DOI: http://dx.doi.org/10.22092/aridse.2016.106403
مجله تحقیقات کاربردی مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی/جلد ۱۷/ شماره ٦٦/سال ۱۳۹۵/ص ۱۵۲-۱۳۷

بررسی عملکرد سامانهٔ کنترل خودکار غیرمتمرکز در بهره‌برداری کانال اصلی آبیاری تحت نوسان‌های جریان ورودی

سیدمهدی هاشمی شاهدانی[*]، علیرضا فیروزفر، سونیا صادقی و اسماعیل ادیب‌مجد[**]

[*] نگارنده مسئول: گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران. تلفن: ۳۶۰۴۰۹۰۶(۰۲۱)، پیام‌نگار: mehdi.hashemy@ut.ac.ir

[**] به‌ترتیب: استادیار گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران؛ پژوهشگر فرادکتری، مؤسسه IIHR، دانشگاه آیوا، آمریکا؛ کارشناس ارشد سازه‌های آبی و استاد مدعو گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد بابل؛ و کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی، شرکت آب منطقه‌ای اصفهان

تاریخ دریافت: ۹۵/۱/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۳/۱۸

چکیده

بومی‌سازی و پیاده‌سازی فناوری‌های نوین مدیریت بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری، به‌منظور بهبود بهره‌وری آب کشاورزی، بیشتر از همیشه احساس می‌شود. این مطالعه با هدف بررسی توانایی سامانهٔ غیرمتمرکز کنترل خودکار رقوم سطح آب در کانال اصلی آبیاری در بهره‌برداری کانال اصلی آبیاری تحت نوسان‌های جریان ورودی به اجرا درآمد. سامانهٔ کنترل خودکار تناسبی- انتگرالی طراحی شده در این تحقیق روی مدل ریاضی کانال اصلی شاخهٔ شمالی شبکهٔ آبیاری رودشت آزمایش شد که با مشکل اساسی نوسان‌های جریان ورودی روبه‌روست. به‌منظور تعیین توانایی‌های این سامانهٔ کنترل طراحی شده، دو سناریوی بهره‌برداری شامل نوسان‌های ورودی غیرقابل پیش‌بینی نرمال و شدید در نظر گرفته شد. ارزیابی وضعیت بهره‌برداری نشان می‌دهد که تحت نوسان‌های نرمال جریان ورودی به کانال اصلی، کنترلگر تناسبی- انتگرالی تقریباً در تمام بازه‌های کانال اصلی عملکرد مطلوبی در تنظیم سطح آب داشته به‌طوری‌که حداکثر شاخص‌های ارزیابی خطای مطلق و خطای تجمعی به‌ترتیب برابر ۱۱/۳ و ۷/۵ درصد در بازه ۲۳ به‌دست آمده است. اما در نوسان‌های شدید، کنترلگر تنها قادر به کنترل وضعیت جریان در نیمهٔ بالادستی کانال اصلی بوده و نیمهٔ پایین‌دست بازه‌های کانال اصلی قادر به آبگیری نبوده است. بر اساس نتایج این تحقیق، سامانه‌های کنترل خودکار غیرمتمرکز در شرایط نرمال نوسان‌های ورودی بهره‌برداری مطلوبی ایجاد می‌کنند در حالی‌که در شرایط نوسان‌های شدید جریان ورودی لازم است از سامانه‌های هوشمندتری برای تأمین بهره‌برداری مطلوب استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی

بهره‌برداری، خشکسالی، سامانهٔ کنترل خودکار، کنترلگر تناسبی- انتگرالی، نوسان‌های ورودی

مقدمه

امروزه با افزایش جمعیت، ظاهر شدن چهرهٔ کم‌آبی و افزایش تقاضا برای مصرف آب در جهان، توجه کارشناسان به بهره‌گیری بهینه از منابع آب موجود جلب شده است. در این میان، بخش کشاورزی به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کنندهٔ آب عملکرد ضعیفی در بهره‌وری بهینه از آب داشته است. هدف از احداث و توسعهٔ شبکه‌های آبیاری و زهکشی، بهبود کارایی و بهره‌وری آب کشاورزی است. شبکه‌های آبیاری با بهره‌گیری از مجموعه سازه‌های اندازه‌گیری، سازه‌های کنترل و تنظیم سطح آب و نیز

آبگیرها، در مقایسه با سایر گزینه‌های مرسوم کشاورزی (شامل برداشت از آب‌های زیرزمینی و برداشت‌های مستقیم آب از رودخانه‌ها و انهار سنتی)، با اهمیت‌ترند زیرا در آنها مدیریت دقیق‌تر و صحیح‌تر آب کشاورزی و در نتیجه بهبود بهره‌وری آب کشاورزی امکان‌پذیر خواهد بود. از این‌رو در زمینهٔ بهبود عملکرد شبکه‌های آبیاری موجود با استفاده از طرح‌های نوسازی، بهسازی و مدرن‌سازی، که از راهکارهای اصلی بهبود کارایی شبکه‌های آبیاری است، انگیزه‌ای قوی ایجاد شده است.

عملکرد اکثر شبکه‌های آبیاری و زهکشی چه از لحاظ فرآیندی مثل کفایت، راندمان، عدالت و پایداری و چه از لحاظ خروجی یعنی تولید محصول، مطلوب نیست و نیازمند بازنگری کلی در شیوهٔ مدیریت فعلی آنهاست (Burt 2013; van Overloop *et al.*, 2014). بخش عمده‌ای از این نامطلوب بودن عملکرد شبکه‌های آبیاری و زهکشی ناشی از مدیریت غیرمؤثر حاکم بر این سامانه‌ها و نیز عملیات بهره‌برداری و نگهداری نامناسب شبکه‌هاست (Hashemi *et al.*, 2013). در شیوهٔ مرسوم، بهره‌برداری کانال‌های اصلی آبیاری به روش سیستم کنترل بالادست است. در این روش سازه‌های کنترل سطح آب روزانه و اغلب توسط اپراتور بهره‌برداری و با بهره‌گیری از سازهٔ هیدرومکانیکال آمیل و یا سرریزهای لبه‌طولانی تنظیم می‌شود. در این روند حجم زیادی از آب به‌سبب بهره‌برداری‌های نامناسب تلف خواهد شد. روش‌های بهره‌برداری مرسوم بدون در نظر گرفتن عوامل تأثیرگذار در جریان آب درکانال شامل: تأخیرهای زمانی قابل توجه و متفاوت ناشی از حرکت آب در مسافت‌های طولانی و نیز وضعیت‌های هیدرولیکی متغیر، نسبت به شیوهٔ بهره‌برداری سازه‌های تنظیم و آبگیری، توفیق چندانی در بهبود فرآیند تحویل و توزیع آب نخواهد داشت.

در سال‌های اخیر و با جدی شدن خطر خشکسالی در اکثر نقاط کشور، مدیران و تصمیم‌گیران بخش آب با توسعهٔ روش‌های مختلف مدیریت تقاضا، سعی در بهبود بهره‌وری آب کشاورزی داشته‌اند. بخش عمدهٔ این فعالیت‌ها بر فعالیت‌های درون مزرعه‌ای متمرکز بوده و به‌روزرسانی و بهبود مدیریت بهره‌برداری سامانهٔ انتقال اصلی به فراموشی سپرده شده است، در حالی‌که بهبود بهره‌برداری سامانه‌های اصلی انتقال در مرحلهٔ اول سبب کاهش تلفات بهره‌برداری و در مرحلهٔ بعد سبب مدیریت صحیح آب منطبق بر نوع سامانه‌های آبیاری به‌کار رفته در واحدهای زراعی درجهٔ چهار و مزارع خواهد شد. در عمل، پیاده‌سازی استراتژی‌های نوین بهره‌برداری به‌منظور رسیدن به اهداف نوظهور در کشاورزی آبی شامل ایجاد بازارهای رقابتی توزیع آب، پیاده‌سازی استراتژی تجارت آب مجازی بین استانی، و توزیع عادلانهٔ آب در شرایط خشکسالی - که از اهداف اصلی اقتصاد مقاومتی به حساب می‌آیند- تنها با اِعمال مدیریت هوشمند بهره‌برداری در شبکه‌های آبیاری امکان‌پذیر است. بنابراین لازم است توانایی سامانه‌های مختلف هوشمند بهره‌برداری کانال‌های آبیاری، در مقابل مشکلات جدید حاصل از خشکسالی به‌طور دقیق بررسی شود تا بتوان با انتخاب مناسب شیوهٔ بهره‌برداری کانال‌ها به اهداف نوظهور مذکور دست پیدا کرد.

این تحقیق، به بررسی میزان کارایی سامانهٔ کنترل خودکار غیرمتمرکز تناسبی- انتگرالی در بهبود فرآیند بهره‌برداری یک کانال بزرگ اصلی آبیاری که تحت نوسان‌های شدید جریان ورودی قرار دارد، پرداخته است. نوسان‌های ورودی پس از وقوع خشکسالی در آن دسته از شبکه‌های آبیاری کشور رخ داده است که به‌خصوص در پایین‌دست حوضه‌ها (یا زیرحوضه‌ها) واقع شده‌اند. به واسطهٔ برداشت‌های آب در بخش‌های بالادست و بخش‌های میانی حوضه‌ها، میزان جریان ورودی به پایین‌دست قابل پیش‌بینی نیست و تأمین آب در شبکه‌های پایین‌دستی با عدم قطعیت همراه است. در

مواقعی که به‌واسطهٔ وجود سیستم پایش اندازه‌گیری دبی تحویلی به مصرف‌کنندگان مختلف در بالادست شبکه‌های مذکور امکان پیش‌بینی مناسب آب قابل استفاده برای این شبکه‌ها وجود داشته باشد، اِعمال مدیریت‌های بهره‌برداری غیرسازه‌ای هم امکان‌پذیر خواهد بود. روش‌های مدیریت بهره‌برداری غیرسازه‌ای می‌تواند بدون تغییر در ساختار فیزیکی شبکه و با اعمال بهره‌برداری دینامیک کانال اصلی آبیاری با افزایش تعداد مرتبه تنظیم سازه‌های کنترل در طول روز، بهره‌برداری کانال را با نوسان‌های ورودی تا حدی منطبق کند. در مواردی‌که وقوع نوسان‌های ورودی و بزرگی آنها قابل پیش‌بینی نباشد، لازم است با استفاده از روش‌های سازه‌ای مانند احداث مخزن در ابتدای شبکه یا مخازن درون مسیری در طول مسیر کانال اصلی یا بهره‌گیری از سامانه‌های هوشمند کنترل خودکار، آثار این پدیده را در بهره‌برداری کانال اصلی آبیاری کاهش داد.

برای این منظور در این تحقیق، سامانهٔ کنترل خودکار غیرمتمرکز تناسبی- انتگرالی به‌عنوان ابتدایی‌ترین نوع کنترلگرها به‌کار گرفته شد که عملیات بهره‌برداری را به‌صورت موضعی و بر اساس اطلاعات اندازه‌گیری در محل هر سازهٔ کنترل و تنظیم انجام می‌دهد.

سامانهٔ طراحی شده روی مدل ریاضی کانال اصلی شاخهٔ شمالی شبکهٔ آبیاری رودشت، که آخرین شبکهٔ آبیاری در دشت زاینده‌رود است و با مشکل اساسی نوسان‌های جریان ورودی روبه‌روست، آزمایش شد. به‌منظور تعیین توانایی‌های این سامانهٔ کنترل طراحی شده، دو سناریوی بهره‌برداری شامل نوسان‌های ورودی غیرقابل پیش‌بینی نرمال، بر اساس اطلاعات شبکهٔ آبیاری مورد مطالعه، و نوسان‌های شدید در نظر گرفته شد. با استفاده از شاخص‌های ارزیابی عملکرد، میزان توانایی سامانهٔ کنترل طراحی شده در بهره‌برداری کانال اصلی بررسی گردید.

مواد و روش‌ها

سامانهٔ کنترل خودکار غیرمتمرکز تناسبی-انتگرالی

کنترلگر تناسبی – انتگرالی[1] بر اساس روش کنترل پس‌خور (کنترل حلقه بسته) طراحی می‌گردد که در آن متغیر کنترل‌شونده (رقوم سطح آب در این تحقیق) در بالادست سازهٔ تنظیم اندازه‌گیری می‌شود. در این روش، میزان انحراف رقوم سطح آب از رقوم هدف به الگوریتم کنترل بازگردانده می‌شود تا با اندازه‌گیری اقدام تصحیحی که عبارت است از تنظیم سازه‌های کنترل رقوم سطح آب که قرار است جایگزین سرریز لبه‌طولانی گردد، متغیر کنترل‌شونده به‌سوی مقادیر هدف بازگردانده شود. در این روش اغتشاش‌ها (نوسان‌های ورودی در این مقاله) حتی اگر شناخته شده نباشند، به‌صورت غیرمستقیم و از طریق آثار آن بر خروجی سیستم (رقوم سطح آب هر بازه) در نظر گرفته می‌شوند. بر اساس الگوریتم کنترل تناسبی- انتگرالی، تغییرات دبی عبوری از زیر سازه‌های تنظیم به‌صورت رابطهٔ ۱ قابل محاسبه است (van Overloop *et al.*, 2005):

$$\Delta Q_{(k)} = K_i.e_{(k)} + K_p.\left[e_{(k)} - e_{(k-1)}\right] \qquad (۱)$$

که در آن،

$\Delta Q_{(k)}$ = مقدار تغییرات دبی عبوری از سازه‌های تنظیم بر حسب مترمکعب بر ثانیه در گام زمانی جاری؛ e = مقدار انحرافات تراز سطح آب از رقوم هدف؛ اندیس‌های k و $k-1$ به‌ترتیب نشانگر گام زمانی جاری و گام زمانی قبلی است؛ K_p = ضریب تناسبی؛ و K_i = ضریب انتگرالی.

زمانی‌که کنترل مجموعه‌ای از بازه‌های کانال مد نظر باشد، تشدید اغتشاش رخ می‌دهد. این پدیدهٔ ناشی از اتصال پیوستهٔ بازه‌ها به یکدیگر است. برای کاهش اغتشاش‌ها، از یک فیلتر پایین‌گذر مرتبهٔ اول جهت کاهش

1- Proportional Integral Controller

دامنهٔ نوسان‌های سیگنال‌های ورودی به کنترلگر برای تمام بازه‌های کانال استفاده شد. استفاده از این فیلتر در مواقعی که امواج رزونانس غیر میرا در بازه کانال پدیدار شوند، به‌خصوص در بازه‌های کوتاه یا بازه‌های کم‌شیب کانال، توصیه می‌گردد (van Overloop *et al.*, 2005). با استفاده از فیلتر پایین‌گذر مرتبهٔ اول مقدار تغییرات دبی عبوری از سازه‌های تنظیم از رابطهٔ ۲ محاسبه می‌شود:

$$\Delta Q_{(k)} = K_i.e_{f(k)} + K_p.\left[e_{f(k)} - e_{f(k-1)}\right] \qquad (۲)$$

که در آن،

اندیس f نشانگر خطای فیلتر شده است که از رابطهٔ ۳ به‌دست می‌آید:

$$e_{f(k)} = F_c.e_{f(k-1)} + (1 - F_c).e_{(k)} \qquad (۳)$$

که در آن،

F_c = ثابت فیلتر که بر اساس مشخصات سیستم به‌دست می‌آید (جزئیات تعیین این شاخص در مقاله ون‌اورلوپ و همکاران (van Overloop *et al.*, 2005) آمده است). ضرایب تناسبی و انتگرالی (K_p و K_i) بر اساس فرمول پیشنهادی شورمانز (Schuurmans, 1997) برای طراحی کنترلگر تناسبی- انتگرالی محاسبه شد.

بر اساس قوانین تنظیم ارائه شده توسط شورمانز (Schuurmans, 1997)، ضرایب تناسبی بر پایهٔ چهار پارامتر سیستم قابل محاسبه‌اند: سطح ذخیره در شرایط بهره‌برداری (A_s)، گام زمانی کنترل (T_c)، رزونانس حداکثر در جریان حداقل (R_p) و بسامد رزنانس حداکثر در جریان حداقل بازه کانال (ω_r)؛ این چهار پارامتر از دو رابطهٔ ۴ و ۵ محاسبه می‌شوند:

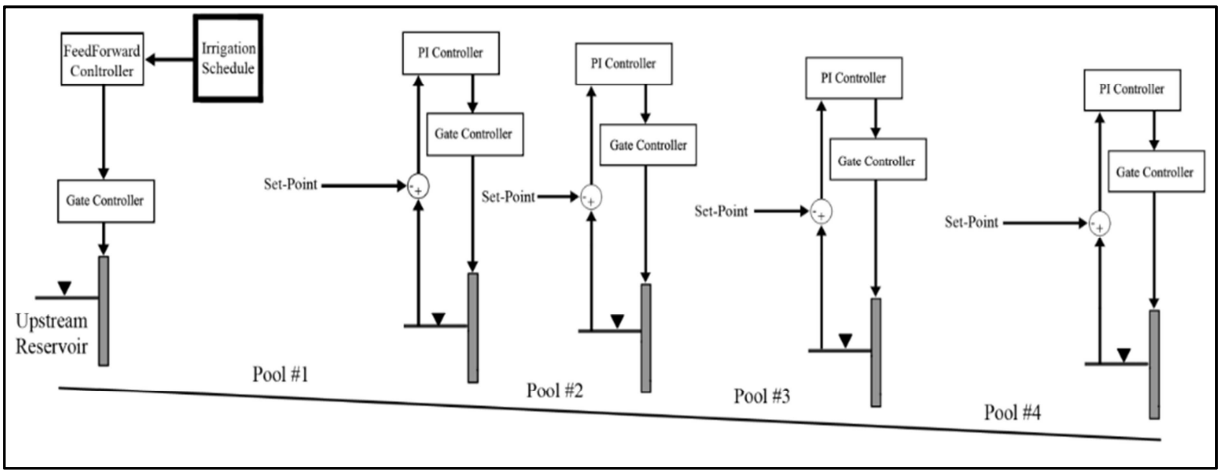
$$K_p = \frac{1}{2}.\sqrt{\frac{A_s.\omega_r}{R_p}} \qquad (۴)$$

$$K_i = \frac{T_c.\omega_r}{12.R_p} \qquad (۵)$$

بر اساس تحقیق میلتنبرگ (Miltenburg, 2008) می‌توان دبی ورودی به هر بازهٔ کانال را به‌عنوان ورودی قابل اندازه‌گیری و رقوم سطح آب در هر بازه را به‌عنوان خروجی قابل اندازه‌گیری در نظر گرفت. با بهره‌گیری از روش شناسایی می‌توان برای محاسبهٔ مشخصات سیستم (عوامل مورد نیاز روابط ۴ و ۵) در یک شرایط هیدرولیکی استفاده کرد. در کانال‌های آبیاری با بازه‌های متعدد، اثر متقابل بین بازه‌های کانال به دو جهت بالادست و پایین‌دست منتقل می‌شود و در نتیجه بر رفتار کنترل‌گر تأثیر خواهد گذاشت. در سیستم‌های کنترل سراسری، تمام بازه‌های کانال به‌عنوان زیرسیستم‌های یک سیستم واحد در یک کنترلگر لحاظ خواهند شد و در نهایت این تأثیرهای متقابل به‌طور مؤثر کنترل می‌شوند. با این همه، به‌سبب هزینه‌بر بودن طراحی، اجرا، تنظیمات و نگهداری سامانه‌های کنترل سراسری، مدیران و تصمیم‌گیران شبکه‌های آبیاری در برخی موارد تمایل بیشتری را برای پیاده‌سازی یک سامانهٔ کنترل خودکار موضعی ارزان قیمت کمتر نشان می‌دهند (Gómez *et al.*, 2002).

اصولاً طراحی سیستماتیک کنترلگر کلاسیک در کانال‌های آبیاری می‌تواند به سه شیوه باشد: کنترل بالادست، کنترل پایین‌دست یا ترکیب آنها. برای مثال، شکل ۱ کاربرد کنترلگر طراحی شده این تحقیق را با استفاده از تلفیق تکنیک پیش‌خور برای کنترل بالادست در چند بازه کانال نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، ورودی هر کنترلگر رقوم اندازه‌گیری شدهٔ سطح آب در بالادست هر سازهٔ تنظیم است. بر اساس

میزان خطای سطح آب اندازه‌گیری شده از رقوم هدف، متغیر کنترلی محاسبه و میزان بازشدگی دریچه مشخص می‌شود. در روش‌های کنترل بالادست، سازهٔ تنظیم سراب کانال معمولاً آب مورد نیاز پایین‌دست را با استفاده از روش پیش‌خور و بر اساس برنامهٔ تحویل آب آبیاری از قبل تعیین شده رها می‌کند. در مواردی‌که از این روش استفاده نمی‌شود، کنترل سازهٔ تنظیم سراب به شیوهٔ کنترل پایین‌دست موضعی یا فاصله‌دار خواهد بود. کنترل سایر سازه‌های تنظیم بر اساس کنترل موضعی بالادست و با اندازه‌گیری رقوم سطح آب در بالادست و مجاورت سازه تنظیم انجام می‌پذیرد.



شکل ۱- شمایی از کنترلگر طراحی شده به روش کنترل موضعی بالادست در کانال آبیاری این تحقیق

مدل ریاضی شبیه‌سازی جریان در کانال اصلی آبیاری

کامل‌ترین مدل شبیه‌سازی هیدرولیکی حرکت آب در مجاری روباز (کانال‌ها و زهکش‌ها)، معادلات سنت‌ونانت[1] هستند (Cunge, 1969). این معادلات، آنگاه که به‌صورت کامل در نظر گرفته شوند، به معادلات موج دینامیک[2] مشهورند که با حل عددی آنها رفتار آب در کانال‌ها با دقت بسیار مناسبی مدل می‌شود. معادلات سنت‌ونانت می‌توانند هیدرولیک جریان را در شرایط جریان غیرماندگار و متغیر تدریجی یک بعدی کانال به‌طور کامل تشریح کنند. اما این معادلات به فرم مجموعه معادلات دیفرانسیل پاره‌ای غیرخطی هستند و حل تحلیلی آنها تنها در شرایط بسیار ساده شده و محدود امکان‌پذیر است که کاربرد چندانی ندارد. از این‌رو این معادلات عموماً با استفاده از روش‌های عددی حل می‌شوند. از سوی دیگر، چند موضوع کاربرد معادلات سنت‌ونانت را برای استفاده در طراحی کنترلگرها محدود ساخته است: وجود جریان‌های جانبی ورودی و خروجی گسترده و متمرکز، هندسهٔ ناهمگن و تنوع شرایط مرزی با انواع بهره‌برداری‌های دستی و خودکار به‌صورت موضعی، راه دور و سراسری. علاوه بر آن، مدلسازی ریاضی با استفاده از روابط سنت‌ونانت نیازمند به‌کارگیری ضرایب متعددی در مدل‌سازی بوده و از این‌رو از لحاظ محاسباتی بسیار پرهزینه و زمان‌بر است. به این جهت مدل‌های ساده‌تر با تعداد پارامترهای حالت کمتری از سیستم توصیه شده است (Xu *et al.*, 2011). محققان مدل‌های ریاضی ساده شدهٔ متفاوتی را به‌عنوان جایگزین معادلات سنت‌ونانت مطرح کرده‌اند که هر یک برای شرایط خاص توسعه یافته است و بالطبع مزایا و معایب خود را دارد. در این تحقیق،

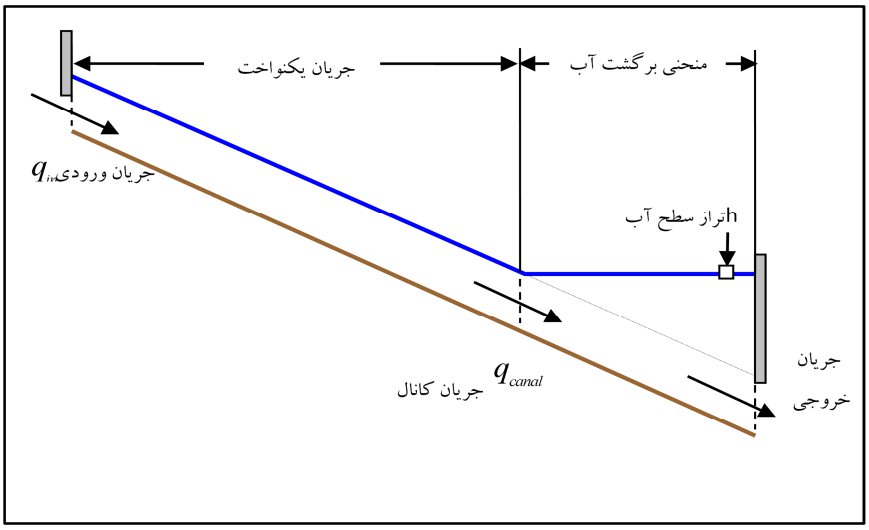
1- De Saint Venant Equations
2- Dynamic Wave

پرکاربردترین مدل ریاضی ساده شده کانال آبیاری (مدل انتگرالی- تاخیری) برای شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در کنترلگر استفاده شده است که در ادامه معرفی می‌شود.

مدل انتگرالی - تاخیری[1]:

شورمانز (Schuurmans, 1997) برای طراحی الگوریتم‌های کنترل، هر بازه از کانال آبیاری را به دو بخش، مطابق شکل ۲، تقسیم کرد و مدل تقریبی آن را به شرح زیر ارائه داد:

قسمتی از کانال که بین دو سازهٔ تنظیم قرار گرفته باشد بازه نامیده می‌شود. هر بازه شامل دو بخش است: بخش جریان یکنواخت و بخش منحنی برگشت آب. هر بخش مشخصه‌ای اصلی دارد که از مجموع این دو، مدل ریاضی کانال به نام مدل انتگرالی - تأخیری به‌دست می‌آید. دو مشخصهٔ اصلی هر بازه عبارتاند از: زمان تأخیر (τ) و سطح ذخیره (A_s).



شکل ۲- شماتیک مدل انتگرالی - تأخیری

بخش جریان یکنواخت

در این بخش فرض می‌شود که امواج فقط به سمت پایین‌دست منتقل می‌شوند. هر تغییر در سازهٔ بالادست منجر به تولید یک موج می‌شود، این بخش از کانال فقط به‌عنوان گذار برای عبور این موج عمل می‌کند. سرعت موج در یک بازه از کانال با عمق نرمال، به سرعت موج سینماتیک نزدیک است. زمان تأخیر ناشی از حرکت، موج ایجاد شده در بالادست کانال به بخش منحنی برگشت آب می‌رسد و موجب تغییر تراز سطح آب می‌شود. تنها پارامتری که در بخش جریان یکنواخت برای تشریح جریان تعریف می‌شود زمان تأخیر است. معادلهٔ حاکم بر این بخش به‌صورت رابطهٔ ۶ بیان شده است:

$$q_{canal}(t) = q_{in}(t-\tau) \qquad (۶)$$

که در آن،

q_{in} = میزان دبی ورودی به بخش یکنواخت جریان (متر مکعب بر ثانیه)؛ q_{canal} = دبی ورودی به بخش ذخیره متر مکعب بر ثانیه)؛ t = زمان (ثانیه)؛ و τ زمان تأخیر (ثانیه). پایداری سیستم تحت کنترل (نظیر کانال‌های آبیاری)

1- Integrator Delay Model

معمولاً به دو صورت تحلیل می‌شود: تحلیل زمانی و تحلیل فرکانسی[1] (Kreyszig, 1999). در تحلیل فرکانسی، معادلات سیستم با استفاده از تبدیل‌های لاپلاس به‌کار گرفته می‌شود. با استفاده از تبدیل لاپلاس معادلهٔ جریان در بخش یکنواخت (رابطهٔ ۶)، به فرم رابطهٔ ۷ تبدیل می شود (Schuurmans, 1997):

$$\mathcal{L}(q_{canal}(t)) = \mathcal{L}(q_{in}(t-\tau)) \Leftrightarrow q_{canal}(s) = e^{-\tau s} \cdot q_{in}(s) \qquad (۷)$$

که در آن،

$\mathcal{L}$ = عملگر لاپلاس[2] و s = متغیر لاپلاس است.

بخش منحنی برگشت آب

این بخش مانند یک مخزن عمل می‌کند و بخش انتگرالی مدل را شامل می‌شود. تغییرات مساحت سطح افقی آب در ترازهای مختلف مخزن (A_s) بر اساس دبی‌های ورودی و خروجی از بازهٔ کانال به‌صورت رابطهٔ ۸، در حوزهٔ زمان و حوزهٔ فرکانس، قابل بیان است (Schuurmans, 1997):

$$\begin{aligned} &A_s \cdot \frac{dh(t)}{dt} = q_{canal}(t) - q_{out}(t) \\ &A_s \cdot s \cdot h(s) = q_{canal}(s) - q_{out}(s) \Leftrightarrow h(s) = \frac{1}{A_s \cdot s} \cdot [q_{canal}(s) - q_{out}(s)] \end{aligned} \qquad (۸)$$

که در آن،

A_s = مساحت سطح ذخیره در بخش منحنی برگشت آب (متر مربع)؛ h = عمق آب (متر)؛ و q_{out} = مقدار دبی خروجی از بخش منحنی برگشت آب (متر مکعب بر ثانیه).

مدل انتگرالی تأخیری کامل

برای یک بازه از کانال که شامل بخش جریان یکنواخت و بخش منحنی برگشت آب است، مدل کاملی از تلفیق معادلات ارائه شده در بخش‌های قبلی به‌دست می‌آید. در فضای زمان پیوسته، مدل انتگرالی تأخیری برای تحلیل زمانی و تحلیل فرکانسی به‌صورت رابطهٔ ۹ ارائه می‌شود (Schuurmans, 1997):

$$\begin{aligned} &\frac{dh(t)}{dt} = \frac{1}{A_s} \cdot [q_{in}(t-\tau) - q_{out}(t)] \\ &h(s) = \frac{e^{-\tau \cdot s}}{A_s \cdot s} \cdot [q_{in}(s) - q_{out}(s)] \end{aligned} \qquad (۹)$$

معرفی کانال مورد مطالعه و مشکلات بهره‌برداری

منطقهٔ رودشت در فاصلهٔ ۳۰ تا ۱۰۰ کیلومتری شرق و جنوب شرقی اصفهان واقع شده است. این منطقهٔ گسترده در دو سوی زاینده‌رود به دو بخش رودشت شمالی و رودشت جنوبی (یکی در شمال و دیگری در جنوب زاینده‌رود) تقسیم شده است. شبکهٔ آبیاری این منطقه حدود ۴۵۰۰۰ هکتار زمین را زیر پوشش قرار می‌دهد. رودشت آخرین دشتی است که از زاینده‌رود آبگیری می‌کند بنابراین همهٔ نوسان‌های رودخانه در طول مسیر ۳۵۰ کیلومتری روی شبکهٔ آبیاری آن تأثیر می‌گذارند. این تأثیر به‌صورت نوسان‌های مداوم دبی ورودی به شبکه و در نتیجه اختلال در کارکرد شبکه بروز می‌کند. در اثر این اختلال، گاهی دبی کافی به دریچه‌های انتهایی شبکه نمی‌رسد و گاهی هم دریچه‌های انتهایی با آب مازاد بر سهمیهٔ هر دریچه روبه‌رو می‌شوند که اگر مورد بهره‌برداری قرار نگیرد هرز می‌رود. کانال اصلی شاخهٔ شمالی شبکهٔ آبیاری رودشت به طول ۴۲۱۶۹ متر، شامل ۲۴ سازهٔ آب‌بند از نوع سرریز نوک اردکی، ۴۲ دریچهٔ آبگیری از نوع نیرپیک به‌عنوان کانال مورد مطالعه این تحقیق انتخاب شده است. جدول ۱ مشخصات فیزیکی کانال را نشان می‌دهد. نیم‌رخ این کانال در شکل ۱ نشان داده شده است.

میزان تغییرات مجاز رقوم سطح آب در هر یک از این

1- Frequency Domain

2- - Laplace Operator

۲۴ بازه کانال تحت عنوان خطای مجاز در جدول ۱ مشخص شده است. این مقدار بر اساس نوع دریچهٔ نیرپیک موجود در هر بازهٔ کانال مشخص شده است. برای مثال، در بازه‌هایی که آبگیر مدول نیرپیک XX2 وجود دارد، حداکثر انحراف مجاز سطح آب در بازهٔ کانال، بالادست دریچهٔ آبگیر، برای تحویل حداقل ۹۰ درصد دبی حقابه، مطابق با منحنی دبی- اشل موجود این دریچه، می‌تواند ۸ سانتی‌متر باشد. مقدار مشابه برای دریچهٔ نیرپیک L2 برابر ۱۳ سانتی‌متر است.

جدول ۱- مشخصات کانال اصلی آبیاری شاخهٔ شمالی شبکهٔ آبیاری رودشت (بر اساس اطلاعات جمع‌آوری شده در این پژوهش)

شمارهٔ بازه	خطای مجاز (سانتی‌متر)	طول (متر)	تعداد آبگیر	نوع آبگیر
۱	۸	۵۵۲۲	۴	XX2- L2
۲	۸	۱۸۳۳	۱	XX2
۳	۱۳	۱۴۰۰	۱	L2
۴	۱۳	۱۵۰۷	۱	L2
۵	۸	۳۸۸۰	۲	XX2- L2
۶	۸	۲۴۵۰	۲	XX2
۷	۸	۲۰۶۷	۲	XX2
۸	۸	۲۰۵۷	۲	XX2
۹	۸	۱۸۷۲	۲	XX2
۱۰	۸	۱۱۹۰	۲	XX2- L2
۱۱	۸	۱۷۳۴	۲	XX2
۱۲	۸	۲۴۵۱	۲	XX2- L2
۱۳	۸	۱۷۶۷	۲	XX2- L2
۱۴	۱۳	۱۵۵۵	۱	L2
۱۵	۸	۳۲۶۱	۲	XX2- L2
۱۶	۱۳	۲۰۹۴	۲	XX2
۱۷	۸	۲۰۱۰	۲	XX2- L2
۱۸	۸	۳۰۶۱	۲	XX2
۱۹	۸	۲۲۱۴	۲	XX2- L2
۲۰	۱۳	۲۰۳۴	۱	L2
۲۱	۱۳	۳۴۷۷	۱	L2
۲۲	۱۳	۱۶۳۵	۱	XX2
۲۳	۸	۲۳۷۳	۱	XX2
۲۴	۱۳	۵۴۹	۰	-
۱۳	۸	۱۷۶۷	۲	XX2- L2
۱۴	۱۳	۱۵۵۵	۱	L2
۱۵	۸	۳۲۶۱	۲	XX2- L2

سناریوهای بهره‌برداری کانال اصلی

به‌منظور شبیه‌سازی وضعیت هیدرولیکی جریان در کانال و میزان برداشت آبگیرها در زمان نوسان‌های جریان ورودی در سراب کانال، سناریوهایی در نظر گرفته شده که در آنها میزان بازشدگی آبگیرها ثابت اما دبی ورودی به سراب کانال متغیر است. یادآوری می‌شود که سناریوهای بهره‌برداری بخش حاضر بر اساس اطلاعات گزارش شده از تغییرات دبی ورودی در سراب کانال تعیین شده است که با توجه به این اطلاعات دو سناریو به‌ترتیب شامل تغییرات نرمال و شدید جریان در سراب کانال در نظر گرفته شد. در خلال بهره‌برداری، دریچه‌ها در دبی‌های مورد نیاز باز نگهداشته شدند و میزان تغییرات دبی تحویلی از هر دریچه با توجه به تغییرات عمق در بالادست آن ارزیابی شد. جدول ۲ میزان تغییرات دبی ورودی به سراب کانال را برای هر دو سناریو نشان می‌دهد.

جدول ۲- میزان دبی ورودی به سراب کانال

سناریوهای بهره‌برداری	زمان تغییر دبی در سراب کانال (ساعت)	دبی ورودی در سراب کانال (مترمکعب بر ثانیه)	کاهش دبی (درصد)	میزان کل تقاضا در کانال (مترمکعب بر ثانیه)
سناریوی اول (تغییرات نرمال)	ساعت ۱	۲/۷۸	-	۲/۷۸
	ساعت ۸	۲/۲۲	۲۰	۲/۷۸
	ساعت ۱۶	۲/۷۸	-	۲/۷۸
	ساعت ۲۰	۱/۶۶	۴۰	۲/۷۸
	ساعت ۲۴	۲/۷۸	-	۲/۷۸
سناریوی دوم (تغییرات شدید)	ساعت ۱	۲/۷۸	-	۲/۷۸
	ساعت ۸	۰/۸۳۴	۷۰	۲/۷۸
	ساعت ۱۶	۲/۷۸	-	۲/۷۸
	ساعت ۲۰	۱/۶۶	۴۰	۲/۷۸
	ساعت ۲۴	۲/۷۸	-	۲/۷۸

شاخص‌های ارزیابی عملکرد

تقریباً در تمامی سامانه‌های کنترل خودکار هدف اصلی ثابت نگهداشتن تراز سطح آب در کانال در یک ارتفاع هدف است. با حفظ رقوم سطح آب در بازه‌های کانال در این رقوم هدف، آبگیرهای جانبی همواره دبی ثابت و یکنواختی را دریافت می‌کنند. با توجه به این موضوع، در اکثر تحقیقات خودکارسازی کانال‌ها قضاوت دربارهٔ عملکرد هر الگوریتم کنترل می‌تواند از روی چگونگی عملکرد آن در ثابت نگهداشتن سطح آب ارائه شود. از این‌رو، شاخص‌های ارزیابی بر اساس میزان خطای سطح آب از سطح هدف و مدت‌زمان وقوع این خطا طرح‌ریزی شده‌اند. رایج‌ترین شاخص‌های ارزیابی عملکرد مورد استفاده در پژوهش‌های مختلف عبارت‌اند از حداکثر

خطـــای مطلـــق[1] و خطـــای مطلـــق تجمعـــی[2] (Clemmens & Replogle, 1989; Molden & Gates, 1990):

$$MAE=\frac{max\left(\left|y_t-y_{target}\right|\right)}{y_{target}} \qquad (۱۰)$$

که در آن،

y_t = تراز سطح آب مشاهده شده (محاسبه شده با مدل شبیه‌سازی جریان) در زمان t؛ و y_{target} = تراز سطح آب هدف.

$$IAE=\frac{\frac{\Delta t}{T}\sum_{t=0}^{T}\left(\left|y_t-y_{target}\right|\right)}{y_{target}} \qquad (۱۱)$$

که در آن،

Δt = فاصلهٔ بین گام‌های زمانی اِعمال تنظیم‌ها؛ و

T = دورهٔ زمانی اجرای سناریو.

نتایج و بحث

وضعیت بهره‌برداری کانال اصلی مورد مطالعه با مدل ریاضی طراحی شدهٔ جریان در کانال (مطابق مدل انتگرالی – تأخیری) و سامانهٔ بهره‌برداری طراحی شده برای کانال مورد مطالعه (توسط سامانهٔ کنترل خودکار تناسبی-انتگرالی)، شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی به تفکیک دو سناریوی بهربرداری جریان ورودی با نوسان‌های نرمال و نوسان‌های شدید، در شکل‌های ۳ و ۴ رسم و شاخص‌های ارزیابی عملکرد برای تمامی ۲۴ بازهٔ کانال محاسبه شدند.

سناریوی بهره‌برداری جریان ورودی با نوسان‌های نرمال

این سناریو با توجه به الگوی تغییرات دبی ورودی در سراب کانال مورد مطالعه، که اطلاعات آن از دفتر بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری شرکت آب منطقه‌ای اصفهان جمع‌آوری شده بود، انتخاب شد. باید توجه داشت که در هر دو سناریوی بهره‌برداری این تحقیق، با وجود تغییرات دبی ورودی به کانال اصلی در اثر نوسان‌های ورودی به شبکه، تنظیم آبگیرهای نیرپیک در دورهٔ بهره‌برداری ثابت بوده که بدین معنی است که در میزان کل دبی برداشتی از آبگیرها تغییری ایجاد نمی‌شود. مطابق این سناریو، در ابتدا دبی ورودی به کانال طی ۸ ساعت برابر با ۲/۷۸ مترمکعب بر ثانیه بوده است، این میزان دبی در بازه‌های زمانی ۴ ساعته به‌ترتیب با ۲۰ و ۴۰ درصد کاهش و سپس با افزایش مواجه شده و در نهایت در ساعت ۲۰ شبیه‌سازی به مقدار اولیه باز می‌گردد (جزییات کامل در جدول ۲ قابل مشاهده است). میزان تغییرات مجاز رقوم سطح آب در هر یک از ۲۴ بازه کانال مورد مطالعه با عنوان خطای مجاز در جدول ۱ مشخص شده است. بر این اساس اگر انحراف رقوم سطح آب کنترل شده در بالادست آبگیر از رقوم هدف (و به عبارت دیگر، خطای رقوم سطح آب) از این میزان بیشتر شود، آبگیری مختل می‌گردد. بنابراین شاخص‌های ارزیابی عملکرد به این‌صورت محاسبه شدند که با تخطی خطای سطح آب از محدودهٔ مجاز خطا، مقدار شاخص‌ها غیر صفر و در غیر این‌صورت صفر اندازه‌گیری شدند. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، میدان تغییرات رقوم سطح آب کنترل شده توسط سامانهٔ کنترل خودکار تناسبی- انتگرالی طراحی شده در این تحقیق برای ۲۰ بازهٔ ابتدایی کانال اصلی، کمتر از ۸ سانتی‌متر بوده است. شاخص‌های ارزیابی عملکرد محاسبه شده خطای مطلق و خطای مطلق تجمعی برای بازه‌های مذکور صفر شده است که

1- Maximum Absolute Error (MAE)

2- Integral of Absolute Magnitude of Error (IAE)

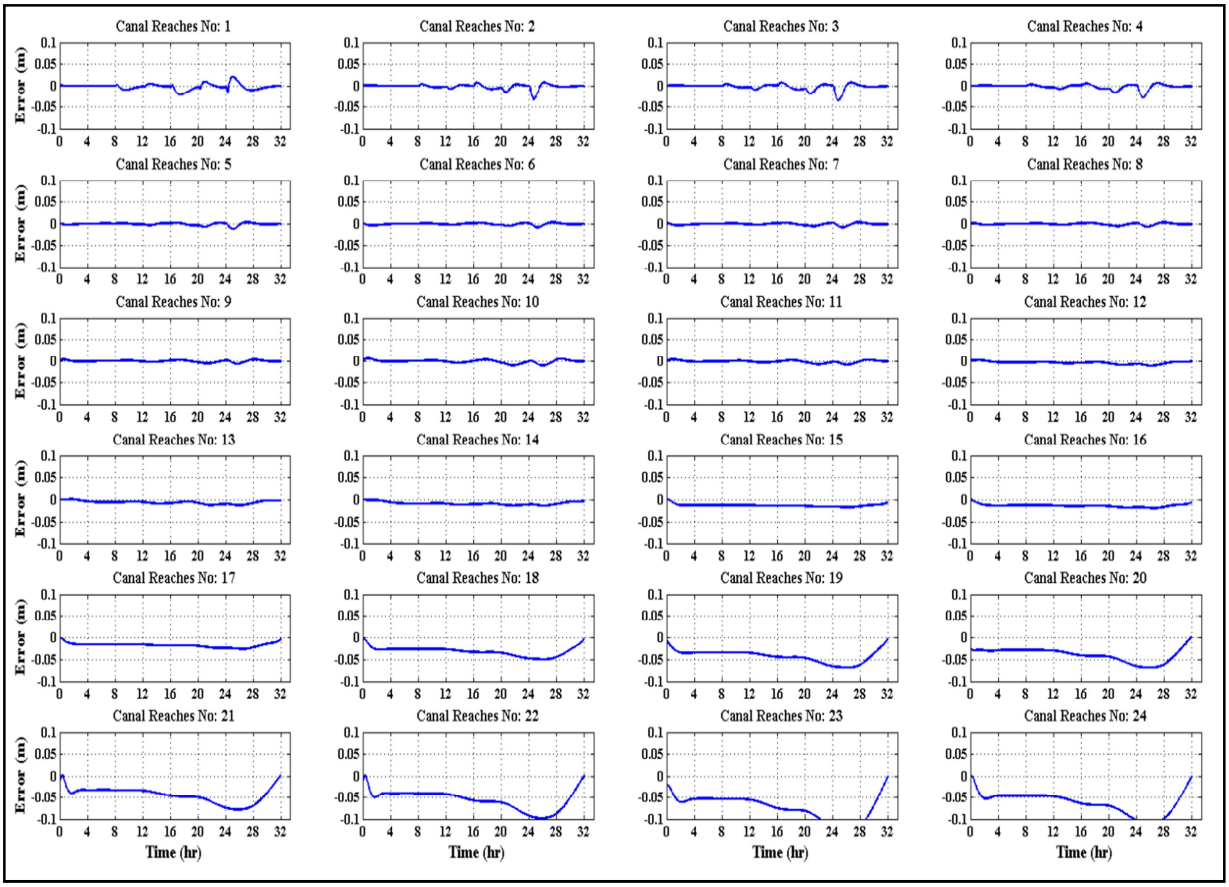
تأییدکنندهٔ این واقعیت هستند.

با توجه به ماهیت شیوهٔ کنترل پس‌خور کنترلگر تناسبی- انتگرالی، مطابق انتظار میزان نوسان‌های ورودی کمترین تأثیر را در انحراف رقوم سطح آب بازه‌های بالادست از رقوم هدف گذاشته است. مطابق شکل ۳، در ۴ بازهٔ ابتدایی کانال اصلی که حجم آبگیری بالایی دارند، و به‌خصوص در بازهٔ اول که با چهار آبگیر بیشترین تعداد آبگیرها را به خود اختصاص داده، رقوم سطح آب به نحو بسیار مطلوبی کنترل شده است. مشابه این روند در بازه‌های میانی کانال اصلی، بازهٔ شمارهٔ پنج تا شانزده، که آبگیرهای واقع شده در آنها میزان آبگیری اندکی دارند، رخ داده و رقوم سطح آب به‌خوبی کنترل شده و می‌توان گفت که اثر نوسان‌های ورودی عملاً به طرز مطلوبی خنثی شده است. اما عملکرد بهره‌برداری کانال در بازه‌های پایین‌دستی، بازه‌های ۲۱ تا ۲۴، از میزان مطلوب فاصله گرفته به نحوی که در سه بازهٔ انتهایی کنترلگر قادر به کنترل رقوم سطح آب در محدودهٔ مجاز نبوده است.

مقادیر محاسبه شده شاخص‌های ارزیابی عملکرد در جدول ۳ آمده است. بر این اساس، حداکثر شاخص‌های ارزیابی عملکرد محاسبه شده در بازهٔ ۲۳ و به میزان ۱۱/۳ و ۷/۵ درصد به‌ترتیب برای شاخص خطای مطلق و خطای مطلق تجمعی به‌دست آمده است. دلیل این امر را می‌توان به ماهیت موضعی بودن کنترلگر تناسبی- انتگرالی طراحی شده در کنترل سطح آب بالادست سازهٔ کنترل نسبت داد. به عبارت دیگر، هر کنترلگر، صرف‌نظر از وضعیت بهره‌برداری بازه‌های بالادست و پایین‌دستی، تنها وضعیت جریان را در مجاورت خود کنترل می‌کند.

با توجه به طولانی بودن و همچنین بالا بودن تعداد سازه‌های تنظیم کانال مورد مطالعه، زمان تأخیر حرکت جریان افزایش یافته است که تأثیر به‌کارگیری اقدامات اصلاحی در سراب کانال را نیز کاهش می‌دهد. مجموعهٔ این عوامل سبب شده که توانایی سامانهٔ کنترل غیرمتمرکز تناسبی- انتگرالی طراحی شده، در زمان جریان ورودی با نوسان‌های نرمال ایده‌آل نباشد. گفتنی است که در همین شرایط سناریوی مذکور، بهره‌برداری حال حاضر کانال مورد مطالعه در توزیع آب از لحاظ کفایت تحویل آب به آبگیرها و نیز تأمین عدالت در توزیع بین بالادست و پایین‌دست با مشکلات بسیار جدی همراه است.

بر اساس نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، بهره‌گیری از سامانهٔ طراحی شده، در مقایسه با وضعیت حال حاضر بهره‌برداری کانال، میزان بهبود عملکرد بهره‌برداری این کانال را تا حد قابل توجهی افزایش می‌دهد.



شکل ۳- رقوم سطح آب کنترل‌شده در بازه‌های کانال اصلی مورد مطالعه تحت نوسان‌های ورودی نرمال

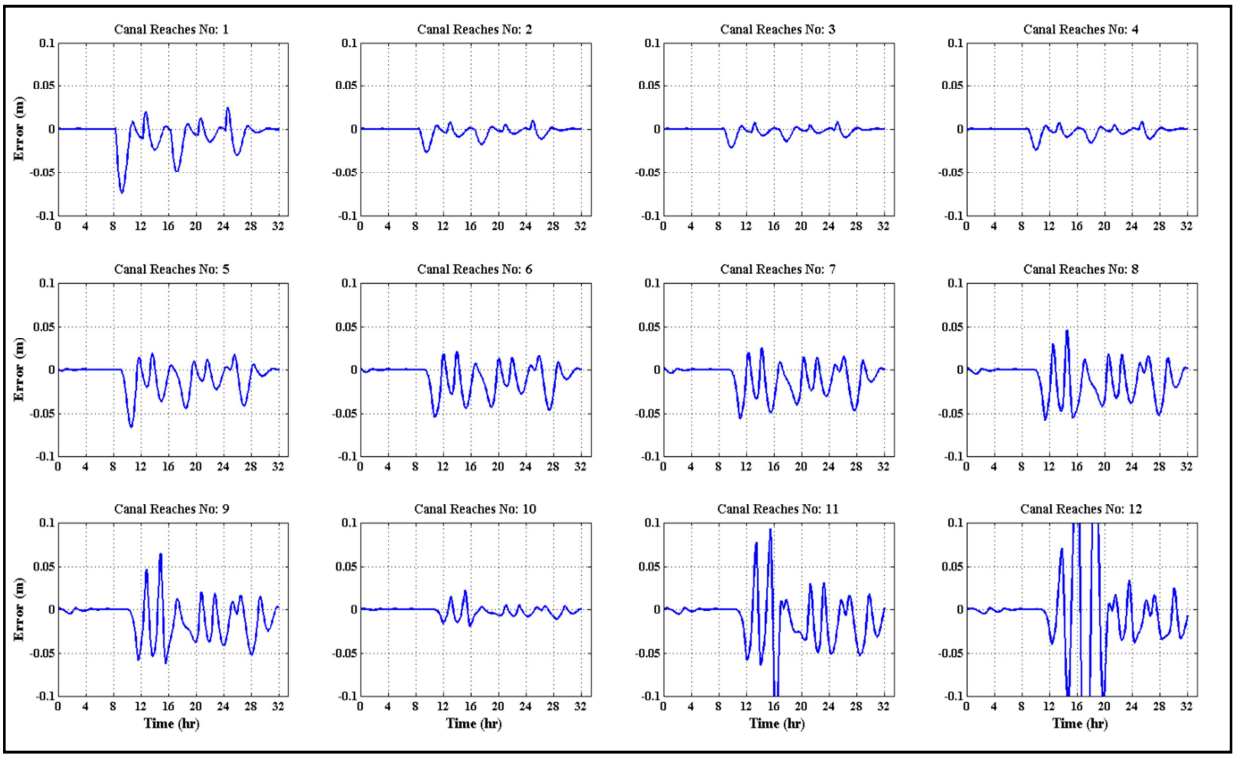
جدول ۳- مقادیر شاخص‌های محاسبه شده در سناریوی اول

	۲۴ بازهٔ موجود																							
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
خطای مطلق (درصد)	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۷/۸	۹	۱۱/۳	۱۱
خطای مطلق تجمعی (درصد)	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵	۵/۸	۷/۵	۷/۲

سناریوی بهره‌برداری جریان ورودی با نوسان‌های شدید

مطابق این سناریو، مشابه با سناریوی نرمال، در ابتدا دبی ورودی به کانال طی ۸ ساعت برابر با ۲/۷۸ مترمکعب بر ثانیه بوده است اما در سناریوی دوم میزان دبی ورودی به‌ترتیب با ۷۰ و ۴۰ درصد کاهش و افزایش در بازه‌های زمانی ۴ ساعته مواجه می‌شود و سرانجام در ساعت ۲۰ شبیه‌سازی به مقدار اولیه باز می‌گردد. در مقابل نتایج مطلوبی که از بهره‌برداری کانال توسط سامانهٔ کنترل خودکار طراحی شده در شرایط نوسان‌های نرمال به دست آمده است، در شرایط نوسان‌های شدید عملکرد این سامانه

ضعیف ارزیابی می‌گردد. مقادیر محاسبه شدهٔ شاخص‌های ارزیابی عملکرد در جدول ۴ آمده است. مطابق با شکل ۴ که نتایج شبیه‌سازی بهره‌برداری کانال اصلی تحت نوسان‌های شدید ورودی به کانال اصلی را نشان می‌دهد، کنترلگر تناسبی- انتگرالی تنها قادر به کنترل رقوم سطح آب در بازه‌های بالادستی بوده به‌طوری‌که کنترلگر واقع در بازه یازدهم سازهٔ تنظیم مرتبط با خود را به‌طور کامل بسته و اجازهٔ عبور آب به پایین‌دست کانال را نداده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که پس از اِعمال نوسان شدید در جریان ورودی و با ۷۰ درصد دبی ورودی به کانال اصلی، دبی عبوری از بازهٔ دوازدهم تا انتهای کانال تقریباً صفر شده و با راه افتادن موج منفی ناشی از بسته شدن ناگهانی دریچه‌ها، تشدید امواج، رزونانس، نه تنها در بازه‌های پایین‌دست بلکه در بازه‌های بالادست نیز رخ داده است. شاخص‌های محاسبه شده ارزیابی عملکرد و نیز پروفیل سطح آب در نیمهٔ پایین‌دست کانال حاکی از اختلال شدید در آبگیری تا یک ساعت پس از ورود دبی نوسانی به کانال اصلی و سپس قطع کامل آبگیری بوده است.



شکل ٤- رقوم سطح آب کنترل‌شده در دوازده بازهٔ ابتدایی کانال اصلی مورد مطالعه تحت نوسان‌های ورودی شدید

جدول ٤- مقادیر شاخص‌های محاسبه شده در سناریوی دوم

	۱۲ بازه ابتدایی											
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
خطای مطلق (درصد)	۲/۲	۰	۰	۰	۳/۹	۳/۵	۳/۶	۶/۹	۱۰	۰	۳۵	۵۵
خطای مطلق تجمعی (درصد)	۲/۸	۰	۰	۰	۳/۲	۲/۹	۳/۱	۷/۲	۹/۱	۰	۳۱	۳۸

نتیجه‌گیری

سازه‌های تنظیم سریزهای نوک اردکی موجود در کانال اصلی شاخهٔ شمالی رودشت به واسطهٔ نوسان‌های دبی ورودی به شبکه، به‌خصوص در دریچه‌های نیرپیک واقع در پایین‌دست کانال اصلی، نتوانسته‌اند مانع اختلال فرایند آبگیری شوند، از این‌رو توزیع ناعادلانهٔ آب بین کشاورزان منطقه مشکلات حادی را به‌وجود آورده است. در این باره راه‌هایی متعدد برای حل این معضل اندیشیده و راه‌کارهای متفاوتی ارائه شده است، راه‌کارهایی مانند بررسی احداث مخزن در ابتدای شبکه برای خنثی کردن اثر نوسان‌ها در کانال اصلی تا جایگزینی روش منسوخ تقسیم تناسبی آب با استفاده از تقسیم عرض سرریزهای کنترل جریان به تناسب میزان حق‌آبهٔ آب‌بران به‌جای سرریزهای لبه طولانی در طول مسیر کانال اصلی.

مطابق با اسناد بالادستی آب کشور، تحویل حجمی کنترل شده و دقیق به آب‌بران، در شبکه‌های آبیاری مدرن و سنتی کشور یکی از مهم‌ترین اقدامات ضروری در شبکه‌های آبیاری تلقی می‌شود. بر این اساس، نیاز به بومی‌سازی و پیاده‌سازی فناوری‌های نوین مدیریت آب کشاورزی بیشتر از همیشه احساس می‌شود. تحقیق پیش‌رو با هدف بررسی توانایی سامانهٔ کنترل خودکار رقوم سطح آب در کانال اصلی آبیاری و به شیوهٔ غیرمتمرکز، که ابتدایی‌ترین سطح خودکارسازی الکترونیکی به‌شمار می‌رود، برای رفع مشکل شبکهٔ آبیاری رودشت به اجرا درآمد.

نتایج تحقیق نشان می‌دهد که برای الگوی تغییرات نرمال، با حداکثر انحراف دبی ورودی ۴۰ درصد به کانال اصلی در زمان نوسان‌های آب تأمین شده برای شبکهٔ آبیاری رودشت، سامانهٔ کنترل خودکار غیرمتمرکز تناسبی- انتگرالی به‌خوبی می‌تواند نوسان‌های ورودی به کانال اصلی را کنترل کند. با توجه به اینکه کانال مورد مطالعه در این تحقیق از نظر تعداد زیاد بازه‌های کانال شرایط ویژه‌ای دارد، همچنین سناریوهای بهره‌برداری این تحقیق به‌صورت سختگیرانه‌ای تنظیم شده‌اند، به نحوی که دبی پایهٔ کانال برابر با دبی حداقل در نظر گرفته شد تا نوسان‌های ورودی بیشترین تاثیر را در عملکرد بهره‌برداری کانال بگذارند، لذا می‌توان با اطمینان خاطر گفت که سامانهٔ طراحی شده در این تحقیق می‌تواند در شرایط مشابه و برای سایر کانال‌های اصلی آبیاری بهره‌برداری مطلوبی را ارائه دهد.

نتایج سناریوی شدید که ناشی از کاهش ناگهانی ۷۰ درصدی جریان ورودی به کانال است، نشان از ناتوانی سامانهٔ کنترل غیرمتمرکز تناسبی- انتگرالی در کنترل این وضعیت شدید بهره‌برداری کانال اصلی است. بر پایهٔ نتایج به‌دست آمده پیشنهاد می‌شود در مواقعی که نوسان‌های جریان ورودی به کانال قابل توجه است، بهره‌گیری از سامانهٔ کنترل خودکار متمرکز ضروری است. همچنین می‌توان راه‌هایی مانند استفاده از کنترلگرهای غیرمتمرکز کوپل شده و بهره‌گیری از استراتژی ذخیرهٔ درون مسیری به میان آورد، با این هدف که آب مازاد در بازه‌هایی از کانال اصلی برای کاهش اثر مخرب نوسان‌ها ذخیره شود.

ذکر این نکته الزامی است که نوسان‌های ورودی در نظر گرفته شده در این تحقیق از نوع ناگهانی و غیر قابل پیش‌بینی هستند؛ در مواقعی که امکان پیش‌بینی زودتر نوسان‌ها با کمک ایستگاه‌های اندازه‌گیری دبی رودخانه واقع در بالادست شبکهٔ آبیاری وجود داشته باشد، بهره‌گیری از راه‌های کمکی مانند استفاده از روش‌های کنترل تلفیقی بالادست و پایین‌دست و استفادهٔ هم‌زمان کنترلگرهای پس‌خور و پیش‌خور می‌تواند به بهبود وضعیت عملکرد سامانه‌های کنترل خودکار غیرمتمرکز کمک کند.

قدردانی

این مقاله با حمایت مالی شرکت آب منطقه‌ای اصفهان در قالب پروژهٔ تحقیقاتی شماره ۹۴/۱۱۷ تهیه شده است. نویسندگان مقاله قدردانی خود را از شرکت مذکور اعلام می‌نمایند.

مراجع

Burt, C. M. 2013. The irrigation sector shift from construction to modernization: what is required for success?. Irrig. Drain. 62(3): 247-254.

Clemmens, A. and Replogle, J. 1989. Control of irrigation canal networks. J. Irrig. Drain. E-ASCE. 115(1): 96-110.

Cunge, J. A. 1969. On the subject of a flood propagation computation method (Musklngum method). J. Hydraul. Res. 7(2): 205-30.

Gómez, M., Rodellar, J. and Mantecón, J. A. 2002. Predictive control method for decentralized operation of irrigation canals. Appl. Math. Model. 26(11): 1039-56.

Hashemi, M., Monem, M. J., Maestre, J. M. and van Overloop, P. 2013. Application of an in-line storage strategy to improve the operational performance of main irrigation canals using model predictive control. J. Irrig. Drain. E-ASCE. 139(8): 635-644.

Kreyszig, E. 1999. Advanced Engineering Mathematics. 8th Ed. John Wiley & Sons, Inc. USA.

Miltenburg, I. J. 2008. Determination of canal characteristics with experimental modeling. M. Sc. Thesis. Faculty of Civil Engineering and Geoscience. Delft University of Technology. The Netherlands.

Molden, D. and Gates, T. 1990. Performance measures for evaluation of irrigation-water-delivery systems. J. Irrig. Drain. E-ASCE. 116, 804-823.

Schuurmans, J. 1997. Control of water levels in open-channels. Ph. D. Thesis. Delft University of Technology. The Netherlands.

van Overloop, P. J., Schuurmans, J., Brouwer, R. and Burt, C. M. 2005. Multiple-model optimization of proportional integral controllers on canals. J. Irrig. Drain. E-ASCE. 131, 190-196.

van Overloop, P. J., Maestre, J. M., Hashemy, S. M., Sadowska, A. D., Davids, J. C. and Camacho, E. F. 2014. Human in the loop control of Dez main canal. Proceedings of the Planning, Operation and Automation of Irrigation Delivery Systems. U. S. Committee on Irrigation and Drainage. Phoenix, Arizona, USA.

Xu, M., van Overloop, P. J. and van de Giesen, N. C. 2011. On the study of control effectiveness and computational efficiency of reduced Saint-Venant model in model predictive control of open channel flow. Adv. Water Resour. 34 (2): 282 - 90.

AERI *Journal of Applied Research in Irrigation and Drainage Structures Engineering/Vol.17/No.66/2016/P:137-152*

Performance Assessment of Decentralized Automatic Control System for Applying in Operation of a Main Irrigation Canal under Inflow Fluctuations

S. M. Hashemy-Shahdany*, A. Firrozfar, S. Sadeghi and E. Adib-Majd

* Corresponding Author: Assistant Professor, Water Engineering Department, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: mehdi.hashemy@ut.ac.ir
Received: 16 April 2016, Accepted: 7 June 2016

Improving agricultural water productivity is one of the important objectives in irrigation canal networks. Accordingly, localizing and implementation of the modern operational technologies is essential. In order to deal with operation of main irrigation canal under inflow fluctuations, in the present study, the application of decentralized automatic control system, as the first step towards the canal automation is investigated. The Inflow fluctuations happen due to water scarcity in those irrigation networks located in the southern part of the watersheds. To this end, a decentralized PI Controller is designed to be applied for operation of mathematical model of the of Roodasht main irrigation canal. The deigned controller was tested by two normal and harsh unpredictable inflow fluctuation scenarios. The results of the simulation are evaluated by the operational performance evolution indices. The results indicate that the canal operational condition under the normal inflow fluctuations is reasonably controlled by the designed PI system. But in the case of harsh inflow fluctuations, the PI controller is not capable to handle the condition and the middle and downstream canal reaches are suffering from inappropriate water taking. Therefore it can be concluded that, application of the modern centralized controller would be recommended as a reliable options for operation of the main canal.

Keywords: Control System, Drought, Inflow Fluctuations, Operation, Proportional-Integral Controller