

الگوریتم‌های کنترل و کاربرد آن در کانال‌های شبکه آبیاری عقیلی: (۱) مبانی، معیارها و طراحی

علی اصغر منتظر^{۱*} و سعید عیسی پور^۲^۱دانشیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران و آکاشناس ارشد مهندسین مشاور یکم
(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱۱/۱۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۸۹/۱۱/۱۹)

چکیده

طراحی و بهره برداری سنتی شبکه‌های آبیاری به دلیل عدم وجود ابزارهای تطبیق قوانین بهره برداری با نیازهای متغیر زمانی آب، تلفات قابل ملاحظه‌ای را در این سامانه‌ها به وجود می‌آورد. از این رو تحقیق در نحوه مدیریت بهره‌برداری و تعیین روش‌ها و ابزار کنترل مناسب در شبکه‌های آبیاری، امری ضروری می‌نماید که با به خدمت گرفتن مدل‌های هیدرودینامیک و طراحی و اجرای سیستم‌های کنترل خودکار مناسب انجام پذیر است. در این تحقیق ضمن معرفی مبانی، مفاهیم و معیارهای طراحی سیستم‌های کنترل شبکه‌های آبیاری، سه الگوریتم کنترل برای کانال‌های شبکه آبیاری عقیلی طراحی گردید. الگوریتم‌های کنترل عبارت بودند از: (۱) کنترل‌کننده موضعی بالادست با تکنیک تناسبی-انتگرالی پس‌خورد در سازه بالادست، (۲) کنترل‌کننده سراسری پایین‌دست فاصله‌دار با تکنیک تناسبی-انتگرالی پس‌خورد و دی‌کوپلینگ و (۳) کنترل‌کننده سراسری پایین‌دست فاصله‌دار با تکنیک تناسبی-انتگرالی پس‌خورد + پیش‌خورد و دی‌کوپلینگ. در طراحی و اجرای الگوریتم‌های کنترل از مدل هیدرودینامیک SOBEK در تلفیق با نرم‌افزار MATLAB استفاده شد. به منظور کاهش اثر حرکت نوسانی آب بین دو سازه تنظیم در تعامل با متغیرکنترل اعمال شده به سازه‌ها، در کلیه الگوریتم‌ها از فیلتر پایین‌گذر مرتبه اول استفاده گردید.

واژه‌های کلیدی: سیستم کنترل، کانال آبیاری، کنترل سراسری پایین‌دست، کنترل موضعی، مدل SOBEK

مقدمه

امروزه رویکرد تقاضا مدار نمودن شبکه‌های آبیاری، به عنوان کارآمدترین رویکرد پیش روی متولیان امور آب در ارتقای سطح کیفی و کمی عملکرد بهره‌برداری این سامانه‌ها شناخته می‌شود. دستیابی به این مهم، در گرو فراهم آمدن یک سیستم اطلاعاتی جامع و دقیق از متغیرهای تعیین کننده رفتار هیدرولیکی در سطح شبکه‌های آبیاری است. این وابستگی از آن روست که فقدان اطلاعات صحیح و بهنگام، عدم دقت کافی در اجرای تنظیمات سازه‌ای، کنش و تاثیرات هیدرولیکی متقابل سازه‌ها و اختلاف مابین مقادیر هدف و واقعی متغیرهای مدیریتی از جمله مهمترین عواملی به شمار می‌آیند که عملکرد بهره‌برداری سیستم‌های انتقال و توزیع آب را تحت الشعاع قرار می‌دهند.

ایده خودکارسازی و اجرای سیستم‌های کنترل شبکه‌های آبیاری، از اواخر دهه ۱۹۷۰ میلادی مطرح و نظر تعدادی از متخصصان و متولیان آبیاری را به خود معطوف ساخت. طی سه دهه اخیر، دانش طراحی سیستم‌های کنترل پیشرفت‌های چشمگیری داشته لکن هنوز بخش عمده‌ای از تکنولوژی به دست آمده، در سطح شبکه‌های آبیاری مورد استفاده قرار

نگرفته است (Rogers and Goussard, 1998). نظر به اینکه طراحی و اجرای سیستم‌های کنترل خودکار می‌تواند به عنوان رویکردی جدید و یکی از زمینه‌های تحقیقاتی الویت‌دار صنعت آب کشور مطرح باشد؛ طراحی و ارزیابی الگوریتم‌های کنترل مختلف در تعدادی از شبکه‌های آبیاری کشور ضروری می‌نماید. در این تحقیق ضمن معرفی مبانی، مفاهیم و معیارهای طراحی سیستم‌های کنترل، سه الگوریتم کنترل برای کانال‌های شبکه آبیاری عقیلی طراحی و ارائه گردید.

فرآیند کنترل شبکه‌های آبیاری

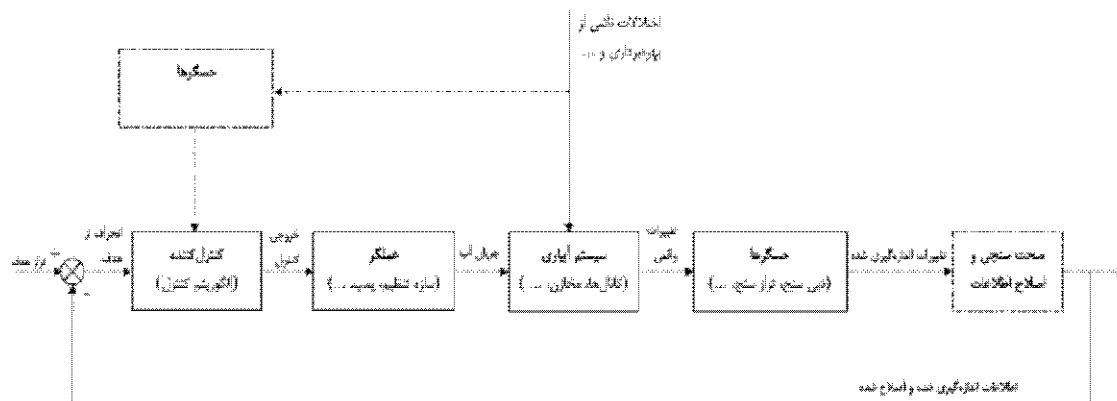
طراحی و اجرای سیستم‌های کنترل خودکار با هدف توزیع بهینه آب و با اعمال کنترل در سازه‌های تنظیم به منظور تنظیم سطح آب و یا دبی تحویلی و یا هر دو پارامتر در محل این سازه‌ها در مقابل اختلالات حاصل از بهره‌برداری انجام می‌گیرد. فرآیند کنترل شامل بخش‌های مشاهده، مقایسه، تصمیم‌گیری، اجرا و بازنگری می‌باشد. در شکل (۱)، یک فرآیند کنترل استاندارد برای شبکه‌های آبیاری روباز نشان داده شده است.

اجزای این فرآیند عبارتند از:

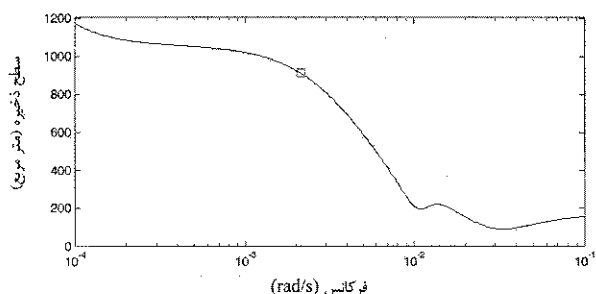
شبکه آبیاری به عنوان یکی از مهمترین بخش‌های این فرآیند، شامل رفتار دینامیکی کانال‌ها و مخازن می‌باشد. رفتار

ناشی از فعالیت‌های بهره‌برداری در سطح آب بین دو سازه تنظیم توصیف می‌گردد.

دینامیکی این سیستم‌ها اساساً توسط زمان تأخیر τ (Delay Time)، سطح ذخیره (Storage Area- As) و امواج



شکل ۱- فرآیند کنترل استاندارد شبکه های آبیاری روباز



شکل ۳- منحنی تغییرات سطح ذخیره در مقابل امواج با فرکانس های مختلف (با داده های فیلتر نشده)

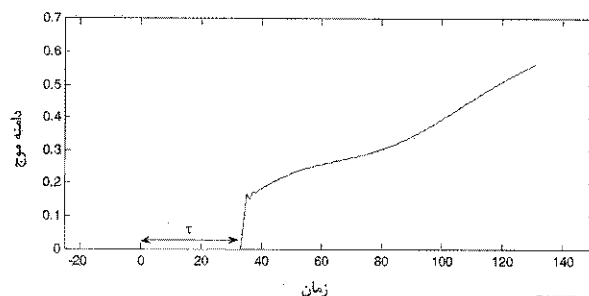
زمانی که در سیستم امواج با فرکانس بالا وجود داشته باشد اعمال فیلتر برای از بین بردن و حذف اختلالات ناخواسته ضروری است که در این صورت سطح ذخیره بعد از اعمال فیلتر تعیین می‌گردد. در این حالت سطح ذخیره می‌تواند از شکل (۴) تخمین زده شود.

حسگرها متغیرهای قابل اندازه‌گیری برای انجام فعالیت‌های بهره‌برداری را نشان می‌دهند. در شبکه‌های آبیاری روباز، تراز سطح آب در بالادست سازه‌های تنظیم و آبگیرها به عنوان متغیر مورد اندازه‌گیری لحاظ شده و بر این اساس می‌توان از حسگرهای صوتی استفاده نمود. در صورت نیاز به اندازه‌گیری دبی تحویلی به بهره‌برداران، امکان استفاده از حسگرهایی نظیر داپلرها وجود دارد.

صحت‌سنجی و اصلاح اطلاعات، بخشی از فرآیند هوشمندسازی است که در این بخش متغیرهای مورد نیاز کنترل‌کننده، از داده‌های اندازه‌گیری شده استخراج و به فرآیند کنترل وارد می‌گردد. اگر در زمان اندازه‌گیری متغیر مورد نظر توسط حسگرها امکان اشتباه وجود داشته باشد، این مقادیر اشتباه نباید وارد فرآیند کنترل شود. بنابراین در این بخش از سیستم کنترل ابتدا باید این مقادیر اشتباه شناسایی و سپس از

زمان تاخیر در واقع مدت زمان پاسخ تراز آب بالادست یا پایین‌دست به یک تغییر کوچک در پایین‌دست یا بالادست است (Schuurmans, 1999). در واقع 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 (۲) مفهوم زمان تاخیر یک بازه کانال را نشان می‌دهد.

سطح ذخیره تعیین‌کننده 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 (۳) قابل تعیین است. در حالت تئوریک سیستم در فرکانس‌های پایین باید سطح ذخیره پایینی داشته باشد لکن در حالت واقعی پروفیل و مقطع بازه نیز در میزان سطح ذخیره موثر است. فلات تشکیل شده در منحنی این شکل (فرکانس‌های کمتر از ۰/۰۰۱ رادیان بر ثانیه) نشان می‌دهد که سیستم دارای امواج با فرکانس‌های پایین به طور تقریبی سطح ذخیره ثابتی دارد (Miltenburg, 2008). تأثیر سطح ذخیره در این حالت نسبت به زمانی که فرکانس‌های بالا در سیستم وجود داشته باشد بیشتر است (Schuurmans, 1999).



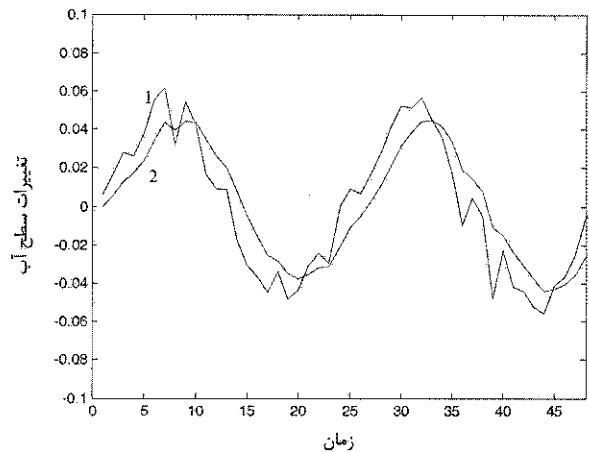
شکل ۲- تخمین زمان تأخیر و مفهوم آن

Archive of SID

که در آن h_f تراز آب فیلتر شده، h تراز آب اندازه‌گیری شده، k اندیس مربوط به گام زمانی و T_f ثابت فیلتر را نشان می‌دهد. مقدار ثابت فیلتر از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$T_f = \frac{T_{cutoff}}{T_{cutoff} + T_s} \quad (۲)$$

که در آن T_s گام زمانی مقادیر نمونه‌گیری و T_{cutoff} مدت زمانی بین حد فاصل عبور و عدم عبور امواج را نشان می‌دهد. کاهش گام زمان نمونه‌گیری موجب افزایش داده‌های به دست آمده خواهد شد و کیفیت فیلتر را بالا خواهد برد. شکل (۵) نمونه‌ای از روند تغییرات واقعی تراز آب در یک بازه از کانال قبل و بعد از اعمال فیلتر پایین‌گذر مرتبه اول را نشان می‌دهد. در این شکل، منحنی ۱ تغییرات سطح آب را قبل از اعمال فیلتر و منحنی ۲ تغییرات سطح آب را بعد از اعمال فیلتر نمایش می‌دهد.

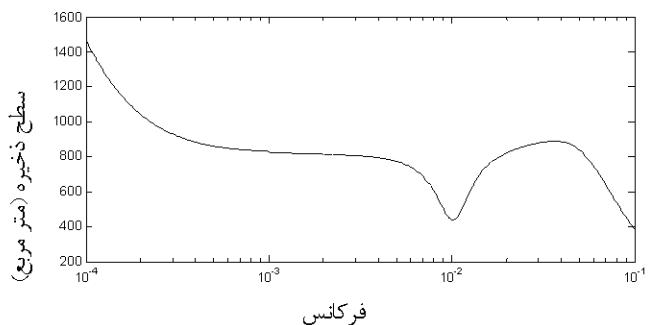


شکل ۵- اعمال فیلتر پایین‌گذر مرتبه اول و روند تغییرات سطح آب در یک بازه از کانال آبیاری

کنترل‌کننده، الگوریتم کنترلی است که فرآیند آن در یک کامپیوتر یا کنترل‌کننده منطقی برنامه‌پذیر تعریف شده است که براساس مقادیر اندازه‌گیری شده، گزینه‌های بهره‌برداری، مقادیر قابل پیش‌بینی و براساس مشخصات سیستم تحت کنترل مقادیر لازم جهت کنترل جریان مورد نظر را محاسبه می‌کند. در فرآیند کنترل عملگرها شامل سازه‌های تنظیم، سازه‌های آبیگر، پمپ‌ها و ... می‌باشند. اعمال تغییرات در هر یک از اجزاء شبکه‌های آبیاری (عملگرها) که از آن به بهره‌برداری تلقی می‌گردد، در قالب یک برنامه مدیریت بهره‌برداری تعریف و هدف آن تأمین بهینه و مناسب دبی و تراز آب در سراسر سیستم است.

در شکل (۱) پیکان‌هایی که بین اجزای مختلف قرار دارند اطلاعات و سیگنال‌های سیستم کنترل می‌باشند که در فرآیند هوشمندسازی، انتقال و دریافت می‌گردد. این اطلاعات در یک

ورود آنها به فرآیند کنترل جلوگیری گردد. اگر مقدار اندازه‌گیری شده توسط حسگر از مقدار بیشینه بیشتر یا از مقدار کمینه کمتر و یا بین مقدار اندازه‌گیری فعلی با مقدار اندازه‌گیری قبلی اختلاف زیادی وجود داشته باشد، این مقدار می‌تواند به طور کامل نادیده فرض گردد و یا با استفاده از درون‌یابی مقادیر اصلاح شده، مقداری برای آن فرض شود. ضمن اینکه باید توجه نمود که مقادیر بیشینه و کمینه تعریف شده به دقت و نوع سیستم کنترل هوشمند بستگی دارد.



شکل ۴- منحنی تغییرات سطح ذخیره در مقابل امواج با فرکانس‌های مختلف (پس از اعمال فیلتر)

یکی دیگر از کاربردهای مهم صحت‌سنجی و اصلاح اطلاعات، اعمال فیلتر بر داده‌های اندازه‌گیری شده است. با کاربرد فیلترها، می‌توان امواجی که دوره تناوب مورد نظر را دارند به فرآیند کنترل وارد نموده و سایر امواج و مقادیر اندازه‌گیری شده را از فرآیند کنترل جدا کرد. هدف فیلتر از بین بردن تاثیر رفتار رزونانسی آب در تراز آب اندازه‌گیری شده است. میزان انحرافات به جای استفاده از اندازه‌گیری واقعی تراز آب، در بازه‌های کانال از تفاوت تراز آب فیلتر شده و تراز آب هدف به دست می‌آید. برای مثال در یک فرآیند هوشمندسازی برای کنترل تراز آب یک مخزن، امواج با دوره تناوب بلند (برای نمونه یک ساعت و بیشتر) مناسب است. امواجی که دوره تناوب کوتاهی دارند (برای نمونه یک دقیقه و کمتر) توسط باد و سایر عوامل فیزیکی تولید شده‌اند که این امواج اختلال تلقی می‌شوند. یکی از مناسب‌ترین فیلترهای قابل کاربرد در سیستم‌های کنترل هوشمند، فیلتر پایین‌گذر مرتبه اول (First order low pass filter) است (Overloop et al, 2005). در این نوع از فیلتر مقادیر محاسبه شده برای اعمال فیلتر در گام فعلی، به مقدار اندازه‌گیری شده فعلی توسط حسگر و مقادیر فیلتر شده قبلی بستگی دارد. در این فیلتر تراز آب فیلتر شده در هر گام زمانی از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$h_f(k) = T_f \cdot h_f(k-1) + (1-T_f) \cdot h(k) \quad (۱)$$

تابحال الگوریتم‌های کنترل متعددی ابداع شده که گرچه هر یک دارای منطق خاصی به منظور تعیین پارامترهای کنترلی بوده لکن همه آنها دارای چهار جزء اصلی: متغیرها، ساختار ورودی- خروجی، منطق کنترل و تکنیکهای طراحی می‌باشند (Malaterre et al., 1998).

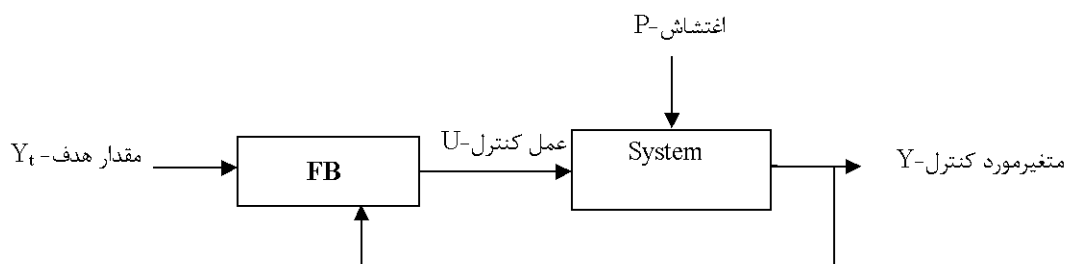
Malaterre et al. (1998) طبقه‌بندی جامعی از الگوریتم‌های کنترل بر اساس معیارهای مختلف شامل: متغیرهای اندازه‌گیری و کنترل، منطق کنترل، روش‌های طراحی و شرایط بهره‌برداری ارائه نمودند. بر این اساس، متغیرها می‌توانند شدت جریان، حجم، رقوم سطح آب بالادست و پایین دست سازه‌های تنظیم و یا رقوم آب در طول بازه کانال (فاصله بین دو سازه تنظیم کننده) در نظر گرفته شوند. منطق کنترل به نوع و جهت ارتباط بین متغیرهای موردکنترل و متغیرهای خروجی بستگی دارد. نوع کنترل خود در سه گروه شامل: کنترل پس خورد (Feedback-FB)، کنترل پیش خورد (Feedforward-FF) و کنترل ترکیبی پس خورد + پیش خورد قابل تقسیم بندی است.

در الگوریتم کنترل پس خورد (شکل ۶)، مقدار متغیر مورد کنترل در اثر ورود یک اغتشاش به سیستم، اندازه‌گیری و یا محاسبه گردیده، انحراف مقدار کمی آن از مقدار هدف تعیین و به منظور اعمال اصلاحات به الگوریتم کنترل برگشت داده می‌شود. عمل کنترل تا رسیدن مقدار متغیر مورد کنترل به مقدار هدف ادامه می‌یابد. در نتیجه‌های مختلف آمیل، آویو و آویس در تنظیم سطح آب از این منطق کنترل استفاده می‌کنند. الگوریتم‌های کنترل معرفی شده توسط Kosuth et al. (1992)، Rodellar et al. (1993) و Liu et al. (1992) از جمله الگوریتم‌های کنترل طراحی شده بر اساس این منطق کنترل می‌باشند.

سیستم هوشمند واقعی، توسط کابل‌های ارتباطی، سیستم‌های مخابراتی نظیر خطوط تلفن و سیستم‌های رادیویی انتقال داده می‌شود. انتقال اطلاعات صحیح در زمان مورد نظر و تصمیم‌گیری براساس این اطلاعات بخش بسیار مهمی از سیستم‌های کنترل خودکار است. سیستم‌های کنترلی که به صورت متمرکز چند بازه کانال آبیاری را مدیریت می‌نمایند ممکن است شامل چندین خط انتقال اطلاعات بین هریک از این اجزاء باشند. بدین ترتیب که با انتقال اطلاعات اندازه‌گیری شده به یک مرکز کنترل با سیستم کنترل مرکزی و الگوریتم کنترل واحد، ابتدا مقادیر اندازه‌گیری شده ارزیابی و براساس این مقادیر و استراتژی تعریف شده خروجی کنترل مناسب محاسبه شده و به هر کدام از عملگرها فرستاده می‌شود. علاوه بر قابلیت متمرکز نمودن مدیریت بهره‌برداری یک شبکه آبیاری پیچیده که شامل سازه‌ها و بخش‌های متعددی است، یکی از نقاط قوت سیستم‌های کنترل هوشمند این است که تمام فرآیندهای ذکر شده در کسری از ثانیه محاسبه و تصمیم بهینه اتخاذ می‌گردد. سیستم‌های کنترل هوشمند متمرکز به لحاظ برخورداری از اطلاعات اندازه‌گیری شده متعدد دقت زیادی در مقایسه با سیستم‌های کنترل موضعی دارند حال آنکه ایجاد اختلال در فرآیند انتقال اطلاعات از نقاط ضعف سیستم‌های کنترل متمرکز می‌باشد.

طبقه‌بندی سیستم‌های کنترل

سیستم‌های کنترل که در کانال‌های آبیاری وظیفه تعیین میزان تنظیمات و اعمال مانور سازه‌ها را بر عهده دارند، شامل دو بخش نرم افزاری و سخت افزاری می‌باشند. بخش نرم افزاری در قالب یک الگوریتم کنترل، محاسبه میزان تنظیمات سازه‌ها را بر عهده داشته و در بخش سخت افزاری، اعمال تنظیمات محاسبه شده سازه‌ها انجام می‌گردد. موفقیت یک سیستم کنترل به توانایی الگوریتم کنترل در تعیین دقیق پارامترهای کنترلی دارد.



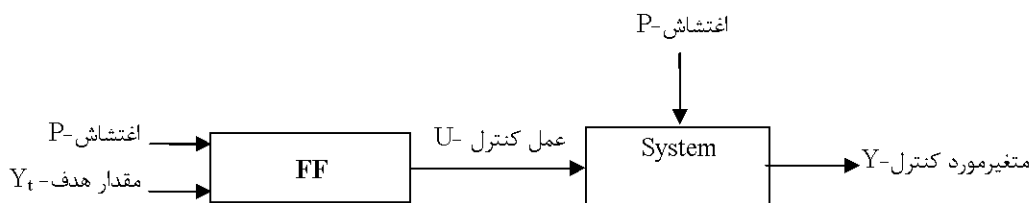
شکل ۶- کنترل کننده پس خورد

می‌گردد. از جمله الگوریتم‌های کنترلی که بر اساس این نوع منطق طراحی شده اند، می‌توان به فعالیتهای انجام شده توسط Lin and Manz (1992) و Baume et al. (1993) اشاره نمود. هر

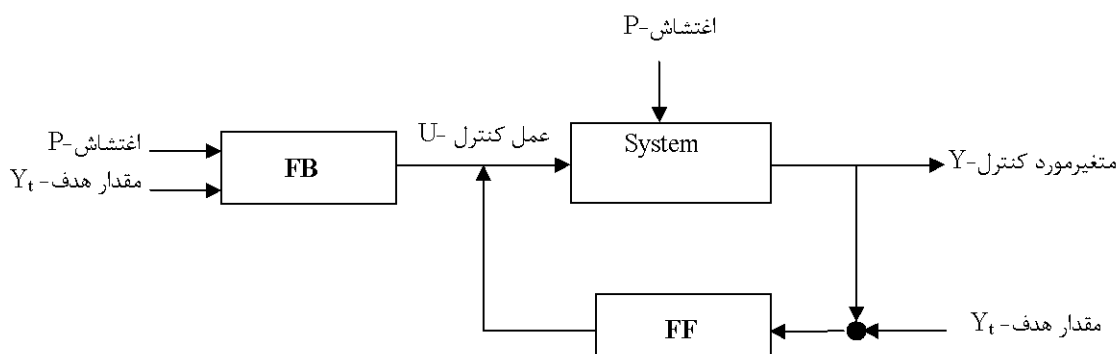
در الگوریتم کنترل پیش خورد (شکل ۷)، مقدار متغیر هدف و اغتشاش برآورد گردیده و وارد الگوریتم می‌شود و بر این اساس مقدار متغیر خروجی کنترل توسط الگوریتم تعیین

خورد + پس خورد (شکل ۸) در برخی شرایط می‌تواند عملکرد قابل قبول تری داشته باشد (Malaterre et al., 1998).

یک از دو الگوریتم کنترل فوق دارای محدودیت‌ها و توانایی‌هایی می‌باشند و از این رو به کارگیری الگوریتم کنترلی ترکیبی پیش



شکل ۷- کنترل کننده پیش‌خورد



شکل ۸- کنترل کننده ترکیبی پیش‌خورد+پس‌خورد

انتگرالی - دیفرانسیلی (Proportional Integral Derivative) و (PID، کنترل فازی، تکنیک‌های ابداعی (Heuristic) و سه‌وضعیتی (Malaterre et al., 1998).

تابحال تکنیک‌های چندمتغیره زیادی نیز ارائه گردیده که تعداد محدودی از آنها در کانال‌های آبیاری به کار برده شده‌اند. تکنیک‌های بهینه‌سازی خطی، بهینه‌سازی غیرخطی، تنظیم‌کننده خطی درجه دو (Linear Quadratic Regulation)، مدل معکوس و شبکه‌های عصبی مصنوعی مهمترین تکنیک‌های چندمتغیره موجود هستند (Malaterre et al., 1998).

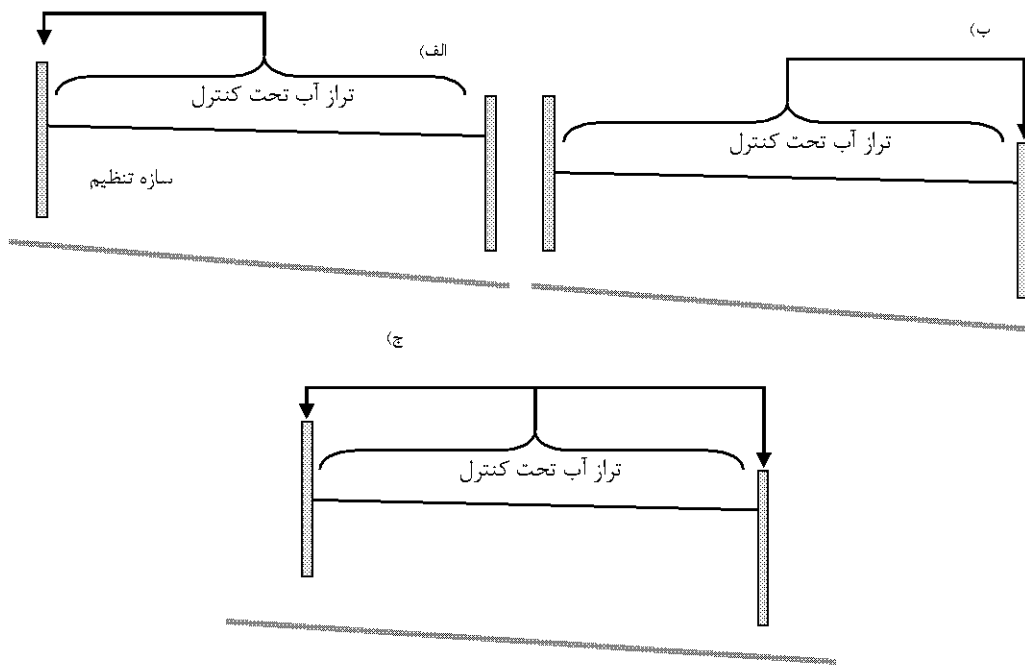
همانطور که قبلاً اشاره گردید، اکثر الگوریتم‌های کنترل هنوز در سطح شبکه‌های آبیاری به اجرا در نیامده‌اند. از طرفی تهیه مدل فیزیکی و انجام مطالعات و ارزیابی عملکرد این الگوریتم‌ها هزینه بر و زمان گیر می‌باشد. از این رو به کارگیری مدل‌های هیدرودینامیک و استفاده از نتایج شبیه‌سازی‌ها، روش بهینه، کارآ و قابل توصیه در مطالعه این الگوریتم‌ها به حساب می‌آید. به تعبیر دیگر، نظر به ماهیت غیردایمی جریان در طول بهره‌برداری و تعامل سیستم‌های کنترل با جریان‌های غیردایمی، بررسی عملکرد این سیستم‌ها در قالب تلفیق الگوریتم اجرایی آنها با یک مدل هیدرودینامیک امکان پذیر می‌باشد. در این رابطه Clemmens et al. (1998) با انجام شبیه‌سازی‌هایی به مقایسه و ارزیابی الگوریتم‌های کنترل مختلف پرداختند. این مقایسات بر روی الگوریتم‌های کنترل از پایین دست نوع پیش

جهت کنترل در الگوریتم‌های کنترل، موقعیت کنترل گر و یا به عبارتی متغیری که مورد کنترل قرار می‌گیرد، به سه نوع کنترل از پایین دست (Downstream Control)، کنترل از بالادست (Upstream Control) و یا کنترل ترکیبی از این دو نوع تقسیم بندی می‌شود (شکل ۹). در سیستم کنترل از پایین دست (الف)، کنترل گر در پایین دست سازه‌ها قرار گرفته و متغیر پایین دست سازه مورد کنترل قرار می‌گیرد. در سیستم کنترل از بالادست (ب)، کنترل گر در بالادست سازه‌ها واقع شده و متغیر بالادست سازه مورد کنترل قرار می‌گیرد. در کنترل ترکیبی از پایین دست و بالادست (ج)، کنترل گر در بالادست و پایین دست سازه مورد کنترل واقع شده و تغییرات عمق آب بالادست و پایین دست آن در کنترل سازه نقش ایفا می‌نماید.

تکنیک طراحی الگوریتم کنترل، شیوه‌ای که در تولید متغیرهای خروجی کنترل با استفاده از متغیرهای اندازه‌گیری شده بکار گرفته می‌شود، را می‌توان در دو گروه اصلی روش‌های یک‌متغیره و چند متغیره دسته بندی نمود. خروجی کنترل در روش‌های یک متغیره همواره منفرد بوده ولی تعداد ورودی‌ها می‌تواند یک و یا بیشتر باشد. تعدادی از مهمترین تکنیک‌های یک متغیره عبارتند از: تکنیک‌های تناسبی (Proportional-P)، تناسبی انتگرالی (Proportional Integral PI)، تناسبی -

انجام گرفت. تکنیک PI توسط محققین دیگری نیز مورد استفاده قرار گرفته است که از آن جمله می توان به کارهای Litrico et al. (2006) و Isapour et al. (2010) اشاره نمود. بررسی نتایج تحقیقات گذشته نشان می دهد که تا به حال تکنیک تناسبی-انتگرالی به دلیل سهولت کاربری و دقت نسبی مناسب در شبکه های آبیاری مورد اقبال بیشتری بوده است.

خورد انجام گرفتند. Clemmens and Schuurmans (2004) کنترل گره های بهینه کنترل از پایین دست PI نوع پیش خورد را معرفی نمودند. ارزیابی کنترل کننده مرکزی تناسبی-انتگرالی ترکیبی (پس خورد + پیش خورد) سراسری با کاربرد دی کپلینگ (Decoupling) برای کنترل کانال اصلی نارمادا (Narmada) در هندوستان توسط Montazer et al. (2005)



شکل ۹- تقسیم بندی منطق کنترل از نظر جهت کنترل

عقیلی و دو کانال درجه یک به نام های شرقی عقیلی و غربی عقیلی می باشد. کانال اصلی شبکه با ظرفیت ۱۲ متر مکعب در ثانیه از سد تنظیمی انحرافی گتوند آبیاری نموده و در کیلومتر ۱+۹۰۰ دو کانال شرقی و غربی به ترتیب با ظرفیت ۵ و ۷ متر مکعب در ثانیه از آن آبیاری می نمایند. کانال شرقی شبکه دارای ۱۴ بازه و ۲۸ سازه آبیگر بوده و کانال غربی شبکه به ۱۲ بازه تقسیم می گردد که در طول آن ۲۷ سازه آبیگر وجود دارد (شکل ۱۰). اراضی این شبکه آبیاری در اختیار زارعین و خرده مالکین منطقه عقیلی قرار دارد. تعداد قطعات زراعی و بهره بردار این شبکه آبیاری به ترتیب ۴۱۶۵ قطعه و ۳۲۵۳ بهره بردار می باشد و از این رو در طول فصل بهره برداری، تغییرات زمانی مکانی نسبتاً زیادی در جریان آبیگرها و انشعابات آن بوقوع می پیوندد. سیستم بهره برداری این شبکه بصورت روزانه و دستی می باشد که توسط اپراتور در سازه های تنظیم و آبیگرهای کانال های آن اعمال می گردد.

در جدول (۱) انواع و تعداد سازه های موجود در کانال های شبکه آبیاری عقیلی ارائه شده است. طبق بازدیدهای به عمل آمده در این تحقیق، کلیه ۱۳۴ سازه آبی موجود بر روی

همچنین کنترل کننده ها به دو گروه کنترل کننده های موضعی (Local control) یا غیرمتمرکز و کنترل کننده های متمرکز یا سراسری (Centralized control) طبقه بندی می شوند. در کنترل کننده های موضعی متغیر کنترل بر اساس متغیر اندازه گیری شده در محل سازه تنظیم محاسبه و در سازه تنظیم اعمال می گردد. در حالی که در کنترل گره های سراسری متغیر کنترل با استفاده از متغیرهای اندازه گیری شده در سراسر کانال محاسبه شده و در سازه های کنترل اعمال می گردد (Wahlin and Clemmens, 2002).

شبکه آبیاری مورد مطالعه

تحقیق حاضر بر روی شبکه آبیاری عقیلی یکی از زیر شبکه های شبکه آبیاری و زهکشی گتوند واقع در استان خوزستان انجام گرفت. آب شبکه از سد تنظیمی انحرافی گتوند واقع در شمال خوزستان در ۴ کیلومتری شهرستان گتوند تامین می گردد.

سطح زیر کشت ناخالص و خالص شبکه عقیلی به ترتیب ۷۲۲۵ و ۴۰۰۰ هکتار و میانگین مصرف آب سالانه آن ۱۵۰ میلیون مترمکعب می باشد. این شبکه متشکل از کانال اصلی

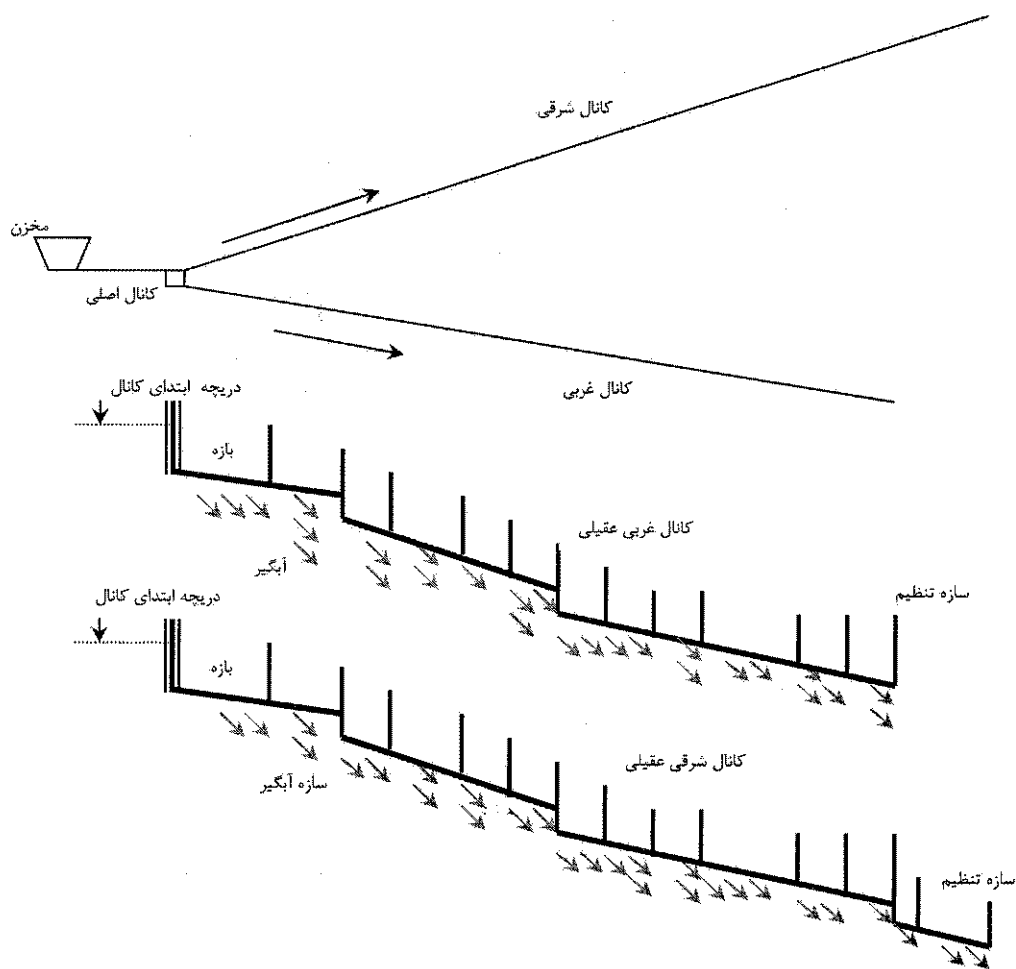
Archive of SID

این مدل هفت مدول مختلف وجود داشته که با توجه به اهداف شبیه سازی از حالت ترکیبی این مدولها نیز می توان استفاده نمود. مدول Water Flow به منظور شبیه سازی جریانهای دایمی و غیر دایمی مجاری روباز به کار گرفته می شود. در طراحی الگوریتم‌های کنترل از حالت ترکیبی این مدول با مدول Real Time Control استفاده گردید. در این مدل امکان شبیه سازی انواع مختلف سازه‌های موجود در سیستم‌های انتقال و توزیع جریان وجود دارد. همچنین امکان شبیه سازی بهره برداری‌های دستی، اتوماتیک و اجرای سیستم‌های کنترل مختلف در مدل پیش بینی شده است (WL/Delft Hydraulic, 2000).

کانال‌های شبکه عقیلی سالم بوده و در طول سال‌های بهره‌برداری به آنها آسیب جدی وارد نشده است.

مدل هیدرودینامیک سوپک (SOBEK)

به منظور انجام شبیه‌سازی‌ها و ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های کنترل طراحی شده در این تحقیق، از مدل هیدرودینامیک سوپک استفاده شد. مدل سوپک یک بسته نرم افزاری است که قابلیت کاربری در حوزه‌های مختلف مدیریت رودخانه‌ها و مجاری انتقال و توزیع آب را دارا می‌باشد (WL/Delft Hydraulic, 2000). این مدل در سال ۲۰۰۰ توسط WL/Delft Hydraulic در قالب یک مدل تجاری ارائه گردید. در



شکل ۱۰- نمایش شماتیکی اجزای شبکه آبیاری عقیلی

جدول ۱- نوع و سازه های موجود در بر روی کانال های شبکه آبیاری عقیلی

نوع سازه	آبگیر	چک	سیفون	دراپ	چک دراپ	وست وی	چاهک اندازه گیری	کالورت
تعداد سازه	۶۳	۱۹	۱۶	۴	۱۳	۱۱	۱	۷

شبکه در طول ماه فروردین ۱۳۸۶ صورت گرفت. بدین منظور داده‌های ۱۵ روز اول از این ماه برای واسنجی و داده‌های ۱۶ روز دوم ماه برای صحت سنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. برای

پس از تهیه مدل هر یک از کانال‌های شرقی و غربی شبکه آبیاری مورد مطالعه در سوپک، واسنجی و صحت سنجی مدل براساس داده‌های واقعی بهره‌برداری جمع‌آوری شده از

خروجی کنترل معادل با مجموعی از نسبت‌های تناسبی و انتگرالی در نظر گرفته شد (رابطه ۳).

$$Q_{EST} = Q_{(1)} + Q_{(2)} \quad (3)$$

که در این رابطه Q_{EST} مقدار برآورد مقدار متغیر خروجی کنترل در زمان t ، $Q_{(1)}$ معادل نسبت تناسبی متغیر مورد کنترل و $Q_{(2)}$ مساوی نسبت انتگرالی متغیر مورد کنترل می‌باشد که مقادیر این نسبت‌ها از روابط زیر محاسبه می‌شود.

$$Q_{(1)} = K_p \cdot (\Delta I) \quad (4)$$

$$Q_{(2)} = K_i \cdot \int_0^t (\Delta I) dt \quad (5)$$

در روابط فوق، ΔI برابر تفاوت مقدار متغیر اندازه‌گیری شده و مقدار هدف در زمان t ، K_p برابر ضریب وزنی اثر نسبت تناسبی و K_i برابر اثر وزنی نسبت انتگرالی است.

برای بهبود بخشیدن به اجرای الگوریتم‌های کنترل دو و سه، فیلتر دی‌کوپلینگ نیز به تکنیک PI اضافه گردید. در کانال‌های آبیاری با بازه‌های متعدد نظیر کانال‌های شبکه آبیاری عقلی اثر متقابل بین بازه‌ای در نتیجه اعمال متغیرکنترل به سازه‌های تنظیم، به دو جهت بالادست و یا پایین دست منتقل می‌شود. با کوپل کردن بازه‌ها این اثرات به منظور انجام اصلاحات به بالادست یا پایین دست بازه‌ها منتقل گردیده و فرآیند تنظیم و کنترل جریان در بازه‌های کانال با سرعت بیشتری انجام می‌گردد.

طراحی و اجرای موفق کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی به تنظیم (Tuning) پارامترهای کنترل‌کننده وابسته است. این پارامترها به علت اثر متقابل بین بازه‌ای و تغییر شرایط جریان به سختی تعیین می‌گردند. پارامتر تناسبی کنترل‌کننده (K_p) و پارامتر انتگرالی کنترل‌کننده (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. علاوه بر این کنترل‌کننده باید بتواند متغیر کنترل را در مقدار هدف با کمترین نوسان ممکن کنترل نموده و پایداری جریان را تامین کند. در عمل الگوریتم کنترل برای بدترین سناریوی بهره‌برداری طراحی می‌گردد. اگر کنترل‌کننده بتواند در گستره وسیعی از تغییرات شدید به صورت پایدار عمل کند الگوریتم آن از کارایی بالایی برخوردار است (Litrico et al., 2006). در این مطالعه پارامترهای کنترل برای تمام بازه‌های کانال با شبیه‌سازی ۱۰٪، ۵۰٪ و ۸۰٪ ظرفیت بهره‌برداری کانال تعیین شدند. برای تعیین پارامترهای تناسبی-انتگرالی الگوریتم کنترل بر اساس مشخصه‌های کانال از روابط ارائه شده توسط Overloop et al. (2005) استفاده گردید. ضریب ثابت فیلتر نیز برای رهایی از نوسانات ریز سطح آب محاسبه گردید. این ضریب با توجه به

مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهداتی نیز از شاخص‌های آماری مقدار حداکثر خطا یا (ME)، ریشه میانگین مربعات خطا یا (RMSE)، راندمان شبیه‌سازی یا (EF) و ضریب خطای پس‌ماند یا (CRM) استفاده شد (Jabro et al., 1998). با توجه به تراز ثابت آب در بالادست دریاچه فوقانی کانال، هیدروگراف مشخص در انتهای کانال و هیدروگراف دبی تحویلی جمع‌آوری شده برای هر کدام از آبگیرها، انجام شبیه‌سازی جهت واسنجی مدل صورت گرفت. برای واسنجی مدل ضریب مانینگ کانال و ضریب دبی سازه‌های تنظیم و سازه‌های آبگیر به عنوان متغیرهای قابل تغییر جهت انطباق مقادیر شبیه‌سازی با مقادیر مشاهداتی استفاده شدند. در هر شبیه‌سازی مقادیر دبی سازه‌های تنظیم و تراز آب در بالادست آنها در انتهای کلیه بازه‌های هر یک از کانال‌های شرقی و غربی عقلی استخراج شده و با مقادیر مشاهداتی مقایسه گردید. ضریب مانینگ در شبیه‌سازی اولیه برای همه بازه‌های کانال‌ها برابر مقدار طراحی (۰/۱۴) در نظر گرفته شد. سپس مقدار ضریب مانینگ در هر بازه برای واسنجی تنظیم شده و شبیه‌سازی تا واسنجی کامل و به دست آمدن نتایج مورد قبول ادامه یافت. این مرحله به صورت آزمون و خطا تا زمانی که مقادیر شبیه‌سازی با مقادیر مشاهداتی کمترین اختلاف را داشته باشند انجام گرفت. بعد از انجام واسنجی و صحت‌سنجی، مدل برای طراحی الگوریتم‌های کنترل و شبیه‌سازی سناریوهای مختلف بهره‌برداری به کار گرفته شد.

طراحی الگوریتم‌های کنترل

هر یک از کانال‌های شرقی و غربی شبکه مورد مطالعه توسط مدل هیدرودینامیک سوپک شبیه‌سازی شد. الگوریتم‌های کنترل در قالب سه m-file در Matlab برنامه نویسی و با استفاده از مدول Real Time Control با مدول Water Flow در مدل سوپک تلفیق گردید. الگوریتم‌های کنترل طراحی شده عبارت بودند از: (۱) کنترل‌کننده موضعی بالادست با تکنیک تناسبی-انتگرالی پس‌خورد در سازه بالادست، (۲) کنترل‌کننده سراسری پایین دست فاصله‌دار با تکنیک تناسبی-انتگرالی پس‌خورد و دی‌کوپلینگ و (۳) کنترل‌کننده سراسری پایین دست فاصله‌دار با تکنیک تناسبی-انتگرالی پس‌خورد + پیش‌خورد و دی‌کوپلینگ. در این تحقیق، هر یک از الگوریتم‌های کنترل مطابق با شماره انتسابی فوق نامگذاری گردید (الگوریتم شماره یک الی سه).

همان‌طور که از نام الگوریتم‌ها نیز مشخص است، در طراحی هر سه الگوریتم کنترل برای محاسبه متغیر خروجی از روش www.SID.ir + انتگرالی (PI) استفاده گردید. به تعبیر دیگر

رزونانس (ω_p) و رزونانس ماکزیمم (R_p) در شکل (۱۱) نشان داده شده است (Ljung, 2007).

برای تعیین پارامترهای تناسبی-انتگرالی الگوریتم کنترل بر اساس مشخصه‌های کانال از روابط زیر استفاده گردید (Schuurmans, 1997; Overloop et al., 2005).

$$K_p = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{A_s \cdot \omega_p}{R_p}} \quad (۶)$$

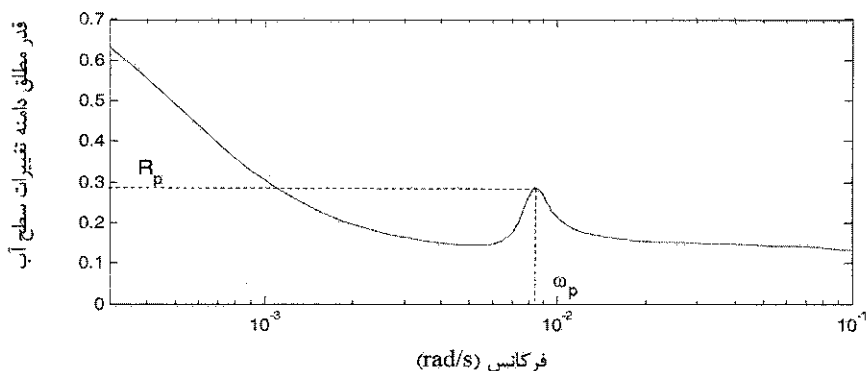
$$K_I = \frac{T_c \cdot \omega_p}{12 \cdot R_p} \quad (۷)$$

در رابطه (۷) T_c گام زمانی کنترل می باشد.

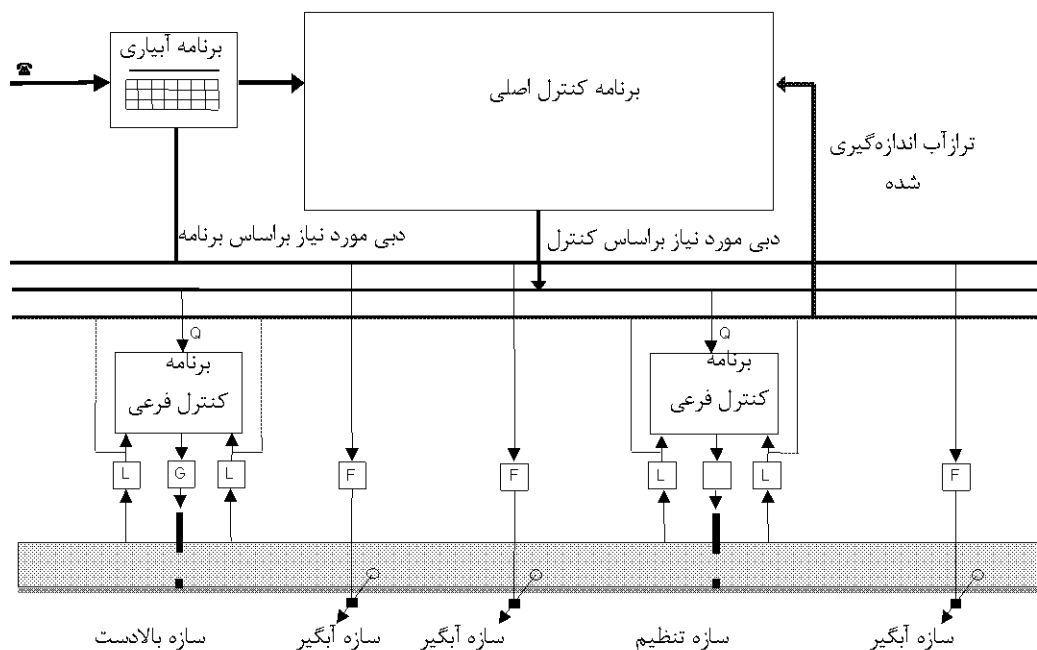
گام زمانی کنترل که برابر ۳۰۰ ثانیه و گام زمانی نمونه‌گیری که برابر ۶۰ ثانیه است محاسبه شد.

به همین منظور مشخصه‌های کانال برای تعیین این پارامترها با استفاده از قوانین تنظیم Schuurmans (1997) توسط مدل هیدرودینامیک سوپک استخراج گردید. مشخصه‌های کانال با کاربرد فرآیند سیستم شناسی (System Identification) برای محاسبه پارامترهای کنترل تعیین شدند (Miltenburg, 2008; Weyer, 2001). این مشخصه‌ها که به

عنوان اطلاعات ورودی مدل هستند شامل سطح ذخیره، زمان تأخیر، تناوب رزونانس (Resonance frequency) و رزونانس ماکزیمم (Resonance peak) هستند. مفهوم تناوب



شکل ۱۱- مفهوم تناوب رزونانس ω_p و رزونانس ماکزیمم R_p



شکل ۱۲- فرآیند اجرایی کنترل کننده اصلی فرعی

در شکل (۱۲) نشان داده شده است. الگوریتم‌های طراحی شده در برنامه کنترل اصلی این سیستم جای می‌گیرند و برنامه

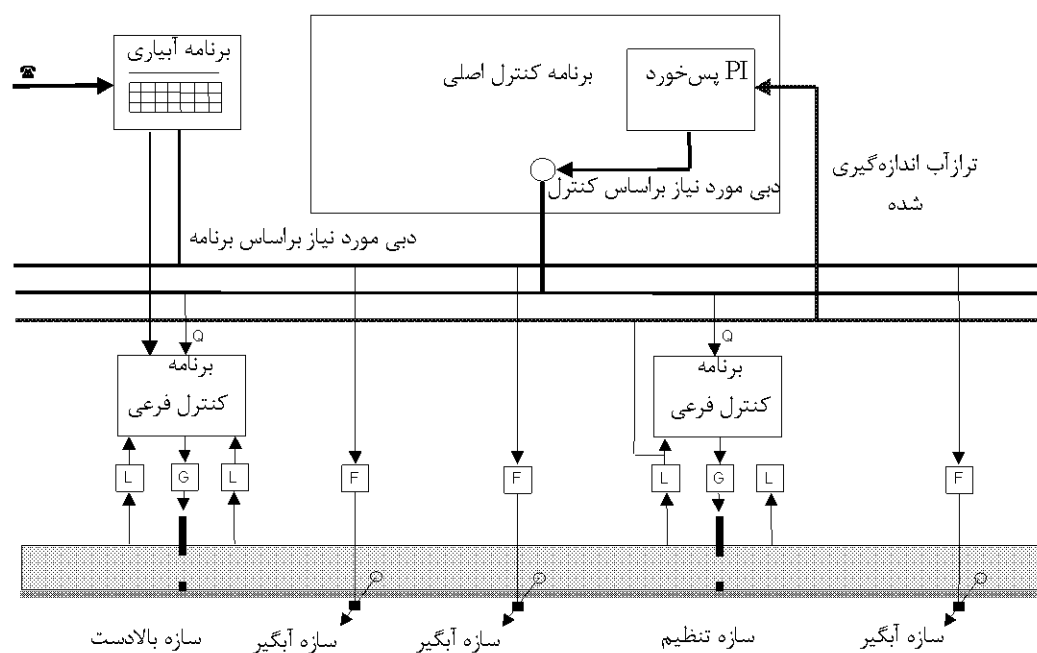
فرآیند هر سه الگوریتم کنترل طراحی شده به صورت

اصلی فرعی (Master and Slave Control) می‌باشد. این فرآیند

مطلوب باید مقدار تراز آب پایین دست سازه تنظیم در فرآیند محاسبه دبی مطلوب لحاظ گردد. در هر گام کنترل، کنترل‌کننده‌های اصلی و فرعی در تعامل با یکدیگر عمل نموده و یک خروجی کنترل (F) وارد سیستم تحت کنترل می‌گردد.

شکل (۱۳) فرآیند اجرایی کنترل‌کننده موضعی بالادست با منطق پس‌خورد در سازه بالادست (الگوریتم شماره یک) را نشان می‌دهد. در این کنترل‌کننده، کنترل براساس متغیر اندازه‌گیری شده برای کنترل تراز آب در بالادست سازه تنظیم، بر سازه اعمال می‌گردد. این کنترل‌کننده حالت هوشمند و خودکار سیستم بهره‌برداری فعلی کانال‌های شبکه می‌باشد. در الگوریتم‌های کنترل دو و سه، از سیستم کنترل سراسری استفاده گردید با این تفاوت که در الگوریتم شماره دو از کنترل نوع پس‌خورد و در الگوریتم شماره سه از کنترل ترکیبی پس‌خورد + پیش‌خورد استفاده شد. شکل‌های (۱۴) و (۱۵) به ترتیب فرآیند اجرایی الگوریتم شماره دو و سه را نشان می‌دهد.

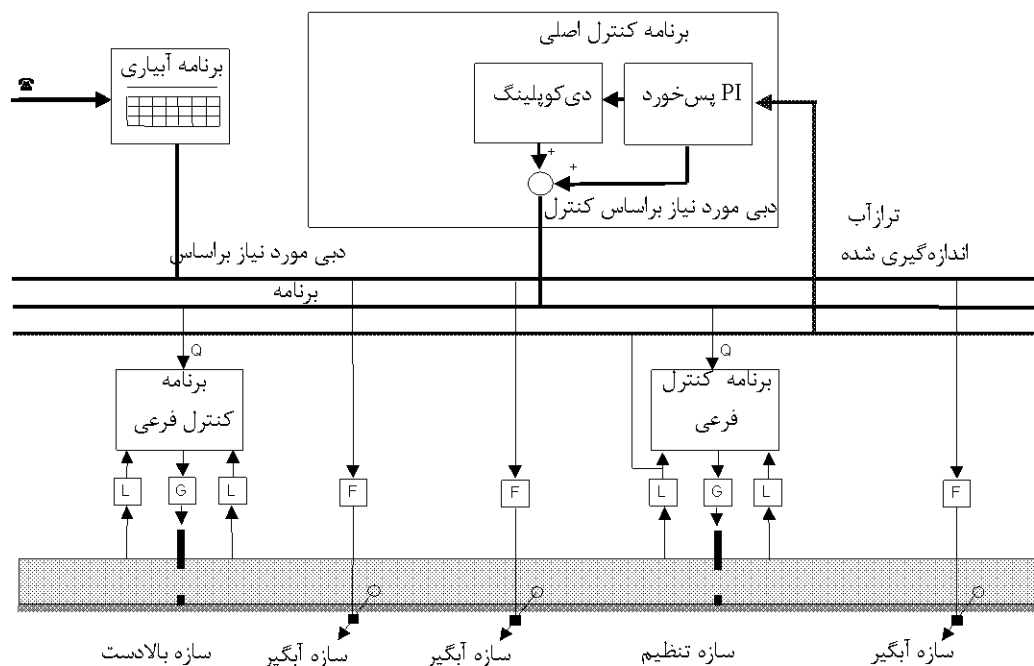
کنترل فرعی در کلیه کنترل گرها مشابه می‌باشد. کنترل‌کننده اصلی با استفاده از اندازه‌گیری واقعی تراز آب که در شکل فوق با L نشان داده شده است به محاسبه و ارسال مقادیر مطلوب جریان برای سازه تنظیم سعی در کنترل تراز آب در بالادست و یا پایین دست آن سازه را دارد. کنترل‌کننده فرعی با اعمال دبی درخواستی با توجه به ساختار فیزیکی سازه تنظیم و مشخصات هیدرولیکی آن فرآیند کنترل را تکمیل می‌کند. کنترل‌کننده فرعی معمولاً با به کارگیری رابطه حاکم بر هیدرولیک سازه به صورت معکوس عمل نموده و بازشدگی مطلوب را بر اساس تراز آب بالادست محاسبه می‌کند. در واقع این کنترل‌گر با استفاده از دبی محاسبه شده توسط کنترل‌کننده به محاسبه مقدار بازشدگی سازه تنظیم (G) می‌پردازد. کاهش بازشدگی یا افزایش آن موجب کاهش یا افزایش دبی عبوری از سازه و در نتیجه کنترل تراز آب در پایین دست سازه موردنظر خواهد شد. بنابراین برای محاسبه بازشدگی



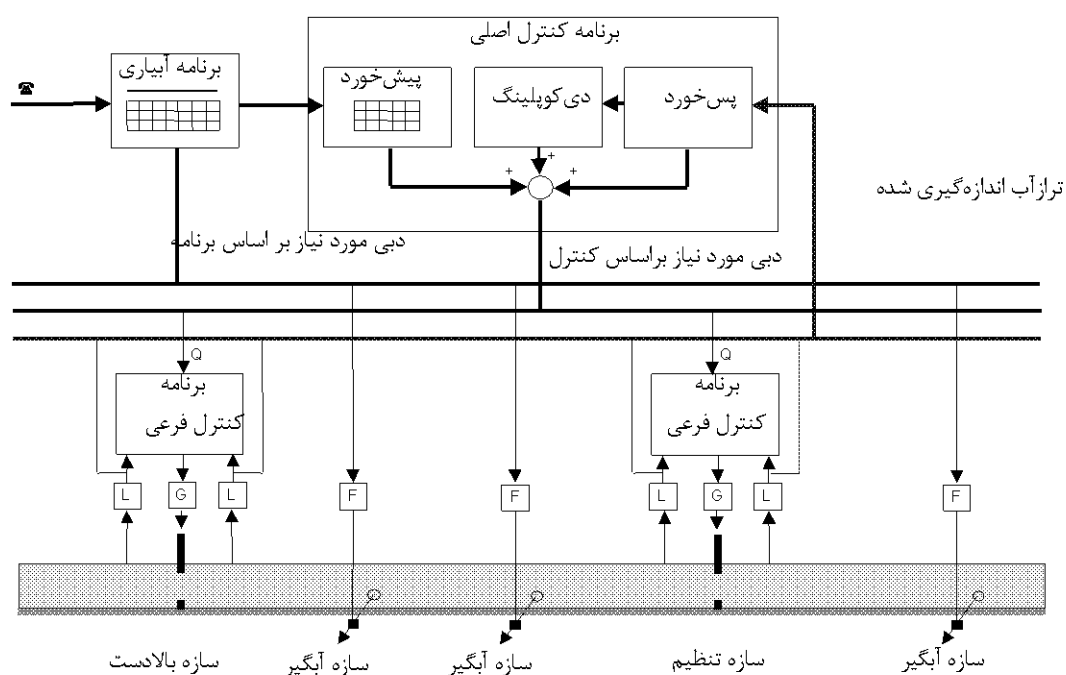
شکل ۱۳- فرآیند اجرایی کنترل‌کننده شماره یک

همان طور که در فرآیند اجرایی سه الگوریتم کنترل نیز نشان داده شده است، عمده تفاوت این کنترل گرها در اجزای برنامه کنترل اصلی آنها و چگونگی ارتباط برنامه آبیاری با این برنامه می‌باشد. در کنترل گر شماره یک، منطق کنترل پس‌خورد برنامه کنترل اصلی را تشکیل داده و برنامه آبیاری از طریق برنامه کنترل فرعی به سیستم کنترل اعمال می‌گردد. در

کنترل گر شماره دو نیز نحوه اعمال برنامه آبیاری بر سیستم کنترل مشابه کنترل گر یک بوده لکن برنامه کنترل اصلی از نوع پس‌خورد سراسری همراه با تکنیک دی‌کوپلینگ می‌باشد. در کنترل‌کننده شماره سه، برنامه آبیاری مستقیماً وارد برنامه کنترل اصلی که از نوع پس‌خورد + پیش‌خورد سراسری همراه با تکنیک دی‌کوپلینگ است، می‌گردد.



شکل ۱۴- فرآیند اجرایی الگوریتم کنترل کننده شماره دو



شکل ۱۵- فرآیند اجرایی الگوریتم کنترل کننده شماره سه

که بدین وسیله از دفتر تحقیقات شبکه‌های آبیاری و زهکشی این سازمان تشکر و قدردانی می‌گردد. همچنین از موسسه WL/Delft Hydraulic که در طول مدت انجام تحقیق مدل سوپک را در اختیار قرار داد، سپاسگزاری به عمل می‌آید.

سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت‌های مالی سازمان آب و برق خوزستان در قالب طرح تحقیقاتی شماره KUI86023 انجام گرفته است

REFERENCES

Baume, J., Sau, J., and Malaterre, P. O. (1998). Modeling of irrigation channel dynamics for controller design. Conference on Systems, Man

and Cybernetics (SMC'98), San Diego, CA, 3856-3861.

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.
- Clemmens, A.J., and Schuurmans, J. (2004). Simple optimal downstream feedforward canal controllers: Theory. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130 (1), 26-34.
- Isapoor, S., Montazar, A., van Overloop, P., and van Giesen N. (2010). Designing and evaluation control systems of the Dez main canal. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. (In Farsi).
- Jabro, J. D., Toth, J. D., and Fox, R. H. (1998). Evaluation and comparison of five simulation models for estimating water drainage fluxes under corn. *Journal of Environmental Quality* 27, 1376-1381.
- Kosuth, P., Roux, A., and Lafaysses, J. L. (1992). *Use of a simulation model to improve operation of dam-river systems for irrigation purpose: elements for methodology*. Cemagref-IIMI International Workshop, Montpellier, October.
- Litrico, X., Fromion, V., and Baume, J. P. (2006). Tuning of robust distant downtown PI controllers for an irrigation canal pool. II: Implementation issues. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132 (4), 369-379.
- Liu, F., Feyen, J., and Berlamont, J. (1992). Computational method for regulating unsteady canals. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 120 (3), 674-689.
- Lin, Z., and Manz, D. H. (1992). *Optimal operation of irrigation canal systems using nonlinear programming-dynamic simulation model*. Cemagref-IIMI International Workshop, Montpellier, October, pp 297-306.
- Ljung, L. (2007). *System identification tool box 7*. The Math Works Inc., Natick, MA, USA
- Malaterre, P. O., Roggers, D. C., and Schuurmans, J. (1998). Classification of canal control algorithm. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 124 (1), 3-10.
- Miltenburg, I. (2008). *Determination of canal characteristics with experimental modeling*. M.Sc. thesis, Delft Univ. of Technology, Civil Engineering Faculty, Water Management Dept.
- Montazar, A., van Overloop, P. J., Brouwer, R. (2005). Centralized controller for the Narmada main canal. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 54 (3), 79-89.
- Overloop, P. J. van, Schuurmans, J., Brouwer, R., and Burt, C. M. (2005). Multiple model optimization of proportional integral controllers on canals. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131 (2), 190-196.
- Rogers, D. C., and Goussard, J. (1998). Canal control algorithms currently in use. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 124(1): 31-39.
- Rodellar, J., Gomez, M., and Bonet, L. (1993). Control method for on-demand operation of open-channel flow. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 119 (2), 225-241.
- Schuurmans, J. (1997). *Control of water levels in open channels*. Ph.D. thesis, Delft Univ. of Technology, Civil Engineering Faculty, Water Management Dept.
- 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.
- Wahlin, B. T., and Clemmens, A. J. (2002). *Preliminary results for downstream feedback control of branching canal networks*. Proc., United States Committee on Irrigation and Drainage/Environmental and Water Resources Institute Conf. on Energy, Climate, Environment, and Water, San Luis Obispo, Calif.
- WL/Delft Hydraulic. (2000). *Sobek Manual and Technical Reference*. The Netherlands.
- Weyer, E. (2001). System identification of an open water channel. *Control Engineering Practice* 9 (12), 1289-1299.