

اثر پارامتر شیب کف بر تعیین بهینه ضرایب و عملکرد کنترل کننده PID در کانال‌های آبیاری

شهلا زمانی^{۱*}، عاطفه پرورش‌ریزی^۱ و سعید عیسی‌پور^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۱/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۲/۲)

چکیده

خودکارسازی شبکه‌های آبیاری برای ارتقای عملکرد این شبکه‌ها و به عنوان یکی از روش‌های بهبود بهره‌برداری، ضرورتی است که نیازمند بکارگیری سیستم‌های کنترل است. در این بین، کنترل کننده‌های PID کاربرد زیادی در مناطق مختلف دنیا داشته‌اند، اما تنظیم آنها برای شرایط هندسی و هیدرولیکی مختلف کانال‌ها، همچنان به عنوان مشکل اصلی طراحی محسوب می‌شود. از آنجا که پارامتر شیب کف کانال یکی از عوامل تعیین کننده رفتار دینامیک جریان آب است، در این مطالعه با اعمال تغییر شیب طولی در یک کانال مینا، کنترل کننده پایین دست فاصله‌دار با کاربرد دی‌کوپلینگ و تکنیک تناسبی-انترگالی-دیفرانسیلی پس‌خورد، طراحی و ارزیابی شد. هم‌چنین برای تنظیم کنترل کننده از مشخصه‌های کانال استفاده شد و این مشخصه‌ها با استفاده از رویکرد جدید فرایند شناسایی سیستم تعیین شدند. به منظور طراحی و اجرای الگوریتم‌های کنترل از مدل هیدرودینامیک سوپک در تلفیق با نرم‌افزار مت‌لب استفاده شد و با در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای شیب کف کانال، اثر آن روی رفتار جریان آب و تنظیم کنترل کننده و در نتیجه اثر آن در ضرایب کنترل کننده، بررسی شد. سپس ارزیابی عملکرد کنترل کننده تنظیم شده، در دوره بهره‌برداری مورد نظر و در سناریوهای مختلف، با محاسبه شاخص‌های عملکرد صورت گرفت. به طور کلی نتایج نشان داد که جریان آب در شیب‌های زیاد رفتار رزونانسی کمتری نشان می‌دهد و توانایی این نوع کنترل کننده در کانالی با شیب زیاد، نسبت به شیب‌های ملایم‌تر، کمتر است.

واژه‌های کلیدی: کنترل کانال‌های آبیاری، ضرایب کنترل کننده، شیب طولی، مدل سوپک، شاخص‌های ارزیابی عملکرد

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

۲. مهندسین مشاور یکم، تهران

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: sh.zamani@ut.ac.ir

مقدمه

مورد نظر اعمال شود. در الگوریتم کنترل پیش خورد، مقدار متغیر هدف و اغتشاش برآورد گردیده و وارد الگوریتم کنترل می‌شود و با توجه به آن مقدار متغیر خروجی کنترل تعیین می‌گردد (۹). سیستم‌های کنترل از نظر جهت به کنترل پایین دست و کنترل بالادست تقسیم‌بندی می‌شوند. در کنترل پایین دست سازه کنترل با استفاده از اطلاعات مربوط به پایین دست تنظیم می‌شود ولی در کنترل بالادست تنظیمات مربوط به سازه کنترل با استفاده از اطلاعات بالادست سازه انجام می‌شود (۶). هر سیستم کنترل تکنیک و الگوریتم مربوط به خود را دارد و یکی از روشهای متداول در کانال‌های آبیاری، تکنیک طراحی تناسبی-انتگرالی-دیفرانسیلی (Proportional-Integral-Derivative, PID) است. در این روش کنترل‌کننده با استفاده از انحراف متغیر کنترل شده، انحراف تجمعی و دیفرانسیل انحراف آن، به حداقل کردن خطای بین مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار هدف برای متغیر کنترل شده می‌پردازد (۴).

اجرای سیستم‌های کنترل در کانال‌های آبیاری، از اواخر دهه ۱۹۷۰ نظر تعدادی از مهندسين آبیاری را به خود معطوف ساخت. راجو در سال ۲۰۰۳ به بررسی کنترل اتوماتیک تناسبی-انتگرالی (PI) محلی با الگوریتم کنترل پس‌خورد در یک کانال آزمایشگاهی پرداخت (۱۲). در سال ۲۰۰۵، منتظر و همکاران به ارزیابی کنترل کننده PI مرکزی با منطق کنترل پس‌خورد و پیش‌خورد با کاربرد دی‌کوپلینگ (Decouplers) برای کنترل کانال اصلی نارمادا در هندوستان پرداختند (۱۱). این تکنیک هم‌چنین توسط منتظر و عیسی‌پور در سال ۱۳۸۹ برای کانال غربی شبکه آبیاری عقیلی انجام شد (۲ و ۳). علاوه بر کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی، کنترل‌کننده‌های پیچیده‌تری در شبکه‌های آبیاری توسعه یافته است. بلر در سال ۲۰۱۰، یک کنترل‌کننده پایین دست برای یک بازه از کانال، با استفاده از تئوری کنترل پس‌خورد کمی (Quantitative Feedback Control Theory, QFT) طراحی کرد (۵). ون اورلوپ و همکاران در

یکی از عوامل مؤثر بر عملکرد شبکه‌های آبیاری، خودکارسازی اجرای سیستم‌های کنترل است که تحویل ساده و سستی آب را به خدماتی پیشرفته تغییر می‌دهد و به تحویل آب قابل انعطاف و افزایش ذخیره آب کمک می‌کند (۸). خودکارسازی کانال‌های آبیاری با استفاده از کنترل‌کننده‌های قابل برنامه‌نویسی امکان اجرای چندین روش کنترل را بر طبق سناریوهای مختلف تحویل آب فراهم می‌کند (۱۲). سیستم‌های کنترل خودکار کانال‌های آبیاری شامل دو بخش نرم‌افزاری و سخت‌افزاری هستند. در بخش نرم‌افزاری با استفاده از یک الگوریتم کنترل، میزان تنظیمات سازه‌ها (مثل بازشدگی یک دریچه) محاسبه شده و در بخش سخت‌افزاری، تنظیمات محاسبه شده روی سازه‌ها اعمال می‌شود (۹). مالتر و همکاران در سال ۱۹۹۸ طبقه‌بندی جامعی از مشخصات سیستم‌های کنترل ارائه دادند. این مشخصات شامل متغیرها، منطق کنترل و تکنیک طراحی است. متغیرهای مورد نظر در یک سیستم کنترل، شامل موارد زیر هستند: متغیرهای کنترل‌شونده که با استفاده از الگوریتم‌های کنترل در مقدار هدف تنظیم می‌شوند؛ متغیرهای اندازه‌گیری‌شونده که در کانال اندازه‌گیری می‌شوند و به عنوان ورودی به الگوریتم کنترل داده می‌شوند و متغیرهای خروجی کنترل که در واقع خروجی الگوریتم کنترل هستند و بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در شبکه و الگوریتم کنترل، محاسبه می‌شوند (۹).

منطق کنترل، که با نوع و جهت کنترل مشخص می‌شود، نشان‌دهنده ارتباط بین متغیرهای کنترل‌شونده و متغیرهای خروجی کنترل است. به‌طور کلی سه نوع مختلف از سیستم‌های کنترل وجود دارد که شامل سیستم‌های پس‌خورد (FeedBack)، پیش‌خورد (FeedForward) و یا ترکیبی از آنها هستند. در الگوریتم کنترل پس‌خورد مقدار متغیر مورد کنترل اندازه‌گیری شده و مقدار انحراف این متغیر از مقدار هدف مورد نظر، به الگوریتم کنترل برگشت داده می‌شود تا اصلاحات

۲. مشخصات فیزیکی کانال مورد مطالعه

در این تحقیق برای طراحی و ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده PID و اثر شیب کف کانال بر روی ضرایب این کنترل‌کننده، کانالی با مشخصات فیزیکی مشخص و متداول در طراحی‌ها، در نظر گرفته شد و با تغییر شیب کف در طراحی این کانال، اثر آن بر روی ضرایب کنترل‌کننده بررسی گردید. کانال مورد مطالعه دارای مقطع دوزنقه‌ای و سه سازه تنظیم (و در نتیجه دو بازه بهره‌برداری) است. شکل ۱ مسیر شماتیک این کانال را در محیط مدل سوبک همراه با بازه‌ها و کانال‌های آبیگری نشان می‌دهد. آبیگرها در فاصله ۱/۵ و ۳ کیلومتری از ابتدای کانال قرار گرفته‌اند. کانال‌های آبرسان دارای مقطع دوزنقه‌ای و شیب کف ۰/۰۰۲، عرض کف ۳ متر و شیب جانبی ۱:۱ هستند. رقوم کف هر آبیگر، در ارتفاع ۰/۲۵ متری از کف کانال اصلی قرار گرفته است.

برای شبیه‌سازی کانال مورد مطالعه برای سناریوهای مختلف توسط مدل سوبک، تمامی مشخصات فیزیکی کانال اعم از مقطع کانال، شیب طولی، ضریب زبری مانینگ، سازه‌های تنظیم و آبیگرها در مدول Water Flow شبیه‌سازی شد.

۳. معرفی دوره بهره‌برداری مورد مطالعه

برای ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده، دوره ۵ روزه بهره‌برداری منظور شد. جدول ۱ روند تغییرات دبی آبیگرها و دبی عبوری از سازه‌های تنظیم و به عبارتی سناریوی بهره‌برداری را نشان می‌دهد.

۴. معرفی سناریوهای هیدرولیکی مورد مطالعه

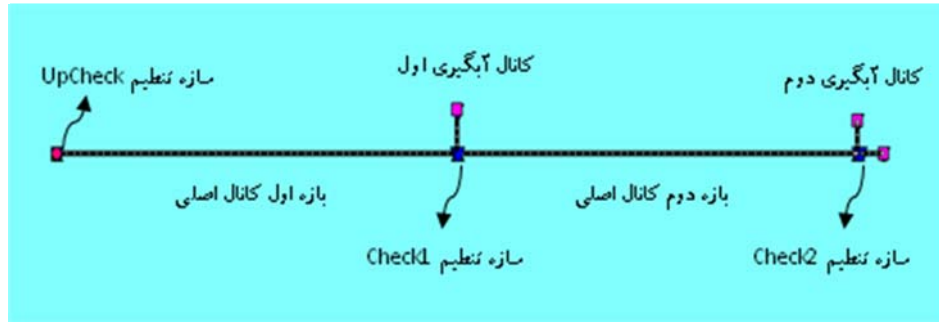
در این تحقیق برای بررسی تأثیر شیب کف کانال (با حفظ ظرفیت کانال) در میزان و نحوه تغییر ضرایب کنترل‌کننده، الگوریتم کنترل مناسب به ازای شیب‌های مختلف طراحی شد و عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی اثر این پارامتر بر روی رفتار جریان آب، کانال مورد مطالعه برای سه سناریوی هیدرولیکی شبیه‌سازی شد. در این سناریوها، با تغییر

سال ۲۰۱۰ مدل کنترل پیش‌بینی شده (Model Predictive Control, MPC) را در ناحیه آبیاری و زهکشی ماریکوپا-استنفیلد (Maricopa-Stanfield) مورد ارزیابی قرار دادند (۱۵). بررسی تحقیقات نشان می‌دهد که تکنیک PID به دلیل سهولت کاربری و دقت مناسب در شبکه‌های آبیاری، بیشتر مورد اقبال قرار گرفته است. گرچه تحقیقات زیادی در استفاده از کنترل‌کننده‌های PID انجام شده است، ولی اجرای موفق سیستم کنترل در شبکه‌های آبیاری کمتر صورت گرفته و یکی از دلایل اصلی این مسئله، پیچیدگی فرایند تنظیم ضرایب کنترل است (۱۴). از آنجا که سیستم 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 (۱). بنابراین با تغییر شرایط هیدرولیکی کانال، الگوریتم کنترل تغییر کرده و نیازمند تنظیم ضرایب کنترل است. هدف تحقیق حاضر بررسی اثر شیب کف روی تنظیم (Tuning) الگوریتم کنترل و ارزیابی عملکرد فرایند کنترل به ازای شیب‌های مختلف است.

مواد و روش‌ها

۱. مدل هیدرودینامیک سوبک

در این مطالعه از مدل سوبک برای شبیه‌سازی سناریوهای مورد مطالعه و طراحی کنترل‌کننده‌های هوشمند استفاده شد. این مدل توسط موسسه هیدرولیک دلفت با همکاری دانشگاه تی‌یو دلفت کشور هلند توسعه یافته است و شامل یک بسته نرم‌افزاری با هفت زیربرنامه متنوع است و با توجه به اهداف شبیه‌سازی، می‌توان از حالت ترکیبی این مدول‌ها نیز استفاده نمود. مدول شبیه‌سازی جریان آب برای شبیه‌سازی جریان‌های ماندگار و غیرماندگار مجاری روباز به کار گرفته می‌شود. در این تحقیق از ترکیب این مدول با مدول کنترل بلادرنگ (Real Time Control, RTC) برای طراحی الگوریتم کنترل استفاده شده است.



شکل ۱. مسیر شماتیک کانال مورد مطالعه در مدل سوبک

جدول ۱. مقادیر دبی آبیگرها و سازه‌های تنظیم در دوره بهره‌برداری

دبی خروجی از بازه دوم (m ³ /s)	دبی ورودی به بازه اول (m ³ /s)	دبی آبیگر دوم (m ³ /s)	دبی آبیگر اول (m ³ /s)	دوره بهره‌برداری
۷/۲	۹	۰/۹	۰/۹	روز اول
۱۴/۴	۱۸	۱/۸	۱/۸	روز دوم
۱۸	۲۲/۵	۲/۲۵	۲/۲۵	روز سوم
۱۴/۴	۱۸	۱/۸	۱/۸	روز چهارم
۷/۲	۹	۰/۹	۰/۹	روز پنجم

سناریوهای مذکور ارائه شده است. شکل‌های ۲، ۳ و ۴ پروفیل سطح آب شبیه‌سازی شده در کانال موردنظر برای سناریوهای S_1 تا S_3 ، به ازای شرایط بهره‌برداری روز اول، توسط مدل سوبک را نشان می‌دهد.

۵. طراحی الگوریتم کنترل برای شرایط هیدرولیکی مفروض الگوریتم کنترل مسیری است که کنترل‌کننده از آن مسیر و با استفاده از متغیرهای اندازه‌گیری شده، خروجی کنترل را محاسبه می‌کند. برای طراحی یک الگوریتم کنترل مناسب باید منطق کنترل و تکنیک طراحی برای آن سیستم کنترل مشخص شود. در تکنیک PID متغیر خروجی کنترل طبق رابطه ۱ با مجموع ترم‌های تناسبی با ضریب K_p ، انتگرالی با ضریب K_i و دیفرانسیلی با ضریب K_d برابر است:

$$u = K_p \cdot e + K_i \cdot \int e \, dt + K_d \cdot \frac{de}{dt} \quad [1]$$

در این رابطه u مقدار متغیر خروجی کنترل در زمان t مقدار

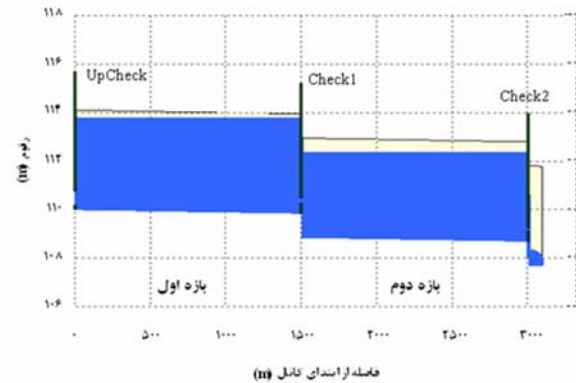
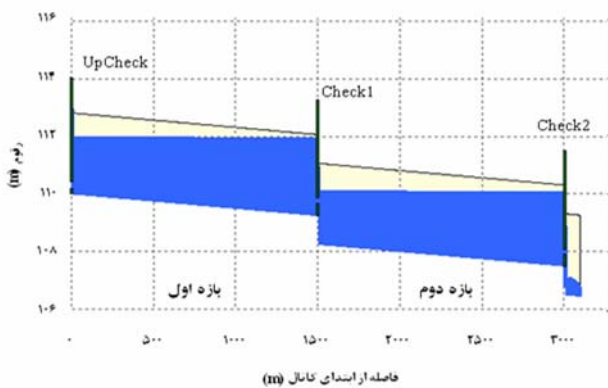
در شیب کف و ثابت نگه داشتن پارامترهای طراحی دیگر کانال، عملکرد الگوریتم کنترل ارزیابی شد.

برای طراحی الگوریتم کنترل و اعمال فرایند کنترل برای هر سناریو مقدار رقوم سطح آب هدف مورد نیاز است. برای طراحی کانال‌های روباز در شبکه‌های آبیاری، با در دست داشتن رقوم سطح آب هدف و رقوم کف کانال مقدار عمق نرمال جریان آب در کانال را محاسبه کرده و در نهایت با قوانین حاکم بر طراحی کانال، ابعاد بهینه کانال را به دست می‌آورند. در این مطالعه نیز مقدار سطح آب هدف در هر سناریو برابر با عمق نرمال آب در کانال (به ازای حداکثر ظرفیت طراحی کانال یعنی دبی ورودی به کانال ۴۵ و دبی هر آبیگر ۴/۵ مترمکعب بر ثانیه) به علاوه ۰/۲ متر (به دلیل افزایش عمق در بخش برگشت آب در انتهای هر بازه) در نظر گرفته شد.

در جدول ۲ پارامترهای طراحی کانال مورد مطالعه برای

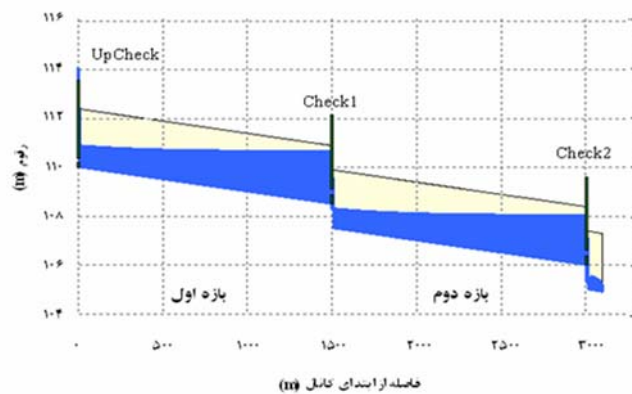
جدول ۲. مقادیر پارامترهای طراحی کانال برای سناریوهای هیدرولیکی مورد نظر

رقوم سطح آب هدف (m)		ضریب زبری n	عمق کانال (m) d	شیب جانبی z	عرض کف (m) b	شیب کف s	نام سناریو
بازه اول	بازه دوم						
۱۱۲/۳	۱۱۳/۷	۰/۰۲۲	۴/۱	۱/۵	۱۰	۰/۰۰۰۱	S ₁
۱۱۰	۱۱۱/۹	۰/۰۲۲	۲/۸	۱/۵	۱۰	۰/۰۰۰۵	S ₂
۱۰۸	۱۱۰/۶	۰/۰۲۲	۲/۴	۱/۵	۱۰	۰/۰۰۰۱	S ₃



شکل ۳. پروفیل سطح آب شبیه‌سازی شده در کانال برای سناریوی S₂

شکل ۲. پروفیل سطح آب شبیه‌سازی شده در کانال برای سناریوی S₁



شکل ۴. پروفیل سطح آب شبیه‌سازی شده در کانال برای سناریوی S₃

نوع کنترل‌کننده پایین‌دست فاصله دار با کاربرد دی‌کوپلینگ و تکنیک تناسبی-انتگرالی-دیفرانسیلی پس‌خورد (Distant Downstream Proportional Integral Derivative Feedback

انحراف متغیر اندازه‌گیری شده از متغیر هدف در زمان t ، K_p ضریب اثر نسبت تناسبی، K_i ضریب اثر نسبت انتگرالی و K_d ضریب اثر نسبت دیفرانسیلی است. کنترل‌کننده مورد مطالعه از

تأخیر (Delay time)، سطح ذخیره (Storage area) و مشخصه‌های رزونانسی آن (شامل تناوب رزونانس (Resonance Frequency) و رزونانس ماکزیمم (Peak)) باید مشخص شوند. مشخصه‌های کانال با استفاده از فرآیند شناسایی سیستم (System Identification, SI) و برای شبیه‌سازی ۱۰٪، ۵۰٪، و ۸۰٪ دبی طراحی کانال، به دست می‌آید. روابطی که برای محاسبه ضرایب کنترل تناسبی و انتگرالی توسط محققین توسعه یافته‌اند به صورت زیر هستند (۱۳):

$$K_p = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{A_s \cdot \omega_p}{R_p}} \quad [2]$$

$$K_i = \frac{T_c \cdot \omega_p}{12 \cdot R_p} \quad [3]$$

در این روابط T_c گام زمانی کنترل بر حسب ثانیه، A_s سطح ذخیره بر حسب متر مربع، R_p رزونانس ماکزیمم (در جریان حداقل) و ω_p تناوب رزونانس بر حسب رادیان بر ثانیه است. مقدار بهینه ضریب K_d نیز، با ارزیابی معیار عملکرد ارائه شده توسط پیربائوم و همکاران (۴) به دست آمد. برای این کار فرآیند کنترل برای ضرایب دیفرانسیلی مختلف روی کانال مورد مطالعه اعمال شد و ضریبی انتخاب شد که دارای کمترین مقدار معیار عملکرد (۵) بود:

$$\xi = \sum_{i=1}^n \int_0^T [(y_i - y_{ii})^2 + \delta GL_i^2] dt \quad [4]$$

که در این رابطه ξ معیار عملکرد، n تعداد بازه، T طول سناریوی بهره‌برداری، y سطح آب اندازه‌گیری شده، y_i سطح آب هدف و δGL تغییرات بازشدگی سازه‌های تنظیم است.

نتایج و بحث

۱. نتایج کاربرد شناسایی سیستم (SI) در تعیین مشخصه‌های کانال برای سناریوهای مورد بررسی
فرآیند شناسایی سیستم برای تعیین مشخصه‌های بازه‌های کانال

Control with Decouplers) است. الگوریتم این کنترل‌کننده در قالب سه m-file در نرم‌افزار مت‌لب (MATLAB) نوشته شده است. این کنترل‌کننده با استفاده از اندازه‌گیری واقعی تراز آب پایین‌دست سازه تنظیم، به محاسبه و ارسال مقادیر تغییرات دبی جریان به عنوان خروجی کنترل برای سازه تنظیم بالادست، به کنترل تراز آب پایین‌دست سازه می‌پردازد. کنترل‌کننده، از یکی از الگوریتم‌های فرعی برای به دست آوردن دبی سازه‌های تنظیم استفاده می‌کند و با تغییرات دبی به دست آمده از الگوریتم کنترل اصلی، دبی نهایی سازه تنظیم را برای گام بعدی کنترل اعمال می‌کند. در الگوریتم فرعی دیگر، کنترل‌کننده با به کارگیری رابطه حاکم بر هیدرولیک سازه به صورت معکوس عمل نموده و با استفاده از دبی محاسبه شده توسط کنترل‌کننده، به محاسبه مقدار بازشدگی سازه تنظیم می‌پردازد.

یکی از مزایای اصلی این کنترل‌کننده استفاده از تکنیک دی‌کوپلینگ است که باعث می‌شود سیستم کنترل موضعی به کنترل سراسری تبدیل شود. در این کنترل‌کننده با کوپل کردن بازه‌ها، هرگونه انحراف تراز آب به ساختار الگوریتم کنترل وارد و خروجی کنترل متناسب با آن برای انحلال انحراف، محاسبه شده و به طور مستقیم به بازه بالادست فرستاده می‌شود. یعنی با کاربرد دی‌کوپلینگ، اثر یک اختلال به طور مستقیم در نظر گرفته می‌شود و نه به صورت اثر این اختلال در تراز آب. برای کاهش اثر حرکت نوسانی آب در بین دو سازه تنظیم، اعمال فیلتر به ساختار الگوریتم کنترل ضروری است. در این مطالعه برای طراحی الگوریتم کنترل، از فیلتر پایین‌گذر مرتبه اول (First Order Low Pass Filter) برای متغیرهای اندازه‌گیری شده که در امواج رزونانسی آب نقش غالب دارند، استفاده شد. منظور از رفتار رزونانسی جریان آب امواج ناشی از فعالیت‌های بهره‌برداری در سطح آب بین دو سازه تنظیم است. این فیلتر با استفاده از یک ضریب ثابت امواج رزونانسی آب را فیلتر می‌کند (۱۴). هم‌چنین برای تنظیم ضرایب K_p و K_i از مدل انتگرالی-تأخیری شوئرمانز (۱۳) استفاده شد. برای تعیین مقادیر بهینه این ضرایب، مشخصه‌های کانال نظیر زمان

برای هیچ‌کدام از دبی‌ها صفر نیست. معمولاً برای دبی‌های حداکثر به دلیل سرعت زیاد در کانال، مقدار تناوب رزونانس رزونانس ماکزیمم صفر است. ولی در این سناریو به علت شیب کم کانال، جریان آب حتی در دبی‌های زیاد هم رفتار رزونانسی دارد. به این کانال‌ها اصطلاحاً کم شیب و عمیق (Deep and Flat Canals) می‌گویند. در این کانال‌ها تنظیم ضرایب کنترل‌کننده بیشتر تحت تسلط رفتار رزونانسی جریان آب است. مقادیر تناوب رزونانس و رزونانس ماکزیمم در سناریو S_2 نشان می‌دهد که با افزایش شیب کانال سرعت جریان آب افزایش یافته و کانال رفتار رزونانسی کمتری از خود نشان می‌دهد. ولی در این سناریو هنوز جریان آب در ظرفیت‌های 10% و 50% دبی طراحی، رفتار رزونانسی دارد. در سناریوی S_3 به دلیل شیب زیاد، سرعت آب در کانال افزایش یافته و کانال رفتار رزونانسی خیلی کمی از خود نشان می‌دهد. از دیدگاه مهندسی کنترل این نوع کانال‌ها، شیب‌دار و کم عمق (Steep and Shallow Canals) تلقی می‌شوند. آب در این نوع بازه‌ها کمتر رفتار رزونانسی دارد و فقط در دبی‌های پایین این رفتار دیده می‌شود (مقادیر تناوب رزونانس و رزونانس ماکزیمم به غیر از بازه شماره دو، با دبی 10% طراحی، صفر به دست آمده است). فرآیند تنظیم الگوریتم کنترل در این نوع کانال‌ها تحت تسلط زمان تأخیر است.

۲. تنظیم الگوریتم کنترل برای سناریوهای مورد بررسی

در این مطالعه برای تعیین K_p و K_i از قوانین تنظیم شوثرمانز (۱۳) و مدل هیدرودینامیک سوپک استفاده شد. این ضرایب برای سناریوهای مختلف از روابط ۲ و ۳ به دست می‌آیند. برای تعیین مقدار بهینه ضریب K_d ، بعد از به دست آوردن مقادیر بهینه ضرایب تناسبی و انتگرالی، فرآیند کنترل برای ضرایب K_d برابر با $0/3$ ، $0/5$ و $0/7$ ، برای سناریوهای مختلف اعمال شد و ضریبی انتخاب شد که دارای کمترین مقدار معیار عملکرد بود (رابطه ۴) که مقدار این ضریب برای سه سناریو $0/3$ به دست آمد. جدول ۴ مقادیر بهینه ضرایب الگوریتم کنترل را نشان می‌دهد. با توجه به تنظیم مناسب ضرایب تناسبی و

جهت تنظیم الگوریتم کنترل به کار برده می‌شود. زمان تأخیر به عنوان یکی از این مشخصه‌ها، مدت زمان عبور یک موج از بخش یکنواخت بازه کانال و تأثیر در بخش منحنی برگشت این بازه از کانال را نشان می‌دهد. مقادیر زمان تأخیر برای ظرفیت‌های 10% ، 50% و 80% دبی طراحی، در جدول ۳ برای سناریوهای مورد نظر آمده است و نشان می‌دهد که دبی‌های کمتر، زمان تأخیر بالایی دارند. دلیل آن می‌تواند کاهش سرعت حرکت آب در دبی‌های کم باشد. مشخصه دیگری که با فرایند SI بدست می‌آید سطح ذخیره است که برای تعیین ضرایب کنترل‌کننده به کار برده می‌شود. با مقایسه سطح ذخیره برای درصد دبی‌های اعمال شده برای SI، مشخص می‌شود که مقدار سطح ذخیره برای دبی‌های کم بیشتر است، زیرا برای دبی‌های کم و با عمق هدف ثابت در بالادست سازه‌های تنظیم، طول منحنی برگشت آب (Back Water) بیشتر است. با مقایسه داده‌های جدول ۳ در سناریوهای مختلف می‌توان دریافت که در شیب‌های کم، مقادیر سطح ذخیره برای دبی‌های مختلف بیشتر از شیب‌های زیاد است، چرا که کانال‌های با شیب کم دارای عمق آب زیاد و سرعت جریان کم هستند و این مسئله باعث می‌شود که طول منحنی برگشت آب بیشتر شده و سطح ذخیره افزایش یابد. برای افزایش کارایی کنترل‌کننده در انحلال اغتشاشات و هم‌چنین افزایش پایداری آن در برابر رفتار رزونانسی جریان آب، استفاده از مشخصه‌های رزونانسی سیستم پیشنهاد می‌گردد (۱۰). با مقایسه مقادیر تناوب رزونانس و رزونانس ماکزیمم در ظرفیت‌های 10% ، 50% و 80% 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.

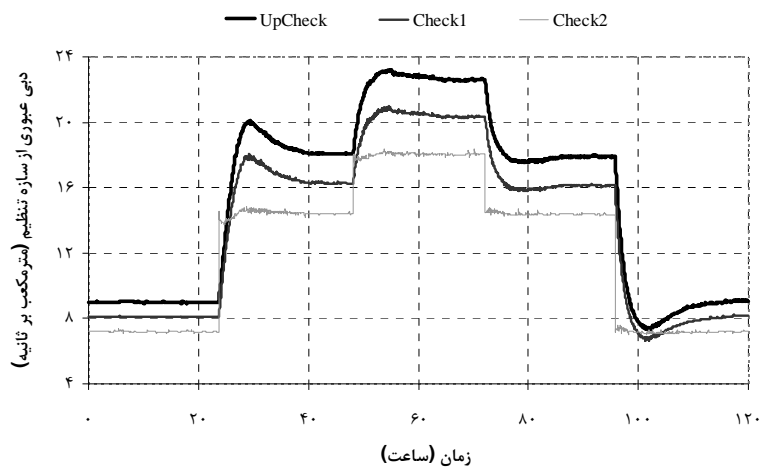
با مرور یافته‌های جدول ۳ می‌توان دریافت که در سناریوی S_1 به دلیل شیب کم، مقادیر تناوب رزونانس و رزونانس ماکزیمم

جدول ۳. پارامترهای تعیین شده توسط SI برای سناریوهای مورد بررسی

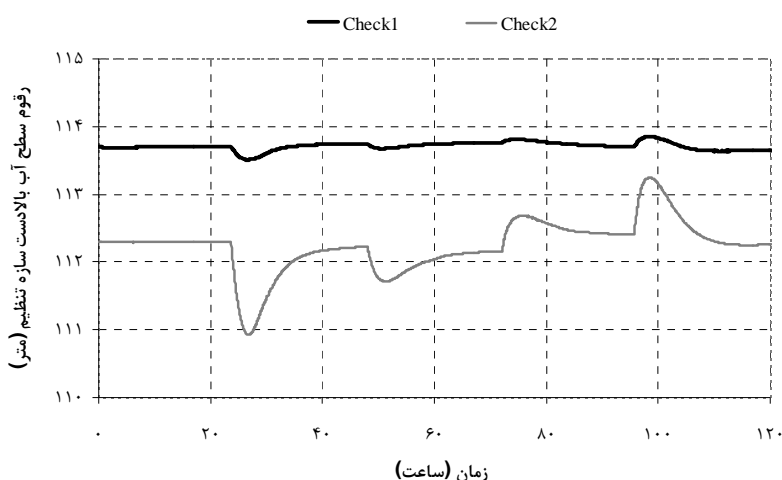
اسم سناریو	درصد دبی طراحی	سطح ذخیره (m^2)		زمان تأخیر (s)		رزونانس ماکزیمم		تناوب رزونانس (rad/s)	
		بازه اول	بازه دوم	بازه اول	بازه دوم	بازه اول	بازه دوم	بازه اول	بازه دوم
S ₁	٪۱۰	۳۶۱۱۶	۳۰۲۴۸	۲۴۰	۲۴۰	۰/۰۸۰۹	۰/۱۱۱۵	۰/۰۱۱۱	۰/۰۱۰۷
	٪۵۰	۲۷۴۳۲	۴۲۲۳۳	۱۲۰	۲۴۰	۰/۰۳۹۵	۰/۰۴۸۲	۰/۰۱۱۵	۰/۰۱۰۵
	٪۸۰	۳۰۳۴۵	۲۸۸۳۵	۱۸۰	۱۸۰	۰/۰۳۰۳	۰/۰۳۵۰	۰/۰۱۰۸	۰/۰۱۰۶
S ₂	٪۱۰	۲۴۱۹۹	۲۲۷۱۴	۳۰۰	۱۸۰	۰/۰۸۰۸	۰/۰۷۹۶	۰/۰۰۸۷	۰/۰۰۸۶
	٪۵۰	۲۲۸۰۶	۲۴۵۷۲	۲۴۰	۱۸۰	۰/۰۲۲۹	۰/۰۱۹۶	۰/۰۰۷۹	۰/۰۰۸۴
	٪۸۰	۱۹۸۹۷	۱۶۹۳۴	۱۸۰	۲۴۰	۰	۰	۰	۰
S ₃	٪۱۰	۱۸۲۱۳	۱۷۰۵۶	۳۶۰	۳۶۰	۰	۰/۰۲۹۲	۰	۰/۰۰۷۵
	٪۵۰	۱۴۶۴۴	۱۲۱۹۶	۲۴۰	۲۴۰	۰	۰	۰	۰
	٪۸۰	۱۴۷۲۶	۱۵۷۴۵	۲۴۰	۲۴۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۴. ضرایب الگوریتم کنترل طراحی شده برای سناریوهای مورد بررسی

اسم سناریو	شماره بازه	K_p	K_i	K_d
S ₁	بازه اول	۶/۱۸۰۵	۰/۴۴۸۷	۰/۳
	بازه دوم	۴/۴۸۴۳	۰/۲۸۲۱	۰/۳
S ₂	بازه اول	۶/۱۸۸۱	۰/۶۷۱۴	۰/۳
	بازه دوم	۶/۲۸۱۴	۰/۷۳۷۰	۰/۳
S ₃	بازه اول	۶/۶۵۶۴	۰/۴۵۳۸	۰/۳
	بازه دوم	۵/۵۴۳۶	۰/۳۷۸۰	۰/۳



شکل ۵. تغییرات شدت جریان عبوری از سازه‌های تنظیم (S₁)



شکل ۶. تغییرات رقوم سطح آب بالادست سازه‌های تنظیم (S₁)

از تغییرات دبی آبیگرها ناشی می‌شود مناسب است. با افزایش شیب کف سطح ذخیره کمتر شده و این باعث می‌شود که کنترل‌کننده در این شیب‌ها توانایی انحلال اثر اختلالات وارده را به صورت کامل نداشته باشد.

شکل‌های ۶، ۹ و ۱۲ روند تغییرات رقوم سطح آب بالادست سازه‌های تنظیم را نشان می‌دهد. وضعیت تغییرات رقوم سطح آب در این شکل‌ها بیانگر آن است که مقادیر هدف در بازه اول بر اثر اعمال هر گونه اغتشاش، با اجرای سیستم کنترل طراحی شده و با تغییر بازشدگی سازه‌های تنظیم توسط کنترل‌کننده با دقت و سرعت بالاتری نسبت به بازه دوم قابل دستیابی است. برای سازه تنظیم Check2 کنترل حجم در نظر گرفته شد تا مقدار آب مشخصی از این دریچه عبور کند. تأثیر همزمان بازشدگی دریچه سازه تنظیم Check1 و Check2 باعث می‌شود که کنترل‌کننده بتواند در بازه دوم به خوبی کنترل را انجام دهد.

۴. ارزیابی کمی عملکرد الگوریتم کنترل طراحی شده برای

سناریوهای مورد بررسی

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم کنترل طراحی شده برای سناریوهای مورد بررسی در کانال مورد مطالعه، از شاخص‌های

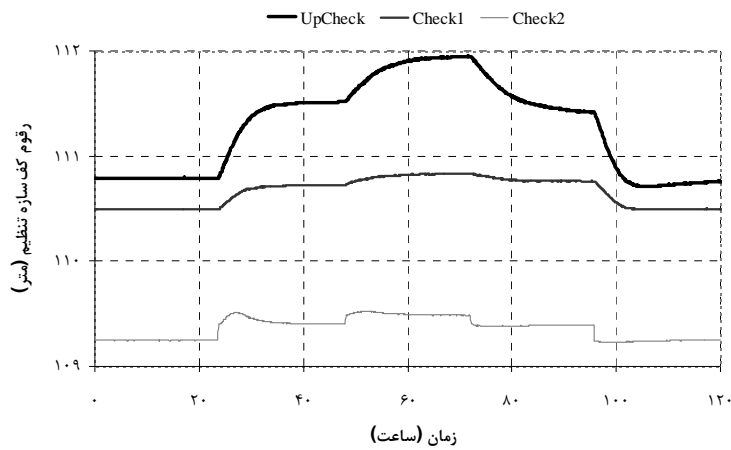
انتگرالی در نتیجه کاربرد روش تعیین مشخصه‌های سیستم برای تنظیم کنترل‌کننده‌ها، اعمال مقدار K_p در عملکرد الگوریتم کنترل طراحی شده تأثیر بسزایی ندارد.

۳. بررسی نتایج الگوریتم طراحی شده برای سناریوهای مورد

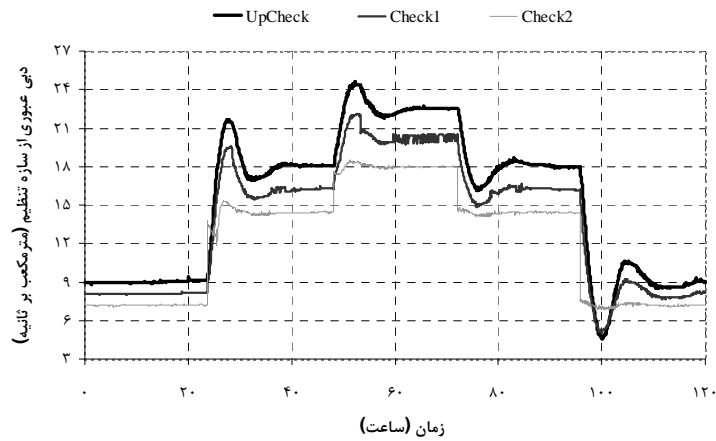
بررسی

برای ارزیابی نتایج کنترل‌کننده، تغییرات شدت جریان عبوری از سازه‌های تنظیم، رقوم سطح آب بالادست سازه‌های تنظیم که تحت کنترل قرار گرفته‌اند و روند تغییرات بازشدگی سازه‌های تنظیم در هر یک از بازه‌های کانال در دوره بهره‌برداری تعریف شده، مورد بررسی قرار گرفت. شکل‌های ۵ تا ۱۳ منحنی‌های مربوط به هر کدام از این تغییرات را برای سناریوهای مختلف نشان می‌دهد.

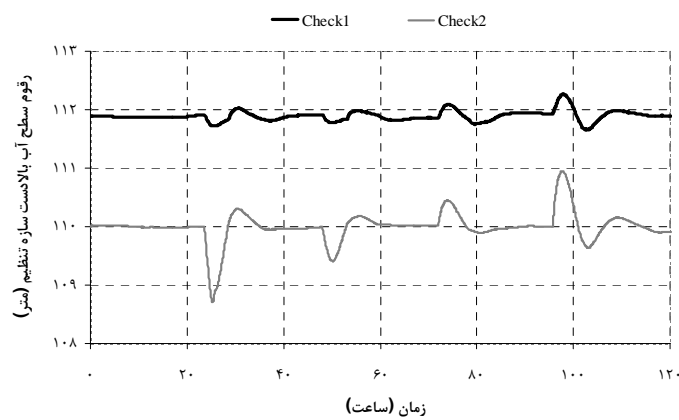
بررسی نحوه تغییرات دبی سازه‌های تنظیم برای سناریوهای مختلف در شکل‌های ۵، ۸ و ۱۱ نشان می‌دهد که این تغییرات با روند بهره‌برداری و تغییرات دبی آبیگرها که در جدول ۱ ارائه شده است، منطبق است. این نمودارها نشان می‌دهد که کنترل‌کننده برای کانال‌های با شیب کم کنترل سازه‌های تنظیم را بهتر انجام داده است. همان‌طور که قبلاً گفته شد سطح ذخیره برای انحلال اثر اختلالات تراز آب که



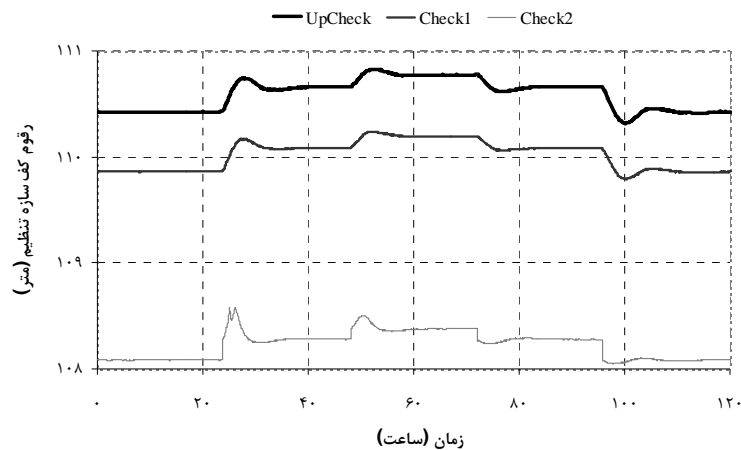
شکل ۷. تغییرات بازشدگی سازه‌های تنظیم (S_1)



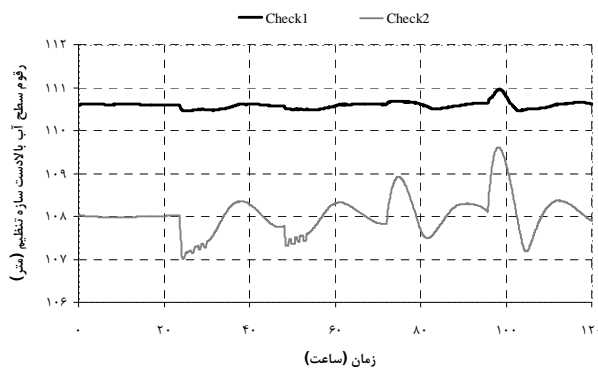
شکل ۸. تغییرات شدت جریان عبوری از سازه‌های تنظیم (S_2)



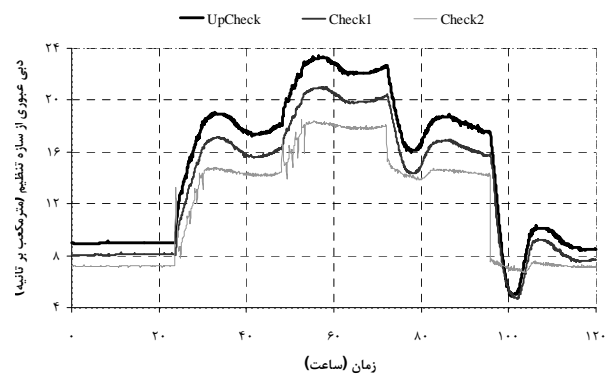
شکل ۹. تغییرات رقوم سطح آب بالادست سازه‌های تنظیم (S_2)



شکل ۱۰. تغییرات بازشدگی سازه‌های تنظیم (S₂)



شکل ۱۲. تغییرات رقوم سطح آب بالادست سازه‌های تنظیم (S₃)



شکل ۱۱. تغییرات شدت جریان عبوری از سازه‌های تنظیم (S₃)

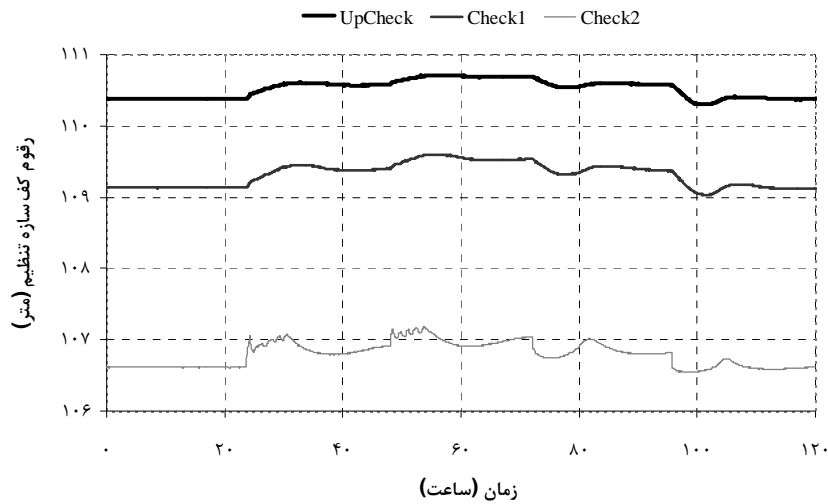
$$STE = \frac{\Delta t}{(t_0 + \Delta t) \cdot y_i} \sum_{t=T-t_0}^T |y - y_i| \quad [V]$$

در روابط فوق y عمق آب محاسبه شده از نتایج شبیه‌سازی در زمان t ، y_i عمق آب هدف، Δt گام زمانی تنظیم، T بازه زمانی شبیه‌سازی و t_0 برابر ۲ ساعت می‌باشد. جدول ۵ مقادیر این شاخص‌ها برای الگوریتم کنترل طراحی شده در سناریوهای مختلف در دوره بهره‌برداری مورد نظر را نشان می‌دهد. بررسی و مقایسه مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد نشان می‌دهد که در هر سناریو مقادیر این شاخص‌ها برای بازه دوم بیشتر به دست آمده است و این به دلیل اثر کنترل حجم سازه تنظیم

ارزیابی عملکرد سیستم‌های کنترل استفاده شد. این شاخص‌ها شامل ماکزیمم قدر مطلق خطا (Maximum Absolute Error, MAE)، انتگرال قدر مطلق بزرگی خطا (Integral of Absolute Magnitude of Error, IAE) و خطای برگشت به حالت ماندگار (Steady State Error, STE) هستند (V)، که از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$MAE = \frac{\max(|y - y_i|)}{y_i} \quad [5]$$

$$IAE = \frac{\Delta t / T \sum_{t=0}^T |y - y_i|}{y_i} \quad [6]$$



شکل ۱۳. تغییرات بازشدگی سازه‌های تنظیم (S_3)

جدول ۵. شاخص‌های ارزیابی عملکرد سیستم کنترل طراحی شده برای سناریوهای مورد بررسی

اسم سناریو		MAE		IAE		STE	
بازه اول	بازه دوم	بازه اول	بازه دوم	بازه اول	بازه دوم	بازه اول	بازه دوم
S_1	۰/۰۵	۰/۳۸۱	۰/۰۱۱	۰/۰۶۹	۰/۰۱۳	۰/۰۱	
S_2	۰/۱۳۷	۰/۵۱۴	۰/۰۲۳	۰/۰۵۴	۰/۰۰۱	۰/۰۳۷	
S_3	۰/۱۷۱	۰/۸۰۷	۰/۰۲۶	۰/۱۵۲	۰/۰۱۹	۰/۰۲۴	

سیستم‌های آبیاری به دلیل افزایش انعطاف پذیری تحویل آب یکی از گزینه‌های مؤثر برای مدیریت بهینه از شبکه‌های آبیاری به‌شمار می‌رود. در این تحقیق کنترل‌کننده پایین‌دست فاصله دار با کاربرد دی‌کوپلینگ و تکنیک PID پس‌خورد، برای کانالی با ۳ سازه تنظیم و دو بازه آبیاری طراحی و تنظیم شد. برای تنظیم کنترل‌کننده از روش تعیین مشخصه‌های کانال با فرآیند SI استفاده شد. مشخصه‌های کانال نیز خود به شرایط و پارامترهای هیدرولیکی کانال وابسته هستند. در این مطالعه شیب کف کانال به عنوان یکی از پارامترهای هیدرولیکی تأثیر گذار بر روی رفتار جریان آب در نظر گرفته و اثر آن روی تنظیم کنترل‌کننده بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش

آخر در بازه دوم است. مقدار شاخص MAE برای بازه اول به ترتیب برای این سه سناریو، ۰/۰۵، ۰/۱۳۷ و ۰/۱۷۱ است، که با مقایسه آنها می‌توان دریافت که با افزایش شیب کانال مقادیر این شاخص‌ها افزایش می‌یابند و این موضوع، توانایی عملکرد الگوریتم کنترل طراحی شده برای انحلال اختلالات در شیب‌های مختلف را نشان می‌دهد. در کانال‌های شیب‌دار یعنی در سناریوی S_3 ، به دلیل سطح ذخیره کم، کنترل‌کننده توانایی کمتری نسبت به سناریوهای دیگر در انحلال اختلالات دارد.

نتیجه‌گیری

استفاده از کنترل‌کننده‌های هوشمند برای کنترل خودکار

شیب کف کانال، سرعت جریان آب افزایش یافته و سطح ذخیره در کانال کاهش می‌یابد. با کاهش سطح ذخیره، توانایی کنترل‌کننده PID در انحلال اثر اختلالات تراز آب که ناشی از دبی آبیگرها است، کمتر می‌شود. بنابراین، پیشنهاد می‌شود در شیب‌های زیاد از کنترل‌کننده‌هایی غیر از کنترل‌کننده‌های کلاسیک استفاده شود.

منابع مورد استفاده

۱. عیسی‌پور، س. و ع. منتظر. ۱۳۸۸. ارزیابی عملکرد دو الگوریتم کنترل در بهبود فرایند بهره‌برداری از کانال اصلی غرب شبکه آبیاری دز. مجله علمی- پژوهشی هیدرولیک (۲): ۱-۱۸.
۲. منتظر، ع. و س. عیسی‌پور. ۱۳۹۰a. 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.
۳. منتظر، ع. و س. عیسی‌پور. ۱۳۹۰b. الگوریتم‌های کنترل و کاربرد آن در کانال‌های شبکه آبیاری عقیلی: (۲) ارزیابی عملکرد. مجله تحقیقات آب و خاک ایران ۴۲(۱): ۶۷-۷۶.
4. Baume, J.P., P.O. Malaterre and J. Sau. 1999. Tuning of PI controllers for an irrigation canal using optimization tools. Workshop on Modernization of Irrigation Water Delivery Systems, October 18-21, 1999, in Phoenix, Arizona. P: 483-500.
5. Blair, L.S. 2010. Design of a single-pool downstream controller using quantitative feedback control theory. J. Irrig. and Drain. Eng. 136(10): 685-691.
6. Buyalski, C.P., D.G. Ehler, H.T. Falvey, D.C. Rogers and E.A. Serfozo. 1991. Canal Systems Automation Manual. Volume 1. U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation.
7. Clemmens, A.J., T. Kacerek, B. Grawitz and W. Schuurmans. 1998. Test cases for canal control algorithms. J. Irrig. and Drain. Eng. 24(1): 23-30.
8. Lozano, D., C. Arranja, M. Rijo and L. Mateos. 2010. Simulation of automatic control of an irrigation canal. J. Agric. Water Manage. 97: 91-100.
9. Malaterre, P.O., D.C. Roggers and J. Schuurmans. 1998. Classification of canal control algorithm. J. Irrig. and Drain. Eng. 124(1): 3-10.
10. Miltenburg, I. 2008. Determination of canal characteristics with experimental modeling. MSc. Thesis, College of Civil Eng., Delft Univ. of Technology, The Netherlands.
11. Montazar, A., P.J. Van Overloop and R. Brouwer. 2005. Centralized controller for the Narmada main canal. J. Irrig. and Drain. Eng. 54(3): 79-89.
12. Rijo, M. 2003. Local automatic control modes in an experimental irrigation canal. J. Irrig. and Drain. Sys. 17: 179-193.
13. Schuurmans, J. 1997. Control of water levels in open-channels. PhD. Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands.
14. Van Overloop, P.J., J. Schuurmans, R. Brouwer and C. M. Burt. 2005. Multiple model optimization of proportional integral controllers on canals. J. Irrig. and Drain. Eng. 131(2): 190-196.
15. Van Overloop, P. J., A. J. Clemmens, R. J. Strand, R. M. J. Wagemaker and E. Bautista. 2010. Real-time implementation of model predictive control on Maricopa-Stanfield irrigation and drainage district's WM Canal. J. Irrig. and Drain. Eng. 136(11): 747-756.

Effect of Bottom Slope on Determining Optimum Coefficients and Performance of PID Controller in Irrigation Canals

SH. Zamani¹, A. Parvaresh Rizi¹ and S. Isapour^{2*}

(Received : Feb. 8-2012 ; Accepted : Apr.. 22-2013)

Abstract

Modernization of irrigation canals as an operation improvement tool is essential to promote the performance of canal networks and indeed requires control systems. Proportional integral derivative (PID) algorithms have more applications than the other controllers in different places of the world, but tuning these controllers for different hydraulic conditions of canals is considered as a major problem for designing control algorithms. Since the bottom slope is one of the effective factors in the water flow dynamic behavior, in this research, the distant downstream Proportional Integral Derivative feedback control with decouplers was designed with a change in longitudinal slope in a reference canal and its performance was investigated. The canal characteristics were used to tune this controller and the system identification as a new method was applied for determining canal characteristics. SOBEK hydrodynamic model modulated with MATLAB software was used to design and run the control algorithms, and slope influence on water flow behavior, tuning controller, and coefficients of controller were investigated with different values of slope. Then, controller performance for hypothetical period of operation in various scenarios was evaluated with computation performance indices. The results showed less resonance behavior of water flow and less potential of controller in steep slope.

Keywords: Irrigation canal control, Coefficients of controller, Bottom slope, SOBEK, Performance evaluation indices.

1. Dept. of Irrig. & Reclam., Univ. College of Agric& Natur. Resour. Univ. of Tehran, Tehran, Iran.

2. Yekom Consulting Eng., Tehran, Iran.

*: Corresponding Author, Email: sh.zamani@ut.ac.ir