

ساخت و آزمون سامانه کنترل PID برای کانال‌های آبیاری در مقیاس آزمایشگاهی

کاظم شاهوردی^۱، محمد جواد منعم^{۲*}

۱- دانشجوی دکترای مهندسی سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار گروه مهندسی سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

* تهران، صندوق پستی ۴۸۳۸-۱۴۱۵۵

Monem_mj@modares.ac.ir

چکیده - خودکارسازی سازه‌های کنترل و تنظیم در کانال‌های آبیاری یکی از روشهای ارتقای بهره‌وری، بهبود بهره‌برداری و افزایش انعطاف‌پذیری در شبکه‌ها است. ساخت و آزمون سامانه‌های کنترل خودکار یکی از اولین و مهمترین اقدامات در این زمینه می‌باشد. در این تحقیق سامانه کنترل خودکار استاندارد PID ساخته شد و در فلوم آزمایشگاهی مورد آزمون و بررسی قرار گرفت. سخت‌افزارهای سامانه شامل حسگرهای اندازه‌گیری عمق و بازشدگی دریچه، موتور محرک، دریچه کشویی، قطعات الکترونیکی رابط و کامپیوتر و نرم‌افزار آن شامل الگوریتم کنترل خودکار PID و برنامه Labview می‌شود. برنامه Labview الگوریتم کنترل خودکار PID را به سخت‌افزار سیستم می‌شناساند. برای بررسی کارکرد سامانه کنترل PID ساخته شده، گزینه‌های مختلف تغییرات ناگهانی جریان در بالادست و پایین‌دست اجرا شد و رفتار سامانه کنترل در این شرایط مورد مطالعه قرار گرفت. در نهایت داده‌های حاصل از آزمایشها با استفاده از شاخص‌های حداکثر خطای مطلق (MAE)، میانگین مطلق خطاها (IAE) و زمان عکس‌العمل سامانه (SRT) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده از فناوری ساخته شده و آزمون‌های مربوط نشان می‌دهد که سامانه کنترل خودکار PID و تجهیزات ساخته شده برای کنترل سطح آب در بالادست و پایین‌دست رفتار مناسبی دارد و در سامانه کنترل پایین‌دست عملکرد مطلوب‌تری داشته است. با توجه به رفتار سامانه در مقیاس آزمایشگاهی می‌توان توسعه آن را در کانال‌های آبیاری با استفاده از تجربه‌های حاصل از ساخت تجهیزات توصیه کرد.

کلید واژگان: توسعه فناوری، خودکارسازی، سامانه کنترل خودکار، کانال‌های آبیاری، منطق PID، Labview.

۱- مقدمه

بالتر در تحویل آب در میان محققان مطرح شده است. یکی از بهترین راههای بهبود کارایی و افزایش انعطاف‌پذیری تحویل آب در کانال‌های روباز،

به دلیل پایین بودن کارایی شبکه‌های آبیاری، موضوع بهبود روشهای تحویل و توزیع و تأمین انعطاف‌پذیری

فناوری ساخت این سامانه‌ها توسعه نیافته است. اگر چه تحقیقات زیادی در زمینه سامانه‌های کنترل خودکار به صورت مدل‌های ریاضی و فیزیکی و گاهی در کانال‌های آبیاری انجام شده، اما باید توجه داشت که توسعه محلی سامانه‌های کنترل خودکار و کاربرد آنها در شبکه‌های آبیاری، مستلزم بومی‌سازی فناوری و ساخت تجهیزات و نرم‌افزارهای مورد نیاز و آزمون آنها است. از آنجا که ساخت و آزمون این سامانه‌ها در محیط‌های آزمایشگاهی دقیق‌تر بوده و هزینه کمتری نیز دارد، لذا به منظور توسعه محلی این سامانه‌ها در داخل کشور، لازم است نخست این سامانه‌ها در مقیاس آزمایشگاهی ساخته شده و نتایج آنها ارزیابی شود تا پس از برطرف شدن مشکلات اجرایی، بتوان آنها را در محیط‌های واقعی اجرا کرد.

۲- مواد و روشها

۲-۱- ساخت افزار سامانه

تمامی آزمایشها در فلومی به طول ۱۰ متر و ارتفاع و عرض به ترتیب ۰/۴۵ و ۰/۳ متر اجرا شد. به منظور انجام آزمایشها فلوم به دو بازه تقسیم و در فاصله ۴ متری از ابتدای فلوم دریچه کشویی آب‌بندی شده‌ای نصب شد. ارتفاع و عرض دریچه به ترتیب برابر ۵۰ و ۲۸ سانتی‌متر است و از ورق آلومینیومی به ضخامت ۵ میلی‌متر و به صورت لبه‌تیز ساخته شده است. در کنار دریچه، موتوری نصب شده که به وسیله یک چرخ دنده رابط با دریچه ارتباط داشته و باز و بسته کردن آن را انجام می‌دهد (شکل ۱).

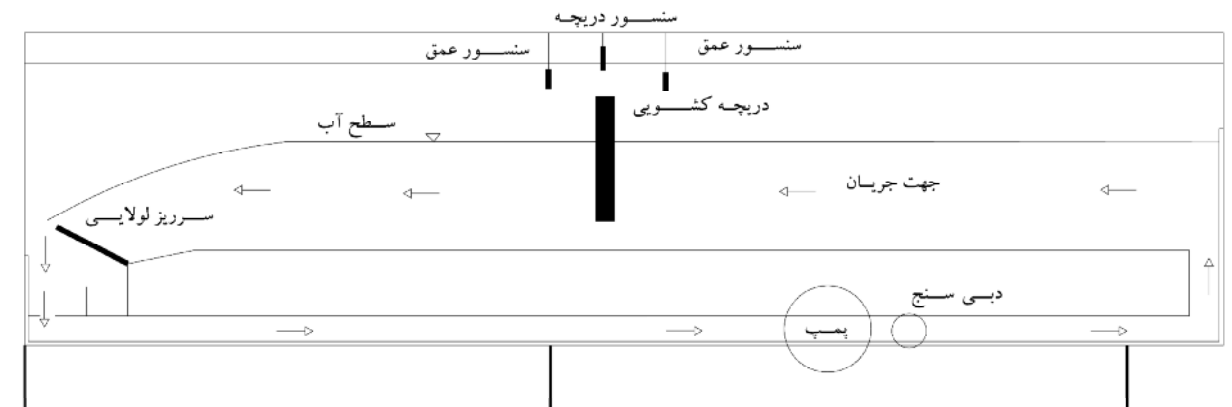
در قسمت ابتدایی فلوم پمپی نصب شده که می‌تواند جریان ۲۰-۰ لیتر بر ثانیه را در داخل فلوم برقرار کند.

خودکارسازی کانال‌ها است. خودکارسازی کانال‌های آبیاری اولین بار با سامانه‌های الکترومکانیکی Littleman و Colvin (Buyalski, 1970) و سپس با دریچه‌های خودکار هیدرولیکی آمیل، آویس و آویو توسعه یافت (منعم و کیاپاشا، ۱۳۸۸). در سالهای اخیر با توسعه مدل‌های ریاضی، ترکیب مدل‌های شبیه‌ساز جریان کانال‌ها با الگوریتم‌های کنترل به‌منظور کنترل خودکار سازه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. در این میان تحقیق در زمینه الگوریتم‌هایی مانند PID¹ با استفاده از روشهای جدید برای محاسبه ضرایب آنها توسعه یافته است (Lozano et al., 2007).

(Wahlin and Liu et al. (1995), Burt et al. (1998) عملکرد این روش کنترلی را با استفاده از مدل‌های ریاضی بررسی و نتایج حاصل را مثبت ارزیابی کردند. منطق کنترل PID از دیرباز در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گرفته و کاربرد آن در کانال‌های آبیاری توسط شرکت فرانسوی سوگرا توسعه یافته و برای کنترل سطح آب در کانال کرکوک-آدهایم عراق به طول ۳۷ کیلومتر و دبی حداکثر ۷۵ متر مکعب بر ثانیه استفاده شده است (Rogers et al., 1998).

عملکرد این روش به‌تازگی در کانال‌هایی در چین (Changde et al., 2007)، پاکستان (Munir et al., 2007) و فرانسه (Litrico et al., 2007) مطالعه و ارزیابی شده و نتایج نشان داده که عملکرد آن در کانال‌های آبیاری قابل قبول است. در ایران مدل ریاضی منطق کنترل بالادست و پایین‌دست PID توسط منعم و مساح (۱۳۸۲) توسعه یافت و با مدل هیدرودینامیکی ICSS² ترکیب شد. مشاهده می‌شود که بیشتر کار در زمینه سامانه‌های کنترل خودکار به‌شکل مدل‌های ریاضی بوده و به‌ویژه در ایران

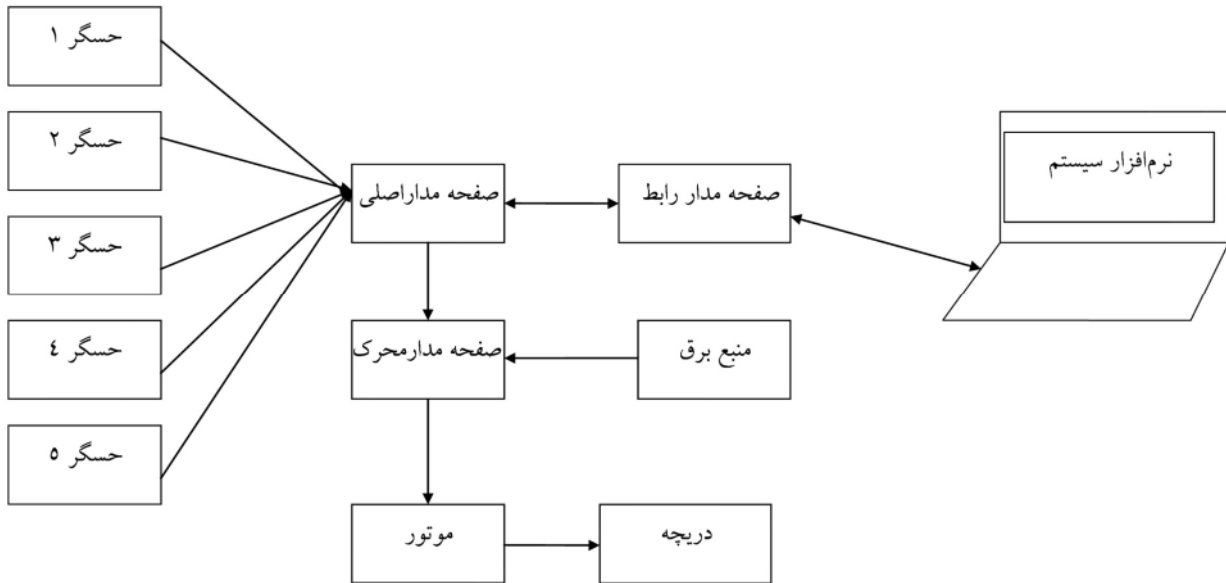
1. Proportional-Integral-Differential
2. Irrigation Conveyance System Simulation



شکل ۱. پلان و پروفیل فلوم آزمایشگاهی

برای تنظیم جریان یک شیر نصب شده که به صورت دستی تنظیم می‌شود. اندازه‌گیری جریان به وسیله دبی‌سنج الکترومغناطیس بر روی لوله جریان ورودی انجام می‌شود. سایر اجزای سخت‌افزار سامانه شامل حسگر عمق و بازشدگی دریچه، صفحه مدار اصلی، صفحه مدار رابط، کامپیوتر و صفحه مدار محرک است. حسگرهای مورد استفاده در این تحقیق از نوع فراصوتی بوده که با استفاده از موج فرستاده و دریافت شده عمق یا بازشدگی دریچه را در فاصله‌های زمانی 0.02 ثانیه با دقت 0.1 میلی‌متر اندازه‌گیری می‌کند. دو حسگر عمق و یک حسگر دریچه استفاده شده است. حسگر بازشدگی دریچه دقیقاً در بالای دریچه و بر روی محور عمودی آن نصب شده است. حسگرهای عمق به فاصله 0.5 متر یکی در بالادست و دیگری در پایین‌دست دریچه نصب شده است. وقتی سامانه کنترل بالادست فعال باشد، حسگر بالادست دریچه فعال بوده و وقتی سامانه پایین‌دست فعال باشد، حسگر پایین‌دست دریچه فعال است. اطلاعات حسگرها به صفحه مدار اصلی و از طریق صفحه مدار رابط به کامپیوتر منتقل می‌شود. نرم‌افزار مورد استفاده در کامپیوتر Labview است که بخش کنترل‌کننده به وسیله آن با سخت‌افزارها در ارتباط است. مقادیری که توسط حسگرها اندازه‌گیری شده و توسط صفحه مدار رابط به کامپیوتر انتقال می‌یابند، توسط نرم‌افزار Labview به واحد طول تبدیل شده و بر اساس آن، میزان تغییر در بازشدگی دریچه محاسبه می‌شود. این مقدار در مرحله بعدی به وسیله Labview به ولتاژ تبدیل می‌شود. خروجی کامپیوتر از طریق صفحه مدار رابط و صفحه مدار اصلی به صفحه مدار محرک داده شده و از طریق آن به موتور منتقل می‌شود. سخت‌افزارهای موجود و نحوه ارتباط آنها در شکل ۲ نشان داده شده است. برای اجرای عملیات بهره‌برداری خودکار، ابتدا مقادیر ثابت موجود در برنامه مانند ضرایب تناسبی، انتگرالی، دیفرانسیلی، بازشدگی اولیه دریچه، عمق هدف، محدوده مجاز تغییر دریچه و عمق، در نرم‌افزار سامانه کنترل خودکار وارد می‌شود. برای سامانه کنترل بالادست تغییر ناگهانی جریان ورودی به صورت افزایش جریان از 5 به 10 لیتر بر ثانیه در مدت زمان 2 ثانیه و کاهش جریان از 5 به 1 لیتر بر ثانیه در مدت زمان 2 ثانیه اجرا شد.

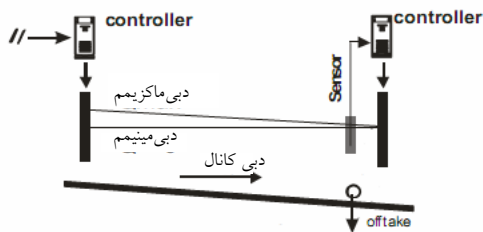
برای تنظیم جریان یک شیر نصب شده که به صورت دستی تنظیم می‌شود. اندازه‌گیری جریان به وسیله دبی‌سنج الکترومغناطیس بر روی لوله جریان ورودی انجام می‌شود. سایر اجزای سخت‌افزار سامانه شامل حسگر عمق و بازشدگی دریچه، صفحه مدار اصلی، صفحه مدار رابط، کامپیوتر و صفحه مدار محرک است. حسگرهای مورد استفاده در این تحقیق از نوع فراصوتی بوده که با استفاده از موج فرستاده و دریافت شده عمق یا بازشدگی دریچه را در فاصله‌های زمانی 0.02 ثانیه با دقت 0.1 میلی‌متر اندازه‌گیری می‌کند. دو حسگر عمق و یک حسگر دریچه استفاده شده است. حسگر بازشدگی دریچه دقیقاً در بالای دریچه و بر روی محور عمودی آن نصب شده است. حسگرهای عمق به فاصله 0.5 متر یکی در بالادست و دیگری در پایین‌دست دریچه نصب شده است. وقتی سامانه کنترل بالادست فعال باشد، حسگر بالادست دریچه فعال بوده و وقتی سامانه پایین‌دست فعال باشد، حسگر پایین‌دست دریچه فعال است. اطلاعات حسگرها به صفحه مدار اصلی و از طریق صفحه مدار رابط به کامپیوتر منتقل می‌شود. نرم‌افزار مورد استفاده در کامپیوتر Labview است که بخش کنترل‌کننده به وسیله آن با سخت‌افزارها در ارتباط است. مقادیری که توسط حسگرها اندازه‌گیری شده و توسط صفحه مدار رابط به کامپیوتر انتقال می‌یابند، توسط نرم‌افزار Labview به واحد طول تبدیل شده و بر اساس آن، میزان تغییر در بازشدگی دریچه محاسبه می‌شود. این مقدار در مرحله بعدی به وسیله Labview به ولتاژ تبدیل می‌شود. خروجی کامپیوتر از طریق صفحه مدار رابط و صفحه مدار اصلی به صفحه مدار محرک داده شده و از طریق آن به موتور منتقل می‌شود. سخت‌افزارهای موجود و نحوه ارتباط آنها در شکل ۲ نشان داده شده است. برای اجرای عملیات بهره‌برداری خودکار، ابتدا مقادیر ثابت موجود در برنامه مانند ضرایب تناسبی، انتگرالی، دیفرانسیلی، بازشدگی اولیه دریچه، عمق هدف، محدوده مجاز تغییر دریچه و عمق، در نرم‌افزار سامانه کنترل خودکار وارد می‌شود. برای سامانه کنترل بالادست تغییر ناگهانی جریان ورودی به صورت افزایش جریان از 5 به 10 لیتر بر ثانیه در مدت زمان 2 ثانیه و کاهش جریان از 5 به 1 لیتر بر ثانیه در مدت زمان 2 ثانیه اجرا شد.



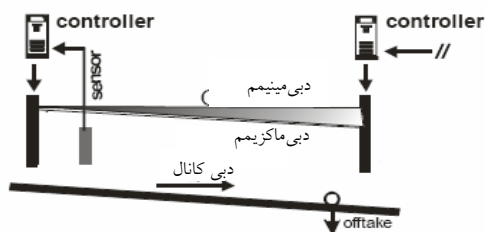
شکل ۲ روند عملیات کنترل خودکار

کمینه ($Q=0$) قرار دارد، در نتیجه سطح آب همیشه پایین تر از عمق عادی کانال خواهد بود.

برای سامانه کنترل پایین دست تغییر ناگهانی جریان خروجی به صورت افزایشی و کاهش شبیه به سناریوهای کنترل بالادست اجرا شد.



(الف) سامانه کنترل بالادست



(ب) سامانه کنترل پایین دست

شکل ۳ سامانه های کنترل بالادست و پایین دست

۲-۲- سامانه PID کنترل بالادست و پایین دست

هدف اصلی در خودکار سازی کانال های آبیاری، تنظیم عمق جریان در عمق هدف است. برای تثبیت سطح آب از سامانه های کنترل استفاده می شود. به طور کلی سامانه های کنترل به دو نوع کنترل بالادست و کنترل پایین دست تقسیم بندی می شوند. اگر سطح آب در بالادست سازه کنترل ثابت نگه داشته شود، کنترل بالادست و اگر در پایین آن کنترل شود، کنترل پایین دست نامیده می شود (شکل های ۳ الف و ب).

با توجه به این شکل ها می توان تفاوت دو سامانه کنترل بالادست و پایین دست را به شرح زیر توضیح داد برای عمق عادی مساوی در کانال، در سامانه کنترل بالادست سطح آب در دبی بیشینه (Q_{max}) بالاتر از آن در دبی

درصد عمق هدف در نظر گرفته شد). کنترل‌کننده دیفرانسیلی سرعت حرکت دریچه را در زمان بهره‌برداری تنظیم می‌کند و با سرعت خاصی آن را باز یا بسته می‌کند. بنابراین نوسانهای شدید سطح آب و ناگهانی در کانال وجود نخواهد داشت (Rogers et al., 1998). به‌طور کلی مجموع کل بازشدگی دریچه (GO) در این منطق کنترل از رابطه ۱ محاسبه می‌شود (Carmona et al., 1998):

$$GO = k_p(Y_t - Y) + k_i \int_0^t (Y_t - Y) + k_d \frac{d}{dt}(Y_t - Y) \quad (1)$$

در این رابطه Y_t عمق هدف، Y عمق اندازه‌گیری شده، k_p ضریب تناسبی، k_i ضریب انتگرالی، k_d ضریب دیفرانسیلی و t زمان است.

ثابت‌های k_p ، k_i و k_d با استفاده از مقادیر اولیه پیشنهادی محققان مختلف و به روش سعی و خطا در مدل فیزیکی تعیین شد. برای این کار دامنه وسیعی از تغییرات جریان مورد آزمون و ارزیابی قرار گرفت و با بررسی رفتار سامانه، مقدار مناسب این ضرایب مشخص شد. برای انتخاب ضرایب مناسب، سه معیار باید در نظر گرفته شود:

- ۱- مقدار بیشینه انحراف عمق از عمق هدف حداقل باشد
- ۲- زمان عکس‌العمل سیستم حداقل باشد ۳- عمق نهایی محاسبه‌شده به عمق هدف بسیار نزدیک باشد. مقادیر مناسب این ضرایب در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ مقادیر نهایی و مناسب به‌دست آمده برای k_p ، k_i و k_d

	منطق کنترل بالادست PID		منطق کنترل پائین‌دست PID	
	$Q=5m^3/s$	$Q=10m^3/s$	$Q=5m^3/s$	$Q=10m^3/s$
k_p	۰/۱	۰/۱۴	۰/۱	۰/۱
k_i	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
k_d	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱

در صورتی که در سامانه کنترل پایین‌دست سطح آب در دبی بیشینه پایین‌تر از آن در دبی کمینه قرار می‌گیرد که باعث افزایش ابعاد کانال و در نتیجه هزینه‌های مربوط می‌شود. در مقابل، سامانه کنترل پایین‌دست قابلیت جوابگویی به‌هنگام به نیازهای پایین‌دست را داشته و به‌صورت "بر حسب تقاضا" عمل می‌کند.

۲-۳- منطق کنترل PID

به‌طور کلی منطق‌های مورد استفاده در سامانه‌های کنترل PID شامل کنترل تناسبی (P^1)، انتگرالی (I^2) و دیفرانسیلی (D^3) است. کنترل‌کننده تناسبی، یکی از مهمترین کنترل‌کننده‌ها بوده که با مقایسه عمق هدف و عمق اندازه‌گیری شده، مقدار تغییر در بازشدگی دریچه را متناسب با میزان انحراف موجود محاسبه می‌کند. وقتی سطح آب در محدوده مجاز قرار بگیرد، سطح آب تقریباً در حالت پایدار خواهد بود، اما در طول دوره بهره‌برداری انحراف عمق از عمق هدف باعث می‌شود که تغییر قابل توجهی در حجم آب تحویلی به آبیگرها به‌وجود آید؛ بنابراین برای تحویل دبی ثابت، کنترل‌کننده انتگرالی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این کنترل‌کننده میانگین تغییرات عمق آب از عمق هدف را در طول دوره بهره‌برداری به حداقل می‌رساند (Munir et al., 2007). بنابراین میزان آبی که به آبیگرها تحویل داده می‌شود مقدار ثابتی خواهد بود. این کنترل‌کننده وقتی فعال می‌شود که سطح آب خارج از محدوده مجاز عمق قرار داشته باشد و به محض وارد شدن سطح آب در درون این محدوده، به‌طور خودکار غیرفعال می‌شود. محدوده مجاز معمولاً به‌صورت درصدی از عمق هدف در نظر گرفته می‌شود (در این تحقیق این مقدار بر اساس تجربه محققان پیشین برابر ۵

1. Proportional
2. Integral
3. Differential

۳- شاخص‌های ارزیابی سامانه کنترل خودکار

برای ارزیابی سامانه کنترل خودکار از شاخص‌های حداکثر خطای مطلق (MAE^1)، میانگین مطلق خطاها (IAE^2) (Clemmens et al., 1998) و زمان عکس‌العمل سیستم (SRT^3) (منعم و مساح، ۱۳۸۲) استفاده شد. شاخص‌های حداکثر خطای مطلق و میانگین مطلق خطاها به صورت زیر معرفی می‌شود:

$$MAE = \frac{\max(|Y_t - Y|)}{Y_t} \quad (2)$$

$$IAE = \frac{\Delta t \sum_0^T (|Y_t - Y|)}{Y_t} \quad (3)$$

T طول دوره بهره‌برداری است و سایر پارامترها پیشتر معرفی شده است. شاخص حداکثر خطای مطلق نشان‌دهنده حداکثر انحراف عمق از عمق هدف است. شاخص میانگین مطلق خطا، نشان‌دهنده متوسط انحراف عمق آب از عمق هدف در طول دوره بهره‌برداری است. فاصله زمانی بین شروع انحراف عمق از محدوده مجاز تا تثبیت دوباره عمق در درون این محدوده را زمان عکس‌العمل سامانه می‌نامند و آن را با SRT نشان می‌دهند. هر چه مقدار این شاخص کمتر باشد، عمق آب سریعتر در داخل محدوده مجاز تثبیت می‌شود. دامنه تغییرات شاخص‌های حداکثر خطای مطلق و میانگین مطلق خطا بین صفر و ۱۰۰ درصد است. در صورتی که تغییرات عمق در درون محدوده مجاز صورت گیرد زمان عکس‌العمل برابر صفر خواهد بود.

۴- نتایج و بحث

برخی تجربیات حاصل از این فناوری را به اختصار می‌توان به شرح زیر بر شمرد:

در زمینه حسگرهای فراصوتی خوشبختانه تجربه موجود در کشور به اندازه‌ای گسترش یافته که به راحتی با هزینه‌ای پایین و با دقت مطلوب قابل ساخت است. نکته مهم در مورد این حسگرها وضعیت و محیط نصب آنها است. نصب باید عمود بر سطح مورد نظر و نزدیک به آن باشد. افزایش فاصله و زاویه موجب افزایش خطا می‌شود. همچنین وجود سر و صدا در محیط و لرزش دستگاه موجب افزایش خطا می‌شود. در زمینه ساخت صفحه مدارها در داخل کشور، مراحل ابتدایی در حال انجام است. صفحه مدار اصلی را می‌توان فقط برای منطق کنترلی خاص یا برای انواع منطق کنترلی متفاوت طراحی کرد و ساخت. در حالت اول هزینه کمتر بوده و در حالت دوم متناسب با انواع منطق کنترل هزینه‌ها افزایش می‌یابد. افزایش تجربه در این زمینه می‌تواند در بهینه‌سازی مدارها و اجزای مورد نیاز و هزینه‌های مربوط مؤثر باشد که این برای تولید صنعتی ضروری است. برای ساخت اجزای مکانیکی محرک دریچه به طوری که با سامانه کنترل خودکار انطباق خوبی داشته باشد، گزینه‌های مختلفی در اختیار است. در این تحقیق از سازوکار چرخ دنده که با دریچه درگیر است، به دلیل سادگی استفاده شد. ابعاد و اندازه چرخ دنده و نوع موتور، تأثیر قابل توجهی بر سهولت و روانی حرکت دریچه دارد. برای توسعه و کاربرد این سامانه در کانال‌های آبیاری باید سازوکارهای مختلف با توجه به ابعاد و اندازه دریچه و کانال بررسی شده و مناسبترین آنها از نظر فنی و به‌ویژه از نظر انطباق با سامانه کنترل خودکار و اقتصادی انتخاب شود.

1. Maximum Absolute Error
2. Integral of Absolute magnitude of Error
3. System Response Time

سامانه تا دقیقه ۴۰ در نمودار آورده شده است. رفتار مشابهی برای دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه در این سامانه و برای دبی‌های ۵ و ۱۰ لیتر بر ثانیه در سامانه کنترل پایین‌دست مشاهده شد که در ادامه، نتایج به‌دست آمده تشریح می‌شود.

مقادیر MAE در این آزمایشها برای سامانه کنترل پایین‌دست بین ۰/۱۵ و ۰/۳۳ و برای سامانه کنترل بالادست بین ۰/۱۵ و ۰/۲۹ به‌دست آمده است. حداکثر انحراف برای سامانه کنترل پایین‌دست در حالت کاهش ناگهانی و برای سامانه کنترل بالادست در حالت افزایش ناگهانی اتفاق افتاده است. دلیل این پدیده شکل موج ایجاد شده کاهشی و افزایشی در دو سامانه است. در سامانه کنترل پایین‌دست کاهش ناگهانی جریان پایین‌دست موجب ایجاد موج مثبت به سمت دریچه شده و در سامانه کنترل بالادست افزایش ناگهانی جریان موجب ایجاد موج مثبت به سمت دریچه شده است. موج مثبت با پیشانی نسبتاً عمودی و بدون تغییر شکل به دریچه می‌رسد و لذا عکس‌العمل سامانه کنترل در مقابل آن شدید بوده و در نتیجه حداکثر انحراف عمق در این حالت ایجاد شده است. همین وضعیت در مورد حد پایینی MAE نیز میان دو سامانه وجود دارد. به این معنا که حداقل انحراف عمق در سامانه کنترل پایین‌دست در شرایط افزایش ناگهانی و برای سامانه کنترل بالادست در شرایط کاهش ناگهانی جریان ایجاد شده که در هر دو حالت موج منفی ایجاد می‌شود.

موج منفی با تغییر شکل در طول کانال و به‌شکل تدریجی به دریچه می‌رسد که موجب عکس‌العمل ملایم سامانه کنترل و کاهش انحراف عمق شده است.

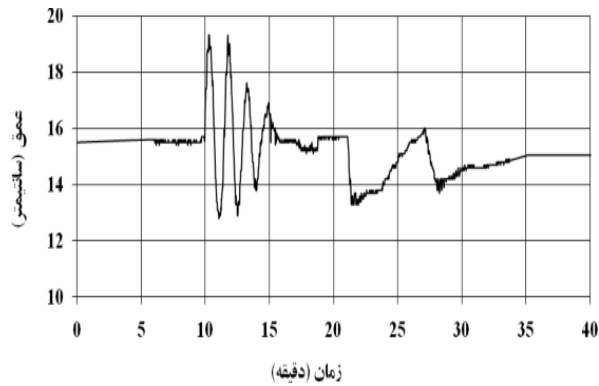
دید می‌شود که حد پایینی MAE برای سامانه کنترل بالادست (۰/۱۵) برابر با مقدار متناظر آن در سامانه کنترل پایین‌دست (۰/۱۵) و حد بالایی آن (۰/۲۹) کمتر از مقدار

نتایج حاصل از آزمون سامانه نشان داد که عملکرد این سامانه نسبت به ضرایب k_p ، k_i و k_d به‌ویژه به ضریب تناسبی حساس بوده و در صورت عدم تعریف صحیح این پارامتر، محاسبات همگرا نخواهد شد. مقدار ضریب تناسبی به‌مراتب بیشتر از ضرایب انتگرالی و دیفرانسیلی است؛ این ضریب حدود ۱۰۰ برابر ضریب انتگرالی و حدود ۱۰۰۰ برابر ضریب دیفرانسیلی است. این نشان می‌دهد که ضریب تناسبی در این سامانه مهمترین ضریب است. این ضرایب باید متناسب با ابعاد و اندازه کانال، دریچه و محدوده تغییرات دبی و عمق تعیین شوند. نتایج سایر محققان در تعیین این ضرایب نشان‌دهنده آن است که نسبت آنها تقریباً مشابه با نتایج حاصل از این تحقیق است.

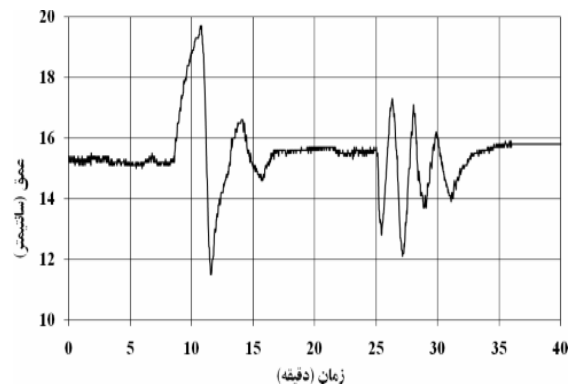
به‌عنوان مثال k_p و k_i در تحقیق Wahlin and Clemmens (2002) به‌ترتیب برابر ۰/۱ و ۰/۰۰۵ به‌دست آمده است. منحنی‌های تغییرات عمق نسبت به زمان مربوط به آزمایش‌ها در شکل‌های ۴، ۵، ۶ و ۷ نشان داده شده است. در این شکل‌ها محور افقی زمان بر حسب دقیقه و محور عمودی عمق بر حسب سانتی‌متر است. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده در سامانه کنترل بالادست با دبی اولیه ۵ لیتر در ثانیه، ابتدا نوعی جریان اولیه ماندگار در داخل فلوم برقرار است. پس از گذشت چهار دقیقه عملیات بهره‌برداری انجام شده و دبی به‌صورت ناگهانی افزایش یافت که بر اثر آن عمق افزایش یافته و سامانه کنترل در مدت زمان حدود ۵ دقیقه (در دقیقه ۹) این تغییرات را تثبیت کرده است. عملیات بهره‌برداری مربوط به کاهش عمق در دقیقه پانزدهم انجام شد و دبی به‌صورت ناگهانی کاهش یافت. سامانه کنترل پس از گذشت حدود ۱۱ دقیقه این تغییرات را کنترل کرده و در زمان ۲۶ دقیقه در محدوده مجاز تثبیت کرد که رفتار

مقادیر IAE در این آزمایشها برای سامانه کنترل پایین دست بین ۰/۰۳ و ۰/۰۵ به دست آمده است، در صورتی که مقدار این پارامتر برای سامانه کنترل بالادست بین ۰/۰۳ و ۰/۰۶ حاصل شده است.

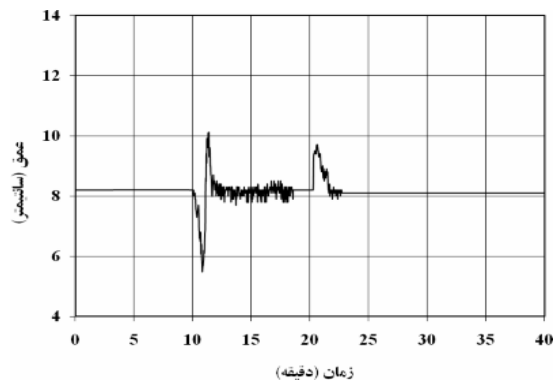
متناظر آن در سامانه پایین دست (۰/۳۳) به دست آمده است. در نتیجه حداکثر انحراف عمق در این دو سامانه تقریباً برابر بوده و اختلاف چندانی ندارند (جداول ۲ و ۳).



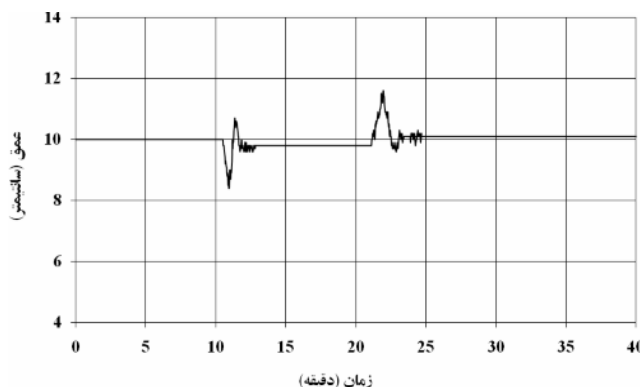
شکل ۴ تغییرات ناگهانی عمق برای سامانه کنترل بالادست ($Q=5l/s$)



شکل ۵ تغییرات ناگهانی عمق برای سامانه کنترل بالادست ($Q=10l/s$)



شکل ۶ تغییرات ناگهانی عمق برای سامانه کنترل پایین دست ($Q=5l/s$)



شکل ۷ تغییرات ناگهانی عمق برای سامانه کنترل پایین دست ($Q=10l/s$)

این پارامتر برای سامانه کنترل پایین دست بین ۰/۶ تا ۱/۳ دقیقه و برای سامانه کنترل بالادست بین ۵/۱۶ تا ۱۲/۸۶ به دست آمده است.

جدول ۳ شاخص‌های ارزیابی برای سامانه

کنترل بالادست PID

	$Q=5l/s$		$Q=10l/s$	
	افزایش ناگهانی	کاهش ناگهانی	افزایش ناگهانی	کاهش ناگهانی
$Y_t(cm)$	۱۵/۵	۱۵/۷	۱۵/۳	۱۵/۶
max Y(cm)	۱۹/۳	۱۶	۱۹/۷	۱۷/۳
min Y(cm)	۱۲/۸	۱۳/۳	۱۱/۵	۱۲/۱
MAE	۰/۲۵	۰/۱۵	۰/۲۹	۰/۲۲
IAE	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۳
SRT۵%(min)	۵/۱۶	۱۲/۸۶	۵/۸۱	۶/۳۳

مقادیر این پارامتر در حالت ۵ درصد در سامانه کنترل پایین دست با اختلاف بزرگی کمتر از مقادیر متناظر در سامانه کنترل بالادست است. در تحقیق منعم و مساح (۱۳۸۲) مقدار SRT برابر ۱۲ دقیقه به دست آمد. این تحقیق در کانال E1-R1 در شبکه دز با استفاده از مدل ریاضی انجام شد. طول این کانال دوزنقه‌ای شکل برابر ۲۸۳۰/۵ متر بوده که به ۳ بازه تقسیم می‌شود و در مسیر

دیده می‌شود که IAE در این دو سامانه تقریباً برابر بوده و اختلاف چندانی ندارند.

مقدار MAE و IAE در تحقیق Clemmens et al. (1998) با استفاده از مدل ریاضی به ترتیب برابر ۰/۲۲۴ و ۰/۰۴۴ در کانال شماره ۱ ASCE و در تحقیق Liu et al. (1998) با استفاده از مدل ریاضی به ترتیب برابر ۰/۲۳۱ و ۰/۱۲۴ در کانال شماره ۲ ASCE گزارش شده است.

جدول ۲ شاخص‌های ارزیابی برای سامانه

کنترل پایین دست PID

	$Q=5l/s$		$Q=10l/s$	
	افزایش ناگهانی	کاهش ناگهانی	افزایش ناگهانی	کاهش ناگهانی
$Y_t(cm)$	۸/۲	۸/۲	۱۰/۱	۱۰/۱
max Y(cm)	۹/۷	۱۰/۱	۱۱/۶	۱۰/۷
min Y(cm)	۷/۸	۵/۵	۹/۱	۸/۴
MAE	۰/۱۸	۰/۳۳	۰/۱۵	۰/۱۷
IAE	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۴
SRT۵%(min)	۰/۶۳	۱/۳۰	۰/۶۶	۰/۶۰

با توجه به مقادیر SRT در حالت ۵ درصد در می‌یابیم که این مقادیر برای سامانه کنترل پایین دست کمتر از سامانه کنترل بالادست است. برای محدوده مجاز ۵ درصد مقدار

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق سامانه‌های کنترل خودکار بالادست و پایین دست PID طراحی و ساخته شد. تجربه به دست آمده در ساخت تجهیزات الکترونیک و مکانیک مربوط ارزشمند بوده و می‌توان از آن در توسعه سامانه‌های کنترل خودکار در کانال‌های واقعی استفاده کرد. با توجه به تجربه‌های موجود در زمینه ساخت حسگرهای فراصوتی، آنها را می‌توان به صورت استاندارد تولید کرد. در مورد صفحه مدارهای الکترونیک باید با افزایش تجربه نسبت به بهینه‌سازی مدارها و تجهیزات مورد نیاز از نظر فنی و اقتصادی اقدام کرد. در مورد سازوکار محرک لازم است انواع سازوکارهای مختلف برای شرایط کاربرد متفاوت متناسب با ابعاد و اندازه دریچه‌ها و کانال و قابلیت انطباق با سامانه کنترل خودکار بررسی شده و مناسبترین آنها از نظر فنی و اقتصادی انتخاب شود. سامانه ساخته شده در مقیاس آزمایشگاهی مورد آزمون و ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور ابتدا با استفاده از مدل فیزیکی، مقدار مناسب ضرایب k_p ، k_i و k_d با استفاده از مقادیر توصیه شده اولیه با سعی و خطا تعیین و سپس با استفاده از این ضرایب آزمایش‌ها برای دبی‌های اولیه ۵ و ۱۰ لیتر بر ثانیه با تغییرات ناگهانی و تدریجی اجرا شد. نتایج حاصل با استفاده از شاخص‌های MAE، IAE و SRT ارزیابی شد. حداکثر مقدار این شاخص‌ها در سامانه کنترل پایین دست برابر ۰/۳۳، ۰/۰۵ و ۱/۳ و برای سامانه کنترل بالادست برابر ۰/۲۹، ۰/۰۶ و ۱۲/۸۶ به دست آمد. نتایج حاصل از ارزیابی‌ها نشان داد که مقادیر شاخص‌های MAE و IAE تقریباً برابر بوده و شاخص SRT برای سامانه کنترل پایین دست کمتر از سامانه کنترل بالادست است که نشان می‌دهد عملکرد سامانه کنترل پایین دست در مقایسه با سامانه کنترل بالادست مطلوب‌تر است.

آن سه سازه آب‌بند کشویی و شش آبگیر جانبی وجود دارد.

حداکثر مقدار MAE برای سامانه پایین دست برابر ۰/۳۳ است که مقدار قابل توجهی است، اما زمان پاسخگویی متناظر با آن برابر ۱/۳ دقیقه می‌باشد که مقدار کمی محسوب می‌شود. به بیانی دیگر با وجود خطای قابل توجه (۰/۳۳)، این انحراف به صورت لحظه‌ای اتفاق افتاده و در مدت حدود یک دقیقه تثبیت شده است.

در سامانه کنترل بالادست حداکثر زمان پاسخگویی سامانه برابر ۱۲/۸۶ دقیقه و MAE متناظر با آن برابر ۰/۱۵ است. در سامانه کنترل پایین دست در هر دو مقدار دبی ۵ و ۱۰ لیتر بر ثانیه، حداکثر انحراف عمق در شرایط کاهش جریان بیشتر از شرایط افزایش جریان است. زیرا شرایط کاهش جریان پایین دست باعث ایجاد موج مثبت و افزایش جریان پایین دست باعث ایجاد موج منفی شده و تفاوت شکل دو موج در رفتار هیدرولیکی آنها موجب تفاوت عکس‌العمل سامانه کنترل شده است. این در سامانه کنترل بالادست نیز دیده می‌شود. در این سامانه در هر دو مقدار دبی ۵ و ۱۰ لیتر بر ثانیه حداکثر انحراف عمق در شرایط افزایش جریان، بیشتر از شرایط کاهش جریان است. در سامانه کنترل بالادست، کاهش جریان موجب ایجاد موج منفی شده که تفاوت شکل و رفتار هیدرولیکی موج باعث تفاوت عکس‌العمل سامانه کنترل شده است. دیده می‌شود که پارامترهای ارزیابی MAE، IAE در این دو سامانه مشابه بوده و تقریباً برابرند، در صورتی که SRT در سامانه کنترل پایین دست کمتر از سامانه کنترل بالادست است که این نشانگر عملکرد بهتر سامانه کنترل پایین دست در مقایسه با سامانه کنترل بالادست است.

Irrigation and Drainage Engineering, January/February, 1998, pp. 31-39.

Changde, W., Xiong, Y., Jie, F. and Guanghua, G. (2007). "Study on operation of a long distance water transfer canal system". Proceeding of USCID Fourth International Conference on Irrigation and Drainage, October 3-6, 2007, pp. 615-629. Sacramento, California.

Clemmens, A. J., Kacerek, T. F., Grawitz, B., and Schuurmans, W. (1998), "Test Cases for canal control algorithms", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 124(1): 23-30.

Litirco, X., Fromion, V., Baume, J., Arranja, C. and Rijo, M. (2007). "Automatic tuning of pi controllers for an irrigation canal pool". Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Volume 133, Issue 1, pp. 27-37.

Liu, F., Feyen, j., Malaterre, P. O., Baume, J. P. and Kosuth, P. (1998). "Development and evaluation of canal automation algorithm CLIS". Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 124(1): 40-46.

Lozano, D., Arranja, C., Rijo, M., Mateos, L. (2007). "Canal control alternatives in the irrigation district 'sector bxii del bajo guadalquivir,' Spain". Proceeding of USCID Fourth International Conference on Irrigation And Drainage. October 3-6, 2007, pp 667-679, CALIFORNIA.

Munir, S., Schultz, B., Khan, A. H., Suryadi, F. X. and Gichuki, F. (2007). "Hydrodynamic behavior of a canal network under simultaneous supply and demand based operations". Proceeding of USCID Fourth International Conference on Irrigation and Drainage, October 3-6, 2007, pp. 681-697. Sacramento, California.

Rogers, D. C. and Goussard, J. (1998). "Canal control systems currently in use". Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, January/February, 1998, 124:11-15.

Wahlin, T. B., and Clemmens, A. J. (2002). "Performance of historic downstream canal control algorithms on ASCE test canal 1". Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 128, No. 6, pp. 365-375.

۶- فهرست علائم

GO	مجموع کل بازشدگی دریچه
IAE	میانگین مطلق خطاها
k_d	ضریب دیفرانسیلی
k_i	ضریب انتگرالی
k_p	ضریب تناسبی
MAE	حداکثر خطای مطلق
Q	دبی جریان
Qmax	دبی حداکثر
SRT	زمان عکس‌العمل سامانه
t	زمان
T	طول دوره بهره‌برداری
Y	عمق اندازه‌گیری شده
Y_t	عمق هدف

۷- منابع

منعم، م. ج. و کیاپاشا، م. ص. (۱۳۸۸). توسعه و ارزیابی مدل سیستم کنترل خودکار بالادست فازی در کانال‌های آبیاری. مجله پژوهش آب ایران، سال سوم/شماره چهارم/بهار و تابستان ۱۳۸۸ ص.ص. ۴۱-۵۰.

منعم، م. ج. و مساح، ع. (۱۳۸۲). تهیه مدل ریاضی سازه هیدرولیکی آمیل. چهارمین کنفرانس هیدرولیک ایران، شیراز.

Burt, C. M., Mills, R. S., Khalsa, R.D. and Ruis, V. (1998). "Improved proportional-integral (pi) logic for canal automation". Journal of Irrigation and Drainage Engineering, January/February, 1998, pp. 53-57.

Buyalski, C. P. (1970). "Basic equipments in automatic delivery systems", A paper presented at the National Irrigation Symposium, Irrigation Today and Tomorrow, Lincoln, Nebraska, Nov. pp. 10-13.

Carmona, V. M., and Clemmens, A. J. (1998). "Canal control algorithm formulations". Journal of