

## ارزیابی عملکرد دو الگوریتم کنترل در بهبود فرایند بهره‌برداری از کانال اصلی غرب شبکه آبیاری دز

سعید عیسی پور<sup>۱</sup>، علی اصغر منتظر<sup>۲\*</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران  
۲- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران

\* پاکدشت-پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی

almontaz@ut.ac.ir

**چکیده-** خودکارسازی شبکه‌های آبیاری به‌عنوان یکی از کارآمدترین رویکردهای ارتقای سطح کیفی و کمی عملکرد این سیستم‌ها شناخته می‌شود. در این تحقیق، دو الگوریتم کنترل پسخورد موضعی تناسبی-انتگرالی درجهت بالادست<sup>۱</sup> و الگوریتم کنترل پسخورد تناسبی-انتگرالی با دی‌کوپلینگ در جهت پایین‌دست<sup>۲</sup> برای کانال اصلی غرب شبکه آبیاری دز طراحی و عملکرد آنها در بهبود شرایط بهره‌برداری کانال ارزیابی شد. به‌منظور طراحی و اجرای الگوریتم‌های کنترل از مدل هیدرودینامیک سوپک<sup>۳</sup> در تلفیق با نرم‌افزار متلب<sup>۴</sup> استفاده شد. ارزیابی الگوریتم‌ها با استفاده از شاخص‌های بیشینه قدر مطلق خطا<sup>۵</sup>، انتگرال قدر مطلق خطا<sup>۶</sup> و خطای برگشت به حالت ماندگار<sup>۷</sup> برای نتایج شبیه‌سازی گزینه بهره‌برداری واقعی کانال در طول یک دوره یک‌ماهه که بیشترین تغییرات در شرایط بهره‌برداری سالیانه کانال بوقوع می‌پیوندد، انجام شد. نتایج نشان داد که هر دو الگوریتم کنترل طراحی شده از پتانسیل قابل توجهی در کنترل جریان و استهلاك اغتشاشهای سازه‌ای و هیدرولیکی ناشی از بهره‌برداری کانال برخوردار بوده و می‌توانند به‌عنوان الگوریتم‌هایی کارآمد در خودکارسازی و بهبود فرایند تنظیم و توزیع جریان کانال مورد مطالعه استفاده شوند. در این راستا، الگوریتم سراسری تناسبی-انتگرالی پسخورد از پایین‌دست، دقت و پتانسیل مطلوبتری در کنترل جریان کانال داشته و امکان تحقق توزیع تقاضا مدار و ارتقای عملکرد بهره‌برداری شبکه را فراهم می‌سازد. از آنجا که الگوریتم کنترل موضعی کانال نیز می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای مناسب در تکمیل عملکرد الگوریتم کنترل سراسری و به‌صورت سیستم پشتیبان اجرا شود، اجرای تلفیقی این دو الگوریتم به‌عنوان سیستم کنترل کانال توصیه می‌شود.

**کلید واژگان:** طراحی الگوریتم کنترل، مدل هیدرودینامیک، کنترل موضعی، کنترل سراسری، شاخص‌های ارزیابی عملکرد، شبکه آبیاری دز.

1. Local upstream proportional integral (PI) feedback control
2. Remote downstream proportional integral (PI) feedback control with decouplers
3. Sobek
4. Matlab
5. Maximum Absolute Error-MAE
6. Integral Absolute Error-IAE
7. Steady State Error- STE

## ۱- مقدمه

بهره‌برداری سنتی از شبکه‌های آبیاری به دلیل عدم وجود ابزارهای دقیق تطبیق قوانین بهره‌برداری با نیازهای متغیر زمانی و مکانی آب، مشکلاتی جدی را در تنظیم و توزیع آب به وجود می‌آورد. امروزه انتخاب رویکرد تقاضا مدار کردن سیستم‌های انتقال و توزیع جریان، به عنوان کارآمدترین شیوه ارتقای سطح کیفی و کمی عملکرد بهره‌برداری از شبکه‌های آبیاری مطرح است (منتظر و همکاران، ۱۳۸۶). از این رو تحقیق در نحوه مدیریت بهره‌برداری جهت هوشمندسازی آن و تعیین روشها و ابزارهای کنترل در شبکه‌ها، امری ضروری است که با به خدمت گرفتن مدل‌های هیدرودینامیک، طراحی و اجرای سیستم‌های کنترل و شیوه‌های بهینه‌سازی مناسب امکان‌پذیر می‌شود. سیستم‌های کنترل خودکار با هدف توزیع بهینه آب و با اعمال کنترل در سازه‌های تنظیم به منظور تنظیم تراز آب در محل این سازه‌ها یا دبی تحویلی یا هر دو مؤلفه در مقابل اغتشاشهای حاصل از بهره‌برداری، طراحی و اجرا می‌شوند (Mutua and Malano, 2001).

فکر خودکارسازی و اجرای سیستم‌های کنترل در کانال‌های آبیاری، از اواخر دهه ۱۹۷۰ میلادی مطرح شد و نظر تعدادی از متخصصان و متولیان سامانه‌های آبیاری را به خود معطوف ساخت. مهمترین بخش خودکارسازی، طراحی الگوریتم کنترل به منظور برآورده ساختن اهداف مدیریت بهره‌برداری است. (Malaterre et al. (1998 طبقه‌بندی جامعی را از روی الگوریتم‌های کنترل بر اساس معیارهای مختلف انجام دادند. این معیارها شامل متغیرهای اندازه‌گیری، متغیرهای کنترل، منطق کنترل، روشهای طراحی و شرایط بهره‌برداری (پیش‌بینی دبی آبگیرها) است. همچنین سیستم‌های کنترل از نظر جهت کنترل به دو شکل کنترل از بالادست و کنترل از پایین‌دست تقسیم‌بندی

می‌شوند. کنترل از بالادست یا کنترل منبع‌گرا<sup>۱</sup> براساس پیش‌بینی مقادیر مصرف آب در پایین دست انجام می‌شود. به دلیل پیچیدگی پیش‌بینی دقیق نیاز آبی پایین‌دست، سیستم کنترل از بالادست کارایی کمتری داشته و مصرف‌کنندگان پایین‌دست معمولاً کمتر یا بیشتر از مقدار نیازشان آب دریافت می‌کنند. کنترل از پایین‌دست یا کنترل تقاضامدار روشی است که در بیشتر سیستم‌های آبیاری برای بهبود عملکرد مدیریت به کار می‌رود. در این روش، هنگامی که مصرف‌کننده با افزایش دبی درخواستی، موجب کاهش تراز آب در پایین‌دست می‌شود، مقدار انحراف ایجاد شده از عمق هدف، موجب ایجاد عکس‌العمل در سازه تنظیم بالادست و افزایش بازشدگی برای تأمین نیاز پایین‌دست می‌شود. تأثیر متقابل بین بازه‌های کانال، موجب انتقال انحراف ایجاد شده به بازه‌های بالادست و در نهایت به منبع می‌شود.

سیستم‌های کنترل از دیدگاه منطق کنترل به دو بخش کنترل پسخورد<sup>۲</sup> یا حلقه بسته و کنترل پیشخورد<sup>۳</sup> یا کنترل حلقه باز تقسیم می‌شوند. به دلیل ضعف و قوت‌های این دو منطق و برای افزایش کارایی الگوریتم کنترل معمولاً از تلفیق این دو منطق در طراحی سیستم کنترل استفاده می‌شود. یکی از الگوریتم‌های کارآمد در کنترل‌کننده‌های شبکه‌های آبیاری، تکنیک تناسبی-انتگرالی<sup>۴</sup> با منطق کنترل پسخورد است (Rogers and Goussard, 1998). در کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی، عملگر کنترل تابعی از مجموع نسبت‌های تناسبی و انتگرالی انحرافهای متغیر تحت کنترل (تراز آب یا دبی) نسبت به مقدار هدف است. مقدار انحرافها، از تفاضل

1. Source Oriented
2. Feedback control
3. Feedforward control
4. Proportional Intrgral Feedback Control- PI Feedback Control

کنترل‌کننده‌های متعددی برای هوشمندسازی سیستم بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری در سراسر دنیا طراحی شده که می‌توان به کنترل‌کننده‌های بیوال<sup>۱</sup> برای تنظیم تراز سطح آب در وسط بازه‌های کانال توسط Chevereau et al. (1987) و کنترل‌کننده EL-FLO برای تنظیم تراز سطح آب در انتهای هر یک از بازه‌های کانال با تنظیم سازه بالادست اشاره کرد (Buyalski and Serfozo, 1979).

Balogun et al. (1988) و Reddy et al. (1992) با استفاده از روش بهینه‌سازی خطی درجه دوم<sup>۲</sup>، به ترتیب کنترل‌کننده موضعی و کنترل‌کننده سراسری برای کنترل شبکه‌های آبیاری طراحی کردند.

Rodellar et al. (1993) روش کنترلی مبتنی بر پیش‌بینی جریان بر اساس مدل ماسکینگهام<sup>۳</sup> که در آن از روابط بین تغییرات دبی و تراز آب در بالادست و پایین‌دست هر یک از بازه‌های کانال استفاده می‌شود، طراحی کردند. این کنترل‌کننده روش ساده‌ای در محاسبه اتخاذ می‌کند، اما متغیر خروجی کنترل در آن دبی سازه تنظیم است که باید به میزان بازشدگی تبدیل شود. کنترل‌کننده مرکزی تناسبی-انتگرالی ترکیبی (پس‌خورد و پیش‌خورد) با کاربرد دی‌کوپلینگ<sup>۴</sup> برای کنترل کانال اصلی نارمادای هندوستان، به منظور بهبود روند مدیریت بهره‌برداری آن طراحی شد (Montazar et al., 2005).

Weyer, (2001) کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی موضعی برای کنترل کانال‌های آبیاری طراحی کرد. این کنترل‌کننده بر روی کانال اصلی هاوتون<sup>۵</sup> در کوئینزلند<sup>۶</sup> استرالیا نصب و عملکرد آن ارزیابی شد.

متغیر اندازه‌گیری شده (تراز سطح آب) و متغیر هدف (تراز سطح آب) برای محاسبه عملگر کنترل (میزان بازشدگی) به دست می‌آید. اعمال عملگر کنترل در سازه تنظیم توسط کنترل‌کننده، موجب تنظیم متغیر تحت کنترل (تراز سطح آب) می‌شود. به عبارت دیگر سیستم کنترل با اعمال تغییر بر متغیر کنترل (جابه‌جایی دریچه سازه تنظیم)، متغیر تحت کنترل (تراز سطح آب) را تنظیم می‌کند. از آنجا که سیستم مدیریت بهره‌برداری هر شبکه، به دلیل تأثیرپذیری از ساختار هیدرولیکی، اهداف مدیریتی، الگوی کشت و اقلیم منطقه، منحصر به فرد است، الگوریتم کنترل طراحی شده برای شبکه نیز منحصر به فرد خواهد بود.

کنترل‌کننده‌های موضعی یا غیرمتمرکز کنترل‌کننده‌هایی هستند که در آنها متغیر کنترل بر اساس متغیر اندازه‌گیری شده در محل سازه تنظیم، محاسبه و در سازه تنظیم اعمال می‌شود؛ در حالی که در کنترل‌کننده‌های متمرکز یا سراسری، عملگر کنترل با استفاده از متغیرهای اندازه‌گیری شده در سراسر کانال محاسبه و در سازه‌های کنترل اعمال می‌شود. از آنجا که در این سیستم‌ها، محاسبه عملگر کنترل بر اساس تعداد زیادی از متغیرهای اندازه‌گیری انجام می‌شود، پتانسیل و دقت بالایی در کنترل کانال‌های آبیاری دارند (Schuurmans et al., 1999; Wahlin and Clemmens, 2002). در شرایط عادی بهره‌برداری، مزیت سیستم‌های کنترل متمرکز یا سراسری آن است که با افزایش انعطاف‌پذیری در بهره‌برداری شبکه، حتی در شرایط تغییر شدید دبی آبیاریها، در کنترل تراز آب از دقت مناسبی برخوردارند. اما این سیستم‌ها به سخت‌افزار بیشتری در مقایسه با سیستم‌های کنترل موضعی نیاز دارند که علاوه بر افزایش هزینه اجرای سیستم کنترل، ممکن است باعث افزایش ریسک نارسایی ناشی از اثرات جانبی مثل بریدگی کابل انتقال اطلاعات یا اختلال امواج رادیویی شود.

1. BIVAL
2. Linear Quadratic Optimization Technique
3. Predictive Control Method based on the Muskingum Model
4. Centralized Prportional Integral Feedback+Feedforward Control with Decoupler
5. Narmada
6. Houghton Main Channel- HMC
7. Queensland

در طول کانال ۱۴ سازه تنظیم وجود دارد که تمامی آنها از نوع قطاعی است.

شکل ۱ نمای جانبی سازه قطاعی را نشان می‌دهد. در این شکل  $H_H$  تراز آب بالادست و قابل کنترل توسط سازه،  $Z$  میزان بازشدگی و  $H_h$  تراز آب پایین دست را نشان می‌دهد. بهره‌برداری از کانال با تنظیم و کنترل سازه‌های قطاعی توسط اپراتورها و به صورت روزانه انجام می‌شود. همچنین تعداد ۷۰۰ آبگیر و کانال فرعی در طول کانال، وظیفه توزیع آب بین بهره‌برداران محلی را بر عهده دارند. شکل ۲ نمای جانبی آبگیر را نشان می‌دهد. در طول کانال تعداد ۱۵ سازه تقاطعی از نوع سیفون، چک سیفون و کالورت وجود دارد. سازه منحصر به فرد سیفون بالارود با طولی نزدیک به یک کیلومتر در کیلومتر شش کانال واقع شده است. بهره‌برداری از این کانال به صورت روزانه و دستی بوده و توسط میراب در سازه‌های تنظیم و آبگیرها اعمال می‌شود.

## ۲-۲- تهیه مدل، کالیبره کردن و صحت سنجی

مدل کانال مورد مطالعه توسط نرم‌افزار سوبک تهیه شد. مشخصات هندسی کانال و سازه‌های موجود در آن از شرکت بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری شمال استان خوزستان جمع‌آوری شد. کانال اصلی غرب دز از رودخانه دز و از سد انحرافی احداث شده بر روی این رودخانه تغذیه می‌شود. سرریز ثابت سد انحرافی احداث شده بر روی رودخانه دز موجب ایجاد تراز ثابت آب در بالادست سازه ابتدای کانال شده که مشخصات هیدرولیکی آن به‌عنوان شرایط مرز بالادست در شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی در نظر گرفته شد. برای پایین دست کانال از داده‌های واقعی دبی-اشل جمع‌آوری شده از پارشال فلوم هفت تپه استفاده شد. کالیبره کردن مدل براساس داده‌های واقعی بهره‌برداری جمع‌آوری شده کانال دز برای کشت زمستانه سال ۱۳۸۵

تاکنون روشها و الگوریتم‌های متعددی برای کنترل شبکه‌های آبیاری توسعه یافته که می‌توان به کنترل فازی<sup>۱</sup> و تنظیم‌کننده خطی درجه دو<sup>۲</sup> اشاره کرد (Malaterre et al., 1998). همچنین کنترل‌کننده‌های پیچیده‌تری نسبت به کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی نظیر مدل کنترل پیش‌گویانه<sup>۳</sup> و کنترل‌کننده خطی درجه دوم گاوسی<sup>۴</sup> برای شبکه‌های آبیاری توسعه یافته است (Wahlin and Clemmens, 2002).

هدف از تحقیق حاضر، طراحی و ارزیابی دو الگوریتم کنترل برای کانال اصلی غرب شبکه آبیاری دز است. در این راستا دو الگوریتم کنترل موضعی تناسبی-انتگرالی پس‌خورد در جهت بالادست و الگوریتم کنترل تناسبی-انتگرالی سراسری پس‌خورد با دی‌کوپلینگ در جهت پایین دست طراحی شد و عملکرد آنها در بهبود فرایند بهره‌برداری این کانال مورد ارزیابی قرار گرفت.

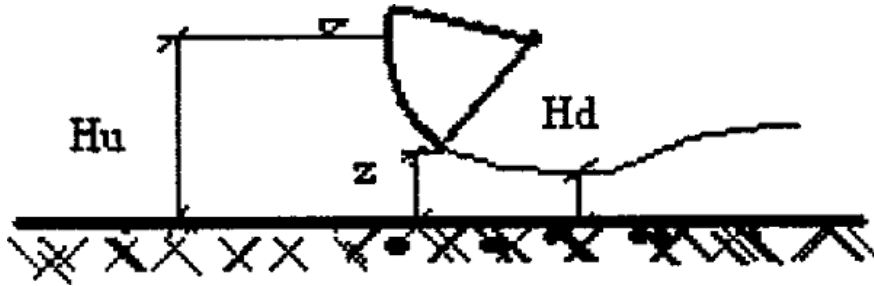
## ۲- مواد و روشها

### ۲-۱- مشخصات کانال مورد مطالعه

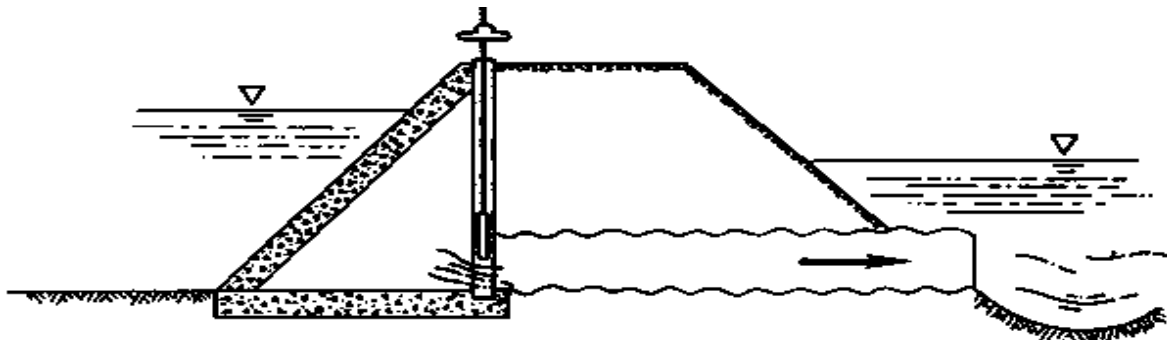
شبکه آبیاری دز در شمال استان خوزستان واقع شده و وسعت اراضی خالص این شبکه ۹۳۰۰۰ هکتار است. این شبکه شامل سه کانال اصلی غرب، شرق و عقیلی است که این مطالعه بر روی کانال اصلی غرب انجام شده است. کانال اصلی غرب از سد انحرافی احداث شده بر روی رودخانه دز منشعب شده است. طول کانال ۹۳ کیلومتر بوده که در این تحقیق ۴۴ کیلومتر ابتدای آن از محل سد انحرافی تا ابتدای کشت و صنعت هفت تپه بررسی شد. دبی طراحی کانال در بخش ابتدایی برابر  $15 \text{ m}^3/\text{s}$  بوده و

1. Fuzzy Control
2. Linear Quadratic Regulation
3. Model Predictive Control- MPC
4. Linear Quadratic Gaussian- LQG

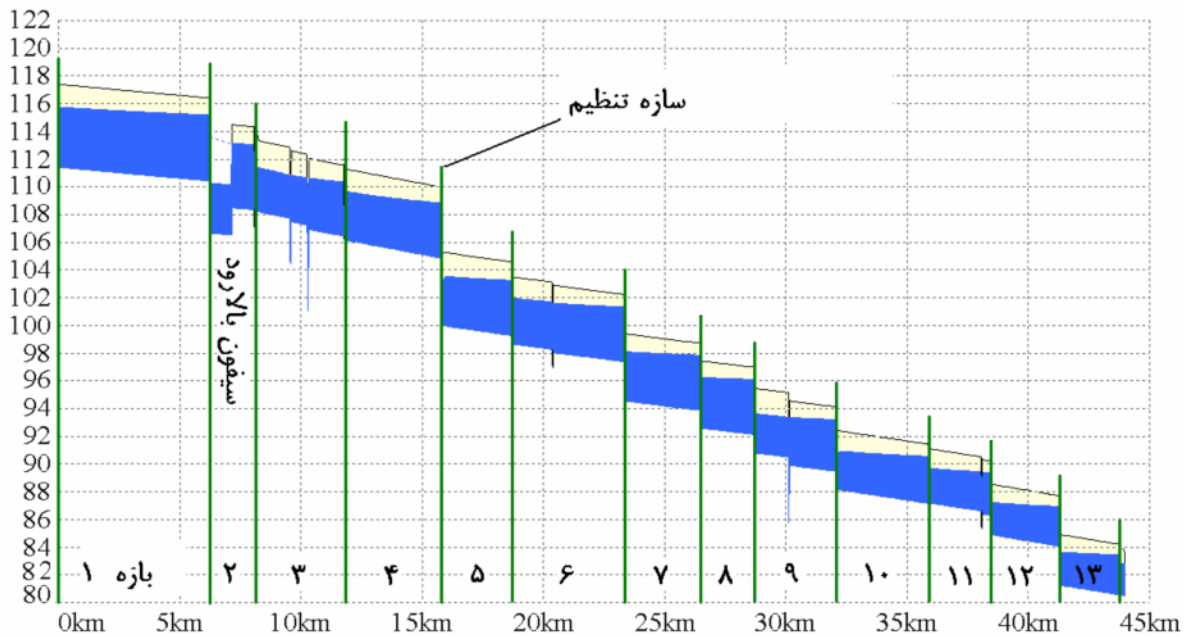
انجام شد. برای مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهده شده شکل ۳ پروفیل طولی جریان شبیه‌سازی شده کانال مورد مطالعه توسط بسته نرم‌افزاری سوپک را نشان می‌دهد. از شاخص‌های زیر استفاده شد (Jabro et al., 1998).



شکل ۱ نمایی از سازه تنظیم قطاعی در کانال اصلی غرب شبکه دز



شکل ۲ نمایی از آبگیر فرعی در کانال اصلی غرب شبکه دز



شکل ۳ پروفیل طولی جریان شبیه‌سازی شده کانال اصلی غرب دز توسط مدل سوپک

با مقادیر مشاهداتی وجود ندارد.

مقدار بهینه این پارامتر برای کالیبره کردن مدل باید برابر صفر باشد که نشان‌دهنده دقت کالیبره کردن است. با توجه به تراز ثابت آب در بالادست دریچه فوقانی کانال، هیدروگراف مشخص در انتهای کانال و هیدروگراف دبی تحویلی برداشت شده برای هر یک از آبگیرها، شبیه‌سازی برای کالیبره کردن مدل انجام شد. برای کالیبره کردن مدل ضریب مانینگ کانال و ضریب دبی سازه‌های تنظیم و سازه‌های آبگیر به‌عنوان متغیرهای قابل تغییر برای انطباق مقادیر شبیه‌سازی با مقادیر مشاهده‌ای استفاده شد. بدین منظور در هر شبیه‌سازی مقادیر دبی سازه‌های تنظیم و تراز آب در بالادست آنها استخراج و با مقادیر مشاهداتی مقایسه می‌شد. کالیبره کردن و صحت‌سنجی مدل برای یک ماه از داده‌های واقعی برداشت شده انجام شد؛ بدین ترتیب که ۱۵ روز اول برای کالیبره کردن و ۱۵ روز بعدی برای صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت. ضریب مانینگ در شبیه‌سازی اولیه برای کل کانال برابر مقدار طراحی ۰/۰۱۴۹ در نظر گرفته شد. سپس مقدار مانینگ در هر بازه برای کالیبره سازی تنظیم شده و شبیه‌سازی تا کالیبره شدن کامل و به‌دست آمدن نتایج مورد قبول ادامه یافت. این مرحله به‌صورت آزمون و خطا تا زمانی انجام شد که مقادیر شبیه سازی با مقادیر مشاهداتی کمترین اختلاف را نشان دادند. پس از کالیبره شدن مدل و تنظیم پارامترهای آن، مدل برای ۱۵ روز بعدی برای صحت‌سنجی با پارامترهای به‌دست آمده شبیه‌سازی شد. بعد از کالیبره کردن و صحت‌سنجی، مدل برای طراحی الگوریتم‌های کنترل و شبیه‌سازی گزینه‌های بهره‌برداری مورد استفاده قرار گرفت.

## ۲-۳- طراحی الگوریتم‌های کنترل

کنترل‌کننده PI ساده‌ترین روشی است که بارها در کانال‌های

$$ME = \max |M_i - S_i|_{i=1}^n \quad (1)$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2 \right]^{0.5} \times \left( \frac{100}{M} \right) \quad (2)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - M)^2 - \sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - M)^2} \quad (3)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n M_i - \sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (4)$$

در این روابط  $M_i$  و  $M$  به ترتیب مقادیر شبیه‌سازی شده، مشاهده شده و میانگین مقادیر مشاهداتی است. مقدار حداکثر خطا<sup>۱</sup> برابر با حداکثر مقدار خطا بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر شبیه‌سازی است. مقدار بهینه حداکثر خطا برابر صفر و به این معنا است که مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهداتی کاملاً برابر است. ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۲</sup> شاخص دیگری است که در این مطالعه برای کالیبره کردن مدل مورد استفاده قرار گرفت. این شاخص، درصد مجموع اختلافات مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی نسبت به میانگین مقادیر مشاهداتی را نشان می‌دهد. مقدار بهینه این شاخص نیز برابر صفر بوده و نشان‌دهنده انطباق مقادیر شبیه‌سازی مدل با مقادیر مشاهداتی است. برای نشان دادن دقت شبیه‌سازی مدل، کارایی شبیه‌سازی<sup>۳</sup> محاسبه شد. با توجه به رابطه (۳)، مقدار این شاخص، زمانی که مقادیر شبیه‌سازی با مقادیر مشاهداتی کاملاً منطبق باشد برابر یک است. ضریب خطای پس‌ماند<sup>۴</sup> شاخصی است که خطاهای ثابت توزیع شده در تمامی مقادیر شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

اگر ضریب خطای پس‌ماند برابر صفر باشد، نشان می‌دهد که خطای توزیع شده بر روی مقادیر شبیه‌سازی در ارتباط

1. Maximum Error- ME
2. Root Mean Squar Error- RMSE
3. Modeling efficiency- EF
4. Coefficient of Residual Mass- CRM

استفاده شد. برای تنظیم پارامترهای الگوریتم از مدل انتگرالی - تأخیری شورمانز استفاده شد (Schuurmans, 1997). در کانال‌های آبیاری با بازه‌های متعدد نظیر کانال مورد مطالعه، اثر متقابل بین بازه‌ای در نتیجه اعمال متغیر کنترل به سازه‌های تنظیم، به دو جهت بالادست و پایین‌دست منتقل می‌شود. در سیستم‌های کنترل سراسری با کوپل کردن<sup>۴</sup> روش کنترل بازه‌های کانال، این اثرها به بالادست یا پایین‌دست برای انجام اصلاح منتقل می‌شود. با توجه به اینکه اثرهای متقابل بین‌بازه‌ای در سیستم‌های کنترل موضعی به‌طور مستقیم در نظر گرفته نمی‌شوند، کارایی کمتری در مقایسه با سیستم‌های کنترل سراسری دارند. در این تحقیق، یک الگوریتم کنترل سراسری برای کانال مورد مطالعه طراحی شد.

شکل ۴ فرایند اجرایی این الگوریتم کنترل را نشان می‌دهد. در این کنترل‌کننده، عملگر کنترل براساس متغیر اندازه‌گیری محاسبه شده و برای کنترل تراز آب در انتهای بازه به سازه تنظیم بالادست اعمال می‌شود. به‌علاوه برای کنترل سریع کانال مقدار عملگر کنترل مستقیماً به بازه بالادست نیز ارسال می‌شود که این باعث می‌شود مقدار عملگر به‌صورت مستقیم به بالادست منتقل شود. بدین ترتیب تمامی انحرافها به بالادست و در نتیجه به منبع یا سازه فوقانی کانال منتقل می‌شود. در این تحقیق همچنین یک الگوریتم کنترل موضعی بالادست طراحی شد. شکل ۵ فرایند اجرایی این الگوریتم کنترل را نشان می‌دهد. در این الگوریتم کنترل، عملگر کنترل براساس متغیر اندازه‌گیری شده محاسبه شده و برای کنترل تراز آب در بالادست سازه تنظیم استفاده می‌شود.

آبیاری مورد استفاده قرار گرفته‌است (Aström and Montazar et al., 2006, Litrico et al., 2005, Hägglund, 1995, Overloop, 2005, al., 2005). در این روش، محاسبه متغیر خروجی به روش تناسبی - انتگرالی انجام می‌شود. به بیان دیگر متغیر کنترل معادل است با مجموعی از نسبت‌های تناسبی با ضریب  $K_p$  و انتگرالی با ضریب  $K_i$ :

$$u = K_p e + K_i \int e dt \quad (5)$$

در رابطه فوق  $u$  مقدار عملگر کنترل در زمان  $t$ ،  $e$  مقدار انحرافهای تراز آب از تراز هدف در زمان  $t$ ،  $K_p$  ضریب اثر نسبت تناسبی (نسبت مقدار انحراف تراز آب به تراز هدف) و  $K_i$  ضریب وزنی اثر نسبت انتگرالی (مجموع انحرافات نسبت به مقدار هدف) است. پارامترهای کنترل ( $K_p$  و  $K_i$ ) برای بهبود عملکرد کنترل در جهت کاهش زمان کنترل و میزان دقت آن قابل تغییر و تنظیم است. برای کاهش اثر حرکت نوسانی آب در بین دو سازه تنظیم در تعامل با متغیر کنترل اعمال شده به سازه‌ها، اعمال فیلتر به ساختار الگوریتم ضروری است.

در این مطالعه برای طراحی الگوریتم کنترل، از فیلتر پایین‌گذر مرتبه اول<sup>۱</sup> برای تمام بازه‌های کانال استفاده شد (عیسی‌پور، ۱۳۸۷). بنابراین الگوریتم‌های طراحی شده از نوع تناسبی-انتگرالی با اعمال فیلتر پایین‌گذر مرتبه اول<sup>۲</sup> است.

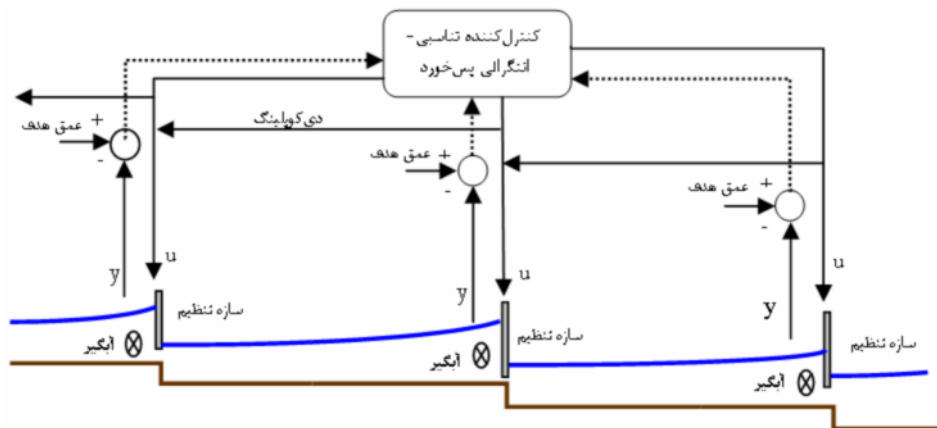
فیلتر اعمال شده دارای پارامتر ثابتی است که علاوه بر تنظیم پارامترهای کنترل، این پارامتر نیز باید تنظیم شود تا بتواند حرکت‌های نوسانی آب را فیلتر کند. در این مطالعه از تئوری کنترل خطی شورمانز<sup>۳</sup> برای طراحی الگوریتم‌های کنترلی

1. First Order Low Pass Filter

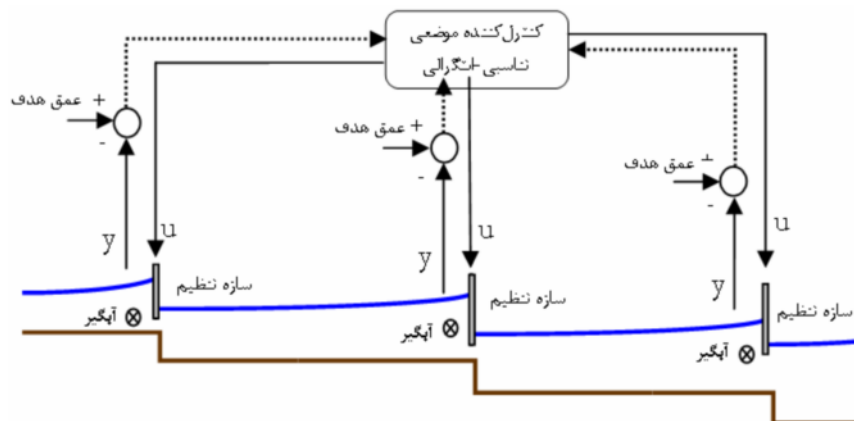
2. Proportional Integral Control with First Order Low Pass Filter-PIF

3. Schuurmanse

4. Decouplers



شکل ۴ فرایند اجرای کنترل کننده سراسری تناسبی-انتگرالی



شکل ۵ فرایند اجرای کنترل کننده موضعی تناسبی-انتگرالی

مشکل اصلی طراحی تلقی می‌شود.

طراحی و اجرای موفق کنترل کننده PI به تنظیم پارامترهای کنترل کننده وابسته است. این پارامترها به علت اثر متقابل بین بازه‌ای و تغییر شرایط جریان به سختی قابل تعیین هستند. پارامترهای کنترل ( $K_p$  و  $K_i$ ) باید طوری محاسبه شوند که الگوریتم کنترل بتواند در کمترین زمان ممکن و با دقت مناسب، متغیر تحت کنترل را به مقدار هدف برساند. علاوه بر این کنترل کننده باید بتواند متغیر تحت کنترل را در

کنترل موضعی بالادست از دیدگاه مدیریت بهره‌برداری کنترل منبع‌گرا تلقی می‌شود؛ زیرا در این سیستم، مقدار نیاز مصرف‌کنندگان با در نظر گرفتن مقدار آب موجود در بالادست بازه تأمین می‌شود. بنابراین در کنترل بالادست، نیاز کشاورزان پایین دست کانال با دقت مناسبی قابل تأمین نیست. این مشکل با هوشمندسازی سیستم کنترل بالادست حل شدنی است. با وجود اینکه کنترل کننده‌های تناسبی-انتگرالی پس‌خورده کاربرد فراوانی در کنترل هوشمند و مدیریت سیستم‌های آبیاری دارند، تنظیم و محاسبه پارامترهای الگوریتم کنترل طراحی شده هنوز به عنوان



بهره‌برداری و تعیین متغیرهای هیدرولیکی مورد نیاز به‌منظور محاسبه شاخصهای ارزیابی عملکرد الگوریتم است. بنابراین پس از به اجرا درآمدن سیستم کنترل در سطح کانال و نصب سنسورهای مربوط، به مدل نیاز نبوده و کنترل‌کننده‌ها به‌صورت خودکار، تنظیم جریان در کانال را انجام می‌دهند. دو الگوریتم (۱) کنترل تناسبی-انتگرالی پسخورد با دی‌کوپلینگ در جهت پایین‌دست و (۲) کنترل تناسبی-انتگرالی موضعی بالادست تهیه شده در نرم‌افزار متلب کدنویسی و با استفاده از مدول‌های شبیه‌سازی جریان آب در کانال‌ها و مدول کنترل بلادرنگ<sup>۱</sup> به مدل کانال مورد مطالعه در سوپک ارتباط داده شد. به‌منظور ارزیابی الگوریتم‌های طراحی شده، داده‌های واقعی بهره‌برداری مربوط به دو ماه فروردین و اردیبهشت برای کشت زمستانه سال ۸۵ برداشت و توسط مدل سوپک شبیه‌سازی شد. داده‌های واقعی بهره‌برداری شامل دبی تحویلی آبیگرها، دبی سازه‌های تنظیم و تراز آب بالادست سازه‌های تنظیم از اول فروردین تا ۳۱ اردیبهشت ۱۳۸۵ بوده و به‌منظور شبیه‌سازی برای کالیبره کردن و صحت‌سنجی مدل کانال (فروردین ماه) و ارزیابی الگوریتم کنترل در شرایط بهره‌برداری (اردیبهشت ماه) به‌کار برده شد. براساس تغییرات دبی آبیگرها، تراز آب در بالادست سازه‌های تنظیم تغییر کرده که کنترل‌کننده‌ها باید در کمترین زمان ممکن و با دقت قابل قبولی تراز آب را در عمق هدف تثبیت کنند. کنترل‌کننده موضعی بالادست با محاسبه و اعمال متغیر کنترل در سازه تنظیم، تراز آب در بالادست سازه را کنترل می‌کند در حالی که کنترل‌کننده سراسری کنترل از پایین‌دست، با تنظیم سازه بالادست تراز آب در انتهای بازه را کنترل می‌کند، با بررسی رفتار بهره‌برداری کانال و دبی تحویلی آبیگرها

مقدار هدف با کمترین نوسان ممکن کنترل کند. در عمل الگوریتم کنترل برای بدترین سناریوی بهره‌برداری طراحی می‌شود (Litrico et al., 2006). در این مطالعه پارامترهای کنترل برای تمام بازه‌های کانال با شبیه‌سازی ۱۰٪، ۵۰٪ و ۸۰٪ ظرفیت بهره‌برداری کانال مورد مطالعه تعیین شد.

## ۲-۴- شبیه‌سازی گزینه‌های بهره‌برداری

کانال مورد مطالعه توسط مدل هیدرودینامیک سوپک شبیه‌سازی شد (عیسی‌پور، ۱۳۸۷). مدل سوپک برای شبیه‌سازی جریانهای ماندگار و غیرماندگار از معادلات سنت و نانت بهره می‌گیرد. معادلات سنت و نانت زمانی که به‌صورت کامل در نظر گرفته شوند، به معادلات موج دینامیک مشهورند. روابط (۷) و (۸) معادلات پیوستگی و مومنتم را -که در مدل سوپک استفاده می‌شود- نشان می‌دهند.

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial A_f}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_i \quad (6)$$

معادله مومنتم:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A_f} \right) + g \cdot A_f \cdot \frac{\partial Y}{\partial x} + g \cdot A_f \cdot (S_f - S_b) = 0 \quad (7)$$

در این روابط  $Q$  دبی برحسب  $(m^3/s)$ ،  $A_f$  سطح خیس جریان  $(m^2)$ ،  $Y$  عمق آب  $(m)$ ،  $g$  شتاب ثقل،  $S_f$  شیب اصطکاک و  $S_b$  شیب کف کانال است. این معادلات به روش تفاضلات محدود حل می‌شوند. مدل سوپک روش خاصی را برای حل معادلات سنت و نانت به‌کار می‌برد که به آن شمای دلفت<sup>۱</sup> می‌گویند.

نقش مدل سوپک در این مطالعه صرفاً شبیه‌سازی گزینه‌های

### ۳- بحث و نتایج

#### ۳-۱- کالیبره کردن و صحت‌سنجی مدل

جدول ۱ نتایج کالیبره کردن و صحت‌سنجی مدل و مقادیر شاخص‌های ارزیابی در نظر گرفته شده برای کالیبره کردن و صحت‌سنجی را بر اساس دو دوره بهره‌برداری ۱۵ روزه نشان می‌دهد. مقادیر بالای EF و مقادیر کم ME، MAE، CRM و RMSE نشان می‌دهد که مدل به خوبی کالیبره شده و برای شبیه‌سازی شرایط هیدرولیکی گزینه‌های مختلف بهره‌برداری به منظور ارزیابی الگوریتم‌های کنترل از دقت مطلوبی برخوردار است.

جدول ۱ مقادیر شاخص‌های ارزیابی در کالیبره کردن و صحت‌سنجی مدل کانال

شاخص	EF	ME	RMSE	CRM	MAE
صحت‌سنجی	۰/۹۹۸	۰/۰۳۰	۱/۱۳۲	۰/۰۱۱	۰/۵۷۶
کالیبره کردن	۰/۹۹۹	۰/۰۲۰	۰/۹۸۶	۰/۰۰۱	۰/۳۴۹

#### ۳-۲- تنظیم الگوریتم کنترل

پارامترهای کنترل ( $K_i$  و  $K_p$ ) با استفاده از قوانین تنظیم شورمانز (۱۹۹۷) و توسط مدل هیدرودینامیک سوپک تعیین شد. بدین منظور از فرایند سیستم شناسی<sup>۴</sup> استفاده شد (عیسی پور، ۱۳۸۷) که به منظور محاسبه پارامترهای کنترل؛ سطح ذخیره<sup>۵</sup> ( $As$ ) بر حسب متر مربع، زمان تأخیر<sup>۶</sup> ( $\tau$ ) بر حسب ثانیه، تناوب رزونانس<sup>۷</sup> ( $\omega_p$ ) بر حسب رادیان بر ثانیه و رزونانس بیشینه<sup>۸</sup> ( $R_p$ ) مورد استفاده قرار گرفت. مشخصه‌های کانال برای تعیین پارامترهای کنترل با استفاده

مشخص شد که در ماه اردیبهشت دبی آبیگرها تغییرات روزانه شدیدی دارد که در نتیجه اختلالات فروانی به کانال اصلی وارد می‌شود. لذا فرض شد که بدیهی است که اگر الگوریتم کنترل بتواند اختلالات شدید ماه اردیبهشت را کنترل کند، باید انتظار داشت که برای سایر ماه‌ها پایدار باشد. بدین منظور پارامترهای الگوریتم کنترل، براساس قوانین تنظیم شورمانز برای کنترل‌کننده‌های PIF به کار گرفته شد.

#### ۲-۵- ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های کنترل

به منظور ارزیابی الگوریتم‌های کنترل از شاخص‌های بیشینه قدر مطلق خطا<sup>۱</sup>، انتگرال قدر مطلق خطا<sup>۲</sup> و خطای برگشت به حالت ماندگار<sup>۳</sup> استفاده شد (Clemmens et al., 1998). این شاخص‌ها به ترتیب در روابط (۹)، (۱۰) و (۱۱) ارائه شده است:

$$MAE = \frac{\max(|y_t - y_{target}|)}{y_{target}} \quad (8)$$

$$IAE = \frac{\Delta t / T \sum_{t=0}^T |y_t - y_{target}|}{y_{target}} \quad (9)$$

$$STE = \frac{\Delta t}{(t_0 + \Delta t) \cdot y_{setpoint}} \sum_{t=T-t_0}^T |y_t - y_{setpoint}| \quad (10)$$

در این روابط،  $y_t$  رقوم سطح آب محاسبه شده از نتایج شبیه‌سازی در زمان  $t$ ،  $y_{setpoint} = y_{target}$  رقوم سطح آب هدف،  $\Delta t$  گام زمانی تنظیم،  $T$  بازه زمانی شبیه‌سازی و  $t_0$  برابر ۲ ساعت در نظر گرفته شد. شاخص STE توانایی کنترل‌کننده در انحلال اختلالات ناشی از تغییرات دبی آبیگرها و برگشت تراز آب به حالت ماندگار را نشان می‌دهد.

4. System Identification  
5. Storage Area  
6. Delay Time  
7. Resonance Frequency  
8. Resonance Peak

1. Maximum Absolute Error-MAE  
2. Integral of Absolute Magnitude of Error- IAE  
3. Steady State Error- STE

منحنی‌های ارائه شده مربوط به یکی از سازه‌های تنظیم انتهایی بازه‌های کانال است. روند تغییرات دبی تحویلی به آبیگرها و کانال‌های فرعی برای تأمین نیاز بهره‌برداران، موجب تغییر دبی سازه‌های تنظیم و در نتیجه تراز آب در بالادست این سازه‌ها می‌شود. تغییرات شدید آبیگرها و در نتیجه سازه‌های تنظیم ناشی از نظام بهره‌برداری حاکم بر مدیریت شبکه است. وقتی تغییری در تراز سطح آب بر اثر تغییرات برداشت دبی رخ می‌دهد، این تغییر به‌عنوان یک انحراف به فرایند کنترل وارد شده و کنترل‌کننده سعی در برگشت تراز آب به مقدار هدف دارد. متغیر کنترل در کنترل‌کننده سراسری دبی مورد نیاز برای کنترل تراز آب در انتهای بازه است که به بازشدگی مطلوب با به‌کار بردن معادله هیدرولیکی سازه، تبدیل می‌شود.

وضعیت تغییرات رقوم سطح آب و دبی سازه‌های تنظیم، بیانگر آن است که مقادیر هدف هر یک از این دو پارامتر در هر یک از بازه‌ها بر اثر اختلالات هیدرولیکی و سازه‌ای حاصل از بهره‌برداری، با اجرای سیستم‌های کنترل طراحی شده، با دقت و سرعت بالایی قابل دستیابی است. این در حالی است که کنترل‌کننده سراسری با دقت و سرعت بالاتری اختلالات بهره‌برداری را کنترل کرده و کارایی بالاتری دارد.

به‌منظور ارزیابی کمی عملکرد الگوریتم‌های کنترل طراحی شده در بهبود فرایند مدیریت شبکه آبیاری و سیستم توزیع جریان در کانال مورد مطالعه، شاخص‌های ارزیابی عملکرد سیستم‌های کنترل، محاسبه و بررسی شد. میانگین این شاخص‌ها برای هر بازه در طول مدت زمان شبیه‌سازی و برای هر دو الگوریتم کنترل محاسبه شدند. جدول ۳ مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد سیستم‌های کنترل (MAE، IAE و STE) را برای شبیه‌سازی دوره یک‌ماهه بهره‌برداری نشان می‌دهد.

از روابط زیر به‌کار برده شد (Schuurmans, 1997 and Overloop et al., 2005).

$$K_p = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{A_s \cdot \omega_p}{R_p}} \quad (11)$$

$$K_I = \frac{T_c \cdot \omega_p}{12 \cdot R_p} \quad (12)$$

برای افزایش کارایی الگوریتم‌های کنترل در مطالعه اخیر از مدل بهینه‌سازی چندگانه کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی<sup>۱</sup> -که توسط ون اورلوپ و همکاران ارائه شده- استفاده شد (Overloop et al., 2005). در این روش تابع وزنی براساس انحراف تراز آب از تراز هدف، تعریف شده و این تابع در مقابل متغیر خروجی کنترل در جریانهای حداکثر و حداقل، برای رسیدن به پارامترهای بهینه کمینه می‌شود (عیسی‌پور، ۱۳۸۷). جدول ۲ مقادیر پارامترهای الگوریتم‌های کنترل طراحی شده را برای کانال اصلی غرب دز نشان می‌دهد.

### ۳-۳- مقایسه نتایج الگوریتم‌های کنترل

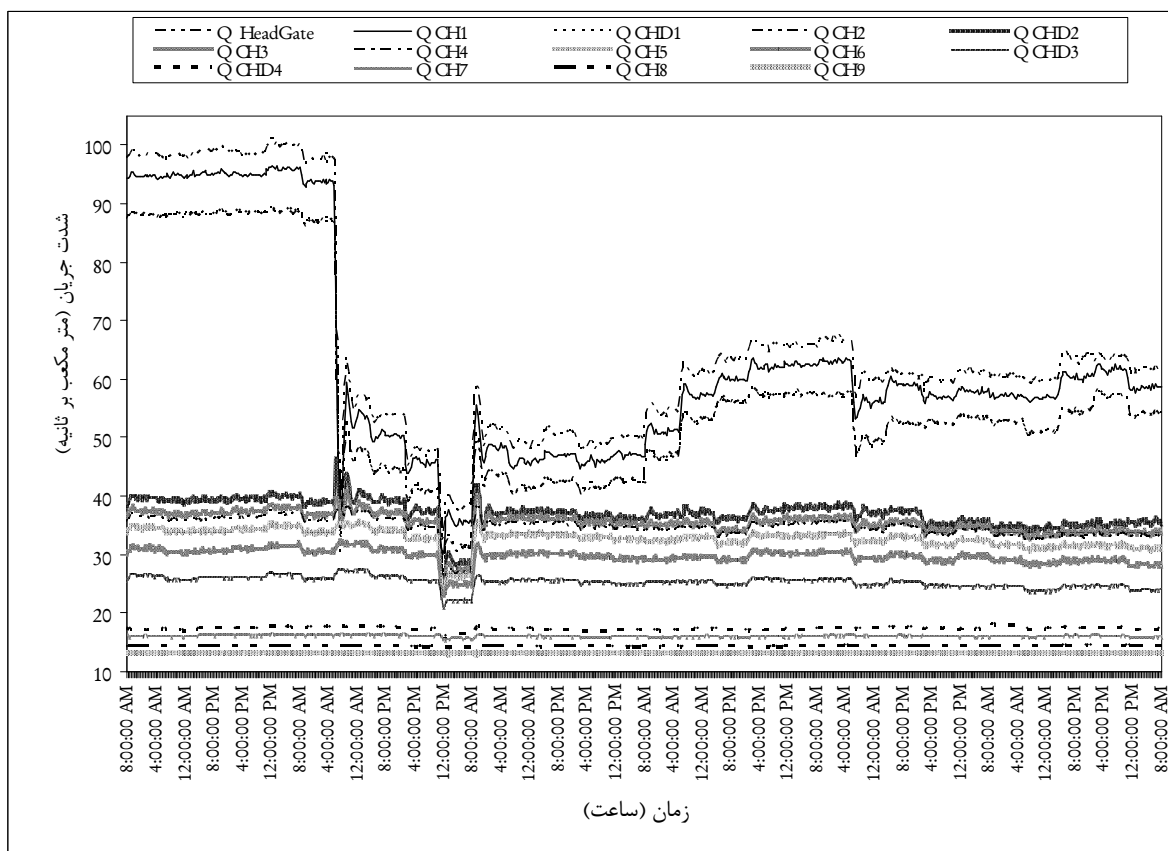
تغییرات شدت جریان عبوری، رقوم سطح آب بالادست سازه‌های تنظیم و روند تغییرات بازشدگی سازه‌های تنظیم در هر یک از بازه‌های کانال، به‌ترتیب برای کنترل‌کننده سراسری و کنترل‌کننده موضعی در طول یک ماه شبیه‌سازی داده‌های واقعی بهره‌برداری در شکل‌های ۶ تا ۱۱ نشان داده شده است. محور افقی این شکل‌ها پارامتر زمان برای دوره یک ماهه شبیه‌سازی و محور عمودی آنها به‌ترتیب دبی عبوری، رقوم سطح آب بالادست سازه‌های تنظیم و میزان بازشدگی سازه‌های تنظیم است.

محور افقی ساعت‌های شبیه‌سازی را در دوره یک‌ماهه برای هر یک از نمودارها نشان می‌دهد. در این شکل‌ها هر یک از

1. Multiple-Model Optimization of Proportional Integral Controllers

جدول ۲ پارامترهای الگوریتم‌های کنترل طراحی شده برای کانال دز

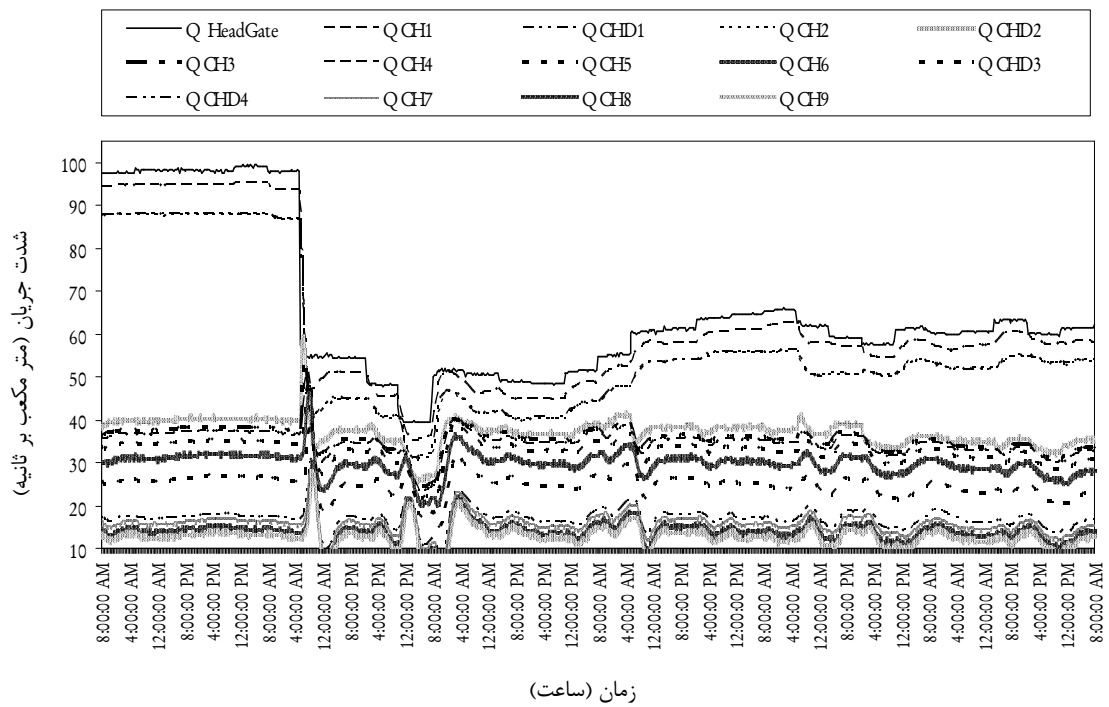
شماره بازه کانال	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	
کنترل کننده سراسری	$K_p$	-۳۹/۰۸۵	-۱۵/۴۰۱	-۳۸/۱۳۲	-۴۸/۵۴۱	-۲۷/۷۵۰	-۳۱/۳۷۳	-۱۹/۵۷۶	-۲۰/۵۲۳	-۲۲/۹۰۹	-۲۱/۰۳۶	-۱۵/۷۱۸	-۱۷/۹۰۹	-۱۴/۲۵۰
پایین دست	$K_i$	-۲/۱۷۱	-۲/۳۱۰	-۲/۵۹۹	-۳/۳۰۹	-۱/۸۹۲	-۲/۱۳۹	-۲/۹۳۶	-۱/۳۹۹	-۱/۵۶۲	-۱/۴۳۴	-۱/۰۷۱	-۱/۲۲۱	-۰/۹۷۱
کنترل کننده موضعی	$K_p$	۲۹/۳۳۴	۲۴/۲۴۰	۳۴/۴۴۲	۵۱/۳۷۶	۳۳/۶۳۸	۳۶/۲۴۴	۳۵/۹۱۵	۴۰/۸۶۲	۳۶/۶۲۴	۳۵/۷۸۴	۳۵/۴۰۵	۳۲/۰۹۰	۲۸/۶۸۶
بالادست	$K_i$	۰/۷۵۵	۲/۱۰۶	۰/۴۸۶	۰/۳۷۱	۰/۶۹۰	۰/۶۷۵	۰/۹۰۲	۱/۰۴۸	۱/۱۶۰	۱/۵۷۳	۲/۵۶۹	۳/۱۱۵	۹/۱۹۳



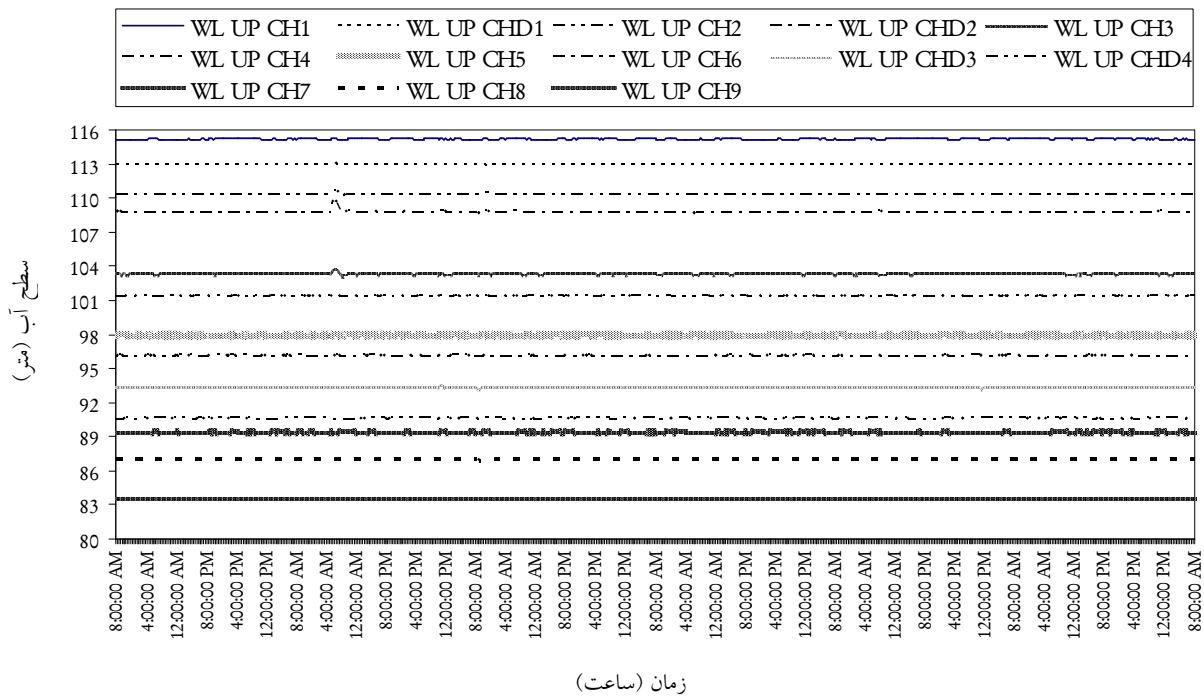
شکل ۶ روند تغییرات دبی سازه‌های تنظیم در تعامل با کنترل کننده سراسری از پایین دست

در این الگوریتم بیشتر بوده و در نتیجه متغیر کنترل محاسبه شده دقت بالایی دارد. (۲) متغیر محاسبه شده به‌طور مستقیم به بالادست منتقل شده تا مقدار متغیر اصلاحی آن محاسبه شود.

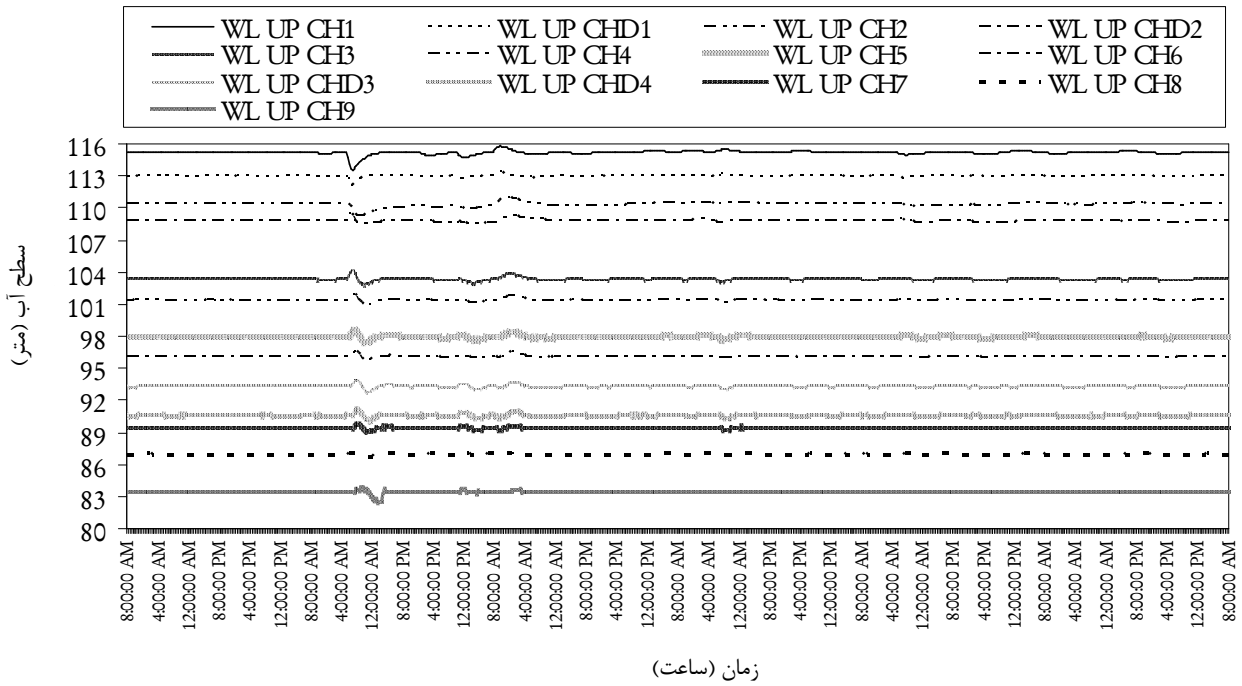
بررسی و مقایسه مقادیر کمی شاخص‌های الگوریتم کنترل نشان می‌دهد که کنترل کننده تناسبی-انتگرالی سراسری، دقت و کارایی بسیار بالایی در کنترل و تحلیل اختلالات ناشی از بهره‌برداری سازه‌ها دارد که دلیل آن را می‌توان در دو مورد زیر دانست: (۱) تعداد متغیرهای اندازه‌گیری شده



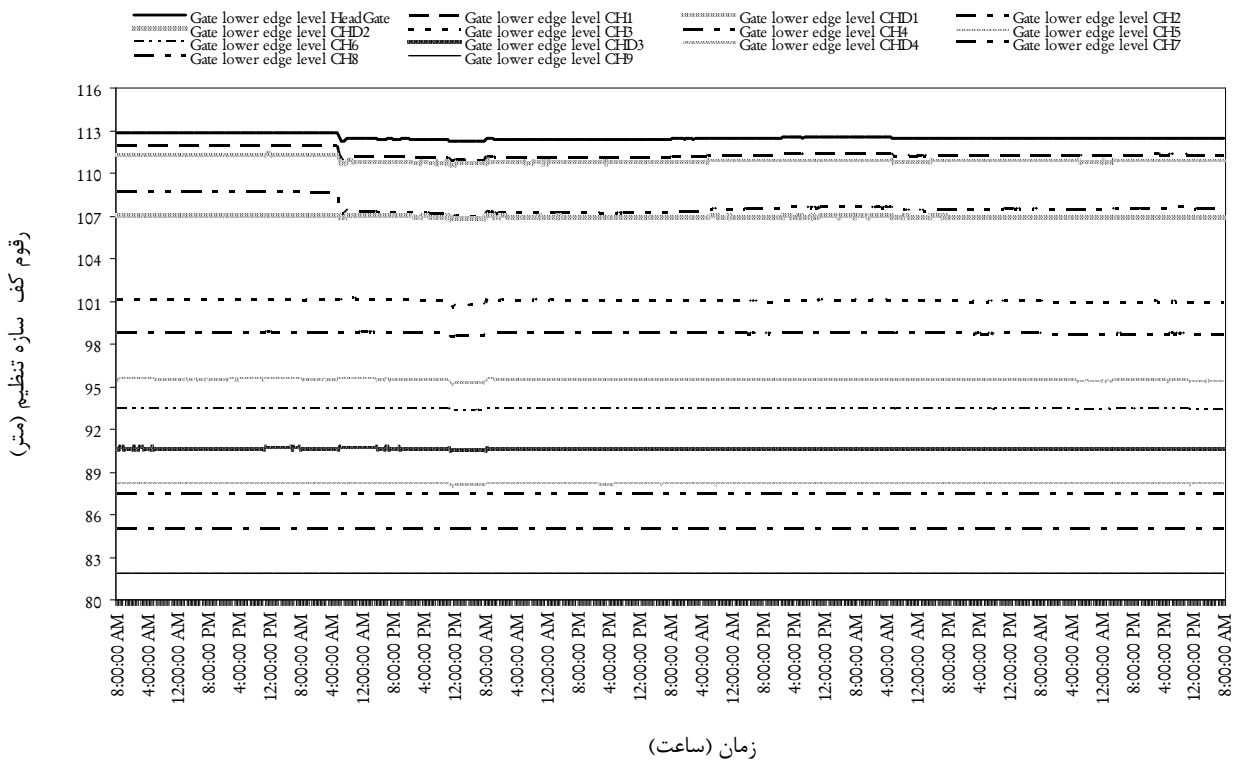
شکل ۷ روند تغییرات دبی سازه‌های تنظیم در تعامل با کنترل‌کننده موضعی بالادست



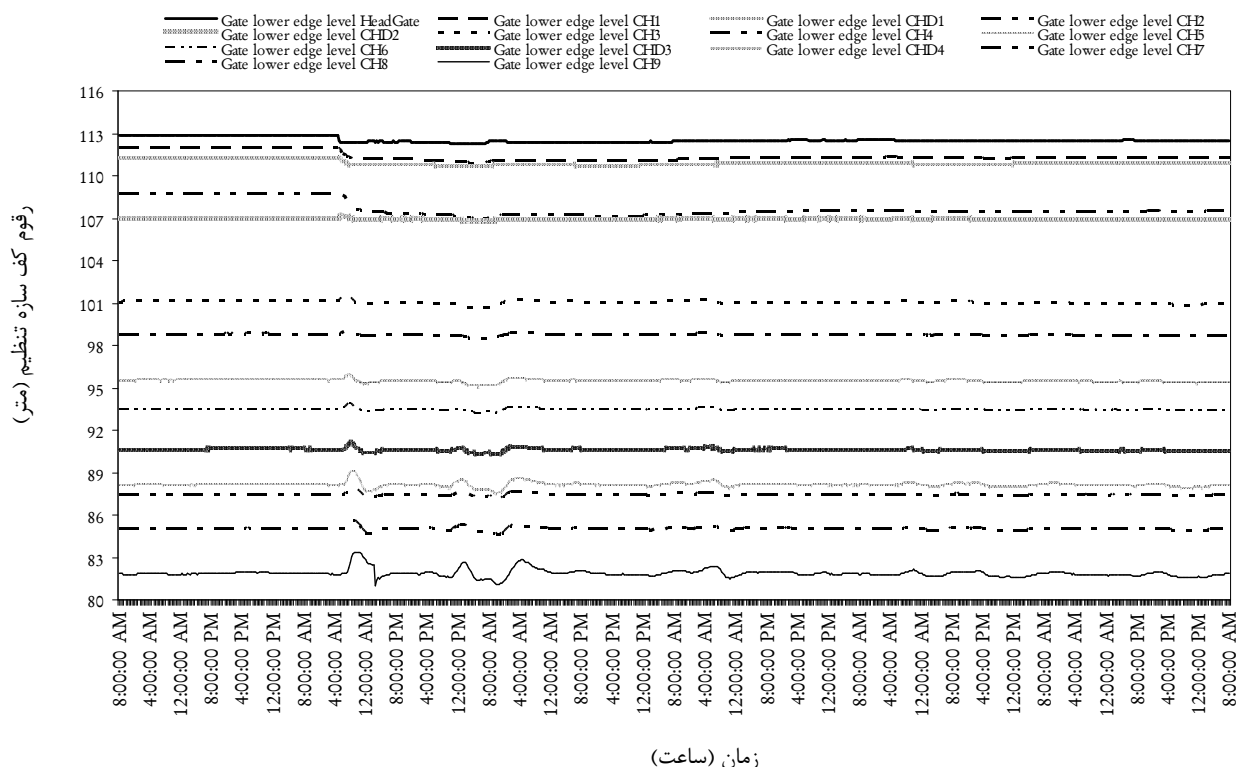
شکل ۸ روند تغییرات رقوم سطح آب در بالادست سازه‌های تنظیم در تعامل با کنترل‌کننده سراسری از پایین‌دست



شکل ۹ روند تغییرات رقوم سطح آب در بالادست سازه‌های تنظیم در تعامل با کنترل کننده موضعی بالادست



شکل ۱۰ روند تغییرات میزان بازشدگی سازه‌های تنظیم در تعامل با کنترل کننده سراسری از پایین دست



شکل ۱۱ روند تغییرات میزان بازشدگی سازه‌های تنظیم در تعامل با کنترل‌کننده موضعی بالادست

جدول ۳ مقادیر کمی شاخص‌های ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های کنترل

شماره بازه کانال	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	
MAE	۱	۰/۰۲۳	۰/۰۴۳	۰/۰۸۶	۰/۰۴۱۴	۰/۰۹۲	۰/۰۴۳	۰/۰۲۳	۰/۰۳۷	۰/۰۳۹	۰/۰۴۰	۰/۰۳۸	۰/۰۳۱	۰/۰۰۸
	۲	۰/۰۳۴۲	۰/۰۳۱۸	۰/۰۲۸۳	۰/۰۲۸۵	۰/۰۲۴۶	۰/۰۱۷۵	۰/۰۱۸۹	۰/۰۱۴۵	۰/۰۱۸۹	۰/۰۱۵۴	۰/۰۱۳۴	۰/۰۱۲۰	۰/۰۳۹۹
IAE	۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۷	۰/۰۰۴	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲
	۲	۰/۰۱۹	۰/۰۱۹	۰/۰۲۹	۰/۰۲۶	۰/۰۱۸	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶	۰/۰۱۳	۰/۰۱۵	۰/۰۱۳	۰/۰۱۱	۰/۰۱۰	۰/۰۰۹
STE	۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
	۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۶	۰/۰۰۳	۰/۰۱۶	۰/۰۰۶	۰/۰۱۰	۰/۰۰۶	۰/۰۰۵	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱

۱- کنترل‌کننده سراسری تناسبی - انتگرالی پس‌خورده از پایین دست

۲- کنترل‌کننده موضعی تناسبی - انتگرالی پس‌خورده بالادست

مطلوبی را ارائه می‌کند. اما این شاخص برای کنترل‌کننده سراسری مقادیر مناسب‌تری دارد. همچنان‌که گفته شد پایداری و برگشت سریع تراز آب به عمق هدف در مقادیر این شاخص نهفته است که کنترل‌کننده باید هرچه سریعتر

شاخص خطای برگشت به حالت ماندگار (STE) که توانایی کنترل‌کننده را در استهلاک اختلالات ناشی از تغییرات دبی آبیگیرها و برگشت تراز آب به حالت ماندگار نشان می‌دهد، برای کنترل‌کننده‌های طراحی شده مقدار

تکمیل عملکرد سیستم کنترل سراسری و به صورت سیستم پشتیبان توصیه می‌شود. تلفیق این دو الگوریتم می‌تواند شرایط ایجاد یک سیستم کنترل خودکار کارآمد برای کانال اصلی غرب شبکه آبیاری دز را فراهم سازد.

#### ۵- فهرست علائم

$A_f$	سطح خیس جریان
$A_s$	سطح ذخیره
$g$	شتاب ثقل
$K_i$	ضریب وزنی اثر نسبت انتگرالی
$K_p$	ضریب اثر نسبت تناسبی
$Q$	شدت جریان
$R_p$	رزنانس بیشینه
$S_b$	شیب کف کانال
$S_f$	شیب اصطکاکی
$T$	بازه زمانی شبیه‌سازی
$Y$	عمق آب
$y_t$	رقوم سطح آب محاسبه شده
$\Delta t$	گام زمانی تنظیم
$\tau$	زمان تأخیر
$\omega_p$	تناوب رزنانس

#### ۶- منابع

عیسی پور، سعید (۱۳۸۷). "طراحی و ارزیابی کارایی چند الگوریتم کنترل خودکار در بهبود مدیریت بهره‌برداری کانال‌های آبیاری- مطالعه موردی کانال اصلی غرب شبکه آبیاری دز". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، تهران، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران.

منتظر، علی اصغر، ص. کوچک زاده، ع. قاهری و پیتر ژولز ون اورلوپ (۱۳۸۶). "طراحی یک الگوریتم کنترل مرکزی کانال اصلی و ارزیابی عملکرد آن: مطالعه موردی کانال اصلی نارمادا"، مجله بین‌المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران، شماره ۲، جلد ۱۸، ص. ۳۳-۴۴.

تراز آب را به عمق هدف برساند و در این تراز نوسان کمتری داشته باشد. به دلیل رفتار رزنانسی تراز آب در بازه‌های کوتاه، مقدار این شاخص در بازه‌های کوتاه، مانند بازه‌های شماره دو، پنج و هفت بیشتر است. به طور کلی بررسی و مقایسه مقادیر کمی شاخص‌های طراحی سیستم‌های کنترل نشان می‌دهد که با توجه به اینکه دبی کانال در ابتدای آن بیشتر است، میزان نوسانها در بازه‌های ابتدایی برای هر دو الگوریتم کنترل نسبت به سایر بازه‌ها بیشتر است. این بدان مفهوم است که با افزایش دبی بهره‌برداری کانال، میزان نوسانهای سطح آب و تغییرات دبی سازه‌ها در نتیجه اعمال هر گونه اغتشاش در بازه‌های کانال بیشتر خواهد بود. به علاوه هر چند تمامی بازه‌ها از دقت کنترلی مناسبی برخوردارند، اما وضعیت کنترل جریان در بازه‌های ۶ تا ۱۳ از وضعیت مناسبتری نسبت به سایر بازه‌ها برخوردار است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

استفاده از سیستم‌های کنترل خودکار در مدیریت انتقال و توزیع آب شبکه‌های آبیاری به‌عنوان ابزاری کارآمد در بهبود روند مدیریت و افزایش عملکرد این سامانه‌ها ضروری به نظر می‌رسد. در این مطالعه دو الگوریتم کنترل سراسری تناسبی-انتگرالی پس‌خورده از پایین‌دست و کنترل‌کننده موضعی تناسبی-انتگرالی پس‌خورده بالادست برای کانال اصلی غرب شبکه آبیاری دز طراحی و ارزیابی شد. نتایج ارزیابی و مقایسه عملکرد الگوریتم‌های کنترل نشان داد که الگوریتم سراسری تناسبی-انتگرالی پس‌خورده از پایین‌دست، دقت و پتانسیل مطلوب‌تری در کنترل جریان داشته و امکان تحقق توزیع تقاضامدار و ارتقای کارایی بهره‌برداری کانال مورد مطالعه را فراهم می‌سازد. کاربرد سیستم کنترل موضعی طراحی شده نیز به‌عنوان گزینه مناسبی به‌منظور



- M.Sc thesis, Delft Univ. of Technology, Civil Engineering Faculty.
- Montazar, A., van Overloop, P. J. and Brouwer, R. (2005). Centralized controller for the Narmada main canal, *J. Irrig. Drain. Eng.* (54), pp. 79-89.
- Mutua, B.M. and Malano, H.M. (2001). Analysis of manual and centralized supervisory control operations to improve level of service: a case study of Pyramid Hill no. 1 channel, Victoria, Australia, *Journal of Irrigation and Drainage Systems* 15: 1-19, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- Overloop, P. J. van, Mursi Batt, A., Heeringen, K. J. van, and Thabet, R.A.H.A. (2001). Real-time control of water quantity and water quality in a reuse of drainage water project, Proc., International Commission on Irrigation and Drainage Workshop, South Korea.
- Overloop, P.J. van, Schuurmans, J., Brouwer, R., and Burt, C.M. (2005). Multiple-model optimization of proportional integral controllers on canals, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Volume 131, Issue 2, pp.190-196.
- Reddy, J.M., Dia A. and Oussou A. (1992). Design of control algorithm for operation of irrigation canals, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 118, No. 6, pp. 852-867.
- Rogers, D.C. and Goussard, J. (1998). Canal control algorithms currently in use, *J. Irrig. Drain. Eng.*, 124(1), pp.31-39.
- Rodellar, J., Gomez, M. and Bonet, L. (1993). Control method for on-demand operation of open-channel flow, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 119, No. 2, pp. 225-241.
- Schuurmans, J., Clemmens, A.J., Dijkstra, S., Hof, A., Brouwer, R. (1999). Modeling of Irrigation and Drainage Canals for Controller Design. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Volume 125, Issue 6, pp. 338-344.
- Aström, K.J. and Hägglund, T. (1995). PID controllers: Theory, design and tuning, 2nd edition, Instrument Society of America, Research Triangle Park, NC, USA.
- Balogun, O.S, Hubbard, M. and DeVries, J.J. (1988). Automatic control of canal flow using linear quadratic regulator theory, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 114, No 1, pp. 75-102.
- Buyalski, C.P. and Serfozo, E.A. (1979). Electronic filter level offset (EL-FLO) plus reset equipment for automatic downstream control of canals., Technical Report REC-ERC-79-3, U.S. Department of Interior, Bureau of Reclamation, Denver Office, p.145.
- Chevereau, G., and Schwartz-Benezeth, S. (1987), BIVAL systems for downstream control, planning, operation, rehabilitation, and automation of irrigation water delivery systems, D. D. Zimbelman, ed., ASCE, New York, N.Y.
- Clemmens, A.J, Kacerek, T., Grawitz, B. and Schuurmans W. (1998). Test cases for canal control algorithms, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 124(1), pp. 23-30.
- Jabro, J.D., Toth, J.D. and Fox, R.H. (1998). Evaluation and comparison of five simulation models for estimating water drainage fluxes under corn, *Journal of Environmental Quality* 27, pp. 1376-1381.
- Litrico, X., Fromion, V. and Baume, J.P. (2006). Tuning of robust distant downtown PI controllers for an irrigation canal pool, II: Implementation issues. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Volume 132, Issue 4, pp. 369-379.
- Malaterre, P.O, Rogers, D.C. and Schuurmans, J. (1998). Classification of canal control algorithm, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 124 1, ASCE.
- MathWorks Inc. (2007). MATLAB User's Guide, 10th printing, Natick, MA, USA.
- Miltenburg, I. (2008). Determination of canal characteristics with experimental modeling,

Environment, and Water, San Luis Obispo, Calif.

Weyer, E. (2001). System identification of an open water channel, *Control Engineering Practice*, Vol. 9, Issue 12, pp. 1289–1299.

WL/Delft Hydraulics (2000). SOBEK manual and technical reference, WL/Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands.

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

Wahlin, B. T., and Clemmens, A. J. (2002). Preliminary results for downstream feedback control of branching canal networks, *Proc., United States Committee on Irrigation and Drainage/Environmental and Water Resources Institute Conf. on Energy, Climate,*