Archive of SID

تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی/جلد ۲۰/ شماره ۷۴/ بهار ۱۳۹۸/ص ۹۲-۷۵

ارزیابی عملکرد سامانه‌های کنترل خودکار در بهبود عدالت توزیع آب در کانال اصلی آبیاری متأثر از نوسانات ورودی

مهدی یلتقیان‌خیابانی[۱]، سیدمهدی هاشمی‌شاهدانی[۲*]، محمدابراهیم بنی‌حبیب[۳] و یوسف حسنی[۴]

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب: دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی؛ استادیار؛ و دانشیار گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، تهران، ایران

۴- پژوهشگر دفتر اقتصاد و بهره‌وری آب و آبفا وزارت نیرو، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۶/۷/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۳/۲۳

چکیده

توزیع ناعادلانهٔ آب در شبکه‌های آبیاری، لزوم استفاده از روش‌های کارآمدتر مانند بهره‌گیری از روش‌های خودکارسازی را می‌طلبد. تحقیق حاضر میزان توانایی سامانهٔ کنترل خودکار سراسری پیش‌بین (MPC) و سامانهٔ کنترل موضعی تناسبی-انتگرالی (PI) را در بهبود توزیع عادلانهٔ آب در کانال اصلی شبکهٔ آبیاری رودشت بررسی می‌کند. مقایسهٔ این سامانه‌ها با وضعیت موجود بهره‌برداری، با شاخص‌های ارزیابی حداکثر خطای مطلق [۳](MAE) و خطای مطلق تجمعی [۴](IAE) و شاخص عدالت توزیع انجام شد. دو سناریوی نوسانات جریان ورودی ملایم و شدید لحاظ گردید. نتایج شاخص‌های MAE و IAE شبیه‌سازی سناریوی اول در آبگیرهای بالادست، عملکرد مناسب‌تر سامانه‌های PI را در مقایسه با کنترل‌گرMPC نشان می‌دهد. سامانهٔ MPC، با میزان ۱۲ درصد بهبود، بهترین عملکرد را از منظر توزیع عادلانه داشته است. در سناریوی دوم، حداکثر مقادیر شاخص‌های IAE و MAE برای سامانهٔ MPC به‌ترتیب ۳/۵۳ و ۱/۴۵ درصد به‌دست آمد درحالی که برای PI حتی بیش از ۱۰۰ درصد هم گزارش شده است. در سناریوی دوم، شاخص عدالت توزیع برای چهار روش بهره‌برداری وضع موجود، سامانهٔ PI کنترل بالادست، سامانهٔ PI کنترل پایین‌دست و سامانهٔ MPC به‌ترتیب ۳۹/۲۳، ۱۸/۷۱، ۱۵/۹۵ و ۴/۳۳ درصد به‌دست آمدکه در بین سامانه‌ها، کنترل‌گر MPC، با بهبود ۳۵ درصد در توزیع عادلانهٔ آب، عملکرد مطلوبی به‌دست داده است.

واژه‌های کلیدی

بهره‌برداری، شبکهٔ رودشت، کانال آبیاری

مقدمه

با توجه به محدودیت منابع آب قابل دسترس، نیاز است تا با به‌روزرسانی مدیریت تقاضا در بخش‌های مختلف مصرف‌کنندهٔ آب، علاوه بر بهینه‌کردن مصرف آب، تلفات را در سامانه‌های تأمین، انتقال و توزیع آب تا آنجا که مقدور است کاهش داد. در این میان، بهره‌گیری از روش‌های نوین مدیریت این سامانه‌ها در بخش کشاورزی که مصرف‌کننده‌ترین منابع آب است، بیش از پیش مورد توجه کارشناسان و صاحب‌نظران قرار گرفته است. شبکه‌های آبیاری و زهکشی که وظیفهٔ انتقال و توزیع منابع آب سطحی (و در مواردی تلفیقی از منابع سطحی و زیرزمینی) را به‌عهده دارند، با ظهور خشکسالی‌ها و دوره‌های کم‌آبی دچار مشکلات زیادی در توزیع آب کافی، به موقع و عادلانه بین تمامی مصرف‌کنندگان شده‌اند (Molden, 2007). بررسی راندمان عملکرد شبکه های آبیاری کشور در سال‌های اخیر نشان می‌دهد در دههٔ ۸۰ خورشیدی (از ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۰) و نیم‌دههٔ پس از آن (سال ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۴)، راندمان انتقال و توزیع به‌ترتیب ۶۸/۵ و ۷۴/۲ درصد و راندمان کل نیز به‌ترتیب ۳۶ و ۴۳/۸ درصد بوده است (Abbasi *et al*., 2017). بنابراین، راندمان پایین

* نگارنده مسئول: mehdi.hashemy@ut.ac.ir

http://doi: 10.22092/idser.2018.115873.1268

www.SID.ir

Archive of SID

شبکه‌های آبیاری در کشور، لزوم پیاده‌سازی هر چه سریع‌تر طرح‌های نوسازی، بهسازی و مدرن‌سازی مدیریت این شبکه‌ها را گوشزد می‌کند. نکتهٔ مهم در این خصوص، نیاز به برقراری تناسب مطلوب بهبود بهره‌وری آب در کل سامانه‌های هر شبکهٔ آبیاری (شامل سامانه انتقال، سامانهٔ تحویل و توزیع و سامانه‌های آبیاری) است تا فرآیند نوسازی مدیریت آنها به‌صورت یکپارچه دنبال شود (Burt, 2013). افزایش راندمان در انتقال، توزیع و تحویل آب در شبکه‌های آبیاری نیازمند استفاده از راهکارهای کارآمد در بهبود مدیریت آب در سامانه‌های خارج از مزرعه[1] است. مدرن‌سازی سامانه‌های انتقال، توزیع و تحویل آب کشاورزی غالباً به دو شیوه قابل اجراست: یکی اِعمال روش‌های سازه‌ای شامل باز طراحی کانال‌های آبیاری یا جایگزینی و احداث سازه‌های جدید در کانال (مثل ساخت مخازن درون مسیری) و دیگری اعمال روش‌های غیرسازه‌ای (Hashemy-Shahdany *et al*., 2016).

خودکارسازی و بهره‌گیری از سامانه‌های کنترل خودکار که گزینه‌هایی موثر برای مدرن‌سازی و افزایش بهره‌وری هستند، می‌توانند موجب انعطاف‌پذیری شبکه در تحویل و توزیع آب شوند (Lozano *et al*., 2010). روش‌های کنترل خودکار که عموماً در پروژه‌های مدرن‌سازی کانال‌های آبیاری به‌کار رفته‌اند، سامانه‌هایی غیرمتمرکز کنترل کلاسیک انتگرالی-تناسبی [2](PI) و کنترل‌گر متمرکز مدرن پیش‌بین [3](MPC) هستند (Lozano *et al*., 2010). روش‌های کنترل کلاسیک جزء روش غیر متمرکز و موضعی محسوب می‌شوند و سامانهٔ کنترل خودکار مجهز به این روش با هزینهٔ کمتری در کانال نصب می‌شود. به‌دلیل تئوری سادهٔ این روش، معمولاً مقبولیت استفاده از آن در بین مدیران شبکه زیاد است. در سوی مقابل، سامانه‌های کنترل مدرن از روش‌های کنترل متمرکز (مثل کنترل‌گر MPC) استفاده می‌کنند که هر کانال آبیاری را مجموعه‌ای از چند زیرسیستم (بازه‌های کانال) با اثرگذاری متقابل بر یکدیگر می‌بینند و در مقایسه با روش‌های کلاسیک توانایی این کنترل‌گرها به مراتب بیشتر است (Malaterre *et al*., 2014).

مالاتر و همکاران (Malaterre *et al*., 2014) با استفاده از کنترل‌گر خودکار تناسبی- انتگرالی در پنج مخزن درون‌مسیری کانال آبیاری، این سامانه را ارزیابی کردند. سادوسکا و همکاران (Sadowska *et al*., 2015) سامانهٔ کنترل خودکار PI را در دو حالت مختلف فرموله‌سازی الگوریتم بر حسب وضعیت تحویل و فرموله الگوریم بر حسب زمان در کانال آبیاری آریزونا بررسی کردند. هاشمی و همکاران (Hashemy-Shahdany *et al*., 2013) در تحقیقی با بررسی توانایی روش کنترل‌گر خودکار غیرمتمرکز PI، سه مخزن درون مسیری را در بازه‌ای از کانال اصلی شبکهٔ آبیاری دز به‌منظور کنترل رقوم آب در بالادست هرسازهٔ تنظیم برای کاهش زمان تأخیر حرکت موج کانال شبیه‌سازی کردند. نتایج خروجی نشان از عملکرد بالای کنترل‌گر غیرمتمرکز PI داشت. زمانی و پرورش‌ریزی (Zamani & Parvaresh-Rizi, 2015) تأثیر پارامترهای طراحی کانال را بر عملکرد سامانهٔ کنترل PI بررسی و ارزیابی کردند و نتیجه گرفتند متغیر شیب کف کانال بیشترین تأثیر را بر طراحی این سامانه در کنترل جریان دارد. شاهوردی و منعم (Shahverdi & Monem, 2010) سامانهٔ کنترل کلاسیک PID را که طراحی و در فلوم آزمایشگاهی ساختند، آزمودند و بررسی کردند. برای بررسی سامانه گزینه‌های مختلف تغییرات ناگهانی جریان اجرا و داده‌های حاصل از آزمایش‌ها با استفاده از شاخص‌های SRT, IAE, MAE ارزیابی شدند.

ایگرژا و همکاران (Igreja *et al*., 2012) با استفاده از کنترل‌گر پیش‌بین، عملکرد این سامانه را در تحویل آب به آبگیرهای بازه‌ای از کانال اصلی بررسی کردند. زافراکابز و همکاران (Zafra-Cabeza *et al*., 2011) با اِعمال روش کنترل پیش‌بین در توزیع آب درکانال اصلی آبیاری، میزان شاخص‌های ریسک و عدم قطعیت را برای عملکرد این سامانه ارزیابی کردند. بگوویچ و همکاران (Begovich *et*

1- Off-Farm Systems
2- Proportional–Integral
3- Model Predictive Control

www.SID.ir

Archive of SID

(MPC) با استفاده از کنترل خودکار پیش‌بین (*al*., 2007) بهره‌برداری از کانال را با چند مخزن درون‌مسیری دارای دریچه که در انتهای کانال قرار دارد، برای تأمین رقوم مورد نیاز در انتهای هر مخزن مدل کردند؛ نتایج به‌دست‌آمده حاکی از ایجاد رقوم آب با خطای مقبول است. بهره‌گیری از سامانه‌های کنترل خودکار علاوه بر افزایش انعطاف‌پذیری مدیریت بهره‌برداری کانال‌های آبیاری، امکان پیاده‌سازی راهبردهای مختلف بهره‌برداری را میسر می‌سازد (Lozano *et al*., 2010).

راهبردهای مدیریتی بنا به اهداف مورد نظر از بهره‌برداری کانال‌های آبیاری متفاوت‌اند. توزیع عادلانهٔ آب بین مصرف‌کنندگان نمونه‌ای از راهبردهای استراتژیک در مدیریت شبکه‌های آبیاری است که با هدف تقسیم منصفانهٔ مازاد آب یا کمبود آب بین کشاورزان در دورهٔ بهره‌برداری تعریف می‌شود. در تحقیق حاضر، کارایی سامانه‌های «کنترل خودکار متمرکز» با بهره‌گیری از کنترل‌گر MPC و «کنترل غیرمتمرکز» با طراحی کنترل‌گرهای PI، در تحویل آب به آبگیر واحدهای زراعی درجه دو واقع در کانال اصلی آبیاری شبکهٔ رودشت، که با نوسانات دائمی جریان روبه‌رو است، مقایسه و بررسی شده است. بر اساس اطلاعات بهره‌برداری جمع‌آوری شده از دفتر بهره‌برداری شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان، متوسط و حداکثر نوسانات ورودی جریان در شبکهٔ رودشت به‌ترتیب ۳۷ و ۷۰ درصد اعلام شده است. در واقع با توجه به ناکارآمدی روش بهره‌برداری کنونی این کانال اصلی آبیاری در توزیع مناسب و عادلانه آب بین آبگیرها (Hashemy-Shahdany *et al*., 2016)، در این تحقیق تلاش شده است تا با ارزیابی عملکرد سامانه‌های کنترل خودکار، گزینهٔ مناسب را برای جایگزینی بهره‌برداری کانال اصلی معرفی کند. برای رسیدن به این هدف مهم، پس از بررسی اطلاعات بهره‌برداری روزانهٔ کانال مذکور، دو سناریوی بهره‌برداری به‌ترتیب با نوسانات ورودی ملایم و شدید، برای بررسی عملکرد سامانه‌های پیشنهادی انتخاب شد. میزان کارآمدی هر یک از سامانه‌های خودکار در بهبود بهره‌برداری کانال اصلی با استفاده از شاخص‌های ارزیابی عملکرد و نیز میزان توانایی‌آنها در بهبود عدالت توزیع آب برای هر دو سناریوی بهره‌برداری بررسی شد.

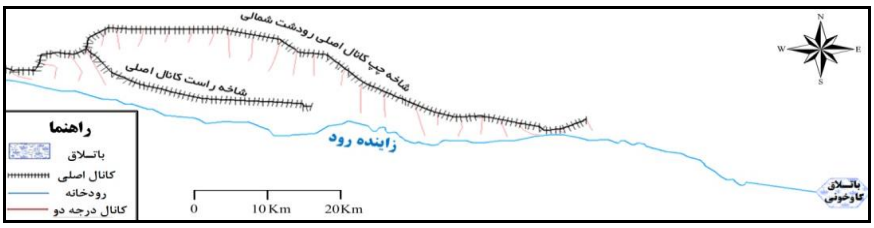
مواد و روش‌ها

معرفی شبکهٔ آبیاری رودشت و چالش‌های بهره‌برداری از آن

شبکهٔ آبیاری رودشت اصفهان حدود ۴۵۰۰۰ هکتار زمین را زیر پوشش دارد و آخرین شبکهٔ آبیاری است که از رودخانهٔ زاینده‌رود آبگیری می‌کند. نمایی از کانال اصلی آبیاری شاخهٔ شمالی این شبکه در شکل ۱ ارائه شده است. با توجه به قرارگیری این شبکه در انتهایی‌ترین نقطهٔ این رودخانه، قبل از اتصال رودخانه به تالاب گاوخونی، مشکلات ناشی از کم‌آبی‌های متاثر از دوره‌های خشکسالی‌های اخیر مدیریت بهره‌برداری این شبکه را با چالش جدی مواجه ساخته است. بر اساس اطلاعات بهره‌برداری جمع‌آوری شده در این تحقیق، در این شبکه نوسانات جریان ورودی در محل سراب به دو دسته ملایم (مانند شکل ۳- الف) و شدید (شکل ۳ – ب) قابل تقسیم است. بررسی اطلاعات مذکور حاکی از آن است که مدت زمان متوسط نوسانات رخ داده شده در حدود ۶۵ درصد زمان بهره‌برداری با فرکانس ۴۵ درصد روزهای بهره‌برداری تقریباً رخ داده است. اطلاعات تاریخی بهره‌برداری از شبکهٔ آبیاری رودشت حاکی از آن است که متوسط و حداکثر نوسانات ورودی جریان به شبکه به‌ترتیب ۳۷ و ۷۰ درصد است. نوسانات مذکور در بسیاری از موارد سبب برداشت نشدن آب در آبگیرهای میانی و انتهایی شبکه و گاهی سبب برداشت مازاد آب در همان آبگیرهای انتهایی شده است.

www.SID.ir

Archive of SID



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

این پژوهش، کانال اصلی چپ شاخهٔ شمالی شبکهٔ آبیاری رودشت را بررسی می‌کند. کانال مورد مطالعه دارای شیب ملایم، سازه‌های تنظیم‌کنندهٔ تراز سطح آب از نوع سرریز نوک اردکی و دریچه‌های آبگیری از نوع نیرپیک است. شرایط هیدرولیکی و نوع آبگیرهای مدول نیرپیک مورد استفاده در کانال اصلی شبکهٔ آبیاری رودشت و نیز مقادیر متوسط دبی مورد تقاضای هر یک از آبگیرها در جدول ۱ نشان داده شده است. در این جدول ۱ مشخص است آبگیرها از نوع دو مدول XX2 و L2 هستند که به‌طور متوسط برای هر دو آبگیر از یک سازهٔ تنظیم سطح آب نوک اردکی استفاده شده است. مقادیر متوسط دبی برداشتی بر اساس متوسط مقادیر تقاضای آب گزارش شده از دفتر بهره‌برداری شبکه به‌دست آمده است.

جدول ۱- مشخصات آبگیرهای مدول نیرپیک واقع در کانال اصلی مورد مطالعه

شمارهٔ آبگیر	نام دریچهٔ آبگیر	نوع دریچهٔ آبگیر	متوسط دبی برداشتی (متر مکعب بر ثانیه)	شمارهٔ آبگیر	نام دریچهٔ آبگیر	نوع دریچهٔ آبگیر	متوسط دبی برداشتی (متر مکعب بر ثانیه)
۱	P0R	L2	۰/۰۵۵	۱۳	PL6	XX2	۰/۰۳۳
۲	P0L	L2	۰/۰۲۱	۱۴	CL7	XX2	۰/۰۳۳
۳	CL1	XX2	۰/۰۱۵	۱۵	PL7	XX2	۰/۰۱۲
۴	CL2	XX2	۰/۰۷۹	۱۶	CL8	L2	۰/۰۱۲
۵	PL2	XX2	۰/۰۷۳	۱۷	PL8	XX2	۰/۰۱۲
۶	CL3	XX2	۰/۰۲۱	۱۸	CL9	L2	۰/۰۵۸
۷	PL3	XX2	۰/۰۴۹	۱۹	PL9	XX2	۰/۰۵۸
۸	CL4	XX2	۰/۰۵۵	۲۰	CL10	L2	۰/۰۵۸
۹	PL4	XX2	۰/۰۱	۲۱	CL11	L2	۰/۱۷۵
۱۰	CL5	XX2	۰/۰۲۱	۲۲	PL11	XX2	۰/۰۶
۱۱	PL5	XX2	۰/۰۲۱	۲۳	CL12	XX2	۰/۰۶
۱۲	CL6	L2	۰/۰۲۴	۲۴	CL13	L2	۰/۱۷۵

سامانهٔ کنترل کلاسیک خودکار انتگرالی-تناسبی (PI)

با به‌کارگیری این روش برای هر سازهٔ تنظیم، متغیر سطح آب به‌عنوان ورودی و میزان بازشدگی دریچهٔ کشوی سازه به‌عنوان خروجی این سامانه محسوب می‌شود. برای کنترل رقوم سطح آب توسط سامانه‌های کنترل خودکار در هر بازه کانال، از دریچه‌های کشوی موتوریزه استفاده می‌شود. فرایند الگوریتم محاسباتی روش کنترل غیرمتمرکز برای تأمین رقوم آب مورد نیاز برای یک سازه تنظیم منفرد اجرا می‌شود (Schuurmans *et al.*, 1999). بر اساس الگوریتم کنترل تناسبی-انتگرالی، تغییرات دبی عبوری از زیر سازه‌های تنظیم به‌صورت رابطهٔ ۱ قابل محاسبه است (Van Overloop *et al.*, 2008):

$$\Delta Q(k) = K_i.e(k) + K_p.\left[e(k) - e(k-1)\right] \qquad (۱)$$

که در آن،

$\Delta Q_{(k)}$= مقدار دبی کنترل شدهٔ عبوری از سازهٔ تنظیم بر

www.SID.ir

Archive of SID

حسب متر مکعب بر ثانیه در گام زمانی جاری؛ e = مقدار انحرافات دبی آب از مقدار هدف؛ k و $k+1$ = به‌ترتیب گام زمانی جاری و گام زمانی قبلی؛ k_p = ضریب تناسبی و k_i = ضریب انتگرالی.

خودکارسازی کانال آبیاری با بهره‌گیری از روش کنترل غیرمتمرکز با استفاده از دو شیوهٔ کنترل بالادست و کنترل پایین‌دست رقوم سطح آب اجرا می‌شود. در این مطالعه، سامانهٔ کنترل خودکار با هر دو شیوه طراحی و توانایی آنها در برقراری تحویل عادلانه آب بررسی شده است. در سامانهٔ کنترل غیرمتمرکز PI بالادست، سازه‌های تنظیم سطح آب مجهز به کنترل‌گرهای طراحی شده قادر به تنظیم سطح آب در بالادست سازه است. در واقع در کنترل بالادست ورودی هر کنترل‌گر رقوم اندازه‌گیری شده سطح آب در بالادست هر سازه تنظیم است. بر اساس میزان خطای سطح آب اندازه‌گیری شده از رقوم هدف، متغیر کنترلی (دبی محاسبه شدهٔ عبوری از سازهٔ تنظیم) محاسبه و در نهایت میزان بازشدگی دریچه مشخص می‌شود. دبی عبوری از سازه واقع در سراب کانال، بر اساس مقادیر تقاضای آب اعلام شده برای هر آبگیر (یا بر اساس حقابهٔ مشخص آبگیرها) با یک کنترل‌گر پیشخور به کانال وارد می‌شود. در حالی‌که در سامانهٔ کنترل غیرمتمرکز PI پایین‌دست، تغییرات اعمال شده روی سازهٔ تحت کنترل، در جهت ثابت نگه داشتن سطح آب در پایین‌دست سازه تنظیم است و تغییرات به‌صورت پی‌درپی و به‌ترتیب از پایین‌دست به سمت بالادست یا از مصرف‌کننده به عرضه‌کننده اعمال می‌شود (Sadowska *et al.*, 2015).

سامانهٔ کنترل خودکار متمرکز پیش‌بین (MPC)

این روش، سامانه‌ای است کنترلی که در تکنیک طراحی آن علاوه بر روش کنترل پسخور[1] و پیشخور[2]، از یک روش بهینه‌سازی برای محاسبهٔ متغیر خروجی کنترل‌گر در (رقوم سطح آب) استفاده می‌شود. وظیفهٔ کنترل‌گر رساندن سطح آب پایین‌دست بازه به سطح آب هدف، با تنظیم سطح آب بالادست و نیز میزان تنظیم‌شدگی دریچه‌ها بیان می‌شود. کنترلگر MPC با بهره‌گیری از ترکیب دو عامل افق زمانی و مدل ریاضی کانال تحت کنترل (مدل داخلی سیستم متغیرهای هیدرولیکی سیستم در آینده را) پیش‌بینی می‌کند. 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[4] خطی به‌دست آمده از رابطهٔ سنت ونانت گسسته شده جهت تعریف مدل داخلی MPC استفاده شده است (Van Overloop *et al.*, 2008).

در کنترل سیستم آبی به روش MPC، از مدل فضای حالت برای بیان مدل داخلی استفاده می‌شود که امکان فشرده‌سازی فرمولاسیون چند متغیره مدل‌های خطی را مهیا می کند. مدل فضای حالت استفاده شده در سیستم کانال‌ها را می‌توان در حالت کلی به فرم زوج رابطه ۲ بیان کرد (Van Overloop, 2006).

$$x(k+1) = A(k).x(k) + B_u.u(k) + B_d.d(k) \qquad (۲)$$
$$y(k) = C.x(k)$$

تابع هدف مورد استفاده برای سیستم کانال به‌صورت رابطهٔ ۳ تعریف می‌شود (Van Overloop, 2006).

$$\min J = X^T.Q.X + U^T.R.U \qquad (۳)$$

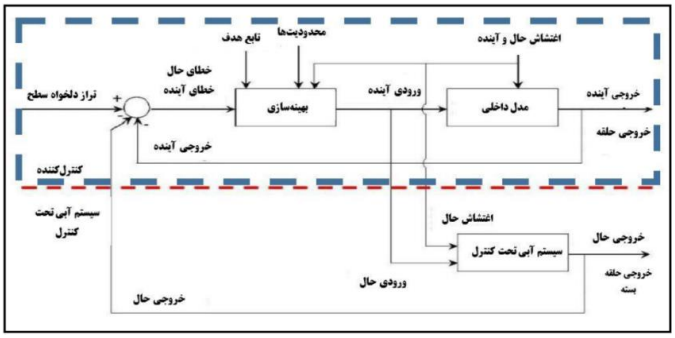
که در آن،

J = تابع هدف و باید حداقل شود؛ X= متغیرهای حالت؛ U= اعمال کنترلی؛ Q = ماتریس وزن برای متغیرهای حالت؛ و R = ماتریس وزن برای اعمال کنترلی.

1- Feedback
2- Feedforward
3- Saint-Venant
4- State Space Model

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲- شمای کلی از سامانهٔ کنترل MPC

با تعریف h_{ref} به‌عنوان مقدار هدف و تعریف خطا به فرم رابطهٔ ۴ و جایگذاری آن در رابطه ۲ می‌توان رابطهٔ میزان خطا در هر بازهٔ کانال را بر اساس جریان ورودی و جریان‌های خروجی محاسبه کرد (Van Overloop *et al.*, 2008).

$$e(k) = h(k) - h_{ref} \qquad (۴)$$

با معلوم شدن ماتریس‌های وضعیت سیستم، اغتشاش و کنترل می‌توان تابع هدف را به صورت مسئلهٔ بهینه سازی چند هدفهٔ بزرگ با افق پیش بینی (n گام زمانی) و تعداد m بازه کانال به فرم رابطهٔ ۵ نشان داد:

$$\min_{\nabla u} J = \qquad (۵)$$
$$\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=1}^{m}\left\{e_j(k+i|k)\ .\ Q_{e,j}\ .\ e_j(k+i|k)\right\} +$$
$$\sum_{i=0}^{n-1}\sum_{j=1}^{l}\left\{\Delta u_j(k+i|k)\ .\ R_{\Delta u_j}\ .\ \Delta u_j(k+i|k)\right\}$$

که در آن،

n = تعداد گام زمانی در طول افق پیش‌بینی؛ m= تعداد بازه‌های کانال؛ l= تعداد سازه‌ها؛ e_j= انحراف سطح آب از سطح آب هدف در بازهٔ j؛ $Q_{e,j}$= ماتریس هزینه‌های (وزن‌های) متغیرهای وضعیت؛ Δu_j= تغییر در میزان دبی عبوری از سازهٔ تنظیم j؛ و $R_{\Delta u}$= ماتریس هزینه‌های (وزن‌های) متغیر کنترل‌شونده.

محدودیت‌ها در هر سیستم آبی (شامل کانال آبیاری) محدودیت‌های بهره‌برداری و فیزیکی هستند. الگوریتم بهینه‌سازی استفاده شده در کنترل‌گر MPC می‌تواند ناحیهٔ حل مسئله را با اعمال این محدودیت‌ها محدودتر کند. در برخی موارد این محدودیت‌ها نباید هرگز به‌واسطهٔ حل مسئله نقض شود، مثلا زمانی‌که بیانگر مقادیری ثابت مانند حداکثر ظرفیت پمپاژ یا حداکثر مانور دریچه باشند، نقض این محدودیت ها ممکن است به تجهیزات و سازه‌ها آسیب بزنند. به این قسم محدودیت‌ها، محدودیت‌های سخت گفته می شود. محدودیت به‌کار برده شده در این تحقیق عبارت از میزان مانور دریچهٔ تحت کنترل در هر گام زمانی (u_{lim}) و نیز حداقل رقوم مورد نیاز آبگیری (x_{lim}) است. رابطهٔ ۶ محدودیت‌های سخت را برای مقادیر وضعیت و متغیر کنترل شونده نشان می‌دهد:

$$E \cdot x(k) \le x_{\lim}(k) \qquad (۶)$$
$$F \cdot u(k) \le u_{\lim}(k)$$

در اینجا E و F نمایانگر ماتریس انتخابی با مقادیر ابتدایی ۱ و ۱- هستند تا برای یکسان‌سازی محاسبات همیشه فرم محدودیت‌ها به حالت نامساوی کوچکتر و مساوی درآید.

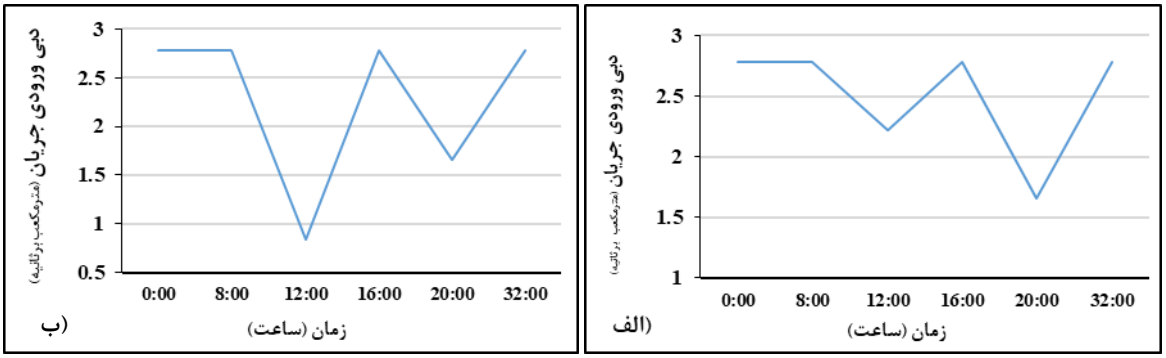
سناریوهای بهره‌برداری کانال آبیاری

پیش‌تر اشاره شد رودشت آخرین دشتی است که از زاینده‌رود آبگیری می‌کند و تحت نوسانات شدید این رودخانه قرار می‌گیرد که در نتیجه عملکرد نامطلوب شبکه را در تحویل عادلانهٔ آب در کانال اصلی به‌همراه دارد. بر این اساس، برای بررسی دقیق و نیز مقایسهٔ توانایی سامانه‌های کنترل خودکار MPC و PI با کنترل

www.SID.ir

Archive of SID

بالادست و پایین‌دست در این تحقیق، از سناریوهای بهره‌برداری با نوسانات جریان ورودی برای شبیه‌سازی وضعیت بهره‌برداری کانال مورد مطالعه استفاده شده است. بر این اساس، دو سناریوی بهره‌برداری با نوسانات نرمال (که به‌طور معمول کانال مورد مطالعه را تحت تاثیر قرار می‌دهد) و نوسانات شدید (که با فرکانس وقوع کمتری در منطقه رخ می‌دهد) در نظر گرفته شد که متوسط، حداقل و حداکثر نوسانات جریان ورودی سناریوها به‌ترتیب ۴۳، ۱۹ و ۷۰ درصد لحاظ گردید.



شکل ۳- الف) سناریوی نوسانات نرمال در جریان ورودی و ب) سناریوی نوسانات شدید در جریان ورودی

در سناریوی بهره‌برداری اول، نیاز کل کانال برابر با دبی ۲/۷۸ مترمکعب بر ثانیه لحاظ شد که الگوی نوسان ورودی به کانال (بر اساس اطلاعات جمع‌آوری شده از دفتر بهره‌برداری شبکهٔ آبیاری رودشت) مطابق شکل (۳-الف) با حداکثر مقدار کاهش جریان ۳۸ درصد به مقدار ۱/۷ مترمکعب برثانیه کاهش پیدا کرده است. مطابق شکل (۳-ب)، در سناریوی شدید نوسانات ورودی، مقدار دبی ورودی به کانال در طول ۲۰ ساعت شبیه‌سازی جریان به‌میزان ۷۵ درصد کاهش داشته و در مدت چهار ساعت به کمتر از یک متر مکعب بر ثانیه رسیده است. یادآوری می‌شود که این مقدار نوسان در جریان ورودی، با بسامد کمی در بهره‌برداری شبکه رخ می‌دهد، با این حال، به‌منظور نشان دادن توانایی‌های سامانه‌های کنترل خودکار، از سناریوهای مذکور در این تحقیق بهره گرفته شد.

شبیه‌سازی وضعیت بهره‌برداری کانال اصلی آبیاری

به‌منظورشبیه‌سازی هیدرولیک جریان در کانال مورد مطالعه از مدل هیدرودینامیک ICSS استفاده شد. این مدل را برای اولین بار در سال ۱۹۸۵ مانز (Manz, 1985) معرفی کرد و قابلیت بهره‌گیری از آن برای کانال آبیاری با سازه‌های مختلف تنظیم و آبگیر را دیگر محققان (Monem, 1999; Monem & Massah, 2002; Monem & Mamizadeh, 2005; Hosseinzadeh & Monem, 2012) تکمیل کردند. این مدل می‌تواند جریان‌های ماندگار و غیرماندگار در شبکه‌های آبیاری را با انواع شکل‌های مقطع کانال همراه با طیف قابل توجهی از سازه‌ها و امکان بهره‌برداری از آنها توام با جریانات گسترده ورودی و خروجی شبیه‌سازی کند. مدل ریاضی کانال اصلی آبیاری مورد مطالعه بر اساس اطلاعات جمع‌آوری شده از دفتر بهره‌برداری شبکهٔ آبیاری رودشت طراحی شد که شامل نقشهٔ مسیر کانال، مشخصات فیزیکی بازه‌های کانال، محل و ابعاد سازه‌های آب‌بند نوک اردکی، نوع و مکان سازه‌های آبگیر نیرپیک و شرایط هیدرولیکی مرزی بالادست و پایین‌دست در شبیه‌ساز هیدرودینامیک ICSS است. مدل شبیه‌ساز بهره‌برداری کانال اصلی آبیاری رودشت توسط مدل ICSS و بر اساس اطلاعات جمع‌آوری شده از دفتر بهره‌برداری شبکهٔ آبیاری رودشت، شامل نقشه‌های پروفیل و پلان کانال، مشخصات

www.SID.ir

Archive of SID

فیزیکی سازه‌های انتقال، سازه‌های آبگیر نیرپیک و کنترل سطح آب نوک اردکی در بازه‌های کانال تهیه شد.

برای شبیه‌سازی جریان در هر کانال با مدل ICSS و به‌منظور اجرای محاسبات هیدرولیکی، کانال به تعدادی بازه تقسیم می‌شود. ابتدا و انتهای این بازه‌ها در اغلب موارد دارای سازه‌های آب‌بند و در طول کانال دارای آبگیر هستند که شرایط مرزی آن قطعه محسوب می‌شوند. بنابراین وضعیت هیدرولیکی این سازه‌ها باید در داده‌های ورودی مدل مشخص و تعریف شود. در مدل ICSS، به‌ازای هر سازه‌ای که در محاسبات در طول کانال نقش شرط مرزی دارد، باید دو ماتریس اطلاعات مربوط به آن شرط مرزی در یک فایل ورودی قید شود. ماتریس اول یا UBC برای حالتی است که سازه مورد نظر در محاسبات نقش شرط مرزی بالادست را دارد و ماتریس دوم که DBC نام دارد برای حالتی است که سازه مربوط شرط مرزی پایین-دست بازه محسوب می‌شود. مدل تهیه شده در شبیه‌ساز هیدرولیکی ICSS بر اساس داده‌های دبی تحویلی به کلیهٔ آبگیرهای کانال رودشت، برای کشت بهارهٔ سال ۱۳۹۴ (از ۲۰ فروردین تا ۱۱ خرداد ۱۳۹۴) واسنجی شد که مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهده شده مقایسه شدند.

مدل، با تغییر ضریب دبی سازه‌های تنظیم و بررسی انطباق مقادیر شبیه‌سازی با مقادیر مشاهده‌ای واسنجی شد. بدین‌منظور در هر شبیه‌سازی مقادیر دبی عبوری از سازه‌های تنظیم و تراز آب در بالادست آنها استخراج و با مقادیر مشاهداتی مقایسه می‌شد. . برای مقایسهٔ مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهده شده، از شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد که درصد مجموع اختلافات مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی نسبت به میانگین مقادیر مشاهداتی را نشان می‌دهد. پس از واسنجی مدل ریاضی جریان در کانال، فرآیند صحت‌سنجی بر اساس مقایسهٔ مقدار دبی محاسبه شده تحویلی هر یک از آبگیرهای واقع در کانال اصلی و مقدار دبی اندازه‌گیری شده توسط شرکت بهره‌برداری دنبال شد. یادآوری می‌شود که صحت‌سنجی مدل ریاضی تهیه شده با مدل ICSS بر اساس 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 بوده است. مقادیر به‌دست آمده برای شاخص ریشهٔ میانگین مربعات خطا به‌ترتیب در واسنجی و صحت‌سنجی مدل ریاضی تهیه شده، برابر با ۰/۰۰۳ و ۰/۰۱۵ به‌دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که مدل به‌خوبی واسنجی شده است و برای شبیه‌سازی سناریوی بهره‌برداری، که هدف اصلی این پژوهش است، دقت خوبی دارد.

شاخص‌های ارزیابی عملکرد

شاخص‌های ارزیابی عملکرد مورد استفاده در این تحقیق، در روابط ۷ تا ۹ ارائه شده‌است؛ این روابط را کلمنس و همکاران (Clemmens *et al.*, 1998) معرفی کرده‌اند:

حداکثر خطای مطلق[1] (MAE):

$$MAE = \frac{\max\left(\left|y_t - y_{target}\right|\right)}{y_{target}} \qquad (۷)$$

که در آن،

y_t =تراز سطح آب مشاهده شده (محاسبه شده توسط مدل شبیه‌سازی جریان) در زمان t و y_{target} =تراز سطح آب هدف.

خطای مطلق تجمعی[2] (IAE):

$$IAE = \frac{\frac{\Delta t}{T}\sum_{t=0}^{T}\left(\left|y_t - y_{target}\right|\right)}{y_{target}} \qquad (۸)$$

که در آن،

Δt = فاصله بین گام‌های زمانی اعمال تنظیمات؛ و T= دورهٔ زمانی اجرای آزمون (۱۲یا ۲۴ ساعت). در اینجا نکتهٔ قابل توجه این است که فاصلهٔ بین گام‌های زمانی باید در دورهٔ زمانی اجرای آزمون در نظر گرفته شده (T) ثابت باشد.

1- Maximum Absolute Error

2- Integral of Absolute Magnitude of Error (IAE)

www.SID.ir

Archive of SID

برای ارزیابی عملکرد شبکهٔ آبیاری از نظر تحویل و توزیع آب در آبگیرها، شاخص عدالت در توزیع به‌عنوان معیار اصلی این تحقیق برای مقایسهٔ سامانه‌های کنترل خودکار به‌کار گرفته شده است. این شاخص که برای ارزیابی عملکرد سیستم در میزان کسب موفقیت شبکه در دستیابی به اهداف طراحی و بهره‌برداری بوده است، از شاخص‌های معروف ارزیابی مولدن و گیتس (Molden & Gates, 1990) برای ارزیابی عملکرد بهره‌برداری به‌شمار می‌آید و به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

عدالت توزیع (P_E):

شاخصی است که میزان تناسب موجود را بین مقادیر تحویلی و مقادیر مورد نیاز آب در انشعابات و دوره‌های زمانی مختلف ارزیابی می‌کند. این شاخص به‌صورت رابطهٔ ۹ بیان می‌شود:

$$P_E = \frac{1}{T}\sum_{T}[CV_R(\frac{Q_d}{Q_r})] \qquad (۹)$$

که در آن،

Q_r و Q_d = به‌ترتیب معرف مقدار آب مورد نیاز (منظور آب درخواستی بر اساس حقابه یا قرارداد در این تحقیق) و مقدار آب تحویل شده در عمل برای انشعاب X در دورهٔ زمانی t؛ و CV_R= ضریب تغییرات مکانی در طول کانال که در جدول ۲ سطح عملکرد شاخص مورد نظر ارائه شده است (Molden & Gates, 1990).

جدول ۲- استانداردهای عملکرد ارائه شده توسط مولدن و گیتس (Molden & Gates, 1990)

شاخص	محدودهٔ عملکرد		
	خوب	متوسط	ضعیف
عدالت تحویل آب	۰-۰/۱	۰/۱۱ -۰/۲۵	>۰/۲۵

نتایج و بحث

هدف اصلی این تحقیق، بررسی میزان بهبود عملکرد بهره‌برداری کانال اصلی آبیاری از لحاظ توزیع عادلانهٔ آب در شرایط غیرمعمول بهره‌برداری، با بهره‌گیری از سامانه‌های کنترل خودکار در کانال است. بر این اساس میزان اثرگذاری سامانه‌های کنترل خودکار کلاسیک تناسبی-انتگرالی (PI) برای هر دو روش کنترل بالادست و پایین‌دست و کنترل‌گر مدرن پیش‌بین (MPC) بر تحویل و توزیع عادلانهٔ آب بین آبگیرهای واقع شده در کانال اصلی رودشت بررسی و نتایج آن ارائه شده است. در هر سناریو، آزمون عملکرد سامانه‌های کنترل خودکار طراحی شده در دو مرحله به انجام رسیده است. در مرحلهٔ اول عملکرد هر سامانه در تنظیم رقوم سطح آب در مجاورت هر سازهٔ آبگیر دو شاخص IAE و MAE، در مرحلهٔ بعد نحوهٔ توزیع عادلانه آب بین آبگیرهای کانال اصلی تحت هر سناریو بررسی شده است.

عملکرد سامانه‌های کنترل خودکار در شرایط نوسانات ورودی نرمال

بررسی عملکرد سامانه های کنترل خودکار طراحی شده در تنظیم سطح آب:

مقادیر شاخص‌های ارایه شده در جدول ۳ که بر اساس مقادیر خطای سطح آب محاسبه و در طول زمان شبیه‌سازی به‌دست آمده، نشان‌دهندهٔ کارایی عملکرد سازه‌های تنظیم مجهز به سامانهٔ کنترل خودکار در حداقل کردن خطای سطح آب در بالادست هر آبگیر است.

مطابق نتایج به‌دست آمده، شاخص MAE که نشان‌دهندهٔ حداکثر تجاوز رقوم سطح آب از رقوم هدف در طول شبیه‌سازی است، برای سامانه‌های کنترل خودکار PI

www.SID.ir

Archive of SID

بالادست و پایین‌دست به‌ترتیب برابر ۳/۰۳ و ۲/۷۶ درصد برای آبگیر شماره ۲۳ در انتهای کانال به‌دست آمده است.

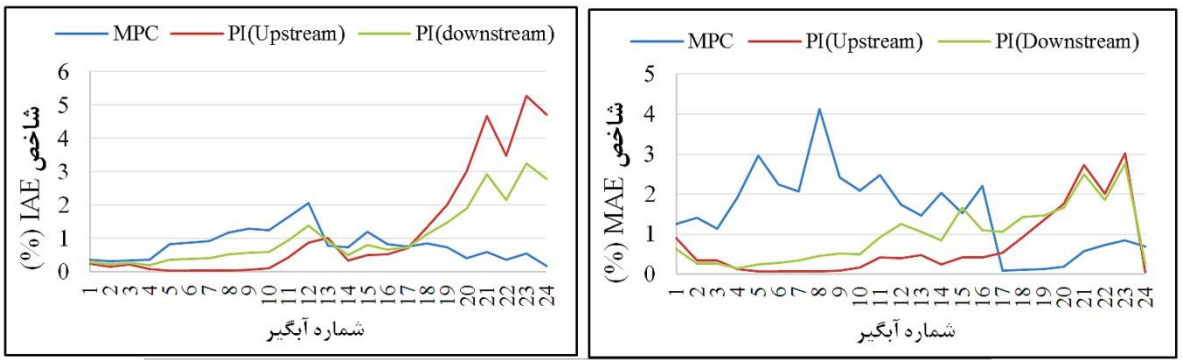
مقدار شاخص مذکور برای کنترل‌گر متمرکز پیش‌بین برابر ۴/۱۳ درصد و در بالادست آبگیر شمارهٔ ۸ رخ داده است. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که هر سه سامانه توانایی کافی در تنظیم سطح آب در مجاورت آبگیرها داشته‌اند به نحوی که مقادیر شاخص مذکور تقریباً در اکثر آبگیرها کمتر از یک درصد به‌دست آمده است. روند تغییرات شاخص MAE در شکل ۴ نشان از هوشمندی سامانهٔ کنترل خودکار متمرکز MPC در حداقل‌سازی خطای سطح آب در بازه‌های انتهایی است به‌نحوی‌که مقادیر شاخص مذکور در بازه‌های انتهایی کانال اصلی با عمق آب کمتر از بازه‌های ابتدایی (تقریباً نصف) حداکثر تغییرات رقوم سطح آب به کمترین میزان ممکن برسد تا آبگیری از کانال اصلی با کمترین اختلال همراه باشد. مقادیر محاسبه شده شاخص IAE، که میزان تجمعی خطای سطح آب را در طول زمان شبیه‌سازی بهره‌برداری کانال نشان می‌دهد، توزیع یکنواخت خطای به‌دست آمده را (با وجود مقدار اندک خطا) برای کنترل‌گر MPC نشان می‌دهد.

جدول ۳- نتایج شاخص‌های ارزیابی عملکرد MAE و IAE در سناریوی بهره‌برداری با نوسانات نرمال

شماره آبگیر	PI				MPC	
	پایین‌دست		بالادست			
	MAE %	IAE %	MAE %	IAE %	MAE %	IAE %
۱	۰/۶۴	۳۱/۰	۹۱/۰	۲۶/۰	۱,۲۶	۳۸/۰
۲	۰/۲۷	۲۴/۰	۳۵/۰	۱۷/۰	۱,۴۱	۳۳/۰
۳	۰/۲۷	۲۸/۰	۳۴/۰	۲۲/۰	۱,۱۴	۳۵/۰
۴	۰/۱۶	۲۱/۰	۱۴/۰	۱/۰	۱,۹۲	۳۶/۰
۵	۰/۲۴	۳۸/۰	۰۸/۰	۰۵/۰	۲,۹۷	۸۳/۰
۶	۰/۲۹	۴/۰	۰۷/۰	۰۴/۰	۲,۲۴	۸۹/۰
۷	۰/۳۴	۴۲/۰	۰۷/۰	۰۴/۰	۲,۰۷	۹۳/۰
۸	۰/۴۷	۵۴/۰	۰۸/۰	۰۵/۰	۴,۱۳	۱,۱۹
۹	۰/۵۳	۵۹/۰	۰۹/۰	۰۶/۰	۲,۴۳	۱,۳۰
۱۰	۰/۵	۶/۰	۱۸/۰	۱۱/۰	۲,۱۰	۱,۲۶
۱۱	۰/۹۳	۰/۹۵	۰/۴۳	۰/۴۳	۲/۴۸	۱/۶۴
۱۲	۱/۲۶	۱/۳۹	۰/۴۱	۰/۸۷	۱/۷۵	۲/۰۷
۱۳	۱/۰۷	۰/۹۲	۰/۴۹	۱/۰۳	۱/۴۸	۰/۷۹
۱۴	۰/۸۶	۰/۵۱	۰/۲۵	۰/۳۵	۲/۰۳	۰/۷۴
۱۵	۱/۶۶	۰/۸	۰/۴۲	۰/۵	۱/۵۲	۱/۲۰
۱۶	۱/۱۰	۰/۶۷	۰/۴۳	۰/۵۴	۲/۲۱	۰/۸۴
۱۷	۱/۰۶	۰/۷۴	۰/۵۴	۰/۷۲	۰/۰۹	۰/۷۷
۱۸	۱/۴۴	۱/۱۳	۰/۹۲	۱/۳۴	۰/۱۱	۰/۸۵
۱۹	۱/۴۸	۱/۴۸	۱/۳۵	۲/۰۳	۰/۱۳	۰/۷۵
۲۰	۱/۶۷	۱/۹۰	۱/۷۷	۳/۰۱	۰/۱۹	۰/۴۲
۲۱	۲/۵۰	۲/۹۳	۲/۷۳	۴/۶۷	۰/۵۸	۰/۶۱
۲۲	۱/۸۶	۲/۱۵	۲/۰۲	۳/۴۹	۰/۷۴	۰/۳۷
۲۳	۲/۷۶	۳/۲۵	۳/۰۳	۵/۲۷	۰/۸۶	۰/۵۶
۲۴	۰/۲۷	۲/۷۸	۰/۰۵	۴/۷۳	۰/۷	۰/۱۸

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ٤- نمودارهای شاخص حداکثر خطای مطلق (سناریوی کم‌آبی نرمال)

بررسی عملکرد سامانه‌های کنترل خودکار طراحی شده از دیدگاه عدالت توزیع:

هدف اصلی این تحقیق بررسی توانایی سامانه‌های کنترل خودکار در پیاده‌سازی تحویل عادلانه آب بین آبگیرهای واقع در کانال اصلی است که با استفاده از شاخص ارزیابی عملکرد عدالت محقق شده است. بر اساس آنچه پیشتر گفته شد، هرچه مقدار این شاخص به صفر نزدیک‌تر باشد آب با عدالت بیشتری در بین آبگیرهای کانال اصلی توزیع می‌شود.

بر این اساس، شکل ۵ امکان بررسی و مقایسهٔ شاخص عدالت به‌دست آمده را در وضعیت موجود بهره‌برداری کانال اصلی رودشت با حالات بهره‌گیری از سامانه‌های کنترل خودکار فراهم آورده است. در این شکل برای نمایش مقدار شاخص عدالت در توزیع آب بین آبگیر واحدهای زراعی درجه دو واقع در کانال اصلی و به‌منظور سهولت در مقایسهٔ توزیع عادلانه آب در روش‌های بهره‌برداری (که در قسمت پایین شکل، این طیف قابل مشاهده است)، از طیف رنگی استفاده شده است. گفتنی است که ناحیهٔ رنگی مشخص شده در هر نقشه، کل واحدهای درجه دو تحت کشت است. بر اساس راهنمای رنگی تعیین شده در شکل برای شاخص عدالت توزیع در کل شبکه، هرچه رنگ ناحیهٔ وسیع زراعی تیره‌تر باشد، عدالت توزیع در کل شبکهٔ آبیاری کمتر است. و برعکس روشن‌تر بودن رنگ منطقهٔ مذکور نشانگر عملکرد مطلوب‌تر شبکه در توزیع عادلانهٔ آب بین آبگیر واحدهای درجه دو است. مطابق شکل، شاخص عدالت توزیع آب در شکل (۵-الف)، که پس از شبیه‌سازی بهره‌برداری وضع موجود کانال (با استفاده از سازه‌های تنظیم سرریزهای نوک‌اردکی) به‌دست آمده است، برابر با مقدار ۱۳/۲۱ درصد حاصل شده است. مطابق معیارهای جدول ۲، عدالت توزیع آب در شرایط کنونی و برای سناریوی نرمال بهره‌برداری در حد «متوسط» ارزیابی می‌شود که خود ضرورت بهبود آن را نشان می‌دهد.

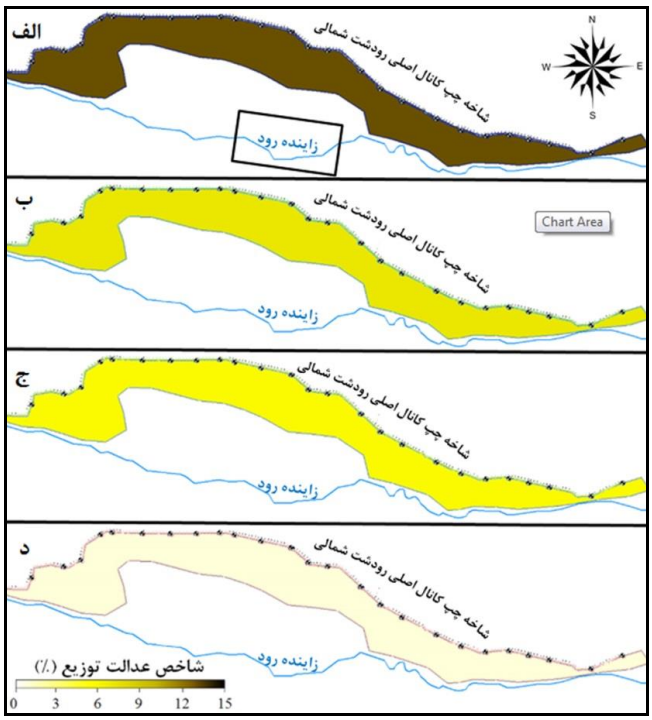
شکل (۵-ب) بیانگر عملکرد سامانهٔ کنترل خودکار کلاسیک انتگرالی-تناسبی از نوع کنترل بالادست است. در اینجا رنگ ناحیهٔ زراعی نسبت به حالت (الف) وضع موجود (وجود سازه تنظیم سریز نوک اردکی) روشن‌تر است. نتایج حاصل از مدل‌سازی این روش برای شاخص عدالت توزیع، مقدار ۷/۲۹ درصد را نشان می‌دهد. این مقدار طبق استاندارد جدول ۲ دارای عملکرد خوبی بوده است. تفاوت بین این روش و روش قبل، به‌میزان ۶ درصد، نشان از کارایی توزیع عادلانهٔ آب بین واحدهای زراعی درجه دو با این سیستم نسبت به زمانی است که این سامانه‌های کنترل خودکار وجود ندارند. بررسی عدالت توزیع از طریق سامانهٔ کنترل خودکار انتگرالی-تناسبی با کنترل سطح آب از پایین‌دست، که در شکل (۵- ج) نمایش داده شده، حاکی از آن است که این روش در مقایسه با سامانهٔ کنترل بالادست عملکردی تا حدودی بهترداشته به‌طوری که

www.SID.ir

Archive of SID

شاخص عدالت توزیع مقدار ۶/۰۱ درصد را به‌دست داده است. با توجه به استاندارد جدول ۲، می‌توان عملکرد این سامانه را نیز همچون سامانهٔ PI کنترل بالادست در سطح خوب و مطلوب قضاوت کرد.

بررسی نتایج شاخص عدالت برای سامانهٔ مدرن و هوشمند کنترل پیش‌بین در شکل (۵-د) حاکی از آن است که این روش در مقایسه با سایر روش‌های ارائه شده در توزیع عادلانهٔ آب به آبگیرها عملکرد به مراتب بهتری از خود نشان می‌دهد. شاخص عدالت توزیع برای سامانهٔ MPC مقدار ۱/۲۱ درصد را با سطح عملکرد خوب نشان می‌دهد. بهبود عدالت در توزیع آب به میزان ۱۲ درصد، نشان از کارایی بالای این سامانه دارد. دلیل این امر را می‌توان از جدول ۳ و طبق نتایج مطلوب شاخص‌های خطای MAE و IAE دریافت. در مقابل، سامانه‌های غیرمتمرکز PI بالادست و پایین‌دست، با وجود آنکه عملکرد قابل قبولی در بازه‌های بالادست و تا حدودی میان‌دست کانال اصلی با توجه به ماهیت موضعی بودن کنترل‌گرهای آن داشتند، نتوانستد مثل کنترل‌گر پیش‌بین، عدالت در توزیع آب در شرایط کم آبی نرمال را بهبود دهند.



شکل ۵- نقشهٔ شاخص عدالت توزیع در روش‌های مختلف بهره‌برداری تحت سناریوی نوسانات ورودی نرمال

عملکرد سامانه‌های کنترل خودکار در زمان سناریوهای نوسانات شدید جریان ورودی

در ادامه، با مدل‌سازی استراتژی‌های مختلف بهره‌برداری برای سناریوی نوسانات شدید جریان ورودی، نتایج حاصل مانند قسمت قبلی برای مقایسهٔ روش‌های بهره‌برداری طبق شاخص‌ها، ارائه و دربارهٔ آن بحث می‌شود.

بررسی عملکرد سامانه های کنترل خودکار طراحی شده در تنظیم سطح آب:

نتایج شاخص‌های خطا در جدول ۴ ارائه شده و بر اساس این مقادیر، سامانه‌های کنترل خودکار در تأمین رقوم آب مورد نیاز در بالادست کانال عملکرد قابل قبول دارند. در این بین، کنترل‌گرهای PI بالادست و پایین‌دست قادر به تأمین آب برای آبگیرهای

www.SID.ir

Archive of SID

میانی به بعد را نداشته‌اند. نمودارهای این نتایج جهت مقایسهٔ بهتر روش‌ها در شکل ۶ آورده شده است. مطابق نتایج به‌دست آمده، شاخص MAE که حداکثر خطای رقوم سطح آب را در طول شبیه‌سازی نشان می‌دهد، برای سامانه‌های کنترل خودکار PI بالادست و پایین‌دست اگرچه خطا در آبگیرهای بالادستی کانال در محدودهٔ مطلوبی قرار دارد ولی از آبگیرهای میانی به بعد سطح آب به رقوم هدف آبگیرها نرسیده که در جدول ۴ به‌صورت خانه‌های خالی نشان داده شده است.

جدول ٤- نتایج شاخص‌های خطا برای سناریوی کم‌آبی شدید

شماره آبگیر	PI				MPC	
	پایین‌دست		بالادست			
	MAE %	IAE %	MAE %	IAE %	MAE %	IAE %
۱	۰/۵۱	۰/۳	۰/۵۳	۰/۳۶	۰/۳۷	۰/۷۴
۲	۰/۲	۰/۲۸	۰/۲۱	۰/۱۳	۰/۱۸	۰/۶۳
۳	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۸	۰/۱	۰/۱۹	۰/۶۷
۴	۰/۱۴	۰/۲۱	۰/۱۸	۰/۱۲	۰/۱۸	۰/۶۸
۵	۰/۲۹	۰/۴۱	۰/۴۱	۰/۳۹	۰/۳۴	۱/۷۰
۶	۰/۳۵	۰/۳۳	۰/۵	۰/۴۳	۰/۳۷	۱/۴۷
۷	۰/۸	۰/۳۸	۶۱/۰	۰/۴۳	۰/۴۲	۱/۵۹
۸	۱/۰۱	۰/۴۲	۱/۳۰	۰/۵	۰/۶	۲/۰۵
۹	۱/۵۶	۰/۴۴	۱/۸۲	۰/۵	۰/۶۶	۲/۲۲
۱۰	۱/۳۴	۰/۴۲	۰/۶۶	۰/۱۱	۰/۵۲	۲/۱۳
۱۱	۲/۰۱	۰/۵۵	۲/۹۹	۰/۸۲	۰/۸۴	۲/۷۵
۱۲	۸/۹۳	۳/۳۵	۱۲/۰۶	۱/۵۷	۱/۲۵	۳/۵۳
۱۳	۹/۵۴	۵/۲۳			۰/۹۱	۱/۸۴
۱۴	۱۰/۱۰	۵/۹۰			۰/۷۹	۱/۷۶
۱۵	۱۱/۷۰	۶/۵۰			۱/۴۵	۳/۳۴
۱۶	۱۲/۲۴	۷/۲۰			۰/۷۵	۲/۱۸
۱۷					۰/۵۲	۲/۰۴
۱۸					۰/۴۱	۲/۵۳
۱۹					۰/۱	۲/۱۳
۲۰					۰/۰۸	۱/۷۵
۲۱					۰/۰۶	۲/۵۸
۲۲					۰/۲۴	۱/۵۴
۲۳					۰/۲۳	۲/۴۲
۲۴					۰/۰۶	۰/۸۳

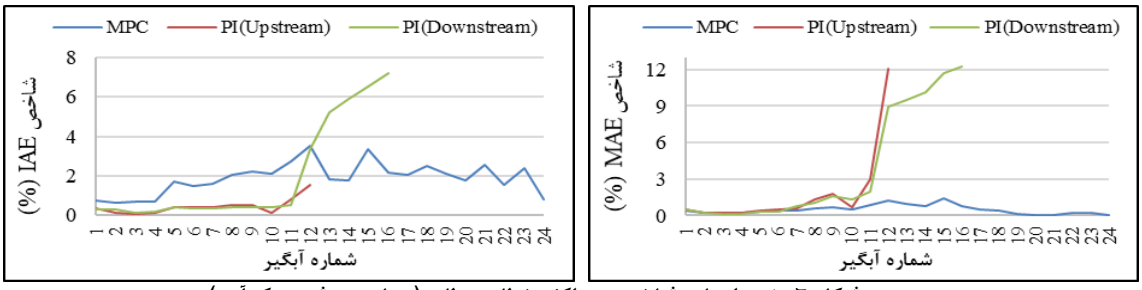
این مسئله آسیب‌پذیری سامانه‌های کنترل خودکار موضعی را مقابل نوسانات شدید جریان ورودی نشان می‌دهد. برای کنترل‌گر متمرکز پیش‌بین (MPC) نتایج شاخص MAE به‌صورت مطلوب‌تری برآورد شده است. حداکثر خطای رقوم سطح آب ۱/۴۵درصد برای سامانهٔ MPC در آبگیر شمارهٔ ۱۵ نشان از تحویل مطمئن آب به آبگیرها دارد. خطای رقوم آب این سامانه در شرایط کم‌آبی شدید برای آبگیرهای انتهایی پایین‌دست کانال حتی از نیم درصد نیز کمتر است. طبق شکل ۶ نیز مشخص است که مقدار خطا برای سامانهٔ MPC روندی ملایم دارد و هوشمندی این کنترل‌گر در مدیریت تحویل آب به آبگیرها برای نوسانات شدید جریان ورودی طبق نتایج قابل دفاع است.

این نکته نیز با اهمیت است که حداکثر میزان خطای شاخص MAE برای سناریوی کم‌آبی شدید حتی کمتر از حداکثر خطا برای سناریوی کم‌آبی نرمال است. نتایج شاخص IAE مشابه MAE، نشان از تأمین‌نشدن سطح آب

www.SID.ir

Archive of SID

موردنیاز آبگیرهای میانی به بعد را برای سامانه‌های PI بالادست و پایین‌دست دارد که به‌رغم مطلوب بودن شاخص IAE برای این دو سامانه نسبت به کنترل‌گر MPC برای آبگیرهای بالادستی، کنترل‌گر MPC توانایی بیشتری در تأمین رقوم هدف در شرایط کم‌آبی شدید داشته است.



شکل ٦- نمودارهای شاخص حداکثر خطای مطلق (سناریوی شدید کم‌آبی)

بررسی عملکرد سامانه های کنترل خودکار طراحی شده از منظر عدالت توزیع:

نتایج شاخص عدالت توزیع برای شرایط کم‌آبی شدید (مشابه سناریوی قبلی) در شکل ۷ آورده شده است و بر اساس معیار گفته شدهٔ مولدن و گیتس (Molden & Gates, 1990) ارزیابی می‌شود. مطابق شکل ۷ که در آن نیز برای سهولت مقایسهٔ توزیع عادلانهٔ آب از طیف رنگی استفاده شده است، هرچه رنگ منطقهٔ تحت کشت روشن‌تر باشد، نشانگر عملکرد مطلوب شبکه در توزیع عادلانهٔ آب بین آبگیر واحدهای درجه دو است. شاخص عدالت توزیع آب شکل (۷-الف) که برای بهره‌برداری وضع موجود کانال است، ۳۹/۲۳ درصد حاصل شده است.

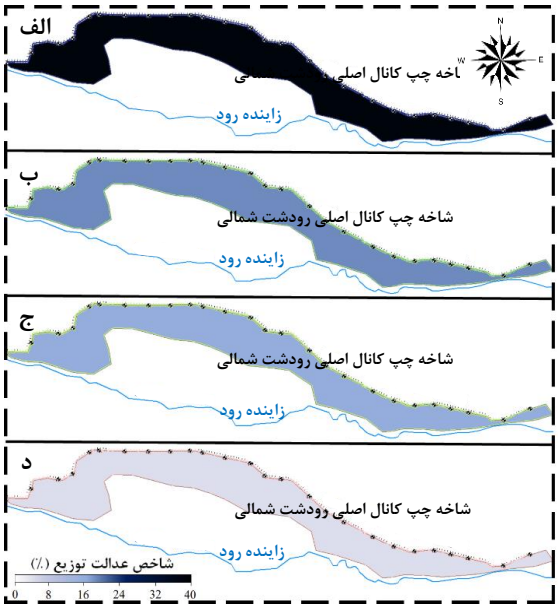
مطابق استاندارد جدول ۲، عدالت توزیع آب در شرایط کنونی و برای سناریوی کم‌آبی شدید در حد «ضعیف» ارزیابی می‌شود و نیاز بهبود وضعیت موجود را می‌طلبد.

شکل (۷-ب) بیانگر عملکرد سامانهٔ کنترل خودکار کلاسیک انتگرالی-تناسبی با کنترل بالادست است. مشاهده می‌شود ناحیهٔ زراعی نسبت به حالت (الف) وضع موجود (وجود سازه تنظیم سریز نوک اردکی) رنگ روشن‌تری به خود گرفته است. نتایج حاصل از مدل‌سازی این روش برای شاخص عدالت توزیع، مقدار ۱۸/۷۱ درصد را نشان می‌دهد. این مقدار طبق استاندارد شاخص عدالت ارائه شده، عملکرد «متوسط» دارد. بهبود ۲۰ درصد در این سامانه نشان از توانایی آن در توزیع عادلانهٔ آب دارد. مقدار شاخص عدالت توزیع برای کنترل‌گر خودکار انتگرالی- تناسبی با کنترل سطح آب از پایین‌دست، که در شکل (۷- ج) آورده شده، نشان‌دهندهٔ این است که این سامانه در مقایسه با سامانهٔ کنترل بالادست عملکرد بهتری داشته‌است؛ شاخص عدالت توزیع ۱۵/۹۵درصد به‌دست آمده است. با توجه به معیار مولدن و گیتس (Molden & Gates, 1990)، می‌توان عملکرد این سامانه را نیز همچون سامانهٔ PI کنترل بالادست در حد «متوسط» ارزیابی کرد.

نتایج شاخص عدالت برای سامانهٔ هوشمند کنترل پیش‌بین که در شکل (۷-د) آمده، نشان از کارآمدی این سامانه در قیاس با سایر روش‌های ارائه شده دارد. شاخص عدالت توزیع برای سامانهٔ MPC مقدار ۴/۳۳ درصد را با سطح عملکرد خوب نشان می‌دهد. بهبود چشمگیر به میزان ۳۵ درصد در عدالت در توزیع آب نشان از توانمندی بالای این سامانه در توزیع عادلانهٔ آب در شرایط کم‌آبی شدید دارد. در مقابل، سامانه‌های غیرمتمرکز PI بالادست و پایین‌دست، با وجود آنکه عملکرد قابل قبولی در بازه‌های بالادست و تا حدودی میان دست کانال اصلی با توجه به ماهیت موضعی بودن کنترل‌گرهای آن داشتند، نتوانستند مانند کنترل‌گر پیش‌بین، عدالت در توزیع آب در شرایط کم آبی نرمال را بهبود دهند.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۷ – پراکندگی مکانی شاخص عدالت توزیع در روش‌های مختلف بهره‌برداری در سناریوی نوسانات ورودی شدید

نتیجه‌گیری

وجود مشکلاتی مانند عملکرد دور از انتظار شبکه‌های آبیاری در توزیع به‌موقع و کافی آب بین واحدهای زراعی، به دلیل استفاده از روش‌های بهره‌برداری سنتی، همواره به عنوان دغدغهٔ بهره‌برداران و مدیران شبکه‌های آبیاری بوده است. خشکسالی‌های پی‌درپی و کمبود آب در شبکه‌ها نیز از سویی دیگر دامنهٔ این مشکلات را بیشتر می‌کند و لزوم مدیریت شبکه و بهره‌برداری مبتنی بر مدیریت تقاضا را در تحویل و توزیع آب در کانال اصلی آشکار می‌سازد. بهره‌گیری از راهبردهای نوین و تاثیرگذار در بهبود فرآیند بهره‌برداری به سبب ملزومات خود نیازمند وجود سامانه کنترل خودکار در کانال است و اصولاً با شیوه‌های بهره‌برداری سنتی شامل بهره‌برداری دستی سازه‌های تنظیم یا بهره‌گیری از سازه‌های هیدرومکانیکال (مانند سازه‌های کنترل سطح آب بالادست آمیل و کنترل سطح آب پایین‌دست آویس و آویو) که در اکثر شبکه‌های کشورمان استفاده می‌شود، اجرا ناشدنی است. در این راستا، این تحقیق به بررسی توانایی سه سامانهٔ بهره‌برداری کنترل خودکار در تحویل و توزیع عادلانه آب و مقایسهٔ آن با وضع بهره‌برداری موجود کانال اصلی در شبکهٔ آبیاری رودشت پرداخته است. دو سامانه بر اساس روش کنترل موضعی (با روش‌ها کنترل PI بالادست و PI پایین‌دست) و سامانهٔ دیگر به روش کنترل سراسری (با روش کنترل MPC) به توزیع عادلانه آب پرداخته‌اند.

نتایج شبیه‌سازی بهره‌برداری کانال اصلی با استفاده از سامانه‌های کنترل خودکار طراحی شده در این تحقیق حاکی از آن است که وقتی نوسانات نرمال در جریان ورودی به کانال اصلی وجود داشته است، هر دو روش سامانهٔ کنترل خودکار موضعی PI بالادست و پایین‌دست برای آبگیرهای بالادستی تا میانی عملکرد قابل قبولی در کنترل سطح آب در عمق هدف بازه‌های کانال آبیاری ارائه داده‌اند. با این همه، عملکرد ضعیف‌تری در تنظیم سطح آب در رقوم هدف آبگیرهای انتهایی داشته‌اند. به نحوی که مقدار شاخص ارزیابی عملکرد MAE از کمتر از ۱ درصد در بازه‌های بالادستی به حدود ۳ درصد در بازه‌های انتهایی رسیده است. این در حالی است که نتایج، حاکی از عملکرد بسیار قابل قبول کنترل‌گر متمرکز MPC در تنظیم رقوم سطح آب هدف آبگیرها دارد؛ به نحوی که اختلاف سطح

www.SID.ir

Archive of SID

آب کنترل شده از رقوم هدف جزئی بوده و در نتیجه، مقدار حداکثر شاخص MAE در بازه‌های پایین‌دست کانال، تنها به ۰/۸۶ درصد رسیده است. پس از بررسی میزان کارایی هر سامانهٔ کنترل خودکار طراحی شده در تنظیم سطح آب در مجاورت عمق هدف، توانایی هر یک از سامانه‌ها در توزیع عادلانهٔ آب در کانال اصلی با استفاده از شاخص عدالت توزیع بررسی شد. بر این اساس، مقادیر محاسبه شدهٔ شاخص عدالت توزیع برای وضع موجود، سامانهٔ کنترل خودکار PI با کنترل بالادست، PI با کنترل پایین‌دست و MPC به ترتیب برابر ۱۳/۲۱، ۷/۲۹، ۶/۰۱ ، و۱/۲۱ درصد به‌دست آمد. در این میان، سامانهٔ کنترل خودکار MPC با بهبود ۱۲ درصد در توزیع عادلانهٔ آب، نسبت به وضعیت بهره‌برداری موجود، بهترین عملکرد را به همراه داشته است. مقدار به‌دست آمده شاخص عدالت توزیع نشان می‌دهد که با به‌کارگیری سامانهٔ MPC در بهره‌برداری کانال اصلی، توزیع آب تقریباً بین همه آبگیرها از بالادست تا پایین‌دست به صورت یکنواخت، منصفانه و عادلانه انجام گرفته است.

نتایج شبیه‌سازی سناریوی بهره‌برداری با نوسانات شدید، به‌روشنی توانایی بالای کنترل‌گر سراسری MPC را در کنترل وضعیت بحرانی بهره‌برداری در کانال آبیاری، در مقایسه با کنترل‌گرهای موضعی، نشان داد. مقدار حداکثر شاخص‌های MAE و IAE به‌دست آمده در طول شبیه‌سازی بهره‌برداری توسط MPC به‌ترتیب برابر ۳،۵۳ و ۱،۴۵ درصد محاسبه شد. در حالی که هردو سامانه‌های PI طراحی شده تنها موفق به تحویل آب به نیمهٔ بالادست آبگیرها شدند و آبی به آبگیرهای بازه‌های میانی تا انتهایی تحویل داده نشد. در واقع، نتایج حاکی از ناتوانایی سامانه‌های کلاسیک در بهره‌برداری کانال در شرایط نوسانات شدید است. میانگین شاخص عدالت توزیع برای بهره‌برداری وضع موجود و بهره‌برداری با استفاده از سامانهٔ کنترل خودکار موضعی به شیوه کنترل بالادست، پایین‌دست و کنترل‌گر متمرکز به‌ترتیب برابر ۳۹/۲۳، ۱۸/۷۱، ۱۵/۹۵ و ۴/۳۳ درصد برآورد شد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، سامانهٔ کنترل خودکار هوشمند پیش‌بین در این سناریو نیز با بهبود چشمگیر توزیع عادلانهٔ آب به میزان تقریبا ۳۵ درصد در شرایط نوسانات شدید حاصل از کم‌آبی، روشی بسیار مطمئن و قابل اعتماد است.

این تحقیق تلاش کرده است توانایی سامانه‌های کنترل خودکار را در شرایط ناعادلانهٔ تحویل و توزیع در شبکه‌های آبیاری مقایسه و بررسی کند تا علاوه بر نشان دادن میزان توانایی هر سامانه در کنترل شرایط سخت بهره‌برداری، ضرورت نوسازی، بهسازی و مدرن سازی شبکه‌های آبیاری را گوشزد کند. در واقع، با تجهیز شبکه‌های آبیاری به سامانه‌های کنترل خودکار، می‌توان آسیب‌پذیری این شبکه‌ها را در مقابل بحران‌های کم‌آبی کاهش داد و با تحویل و توزیع مطمئن، بهره‌وری را به حد مطلوبی رساند.

قدردانی

این تحقیق با حمایت مالی شرکت آب منطقه‌ای اصفهان در قالب پروژه تحقیقاتی شماره ۹۶/۱۲۸ صورت پذیرفته است. نویسندگان مقاله تشکر خود را از این شرکت اعلام می‌نمایند.

مراجع

Abbasi, F., Sohrab, F. and Abbasi, N. 2016. Evaluation of irrigation efficiencies in Iran. Irrig. Drain. Struct. Eng. Res. 17(67): 113-120. (in Persian)

www.SID.ir

Archive of SID

Begovich, O., Ruiz, V., Besancon G., Aldana C. and Georges D. 2007. Predictive control with constraints of a multi-pool irrigation canal prototype. Latin Am. Appl. Res. 37(3):177-85.

Burt, C. M. 2013. The irrigation sector shift from construction to modernization: What is required for success?. Irrig. Drain. 62(3): 247-254.

Clemmens, A. J., Kacerek, T. F., Grawitz, B. and Schuurmans, W. 1998. Test cases for canal control algorithms. J. Irrig. Drain. Eng. 124, 23-30.

Hashemy-Shahedany, S. M., Monem, M. J., Isapoor, S. and Van Overloop, P. J. 2013. Using in-line reservoir operational strategy to improve Dez main irrigation canal performance. J. Irrig. Drain. 62(4): 458-467.

Hashemy Shahedany, S. M., Sadeghi, S. and Adib-Majd, E. 2016. Investigating the effect of using non-structural solutions on improving the operation of the main irrigation canal under Inflow fluctuations. Irrig. Drain. Struct. Eng. Res. 68(18): 50-33. (in Persian)

Hosseinzadeh, Z. and Monem, M. J. 2012. Develop and testing mathematic model of hinged weir with PID method. J. Water Soil Res. 43(1): 87-94. (in Persian)

Igreja, J. M., Lemos, J. M., Cadete, F., Rato, L. M. and Rijo, M. 2012. Control of a water delivery canal with cooperative distributed MPC. American Control Conference (ACC). June 27-29. Fairmont Queen Elizabeth in Montréa, Canada

Lozano, D., Arranja, C., Rijo, M. and Mateos, L. 2010. Simulation of automatic control of an irrigation canal. Agric. Water Manage. 97, 91-100.

Malaterre, P. O., Dorchies, D. and Baume, J. P. 2014. Automatic tuning of robust PI controllers for a cascade of rivers or irrigation canals pools. Control Conference (ECC), European: IEEE. June 24-27. Strasbourg, France.

Manz, D. H. 1985. System analysis of irrigation conveyance system. Ph. D. Thesis. Department of Civil Engineering. University of Alberta. Edmonton, Alberta, Canada.

Molden, D. 2007. Water for Food, Water for Life, Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. International Water Management Institute, London/Earthscan/ Colombo.

Molden, D. J. and Gates, T. K. 1990. Performance measures for evaluation of irrigation water delivery systems. J. Irrig. Drain. Eng. 116(6): 804-822.

Monem, M. J. and Mamizadeh, J. 2005. Create mathematic BIVAL model of downstream control system at irrigation canals. J. Hydraul. 1(2):1-13. (in Persian)

Monem, M. J. and Massah, A. 2002. Introduce mathematical model of Niyer-PEAK gates. Proceedings of the 11th National Irrigation Seminar. Oct. 21-23. Shiraz-Iran. (in Persian)

Monem, M. J. 1999. Testing mathematical model ICSS with real condition of irrigation canal. 2nd Iranian Hydraulic Conference. Nov. 16-18. Tehran-Iran. 119-126. (in Persian)

Sadowska, A., van Overloop, P. J., Maestre, J. M. and Schutter, B. 2015. Human-in-the-loop control of an irrigation canal using optimization model predictive control. European Control Conference. July 15-17. Linz-Austria.

Schuurmans, J., Clemmens, A. J., Dijkstra, S., Hof, A. and Brouwer, R. 1999. Modeling of irrigation and drainage canals for controller design. J. Irrig. Drain. Eng. 125(6):338-44

Shahverdi, K. and Monem, M. 2010. Design construction and test of PID control system upstream of sliding gate. 9th Iranian National Hydralics Conferencess. Nov. 11-12. Tehran-Iran. (in Persian)

Van Overloop, P. J. 2006. Model Predictive Control on Open Water Systems. IOS Press.

Van Overloop, P. J. Miltenburg, I. J. Clemmens, A. J. and Strand, R. J. 2008. Identification of pool characteristics of irrigation canals. World Environmental and Water Resources Congress. May 12-16. Honolulu-Hawaii.

Zafra-Cabeza, A., Maestre, J. M., Ridao, M. A., Camacho, E. F. and Sánchez L. 2011. A hierarchical distributed model predictive control to irrigation canals. J. Process. Control. 14(21): 787-793.

Zamani, S. and Parvaresh-Rizi, A. 2015. The effect of design parameters of an irrigation canal on tuning performance of a PI controller. J. Irrig. Drain. 64(4): 519-534.

www.SID.ir

Arc of SID

Irrigation and Drainage Structures Engineering Research/Vol.20/No.74/ Spring 2019/P:75-92

Performance Assessment of Automatic Control Systems in Improving Equitable Water Distribution through Main Irrigation Canal Influencing by Inflow Fluctuations

M. Yaltaghian-Khiabani, S. M. Hashemy-Shahdany*, M. E. Banihabib and Y. Hassani

Corresponding Auther: Assistant Professor, Water Engineering Department, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: mehdi.hashemy@ut.ac.ir
Received: 21 October 2017, Accepted: 13 June 2018

Inefficient operational methods, in distribution of water within irrigation canals, call for applying more efficient ways such as using automation systems. This study assesses capabilities of the automatic operational systems, including centralized Model Predictive Control (MPC) and decentralized Proportional-Integral (PI) controller in enhancing the fairly water delivery throughout the Roodasht main irrigation canal. Existing canal's operational condition was compared with operational status employing PI and MPC control systems. Comparison was conducted using water level error-based performance indicators of MAE and IAE, and equity indicator. Two operational scenarios including normal and severe inflow fluctuation were assigned. According to results of first scenario, upstream PI system resulting to better indicators of MAE and IAE values rather than other systems. MPC controller leading to better performance in comparison with upstream and downstream PI configurations. Application of MPC system resulted to 12% improvement in equity indicator. In the second scenario with sever inflow fluctuations at the headgate, the maximum IAE and MAE indices for MPC controller were 3.53% and 1.45%, respectively, while these indicators for decentralized systems exceeded 100%, demonstrating the inability of the decentralized systems to control the flow rate in severe water shortage conditions. Finally, calculated equity indicator in second scenario, for current operation, upstream and downstream PI and MPC, were 39.23%, 18.71%, 15.95%, and 4.33%, respectively. Results reveal that the application of centralized MPC controller has significantly improved the equity indicator by 35%.

Key Words: Equitable Distribution, Operation, Roodasht Main Irrigation Canal

www.SID.ir