مجله علمی- پژوهشی
دوره ۷، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۱

استفاده از ذخیره درون مسیری در سامانه‌های کنترل خودکار به‌منظور بهبود فرایند بهره‌برداری در کانال اصلی آبیاری (مطالعه موردی کانال اصلی آبیاری شبکه دز)

سید مهدی هاشمی[۱]، محمد جواد منعم[۲*]، سعید عیسی‌پور[۳]

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس
۲- دانشیار سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس
۳- کارشناس ارشد آبیاری و زهکشی، مهندسین مشاور یکم

* تهران، صندوق پستی ۳۳۶ - ۱۴۱۱۵
monem_mj@modares.ac.ir

چکیده- در این تحقیق، کارایی ذخیره درون مسیری در حداقل‌سازی انحراف‌های رقوم سطح آب از عمق هدف در سامانه‌های کنترل خودکار، به‌عنوان یکی از ابزارهای بهبود مدیریت توزیع و بهره برداری کانال اصلی در پروژه‌های نوسازی و به‌سازی شبکه‌های آبیاری بررسی شده است. به‌منظور ارزیابی کارایی ذخیره درون مسیری در بهبود عملکرد سامانه‌های کنترل خودکار، کنترل‌گر پس‌خورد موضعی تناسبی- انتگرالی به‌روش کنترل بالادست در شرایط بهره‌برداری نرمال و بهره‌برداری با ذخیره درون مسیری طراحی شده و برای گزینه بهره‌برداری افزایشی-کاهشی شدید ناگهانی برای کانال اصلی شبکه آبیاری دز بررسی شد. ارزیابی عملکرد کنترل‌گرها با استفاده از شاخص‌های پیشنهادی ASCE شامل MAE، IAE و StE برای دوره شش روزه بهره‌برداری انجام شد. استفاده از ذخیره درون مسیری سبب بهبود مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد شده که بیشترین میزان بهبود برای بازه‌های ابتدایی کانال بوده که برای شاخص MAE در بازه اول از مقدار ۲/۱ به ۰/۳۲، برای شاخص IAE در بازه سوم از مقدار ۱/۳ به ۰/۵ و برای شاخص StE از مقدار ۰/۷۱ به ۰/۱۴ می‌باشد. بهبود عملکرد در شرایطی حاصل شده که تغییرات ناگهانی و شدید دریافت آب توسط آبگیرها مورد آزمون قرار گرفته است. بدیهی است در شرایط بهره‌برداری معمول که تغییرات دریافت آب کمتر و به‌مراتب تدریجی‌تر میباشد، نقش دخیره درون مسیری در بهبود عملکرد سامانه خودکار به‌مراتب بیشتر خواهد بود.

کلیدواژگان: ذخیره درون مسیری، بهره‌برداری کانال اصلی، مدل هیدرودینامیک، کنترل‌گر تناسبی- انتگرالی.

۱- مقدمه

امروزه آب به عنوان یک منبع کمیاب و گران‌قدر در سطح دنیا تبدیل شده است. با رشد جمعیت و توسعه فزاینده نواحی اقتصادی در اطراف شهرها، علاوه بر مصارف شهری، مصارف بخش کشاورزی اهمیت بسیار زیادی نسبت به گذشته به خود گرفته است. کشاورزی وابسته به

آبیاری که تقریباً ۴۰ درصد تولید محصولات غذائی را تأمین می‌کند، با یک چالش روبرو شده است. از یک طرف با افزایش جمعیت نیاز به تولید محصول بالا رفته و از طرف دیگر با رشد مصارف شهری و صنعتی آب کمتری نسبت به گذشته به بخش کشاورزی تخصیص داده می‌شود (Litrico and Fromion, 2009). این عوامل، انگیزه شدیدی را برای خودکارسازی مدیریت کانال‌های آبیاری با بهره‌گیری از روش‌های مهندسی کنترل ایجاد کرده است (Clemmens and Replogle, 1989). مدیریت هوشمند انتقال و تحویل آب آبیاری یکی از اقدام‌های جدی در افزایش میزان بهره‌وری آب در بخش کشاورزی می‌باشد. در شبکه‌های آبیاری و زهکشی، این مدیریت باید دقیق و انعطاف‌پذیر باشد. منظور از دقیق بودن، تطابق داشتن میزان آب تأمین شده با نیازهای موجود بوده، و منظور از انعطاف‌پذیری، تأمین آب متناسب با تغییرات نیازهای آبی می‌باشد (Schuurmans et al., 1999). برای این منظور، تمامی اجزای سیستم انتقال آب از سازه‌های تنظیم و دریچه‌های آبگیری تا پمپ‌ها همگی باید به صورت صحیح تنظیم شوند. مدیریت هوشمند بهره‌برداری، دامنه زمانی بهره‌برداری سیستم انتقال آب را از مقیاس زمانی چند روز به مقیاس زمانی به مراتب کمتر (ابعاد دقیقه تا ساعت) تقلیل می‌دهد (Litrico and Fromion, 2009). مدیریت هر نوع سیستم‌های آبی روباز را می‌توان بوسیله مجموعه‌ای از قواعد ریاضی و منطق، در قالب یک سامانه کنترل، برای کنترل دبی، حجم یا تراز سطح آب فرمول‌بندی کرد (Overloop et al., 2005). کنترل‌گر با کنترل متغیر وضعیت جریان (معمولاً رقوم سطح آب) که تحت تأثیر اغتشاشات وارده بر سیستم قرار دارد، در بهبود بهره‌برداری از کانال مورد استفاده قرار می‌گیرد. باید توجه شود که جریان آب در کانال‌های آبیاری، مسافت‌های بسیار طولانی را با تأخیرهای زمانی قابل ملاحظه و دینامیک متغیر نسبت به وضعیت‌های بهره‌برداری طی می‌کند. سازه‌های تنظیم و آبگیری واقع شده در کانال به‌طور متوالی نصب شده و وضعیت جریان را تحت تأثیر خود قرار می‌دهند. بنابراین سیستم کانال باید به صورت یک سیستم دینامیک پیچیده با تعداد زیادی متغیر لحاظ شود (Montazar et al, 2005).

برای تحلیل همه جانبه سامانه انتقال آب، بررسی نتایج حاصل از اعمال سامانه‌های کنترلی و نیز مشخص نمودن بهترین پاسخ هیدرولیکی سیستم به هرگونه تغییرات اعمال شده در روند بهره‌برداری، استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز هیدرودینامیک جریان اجتناب‌ناپذیر است. از مزایای استفاده از مدل‌های هیدرودینامیک در مقایسه با مدل‌های فیزیکی، کاهش زمان آزمون، بررسی و مقایسه گزینه‌های گوناگون و کاهش هزینه‌ها است (Clemmen et al., 2005). به‌عبارت دیگر، مدل‌های شبیه‌ساز هیدرولیکی بستری را برای ارزیابی و انتخاب مؤثرترین روش کنترلی در روند بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری و زهکشی فراهم می‌کند.

موفقیت بهره‌برداری یک سیستم آبیاری در گرو از بین بردن عدم تطابق بین عرضه و تقاضا در شبکه می‌باشد. ورود آب مازاد بر ظرفیت کانال سبب اتلاف آب و تخلیه آن در پایین‌دست شبکه، ایجاد شرایط ماندابی، افزایش شوری اراضی و نهایتاً وارد شدن خسارات زیست‌محیطی به اراضی پایین‌دست خواهد شد. از طرف دیگر، کمبود آب ورودی، سبب کاهش میزان کفایت تحویل آب به آب‌بران می‌شود. هر عاملی که سبب حداقل‌سازی اختلاف موجود بین عرضه و تقاضا شود، سبب بهبود عملکرد کل سیستم آبیاری خواهد شد (Bhadra et al., 2009). در شبکه‌های بزرگ آبیاری که اغلب به شیوه کنترل از بالادست کنترل می‌شوند، زمان تأخیر قابل ملاحظه‌ای بین زمان ورود جریان از سراب تا زمان تحویل به آبگیرهای واقع در اواسط و انتهای شبکه وجود دارد. این زمان تأخیر زیاد سبب افزایش مدت زمان جریان غیرماندگار در شبکه

خواهد شد که به تبع آن سبب تشدید تغییرات عمق در طول بازه‌های کانال و تغییرات در دبی تحویلی می‌شود (اسلامبولچی، ۱۳۸۶). یکی از ابزارهای مناسب مدیریتی در جهت کاهش تأخیر زمانی و بهبود مدیریت بهره‌برداری سیستم، استفاده از مخازن تنظیمی در مسیر کانال‌های آبیاری می‌باشد که با بهره‌گیری از این روش می‌توان تا حد زیادی عدم تطابق بین تأمین و تحویل را کاهش داده و عدالت در توزیع را بهبود بخشید. این مخازن می‌توانند به صورت مخزن جداگانه در کنار کانال اصلی ساخته شوند (اسلامبولچی، ۱۳۸۵؛ احسانی و همکاران، ۱۳۸۳) و یا به صورت ذخیره در طول کانال اصلی[1] باشند. استفاده از کانال اصلی جهت ذخیره آب، به علت عدم نیاز به ساخت مخزن جداگانه سبب صرفه‌جویی قابل ملاحظه در هزینه‌ها و کاهش مشکلات ناشی از جایابی، احداث، کنترل نشت و عملیات نگهداری از مخزن می‌شود، اما به دلیل افزایش عمق آب در کانال و تشدید نوسان‌های سطح آب، کنترل تراز سطح آب پیچیده‌تر خواهد شد که نیازمند اعمال روش‌های کنترلی دقیق‌تر در بهره‌برداری کانال می‌شود (Schuurmans et al., 1992).

شورمانز و همکاران در سال ۱۹۹۲ تحقیقی را برای بررسی اثر ذخیره درون مسیری در بهبود عملکرد بهره‌برداری کانال اصلی شاه عبدالله اردن انجام دادند. بررسی بهبود فرایند بهره‌برداری با اعمال ذخیره درون مسیری و نیز توانایی عبور سیلاب‌ها از اهداف این تحقیق تعریف شده است. در این تحقیق سه سامانه کنترل موضعی بالادست، پایین‌دست و ترکیبی به صورت پس‌خورد (FB) برای دو حالت کنترل دستی و خودکار مورد آزمایش قرار گرفت. برای کنترل خودکار کانال، کنترل‌گر تناسبی- انتگرالی- دیفرانسیلی (PID) و کنترل‌گر سرعت[2] استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد که روش کنترل دستی توانایی کافی جهت بهره‌برداری کانال اصلی با ذخیره درون مسیری را نداشته و لازم است از سامانه کنترل خودکار استفاده شود. کنترل‌گرهای مورد آزمون در هر دو روش کنترل بالادست و پایین‌دست تنها قادر به کنترل سطح آب در بازه‌های نیمه بالادست کانال بودند. بازه‌های قرار گرفته در نیمه پایین‌دست جهت اعمال کنترل خودکار نیازمند افزایش عمق آزاد کانال یا اعمال رقوم عمق هدف متغیر در طول این بازه‌ها می‌باشند. به‌علت هزینه بالای گزینه اول، ریسک ناشی از کاهش پایداری به سبب افزایش رقوم عمق هدف در طول کانال مورد پذیرش قرار گرفت. روش پیشنهادی نهایی برای این کانال، به‌صورت استفاده از ذخیره درون مسیری، به‌کمک کنترل بالادست خودکار در مواقع سیلابی برای عبور سیلاب و کنترل پایین‌دست خودکار در مواقع غیر سیلابی بود (Schuurmans et al., 1992).

نکته قابل تأمل در تحقیق شورمانز و همکاران آن است که افزایش ذخیره درون مسیری در تمامی بازه‌ها منجر به افزایش ریسک ناپایداری جریان به‌سبب افزایش حجم آب عبوری از تمامی سازه‌های آب‌بند و کاهش عمق آزاد در کلیه بازه‌های کانال اصلی می‌شود. انتخاب یک یا چند بازه کانال برای ذخیره درون مسیری، مدیریت ناپایداری جریان را با اعمال کنترل دقیق‌تر بر این بازه‌ها آسان‌تر و افزایش پایداری جریان در طول کانال اصلی را به‌همراه خواهد داشت. همچنین اعمال روش کنترل دقیق‌تر تنها برای این چند بازه انجام می‌گیرد.

هدف از انجام تحقیق حاضر، بررسی میزان بهبود فرایند بهره‌برداری در یک کانال اصلی خودکار با بهره‌گیری از استراتژی ذخیره درون مسیری در تعداد بازه‌های محدودی از کانال اصلی می‌باشد. برای این منظور کنترل‌گر پسخورد موضعی تناسبی- انتگرالی در شرایط بهره‌برداری نرمال و بهره‌برداری با ذخیره درون مسیری در سه بازه کانال طراحی شدند. توانایی هر دو روش بهره‌برداری با یک

1. In-Line Storage
2. Speed Controller

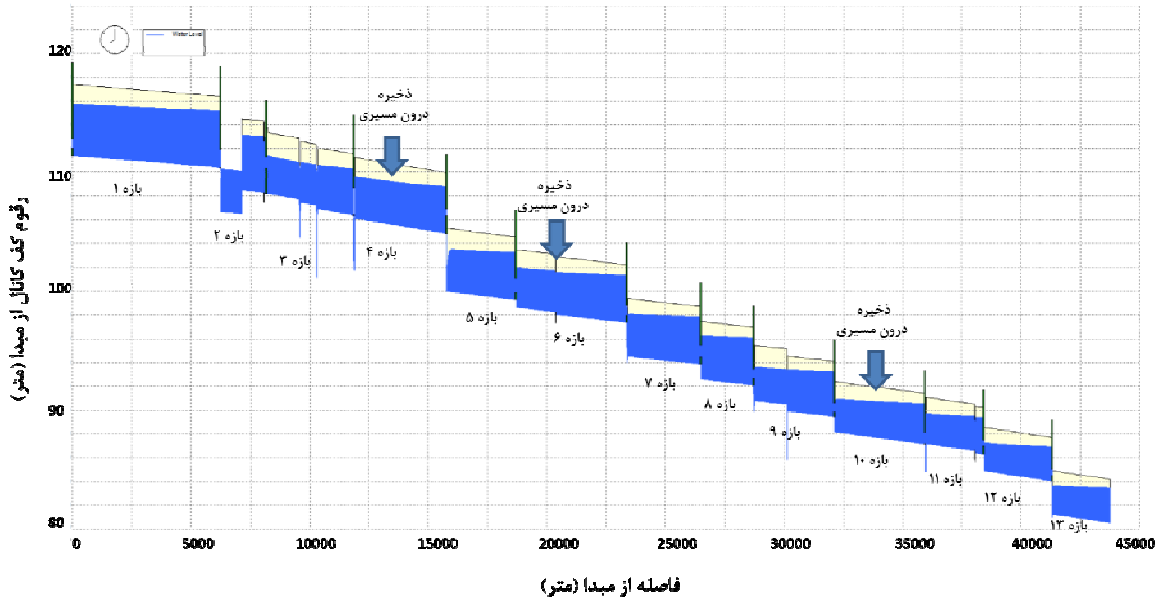
گزینه بهره‌برداری افزایشی-کاهشی شدید ناگهانی، در کانال اصلی شبیه‌سازی شده شبکه آبیاری دز، ارزیابی شد. هدف از انتخاب گزینه بهره‌برداری شدید و ناگهانی، ارزیابی میزان توانایی ذخیره درون مسیری برای بحرانی‌ترین شرایط توزیع و تحویل بوده که در مواقع نرمال بهره‌برداری رخ نمی‌دهد.

در حال حاضر گزینه ساخت مخزن جداگانه در نقطه‌ای در طول مسیر کانال اصلی، یکی از گزینه‌های کاربردی جهت بهبود مدیریت بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری تلقی می‌شود. بررسی نتایج این تحقیق می‌تواند مزایای بهره‌گیری از ذخیره درون مسیری را به‌عنوان یک گزینه جایگزین در پروژه‌های نوسازی و بهسازی شبکه‌های آبیاری در مقابل سایر گزینه‌ها و از جمله احداث مخزن مستقل در کنار کانال اصلی نشان دهد.

۲- مواد و روشها

۲-۱- مشخصات کانال مورد مطالعه

کانال اصلی دز از سد انحرافی احداث شده بر روی رودخانه دز منشعب شده است. طول کانال ۹۳ کیلومتر بوده که در این تحقیق ۴۴ کیلومتر ابتدای آن از محل سد انحرافی تا ابتدای کشت و صنعت هفت تپه مورد بررسی قرار گرفت. دبی طراحی کانال در بخش ابتدایی $۱۵۷m^3/s$ بوده و ۴۴ کیلومتر ابتدایی مورد استفاده در این تحقیق توسط ۱۴ سازه تنظیم قطاعی به ۱۳ بازه تقسیم شده است. بهره‌برداری از کانال به‌صورت کنترل بالادست و با تنظیم سازه‌های قطاعی توسط بهره‌بردارها به‌صورت روزانه صورت می‌گیرد. وظیفه توزیع آب بین بهره‌برداران محلی را تعداد ۷۱ آبگیر، در طول کانال، بر عهده دارند. علاوه بر آن، در طول کانال تعداد ۱۵ سازه‌های تقاطعی از نوع سیفون، چک سیفون و کالورت وجود دارد. سازه منحصر به فرد سیفون بالارود با طولی نزدیک به یک کیلومتر در کیلومتر شش کانال واقع شده است (عیسی‌پور و منتظر، ۱۳۸۸). بازه‌های ۴، ۶ و ۱۰ کانال اصلی که در شکل ۱ نشان داده شده است، به‌ترتیب با طول ۳۹۰۶، ۴۶۷۰ و ۳۸۲۰ متر، به‌عنوان بازه‌های مورد نظر جهت ذخیره درون مسیری در نظر گرفته شد.



شکل ۱ پروفیل طولی کانال دز و موقیت بازه‌ها با ذخیره درون مسیری

انتخاب این سه بازه، بر اساس شرایط فیزیکی مناسب مانند عمق آزاد مناسب، طول کافی، شیب ملایم، واقع نشدن سازه‌های انتقال سیفون و کالورت در آن‌ها و نیز با توجه به فاصله کافی تا آبگیرهای پرمصرف انجام شد. افزایش میزان عمق آزاد ۳ بازه مذکور جهت ذخیره درون مسیری به ترتیب ۰/۵، ۰/۵ و ۰/۴ متر لحاظ گردید.

۲-۲- مدل هیدرودینامیک سوبک

در این مطالعه از مدل هیدرودینامیک سوبک برای شبیه‌سازی سناریوهای بهره‌برداری مورد نظر و طراحی کنترل‌کننده‌های هوشمند برای کانال دز استفاده شد. مدل هیدرودینامیک سوبک (WL/Delft Hydraulics, 2000) توسط مؤسسه هیدرولیک دلفت با همکاری دانشگاه فنی دلفت کشور هلند توسعه یافته است. این مدل به صورت یک بسته نرم‌افزاری قدرتمند با هفت برنامه فرعی متنوع، برای شبیه‌سازی یک‌بعدی و دوبعدی سیستم‌های آبیاری رودخانه‌ها، تالاب‌ها و شبیه‌سازی کیفیت آب، سیستم‌های فاضلاب شهری، حوضه‌های آبریز و پیش بینی سیلاب و برنامه فرعی کنترل در زمان واقعی[1] ارائه می‌شود. از خصوصیات ویژه و مهم این نرم‌افزار می‌توان به قابلیت تلفیق هرکدام از برنامه‌های فرعی با یکدیگر و افزایش تطابق آن با سیستم‌های واقعی و نیز قابلیت طراحی الگوریتم‌های کنترل برای هوشمندسازی سیستم‌های آبیاری اشاره کرد. مدل سوبک برای شبیه‌سازی جریان‌های غیرماندگار از معادلات سنت‌ونانت بهره گرفته و حل معادلات با استفاده از روش تفاضلات محدود انجام می‌شود. این مدل روش خاصی را برای منقطع کردن معادلات بکار می‌برد که به آن شمای دلفت[2] می‌گویند.

۲-۳- شبیه‌سازی کانال اصلی دز

در این تحقیق از مدل موجود کانال اصلی دز در محیط نرم‌افزار شبیه‌ساز هیدرولیکی سوبک استفاده شد. کالیبراسیون و صحت‌سنجی کانال مدل شده، برای شرایط معمول بهره‌برداری و بر اساس داده‌های واقعی بهره‌برداری در مطالعات قبلی انجام شده است. اطلاعات اندازه‌گیری شده شامل دبی تحویلی آبگیرها، دبی سازه‌های تنظیم و تراز آب بالادست سازه‌های تنظیم، برای کشت زمستانه سال ۱۳۸۵ بود. شرط مرزی بالادست، رقوم سطح آب سرریز ثابت سد انحرافی بالادست شبکه و شرط مرزی پایین‌دست بر اساس داده‌های واقعی دبی- اشل جمع‌آوری شده از پارشال فلوم هفت تپه بوده است (Isapoor et al., 2009).

۲-٤- طراحی کنترل‌گر

به منظور اعمال کنترل و بهره‌برداری خودکار در کانال اصلی، کنترل‌کننده تناسبی – انتگرالی (PI) طراحی گردید. بر اساس این الگوریتم کنترل، تغییرات دبی عبوری از زیر سازه‌های تنظیم به صورت رابطه ۱ قابل محاسبه است (Overloop et al, 2005):

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

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

زمانی‌که کنترل مجموعه‌ای از بازه‌های کانال مورد نظر باشد، پدیده تشدید اغتشاش[3] رخ می‌دهد. این پدیده به علت اتصال پیوسته بازه‌ها به‌یکدیگر انجام می‌شود. برای کاهش اغتشاشات، از یک فیلتر پایین‌گذر مرتبه اول[4] برای کاهش دامنه نوسان‌های سیگنال‌های ورودی به کنترل‌گر برای تمام بازه‌های کانال شد. استفاده از این فیلتر در

1. Real Time Control
2. Delft Scheme
3. Disturbance amplification
4. Proportional Integral Control with First Order Low Pass Filter- PIF

مواقعی که امواج رزونانس غیرمیرا در بازه کانال پدیدار شود، به‌خصوص در بازه‌های کوتاه یا بازه‌های کم‌شیب کانال توصیه می‌شود (Overloop et al., 2005). با استفاده از فیلتر پایین‌گذر مرتبه اول مقدار تغییرات دبی عبوری از سازه‌های تنظیم به صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

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

که در این رابطه $e_{f(k)}$ برابر خطای فیلتر شده در گام زمانی کنونی است که از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

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

در این رابطه F_c ثابت فیلتر است که بر اساس مشخصات سیستم بدست می‌آید (Overloop et al., 2005).

محاسبه ضرایب تناسبی و انتگرالی (K_p و K_i) بر اساس فرمول پیشنهادی شورمانز (Schuurmans, 1997) برای طراحی کنترل‌گر PI و با بهره‌گیری از روش شناسائی سیستم[1] انجام گرفت (Weyer, 2001). بر اساس قوانین تنظیم ارایه شده توسط شورمانز محاسبه ضرایب تناسبی بر پایه چهار پارامتر سیستم که عبارتند از: سطح ذخیره در شرایط بهره‌برداری (A_s)،گام زمانی کنترل (T_c)، رزونانس بیشینه در جریان حداقل (R_p) و بسامد رزنانس بیشینه در جریان حداقل بازه کانال (ω_r) و به صورت روابط (۴) و (۵) قابل محاسبه است (Schuurmans, 1997):

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

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

بر اساس تحقیق میلتنبرگ (Miltenberg, 2008) می‌توان دبی ورودی به هر بازه کانال را به‌عنوان ورودی قابل اندازه‌گیری و رقوم سطح آب در هر بازه را به‌عنوان خروجی قابل اندازه‌گیری در نظر گرفت. با استفاده از این مقادیر قابل اندازه‌گیری ورودی و خروجی، می‌توان از مدل‌های تشخیص سیستم جهت محاسبه مشخصات سیستم در یک شرایط هیدرولیکی استفاده کرد.

در کانال‌های آبیاری با بازه‌های متعدد نظیر کانال مورد مطالعه این تحقیق، اثر متقابل بین بازه‌های کانال در نتیجه اعمال متغیرکنترل به سازه‌های تنظیم، به دو جهت بالادست و پایین دست منتقل می‌شود. در سیستم‌های کنترل سراسری با در نظرگرفتن بازه‌های کانال به‌عنوان زیرسیستم‌های یک سیستم واحد در یک کنترل‌گر، این اثرات متقابل به‌طور مؤثری کنترل می‌شوند. با این وجود، طراحی، اجرا، تنظیمات و نگهداری سامانه‌های کنترل سراسری هزینه‌بر و مشکل است (Gómez et al., 2002). لذا به منظور ارایه یک روش عملی، ساده و کاربردی، روش کنترل موضعی در این تحقیق استفاده شد. روش کنترل بالادست موضعی برای تمامی بازه‌ها به‌کار برده شد. در بازه‌هایی که عمل ذخیره آب در آنها انجام می‌گیرد، تلفیق کنترل بالادست و پایین‌دست مورد استفاده قرار گرفت. در این بازه‌ها در شرایطی که مصرف پایین‌دست کمتر از حداکثر باشد با ذخیره جریان در بازه، عمق هدف منطبق بر عمق مجاز حداکثر مجاز در بازه می‌باشد. در صورت افزایش مصرف پایین‌دست، عمق هدف منطبق بر عمق نرمال در نظر گرفته شده و بدین ترتیب نیاز پایین‌دست بدون تأخیر از ذخیره صورت گرفته در بازه تأمین می‌شود.

۲-۵- سناریوی بهره‌برداری شبیه‌سازی شده

به‌طور کلی در ارزیابی الگوریتم کنترل باید سناریوی بهره‌برداری خاصی که متمایز از سناریوهای نرمال است، انتخاب شود. در صورتی که کنترل‌گر بتواند نتایج مطلوبی بر اساس این سناریوی خاص در دامنه گسترده‌ای از دبی جریان به‌دست آورد کنترل‌گر را قوی[2] می‌نامند (Litrico

1. System Identification

2. Robust

et al., 2006). از آنجا کـه هـدف از ایـن تحقیـق بررسـی میزان بهبود عملیات بهره برداری با ذخیـره درون مسـیری در کانال اصلی آبیاری است، شرایط بهره‌بـرداری شـدید و ناگهانی که در مواقع نرمال دیده نمی‌شـود، بـرای ارزیـابی کنترل‌گر طراحی شده انتخاب شد. کنتـرل‌گـر بایـد بتوانـد متغیر تحت کنترل را -کـه رقـوم سـطح آب در هـر بـازه است- در مقدار هدف با کمترین نوسان ممکن کنترل کند. تعداد ۷۱ آبگیر در طول ۱۳ بازه کانال اصلی وجـود دارد. از این تعداد ۵۹ آبگیر با ظرفیت آبگیری ۰/۵ مترمکعب بر ثانیه، ۱۴ آبگیر با ظرفیت ۱ مترمکعب بر ثانیه، آبگیـر W2 بـا ۴۵ مترمکعـب بـر ثانیـه، آبگیـر W3 بـا ظرفیـت ۱۰ مترمکعب بر ثانیه و آبگیر No. 71 با ظرفیت ۱۴ مترمکعب بر ثانیه در انتهای کانال وجود دارد. مراحل بهره‌برداری بـه صورت تغییر ناگهانی کاهشی و افزایشی برای سـه آبگیـر W2، W3 و No. 71 به‌صـورت جـدول ۱ در نظـر گرفتـه شد.

جدول ۱ سناریوی کاهشی و افزایشی ناگهانی بهره‌برداری برای کانال مدل شده

	دبی عبوری از آبگیرها (مترمکعب بر ثانیه)		
	آبگیر W2	آبگیر W3	آبگیر No. 71
روز اول	۴۵	۱۰	۱۴
روز دوم	۴۵	۱۰	۱۴
روز سوم	۱	۱	۱
روز چهارم	۱	۱	۱
روز پنجم	۴۵	۱۰	۱۴
روز ششم	۴۵	۱۰	۱۴
روز هفتم	۴۵	۱۰	۱۴

۲-۶- ارزیابی عملکرد الگوریتم های کنترل

معیارهای مهم ارزیابی عملکرد الگوریتم کنترل عبارتند از: حداکثر انحراف، متوسط انحراف در طـول زمـان و میـزان انحراف باقی‌مانده یا خطای حالت پایدار. این سه معیار در شاخص‌های معرفی شده ASCE بیان شده‌اند کـه عبارتنـد از حداکثر خطای مطلق[1] (MAE)، خطای مطلق تجمعـی[2] (IAE) و خطای حالـت مانـدگار[3] (StE) کـه بـه‌صـورت روابط (۶)، (۷) و (۸) می‌باشـند، بـرای ارزیـابی عملکـرد کنترل‌گرها در این تحقیق استفاده شده‌اند (Clemmens et al., 1998):

$$MAE = \frac{\max\left(\left|y_t - y_{target}\right|\right)}{y_{target}} \qquad (۶)$$

کـه در ایـن رابطـه y_t تـراز سـطح آب مشـاهده شـده (محاسبه شده توسط مدل شبیه‌سازی جریـان) در زمـان t و y_{target} تراز سطح آب هدف است.

$$IAE = \frac{\frac{\Delta t}{T}\sum_{t=0}^{T}\left(\left|y_t - y_{target}\right|\right)}{y_{target}} \qquad (۷)$$

که در این رابطه Δt فاصله بـین گـام‌هـای زمـانی اعمـال تنظیمـات و T دوره زمـانی اجـرای آزمـون (۱۲ یـا ۲۴ ساعت) می باشد. نکته قابل توجه در اینجا این است کـه فاصله بین گـام‌هـای زمـانی بایـد در دوره زمـانی اجـرای آزمون در نظر گرفته شده T ثابت باشد.

$$StE = \frac{\max\left(\left|y_{10,12} - y_{target}\right|,\left|y_{22,24} - y_{target}\right|\right)}{y_{target}} \qquad (۸)$$

که در این رابطه $y_{10,12}$ میانگین تراز سطح آب بین ساعات ۱۰ تا ۱۲ و $y_{22,24}$ میانگین تراز سطح آب بین ساعات ۲۲ تا ۲۴ از شروع آزمایش است.

۲-۷- شبیه‌سازی مراحل بهره‌برداری

برنامه فرعی کنترل بلادرنگ نرم‌افزار سوبک قابلیت اعمال کنترل‌گر موضعی برای بازه‌های کانال را دارا می‌باشد، ولی به علت طراحی متفاوت کنترل‌گرهای مربوط به بـازه‌هـای با ذخیره درون مسـیری، طراحـی کنتـرل‌گـر در نـرم‌افـزار

1. Maximum Absolute Error
2. Integral of Absolute Magnitude of Error
3. Steady-State Error

مت‌لب انجام گرفته و به شبیه‌ساز هیدرولیکی سوبک مرتبط شد. فایل آغازین[1] بر اساس شرایط نرمال بهره‌برداری کانال اصلی دز برای دو روز شبیه‌سازی شد و مقادیر رقوم سطح آب به‌عنوان شرایط اولیه زمانی برای مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. براساس مراحل بهره‌برداری تعریف شده، بهره‌برداری نرمال بدون ذخیره درون مسیری به روش بهره‌برداری بالادست و با استفاده از کنترل‌گر PI پس‌خورد به‌علاوه پیش‌خورد اجرا شد. در روش بهره‌برداری از بالادست، مدیر شبکه بر اساس برنامه آبیاری، میزان حجم آب ورودی به کانال اصلی را تنظیم می‌کند. در این تحقیق، روش پیش‌خورد به ساده‌ترین حالت ممکن و به‌صورت قابلیت بهره‌برداری دریچه سراب کانال بر اساس برنامه تحویل آب به آبگیرها، برای ۶ روز شبیه‌سازی جریان در کانال اصلی تعریف شد.

بهره‌برداری کانال اصلی با بهره‌گیری از ذخیره درون مسیری، با استفاده از کنترل‌گر PI پس‌خورد شبیه‌سازی گردید. روش کنترل به‌صورتی تعریف شد که سازه تنظیم هر بازه رقوم سطح آب بالادست خود را تنظیم کرده و مقدار خطای سطح آب به‌صورت یک حلقه پس‌خورد به بازه بالادستی دارای ذخیره درون مسیری فرستاده می‌شود. به‌طور مثال مقدار خطای تجمعی بازه‌های انتهائی ۱۳، ۱۲ و ۱۱ به بازه دهم منتقل شده و میزان دبی عبوری از دریچه تنظیم این بازه از رابطه (۲) محاسبه می‌شود. به‌همین ترتیب مقدار خطای تجمعی کل بازه‌ها به سراب کانال منتقل شده و میزان دبی ورودی به کانال بدست می‌آید. زمانی که میزان ۸۰ درصد مقدار ذخیره درون مسیری استفاده شود، میزان نیاز مازاد از بالادست تأمین شده و به همین ترتیب مازاد مصرف در صورت خالی شدن ۸۰ درصد حجم ذخیره هر سه بازه دارای ذخیره درون مسیری از سراب تأمین می‌شود.

1. Start-up File

۲-۸- تنظیم الگوریتم کنترل

تنظیم کنترل‌گر PI بر اساس روش ارائه شده در بند ۲-۳ انجام گرفت. چهار مشخصه مذکور سیستم کانال بر اساس اندازه‌گیری تغییرات مقادیر رقوم سطح آب پایین‌دست هر بازه کانال با تغییر مقدار دبی ورودی به آن بازه با استفاده از مدل پنج پارامتری باکس-جنکینس[1] از جعبه ابزار تشخیص سیستم مت‌لب، برای سه حالت جریان با دبی کم، متوسط و زیاد در کانال محاسبه و نتایج در جدول ۲ ارایه شده است.

۳- نتایج و بحث

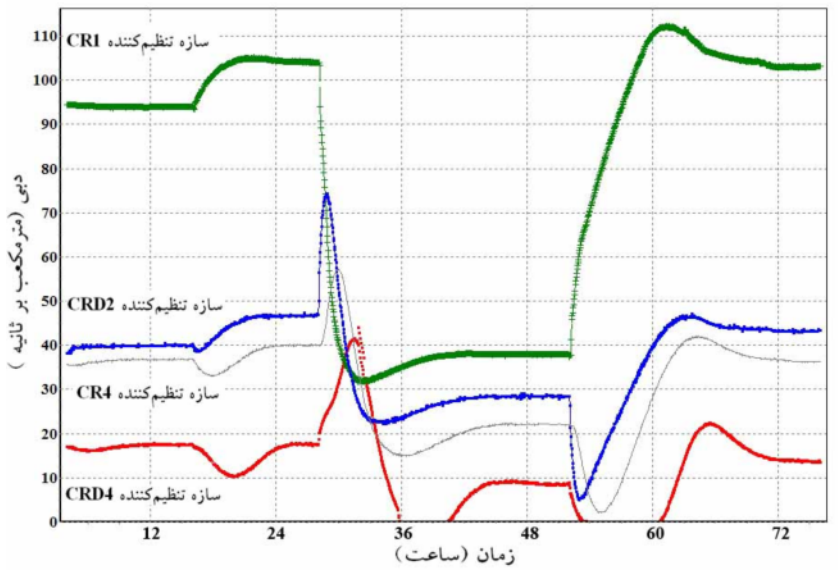
تغییرات شدت جریان عبوری، رقوم سطح آب بالادست سازه‌های تنظیم و میزان بازشدگی سازه‌های تنظیم ابتدای کانال و بازه‌های در نظر گرفته شده برای ذخیره، به‌ترتیب برای دو حالت بهره‌برداری نرمال و بهره‌برداری با بهره‌گیری از ذخیره درون مسیری در طول شبیه‌سازی شش روز سناریوی تحویل آب، در شکل‌های ۲ الی ۷ نشان داده شده است. محور افقی این شکل‌ها زمان شبیه‌سازی و محور عمودی آنها به‌ترتیب دبی عبوری از سازه‌های تنظیم، رقوم سطح آب بالادست سازه های تنظیم و بازشدگی دریچه می‌باشد.

با توجه به سناریوی بهره‌برداری، تغییرات شدید ناگهانی کاهشی- افزایشی دبی آبگیری برای ۳ آبگیر W2، W3 و No.71، منجر به تغییرات شدید در تراز سطح آب، ابتدا در بازه‌های مربوطه و به‌دنبال آن در بازه‌های پایین‌دست آن‌ها شده است. این تغییر به عنوان یک انحراف وارد فرآیند کنترل شده و کنترل‌کننده سعی در برگشت تراز سطح آب به مقدار هدف دارد.

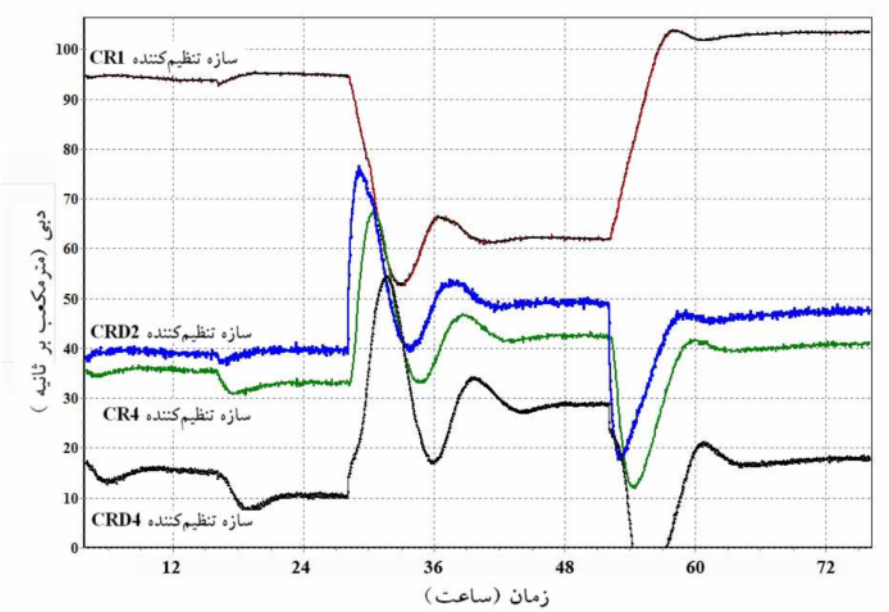
در این میان آبگیر W2 که در بازه ۴ واقع شده با دبی آبگیری حدود ۴۵ مترمکعب بر ثانیه با شروع و قطع ناگهانی برداشت دبی بیشترین اغتشاش را بر سیستم کانال اعمال می‌کند.

جدول ۲ مقادیر نهایی بهره تناسبی (K_p) و بهره انتگرالی (K_i) برای بازه‌های کانال اصلی دز

	بازه ۱	بازه ۲	بازه ۳	بازه ۴	بازه ۵	بازه ۶	بازه ۷	بازه ۸	بازه ۹	بازه ۱۰	بازه ۱۱	بازه ۱۲	بازه ۱۳
K_p	۲۹/۳۳۴	۲۴/۲۴۰	۳۴/۴۴۲	۵۴/۲۱۰	۳۳/۶۳۸	۳۶/۲۴۴	۳۸/۹۹۶	۴۰/۸۶۲	۳۶/۶۲۴	۳۹/۰۱۱	۳۵/۴۰۵	۳۲/۰۹۰	۲۸/۶۸۶
K_i	۰/۷۵۵	۲/۱۰۶	۰/۴۸۶	۰/۳۲۳	۰/۶۹۰	۰/۶۵۵	۰/۹۰۲	۱/۰۴۸	۱/۱۶۰	۱/۴۹۱	۲/۵۶۹	۳/۱۱۵	۹/۱۹۳

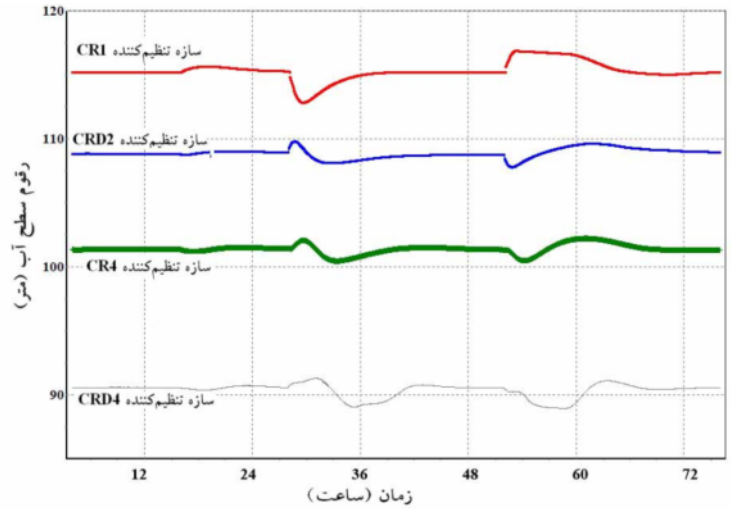


شکل ۲ دبی عبوری از سازه‌های تنظیم‌کننده در شرایط بهره‌برداری بدون ذخیره درون مسیری

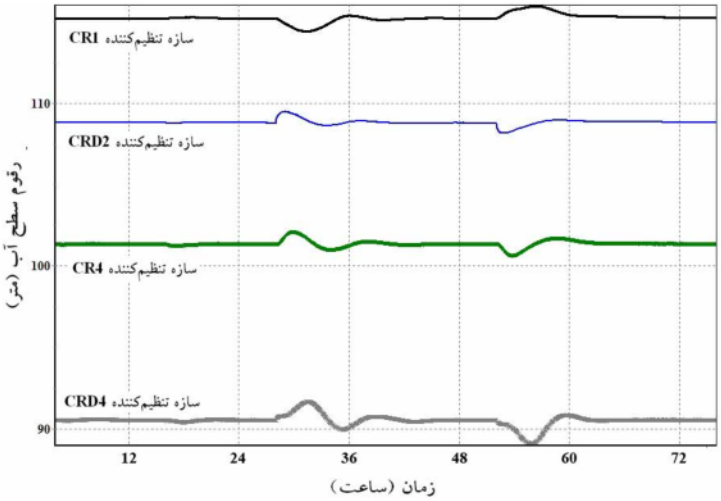


شکل ۳ دبی عبوری از سازه‌های تنظیم‌کننده در شرایط بهره‌برداری با بهره‌گیری از ذخیره درون مسیری

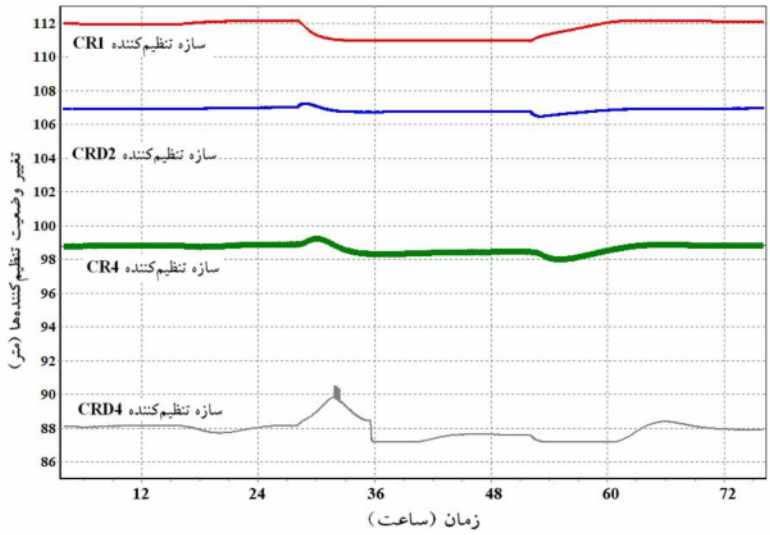
1. Box-Jenkins Model



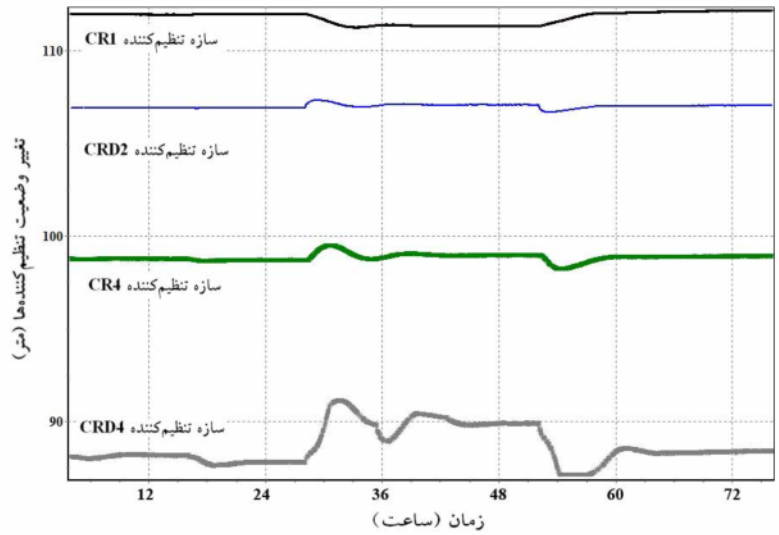
شکل ۴ رقوم سطح آب در بالادست سازه‌های تنظیم‌کننده در شرایط بهره‌برداری بدون ذخیره درون مسیری



شکل ۵ رقوم سطح آب در بالادست سازه‌های تنظیم‌کننده در شرایط بهره‌گیری از ذخیره درون مسیری



شکل ۶ روند تغییرات میزان بازشدگی سازه‌های تنظیم در شرایط بهره‌برداری بدون ذخیره درون مسیری



شکل ۷ روند تغییرات میزان بازشدگی سازه‌های تنظیم در شرایط بهره‌گیری از ذخیره درون مسیری

کاهش و افزایش ۴۴ مترمکعب بر ثانیه دبی تحویلی به آبگیر W2 به‌ترتیب در ساعت ۸ صبح روز سوم و پنجم سبب افزایش ناگهانی ۰/۸۵ متری در تراز سطح آب بازه چهارم (CrossRegulatorD2 در شکل ۴) در روز سوم و کاهش ناگهانی ۱/۱ متری سطح آب همان بازه در روز پنجم می‌شود. به دنبال افزایش ناگهانی تراز سطح آب، میزان بازشدگی سازه تنظیم پایین‌دست این بازه بر اساس شکل ۶، ۰/۲۵ متر و در زمان کاهش ناگهانی تراز سطح آب، میزان بسته‌شدن آن ۰/۴ متر می‌باشد. به‌دنبال این میزان باز و بسته شدن قابل توجه سازه تنظیم، میزان افزایش و کاهش دبی عبوری از آن به‌ترتیب ۲۹ و ۲۴ مترمکعب بر ثانیه بدست آمده است. تلفیق روش پیش-خورد با پسخورد در زمان بهره‌برداری نرمال سبب شده تا این تغییر شدید کاهش-افزایش ناگهانی دبی تحویلی به آبگیر W2 ، با اعمال تغییر در دبی رها شده در سراب کانال اصلی تنظیم شود. مقایسه شیب تغییرات دبی عبوری از سازه تنظیم CrossRegulatorD2 در شکل‌های ۲ و ۳ نشان می‌دهد که موج منفی ناشی از کاهش دبی و نیز موج مثبت ناشی از افزایش دبی در سراب، با سرعت بیشتری نسبت به‌حالت بهره‌برداری با ذخیره درون مسیری، که از تکنیک پیش‌خورد استفاده نمی‌کند، حرکت می‌کند. کاهش زمان انتقال موج در کانال سبب کاهش ناپایداری جریان در کانال خواهد شد، اما به‌دلیل بزرگی مقدار موج‌های مثبت و منفی وارده به کانال در بهره‌برداری نرمال، زمان رسیدن به پایداری طولانی‌تر شده است. عدم بهره‌گیری از روش پیش‌خورد در حالت بهره‌برداری با ذخیره درون مسیری، سبب تغییر تدریجی حجم آب ورودی از سراب متناسب با مقدار تجمعی خطای محاسبه شده در کانال شده است. انتظار می‌رود عکس‌العمل سازه‌های تنظیم در حالت بهره‌برداری با ذخیره کندتر شود. اما مقایسه رقوم سطح آب بالادست سازه‌های تنظیم (شکل‌های ۴ و ۵) نشان می‌دهد در حالت بهره‌برداری بدون ذخیره درون مسیری، کنترل‌گر قادر به بازگرداندن رقوم تراز آب به تراز هدف در زمان مطلوبی نبوده و در محدوده زمانی ۲۸ تا ۴۰ ساعت طول کشیده است. در حالی که بازگشت رقوم سطح آب به رقوم هدف در حالت بهره‌برداری با استفاده از ذخیره درون مسیری بین ۱۰ تا ۲۶ ساعت کم شده است.

به منظور ارزیابی کمّی عملکرد استراتژی بهره‌برداری ذخیره درون مسیری، شاخص‌های ارزیابی عملکرد

سامانه‌های کنترل، که در بخش ۲-۴ تشریح شده است، محاسبه و مورد بررسی قرار گرفت. مقدار حداکثر روزانه این شاخص‌ها برای هر بازه در طول مدت زمان شبیه‌سازی و برای هر دو حالت بهره‌برداری محاسبه شدند. جدول ۳ مقادیر حداکثر شاخص‌های ارزیابی عملکرد سامانه‌های کنترل MAE ، IAE و StE برای شبیه‌سازی دوره شش روزه بهره‌برداری را نشان می‌دهد.

بررسی و مقایسه مقادیر کمّی شاخص‌های الگوریتم کنترل برای دو حالت مختلف بهره‌برداری نشان می‌دهد که کنترل‌کننده تناسبی- انتگرالی در حالت بهره‌گیری از ذخیره درون مسیری، دقت و کارایی بالاتری در کنترل اغتشاش‌های ناشی از مراحل بهره‌برداری در اکثر بازه‌ها نسبت به حالت بهره‌برداری بدون ذخیره دارد. به‌خصوص در مورد بازه‌های ابتدایی و میانی کانال، به‌واسطه وجود ظرفیت بالای آبگیری در آبگیر W2 و W3 در این بازه‌ها، تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین مقدار هر سه شاخص برای دو حالت بهره‌برداری دیده می‌شود که نشان دهنده بهبود قابل ملاحظه فرایند بهره‌برداری با استفاده از اولین و دومین بازه دارای ذخیره درون مسیری در ابتدا و میانه مسیر کانال اصلی می‌باشد. بیشترین میزان این بهبود برای شاخص MAE مربوط به اولین بازه کانال بوده که عملکرد کنترل-گر از مقدار ۲/۰۸ به ۰/۳۲ بهبود یافته است. برای شاخص IAE بیشترین مقدار بهبود مربوط به بازه سوم بوده که از مقدار ۱/۳۲ به ۰/۴۸ تقلیل یافته است. بیشترین مقدار بهبود شاخص StE از مقدار ۰/۷۱ به ۰/۱۴ مربوط به بازه ۴ است. مقدار حداکثر شاخص ارزیابی IAE ارایه شده در جدول ۳ برای بازه ۶، برای حالت بهره‌برداری با ذخیره بیشتر از بهره‌برداری نرمال می‌باشد. این مقدار مربوط به روز پنجم مراحل بهره‌برداری بوده که دبی برداشتی آبگیرهای W3 و آبگیر No.71، به صورت افزایشی بوده و آب ذخیره شده در بازه‌های ۶ و ۱۰ در حال تخلیه بوده-اند. این امر با افزایش سطح حداقل ذخیره درون مسیری از ۲۰ درصد به ۲۵ درصد برطرف شده و مقدار IAE به میزان ۰/۲۲ بهبود یافت.

جدول ۴ چگونگی توزیع مقادیر حداکثر شاخص ارزیابی عملکرد بر اساس پر و خالی شدن ذخیره درون مسیری را بیان می‌کند. این جدول نشان می‌دهد بازه‌های کانال با ذخیره درون مسیری در زمان پر شدن حساسیت بالاتری برای شاخص‌های لحظه‌ای مانند MAE نسبت به زمان تخلیه آب ذخیره شده دارند. این حساسیت با کاهش حد بالایی ذخیره آب در بازه قابل کنترل بوده و مقادیر مطلوب‌تری از شاخص ارزیابی بدست می‌آید. حد بالایی ذخیره آب بازه در این تحقیق ۸۰ درصد حجم قابل ذخیره در بازه کانال در نظر گرفته شد که با توجه به مقادیر مطلوب شاخص‌های ارزیابی عملکرد کنترلگر بدست آمده، قابل قبول است.

جدول ۳ مقادیر کمی شاخص‌های ارزیابی عملکرد سامانه کنترل طراحی شده

بازه کانال		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
سازه کنترلی		CR1	CRD1	CR2	CRD2	CR3	CR4	CR5	CR6	CRD3	CRD4	CR7	CR8	CR9
MAE (%)	بهره‌برداری عادی	۲/۸۶	۱/۰۵۴۲	۱/۷۵۶۷	۰/۹۰۶۲	۱/۱۴۲۵	۰/۹۰۳۹	۱/۰۷۸۶	۱/۲۵۳	۱/۲۸۷۶	۱/۷۸۳	۱/۵۳۹	۱/۴۳۸	۱/۵۳۱
	ذخیره درون مسیری	۰/۳۲	۰/۱۶۲۸	۰/۴۵۵۸	۰/۱۸۸۲	۰/۳۵۱۰	۰/۲۵۶۵	۰/۳۰۹۱	۰/۲۴۶۵	۰/۳۵۲	۰/۴۹۱	۰/۴۷۶	۰/۵۱۶	۰/۴۴۱
IAE (%)	بهره‌برداری عادی	۱/۰۵۶	۰/۶۰۵۴	۱/۳۱۹	۰/۵۲۸	۰/۶۹۳	۰/۵۶۳	۰/۵۸۶	۰/۵۸۹	۰/۶۴۰	۰/۹۵۸	۰/۹۱۰	۱/۰۳	۱/۰۰
	ذخیره درون مسیری	۰/۶۸۶	۰/۴۵۲	۰/۴۸۲	۰/۵۰۱	۰/۶۱۹	۰/۷۶۰	۰/۵۵۳	۰/۵۷۷۸	۰/۵۸۴	۰/۷۲۳	۰.۸۷۰	۱.۲۷	۱/۴
StE (%)	بهره‌برداری عادی	۱/۳۴	۰/۷۸۵	۱/۶۹	۰/۷۰۹	۱/۱۲۰	۰/۹۲۸	۱/۱	۰/۸۷	۱/۳۰	۱/۸۱	۱.۳	۱.۴۱	۱/۴
	ذخیره درون مسیری	۰/۵۷	۰/۲۸۲	۰/۷۶۱	۰/۱۴	۰/۴۵	۰/۳۱۱	۰/۴۶۶	۰/۳۲	۰/۴۴	۰/۶۳	۱/۵	۱/۳۵	۱/۰۶

در مقابل شاخص ارزیابی عملکرد IAE که یک شاخص تجمعی در طول زمان می‌باشد، در حالت خالی شدن ذخیره آب حساسیت بیشتری نشان داده که می‌توان با افزایش حد پایین ذخیره آب در بازه مقادیر مطلوب‌تری از این شاخص بدست آورد.

جدول ۴ چگونگی توزیع مقادیر حداکثر شاخص ارزیابی عملکرد بر اساس پر و خالی شدن ذخیره درون مسیری

شاخص ارزیابی عملکرد	وضعیت ذخیره‌سازی	بازه کانال با ذخیره درون مسیری		
		۴	۶	۱۰
شاخص MAE (%)	پر شدن	**۰/۱۸۸۲**	**۰/۲۵۶۵**	**۰/۴۹۱**
	تخلیه	۰/۱۱	۰/۲۳۴۱	۰/۴۴۳
شاخص IAE (%)	پر شدن	۰/۳۴۲	۰/۵۳	۰/۶۷۸
	تخلیه	**۰/۵۰۱**	**۰/۷۶۰**	**۰/۷۲۳**
شاخص StE (%)	پر شدن	**۰/۱۴**	**۰/۳۱۱**	۰/۵
	تخلیه	۰/۱۰	۰/۲۴۷	**۰/۶۳**

٤- نتیجه‌گیری

در شرایط تغییرات قابل توجه جریان در کانال‌های آبیاری استفاده از سامانه‌های کنترل خودکار برای تنظیم سطوح آب و بهبود عملکرد کانال از نظر کفایت و راندمان عدالت تحویل ضروری است. این مطالعه به بررسی میزان بهبود بهره‌برداری کانال اصلی خودکار آبیاری با بهره‌گیری از استراتژی ذخیره درون مسیری در برخی از بازه‌های کانال، با استفاده از الگوریتم کنترل تناسبی- انتگرالی برای بهره-برداری بالادست در کانال اصلی شبکه آبیاری دز پرداخته است. نتایج بدست آمده با بهره‌برداری نرمال کانال (بدون ذخیره درون مسیری) به روش بهره‌برداری بالادست، که روش معمول بهره‌برداری این کانال است، برای یک سناریوی بهره‌برداری کاهشی-افزایشی شدید ناگهانی مقایسه شد. نتایج حاکی از آن بود که میزان سرعت و توانایی کنترل‌کننده تناسبی - انتگرالی در برگرداندن رقوم سطح آب بازه‌ها به رقوم هدف در شرایط بهره‌گیری از ذخیره درون مسیری با دقت و سرعت تقریباً خوبی قابل دستیابی است و امکان تحقق ارتقای بهره‌برداری معمول سامانه کنترل خودکار را با کاهش میزان زمان تأخیر در تحویل آب به آبگیرها و افزایش کنترل پایدارتر وضعیت هیدرولیکی کانال، فراهم می‌کند. بهره‌گیری از سه بازه با ذخیره درون مسیری سبب ذخیره بخشی از آب مازاد در کانال جهت استفاده در زمان افزایش مصرف شده و نیز به سبب کاهش حجم آب مازاد عبوری، ناپایداری جریان در کانال را کاهش داده است.

بهره‌گیری از استراتژی بهره‌برداری ذخیره درون مسیری می‌تواند به صورت سیستم پشتیبان برای بهره‌برداری کانال اصلی اجرا شود و اجرای تلفیقی آن با بهره‌برداری نرمال کانال اصلی پیشنهاد می‌شود. همچنین پیشنهاد می‌گردد روش‌های بهره‌برداری بالادست و پایین‌دست با اعمال کنترل‌گرهای کلاسیک و در قدم‌های بعدی کنترل‌گرهای مدرن، برای بهره‌برداری از کانال اصلی با بهره‌گیری از ذخیره درون مسیری مورد ارزیابی قرار گیرد تا بتوان به یک تحقیق جامع پیرامون کاربرد ذخیره درون مسیری در کانال‌های اصلی آبیاری دست یافته و آن‌را به‌عنوان یک راه‌کار عملی برای ارتقای فرایند بهره‌برداری کانال‌های اصلی آبیاری بدون تغییر در ساختار فیزیکی این کانال‌ها معرفی کرد.

٥- فهرست علایم

تغییرات شدت جریان	ΔQ
خطای محاسبه شده	e
ضریب تناسبی	K_p
ضریب انتگرالی	K_i
خطای فیلتر شده	e_f
ثابت فیلتر	F_c
سطح ذخیره	A_s
تناوب رزونانس	ω_r
رزونانس ماکزیمم	R_p

زمان تأخیر	τ
عمق محاسبه شده	y_t
عمق هدف	$y_{t\,\mathrm{arg}et}$
میانگین تراز سطح آب بین ساعات ۱۰ تا ۱۲	$y_{10,12}$
میانگین تراز سطح آب بین ساعات ۲۲ تا ۲۴	$y_{22,24}$
دوره زمانی اجرای آزمون	T
فاصله بین گامهای زمانی اعمال تنظیمات	Δt

٦- منابع

عیسی‌پور، س. و منتظر، ع. ا. (۱۳۸۸). "ارزیابی عملکرد دو الگوریتم کنترل در بهبود فرایند بهره‌برداری از کانال اصلی شرق آبیاری دز"، مجله هیدرولیک، ۴(۲)، ص‌ص. ۱- ۱۸.

اسلامبولچی‌زاده، ع. (۱۳۸۵). "*ارزیابی و بهبود مدیریت مخزن در بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری (مطالعه موردی شبکه مغان)*"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس.

احسانی، م.، برهان، ن.، بهره‌دار، د.، ذوالفقاری، ع.، فرهادی، ع.، قاهری، ع.، غروی، ح. و منعم، م. (۱۳۸۳). "*مدیریت آبیاری در سامانه‌های روباز*"، چاپ اول، انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران.

Bhadra, A., Bandyopadhyay, A., Singh R. and Raghuwanshi, N. S., (2009). "Integrated reservoir-based canal irrigation model. I: description", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 135(2), pp. 149-157.

Clemmens, A.J., Bautista, E., Wahlin, B.T. and Strand, R.J., (2005). "Simulation of automatic canal control systems", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 131(4), pp. 324-335.

Clemmens, A. J. and Replogle, J.A., (1989). "Control of irrigation canal network", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 115(1), pp. 96-110.

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

Gómez, M., Rodellar, J. and Mantecón, J. A. (2002). Predictive control method for decentralized operation of irrigation canals. Applied Mathematical Modelling, 26, pp. 1039-1056.

Isapoor, S., Montazar, A., Van Overloop, P.J. and Van De Geisen, N. (2009). Designing and evaluation control systems of the Dez main canal. Irrigation and Drainage, 62(1), pp. 60-71.

Litrico, X. and Fromion, V. (2009). *Modeling and Control of Hydrosystems*, Springer, New York.

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, Volume 132, Issue 4, pp. 369-379.

Montazar, A., Van Overloop P.J. and Brouwer R., (2005), "Centralized controller for the narmada main canal", Irrigation and Drainage, 54(1), pp. 79-89.

Miltenburg, I. (2008). *Determination of canal characteristics with experimental modeling*, MSc Thesis, Delft Univ. of Technology, Civil Engineering Faculty, Water Management Dept.

Schuurmans, W., Brouwer, R. and Wonink, P (1992). "Identification of a control system for a canal with night storage", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 124(3), pp. 238- 247.

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), pp. 338-344.

Schuurmans, J. (1997). *Control of water levels in open-channels*, PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, p. 150.

Overloop P.J., Schuurmans, J., Brouwer, R. and Burt, C.M. (2005). "Multiple-model optimization of proportional integral controllers on canals", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 131(2), pp. 190-196.

Weyer, E. (2001). "System identification of an open water channel", Control Engineering Practice, 9(12), pp. 1289-1299

WL/Delft Hydraulics (2000). *SOBEK manual and technical reference*, WL/Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands.