

## طراحی و ارزیابی الگوریتم کنترل پایین دست خودکار در بخشی از شبکه آبیاری دشت سرخس

سید محمد سیدموسوی<sup>۱</sup>، عاطفه پرورش ریزی<sup>۲\*</sup> و سعید عیسی پور<sup>۳</sup>

### چکیده

استفاده از سامانه‌های کنترل خودکار در مدیریت انتقال و توزیع آب در سامانه‌های آبیاری روباز، به‌عنوان ابزار بهبود مدیریت و افزایش عملکرد این سامانه‌ها ضروری است. این پژوهش با هدف طراحی و ارزیابی الگوریتم کنترل سراسری پایین دست فاصله‌دار با روش تناسبی-انتگرالی پس‌خورد، پیش‌خورد و دی‌کوپلینگ، برای کانال EPC شبکه آبیاری دشت سرخس انجام شد. ارزیابی کارایی الگوریتم با استفاده از نتایج شبیه‌سازی چند گزینه بهره‌برداری مختلف با مدل هیدرودینامیک سوپک و محاسبه شاخص‌های ارزیابی سامانه‌های کنترل انجام شد. برای تنظیم الگوریتم کنترل، مشخصه‌های بازه‌های کانال با استفاده از فرآیند شناسایی سامانه تعیین شدند. متوسط مقادیر شاخص‌های حداکثر قدرمطلق خطا (MAE)، انتگرال قدرمطلق بزرگی خطا (IAE) و خطای برگشت به حالت ماندگار (STE) برای بازه‌های مختلف کانال برابر ۰/۰۴۲، ۰/۰۰۵ و ۰/۰۰۱ به دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم دارای دقت و پتانسیل زیادی در کنترل جریان و استهلاك اغتشاشات است و شرایط تحقق توزیع تقاضامدار و ارتقاء عملکرد سامانه تنظیم و توزیع آب را فراهم می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** دشت سرخس، شناسایی سامانه، کنترل خودکار، مدیریت توزیع آب.

**ارجاع:** سیدموسوی س. م. پرورش ریزی ع. و عیسی پور س. ۱۳۹۴. طراحی و ارزیابی الگوریتم کنترل پایین دست خودکار در بخشی از شبکه آبیاری دشت سرخس. مجله پژوهش آب ایران. ۱۶: ۵۹-۶۸.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران.

۲- استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.

۳- کارشناسی ارشد آبیاری، شرکت مهندسین مشاور یکم، تهران.

\* نویسنده مسئول: [parvarshl@ut.ac.ir](mailto:parvarshl@ut.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۰/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۶/۱۸

## مقدمه

با توجه به کمبود منابع آب در کشور، بهبود مدیریت توزیع آب برای افزایش عملکرد شبکه‌های توزیع آبیاری یک امر اجتناب‌ناپذیر است. وجود آشفتگی در کانال‌های آبیاری، عدم دقت کافی در تنظیم سازه‌ها، دستی بودن تنظیم‌ها و برهم‌کنش سازه‌ها از جمله عامل‌هایی هستند که سبب عملکرد ضعیف سیستم‌های تحویل می‌شوند. خودکارسازی تنظیم سازه‌های کنترل در کانال‌های اصلی شبکه براساس برنامه‌ریزی قبلی و رفتارسنجی دقیق هیدرولیکی، یکی از راه‌هایی است که برخی کشورهای دنیا به آن روی آورده‌اند.

امروزه یکی از عامل‌های مؤثر بر عملکرد شبکه‌های آبیاری، خودکارسازی و اجرای سیستم‌های کنترل است به نحوی که متناسب با وسعت شبکه باشند. درحقیقت خودکارسازی، تحویل ساده و سنتی را به سرویس‌دهی پیشرفته و مطلوب تغییر می‌دهد و به تحویل آب قابل انعطاف و افزایش ذخیره آب کمک می‌کند (لوزانو و همکاران، ۲۰۱۰).

استفاده از کنترل‌کننده‌های هوشمند برای کنترل خودکار سامانه‌های آبیاری، به دلیل افزایش انعطاف‌پذیری تحویل آب یکی از گزینه‌های مؤثر برای مدیریت بهینه شبکه‌های آبیاری است (منتظر و عیسی‌پور، ۱۳۹۰). خودکارسازی شبکه‌های آبیاری با استفاده از کنترل‌کننده قابل برنامه‌نویسی امکان اجرای چندین روش کنترل را طبق سناریوهای مختلف تحویل آب فراهم می‌کند (ریجو، ۲۰۰۳). همچنین اجرای این سامانه‌ها با استفاده از حسگرهای سطح آب و ثبت اطلاعات هیدرولیکی با این دستگاه‌ها، در صورت نیاز امکان داده‌برداری دقیق در شبکه‌های توزیع آب در دراز مدت را داشته و می‌تواند در تصمیم‌گیری برای مدیریت شبکه تأثیرگذار باشد.

ایده خودکارسازی و اجرای سامانه‌های کنترل کانال‌های آبیاری، از اواخر دهه ۱۹۷۰ میلادی مطرح و مورد توجه تعدادی از متخصصان و متولیان سامانه‌های آبیاری قرار گرفت. ریجو (۲۰۰۳) به بررسی کنترل خودکار تناسبی-انتگرالی (PI) موضعی با الگوریتم کنترل پس‌خورد در یک کانال آزمایشگاهی پرداخت. منتظر و همکاران (۲۰۰۵) به ارزیابی کنترل‌کننده PI مرکزی با منطق کنترل پس‌خورد و پیش‌خورد با کاربرد دی‌کوپلینگ<sup>۱</sup> برای کنترل کانال اصلی نارمادا در هندوستان پرداختند. این روش همچنین

توسط منتظر و عیسی‌پور (۱۳۹۰) برای کانال غربی شبکه آبیاری عقیلی انجام شد که در محاسبات هیدرولیکی و کنترلی از نرم‌افزار سوبک<sup>۲</sup> بهره گرفتند.

بجز کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی کنترل‌کننده‌های پیچیده‌تری در شبکه‌های آبیاری توسعه یافته است. بلر (۲۰۱۰) یک کنترل‌کننده پایین دست برای یک بازه از کانال آبیاری، با استفاده از تئوری کنترل پس‌خور کمی طراحی کرد. وی این کنترل‌کننده را در یک محدوده بهره‌برداری وسیع طراحی کرد، تا بتواند تغییرات جریان ناشی از انباشتگی رسوب در کانال و نشت از کانال را تعدیل کند. ون اورلوپ و همکاران (۲۰۱۰) مدل کنترل پیش‌بینی شده<sup>۳</sup> (MPC) را در کانال WM منطقه آبیاری و زهکشی Maricopa-Stanfield ارزیابی کردند. در این پژوهش پیشنهاد شد که قبل از استفاده از روش MPC استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی برای انتخاب روش مناسب برای خودکارسازی کانال‌های آبیاری، مطلوب‌تر است.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که از روش PI به دلیل سهولت کاربری و دقت مناسب در شبکه‌های آبیاری، بیشتر استقبال شده است. از آنجا که سامانه مدیریت بهره‌برداری هر شبکه، به دلیل تأثیرپذیری از ساختار هیدرولیکی کانال‌ها، منحصر به فرد است، الگوریتم کنترل طراحی شده برای شبکه نیز منحصر به فرد خواهد بود. بنابراین با تغییر شرایط هیدرولیکی کانال، الگوریتم کنترل تغییر کرده و نیازمند تنظیم ضرایب کنترل است.

در این پژوهش، با استفاده از مدل هیدرودینامیک سوبک، به طراحی و ارزیابی سامانه کنترل سراسری پایین دست فاصله‌دار تناسبی-انتگرالی پس‌خورد و پیش‌خورد با دی‌کوپلینگ، برای کانال EPC شبکه آبیاری دوستی در دشت سرخس استان خراسان رضوی پرداخته شد.

## مواد و روش‌ها

## مدل هیدرودینامیک سوبک

در این مطالعه از مدل سوبک برای شبیه‌سازی سناریوهای مورد مطالعه و طراحی کنترل‌کننده استفاده شد. این مدل شامل یک بسته نرم‌افزاری با هفت زیربرنامه متنوع است و با توجه به هدف‌های شبیه‌سازی، می‌توان از مدول‌های مختلف استفاده کرد. در این پژوهش از ترکیب مدول

2- SOBEK

3- Model Predictive Control

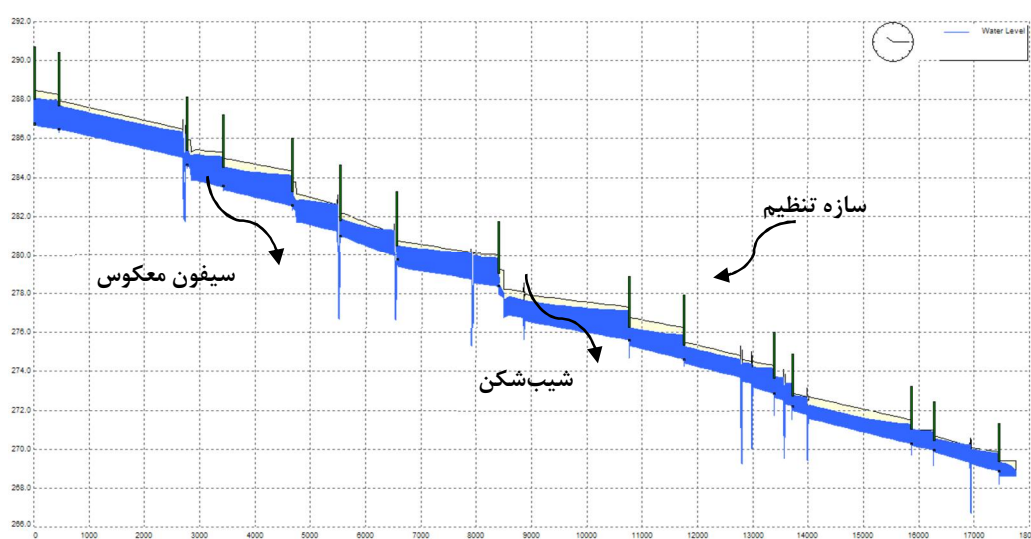
1- Decouplers

بر ثانیه و طول آن ۱۸/۷ کیلومتر است و در طول آن ۱۵ سازه تنظیم، ۱۸ آبگیر و ۱۰ عدد سیفون معکوس وجود دارد. شکل ۱ پروفیل طولی کانال EPC را در محیط مدل سوپک نشان می‌دهد. از ویژگی‌های کانال EPC، داشتن بازه‌های زیاد با طول‌ها و شیب‌های متفاوت (در اکثر بازه‌ها شیب زیاد) و همچنین وجود سیفون‌های زیاد در مسیر این کانال است، که این مشخصات سبب می‌شوند عمل تنظیم الگوریتم کنترل این کانال نسبت به سایر کانال‌های مشابه دشوارتر بوده و نیاز به دقت بیشتری داشته باشد.

شبیه‌سازی جریان آب در مجاری روباز با مدول کنترل به‌هنگام برای طراحی الگوریتم کنترل استفاده شده است.

### مشخصات کانال مورد مطالعه

شبکه آبیاری دوستی در دشت سرخس در شمال‌شرق ایران قرار دارد. اولین کانال درجه یک منشعب شده از کانال اصلی به نام WPC1 است. از انتهای کانال اصلی، دو رشته کانال درجه یک با نام‌های EPC و WPC2 منشعب شده است. مطالعه حاضر بر روی کانال درجه یک EPC انجام شد. دبی طراحی کانال مورد مطالعه ۴/۴۳ مترمکعب



شکل ۱- پروفیل طولی کانال مورد مطالعه در مدل سوپک

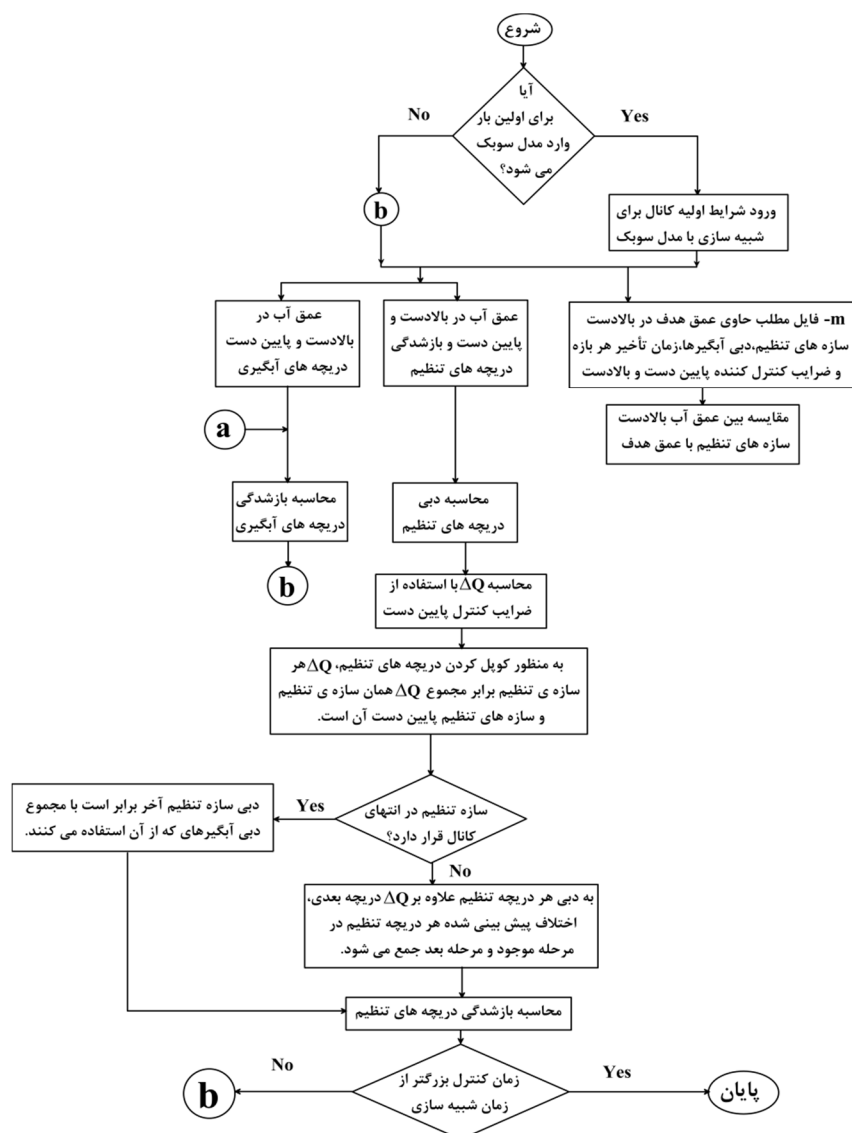
طراحی و اجرای موفق کنترل‌کننده‌های PI به تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده وابسته است. این پارامترها به دلیل اثر متقابل بین بازه‌ها و تغییر شرایط جریان، به سختی تعیین می‌شوند. پارامترهای تناسبی و انتگرالی کنترل‌کننده باید طوری محاسبه شوند که الگوریتم کنترل بتواند در کمترین زمان ممکن و با دقت مناسب، متغیر کنترل را به مقدار هدف برساند. کنترل‌کننده طراحی شده از نوع کنترل‌کننده سراسری پایین‌دست فاصله‌دار تناسبی-انتگرالی پس‌خورد و پیش‌خورد و با روش دی‌کوپلینگ است. در شکل ۲ الگوریتم کنترل طراحی شده در این پژوهش، آمده است.

### معرفی الگوریتم کنترل طراحی شده

کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی ساده‌ترین روشی است که کاربرد زیادی در صنعت و کنترل شبکه‌های آبیاری دارد. در این روش، کنترل‌کننده با استفاده از انحراف متغیر کنترل شده و انحراف تجمعی آن، سعی به حداقل کردن خطای بین مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار هدف برای متغیر کنترل شده می‌پردازد (بائم و همکاران، ۱۹۹۹). به تعبیر دیگر متغیر کنترل معادل است با مجموع نسبت‌های تناسبی با ضریب  $K_p$  و انتگرالی با ضریب  $K_i$  (رابطه ۱).

$$u = K_p \cdot e + K_i \int e \cdot dt \quad (1)$$

که در آن  $u$  مقدار متغیر خروجی کنترل در زمان  $t$ ، مقدار انحراف متغیر اندازه‌گیری شده از متغیر هدف در زمان  $t$ ،  $K_p$  ضریب اثر نسبت تناسبی و  $K_i$  ضریب اثر نسبت انتگرالی است.



شکل ۲- الگوریتم کنترل طراحی شده

## فرآیند شناسایی سامانه (SI)

بعد از طراحی الگوریتم کنترل، از فرآیند شناسایی سامانه برای تعیین مشخصه های بازه های کانال استفاده شد. مشخصه های بازه که در تنظیم الگوریتم کنترل طراحی شده تأثیرگذارند شامل زمان تأخیر، سطح ذخیره، تناوب رزونانس و حداکثر رزونانس هستند. زمان تأخیر در حقیقت مدت زمان عبور یک موج از بخش یکنواخت بازه کانال و تأثیر در بخش منحنی برگشت آب این بازه از کانال است. شیب طولی زیاد کانال در بیشتر بازه ها سبب می شود که طول منحنی برگشت آب در پشت دریاچه های تنظیم در این بازه ها کوتاه تر باشد، در نتیجه سطح ذخیره کمتر خواهد شد. سطح ذخیره برای انحلال اثر اختلافات اندک تراز آب که از تغییرات کم دبی آبیگرها ناشی می شود،

مناسب است. علاوه بر آن وجود سیفون معکوس در برخی بازه های کانال مورد مطالعه سبب می شود که بیشتر امواج ایجاد شده در حین عبور از سیفون های معکوس از بین بروند. این عوامل سبب می شود که در این بازه ها تأثیر پارامترهای حداکثر رزونانس و تناوب رزونانس نسبت به پارامترهای زمان تأخیر و سطح ذخیره، در تنظیم الگوریتم های کنترل کمتر باشد. به همین دلیل در این پژوهش برای تنظیم الگوریتم های کنترل و افزایش کارایی کنترل کننده طراحی شده، مدل بهینه سازی چندگانه الگوریتم کنترل تناسبی- انتگرالی که توسط ون اورلوپ و همکاران (۲۰۰۵) ارائه شد، به کار رفت. با توجه به تغییر ظرفیت بهره برداری در طول فصل زراعی و لزوم پایداری سامانه کنترل در تمام دوره بهره برداری، در این مطالعه

مشخصه‌های هر بازه برای سه حالت بهره‌برداری یعنی ۱۰٪، ۵۰٪ و ۸۰٪ دبی طراحی تعیین شدند. روابط زیر برای محاسبه ضرایب کنترل تناسبی و انتگرالی توسعه یافته‌اند:

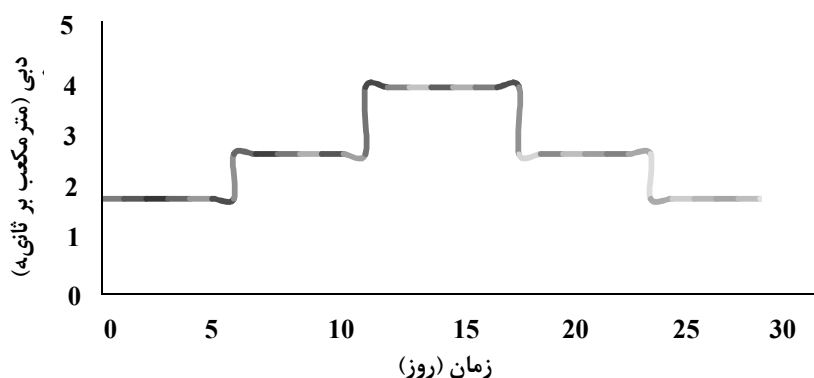
$$K_p = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{A_s \cdot \omega_p}{R_p}} \quad (2)$$

$$K_i = \frac{T_c \cdot \omega_p}{12 \cdot R_p} \quad (3)$$

که در این رابطه‌ها  $T_c$  گام زمانی کنترل بر حسب ثانیه،

#### گزینه بهره‌برداری مورد استفاده

ارزیابی عملکرد الگوریتم کنترل طراحی شده، با استفاده از الگوی بهره‌برداری یک‌ماهه، با تغییرات روزانه شدید انجام شد. شکل ۳ هیدروگراف ورودی به کانال را در یک دوره یک‌ماهه نشان می‌دهد.



شکل ۳- هیدروگراف ورودی به کانال EPC

در روابط بالا  $y$ ، عمق آب محاسبه شده از نتایج شبیه‌سازی در زمان  $t$ ،  $y_t$ ، عمق آب هدف،  $\Delta t$  گام زمانی تنظیم،  $T$  بازه زمانی شبیه‌سازی و  $t_0$  برابر ۲ ساعت است.

#### نتایج و بحث

##### نتایج کاربرد SI در تعیین مشخصه‌های بازه‌های کانال

مشخصه زمان تأخیر پارامتر مهمی در تنظیم ضرایب کنترل‌کننده است. در منطق پیش‌خورد برای پیش‌بینی دبی در گام زمانی بعدی از زمان تأخیر استفاده می‌شود. مقادیر زمان تأخیر برای ظرفیت‌های ۱۰٪، ۵۰٪ و ۸۰٪ دبی طراحی در جدول ۱ آورده شده است. این مقادیر نشان می‌دهند که زمان تأخیر مربوط به طولانی‌ترین بازه از سایر بازه‌ها بیشتر است. همچنین مقادیر زمان تأخیر نشان می‌دهد که دبی‌های کمتر زمان تأخیر بالایی دارند. دلیل افزایش زمان تأخیر در مقابل کاهش دبی می‌تواند به دلیل کاهش سرعت حرکت آب در دبی‌های کم باشد. بیشترین مقدار زمان تأخیر در بازه شماره هشت و برابر ۱۲۶۰ ثانیه است که در ۱۰٪ ظرفیت کانال اتفاق می‌افتد و نشان می‌دهد که مشخصات فیزیکی بازه‌ها از

##### ارزیابی کمی الگوریتم کنترل طراحی شده

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم کنترل طراحی شده برای سناریو مورد بررسی در کانال مورد مطالعه، از شاخص‌های ارزیابی عملکرد سامانه‌های کنترل استفاده شد. این شاخص‌ها شامل حداکثر قدرمطلق خطا<sup>۱</sup> (MAE)، انتگرال قدر مطلق بزرگی خطا<sup>۲</sup> (IAE) و خطای برگشت به حالت ماندگار<sup>۳</sup> (STE) هستند (کلمنس و همکاران، ۱۹۹۸)، که از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$MAE = \frac{\max(|y - y_t|)}{y_t} \quad (4)$$

$$IAE = \frac{\frac{\Delta t}{T} \sum_{t=0}^T |y - y_t|}{y_t} \quad (5)$$

$$STE = \frac{\Delta t}{(t_0 + \Delta t) \cdot y_t} \sum_{t=T-t_0}^T |y - y_t| \quad (6)$$

1- Maximum Absolute Error

2- Integral of Absolute Magnitude of Error

3- Steady State Error

برابر ۳۰۰، ۲۶۰ و ۲۶۰ ثانیه خواهند شد. مشخصه دیگری که با فرآیند SI به دست می‌آید سطح ذخیره است. با مقایسه سطح ذخیره برای درصد دبی‌های اعمال شده در SI، مشخص می‌شود که مقدار سطح ذخیره برای دبی‌های کم بیشتر است، به این دلیل که برای دبی‌های کم و با عمق هدف ثابت در بالادست سازه‌های تنظیم، طول منحنی برگشت آب بیشتر است و در نتیجه سطح ذخیره نیز بیشتر خواهد بود.

عوامل مؤثر بر مشخصه‌های کانال است. برای بازه‌هایی که دارای سیفون معکوس در مسیر کانال هستند، زمان تأخیر نسبت به سایر بازه‌های مشابه که سیفون معکوس ندارند کمتر است. زیرا در این بازه‌ها سرعت جریان آب با عبور از سیفون معکوس افزایش می‌یابد و سبب کاهش زمان تأخیر می‌شود. به‌عنوان مثال اگر در مسیر بازه سیزده، سیفون معکوس حذف شود، زمان تأخیر برای ۱۰٪، ۵۰٪ و ۸۰٪ دبی طراحی به ترتیب

جدول ۱- مشخصه‌های بازه‌های کانال EPC در فرآیند SI

| شماره بازه | ارتفاع بازه (m) | سطح ذخیره (m <sup>2</sup> ) |       |      | تناوب رزناس (rad/sec) |        |        | حداکثر رزناس |       |      | زمان تأخیر (sec) |      |     |
|------------|-----------------|-----------------------------|-------|------|-----------------------|--------|--------|--------------|-------|------|------------------|------|-----|
|            |                 | ۱۰٪                         | ۵۰٪   | ۸۰٪  | ۱۰٪                   | ۵۰٪    | ۸۰٪    | ۱۰٪          | ۵۰٪   | ۸۰٪  | ۱۰٪              | ۵۰٪  | ۸۰٪ |
| ۱          | ۴۵۲             | ۴۹۵۲                        | ۳۴۰۹  | ۲۷۰۲ | ۰/۰۱۱۲                | ۰/۰۲۵  | ۰/۰۲۴۲ | ۰/۱۰۳۵       | ۰/۰۷۵ | ۰/۰۵ | ۲۴۰              | ۶۰   | ۶۰  |
| ۲          | ۲۳۲۰            | ۱۱۳۶۵                       | ۶۹۵۵  | ۵۵۰۷ | .                     | .      | .      | .            | .     | .    | ۹۰۰              | ۸۴۰  | ۴۸۰ |
| ۳          | ۶۵۲             | ۲۵۷۳۴                       | ۵۰۱۴  | ۴۲۶۴ | ۰/۰۱۵۷                | ۰/۰۱۳۹ | ۰/۰۱   | ۰/۱۳۲۸       | ۰/۱   | ۰/۱  | ۳۶۰              | ۱۸۰  | ۱۲۰ |
| ۴          | ۱۲۵۲            | ۵۱۳۹۹                       | ۶۲۷۵  | ۵۹۹۹ | .                     | .      | .      | ۰/۳۱         | ۰/۰۶  | .    | ۶۰۰              | ۳۶۰  | ۳۰۰ |
| ۵          | ۸۶۴             | ۱۳۵۳۰                       | ۳۶۳۴  | ۳۵۲۹ | ۰/۰۱۰۹                | ۰/۰۰۵۲ | .      | ۰/۶          | ۰/۰۹  | .    | ۴۸۰              | ۱۸۰  | ۱۸۰ |
| ۶          | ۱۰۲۰            | ۲۶۲۴                        | ۳۶۵۴  | ۴۱۹۶ | ۰/۰۰۴۴                | .      | .      | ۰/۵۳         | .     | .    | ۴۲۰              | ۴۲۰  | ۳۰۰ |
| ۷          | ۱۸۳۷            | ۱۲۰۰۲                       | ۱۱۵۱۳ | ۷۸۷۳ | .                     | .      | .      | .            | .     | .    | ۱۰۸۰             | ۵۴۰  | ۴۲۰ |
| ۸          | ۲۳۵۴            | ۱۲۶۵۵۰                      | ۳۰۲۱۸ | ۷۴۶۰ | .                     | .      | .      | .            | .     | .    | ۱۲۶۰             | ۱۰۲۰ | ۸۴۰ |
| ۹          | ۹۸۹             | ۲۸۴۹۸                       | ۴۲۵۸  | ۳۲۸۱ | ۰/۰۱۰۶                | ۰/۰۰۵  | .      | ۰/۳۸         | .     | .    | ۳۰۰              | ۲۴۰  | ۲۴۰ |
| ۱۰         | ۱۶۶۶            | ۹۴۱۲۸                       | ۵۱۴۷  | ۴۳۰۰ | .                     | .      | .      | ۰/۰۴۹        | .     | .    | ۹۶۰              | ۸۴۰  | ۸۴۰ |
| ۱۱         | ۳۱۳             | ۴۲۵۸                        | ۱۸۹۰  | ۱۵۵۶ | ۰/۰۲۷۲                | ۰/۰۲۶۵ | ۰/۰۱۳۸ | ۱/۰۵         | ۰/۸۴  | ۰/۴۲ | ۲۴۰              | ۱۸۰  | ۱۸۰ |
| ۱۲         | ۲۱۵۴            | ۱۱۷۳۴                       | ۷۷۹۵  | ۷۳۷۸ | .                     | .      | .      | .            | .     | .    | ۶۰۰              | ۵۴۰  | ۴۹۰ |
| ۱۳         | ۳۳۶             | ۶۸۰۶                        | ۱۴۹۶  | ۸۷۲  | ۰/۰۱۴۸                | ۰/۰۱۲۴ | ۰/۰۱۱۴ | ۰/۸۱         | ۰/۷   | ۰/۱۹ | ۲۴۰              | ۲۴۰  | ۲۴۰ |
| ۱۴         | ۱۱۸۲            | ۴۲۱۵                        | ۳۴۰۴  | ۱۹۰۲ | .                     | .      | .      | .            | .     | .    | ۸۶۰              | ۷۲۰  | ۶۸۰ |

شماره سه، مقدار سطح ذخیره در بازه شماره چهار بیشتر از بازه شماره سه است که دلیل آن می‌تواند به خاطر تقریباً دو برابر بودن طول بازه چهار نسبت به بازه سه باشد. همچنین وجود سیفون معکوس در بازه‌ها بسته به اینکه در ابتدای بازه و یا انتهای بازه باشد می‌تواند بی‌تأثیر و یا سبب کاهش سطح ذخیره شود. به‌عنوان مثال در بازه شماره دو که سیفون در انتهای بازه است سطح ذخیره برای ۱۰٪، ۵۰٪ و ۸۰٪ دبی طراحی به ترتیب برابر ۱۱۳۶۵، ۶۹۵۵ و ۵۵۰۷ متر مربع محاسبه شده است. اگر در همین بازه، سیفون معکوس در وسط و یا ابتدای بازه باشد مقدار سطح ذخیره به ترتیب برای سه حالت دبی

با مقایسه داده‌های جدول ۱ بین بازه‌های مختلف می‌توان دریافت که در شیب‌های کمتر و یا بازه‌های طولانی‌تر، مقادیر سطح ذخیره برای دبی‌های مختلف بیشتر از شیب‌های کمتر در بازه‌های کوتاه‌تر و یا شیب‌های زیاد است و به این دلیل است که بازه‌های با شیب کم و یا طولی، دارای عمق آب زیاد و سرعت کم هستند و این سبب می‌شود که طول منحنی برگشت آب بیشتر شود و سطح ذخیره افزایش یابد. ولی در کانال‌های پرشیب با عمق کم، سرعت جریان آب زیاد است، طول منحنی برگشت آب کمتر شده و سطح ذخیره کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال در بازه شماره چهار با شرایطی مشابه بازه

مقادیر تناوب رزونانس و رزونانس حداکثر در بازه‌های پنج و نه نشان می‌دهند که با افزایش شیب کانال و طول بازه سرعت جریان آب افزایش یافته و کانال رفتار رزونانسی کمتری از خود نشان می‌دهد. ولی در این بازه‌ها هنوز جریان آب در ظرفیت‌های ۱۰٪ و ۵۰٪ دبی طراحی رفتار رزونانسی دارد. از دیدگاه مهندسی کنترل و در شبکه‌های آبیاری، به این نوع بازه‌ها، بازه‌های کم‌شیب، به نسبت طولانی و کم عمق می‌گویند. آب در این بازه‌ها کمتر رفتار رزونانسی دارد و فقط در دبی‌های کم این رفتار دیده می‌شود. فرآیند تنظیم الگوریتم کنترل در این نوع بازه‌ها تحت تسلط زمان تأخیر و رفتار رزونانسی جریان آب است، در صورتی که در بازه‌های کم شیب، کوتاه و عمیق بیشتر تحت تسلط رفتار رزونانسی جریان آب است و در بازه‌های طولانی، کم‌شیب و عمیق و همچنین بازه‌های طولانی و شیب دار بیشتر تحت تسلط زمان تأخیر است (در بازه شماره چهار با شرایطی مشابه بازه سه و شیب تقریباً برابر، مقدار رزونانس حداکثر و تناوب رزونانس صفر است در صورتیکه در بازه سه این مقادیر صفر نیستند. دلیل این مسئله می‌تواند دو برابر بودن طول بازه چهار، نسبت به بازه سه باشد).

#### نتایج تنظیم الگوریتم کنترل

در این مطالعه برای تنظیم ضرایب تناسبی ( $K_p$ ) و انتگرالی ( $K_i$ ) از مدل بهینه‌سازی چندگانه کنترل‌کننده PI که توسط ون‌اورلوپ و همکاران ارائه شد، به کار رفت. این ضرایب برای سناریوهای مختلف از روابط ۲ و ۳ به دست آمده‌اند. جدول ۲ مقادیر بهینه ضرایب الگوریتم کنترل را نشان می‌دهد.

بهره‌برداری برابر با ۲۷۴۳۶، ۸۴۲۶ و ۷۵۸۱ می‌شود، زیرا در حالتی که سیفون معکوس در انتهای بازه کانال است سبب قطع منحنی برگشت آب شده و در نتیجه سطح ذخیره کاهش می‌یابد.

برای افزایش کارایی کنترل‌کننده در انحلال اغتشاشات و همچنین افزایش پایداری آن در برابر رفتار رزونانسی جریان آب، استفاده از مشخصه‌های رزونانسی سامانه پیشنهاد می‌شود (ون‌اورلوپ و همکاران، ۲۰۰۵). با مقایسه مقادیر تناوب رزونانس و رزونانس حداکثر در ظرفیت‌های ۱۰٪، ۵۰٪ و ۸۰٪ دبی طراحی برای سناریوهای مختلف، مشخص می‌شود که در دبی‌های کم، رفتار رزونانسی اثر بارزی بر بازه کانال دارد. به عبارتی با تغییر کوچک در بازه‌شدگی دریاچه‌ها، موج شدیدی در کانال ایجاد شده و جریان آب رفتار رزونانسی شدیدی نشان می‌دهد. در دبی‌های کم، تنظیم الگوریتم کنترل بیشتر تحت تأثیر رفتار رزونانسی جریان آب است. طبق جدول ۱ برای بازه‌های یک، سه، یازده و سیزده به دلیل شیب کم و کوتاهی طول بازه، مقادیر تناوب رزونانس و رزونانس حداکثر برای هیچ‌کدام از دبی‌های طراحی صفر نیست. معمولاً برای دبی‌های حداکثر به دلیل سرعت زیاد در کانال، جریان آب کمتر رفتار رزونانسی از خود نشان می‌دهد و مقدار تناوب رزونانس و رزونانس حداکثر برای این دبی‌ها صفر است. ولی در این بازه‌ها به دلیل شیب کم کانال و کوتاهی طول بازه‌ها، جریان آب حتی در دبی‌های زیاد هم رفتار رزونانسی از خود نشان می‌دهد. به این بازه‌های کانال در اصطلاح بازه‌های کم شیب، عمیق و کوتاه می‌گویند و تنظیم ضرایب کنترل‌کننده بیشتر تحت تسلط رفتار رزونانسی جریان آب است.

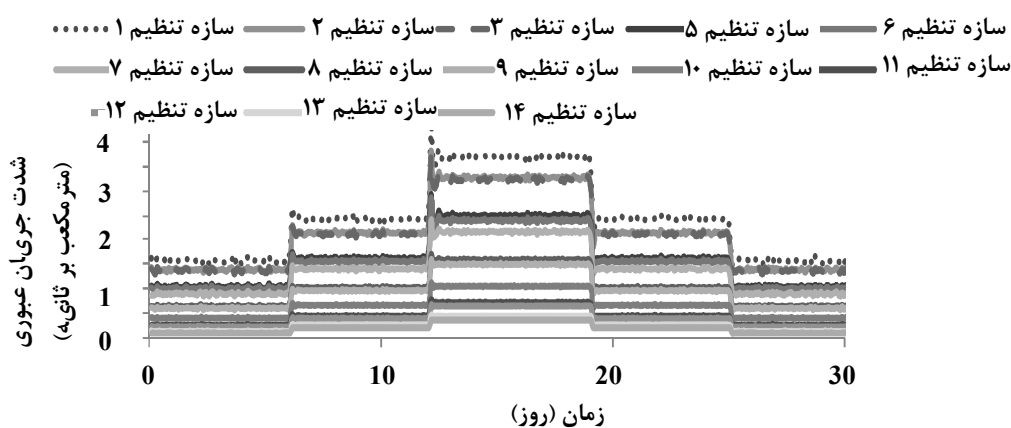
جدول ۲- مقادیر بهینه ضرایب کنترل‌کننده پایین دست

| شماره بازه | $K_i$   | $K_p$ | شماره بازه | $K_i$   | $K_p$ |
|------------|---------|-------|------------|---------|-------|
| ۱          | -۰/۰۸   | -۱/۲۵ | ۸          | -۰/۰۰۳  | -۰/۳۸ |
| ۲          | -۰/۰۰۱۶ | -۰/۲۸ | ۹          | -۰/۱۰   | -۰/۴۷ |
| ۳          | -۰/۰۲۵  | -۰/۹۳ | ۱۰         | -۰/۰۰۱  | -۰/۱۸ |
| ۴          | -۰/۰۰۸  | -۰/۶۰ | ۱۱         | -۰/۰۰۸  | -۰/۲۹ |
| ۵          | -۰/۰۱۸  | -۰/۶۶ | ۱۲         | -۰/۰۰۱۲ | -۰/۲۵ |
| ۶          | -۰/۰۰۳۵ | -۰/۳۰ | ۱۳         | -۰/۰۰۲۵ | -۰/۱۳ |
| ۷          | -۰/۰۰۵  | -۰/۵۰ | ۱۴         | -۰/۰۰۰۵ | -۰/۱۰ |

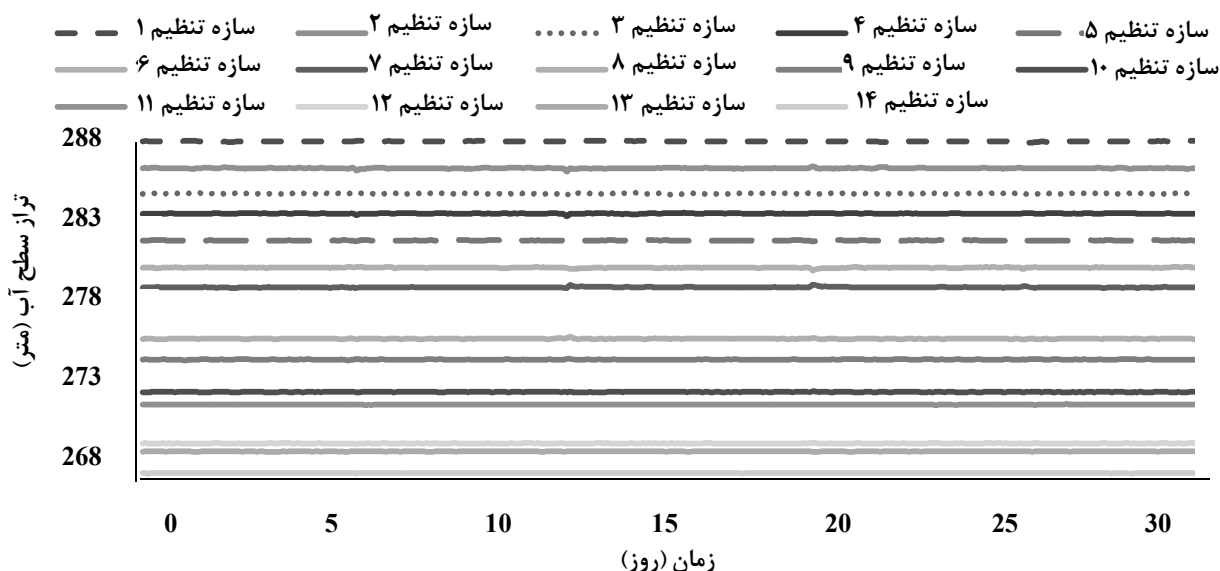
بررسی نتایج الگوریتم‌های کنترل طراحی شده

برای ارزیابی نتایج کنترل کننده، تغییرات شدت جریان عبوری از سازه‌های تنظیم و رقوم سطح آب بالادست سازه‌های تنظیم در هر یک از بازه‌های کانال در دوره بهره‌برداری تعریف شده، بررسی شد. در هر یک از شکل‌های ۳ و ۴ هر یک از منحنی‌های ارائه شده مربوط به یکی از سازه‌های تنظیم انتهای بازه کانال است. روند تغییرات دبی تحویلی به آبگیرها و کانال‌های فرعی برای تأمین نیاز بهره‌برداران موجب تغییر دبی سازه‌های تنظیم و در نتیجه تراز آب در بالادست این سازه‌ها می‌شود. وقتی تغییری در تراز سطح آب در اثر برداشت دبی رخ می‌دهد

این تغییر به‌عنوان یک انحراف وارد فرآیند کنترل شده و کنترل کننده سعی در انحلال و برگشت تراز آب به مقدار هدف را دارد. منطق کنترل پس‌خورد برای افزایش دقت و تنظیم دقیق تراز آب در عمق هدف کارایی مناسبی دارد، زیرا کنترل کننده پس‌خورد به صورت یک حلقه بسته تا زمانی که مقدار انحراف به محدوده مجاز برسد به محاسبه و ارسال عملگر کنترل خواهد پرداخت. با توجه به ماهیت بهره‌برداری از کانال‌های آبیاری و لزوم افزایش انعطاف‌پذیری آن‌ها، کاربرد و تلفیق منطق کنترل پس‌خورد و پیش‌خورد موجب تأمین بهینه هدف‌های مدیریت شبکه خواهد شد.



شکل ۳- تغییرات شدت جریان عبوری از سازه‌های تنظیم



شکل ۴- تغییرات تراز سطح آب بالادست سازه‌های تنظیم



نشان می‌دهد الگوریتم طراحی شده دارای پتانسیل بالایی در کنترل جریان و استهلاک اغتشاشات حاصل از اختلالات سازه‌ای و هیدرولیکی است و شرایط تحقق توزیع تقاضا مدار و ارتقاء عملکرد سامانه، تنظیم و توزیع آب را فراهم می‌کند. بررسی مقدار شاخص‌های ارزیابی عملکرد الگوریتم کنترل طراحی شده نشان می‌دهد مقدار این شاخص‌ها برای بازه شماره دو نسبت به سایر بازه‌ها بیشتر است. با توجه به اینکه مقادیر تناوب رزونانس و حداکثر رزونانس برای این بازه صفر است، پس تنظیم الگوریتم کنترل و محاسبه ضرایب کنترل‌کننده به زمان تأخیر و سطح ذخیره بستگی دارد. وجود سیفون معکوس در انتهای این بازه سبب شده که سطح ذخیره کاهش یابد. به همین دلیل کنترل‌کننده توانایی کمتری در انحلال اختلالات در بازه شماره دو دارد و با تغییر دبی آنگیر انتهای این بازه (بخصوص در حالت افزایش دبی از ۰/۶۰٪ به ۰/۹۰٪ دبی طراحی)، سبب خارج شدن تراز سطح آب از تراز هدف در بالادست سازه تنظیم انتهای بازه شماره دو می‌شود، ولی با توجه به کارایی آن در تنظیم سطح آب، عمق آب در زمانی کمتر از دو ساعت به عمق هدف برمی‌گردد.

وضعیت تغییرات رقوم سطح آب در شکل ۴ بیانگر آن است که مقادیر هدف در همه بازه‌ها بجز بازه‌های دو، سه و هفت بر اثر اعمال هر گونه اغتشاش، با اجرای سامانه کنترل طراحی شده و با تغییر بازه‌های تنظیم توسط کنترل‌کننده با دقت و سرعت بالاتر قابل دستیابی است. با توجه به تغییرات دبی بالادست سازه‌های تنظیم (شکل ۳)، مشاهده می‌شود برای درجه تنظیم شماره یک، در نقاط افزایش دبی (به‌عنوان مثال از ۰/۶۰٪ به ۰/۹۰٪ دبی طراحی) دبی ناگهان به مقدار زیادی افزایش می‌یابد و سپس به مقدار هدف برمی‌گردد. دلیل این امر مربوط به کوپل کردن بازه به یکدیگر است که سبب شده اختلاف تراز سطح آب از عمق هدف تمام بازه‌های بعدی با یکدیگر جمع شوند و در سازه تنظیم ابتدایی اعمال شوند.

#### ارزیابی کمی الگوریتم کنترل طراحی شده

جدول ۳ مقادیر شاخص‌های ارزیابی را برای الگوریتم کنترل طراحی شده در سناریوی بهره‌برداری مورد نظر نشان می‌دهد.

براساس جدول ۳، متوسط مقادیر شاخص‌های حداکثر قدرمطلق خطا (MAE)، انتگرال قدرمطلق بزرگی خطا (IAE) و خطای برگشت به حالت ماندگار (STE) برای کانال مورد مطالعه برابر ۰/۰۴۲، ۰/۰۰۵ و ۰/۰۰۱ است که

جدول ۳- مقادیر شاخص‌های ارزیابی الگوریتم کنترل طراحی شده

| شاخص       | MAE  | IAE     | STE   | شاخص       | MAE  | IAE    | STE   |
|------------|------|---------|-------|------------|------|--------|-------|
| شماره بازه |      |         |       | شماره بازه |      |        |       |
| ۱          | ۰/۰۲ | ۰/۰۰۷   | ۰/۰۰۱ | ۸          | ۰/۰۶ | ۰/۰۰۷  | ۰/۰۰۱ |
| ۲          | ۰/۰۹ | ۰/۰۰۹۱  | ۰/۰۰۲ | ۹          | ۰/۰۳ | ۰/۰۰۶۷ | ۰/۰۰۱ |
| ۳          | ۰/۰۷ | ۰/۰۰۱۰۳ | ۰/۰۰۰ | ۱۰         | ۰/۰۵ | ۰/۰۰۷۸ | ۰/۰۰۰ |
| ۴          | ۰/۰۶ | ۰/۰۰۱   | ۰/۰۰۱ | ۱۱         | ۰/۰۲ | ۰/۰۰۲  | ۰/۰۰۲ |
| ۵          | ۰/۰۳ | ۰/۰۰۶۵  | ۰/۰۰۱ | ۱۲         | ۰/۰۳ | ۰/۰۰۶۹ | ۰/۰۰۱ |
| ۶          | ۰/۰۴ | ۰/۰۰۹۵  | ۰/۰۰۱ | ۱۳         | ۰/۰۲ | ۰/۰۰۴۳ | ۰/۰۰۱ |
| ۷          | ۰/۰۵ | ۰/۰۰۷۸  | ۰/۰۰۱ | ۱۴         | ۰/۰۳ | ۰/۰۰۷  | ۰/۰۰۱ |

می‌کند. یکی از سامانه‌های کنترل مدیریت که کارایی مناسبی دارد کنترل‌کننده سراسری پایین‌دست تناسبی-انتگرالی پس‌خورد و پیش‌خورد است. در این پژوهش کنترل‌کننده‌ای برای کانال EPC طراحی شد و عملکرد آن با داده‌های بهره‌برداری کانال بررسی شد. نتایج ارزیابی عملکرد الگوریتم کنترل نشان داد که الگوریتم طراحی

#### نتیجه‌گیری

توزیع و تحویل مناسب آب به آب‌بران، با کاربرد سامانه‌های کنترل خودکار قابل دستیابی است. این روش هر چند با مشکل سرمایه‌گذاری اولیه زیاد روبرو است ولی به‌عنوان یک ابزار کارا، امکان ارتقای عملکرد تحویل و بهره‌برداری بهینه از ظرفیت شبکه‌های آبیاری را میسر

شده پتانسیل و دقت مطلوبی در کنترل جریان دارد و امکان تقاضامدار کردن کانال و افزایش راندمان بهره‌برداری را فراهم می‌کند.

#### منابع

۱. منتظر ع. و عیسی پور س. ۱۳۹۰. الگوریتم‌های کنترل و کاربرد آن در کانال‌های شبکه آبیاری عقیلی: (۱) مبانی، معیارها و طراحی. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۲(۱): ۵۵-۶۶.
2. Baume J. P. Malaterre P. O. and Sau J. 1999. Tuning of PI controllers for an irrigation canal using optimization tools. Workshop on Modernization of Irrigation Water Delivery Systems. October 18-21. Arizona. 483-500.
3. Blair L. S. 2010. Design of a single-pool downstream controller using quantitative feedback control theory. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 136(10): 685-691.
4. Clemmens A. J. Kacerek T. F. Grawitz B. and Schuurmans W. 1998. Test cases for canal control algorithms. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 24(1): 23-30.
5. Lozano D. Arranja C. Rijo M. and Mateos L. 2010. Simulation of automatic control of an irrigation canal. Agricultural Water Management. 97: 91-100.
6. Montazar A. Van Overloop P. J. and Brouwer R. 2005. Centralized controller for the Narmada main canal. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 54(3): 79-89.
7. Rijo M. 2003. Local automatic control modes in an experimental irrigation canal. Irrigation and Drainage Systems. 17: 179-193.
8. Van Overloop P. J. Schuurmans J. Brouwer R. and Burt C. M. 2005. Multiple model optimization of proportional integral controllers on canals. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 131(2): 190-196.
9. Van Overloop P. J. Clemmens A. J. Strand R. J. Wagemaker R. M. J. and Bautista E. 2010. Real-time implementation of model predictive control on Maricopa-Stanfield irrigation and drainage district's WM canal. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 136(11): 747-756.