

## بهبود ضرایب کنترل کننده تناسبی-انتگرالی بر اساس فرآیند شناسایی سامانه در شبکه آبیاری دوستی

سید محمد سید موسوی<sup>1</sup> - عاطفه پرورش ریزی<sup>2\*</sup> - سعید عیسی پور<sup>3</sup>

تاریخ دریافت: 1392/06/13

تاریخ پذیرش: 1394/03/27

### چکیده

استفاده از سامانه‌های کنترل خودکار در مدیریت انتقال و توزیع آب در شبکه‌های آبیاری روباز، بعنوان ابزار بهبود مدیریت و افزایش عملکرد شبکه‌های توزیع آب ضروری است. در این تحقیق عملکرد فرآیند شناسایی سامانه، SI، نسبت به عملکرد سعی و خطا، در محاسبه ضرایب کنترل کننده تناسبی - انتگرالی و میزان بهبود تنظیم الگوریتم کنترل، مقایسه شد. این مقایسه بر روی الگوریتم کنترل تناسبی - انتگرالی انجام شد که برای کانال EPC شبکه آبیاری دوستی طراحی شده بود. ارزیابی کارایی الگوریتم با استفاده از نتایج شبیه‌سازی چند گزینه بهره‌برداری مختلف و با مدل هیدرودینامیک سوپک و محاسبه شاخص‌های ارزیابی سامانه‌های کنترل انجام شد. بررسی و مقایسه کمی شاخص‌های الگوریتم کنترل تنظیم شده با استفاده از فرآیند شناسایی سامانه، از دقت و پتانسیل قابل توجهی در کنترل جریان و مستهلک نمودن اغتشاشات حاصل از اختلالات سازه‌ای و هیدرولیکی نسبت به انجام سعی و خطا برخوردار است. کاربرد این الگوریتم شرایط تحقق توزیع تقاضامدار و ارتقاء عملکرد توزیع آب را فراهم می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم تناسبی - انتگرالی، بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری، تقاضامدار، کنترل کانال آبیاری

### مقدمه

پارامترهای کنترلی بستگی دارد. الگوریتم کنترل کانال یک روال منطقی است که با بررسی و پردازش ورودی‌ها مانند تراز سطح آب و یا دبی یک سازه یک عمل کنترل خروجی مانند بازشدگی دریچه کنترل را بدست می‌دهد.

ایده‌ی خودکار سازی و اجرای سامانه‌های کنترل کانال‌های آبیاری، از اواخر دهه 1970 میلادی مطرح و نظر تعدادی از متخصصان و متولیان سامانه‌های آبیاری را به خود معطوف کرده است. راجو در سال 2003 (7) به بررسی کنترل اتوماتیک تناسبی - انتگرالی<sup>4</sup> (PI) موضعی با الگوریتم کنترل پس‌خورد در یک کانال آزمایشگاهی پرداخت که نتایج آن حاکی از عملکرد مطلوب و سرعت بالای کنترل کننده PI در چندین سناریو بهره‌برداری بود. در سال 2005، منتظر و همکاران (6) به ارزیابی کنترل کننده PI مرکزی با منطق کنترل پس‌خورد و پیش‌خورد با کاربرد دی‌کوپلینگ برای کنترل کانال اصلی نارمادا در هندوستان پرداختند که نتایج مطلوبی در تنظیم سطح آب، تقاضا مدار نمودن و ارتقای عملکرد کانال مورد نظر داشت. این تکنیک همچنین توسط منتظر و عیسی‌پور (5) در سال 1389 برای کانال غربی شبکه آبیاری عقیلی انجام شد. علاوه بر کنترل کننده‌های تناسبی-انتگرالی، کنترل کننده‌های پیچیده‌تری در

استفاده از کنترل کننده‌های هوشمند در شبکه‌های آبیاری، بدلیل افزایش انعطاف‌پذیری تحویل آب یکی از گزینه‌های موثر برای مدیریت بهینه شبکه‌های آبیاری است (5). خودکار سازی شبکه‌ها با استفاده از کنترل کننده قابل برنامه‌نویسی امکان اجرای چندین روش کنترل را بر طبق سناریوهای مختلف تحویل آب را فراهم می‌کند (7). همچنین اجرای این سامانه‌ها با استفاده از حسگرهای سطح آب و ثبت اطلاعات هیدرولیکی توسط این دستگاه‌ها، در صورت نیاز امکان داده‌برداری دقیق در شبکه‌های توزیع آب در درازمدت را داشته و می‌تواند در تصمیم‌گیری برای مدیریت شبکه تأثیرگذار باشد. سامانه‌های کنترل در کانال‌های آبیاری شامل دو بخش محاسبه میزان تنظیمات سازه‌ها (الگوریتم یا نرم‌افزار سامانه کنترل) و اعمال تنظیمات محاسبه‌شده بر روی سازه‌ها (سخت افزار سامانه کنترل) هستند که موفقیت آنها به توانایی الگوریتم کنترل در تعیین

1 و 2- دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی و استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

\* - نویسنده مسئول: (Email: parvarsh@ut.ac.ir)

3- کارشناسی ارشد آبیاری، شرکت مهندسی مشاور یکم، تهران

توسط موسسه هیدرولیک دلفت با همکاری دانشگاه تی بودلفت کشور هلند توسعه یافته است و شامل یک بسته نرم‌افزاری با هفت زیربرنامه متنوع است. در این مدل امکان شبیه‌سازی انواع سازه‌های موجود در شبکه‌های انتقال و توزیع آب در مجاری روباز وجود دارد. علاوه بر جامعیت این نرم‌افزار، دو رویکرد اختصاصی آن قابلیت طراحی الگوریتم‌های کنترل برای هوشمندسازی شبکه آبیاری و قابلیت تلفیق هر کدام از مدول‌های آن با یکدیگر و افزایش تطابق آن با سامانه‌های واقعی است. مدول شبیه‌سازی جریان آب برای شبیه‌سازی جریانهای ماندگار و غیرماندگار مجاری روباز بکار گرفته می‌شود. در این تحقیق از ترکیب این مدول با مدول کنترل بلادرنگ (RTC) برای طراحی الگوریتم کنترل استفاده شده است.

### مشخصات کانال مورد مطالعه

شبکه آبیاری دوستی در دشت سرخس در شمال شرق ایران واقع شده است. 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 گردیده است. مطالعه حاضر بر روی کانال درجه یک EPC انجام گردید. دبی طراحی کانال مورد مطالعه 4/43 مترمکعب بر ثانیه بوده و طول آن 18/7 کیلومتر است که در طول آن 15 سازه تنظیم از نوع سرریز نوک اردکی وجود دارد. در طول کانال 10 عدد سازه تقاطعی از نوع سیفون معکوس وجود دارد. همچنین 14 آبگیر و کانال فرعی در طول کانال وظیفه توزیع آب بین بهره‌برداران محلی را بر عهده دارد. شکل 1 پروفیل طولی کانال را از ابتدا تا انتها در محیط مدل سوپک به اتفاق سازه‌های موجود در مسیر آن را نشان می‌دهد.

### معرفی الگوریتم کنترل طراحی شده

کنترل کننده تناسبی-انتگرالی ساده‌ترین تکنیکی است که کاربرد بسیار زیادی در صنعت و کنترل شبکه‌های آبیاری دارد. در این تکنیک کنترل کننده با استفاده از انحراف متغیر کنترل شده و انحراف جمعی آن، به کمینه کردن خطای بین مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار هدف برای متغیر کنترل شده می‌پردازد (1). به تعبیر دیگر متغیر کنترل معادل است با مجموعی از نسبت‌های تناسبی با ضریب  $K_p$  و انتگرالی با ضریب  $K_i$  (رابطه 1):

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

در این رابطه  $u$  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. طراحی و اجرای موفق کنترل کننده‌های PI به تنظیم پارامترهای کنترل کننده وابسته است.

شبکه‌های آبیاری توسعه یافته است. بلر (2) در سال 2010، یک کنترل کننده پایین دست برای یک بازه از کانال، با استفاده از تئوری کنترل پس خورد کمی طراحی کرد. ون اورلوپ و همکاران (9) در سال 2010 مدل کنترل پیش‌بینی شده را در ناحیه آبیاری و زهکشی Maricopa-Stanfield مورد ارزیابی قرار دادند. بررسی تحقیقات نشان می‌دهد که تکنیک PI به دلیل سهولت کاربری و دقت مناسب در شبکه‌های آبیاری، بیشتر مورد اقبال قرار گرفته است. گرچه تحقیقات زیادی در استفاده از کنترل کننده‌های PI انجام شده است، ولی در اکثر تحقیقات انجام شده بدلیل پیچیدگی فرآیند تنظیم الگوریتم‌های کنترل، از روش‌های تجربی و سعی و خطا، برای تنظیم این الگوریتم‌ها استفاده کرده‌اند که باعث شده اجرای موفق سامانه‌های کنترل در شبکه‌های آبیاری کمتر صورت گیرد (8).

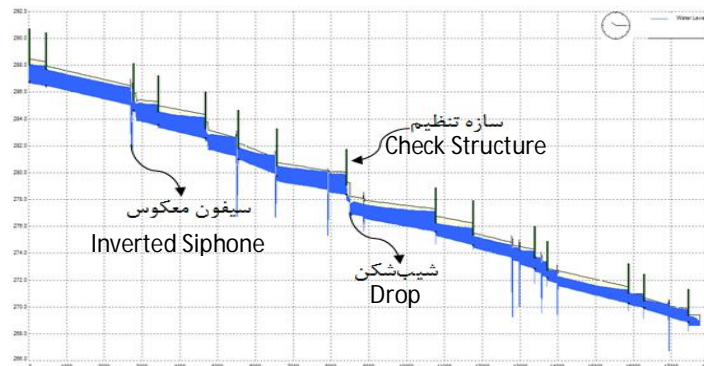
از آنجا که سامانه مدیریت بهره برداری هر شبکه، به دلیل تأثیرپذیری از ساختار هیدرولیکی کانالها، منحصر به فرد است، الگوریتم کنترل طراحی شده برای شبکه نیز منحصر به فرد خواهد بود. بنابراین با تغییر شرایط هیدرولیکی کانال، الگوریتم کنترل تغییر کرده و نیازمند تنظیم ضرایب کنترل است.

در این تحقیق، با استفاده از مدل هیدرودینامیک سوپک، به طراحی سامانه کنترل خودکار تناسبی-انتگرالی برای کانال EPC شبکه آبیاری دوستی پرداخته شد. شبکه دوستی، شبکه حائز اهمیتی در استان خراسان رضوی است. از ویژگیهای کانال EPC این شبکه، داشتن بازه‌های متعدد با طول‌ها و شیب‌های متفاوت (در اکثر بازه‌ها شیب زیاد) و همچنین وجود سیفون‌های متعدد در مسیر این کانال است، که این مشخصات باعث می‌شوند عمل تنظیم الگوریتم کنترل این کانال، نسبت به سایر کانال‌های مشابه دشوارتر بوده و نیاز به دقت بیشتری داشته باشد. در تحقیق حاضر ابتدا با استفاده از روش سعی و خطا، ضرایب الگوریتم کنترل محاسبه شد و با استفاده از ضرایب محاسبه شده برای الگوریتم کنترل، تنظیم تراز سطح آب در بالادست سازه‌های تنظیم و فرآیند شناسایی سامانه<sup>1</sup> (SI) انجام شد. سپس محاسبه ضرایب الگوریتم کنترل مجدداً و با استفاده از نتایج فرآیند SI انجام شد. فرآیند SI دو بار دیگر هم انجام شد و هر بار ضرایب الگوریتم کنترل محاسبه شد. در مرتبه دوم تقریباً ضرایب بدست آمده برای هر بازه، با ضرایب حاصل از انجام فرآیند SI مرتبه اول برابر بود.

### مواد و روش‌ها

#### مدل هیدرودینامیک سوپک

در این مطالعه از مدل سوپک برای شبیه‌سازی سناریوهای مورد مطالعه و طراحی کنترل کننده‌های هوشمند استفاده شد. این مدل



شکل 1- پروفیل طولی کانال EPC شبکه آبیاری دوستی در مدل سوبک  
Figure 1- Longitudinal profile of EPC canal of Doosti irrigation network in SOBEK model

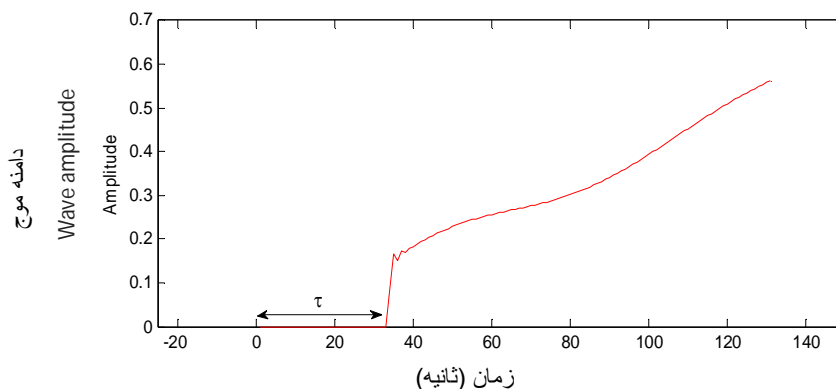
طراحی به کانال تعیین شدند. در فرآیند SI ابتدا با استفاده از ضرایب محاسبه شده از فرآیند سعی و خطا، به کنترل تراز سطح آب در دبی‌های 10، 50 و 80 درصد دبی طراحی پرداخته می‌شود، هنگامی که اختلاف تراز سطح آب از عمق هدف کمتر از مقدار تعریف شده بود، انجام فرآیند SI برای هر بازه شروع می‌شود. بدین ترتیب که در پیچه‌های موجود در ابتدای همه بازه‌ها بجز بازه‌ای که فرآیند SI در آن انجام می‌شود، ثابت می‌ماند. برای شناسایی رفتار بازه‌ای که فرآیند SI بر روی آن در حال انجام است در برابر تغییرات دبی ورودی، در پیچه ابتدای بازه با استفاده از تابع  $RBS^1$  در نرم‌افزار متلب، بصورت تصادفی باز و بسته می‌شود. این کار باعث می‌شود دبی ورودی به بازه مورد نظر تغییر کند. بطور همزمان تراز سطح آب ایجاد شده در پایین دست بازه ثبت می‌شود. فرآیند SI تا زمانیکه اولین موج ایجاد شده به انتهای بازه برسد و مجدداً به ابتدای بازه برگردد طول می‌کشد. پس از انجام فرآیند SI مشخصه‌های کانال محاسبه می‌شوند و سپس با این مشخصه‌ها، ضرایب کنترل کننده محاسبه می‌شوند. در صورتیکه، ضرایب محاسبه شده به خوبی بتوانند سطح آب را کنترل کنند و همچنین مقدار تراز محاسبه شده در انتهای هر بازه در طول SI در محدوده عمق هدف باشد، فرآیند SI انجام شده مناسب بوده و دیگر نیاز به تکرار ندارد. مشخصه‌های کانال در هر بازه شامل زمان تأخیر، سطح ذخیره، تناوب رزونانس و بیشینه رزونانس هستند. زمان تأخیر مدت زمان پاسخ تراز آب بالادست (یا پایین دست) بازه به یک تغییر کوچک در پایین دست (یا بالادست) بازه است. به عبارت دیگر مدت زمانی است که طول می‌کشد تا یک موج یا اختلال، بعد از طی مسیر یک بازه کانال (فاصله بین دو سازه تنظیم کننده) به انتها یا ابتدای آن برگردد. شکل 2 مفهوم زمان تأخیر یک بازه کانال نشان می‌دهد.

این پارامترها به علت اثر متقابل بین بازه‌ای و تغییر شرایط جریان به سختی تعیین می‌گردند. پارامتر تناسبی کنترل کننده ( $K_p$ ) و پارامتر انتگرالی کنترل کننده ( $K_i$ ) باید طوری محاسبه گردند که الگوریتم کنترل بتواند در کمترین زمان ممکن و با دقت مناسب متغیر کنترل را به مقدار هدف برساند.

#### فرآیند شناسایی سامانه (SI)

برای پیاده‌سازی یک سامانه کنترلی، مدلی برای تفسیر چگونگی ارتباط بین متغیرهای سامانه اعم از ورودی و خروجی در قالب ریاضی ضروری است. وجود مدل‌های ریاضی وسیله‌ای برای شبیه‌سازی و یا پیش‌بینی رفتار سامانه است. عبارتی دیگر مدل‌ها نقش بسیار مهم و تعیین کننده در راستای رسیدن به اهداف سامانه‌های پیچیده ایفا می‌کنند. مدل‌ها بر اساس داده‌های مشاهداتی برای یک سامانه معین ایجاد و ساخته می‌شوند. مدل‌های ریاضی به دو طریق برای یک سامانه قابل تعمیم هستند: راهکار اول به این صورت است که مدل سامانه بر اساس تجربیات گذشته و یا با تکیه بر قوانین طبیعی و یا تثبیت شده، شکل گرفته است. این روش اصطلاحاً مدل‌سازی می‌گویند. مدل‌سازی بدون نیاز به کار آزمایشگاهی بر روی سامانه انجام پذیر است. راهکار دوم به این شکل است که مدل بر اساس آزمایش‌های انجام شده بر روی یک سامانه تعیین می‌شود. به عبارت دیگر، مدل بر اساس برقراری ارتباط بین داده‌های ورودی و خروجی حاصل از انجام آزمایش‌های صورت گرفته بر روی سامانه حاصل می‌شود، که به این مدل، شناسایی سامانه می‌گویند.

بعد از طراحی الگوریتم‌های کنترل، از فرآیند شناسایی سامانه برای تعیین مشخصه‌های کانال استفاده می‌شود. با توجه به تغییر ظرفیت بهره‌برداری در طول فصل زراعی و لزوم پایداری سامانه کنترل در تمام شرایط بهره‌برداری، در این مطالعه مشخصه‌های هر بازه برای سه حالت بهره‌برداری یعنی ورود 10، 50 و 80 درصد دبی



شکل 2- تخمین زمان تأخیر و مفهوم آن  
Figure 2- Estimation of delay time and its concept

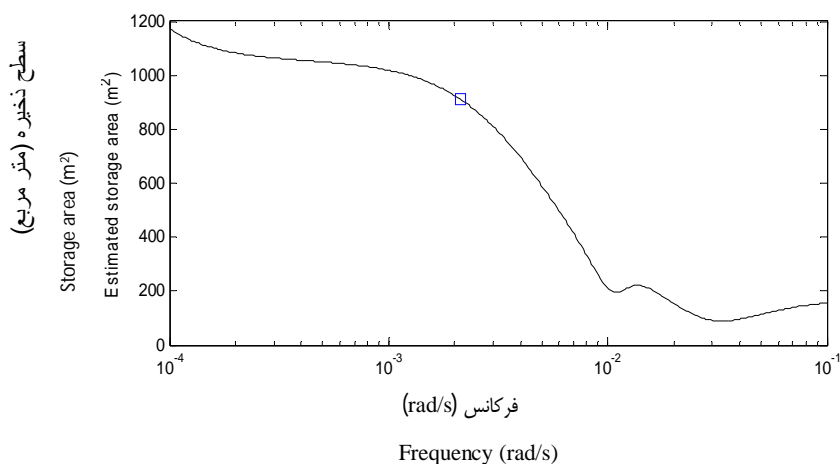
روابطی که برای محاسبه ضرایب کنترل تناسبی و انتگرالی توسعه یافته‌اند بصورت زیر هستند:

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

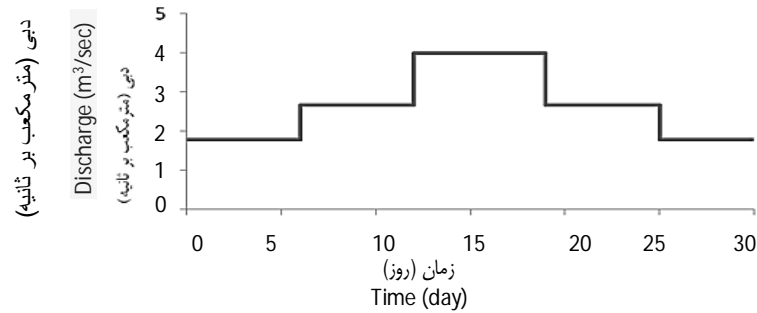
$$K_i = \frac{T_c \cdot \omega_p}{12R_p} \quad (3)$$

در این روابط  $T_c$ ، گام زمانی کنترل بر حسب ثانیه،  $A_s$ ، سطح ذخیره بر حسب متر مربع،  $R_p$ ، رزونانس بیشینه (در جریان کمینه) و  $\omega_p$ ، تناوب رزونانس بر حسب رادیان بر ثانیه است.

سطح ذخیره تعیین کننده میزان پاسخگویی سطح آب به تغییرات اعمال شده در سیستم هیدرولیکی است. بدیهی است هر چه سطح ذخیره بزرگتر باشد میزان تغییرات تراز آب در اثر تغییرات حجم جریان کمتر است. مقدار سطح ذخیره با فرض وجود امواج با فرکانس‌های پایین در سیستم از شکل 3 قابل تعیین است. از نظر تئوری سیستم باید در فرکانس‌های پایین سطح ذخیره پایینی داشته باشد اما در حالت واقعی، پروفیل سطح آب و مقطع بازه نیز درمیزان سطح ذخیره موثر هستند. خط مستقیم تشکیل شده در منحنی این شکل (فرکانس‌های کمتر از 0/001 رادیان بر ثانیه) نشان می‌دهد که سیستم دارای امواج با فرکانس‌های پایین، بطور تقریبی سطح ذخیره ثابتی دارد. تاثیر سطح ذخیره در این حالت نسبت به زمانی که فرکانس‌های بالا در سیستم وجود داشته باشد بیشتر است (6).



شکل 3- تغییرات سطح ذخیره در مقابل امواج با فرکانس‌های مختلف  
Figure 3- Changes in storage area versus the waves with different frequencies



شکل 4- هیدروگراف ورودی به کانال EPC  
Figure 4- Input hydrograph to EPC canal

### نتایج و بحث

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

نتایج مربوط به انجام فرآیند شناسایی سامانه در جدول 1 آورده شده است. این مقادیر نشان می‌دهد که زمان تأخیر مربوط به طولانی‌ترین بازه بیش 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 اتفاق افتاده است که برابر 1260 ثانیه است و در 10 درصد ظرفیت کانال اتفاق می‌افتد و نشان می‌دهد که مشخصات فیزیکی بازه‌ها از عوامل موثر 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 افزایش سرعت جریان باعث کاهش زمان تأخیر می‌شود. بعنوان مثال اگر در مسیر بازه سیزده، سیفون معکوس حذف شود، زمان تأخیر برای 10، 50 و 80 درصد دبی طراحی به ترتیب برابر 300، 260 و 260 ثانیه محاسبه می‌شود. مشخصه دیگری که با فرآیند شناسایی سامانه بدست می‌آید سطح ذخیره است که برای تعیین ضرایب کنترل‌کننده بکار برده می‌شود. با مقایسه سطح ذخیره برای درصد دبی‌های اعمال شده برای SI، مشخص می‌شود که مقدار سطح ذخیره برای دبی‌های کم بیشتر است و این به دلیل اینست که برای دبی‌های کم و با عمق هدف ثابت در بالادست سازه‌های تنظیم، طول منحنی برگشت آب بیشتر بوده که در نتیجه سطح ذخیره نیز بیشتر خواهد بود.

#### ارزیابی عملکرد الگوریتم کنترل طراحی شده

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم کنترل طراحی شده برای سناریوی مورد بررسی در کانال، از شاخص‌های ارزیابی عملکرد سامانه‌های کنترل استفاده شد.

این شاخص‌ها شامل بیشینه قدر مطلق خطا<sup>1</sup> (MAE)، انتگرال قدرمطلق بزرگی خطا<sup>2</sup> (IAE) و خطای برگشت به حالت ماندگار<sup>3</sup> (STE) هستند (3)، که از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$MAE = \frac{\max(|y - y_t|)}{y_t} \quad (5)$$

$$IAE = \frac{\Delta t \sum_{t=0}^T |y - y_t|}{y_t} \quad (6)$$

$$STE = \frac{\Delta t}{(t_0 + \Delta t) \cdot y_t} \sum_{t=T-t_0}^T |y - y_t| \quad (7)$$

در روابط فوق  $y$ ، 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 2 ساعت می‌باشد.

#### گزینه بهره‌برداری مورد استفاده

ارزیابی عملکرد الگوریتم کنترل طراحی شده، با استفاده از الگوی بهره‌برداری یک‌ماهه، با تغییرات روزانه شدید صورت گرفت که بتواند شدیدترین اغتشاشاتی احتمالی را نیز پوشش دهد. شکل 4 هیدروگراف ورودی به کانال را در یک دوره یک‌ماهه نشان می‌دهد.

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

جدول 1- مشخصه‌های بازه‌های کانال EPC در فرآیند شناسایی سامانه در درصدهای مختلف از دبی ورودی به کانال

شماره بازه Reach number	طول بازه Reach length (m)	سطح ذخیره (m <sup>2</sup> ) Storage area			تناوب رزونانس (rad/sec) Resonance frequency			بیشینه رزونانس Maximum resonance			زمان تأخیر (sec) Delay time		
		%10	%50	%80	%10	%50	%80	%10	%50	%80	%10	%50	%80
		1	452	4952	3409	2702	0.0112	0.025	0.0242	0.103 5	0.07 5	0.05	240
2	2320	11365	6955	5507	0	0	0	0	0	0	900	840	480
3	652	25734	5014	4264	0.0157	0.013 9	0.01	0.132 8	0.1	0.1	360	180	120
4	1252	51399	6275	5999	0	0	0	0.31	0.06	0	600	360	300
5	864	13530	3634	3529	0.0109	0.005 2	0	0.6	0.09	0	480	180	180
6	1020	2624	3654	4196	0.0044	0	0	0.53	0	0	420	420	300
7	1837	12002	11513	7873	0	0	0	0	0	0	108 0	540	420
8	2354	12655 0	30218	7460	0	0	0	0	0	0	126 0	102 0	840
9	989	28498	4258	3281	0.0106	0.005	0	0.38	0	0	300	240	240
10	1666	94128	5147	4300	0	0	0	0.049	0	0	960	840	840
11	313	4258	1890	1556	0.0272	0.026 5	0.0138	1.05	0.84	0.42	240	180	180
12	2154	11734	7795	7378	0	0	0	0	0	0	600	540	490
13	336	6806	1496	872	0.0148	0.012 4	0.0114	0.81	0.7	0.19	240	240	240
14	1182	4215	3404	1902	0	0	0	0	0	0	860	720	680

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 (8). با مقایسه مقادیر تناوب رزونانس و رزونانس بیشینه در ظرفیت‌های 10، 50 و 80 درصد دبی طراحی برای سناریوهای مختلف مشخص می‌شود که در دبی‌های کم، رفتار رزونانسی اثر بارزی بر بازه کانال دارد. در واقع با تغییر کوچک در بازشدگی دریچه‌ها، موج شدیدی در کانال ایجاد شده و جریان آب رفتار رزونانسی شدیدی از خود نشان می‌دهد. به عبارتی در دبی‌های پایین، قابلیت انحلال رفتار رزونانسی آب در بازه‌های کانال وجود ندارند و فرآیند تنظیم الگوریتم کنترل بیشتر تحت تأثیر رفتار رزونانسی جریان آب است.

در جدول 1 مشاهده می‌شود که برای بازه‌های یک، سه، یازده و سیزده به دلیل شیب کم و کوتاهی طول بازه، مقادیر تناوب رزونانس و رزونانس بیشینه برای هیچ کدام 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 بیشینه برای این دبی‌ها صفر است. ولی باید توجه کرد که 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

با مقایسه داده‌های جدول 1 بین بازه‌های مختلف می‌توان دریافت که در شیب‌های کمتر و یا بازه‌های طولانی‌تر، مقادیر سطح ذخیره برای دبی‌های مختلف بیشتر از شیب‌های کمتر، بازه‌های کوتاه‌تر و یا شیب‌های زیاد است؛ زیرا بازه‌های با شیب کم و یا بازه‌های طولانی دارای عمق آب زیاد و سرعت جریان کم هستند و این باعث می‌شود که طول منحنی برگشت آب بیشتر شده و سطح ذخیره افزایش یابد ولی در کانال‌های پرشیب که کم عمق‌اند و سرعت جریان آب زیاد است، طول منحنی برگشت آب کمتر شده و سطح ذخیره کاهش می‌یابد. مثلاً در بازه شماره چهار در شرایطی مشابه با بازه سه، مقدار سطح ذخیره بیش از بازه شماره سه است که دلیل آن می‌تواند بخاطر تقریباً دو برابر بودن طول بازه چهار نسبت به بازه سه باشد.

وجود سیفون معکوس در بازه‌ها بسته به اینکه در ابتدای بازه و یا انتهای بازه باشد می‌تواند بی‌تأثیر باشد و یا باعث کاهش سطح ذخیره شود. بعنوان مثال در بازه شماره دو که سیفون در انتهای بازه است سطح ذخیره برای 10، 50 و 80 درصد دبی طراحی بترتیب برابر 11365، 6955 و 5507 مترمربع محاسبه شده است. اگر در همین بازه سیفون معکوس در وسط و یا ابتدای بازه باشد مقدار سطح ذخیره به ترتیب برای این سه حالت دبی بهره‌برداری برابر 27436، 8426 و 7581 می‌شد. زیرا در حالتی که سیفون معکوس در انتهای بازه کانال است باعث قطع شدن منحنی برگشت آب می‌شود که در نتیجه سطح

برابر بودن طول بازه چهار، نسبت به بازه سه باشد).

### تنظیم الگوریتم کنترل

مقادیر ضرایب محاسبه شده برای کنترل کننده با استفاده از فرآیند سعی و خطا در جدول 2 ارائه شده است. در این تحقیق محاسبه پارامتر تناسبی کنترل کننده ( $K_p$ ) و پارامتر انتگرالی کنترل کننده ( $K_i$ ) به اندازه‌ای تکرار شد که الگوریتم‌های کنترل بتوانند در کمترین زمان ممکن و با دقت مناسب متغیر کنترل را به مقدار هدف برسانند. مقادیر ضرایب کنترل کننده در آخرین مرحله انجام فرآیند شناسایی سامانه نیز در جدول 3 ارائه شده است.

### بررسی عملکرد الگوریتم کنترل طراحی شده

میانگین شاخص‌های ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های کنترل برای هر بازه از کانال در طول مدت شبیه‌سازی برای الگوریتم کنترل طراحی شده، برای دو مرتبه با انجام فرآیند شناسایی سامانه و مرحله اول با سعی و خطا محاسبه شدند. جدول 4 مقادیر این شاخص‌ها را در دوره یک‌ماهه شبیه‌سازی در کانال EPC نشان می‌دهد.

این بازه‌ها اصطلاحاً بازه‌های کم شیب، عمیق و کوتاه می‌گویند و تنظیم ضرایب کنترل کننده تحت تسلط رفتار رزونانسی جریان آب قرار می‌گیرد.

مقادیر تناوب رزونانس و رزونانس بیشینه در بازه‌های پنج و نه نشان می‌دهد 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 10 و 50 درصد دبی طراحی، رفتار رزونانسی دارد. از دیدگاه مهندسی کنترل و در خصوص کنترل شبکه‌های آبیاری، به این نوع بازه‌ها، بازه‌های کم‌شیب، نسبتاً طولانی و کم عمق می‌گویند. آب در این نوع بازه‌ها کمتر از خود رفتار رزونانسی نشان می‌دهد و فقط در دبی‌های کمتر 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 شماره سه و شیب تقریباً برابر، مقادیر رزونانس بیشینه و تناوب رزونانس صفر است در صورتیکه در بازه شماره سه صفر نیست. دلیل این مسئله می‌تواند مربوط به دو

جدول 2- مقادیر بهینه ضرایب کنترل کننده تناسبی - انتگرالی با استفاده از فرآیند سعی و خطا  
Table 2- Optimum PI controller coefficients values using trial and error process

شماره بازه Reach number	$K_p$	$K_i$	شماره بازه Reach number	$K_p$	$K_i$
1	-4.1	-0.2	8	-3.6	-0.21
2	-4.5	-0.24	9	-3.5	-0.46
3	-3.8	-0.21	10	-3.8	-0.15
4	-3.9	-0.18	11	-4.5	-0.2
5	-4.5	-0.32	12	-4.1	-0.24
6	-4.00	-0.42	13	-4.40	-0.34
7	-4.40	-0.35	14	-4.30	-0.25

جدول 3- مقادیر بهینه ضرایب کنترل کننده تناسبی - انتگرالی با استفاده از فرآیند شناسایی سامانه  
Table 3- Optimum PI controller coefficients values using system identification process

شماره بازه Reach number	$K_p$	$K_i$	شماره بازه Reach number	$K_p$	$K_i$
1	-1.25	-0.08	8	-0.38	-0.003
2	-0.28	-0.0016	9	-0.47	-0.10
3	-0.93	-0.025	10	-0.18	-0.001
4	-0.60	-0.008	11	-0.29	-0.008
5	-0.66	-0.018	12	-0.12	-0.0012
6	-0.30	-0.0035	13	-0.13	-0.0025
7	-0.50	-0.005	14	-0.10	-0.0005

کنترل با فرآیند شناسایی سامانه نسبت به حالت سعی و خطا، کنترل کننده دارای دقت و کارایی بالاتری در کنترل جریان و کاهش

بررسی و مقایسه کمی شاخص‌های ارزیابی الگوریتم کنترل به خوبی نشان می‌دهد که در حالت محاسبه پارامترهای تنظیم الگوریتم

جدول 4- مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد برای سامانه‌های کنترل طراحی شده  
Table 4- Values of performance assessment indices for designed control systems

شماره بازه Reach number	سعی و خطا trial and error	MAE		IAE		STE			
		شماره فرآیند شناسایی سامانه SI process number		سعی و خطا trial and error		شماره فرآیند شناسایی سامانه SI process number			
		1	2	1	2	1	2		
1	0.35	0.025	0.02	0.012	0.0091	0.0082	0.003	0.003	0.003
2	0.67	0.24	0.22	0.025	0.012	0.0104	0.002	0.003	0.002
3	0.52	0.25	0.13	0.0198	0.0102	0.0098	0.002	0.0025	0.002
4	0.92	0.26	0.11	0.089	0.0142	0.0104	0.003	0.003	0.003
5	0.87	0.19	0.11	0.0158	0.0081	0.0077	0.001	0.002	0.001
6	0.76	0.22	0.10	0.021	0.019	0.01	0.002	0.002	0.002
7	0.9	0.41	0.16	0.0167	0.0117	0.0092	0.001	0.002	0.001
8	0.48	0.32	0.12	0.081	0.0115	0.0091	0.002	0.002	0.002
9	0.56	0.23	0.06	0.0297	0.0098	0.0071	0.001	0.001	0.001
10	0.93	0.27	0.13	0.071	0.0104	0.0096	0.000	0.0001	0.000
11	0.96	0.11	0.09	0.064	0.0071	0.006	0.006	0.007	0.006
12	0.91	0.2	0.08	0.092	0.0098	0.0073	0.009	0.0097	0.009
13	0.94	0.09	0.05	0.096	0.010	0.0058	0.002	0.007	0.002
14	0.86	0.14	0.10	0.094	0.0121	0.0082	0.012	0.020	0.012

EPC شبکه آبیاری دوستی پرداخته شد و عملکرد آن بر اساس شیوه بهره‌برداری کانال و شاخصهای استاندارد، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد الگوریتم کنترل تنظیم شده با استفاده از فرآیند شناسایی سامانه (SI)، از دقت و پتانسیل قابل توجهی در کنترل جریان و مستهلک نمودن اغتشاشات حاصل از اختلالات سازه‌ای و هیدرولیکی برخوردار بوده و شرایط تحقق توزیع تقاضامدار و ارتقاء عملکرد سامانه توزیع آب را فراهم می‌نماید. از آنجا که در تحقیق حاضر کانالی نسبتاً طولانی و شامل بازه‌های متعدد و سازه‌هایی چون سیفون معکوس بررسی شد، کارایی الگوریتم PI و فرآیند SI در این شرایط نیز تایید می‌شود.

## نتیجه‌گیری کلی

بکارگیری سامانه‌های کنترل خودکار هر چند در مرحله اجرا با مشکل سرمایه‌گذاری اولیه زیاد مواجه است ولی بعنوان یک ابزار کارا، امکان ارتقای عملکرد تحویل و بهره‌برداری بهینه از ظرفیت شبکه‌های آبیاری را میسر می‌سازد. به همین دلیل پیشنهاد می‌شود متولیان طراحی شبکه‌های آبیاری به طراحی و امکان استفاده از این گونه کنترل کننده‌ها برای شبکه‌ها، توجه داشته باشند. در سامانه کنترل حاضر از کنترل کننده تناسبی- انتگرالی استفاده شد. این کنترل کننده نیاز به محاسبه ضرایب تنظیم الگوریتم کنترل دارد. برای مقایسه بین محاسبه این ضرایب با روش سعی و خطا و روش فرآیند شناسایی سامانه، به طراحی کنترل کننده تناسبی- انتگرالی برای کانال

## منابع

- 1- Baume J.P., Malaterre P. O. and Sau J. 1999. Tuning of PI controllers for an irrigation canal using optimization tools. p 483-500, Workshop on Modernization of Irrigation Water Delivery Systems, October 18-21, 1999. Phoenix, Arizona, USA.
- 2- 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.
- 3- Clemmens A.J., Kacerek T., Grawitz B. and Schuurmans W. 1998. Test cases for canal control algorithms, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 24 (1):23-30.
- 4- 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.
- 5- Montazar A., Isapoor S. 2010. Control Algorithms and Use of them in the Canals of Aghili Irrigation Network: (I) Principal, criteria, and design process, Journal of Soil and Water Research. (In Persian with English abstract)



- 6- Schuurmans J., Clemmens A.J., Dijkstra S., Hof A. and Brouwer R. 1999. Modeling of Irrigation and Drainage Canals for Controller Design, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 125(6):338-344.
- 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.

## Improving the Coefficients of Proportional-Integral Controller Based On System Identification Process on Doosti Irrigation Network

S. M. Seyedmousavi<sup>1</sup>- A. Parvarsh Riz<sup>2\*</sup> - S. Isapour<sup>3</sup>

Received: 04-09-2013

Accepted: 17-06-2015

**Introduction:** The use of automatic control system for managing the conveyance and distribution of water in surface irrigation systems, as a means of improving the management and performance of these systems is essential. Automating networks using the programmable controller provide the implementation of a number of control ways according to different water delivery scenarios. Also the implementation of these systems using sensors and recording water levels by hydraulic devices can supply an accurate data collection of water distribution networks in the long term and can influence the decisions to manage the network. Control systems in irrigation canals include two parts: calculation for adjustment the structures (algorithms or control system software) and application the calculated settings on structures (hardware of control systems). The success of these parts is depending on the ability of control algorithm to determine the control parameters.

**Materials and Methods:** Doosti irrigation network in the plains of Sarakhs is located in the northeast of Iran. In the end of the main canal, two canals has branched which named EPC and WPC2. This study was performed on the EPC canal with the discharge and length of 4.43 m<sup>3</sup>/s and 18.7 km respectively. There are 15 duck-bill check structures along the EPC. Also 14 intake structures and secondary canals are responsible for water distribution between local water users. In this study, the performance of system identification process, SI, in estimation of coefficients of proportional-integral controller and improvement of adjusting the control algorithm was compared with trial and error process. This proportional-integral control algorithm was designed for EPC canal. The efficiency of algorithm was evaluated using the simulation results of several different choices of operating systems with SOBEK hydrodynamic model and computing evaluation indices of control systems. This model can simulate all kinds of structures in water conveyance and distribution networks. In addition to the integrity of this software, two proprietary approach of the model are ability to design the control algorithms for smart irrigation systems and the ability to integrate each of its modules with each other and increase compliance with real systems. Evaluation of designed control algorithm was done using the pattern of the one-month operation, with extreme daily variation to cover the most intense perturbations in canal. To evaluate the performance of the designed control algorithm for investigated scenarios in the canal, the performance evaluation indices of control systems were used.

**Results and Discussion:** The results of SI process show that the delay time for the longest reach is greater than the other. Also the values of delay time show that the smaller discharges produce more delay time. By comparing the storage area for applied discharges for SI process, it was concluded that the amount of storage area for low flows is higher. Because for low flows with fixed target level in upstream the check structures, the length of backwater curve is more and consequently the amount of storage area would be higher. By comparing the amount of resonance frequency and maximum resonance for the potential of 10%, 50% and 80% of the design flow for various scenarios, it is indicated that in low flows the resonant behavior has significant effects on canal reach. The results show that the adjusted control algorithm using identification process, rather than trial and error, has considerable accuracy and high potential to flow control and to damp the perturbation of hydraulic disturbances. Also this algorithm provides the on-demand distribution and promotes the efficiency of water control and distribution systems.

**Conclusion:** Although using automated control systems faced with the problem of high initial investment but as an effective tool, it improves the performance of water delivery and provides the optimal usage of irrigation network capacity. For this reason, it is recommended to custodians of irrigation networks to design and employment of these controllers in irrigation networks with more attention. In present control system IP controller was used. This controller requires the calculation of adjustment coefficients of control algorithm. For comparison between the calculation of these coefficients by trial and error and the identification system, the IP controller for EPC canal of Doosti Irrigation was designed. Then its performance was studied based on the

1, 2- MSc Graduated of Water Structures and Associate Professor of Irrigation and Reclamation Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran

(\* - Corresponding Author Email: parvarsh@ut.ac.ir)

3- Expert of Irrigation, Yekom Consulting Engineers, Tehran

method of canal operation and standard indices. The results indicated that the tuned algorithm control using SI has considerable accuracy and potential to control the flow and to damp the perturbations concluding from structural and hydraulic disturbances. Also this algorithm provides demand oriented distribution and performance promotion of water distribution system. Since in this study a relatively long canal includes multiple reaches and structures such as inverted siphon was studied, the capability of PI and SI process is also confirmed in these situations.

**Keywords:** Irrigation Canal Control, On-demand, Operation of Irrigation Networks, Proportional-integral Controller