده در سراب کانال مطابق با کل نیازهای اعلام شده در روز شبیه‌سازی بوده، از نقطه نظر کفایت تحویل آب عملکرد مناسبی نداشته است. بنابراین تأمین آب کافی در محل مزارع با استفاده از آب زیرزمینی، به عنوان منبع مکمل در کنار منبع آب سطحی، قابل توجیه می‌باشد. به‌کارگیری سامانه‌های کنترل خودکار PI پس‌خور، PI بالادست با تلفیق روش‌های پیشخور و پسخور و سامانه کنترل متمرکز پیش‌بین سبب بهبود کفایت تحویل آب در طول کانال اصلی شده به نحوی که شاخص کفایت تامین شده توسط سامانه‌های کنترل خودکار به‌ترتیب ۱۱، ۱۳ و ۲۸ درصد بهبود وضعیت داشته است.

مقادیر بدست آمده‌ی شاخص‌های کفایت تحویل آب در طول کانال اصلی و در محل هر کدام از آبگیرهای کانال درجه دو حاکی از آن است که در شیوه بهره‌برداری کانال اصلی با استفاده از سازه‌های آمیل (وضع موجود) و همچنین با به‌کارگیری سامانه کنترل خودکار PI پس‌خور، بازه‌های پایین‌دست کانال آب کمتری را در مقایسه با بازه‌های بالادستی دریافت می‌کنند. بنابراین وضعیت بهره‌برداری شبیه‌سازی شده کانال اصلی گواه این مطلب است که بهره‌برداری تلفیقی از چاه و کانال (البته در محدوده پایین‌دست کانال) نقش قابل توجهی در بهبود عملکرد شبکه دارد. با این حال همان نتایج نیز حاکی از آن است که دو شیوه بهره‌برداری مذکور به ترتیب برای ۴ و ۷ بازه ابتدایی کانال عملکرد مناسبی در تحویل کافی آب به لترال‌ها داشته و بهره‌برداری از چاه در مناطق تحت پوشش این لترال‌ها لازم نمی‌باشد. مطابق جدول ۱ نتایج به‌دست آمده برای سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز PI پیش‌خور و نیز سامانه کنترل خودکار متمرکز پیش‌بین نیز نشان می‌دهد هر دو سامانه عملکرد بسیار خوبی در تحویل آب به لترال‌ها داشته‌اند به نحوی که کفایت تحویل آب در روش متمرکز در همه بازه‌ها به صورت کامل انجام شده و در روش غیرمتمرکز تنها بازه انتهایی کانال عملکرد در حد عالی نداشته است. بنابراین دو روش مذکور بدون نیاز به استفاده تلفیقی از منابع آب زیرزمینی، قادر به بهبود مناسب عملکرد کانال آبیاری از نقطه نظر کفایت تحویل آب می‌باشند.

جمع‌بندی نتایج حاصل از سناریوی اول به این صورت است که استفاده تلفیقی از منابع آب زیرزمینی با منابع آب سطحی زمانی در بهره‌برداری شبکه آبیاری توصیه می‌شود که شیوه بهره‌برداری موجود ناتوان از تحویل مناسب آب در طول کانال اصلی باشد. این اتفاق در بهره‌برداری روزانه کانال مورد مطالعه صورت می‌پذیرد به نحوی‌که با وجود آن‌که دبی ورودی به کانال اصلی مطابق کل تقاضای آب در آبگیرها می‌باشد، با این وجود میزان کنترل و تنظیم سطح آب توسط سازه‌های هیدرومکانیکال به نحوی نبوده که آبگیرهای پایین‌دستی آب کافی دریافت نمایند. حتی با وجود ارتقاء شیوه بهره‌برداری موجود به سامانه کنترل خودکار PI پسخور، باز مشاهده شد که آبگیری در بازه انتهایی کانال به طور مطلوب انجام نگرفته است. اما سامانه‌های کنترل خودکار PI پسخور و پیشخور و نیز سامانه کنترل خودکار متمرکز پیش‌بین به نحو قابل قبولی توزیع آب تحت سناریوی بهره‌برداری نرمال انجام داده‌اند به‌طوریکه هر سه شاخص ارزیابی عملکرد مورد اشاره در جدول

۱ حاکی از آن است که با استفاده از کنترل‌گر پیش‌بین نیازی به برداشت از منابع آب زیرزمینی در طول زمان شبیه‌سازی نمی‌باشد.

برهمین اساس میزان کاهش برداشت از آبخوان پس از ارتقا به سامانه‌های کنترل خودکار ۲۶/۳ درصد محاسبه گردید. در ادامه میزان تأثیر به‌کارگیری هرکدام از روش‌های بهره‌برداری برکاهش مصرف انرژی پمپاژها و در نتیجه کاهش میزان آلایندگی تولید CO_2 مورد بررسی قرار گرفته و نتایج در شکل ۶ ارایه شده است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، مقادیر مذکور به تفکیک هر کدام از کانال‌های درجه دو محاسبه شد. ارتقاء عملکرد کانال آبیاری با خودکارسازی سازه‌های تنظیم، تحت سناریوی معمول (سناریوی اول) موجب کاهش میزان مصرف انرژی در طول یک فصل آبیاری برای روش‌های بهره‌برداری PI پیشخور، PI پسخور و روش MPC به میزان ۵۹۶۱۵۴۶۷۰/۵ (kwh) شده است بالتبع آن میزان تولید گاز Co_2 با به‌کارگیری روش‌های مذکور به میزان ۵۷۱۹۷/۵ (ton) کاهش یافته است. با توجه به شکل ۶ مشخص است که روشهای نوین بهره‌برداری بهترین ذخیره انرژی و کم‌ترین تولید آلاینده کربن را دارند.

۳-۲- نتایج حاصل از شبیه‌سازی سناریوی دوم

براساس سناریوی دوم، بهره‌برداری کانال اصلی شبکه آبیاری قزوین با هدف بررسی توانایی‌های سامانه کنترل خودکار در شرایط کمبود آب (کم‌آبی) مورد ارزیابی قرار گرفت. مطابق این سناریو، با ثابت نگهداشتن مقدار تقاضا در آبگیرها میزان دبی ورودی در طول کانال اصلی با ۲۰ درصد کاهش مواجه می‌شود. مطابق با سناریوی اول شبیه‌سازی بهره‌برداری کانال اصلی بطور جداگانه برای هر کدام از چهار شیوه بهره‌برداری انجام شد و میزان مطلوبیت بهره‌برداری کانال اصلی براساس شاخص‌های ارزیابی عملکرد مورد ارزیابی قرار گرفت و در جدول ۲ ارائه شد. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۲ می‌توان بیان کرد که در شیوه بهره‌برداری معمول، حداکثر شاخص‌های ارزیابی عملکرد محاسبه شده خطای مطلق و خطای مطلق تجمعی در بازه ده کانال اصلی به ترتیب ۵۱/۸ و ۱۵/۷ درصد است. همچنین با توجه به نتایج حاصل شده می‌توان بیان کرد که شاخص کفایت تحویل آب برای بازه اول و دوم به ترتیب به مقدار ۹۳ و ۸۶ درصد است. این در حالی است که کفایت تحویل آب برای بازه‌های سه تا ده مطلوب نبوده به‌طوریکه آب به بازه‌های انتهایی کانال نمی‌رسد. بنابراین، تأمین آب کافی در محل مزارع با استفاده صد درصدی از منابع آب زیرزمینی برای بازه‌های انتهایی کانال اصلی قابل توجیه می‌باشد. با بکارگیری سامانه کنترل خودکار PI پسخور، سبب بهبود کفایت تحویل آب در کانال اصلی نشده و همچنان آب به دو بازه‌ی انتهایی کانال نمی‌رسد. نتایج سناریوی شدید که ناشی از کاهش ۲۰ درصدی جریان ورودی به کانال است، نشان از ناتوانی شیوه بهره‌برداری کانال اصلی با استفاده از دو روش مذکور است. بنابراین وضعیت بهره‌برداری شبیه‌سازی شده کانال اصلی در سناریوی شدید گواه این مطلب است که بهره‌برداری تلفیقی از چاه و کانال نقش قابل توجهی در بهبود عملکرد شبکه دارد. با این حال گفتنی است که دو شیوه بهره‌برداری با استفاده از سازه‌های آمیل (وضع موجود) و همچنین با بکارگیری سامانه کنترل خودکار PI پسخور به ترتیب برای ۲ و ۴ بازه ابتدایی کانال عملکرد مناسبی در تحویل کافی آب به لترال‌ها داشته و بهره‌برداری از چاه در مناطق تحت پوشش این لترال‌ها لازم نمی‌باشد.

Table 1 - Normal operation scenario

جدول ۱- سناریوی بهره‌برداری نرمال

Operation method	Canal Reaches	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Amil Regulator	MAE	4.55	6.07	6.23	6.79	8.24	9.6	11.09	11.88	12.97	14.23
	IAE	3.24	3.27	3.24	3.24	3.73	4.1	4.11	4.78	7.34	9.34
	Adequacy	100	95	92	90	85	82	80	77	72	72
PI -Upstream FB	MAE	1.88	2.81	3.19	3.83	4.61	5.03	5.78	8.01	8.49	9.34
	IAE	0.99	1.24	1.56	2.13	2.55	3.67	3.81	4.38	4.89	5.45
	Adequacy	100	100	100	98	97	92	89	85	83	83
PI -Upstream FB+FF	MAE	1.54	1.89	2.16	2.69	3.1	3.44	3.67	3.94	4.02	4.23
	IAE	0.9	1.43	1.65	1.89	2.18	2.21	2.89	3.11	3.2	3.24
	Adequacy	100	100	100	98	96	95	91	91	88	85
CMPC	MAE	0.06	0.08	0.09	0.14	0.1	0.12	0.13	0.09	0.09	0.06
	IAE	0.43	0.44	0.37	0.52	0.89	0.88	0.72	0.56	0.45	0.38
	Adequacy	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

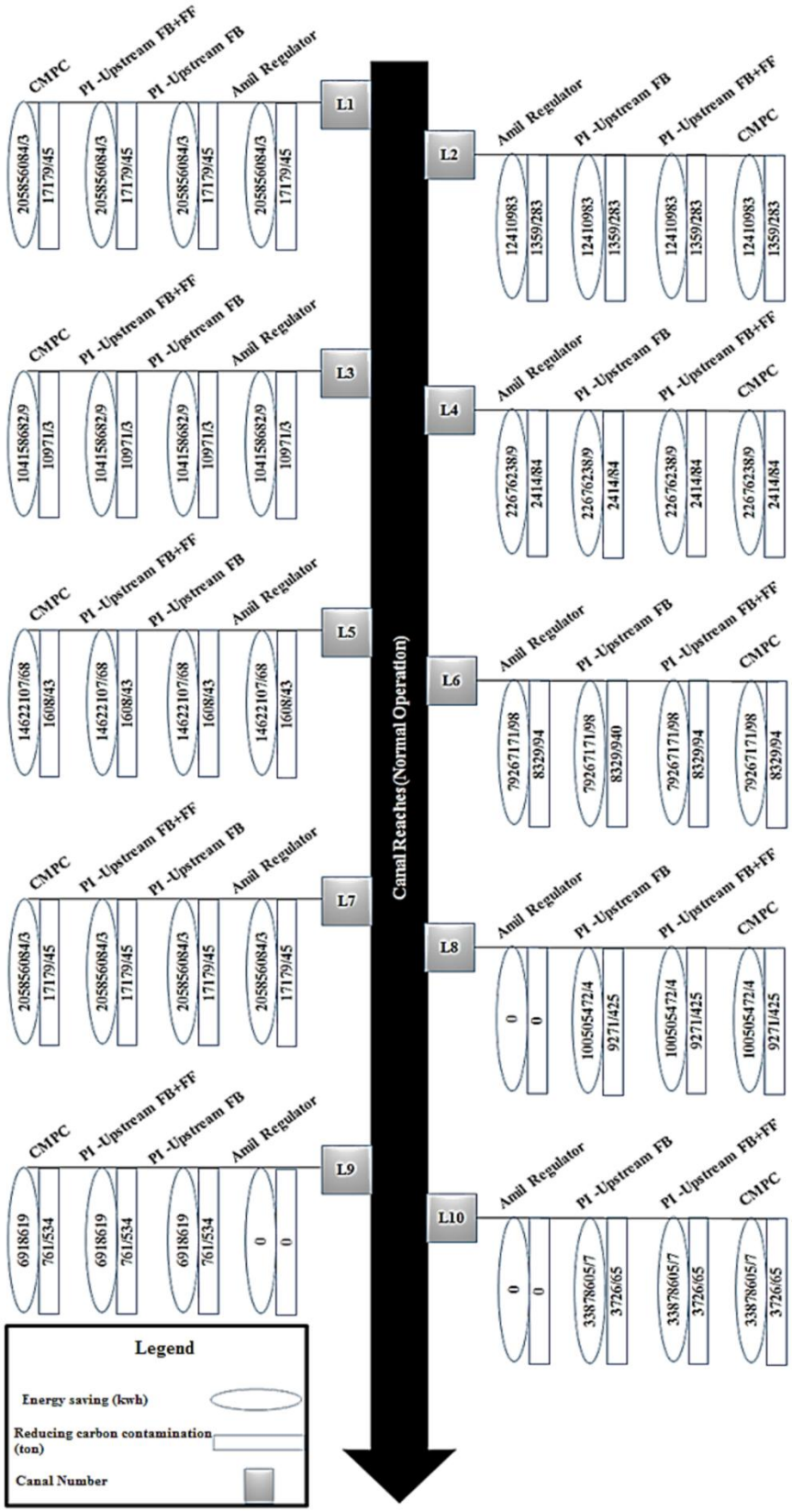

Fig. 6 - The results of energy savings and the absence of carbon dioxide production in the first scenario of operation

شکل ۶- نتایج میزان انرژی صرفه‌جویی شده و عدم تولید دی‌اکسیدکربن در سناریوی اول

با بکارگیری سامانه کنترل خودکار PI بالادست با تلفیق روش‌های پسخور و پیشخور در مقایسه با شیوه‌های بهره‌برداری اول و دوم، شاهد بهبود کفایت تحویل آب در طول کانال اصلی شده. براساس نتایج ارائه شده شاخص کفایت در جدول ۲، کفایت تحویل آب برای شیوه بهره‌برداری ذکر شده برای بازه‌های ۵ تا ۱۰ از نقطه نظر کفایت تحویل آب عملکرد مناسبی نداشته است. بنابراین، روش PI پیشخور بدون بهره‌برداری از منابع زیرزمینی در بازه‌های مذکور قادر به بهبود مناسب عملکرد کانال آبیاری از نقطه نظر کفایت تحویل آب نمی‌باشد. اما سامانه کنترل خودکار پیش‌بین به نحو قابل قبولی در توزیع آب، تحت سناریوی بهره‌برداری شدید انجام داده است به‌طوریکه هر سه شاخص ارزیابی عملکرد مورد اشاره در جدول ۲ نمایانگر آن است که با استفاده از کنترل‌گر پیش‌بین نیازی به برداشت از منابع زیرزمینی در ۷ بازه ابتدایی کانال اصلی در طول زمان شبیه‌سازی نمی‌باشد.

براین اساس میزان کاهش برداشت از آبخوان برای دو روش مذکور به‌ترتیب ۲۸/۳ و ۶۳/۴ درصد محاسبه شد. مطابق با سناریوی اول میزان تأثیر بکارگیری هر کدام از روشهای بهره‌برداری بر کاهش مصرف انرژی پمپاژها و کاهش تولید آلاینده CO_2 مورد بررسی قرار گرفت و نتایج در شکل ۷ ارائه شده است. با توجه به نتایج حاصل، ارتقاء عملکرد کانال آبیاری با خودکارسازی سازه‌های تنظیم، تحت سناریوی شدید (سناریوی دوم) موجب کاهش میزان مصرف انرژی در طول یک فصل آبیاری به ترتیب برای روش‌های بهره‌برداری PI پسخور، PI پیشخور و روش MPC برابر (kwh) ۱۶۹۷۲۸۷۱۶/۶، (kwh) ۱۶۹۷۲۸۷۱۶/۶ و (kwh) ۵۵۵۳۵۷۴۴۵/۳ شده است. بنابراین، میزان تولید گاز CO_2 با بکارگیری روشهای مذکور به ترتیب ۱۷۹۲۹، ۱۷۹۲۹ و ۵۲۷۰۹/۸ تن کاهش یافته است. با توجه به شکل ۷ مشخص است که روش MPC بهترین ذخیره انرژی و کم‌ترین میزان تولید آلاینده را دارا می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

این تحقیق با هدف بررسی میزان تأثیرگذاری بهبود و ارتقاء بهره‌برداری سامانه‌های تنظیم و تحویل آب در کانال اصلی آبیاری بر کاهش برداشت آب از آبخوان (صرفاً در محدوده شبکه‌های آبیاری) و به‌دنبال آن میزان کاهش مصرف انرژی ناشی از کاهش پمپاژ آب و کاهش تولید گاز گلخانه‌ای دی اکسید کربن، اقدام به معرفی گزینه‌های خودکارسازی در کانال اصلی آبیاری نموده است. مطابق اسناد بالادستی آب کشور، تحویل آب کافی، کنترل شده و دقیق به آب‌بران، در شبکه‌های آبیاری مدرن و سنتی کشور یکی از مهم‌ترین اقدامات ضروری در شبکه‌های آبیاری تلقی می‌شود. بر این اساس، نیاز به پیاده‌سازی فناوری‌های نوین مدیریت آب کشاورزی بیشتر از همیشه احساس می‌شود. تقریباً در اکثر شبکه‌های آبیاری کشورمان سامانه‌های تنظیم سطح آب (مانند سازه‌های آمیل موجود در کانال اصلی شبکه قزوین) حتی در شرایط معمول بهره‌برداری نتوانسته‌اند مانع اختلال فرآیند آبگیری شوند، از این‌رو توزیع ناکافی و ناعادلانه آب بین کشاورزان مشکلات حادی را به‌وجود آورده است. عدم مطلوبیت کشاورزان از توزیع و تحویل کافی و مناسب آب در شبکه مورد مطالعه این تحقیق، شبکه آبیاری قزوین، سبب شده تا اقدام به برداشت‌های مجاز (و حتی غیرمجاز) از منابع آب زیرزمینی نمایند تا این عدم مطلوبیت کفایت در توزیع آب را جبران نمایند.

Table 2- Shortage operation scenario

جدول ۲- سناریوی بهره‌برداری شدید

Operation method	Canal Reaches	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Amil Regulator	**MAE**	**20.20**	**27.4**	**28.8**	**32.4**	**29.3**	**33.5**	**38.4**	**43.7**	**47.1**	**51.8**
	IAE	**6.8**	**7.3**	**7.7**	**8.3**	**9.7**	**11.4**	**11.8**	**14.8**	**15.7**	**15.7**
	Adequacy	**93**	**86**	**79**	**75**	**70**	**70**				
PI -Upstream FB	**MAE**	**5.8**	**8**	**8.5**	**9.7**	**11.7**	**13.2**	**15.1**	**17.7**	**19**	**20.9**
	IAE	**3.8**	**4.3**	**4.6**	**5.2**	**6.1**	**7.3**	**7.8**	**8.9**	**11.3**	**13.3**
	Adequacy	**95**	**90**	**83**	**81**	**77**	**72**	**72**	**70**		
PI -Upstream FB+FF	**MAE**	**4.1**	**5.6**	**6**	**7**	**8.4**	**9.5**	**10.7**	**12.7**	**13.5**	**14.8**
	IAE	**2.6**	**3.1**	**3.4**	**3.9**	**4.6**	**5.5**	**5.9**	**6.7**	**8.2**	**9.5**
	Adequacy	**90**	**88**	**86**	**85**	**79**	**78**	**77**	**74**	**72**	**70**
CMPC	**MAE**	**2.9**	**2.8**	**3**	**3.4**	**4**	**4.6**	**5.2**	**5.6**	**6**	**6.5**
	IAE	**1.6**	**1.8**	**1.8**	**2**	**2.4**	**2.5**	**2.7**	**3**	**3.8**	**4.5**
	Adequacy	**80**	**82**	**80**	**89**	**81**	**81**	**80**	**79**	**77**	**77**

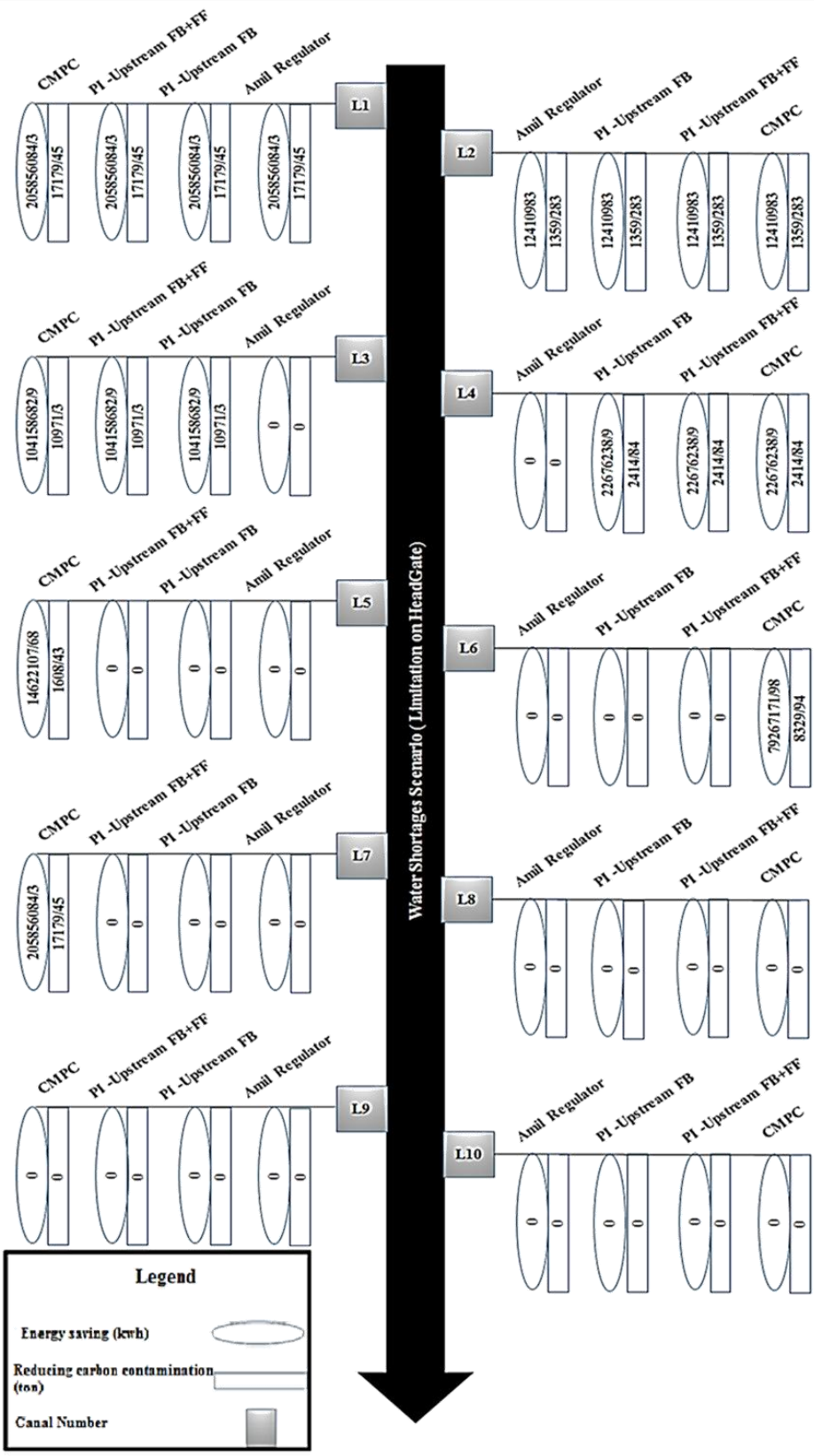

Fig. 7- The results of energy savings and the absence of carbon dioxide production in the second scenario

شکل ۷- نتایج میزان انرژی صرفه‌جویی شده و عدم تولید دی اکسید کربن در سناریوی دوم بهره‌برداری

تحقیق انجام شده به بررسی عملکرد سامانه‌های کنترل خودکار غیرمتمرکز و متمرکز، برای رفع مشکل کانال اصلی شبکه آبیاری قزوین پایه‌ریزی شد. نتایج تحقیق نشان داد که در شرایط بهره‌برداری نرمال (بدون وجود محدودیت در سراب کانال اصلی آبیاری) سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز تناسبی–انتگرالی و سامانه کنترل پیش‌بین به خوبی می‌تواند به توزیع کافی آب بین آبگیرهای بالادست و پایین‌دست کانال اصلی بپردازند. در نتیجه بهبود توزیع منابع آب سطحی در شبکه سبب کاهش نیاز به برداشت آب از آبخوان شده که بالتبع آن کاهش مصرف انرژی و کاهش تولید آلاینده کربن را به‌همراه داشته است. میزان بهبود شاخص کفایت با ارتقا بهره‌برداری موجود به سامانه‌های کنترل خودکار غیرمتمرکز برابر ۱۳ درصد و برای سامانه کنترل خودکار متمرکز ۲۸ درصد بدست آمده است. بر این اساس میزان کاهش برداشت از آبخوان پس‌از ارتقا به سامانه‌های کنترل خودکار ۲۶/۳ درصد، میزان کاهش مصرف انرژی برابر ۲۳/۷ درصد و میزان کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای نیز برابر ۲۴/۱ درصد حاصل شده است. به منظور بررسی توانایی‌های سامانه‌های کنترل و تنظیم سطح آب توسعه داده شده در این تحقیق، اهداف تحقیق در قالب یک سناریوی دیگر برای شرایط کم‌آبی در شبکه بررسی شد. شرایط کم‌آبی با ثابت نگه داشتن میزان تقاضا در آبگیرها وکاهش ۲۰ درصدی جریان ورودی به کانال آبیاری در نظر گرفته شد. توانایی بالای سامانه کنترل خودکار متمرکز پیش‌بین در توزیع کمبود آب در کانال در طول شبکه، به طوری‌که آبگیری در طول زمان شبیه‌سازی و در تمام آبگیرهای بالادست تا پایین‌دست انجام گرفت. در سوی مقابل سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز عملکرد چشم‌گیری را طول شبیه‌سازی نشان نداد، با این وجود بهبود شرایط بهره‌برداری حاصل شده در مقایسه با شرایط معمول بهره‌برداری قابل ملاحظه بود. نتایج حاصل از سناریوی کم‌آبی حاکی از آن است که میزان بهبود شاخص کفایت با ارتقاء بهره‌برداری موجود به سامانه‌های کنترل خودکار غیرمتمرکز برابر ۷۰ درصد و برای سامانه کنترل خودکار متمرکز ۷۷ درصد به‌دست آمده است. بر این اساس میزان کاهش برداشت از آبخوان برای دو روش مذکور به ترتیب ۲۸/۳ و ۶۳/۴ درصد، میزان کاهش مصرف انرژی به ترتیب برابر ۲۱/۳ و ۷۱/۶ درصد و میزان کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای نیز به ترتیب برابر ۲۳/۴ و ۷۰/۱ درصد حاصل شده است.

پی‌نوشت‌ها

1- International Water Management Institute
2- Proportional Integral Derivative Controller
3- Sogreah
4- Cupatitzio
5- Proportional Integral Controller
6- Reinforcement Learning
7- Model Predictive control
8- Feedback
9- Feed-forward
10- State Space Model
11- Maximum Absolute Error (MAE)
12- Integral of Absolute Magnitude of Error (IAE)
13- Safe Yield

۵- مراجع

Abbasi F, Sohrab F, Abbasi N (2016) Evaluation of irrigation efficiencies in Iran. Journal of Irrigation and Drainage Structures Engineering Research 17(67):113-128 (In Persian)

Agide Z, Haileslassie A, Sally H, Erkossa T, Schmitter P, Langan S, Hoekstra D (2016) Analysis of water delivery performance of smallholder irrigation schemes in Ethiopia: Diversity and lessons across schemes, typologies and reaches. LIVES Working Paper 15, Nairobi, Kenya, 38P

Andres RJ, Gregg JS, Losey L, Marland G, Boden TA (2011) Monthly, global emissions of carbon dioxide from fossil fuel consumption. Journal of Chemical and Physical Meteorology 63(3):309-327

Forootan E, Rietbroek R, Kusche J, Sharifi M, Awange J, Schmid M, Famiglietti J (2014) Separation of large scale water storage patterns over Iran using GRACE altimetry and hydrological data. Journal of Remote Sensing of Environment 140:580-595

Fele F, Maestre J, Hashemy SM, de la Peña DM, Camacho EF (2014) Coalitional model predictive control of an irrigation canal. Journal of Process Control 24(4):314-325

Hosseinzade Z, Pagsuyoin S, Ponnambalam K, Monem MJ (2017) Decision making in irrigation networks: Selecting appropriate canal structures using multi-attribute decision analysis. Journal of Science of the Total Environment 601:177-185

Hashemy Shahdany SM, Hasani Y, Majidi Y, Maestre J (2016) Modern operation of main irrigation canals suffering from water scarcity based on an economic perspective. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 143(3):136-147

Hashemi M, Hasani Y, Hormozi M (2017) Optimal water distribution within the main irrigation canal considering economic perspective in water shortages conditions. Journal of Iran-Water Resources Research 13(3):33-42 (In Persian)

Joodaki G, Wahr J, Swenson S (2014) Estimating the human contribution to groundwater depletion in the Middle East, from GRACE data, land surface models, and well observations. Journal of Water Resources Research 50(3):2679-2692

canal structures. Journal of Irrigation and Drainage 64(1):77-84

Shamsai A, Forghani A (2011) Conjunctive use of surface and ground water resources in arid regions. Journal of Iran-Water Resources Research 7(2):26-36 (In Persian)

van Overloop PJ, Schuurmans J, Brouwer R, Burt CM (2005) Multiple model optimization of proportional integral controllers on canals. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 131(2):190-196

van Overloop PJ (2006) Model predictive control on open water systems. Delft University Press, 192P

van Overloop P, Miltenburg I, Clemmens A, Strand R (2008) Identification of pool characteristics of irrigation canals. In:Proc of National Conference on Advances in World Environmental and Water Resources Congress 2008, Ahupua A, 1-12

Wagemaker R (2005) Model predictive control on irrigation canals, application of various internal models. M.Sc. Thesis, Faculty of Information Technology and Systems, Delft University of Technology, Delft, Netherlands

Zamani S, Parvaresh Rizi A, Isapoor S (2015) The effect of design parameters of an irrigation canal on tuning of coefficients and performance of a PI controller. Journal of Irrigation and Drainage 64(4):519-534

Karimi P, Qureshi AS, Bahramloo R, Molden D (2012) Reducing carbon emissions through improved irrigation and groundwater management: A case study from Iran. Journal of Agricultural water management 108:52-60

Madani K (2014) Water management in Iran: what is causing the looming crisis?. Journal of Environmental Studies and Sciences 4(4):315-328

Molden DJ, Gates TK (1990) Performance measures for evaluation of irrigation water delivery systems. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 116(6):804-823

Maciejowski JM (2002) Predictive control: with constraints. Pearson Education Limited, Prentice Hall, London, 262P

Rogers DC, Goussard J (1998) Canal control algorithms currently in use. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 124(1):11-15

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. Journal of Irrigation and Drainage 65(5):578-588

Schuurmans J (1997) Control of water levels in open channels. Ph.D. Dissertation, Delft University of Technology, The Netherlands

Shahverdi K, Monem MJ (2015) Application of reinforcement learning algorithm for automation of