نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره6، جلد9، بهمن - اسفند 1394، ص. 892-883

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 9, Feb.-Mar. 2016, p. 883-892

بهره‌گیری از راهبرد تقسیم خطای رقوم سطح آب در بهره‌برداری کانال اصلی آبیاری به‌منظور تحویل عادلانه آب در شرایط کم‌آبی

سید مهدی هاشمی شاهدانی*[1]، سونیا صادقی[2] و امین کانونی[3]

تاریخ دریافت: 1394/5/6 تاریخ پذیرش: 1394/11/14

چکیده

این مقاله به بررسی عملکرد سامانه کنترل خودکار مرکزی با بهره‌گیری از راهبرد اختلاف خطای رقوم سطح آب، به‌منظور بررسی توزیع عادلانه آب در کانال اصلی آبیاری در شرایطی است که میزان آب ورودی به کانال کم‌تر از میزان تقاضا در کانال است. سامانه کنترل طراحی شده در این تحقیق برای گزینه‌های بهره‌برداری در شرایط کم‌آبی، بهره‌برداری در شرایط معمول و تغییرات ناگهانی در برداشت آب مورد آزمون قرار گرفت و شاخص‌های ارزیابی عملکرد در طول شبیه‌سازی اندازه‌گیری شدند. نتایج تحقیق حاکی از بهره‌برداری مطلوب تمامی بازه‌های کانال توسط سامانه کنترل خودکار طراحی شده در دو گزینه بهره‌برداری در شرایط معمول و شرایط تغییرات ناگهانی بودند. در شرایط کم‌آبی میزان آب تامین شده کم‌تر از میزان کل تقاضا در طول کانال می‌باشد. در این شرایط کنترل‌گر به صورت قابل قبولی اقدام به توزیع خطای ناشی از کمبود آب در طول کانال نموده به صورتی که شاخص بهره‌برداری عدالت برای هر 13 بازه کانال بین 15/0 تا 18/0 به دست آمد. نتایج بدست آمده حاکی از عملکرد قابل سامانه بهره‌برداری کانال اصلی با بهره‌گیری از راهبرد بهره‌برداری اختلاف خطای رقوم سطح آب در توزیع عادلانه آب بین مصرف‌کنندگان بالادستی و پایین دستی در طول کانال آبیاری می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بهره‌برداری کانال اصلی آبیاری، توزیع عادلانه آب، سامانه کنترل خودکار، کنترل‌گر سراسری مرتبه دوم خطی

مقدمه

عملکرد ضعیف شبکه‌های آبیاری به دلیل عواملی نظیر نقص در طراحی و اجرا، عدم اجرای منظم برنامه‌های دوره‌ای بازرسی، نگهداری، تعمیرات و نیز فقدان مدیریت بهره‌برداری مناسب، لزوم توجه بیش‌تر محققان به اصلاح، بهبود عملکرد و ارتقاء بهره‌وری از آب در این بخش را می‌طلبد. بهره‌برداری سنتی، به دلیل عدم وجود زیرساخت مناسب، پیاده‌سازی راهبردهای نوین بهره‌برداری منطبق با نیازهای متغیر زمانی و مکانی آب در شبکه‌های آبیاری، سطح پایینی از رضایت‌مندی آب‌بران را در شبکه‌ها تامین می‌کند. این عوامل، انگیزه شدیدی را جهت نوسازی مدیریت بهره‌برداری کانال‌های آبیاری با بهره‌گیری از روش‌های هوشمند مدیریتی ایجاد نموده است (Clemmens and Replogle., 1989). استفاده از راهبردهای مدرن بهره‌برداری در مدیریت سامانه‌های انتقال و توزیع آب امری ضروری محسوب می‌شود. این کار ارتقا عملکرد بهره‌برداری کانال‌های اصلی آبیاری و به دنبال آن بهبود رضایت در توزیع آب بین مصرف‌کنندگان را به همراه دارد.

کلمنز، راهبرد بهره‌برداری تفاوت خطای رقوم سطح آب را جهت بهبود بهره‌برداری سامانه‌های کنترل خودکار کانال اصلی آبیاری معرفی نمود. در این روش متغیر تحت کنترل عبارت از تفاوت خطای رقوم سطح آب در دو بازه مجاور است. در این حالت کنترل‌گر سعی در توزیع یکسان خطای ایجاد شده در رقوم سطح آب بین بازه‌های مجاور می‌نماید (Clemmens., 2012). مطالعه موردی، راهبرد مذکور با کمک یک کنترل‌گر سراسری برای چند بازه ابتدایی کانال اصلی آریزونا مورد آزمون قرار گرفت. مشکل موجود در بهره‌برداری این کانال به این صورت است که آب ورودی به این کانال تنها در بازه‌های زمانی خاصی قابل تغییر بوده و در اغلب موارد ورودی کانال ثابت خواهد بود. بنابراین هدف ذخیره‌سازی آب مازاد در بازه‌های کانال معرفی شد تا در مواقع افزایش مصرف بتوان از آب ذخیره شده استفاده نمود. نتایج تحقیق حاکی از بهبود بهره‌برداری کانال با استفاده

1- استادیار گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران
2- کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، استاد مدعو گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد بابل
3- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه محقق اردبیلی
(*- نویسنده مسئول: (Email: mehdi.hashemy@ut.ac.ir

از راهبرد مذکور در مقایسه با روش بهره‌برداری مرسوم است (Guan et al., 2012).

باید در نظر داشت که نمی‌توان از روش‌های مرسوم بهره‌برداری برای پیاده‌سازی موفق راهبردهای جدید در سامانه‌های انتقال آب آبیاری استفاده نمود. بهره‌گیری از راهبردهای مختلف بهره‌برداری به سبب ملزومات خاص خود نیازمند وجود سامانه کنترل خودکار در کانال می‌باشند و با شیوه‌های بهره‌برداری سنتی (دستی یا سازه‌های هیدرومکانیکال) انجام‌پذیر نیست. 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). با توجه به تعدد سازه‌های آب‌گیر و تنظیم در امتداد کانال‌های آبیاری، سامانه کنترل کانال باید به صورت یک سامانه دینامیک با تعداد زیادی متغیر مربوط به وضعیت، ورودی‌ها و خروجی‌ها لحاظ گردد (Montazar et al., 2005).

بهره‌برداری از هر نوع سامانه‌ی آبی روباز را می‌توان به وسیله‌ی مجموعه‌ای از قواعد ریاضی و منطق، در قالب یک سامانه کنترل، برای تنظیم تراز سطح آب، دبی جریان یا حجم به صورت معادله در آورد (Van Overloop et al., 2005).

در این تحقیق به بررسی اثر راهبرد بهره‌برداری ذخیره درون مسیری، به عنوان یک راه‌کار عملی در بهبود مدیریت بهره‌برداری کانال‌های بزرگ آبیاری در شرایط مختلف بهره‌برداری پرداخته شده است. در حالت اول، بهره‌برداری کانال اصلی تحت شرایط کم آبی که میزان آب ورودی به کانال اصلی کم‌تر از میزان کل تقاضای آب باشد، مورد آزمون قرار گرفت. هم‌چنین بهره‌برداری کانال اصلی در شرایطی که تغییرات چشم‌گیر و ناگهانی برداشت آب در طول کانال رخ دهد نیز بررسی گردید. از مدل شبیه‌سازی شده کانال اصلی دز غربی (Isapoor et al., 2011) به عنوان یکی از طولانی‌ترین کانال‌های کشور با ظرفیت طراحی بالای 157 متر کعب بر ثانیه جهت بررسی حالت‌های بهره‌برداری مذکور استفاده گردید. راهبرد اختلاف رقوم سطح آب با استفاده از یک کنترل‌گر سراسری مرتبه دوم خطی (LQR) جهت کنترل شرایط پیچیده هیدرولیکی کانال مورد مطالعه، اعمال شد.

مواد و روش‌ها

راهبرد اختلاف خطای رقوم سطح آب

کلمنز (Clemmens., 2012) راهبرد کنترل اختلاف خطای رقوم سطح آب در بازه‌های مجاور را با الگوبرداری از روش ارائه شده در تحقیق (Van Overloop., 2006a) جهت بهبود بهره‌برداری در کانال اصلی آبیاری در شرایطی که جریان ورودی به شبکه تحت کنترل بهره‌بردار کانال نیست، معرفی نمود. بر این اساس متغیر تفاوت خطای رقوم سطح آب به صورت رابطه 1 تعریف می‌گردد:

$$D_j = e_j - e_{j+1} = (y_j - SP_j) - (y_{j+1} - SP_{j+1}) \quad (1)$$

در این رابطه D_j تفاوت خطای رقوم سطح آب در بازه‌ها j (متر)، e خطای سطح آب (متر) و y رقوم سطح آب در انتهای بازه‌های کانال (متر) و SP برابر رقوم هدف در هر بازه است.

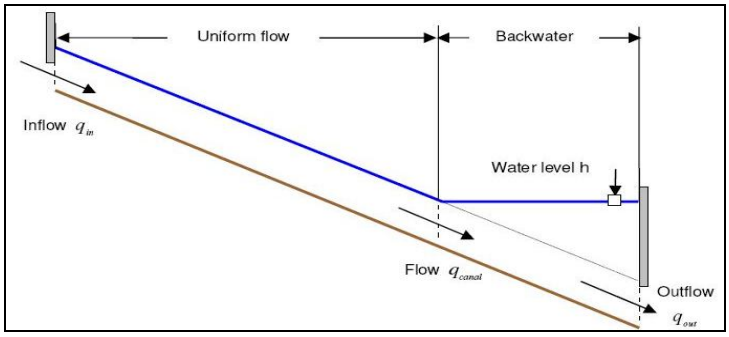
مدل ریاضی جریان آب در کانال آبیاری

مدل ریاضی جریان آب در کانال برای محاسبه رقوم سطح آب در انتهای هر بازه و دبی ورودی به هر بازه کانال استفاده می‌شود. این دو پارامتر، از مولفه‌های اصلی سیستم کانال هستند که رفتار هیدرولیکی سیستم را توصیف می‌کنند (Cunge., 1969). به طور معمول توصیه می‌شود در صورتی که سامانه کنترل خودکار کانال از یکی از روش‌های کنترل مرکزی قوی ، مانند کنترل‌گر طراحی شده در این تحقیق، بهره‌مند باشد، می‌توان برای کاهش زمان محاسبات از معادلات خطی ساده شده استفاده نمود (Xu min et al., 2011; Van Overloop et al., 2010). در این تحقیق از مدل انتگرالی-تاخیری پیشنهاد شده توسط شورمانز (1997) که فراوان در تحقیقات مشابه به کار گرفته شده است برای طراحی الگوریتم‌های کنترل در کانال‌های اصلی آبیاری استفاده شد (Clemmens., 2012; Xu et al., 2011; van Overloop et al., 2010; Negenborn et al., 2009). بر اساس این مدل خطی که هر بازه از کانال به دو بخش، یکی با جریان یکنواخت و دیگری با جریان تحت تاثیر منحنی برگشت آب تقسیم می‌شود. مشخصه اصلی بخش اول زمان تاخیر ناشی از حرکت موج آب از سراب بازه تا محل اثرگذاری جریان برگشتی است و مشخصه اصلی بخش دوم عبارت است از سطح ذخیره. طرح شماتیک مدل انتگرالی – تاخیری که در شکل 1 نشان داده شده است.

بر اساس مدل خطی انتگرالی– تاخیری، مدل گسسته شده برای یک بازه از کانال که شامل بخش جریان یکنواخت و بخش منحنی برگشت آب است، به فرم رابطه 2 قابل ارایه است (Van Overloop et al., 2008):

$$\mathbf{h}(k+1) = \mathbf{h}(k) + \frac{T_c}{A_s}\mathbf{q_{in}}(k-k_d) - \frac{T_c}{A_s}\mathbf{q_{out}}(k) - \frac{T_c}{A_s}\mathbf{q_{off\text{-}take}}(k) \quad (2)$$

که در این رابطه، h عمق آب در انتهای پایین‌دست بازه، As برابر سطح ذخیره ناشی از منحنی برگشت آب (سطح افقی بالای سطوح جریان) (m^2)، Tc گام زمانی کنترل (s)، q_{in} دبی ورودی به بازه کانال (m^3/s)، q_{out} دبی خروجی از بازه کانال (m^3/s)، $q_{off\text{-}take}$ دبی برداشتی توسط آب‌گیر (m3/s)، k_d برابر تعداد گام‌های تاخیری ناشی از حرکت آب از سراب کانال تا محل تحت تاثیر منحنی برگشت آب است و k اندیس گام زمانی است.



شکل 1- شمای مدل ساده خطی انتگرالی– تاخیری (ID) (Shuurmans., 1997)

در ادامه، از مدل فضای حالت که امکان فشرده سازی و فرمول‌بندی چند متغیره مدل خطی را مهیا می‌کنند، برای بیان مدل ریاضی سیستم کانال استفاده شده است. بر این اساس رابطه سیستم به صورت معادله 3 بیان می‌شود (Van Overloop., 2006b):

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}(k).\mathbf{x}(k) + \mathbf{B_u}.\mathbf{u}(k) + \mathbf{B_d}.\mathbf{d}(k) \qquad (3)$$

در این معادله: u ماتریس متغیر کنترل شونده، d ماتریس اغتشاشات است که شامل مقادیر درخواستی آب است. هم‌چنین k نیز شاخص گام زمانی، پارامترهای $\mathbf{A}$، $\mathbf{B_u}$، $\mathbf{B_d}$ ضرایب معادلات هستند که به ترتیب عبارت‌اند از: ماتریس سیستم (نمایی از ضرایب معادلات جریان)، ماتریس ورودی ضرایب کنترل، ماتریس ورودی ضرایب اغتشاشات. همچنین X ماتریس وضعیت سیستم است که به صورت رابطه 4 بیان می‌گردد:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} q_{in}(k+1) \\ . \\ . \\ q_{in}(k-k_d) \\ e_1(k+1) \\ D_1(k+1) \end{bmatrix} \qquad (4)$$

که در این ماتریس e و D به ترتیب خطای رقوم سطح آب در انتهای هر بازه و اختلاف خطای دو بازه مجاور است.

$$\begin{bmatrix} q_{in}(k+1) \\ q_{in}(k) \\ q_{in}(k-1) \\ q_{in}(k-2) \\ e_1(k+1) \\ D_1(k+1) \\ q_1(k+1) \\ q_1(k) \\ e_2(k+1) \\ D_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{T_c}{A_s} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{T_c}{A_s} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_{in}(k) \\ q_{in}(k-1) \\ q_{in}(k-2) \\ q_{in}(k-3) \\ e_1(k) \\ D_1(k) \\ q_1(k) \\ q_1(k-1) \\ e_2(k) \\ D_2(k) \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \nabla q_{in}(k) \\ \nabla q_1(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{T_c}{A_s} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{T_c}{A_s} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_{off-take-1}(k) \\ q_{off-take-2}(k) \end{bmatrix} \qquad (5)$$

q_{in} میزان دبی ورودی به بازه کانال به میزان زمان تاخیر حرکت آب در هر بازه (k_d) گام زمانی است. لازم به ذکر است که هر دو متغیر e و D در ماتریس وضعیت سیستم در نظر گرفته شده است. بدین معنی که کنترل‌گر در تلاش است که هم‌زمان تفاوت خطای سطح آب در بازه‌های متوالی و نیز خطای سطح آب در هر یک از بازه‌ها را به صفر برساند. در نهایت با تبدیل روابط به دست آمده برای تمامی بازه‌ها به فرم مدل ماتریسی فضای حالت (رابطه 2)، ماتریس‌های $\mathbf{X}_{64\times1}$ ، $\mathbf{A}_{64\times64}$، $\mathbf{B}_{\mathbf{u}64\times26}$، $\mathbf{B}_{\mathbf{d}64\times13}$ به دست آمدند. به جهت بزرگ بودن ماتریس‌ها، مدل ماتریسی فضای حالت تنها برای دو بازه اول در رابطه 5 آورده شده است.

کنترل‌کننده خطی مرتبه دوم

در این تحقیق از کنترل‌کننده سراسری پس خور معرفی شده توسط (Clemmens., 2012) که کنترل سیستم کانال را با استفاده از روش تنظیم خطی مرتبه دوم انجام می‌دهد، استفاده شده است. در این روش محاسبه میزان تنظیم دریچه‌ها بر اساس رابطه 6 انجام می‌گیرد:

$$\mathbf{u}(k) = -\mathbf{K}\mathbf{x}(k) \qquad (6)$$

که در این رابطه u ماتریس متغیرهای کنترل شونده، K ماتریس بهره‌های پس‌خور و X ماتریس سیستم است. متغیر کنترل شونده در این تحقیق، دبی عبوری از سازه‌های تنظیم است. بنابراین یک کنترل‌گر فرعی[1] جهت تبدیل میزان دبی عبوری به میزان بازشدگی سازه‌های تنظیم بر اساس روش پیشنهاد شده توسط (Van Overloop., 2006b) نیز مورد استفاده قرار گرفت. برای تنظیم کنترل‌گر، از تابع هدف مرتبه دوم (رابطه 7) برای حداقل سازی اختلاف خطای رقوم سطح آب و تغییرات دریچه‌ها استفاده شد (Shuurmans., 1997):

$$\mathbf{J} = \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{X}(k)^T \mathbf{Q}\mathbf{X}(k) + \mathbf{u}(k)^T \mathbf{R}\mathbf{u}(k) \qquad (7)$$

که در این رابطه T عمل‌گر وارون سازی[2]، u(k) بردار مقادیر تغییرات دبی عبوری از سازه‌ها، Q تابع جریمه برای متغیرهای e و D و هم‌چنین R تابع جریمه برای تغییرات دبی‌های عبوری از سازه‌ها است. برای تغییرات دبی عبوری و در نهایت تغییرات ارتفاع دریچه، حداکثر تغییر ارتفاع دریچه یا حداکثر تغییر دبی عبوری از سازه تنظیم در هر گام زمانی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد؛ بنابراین ورودی‌های Q و R که هم‌آن مقادیر جریمه‌هایی هستند که در متغیرهای مربوطه ضرب می‌شوند، برابر معکوس مربع MAVE متغیرها در نظر گرفته می‌شوند (Van Overloop., 2006b).

1 - Slave Controller
2 - Transpose operator

مشخصات کانال اصلی دز غربی

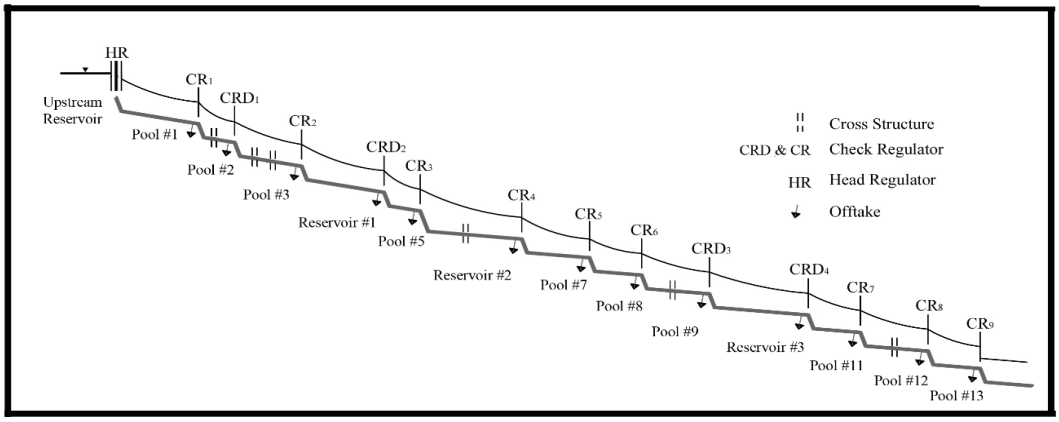
در این تحقیق طراحی کنترل گر برای کانال اصلی دز غربی با طول 44 کیلومتر متشکل از 13 بازه و با دبی طراحی ورودی 157 متر مکعب بر ثانیه انجام گردید. دبی طراحی این کانال در ابتدای آن 157 مترمکعب بر ثانیه بوده و دارای 14 سازه تنظیم (9 سازه چک، 4 سازه مقسم و یک سازه بالادست کانال) است. تمام سازه‌های تنظیم واقع شده در طول کانال قطاعی می‌باشند. تعداد 71 آب‌گیر از نوع دریچه کشویی، در طول کانال، وظیفه انتقال آب به واحدهای درجه دو را به‌عهده دارند (Isapoor et al., 2011). نمای شماتیک کانال در شکل 2 آورده شده است.

گزینه‌های بهره‌برداری مورد آزمون

با توجه به این‌که هدف اصلی بررسی کارایی راه‌برد اختلاف خطای رقوم سطح آب در توزیع عادلانه آب بین مصرف‌کنندگان در کانال اصلی است، تعیین گزینه‌های بهره‌برداری در راستای بررسی این اهداف انجام گرفته است. آزمون و ارزیابی عملکرد کنترل‌گر مدرن LQR در شرایط بهره‌برداری معمول، بدون هیچ محدودیت در آب ورودی و هم‌چنین شرایط غیر معمول بهره‌برداری شامل شرایط کم آبی با محدودیت آب ورودی به کانال اصلی و نیز در شرایط تغییرات شدید و ناگهانی در برداشت آب به شرح ذیل انجام گرفت:

گزینه اول بهره‌برداری: بر اساس یک برنامه زمانی واقعی برداشت آب از کانال اصلی دز غربی برداشت آب به مدت 16 ساعت و مجموع دبی برداشتی در مسیر کانال اصلی برابر با میزان ثابت 63 متر کعب بر ثانیه ثابت است. برداشت آب به تقریب در اکثر آب‌گیرها در طول کانال اصلی رخ داده و هیچ‌گونه تغییر در میزان برداشت آب، در طول شبیه‌سازی رخ نمی‌دهد.

گزینه دوم بهره‌برداری: شامل یک کاهش ناگهانی و سپس افزایش ناگهانی برداشت آب در کانال می‌شود. در طی 7 روز برداشت آب، پس از دو روز میزان تقاضا از 63 به صورت ناگهانی به 35 متر مکعب بر ثانیه و دو مرتبه پس از دو روز دیگر به همان میزان 63 متر مکعب بر ثانیه افزایش می‌یابد. این گزینه جهت ایجاد یک برنامه زمانی برداشت آب شدید و ناگهانی که در مواقع بهره‌برداری کانال به ندرت رخ می‌دهد صورت گرفت. در این برنامه تنها دبی آب‌گیر با بالاترین ظرفیت برداشت آب در کانال اصلی (آب‌گیر W2) واقع در بازه چهارم تغییر داده شدند و برداشت آب در سایر آب‌گیرها تغییر پیدا نکرده است. شبیه به گزینه قبلی، در این گزینه بهره‌برداری نیز هیچ محدودیتی در میزان آب ورودی به کانال وجود نداشته و هدف تنها بررسی عملکرد سامانه کنترل خودکار طراحی شده در شرایط تغییرات شدید برداشت آب در کانال اصلی است.



شکل 2- شکل شماتیک کانال اصلی دز غربی

جدول 1- محدوده مجاز تغییرات رقوم سطح آب در بازه‌های کانال مورد تحقیق برای کنترل‌گر

شماره بازه	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
رقوم حداکثر تا عمق هدف (m)	0/3	0/3	0/3	0/6	0/3	0/3	0/3	0/3	0/3	0/3	0/3	0/2	0/2
رقوم حداقل تا عمق هدف (m)	0/15	0/15	0/15	0/15	0/15	0/15	0/15	0/15	0/15	0/15	0/15	0/15	0/15

گزینه سوم بهره‌برداری: به جهت بررسی کارایی کنترل گر LQR در شرایط کم آبی در کانال اصلی، یک محدودیت 24 ساعته در تغییر وضعیت سازه تنظیم سراب کانال اعمال گردید. برنامه زمانی برداشت آب در طول چهار روز بدون تغییر بوده و میزان برداشت آب توسط آب‌گیرها ثابت و بدون تغییر بوده است. در طول مدت 24 ساعت محدودیت در تغییر وضعیت سازه تنظیم ابتدایی کانال، میزان آب ورودی به کانال برابر با 53 متر مکعب بر ثانیه و به میزان 10 متر مکعب بر ثانیه کم‌تر از حداکثر تقاضا در کانال اصلی رخ داده است. در این مدت سازه تنظیم ابتدایی کانال مجاز به تغییر وضعیت نبوده و بنابراین عملکرد سامانه کنترل خودکار طراحی شده در این تحقیق (LQR با بهره‌گیری از منطق راهبرد اختلاف خطای رقوم سطح آب) در توزیع خطای ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفت. ایده اصلی این گزینه بهره‌برداری از شرایط بهره‌برداری کانال اصلی آریزونا که در آن سازه تنظیم سراب کانال تنها در ساعاتی از روز مجاز به تغییر وضعیت است (Clemmens., 2012)، گرفته شده است.

ارزیابی عملکرد الگوریتم کنترل

رایج‌ترین شاخص‌های ارزیابی عملکرد مورد استفاده در تحقیقات مختلف خودکارسازی کانال‌ها عبارت‌اند از حداکثر خطای مطلق (MAE) و خطای مطلق تجمعی (IAE) (Molden and Gates., 1990; Clemmens et al., 1998):

$$MAE = \frac{\max\left(\left|y_t - y_{Target-band}\right|\right)}{y_{target}} \quad (8)$$

$$IAE = \frac{\frac{\Delta t}{T}\sum_{t=0}^{T}\left(\left|y_t - y_{Target-band}\right|\right)}{y_{Target-band}} \quad (9)$$

که در این رابطه y_t تراز سطح آب مشاهده شده در زمان t، $y_{Target-band}$ تراز محدوده مجاز تغییرات آب، Δt گام زمانی کنترل و T مدت زمان شبیه‌سازی است.

به دلیل بررسی عملکرد سامانه کنترل خودکار طراحی شده این تحقیق در بهبود بهره‌برداری کانال از دیدگاه عدالت در تحویل آب، از شاخص عدالت معرفی شده توسط مولدن و گیتز رابطه 10 استفاده گردید (Molden and Gates., 1990):

$$MPE = \frac{1}{T}\sum_{T} CV_R\left(\frac{Q_D}{Q_R}\right) \quad (10)$$

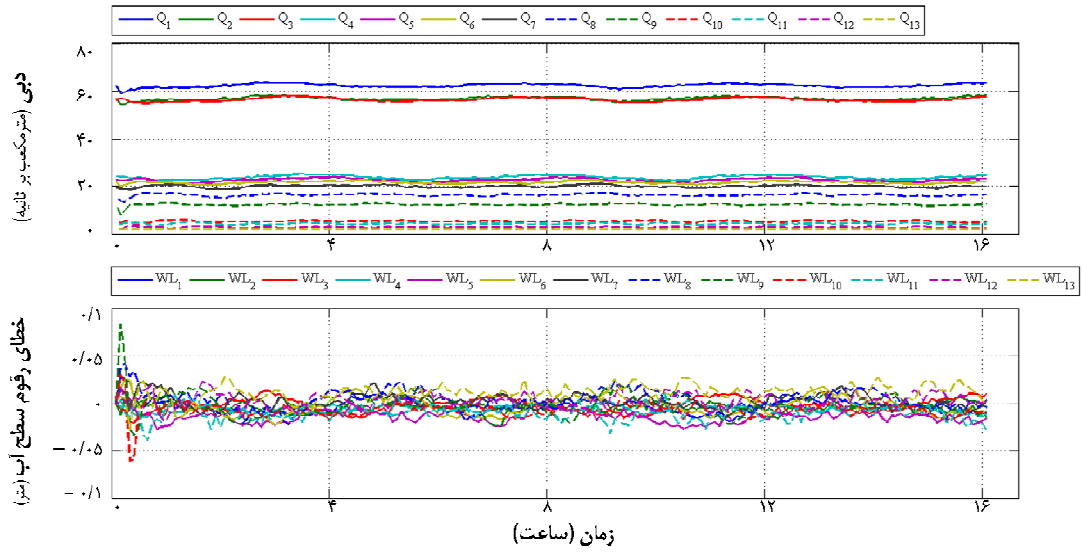
که در این رابطه MPE شاخص عدالت در تحویل، QD میزان دبی تحویلی به یک آب‌گیر در هر گام زمانی شبیه‌سازی است. QR میزان دبی تقاضا شده که برای آب‌گیر است که در برنامه زمانی تحویل آب مشخص شده است. ضریب تغییرات مکانی آب‌گیرها نسبت دبی‌ها در طول کانال است. ضریب تغییرات و به طبع آن شاخص عدالت توزیع برای هر بازه کانال محاسبه شد تا میزان عدالت تحویل آب در بالادست، پایین‌دست و بخش میانی کانال مشخص شود. از آن‌جایی که در هر کدام از بازه‌های کانال مورد مطالعه بین 3

تا 8 آب‌گیر واقع شده است، لذا محاسبه شاخص عدالت تحویل برای هر بازه به صورت مجزا معنی‌دار است. هر چه شاخص عدالت به صفر نزدیک‌تر شود، توزیع آب در کانال عادلانه‌تر انجام پذیرفته است.

نتایج و بحث

نتایج شبیه سازی گزینه‌های مورد آزمون در قالب نمودارهای تغییرات شدت جریان عبوری از سازه‌های تنظیم و میزان خطای رقوم سطح آب در پایین‌دست هر بازه کانال به تصویر کشیده شده است. خطای رقوم سطح آب بر اساس میزان انحراف سطح آب از رقوم هدف در هر بازه کانال ترسیم شده است. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های 3 تا 5 آورده شده است. هم‌چنین شاخص‌های ارزیابی عملکرد MAE و IAE و نیز شاخص بهره‌برداری عدالت تحویل به‌منظور بررسی نحوه توزیع عادلانه آب بین کلیه مصرف‌کنندگان در طول شبکه اصلی محاسبه و گزارش شده است. همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شد، محاسبه شاخص‌های ارزیابی عملکرد بر اساس میزان انحراف سطح آب از محدوده مجاز تغییرات انجام شد. بر این اساس، در زمانی که رقوم سطح آب در محدوده مجاز تغییرات سطح آب قرار گرفته، فرض می‌شود که آب‌گیری در حالت مطلوب انجام می‌پذیرد. شکل 3 نتایج شبیه‌سازی بهره‌برداری کانال برای اولین گزینه بهره‌برداری را به تصویر می‌کشد. مطابق این گزینه، بهره‌برداری بر اساس یک برنامه زمانی 16 ساعته واقعی برداشت آب از کانال اصلی دز غربی ایجاد شده و هیچ‌گونه تغییر در میزان برداشت در آبگیرها اتفاق نمی‌افتد. میزان خطای رقوم سطح آب برای تمامی بازه‌ها در محدوده مجاز تغییرات بوده و هیچ تخطی از این محدوده در طول شبیه‌سازی رویت نشده است. بنابراین مقدار شاخص‌های ارزیابی عملکرد MAE و IAE در طول شبیه‌سازی برابر صفر به دست آمده و توزیع آب بین مصرف‌کنندگان هم عادلانه و هم کافی انجام شده است. در این گزینه بهره‌برداری هیچ عدم تطبیقی بین عرضه و تقاضای آب رخ نداده و تن‌ها ساده‌ترین حالت بهره‌برداری کانال به منظور بررسی رفتار سامانه کنترل طراحی شده در شرایط معمول بهره‌برداری کانال اصلی بررسی شده است. بنابراین در این حالت کنترل‌گر LQR به تنهایی قادر به کنترل مطلوب شرایط بوده و در عمل راهبرد اختلاف خطای رقوم سطح آب به کار گرفته نشده است.

نتایج شبیه‌سازی گزینه دوم بهره‌برداری در شکل 4 آمده است. در این گزینه 7 روزه بهره‌برداری که شاید به ندرت در یک کانال آبیاری حادث شود، پس از دو روز میزان تقاضا از 63 به صورت ناگهانی به 35 متر مکعب بر ثانیه و دوباره در روز چهارم به میزان اولیه 63 متر مکعب افزایش می‌یابد. هدف از این گزینه بهره‌برداری، آزمودن روند توزیع عادلانه آب در کانال اصلی توسط سامانه کنترل خودکار این تحقیق، در شرایط بهره‌برداری کانال با افزایش و کاهش شدید و ناگهانی میزان برداشت آب است. بر اساس نمودارهای خطای رقوم سطح آب در شکل 4 آب مازاد ناشی از کاهش ناگهانی برداشت آب در بازه چهارم کانال و در محدوده مجاز تغییرات رقوم سطح آب نگه داشته شده است. کنترل‌گر LQR با کمک راهبرد اختلاف خطای رقوم سطح آب اقدام به توزیع خطای ایجاد شده در بازه چهارم با بازه‌های پایین‌دست آن نموده است. بر این اساس حجم آب رها شده در اثر کاهش ناگهانی برداشت آب در آب‌گیر W2، سبب ذخیره حجم قابل توجهی از آن در بازه چهارم و سپس بازه‌های پایین دست آن گردد.

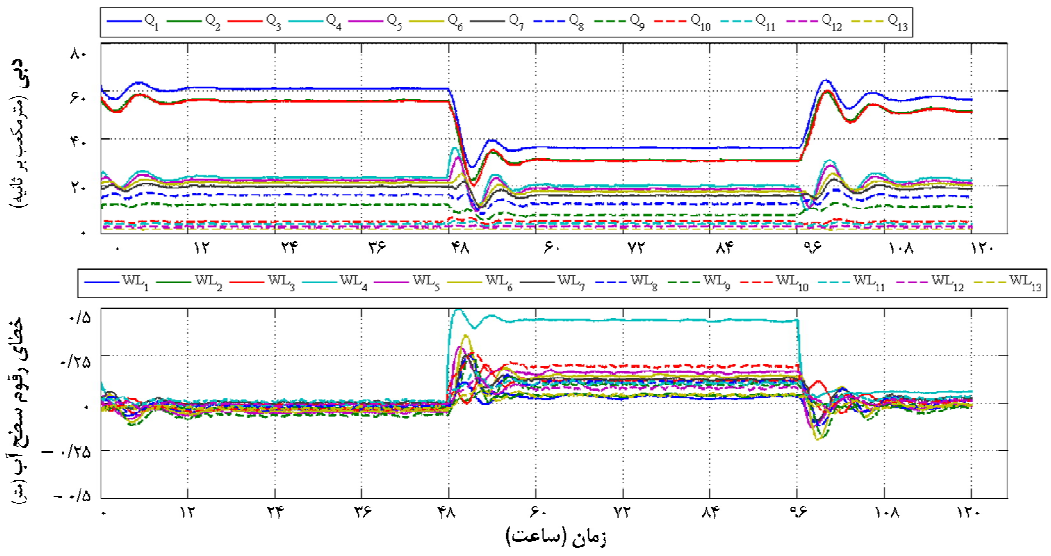


شکل3- مقادیر دبی عبوری و خطای سطح آب در بازه‌های کانال اصلی مربوط به سناریوی اول بهره‌برداری

با وجود این‌که انتظار می‌رود خطای به‌وجود آمده در اثر آب مازاد در بازه چهارم، به صورت یکسان در بازه‌های چهارم تا دوازدهم به تدریج توزیع شود، اما روند نمودارهای رقوم سطح آب حاکی از توزیع غیر یکسان خطای ناشی از آب مازاد در این بازه‌ها است به صورتی که عمده حجم آب مازاد در همان بازه چهارم نگه داشته شده است. دلیل این امر وجود محدوده‌های مجاز تغییرات رقوم سطح آب غیر یکسان در بازه‌های کانال اصلی است. مطابق جدول 1 بیش‌ترین محدوده مجاز تغییرات در بازه چهارم و برابر 0/6 متر بوده و برای بازه‌های پایین‌دست آن 0/3 متر است. هم‌چنین جریمه تعریف‌شده در کنترل‌گر برای خطای رقوم سطح آب در داخل محدوده مجاز تغییرات ناچیز ولی در خارج از این محدوده مجاز بسیار قابل توجه است. بنابراین با توجه به اینکه رقوم سطح آب بازه چهارم در طول شبیه‌سازی در داخل محدوده مجاز تغییرات نوسان می‌کند، کنترل‌گر تاکید چندانی بر توزیع یکسان خطای سطح آب در بازه‌ها ندارد. توانایی بالای کنترل‌گر LQR در کنترل رقوم سطح آب سبب شد تا در این گزینه بهره‌برداری نیز رقوم سطح آب از محدوده مجاز تخطی نکرده و بهره‌برداری کانال در حد مطلوب انجام شده و شاخص‌های ارزیابی عملکرد در تمامی بازه‌های نیز مشابه گزینه قبلی در طول شبیه‌سازی صفر شوند.

نتایج شبیه‌سازی گزینه بهره‌برداری سوم در شکل 5 به تصویر کشیده شده است. شرایط گزینه بهره‌برداری، در این گزینه مشابه با گزینه اول بوده با این تفاوت که یک محدودیت 24 ساعته در تغییر وضعیت سازه تنظیم سراب کانال اعمال شده است. به‌منظور بررسی کارایی راهبرد اختلاف خطای رقوم سطح آب، به مدت 24 ساعت میزان آب ورودی از سراب کانال به میزان 53 متر مکعب بر ثانیه و به مقدار 10 متر مکعب بر ثانیه کم‌تر از میزان تقاضا در کانال اصلی ثابت نگه داشته شد. در طول این 24 ساعت سازه تنظیم ابتدای کانال مجاز به تغییر وضعیت خود نبود.

مطابق نمودارهای خطای رقوم سطح آب در شکل 5، روند یکسان توزیع خطای رقوم سطح آب در تمامی بازه‌های کانال قابل مشاهده است. به واسطه محدودیت ایجاد شده در آب ورودی در طول 24 ساعت، پایین افتادگی سطح آب ابتدا در اول کانال رخ می‌دهد. به دنبال آن، کنترل‌گر LQR با بهره‌گیری از راهبرد اختلاف خطای رقوم سطح آب اقدام به تقسیم خطای به وجود آمده ابتدا با بازه دوم و به دنبال آن برای تمامی بازه‌ها می‌نماید. از آن‌جایی که رقوم سطح آب به تقریب 3 ساعت پس از شروع محدودیت، از تراز پایینی محدوده مجاز تغییرات سطح آب پایین‌تر می‌رود، کنترل‌گر با مقدار جریمه بسیار زیاد بر خطای رخ داده شده اقدام به توزیع خطا در تمامی بازه‌های کانال می‌نماید. نکته قابل توجه دیگر آن است که بر خلاف گزینه قبل، در این گزینه محدوده تغییرات رقوم سطح آب (رقوم حداقل تا عمق هدف مطابق جدول 1) برای تمامی بازه‌ها مقدار یکسان 0/15 متر است، بنابراین توزیع خطای رقوم سطح آب با یک الگوی ثابت در تمام بازه‌ها انجام شده است.

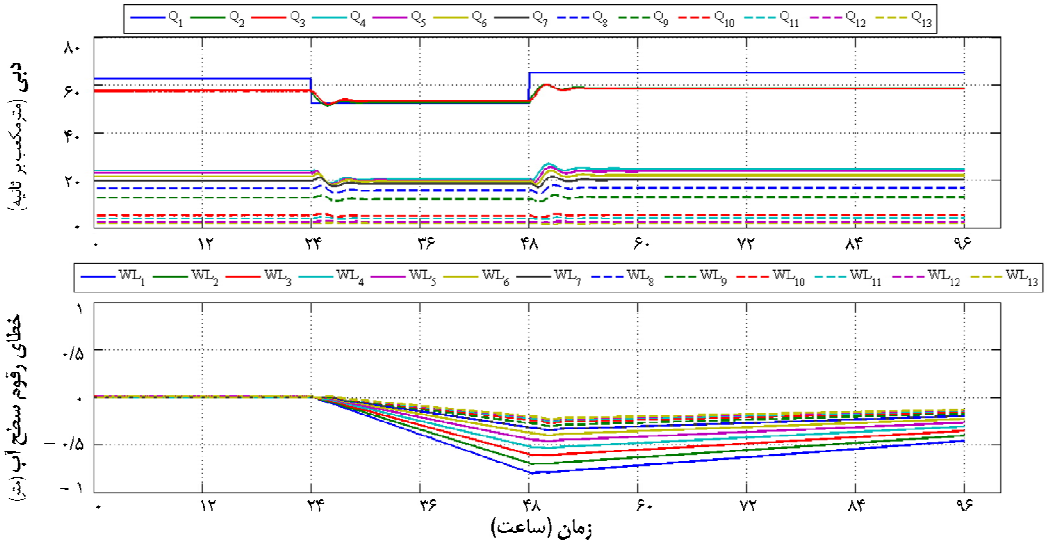


شکل 4- مقادیر دبی عبوری و خطای سطح آب در بازه‌های کانال اصلی مربوط به سناریوی دوم بهره‌برداری

با اتمام محدودیت تغییر بازشدگی دریچه، کنترل‌گر سراسری LQR با استفاده از راهبرد اختلاف خطای رقوم سطح آب به‌گونه‌ای

اقدام به تنظیم هم‌زمان سازه‌های آب‌بند می‌نماید که روند جبران خطای به وجود آمده در طول زمان محدودیت بر سازه ورودی با روندی یکسان در همه بازه‌های کانال اصلی انجام گیرد. حداکثر شاخص‌های ارزیابی برای بازه ابتدایی کانال رخ داده و برابر با MAE = 18 % و IAE = 27 % به دست آمده است. از نظر عدالت در توزیع آب بین بازه‌های کانال اصلی این شاخص بین 0/18 برای بازه چهارم تا 0/15 برای بازه یازدهم تغییر کرده است که تفاوت ناچیز این شاخص حاکی از توزیع عادلانه آب بین تمام آب‌گیرهای واقع شده در کانال اصلی است.

نتایج به دست آمده از دو گزینه بهره‌برداری اول گویای توانایی بالای کنترل‌گر سراسری LQR در تنظیم سازه‌های آب‌بند کانال مورد مطالعه در شرایط بهره‌برداری معمول و نیز شرایط غیر نرمال بهره‌برداری با تغییرات قابل توجه در میزان برداشت آب در طول کانال است. کنترل‌گر LQR با بهره‌گیری از تابع هدف مناسب و با اعمال محدودیت‌های سازه‌ای و بهره‌برداری، تغییر وضعیت بهینه دریچه‌ها را مشخص می‌نماید. نتایج این دو گزینه نشان می‌دهد در زمانی که محدودیت خاصی در میزان آب ورودی به کانال وجود نداشته باشد، کنترل‌گر سراسری قادر به کنترل مطلوب شرایط بوده که شاخص‌های ارزیابی محاسبه شده این موضوع را تایید می‌کنند. با شروع محدودیت در آب ورودی به کانال، نقش راهبرد اختلاف خطای رقوم سطح آب در بهبود عملکرد سامانه کنترل خودکار LQR در توزیع عادلانه آب بین مصرف‌کنندگان به‌طور واضح مشخص می‌گردد.



شکل 5- مقادیر دبی عبوری و خطای سطح آب در بازه‌های کانال اصلی مربوط به سناریوی سوم بهره‌برداری

نتایج این تحقیق می‌تواند به عنوان یک راه‌کار مدیریتی جهت ارتقا مدیریت بهره‌برداری مورد استفاده قرار گرفته و به عنوان یک راه‌کار کاربردی و عملی در پروژه‌های به روز رسانی شبکه‌های آبیاری و زهکشی در نظر گرفته شود. بهره‌برداری از راهبرد اختلاف خطای رقوم سطح آب به عنوان یک روش سیستماتیک در توزیع عادلانه آب بین آب بران در طول کانال اصلی، می‌تواند در بهبود عملکرد سامانه‌های کنترل خودکار نقش قابل توجهی را در شرایط کم آبی ایفا نماید. بر این اساس می‌توان با توزیع عادلانه آب بین مصرف‌کنندگان بالادستی و پایین‌دستی در شرایط کم آبی، یکی از مهم‌ترین دغدغه مدیران شبکه‌های آبیاری که همان توزیع عادلانه آب بین مصرف‌کنندگان است را برطرف نمود.

منابع

Clemmens, Albert,J. 2012. Water-Level Difference Controller for Main Canals. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 138.1:1-8.

Clemmens,A.J., Replogle,J.A. 1998. Test Cases for Canal Control Algorithms. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 124(1): 23-30.

Clemmens,A and Replogle,J. 1989. Control of Irrigation Canal Networks. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 115.1:96-110.

Cunge,J.A. 1969. On the Subject of A Flood Propagation Computation Method (Musklngum Method). Journal of Hydraulic Research. 7.2:25-30.

Guan,G., Clemmens,A.J., Kacerek,T.F., Wahlin,B.T.

and Drainage Systems. 20: 99-109.

Van Overloop,P.J. 2006b. Model predictive control on open water systems, IOS Press, Delft.

Van Overloop,P.I., Miltenburg,A. Clemmens,A.J and Strand,R. 2008. Identification of Pool Characteristics of Irrigation Canals. p. 1-12. 5th World Environmental and Water Resources Congress, Oct, 2008, American Society of Civil Engineers, USA.

Van Overloop,P.J., Schuurmans,J., Brouwer,R., Burt,C.M. 2005. Multiple-Model Optimization of Proportional Integral Controllers on Canals. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 131: 190-196.

Van Overloop,P.J., Clemmens,A.J., Strand,R.J., Wagemaker,R.M.J and Bautista,E. 2010. Real-Time Implementation of Model Predictive Control on Maricopa-Stanfield Irrigation and Drainage District's WM Canal. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 136.11:747-56.

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. Advances in Water Resources. 34.2: 282 - 90.

2012. Applying Water-Level Difference Control to Central Arizona Project. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 137:747-753.

Isapoor,S., Montazar,A., Van Overloop,P.J and Van De Giesen,N. 2011. Designing and evaluating control systems of the Dez main canal. Irrigation and Drainage. 60: 70-79.

Litrico,X and Fromion,V. 2009. Modeling and Control of Hydrosystems, first edition, Springer, London.

Molden,D and Gates,T. 1990. Performance Measures for Evaluation of Irrigation-Water-Delivery Systems. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 116: 804-823.

Montazar,A., Van Overloop,P.J and Brouwer,R. 2005. Centralized controller for the Narmada main canal. Irrigation and Drainage. 54.1: 79-89.

Negenborn,R., van Overloop,P.J., Keviczky,T and De Schutter,B. 2009. Distributed model predictive control of irrigation canals. Networks and heterogeneous media. 4.2:359-380.

Schuurmans,J. 1997. Control of Water Levels in Open-Channels, PhD Desertation, IOS Press, Delft.

Van Overloop,P.J. 2006a. Drainage control in water management of polders in the Netherlands. Irrigation

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 9, Feb.-Mar. 2016, p. 883-892

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره6، جلد9، بهمن - اسفند 1394، ص. 892-883

Fairly Water Delivery in a Centralized Automatic Control System of Main Irrigation Canal Using Water Level Difference Error strategy

S. M. Hashemy Shahdany*[1], S. Sadeghi[2] and A. Kanooni[3]

Recived: Jul.28, 2015 Accepted: Feb.03, 2016

Abstract

This paper investigates the performance of LQR centralized automatic control systems, using water level difference error strategy in main irrigation canal suffering from water scarcity. The purpose is to evaluate the equitable water distribution in main irrigation canal in conditions that the amount of water inflow into the canal is less than total water demands. Therefore three operational scenarios of normal conditions; sudden changes in water off-taking from the main canal; and deficit in supplied water are selected. A centralized LQR automatic control system is designed and tested under the mentioned operational scenarios. Performance assessment indices were also calculated during the simulation and reported in the results. The results show the reasonable performance of the designed controller in the first two operational test scenarios. Also in third one, the controller shows acceptable distribution of water level error so that equitable index varies in a limited ranged from 0.15 to 0.18. The results indicate acceptable performance of LQR controller using water level difference error operational strategy and consequently providing an equitable distribution of water along the main canal.

Keywords: Automatic Control Systems, Canal Operation, Fairly Water Distribution, LQR controllers

1 - Assistant Professor, Water Engineering Department, College of Aburaihan, University of Tehran, Iran
2 - M.Sc. Hydraulic structure; Guest Lecturer, Department of Civil Engineering; Azad University branch of Babol
3 - Assistant Professor, Water Engineering Department, University of Mohaghegh Ardabili
(*-Corresponding Author Email: mehdi.hashemy@ut.ac.ir)