



Application of Controlled Gates Boundary Condition in HEC-RAS in Water Conveyance and Distribution Systems

Hassan Mollazeynali¹  | Kazem Shahverdi² 

1. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: hassan94zeynali@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: k.shahverdi@basu.ac.ir

Article Info

ABSTRACT

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 14 July 2022

Received in revised form:

20 August 2022

Accepted: 27 September 2022

Published online:

25 December 2022

Keywords:

Canal Control,

HEC-RAS,

Water Management,

Water Regulating Structures.

Water level control and regulators have a main role in water conveyance and distribution. Despite the simplicity of structure settings in a steady-state condition, applying an appropriate setting in unsteady flow is complicated. Hence, control logic is used to set these structures, usually developed in languages such as MATLAB, Python, and FORTRAN. To use these logics, they must be combined with hydraulic models. In HEC-RAS, there is an elevation controlled water level boundary condition that can be used to control structures. In this research, the evaluation of the performance of this boundary condition was considered to regulate the water level in the E1R1 canal of the Dez network. The results showed that the rate of opening and closing of the gate has a significant impact on the performance, and if they are chosen correctly, the depth changes will be small. The results showed that the IAE indicator is around 1 percent in all the examined options and except in a few cases where the maximum value of MAE exceeds 10 percent and reaches up to 15 percent, its value is also low. Therefore, it is suggested to use this boundary condition in the control of structures.

Cite this article: Mollazeynali, H., & Shahverdi, K. (2022). Application of Controlled Gates Boundary Condition in HEC-RAS in Water Conveyance and Distribution Systems. *Journal of Water and Irrigation Management*, 12 (4), 847-858. DOI: <http://doi.org/10.22059/jwim.2022.345775.1004>





به‌کارگیری شرط مرزی کنترل سطح آب در HEC-RAS در سامانه‌های انتقال و توزیع آب

حسن ملازینلی^۱ | کاظم شاهوردی^۲ ✉

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: hassan94zeynali@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: k.shahverdi@basu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۰۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۰/۰۴

کلیدواژه‌ها:

سازه‌های تنظیم آب،

کنترل کانال،

مدیریت آب،

HEC-RAS

سازه‌های کنترل و تنظیم سطح آب نقش مهمی در عملکرد کانال‌های انتقال و توزیع آب دارند. هرچند تنظیم سازه‌ها در شرایط ماندگار به راحتی قابل انجام است، اما اعمال تنظیمات درست در شرایط جریان غیرماندگار پیچیده می‌باشد. به این دلیل منطق‌های کنترلی برای تنظیم این سازه‌ها استفاده می‌شود که معمولاً در زبان‌هایی مانند متلب، پایتون و فورترن توسعه می‌یابند. جهت استفاده از این الگوریتم‌ها باید تلفیق آن‌ها با مدل‌های هیدرولیکی انجام گیرد. در مدل هیدرولیکی HEC-RAS، شرط مرزی کنترل سطح آب وجود دارد که با استفاده از آن می‌توان اعمال کنترلی را روی سازه‌ها انجام داد. بدین منظور در این پژوهش، ارزیابی عملکرد این شرط مرزی جهت تنظیم سطح آب مورد توجه قرار گرفت و در کانال EIRI از شبکه دز ارزیابی شد. نتایج نشان داد که نرخ تغییرات باز و بسته شدن دریچه‌ها تأثیر زیادی بر روی عملکرد دارد و در صورت انتخاب درست آن‌ها، تغییرات عمق اندک بوده و حداقل تغییرات به وجود خواهد آمد. نتایج نشان داد که شاخص IAE در تمامی گزینه‌های بررسی شده در حدود یک درصد می‌باشد و شاخص MAE، جز در چند مورد که حداکثر مقدار آن بیش از ۱۰ درصد شده و تا ۱۵ درصد می‌رسد، نیز پایین می‌باشد. از این رو استفاده از این شرط مرزی در کنترل سازه‌ها پیشنهاد می‌شود.

استناد: ملازینلی، ح. و شاهوردی، ک. (۱۴۰۱). به‌کارگیری شرط مرزی کنترل سطح آب در HEC-RAS در سامانه‌های انتقال و توزیع آب. نشریه مدیریت

آب و آبیاری، ۱۲ (۴)، ۸۴۷-۸۵۸. DOI: <http://doi.org/10.22059/jwim.2022.345775.1004>



۱. مقدمه

بهره‌برداری از سازه‌های کنترل و تنظیم آب، جهت تحویل و توزیع عادلانه آب، با راندمان و کفایت بالا همواره مورد توجه پژوهش‌گران مختلف بوده است و پژوهش‌های مختلفی در این راستا انجام شده است. بهره‌برداری از این سازه‌ها در سامانه‌های انتقال و توزیع آب سنتی اکثراً به‌صورت دستی و در سامانه‌های مدرن به‌صورت خودکار، خودکار هیدرولیکی یا الکترونیکی، انجام می‌شود. جهت انجام کنترل با روش‌های خودکار، نیاز به یک شبیه‌ساز کانال و یک الگوریتم کنترل می‌باشد. در پژوهش‌های گذشته شبیه‌سازها و الگوریتم‌های مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است و یک تقسیم‌بندی کاملی از انواع الگوریتم‌های کنترل صورت گرفته است (Malaterre *et al.*, 1998). به‌طور کلی، عمده الگوریتم‌های کنترل مورد استفاده در کانال‌ها شامل روش‌های ساده و کلاسیک مانند PID (Proportional-Integral-Derivative)، مدل کنترل پیش‌بین یا MPC (Model Predictive Control) و مدل‌های هوشمند مبتنی بر هوش مصنوعی یا AI (Artificial Intelligence) می‌باشد.

روش PID یکی از ساده‌ترین روش‌ها می‌باشد که در مسائل مختلف در صنعت مورد استفاده فراوان قرار گرفته است و از یک رابطه ساده ریاضی جهت محاسبه خروجی کنترل، با دریافت ورودی و مقایسه آن با مقدار هدف استفاده می‌کند. مدل ریاضی روش PID با طراحی نرم‌افزاری و سخت‌افزاری آن ساخته و در یک فلوم آزمایشگاهی نصب شد و برای کنترل یک دریچه کشویی که در وسط فلوم قرار گرفته بود، مورد آزمون و ارزیابی قرار گرفت. با محاسبه شاخص‌های ارزیابی کنترل و سطح آب مشخص شد که توانایی این روش در کنترل سطح آب بسیار بالاست (Shahverdi & Monem, 2012). پژوهش مشابهی با استفاده از PID انجام شد با این تفاوت که سازه مورد کنترل، سازه سرریز لولایی بود. نتایج آن نیز بیانگر توانایی روش PID بود (Monem & Hoseinzadeh, 2012). با آن‌که روش PID یک روش ساده‌ای می‌باشد اما پیدا کردن ضرایب مناسب تناسبی، انتگرالی و دیفرانسیلی برای مسئله مورد نظر، کار ساده‌ای نمی‌باشد. به‌عنوان مثال در پژوهشی، برای پیدا کردن ضرایب تناسبی و انتگرالی از روش LMI (Linear Matrix Inequalities) در تلفیق با شبیه‌ساز Sobek استفاده شد. کانال مورد مطالعه کانال شماره یک ASCE بود که مقدار ضرایب مذکور در بازه‌های مختلف تعیین شد (Arauz *et al.*, 2020). روش PI در تلفیق با Sobek برای کنترل کانال توسعه یافت و مورد ارزیابی قرار گرفت (Hashemy & Van Overloop, 2013).

مدل MPC یکی از پرکاربردترین مدل‌ها در مسائل مختلف از جمله در کانال‌ها می‌باشد که در پژوهش‌های مختلف و برای اهداف مختلف از جمله توسعه مدل‌هایی برای توزیع عادلانه آب (Barkhordari and Shahdany, 2021)، توسعه مدلی برای استفاده در شرایط جریان قابل پیش‌بینی و غیرقابل پیش‌بینی (Shahdany *et al.*, 2019)، توسعه مدلی با استفاده از MPC با رویکرد استفاده از ذخیره درون مسیری در کانال اصلی دز (Hashemy *et al.*, 2013)، استفاده شده است. به‌تازگی با توسعه کامپیوترها و ارائه کامپیوترهای با سرعت بالا، هوش مصنوعی نیز در مسائل مختلف مورد استفاده فراوان قرار گرفته است. اولین پژوهش با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی مبتنی بر یادگیری، پژوهش (Hernández & Merkley, 2011) می‌باشد که در آن از هوش مصنوعی جهت خودکارسازی کانال‌ها استفاده شد. در پژوهش (Shahverdi and Monem, 2015)، از روش هوش مصنوعی جهت خودکارسازی کنترل سطح آب در یک کانال کوچک آزمایشگاهی در تلفیق با مدل هیدرودینامیک ICSS (Irrigation Canal Simulation System) استفاده شد. در پژوهش (Shahverdi *et al.*, 2016)، از روش مبتنی بر هوش مصنوعی یعنی روش یادگیری تقویتی RL (Reinforcement Learning) برای برنامه‌ریزی تحویل و توزیع آب استفاده شد. در این پژوهش نیز، از مدل ICSS جهت شبیه‌سازی کانال استفاده شد و نتایج حاصل موفقیت‌آمیز گزارش شد.

علاوه بر روش‌های ذکرشده، بحث بهینه‌سازی تحویل و توزیع آب نیز موردتوجه قرار گرفته است که از پژوهش‌هایی که به‌تازگی انجام شده می‌توان به پژوهش (Liu *et al.*, 2018) که در آن از الگوریتم جامعه پرندگان PSO استفاده شده است؛ پژوهش (Fatemeh *et al.*, 2020) که در آن از الگوریتم مورچگان ACO جهت بهینه‌سازی تحویل و توزیع آب در شرایط نرمال و کم‌آبی‌های شدید استفاده شده است؛ پژوهش (Lord *et al.*, 2021) که در آن از روش ACO جهت حداقل‌سازی مجموع تلفات بهره‌برداری و تلفات نشت در کانال‌ها استفاده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روش‌های کنترل مختلفی در سامانه‌های انتقال و توزیع آب مورد استفاده قرار گرفته و ارزیابی شده است. با توجه به این که کنترل اصلی در کانال انجام می‌شود همواره نیاز هم‌زمان به یک روش کنترل و یک شبیه‌ساز می‌باشد که شبیه‌سازهای مورد استفاده در برخی پژوهش‌های اشاره شده ارائه شده است.

مدل HEC-RAS، یکی از مدل‌های کاربردی هیدرولیکی بوده که قابلیت‌های زیادی داشته و طیف وسیعی از سازه‌ها را با استفاده از معادلات و تکنیک‌های مربوطه در رودخانه‌ها و کانال‌ها می‌تواند شبیه‌سازی کند. لازم به ذکر است که ایده اولیه از طراحی و ارائه HEC-RAS، محاسبه پروفیل سطح آب و نقشه‌های سیل بود. معادلات مربوط به سازه‌ها به صورت یک مجموعه‌ای از معادلات تجربی است که مقدار افت بار را برای دبی مورد نظر، با استفاده از آن‌ها محاسبه می‌شود. سازه‌هایی که معادلات آن‌ها در HEC-RAS به صورت مستقیم وجود دارد محدود بوده و شامل دریچه‌های کشویی، دریچه‌های شعاعی و سرریزها می‌باشد که معادلات مربوطه برای شبیه‌سازی آن‌ها در شرایط جریان آزاد و مستغرق مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای سازه‌هایی که به‌طور مستقیم نمی‌توان آن‌ها را با HEC-RAS مدل‌سازی کرد می‌توان از منحنی‌های دبی-اشل آن‌ها استفاده کرد.

از دیگر قابلیت‌های مدل HEC-RAS، وجود شروط مرزی سری‌های زمانی و کنترل ارتفاع سطح آب می‌باشد که در شرط مرزی اول، تغییرات دریچه در طول زمان را می‌توان به صورت یک سری زمانی به مدل تعریف کرد و در شرط مرزی دوم می‌توان سطح آب را در یک سطح هدف کنترل کرد و یا اختلاف ارتفاع بین دو نقطه را کنترل کرد و در یک محدوده‌ای ثابت نگهداشت. شرط مرزی کنترل ارتفاع سطح آب، یک قابلیت مهم می‌باشد که با استفاده از آن می‌توان کنترل سازه‌های تنظیم سطح آب را انجام داد.

در مقایسه قابلیت کنترل ارتفاع در مدل HEC-RAS با پژوهش‌های اشاره شده در بالا می‌توان دریافت که HEC-RAS هم یک شبیه‌ساز می‌باشد و هم یک روش کنترلی، هرچند با منطق ساده در خود دارد که در صورت استفاده از شرط مرزی کنترل ارتفاع، نیاز به استفاده از روش کنترلی دیگر و تلفیق آن وجود ندارد. با این حال، کاربرد و عملکرد این شرط مرزی در سامانه‌های انتقال و توزیع آب موردآزمون و ارزیابی قرار نگرفته است. در این پژوهش، ضمن معرفی شرط مرزی کنترل ارتفاع، تثبیت عمق آب در عمق هدف در بالادست سازه‌های آب‌بند در کانال EIRI شبکه دز در شمال خوزستان با استفاده از شرط مرزی کنترل ارتفاع مورد بررسی قرار گرفت. سپس، نتایج حاصل با استفاده از شاخص‌های استاندارد مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲. مواد و روش‌ها

جهت کنترل سازه‌های کنترل آب در سیستم‌های انتقال و توزیع آب، منطق‌های مختلف کنترلی مورد استفاده قرار می‌گیرد که معمولاً مهندسیین کنترل آن را توسعه می‌دهند. این منطق‌ها به صورت یک برنامه بیرونی با استفاده از یک مدل خطی یا غیرخطی کانال ترکیب شده و در نهایت یک بسته نرم‌افزاری ایجاد شده و عمل کنترل را در کانال با توجه به تغییرات ایجادشده، انجام می‌دهد. یکی از مدل‌های مورد استفاده برای شبیه‌سازی کانال‌ها، مدل HEC-RAS است که قابلیت‌های زیادی را دارد.

۲. ۱. انواع شرایط مرزی در HEC-RAS

شرایط مرزی مختلفی در مدل HEC-RAS وجود دارد که در شرایط مرزی مانند بخش ورودی و انتهایی کانال، سازه‌های آب‌بند و سازه‌های آبیگر قابل تعریف هستند. که شامل هیدروگراف دبی جریان^۱؛ که در آن مقدار دبی به صورت سری زمانی (برای هر گام زمانی) تعریف می‌شود؛ هیدروگراف عمق جریان^۲؛ که در آن مقدار عمق جریان (نسبت به سطح مبنا) به صورت سری زمانی تعریف می‌شود؛ هیدروگراف دبی/عمق^۳؛ که در آن هر دو مقدار دبی و عمق جریان به صورت سری زمانی تعریف می‌شود؛ عمق نرمال^۴؛ که در آن مقدار شیب پایین دست تعریف می‌شود؛ سری زمانی بازشدگی دریاچه^۵؛ که در آن ارتفاع بازشدگی دریاچه به صورت سری زمانی تعیین می‌شود؛ و شرط مرزی کنترل ارتفاع سطح آب^۶؛ که از آن برای کنترل اتوماتیک سطح آب می‌توان استفاده کرد. در کانال مورد مطالعه در این پژوهش برای مقطع ورودی، مقطع خروجی، سازه‌های آب‌بند و سازه‌های آبیگر به ترتیب شروط مرزی هیدروگراف دبی جریان، هیدروگراف عمق جریان، کنترل ارتفاع سطح آب و سری زمانی بازشدگی دریاچه مورد استفاده قرار گرفت.

۲. ۲. شرط مرزی کنترل ارتفاع سطح آب

در این شرط مرزی، براساس ارتفاع سطح آب در یک یا دو مقطع به سه روش می‌توان سازه را کنترل کرد. در حالت اول، مقطع بالادست سازه تنظیم؛ در حالت دوم، مقطع مورد نظر کاربر که به عنوان مرجع انتخاب شده و ارتفاع سطح آب در آن کنترل می‌شود و در حالت سوم، اختلاف ارتفاع سطح آب در دو مقطع مورد نظر کاربر کنترل می‌شود. در حالت اول یا دوم باید پارامترهای زیر به عنوان داده‌های ورودی توسط کاربر به مدل معرفی می‌شود.

۱. ارتفاعی از سطح آب (نسبت به سطح مبنا) که در آن دریاچه شروع به باز شدن می‌کند. این ارتفاع، همان حد بالای محدوده مجاز می‌باشد. لازم به ذکر است که مقادیر مختلفی از تغییرات محدوده مجاز^۷ از یک درصد تا ۲۰ درصد در نظر گرفته شده و مطالعه شده است. در این پژوهش، محدوده مجاز ۲/۵ درصد و پنج درصد مطالعه شده است. انتخاب محدوده مجاز ۲/۵ و پنج درصد به این دلیل است که گام تغییرات دبی در این پژوهش (۰/۰۵ مترمکعب بر ثانیه)، مقدار کمی بود که منجر به افزایش زمان واکنش سیستم می‌شد. همچنین، محدوده مجاز پایین تر، نشان گر تغییرات کوچک تر عمق و در نتیجه عملکرد بهتر سیستم می‌باشد.

۲. ارتفاعی از سطح آب که در آن دریاچه شروع به بسته شدن می‌کند. این ارتفاع، همان حد پایین محدوده مجاز می‌باشد.

۳. نرخ باز و بسته شدن دریاچه^۸ که مقدار تغییرات در باز شدگی دریاچه در زمان را نشان می‌دهد.

۴. حداکثر و حداقل باز شدگی دریاچه و باز شدگی اولیه دریاچه.

در این مطالعه، حداقل باز شدگی دریاچه‌های آب‌بند ۰/۱ متر در نظر گرفته شد. باز شدگی دریاچه‌ها در شرایط اولیه با توجه به پارامترهای دریاچه مانند دبی عبوری، عرض دریاچه، ارتفاع آب و ضریب تخلیه و با استفاده از رابطه مربوطه محاسبه شد و سپس به طور دقیق تر با سعی و خطا در داخل مدل HEC-RAS تعیین می‌شود. محدودیت‌ها و چگونگی عملکرد دریاچه در مواقع تغییر شرایط براساس این داده‌های ورودی می‌باشد. در حالت سوم، به جای پارامتر یک و دو، اختلاف ارتفاع سطح آب (منفی، صفر و یا مثبت) به عنوان شرط باز یا بسته شدن دریاچه در نظر گرفته می‌شود.

۲. ۳. کانال مورد پژوهش

در این پژوهش، جهت آزمون قابلیت کنترل باز شدگی دریاچه‌ها توسط شرط مرزی کنترل سطح آب در HEC-RAS، کانال درجه دوم EIRI از شبکه آبیاری دز استفاده شد. طول این کانال ۲۸۳۰/۵ متر بوده و دارای سه سازه آب‌بند و شش آبیگر با دریاچه‌های نوع کشویی می‌باشد. مقطع کانال دوزنقه‌ای، پوشش بتنی بوده و عرض کف از ابتدا تا آب‌بند

اول ۱/۵ متر و از آن پس تا انتها به یک متر تغییر می‌یابد. شیب طولی از ۰/۰۰۰۱۲ تا ۰/۰۰۱۵ متغیر بوده و شیب جانبی در کل مسیر کانال ۱/۵ افقی به یک قائم می‌باشد. مقدار دبی ورودی به کانال، بین ۰/۷ تا ۱/۵ مترمکعب در ثانیه می‌باشد. در این پژوهش، مدل ریاضی این کانال در HEC-RAS تهیه شد و سپس گزینه‌های مختلف بهره‌برداری در آن موردآزمون و ارزیابی قرار گرفت. لازم به ذکر است که آبیگرهای یک و دو در بالادست آب‌بند یک، آبیگرهای سه و چهار در بالادست آب‌بند دو و آبیگرهای پنج و شش در بالادست آب‌بند سه قرار دارند.

۲.۴. گزینه‌های مورد استفاده برای آزمون و ارزیابی

به‌منظور بررسی رفتار جریان مانند دبی عبوری از سازه‌های آب‌بند و آبیگر، ارتفاع سطح بالادست آن‌ها و بازشدگی دریاچه در سازه‌های آب‌بند و به‌طور کلی رفتار جریان در مواقع تغییر شرایط و نیاز پایین‌دست، دو گزینه آزمون و ارزیابی در شرایط ۲۰ درصد افزایش و کاهش دبی ورودی برای شبیه‌سازی انتخاب شد. در گزینه یک که افزایش جریان ورودی رخ می‌دهد، در وضعیت اول دبی ورودی به کانال و دبی خروجی از آبیگرهای پنج و شش به ترتیب یک، ۰/۱ و ۰/۱ مترمکعب بر ثانیه بود که در وضعیت دوم به ۱/۲، ۰/۲ و ۰/۲ مترمکعب بر ثانیه تغییر می‌یابد. در گزینه دو که کاهش جریان ورودی رخ می‌دهد، در وضعیت اول دبی ورودی به کانال و دبی خروجی از آبیگرهای پنج و شش به ترتیب ۱/۵، ۰/۲ و ۰/۲ مترمکعب بر ثانیه بود که در وضعیت دوم به ۱/۲، ۰/۰۵ و ۰/۰۵ مترمکعب بر ثانیه تغییر می‌یابد. لازم به ذکر است که ارتفاع سطح آب در بالادست آب‌بندها در شرایط نرمال برابر با ۱/۲ متر در حالت ماندگار می‌باشد.

همان‌طور که گفته شد، نرخ باز و بسته‌شدن دریاچه‌ها در شرط مرزی کنترل ارتفاع سطح آب باید به‌عنوان ورودی به مدل HEC-RAS داده شود. اگر این مقادیر موجود باشد می‌توان از آن‌ها استفاده کرد. در این پژوهش با توجه به موجود نبودن نرخ باز و بسته‌شدن دریاچه‌ها، مقدار آن برای هر کدام از دریاچه‌های آب‌بند با روش سعی و خطا به دست آمد. برای این منظور، نرخ تغییر دبی^۹ در آب‌بندها با فرض این که در تمام آب‌بندها امکان دبی عبوری ۰/۷ تا ۱/۵ مترمکعب در ثانیه وجود دارد، برابر با ۰/۰۵ مترمکعب بر ثانیه در شرایط افزایش و کاهش تغذیه کانال در نظر گرفته شد. در واقع، تغییرات دبی با نرخ ثابت مورد بررسی قرار می‌گیرد تا برای هر تغییر کاهشی و یا افزایشی به میزان ۰/۰۵ مترمکعب بر ثانیه نسبت به دبی اولیه موجود، سرعت مناسب به دست آورده شود. سپس، برای هر آب‌بند نرخ باز و بسته‌شدن با شرط این که تلاطم را در سطح آب ایجاد کند و در حداقل زمان ممکن پس از تنظیم دریاچه در محدوده مجاز (Deadband) قرار گیرد، تعیین شد. اعداد به دست آمده تا جایی اصلاح شد که سطح آب در بالادست سازه در عمق هدف تثبیت شود.

۲.۵. شاخص‌های ارزیابی

برای بررسی عملکرد تنظیم آب‌بندها و کارایی روش مورد استفاده، از شاخص‌های مبتنی بر عمق شامل شاخص خطای حداکثر مطلق^{۱۰} (MAE)، که نشان‌دهنده حداکثر انحراف عمق از عمق هدف در طول شبیه‌سازی است و شاخص خطای مطلق تجمعی^{۱۱} (IAE) (Clemmens *et al.*, 1998)، که بیانگر متوسط انحراف عمق آب از عمق هدف در طول شبیه‌سازی می‌باشد، استفاده شده است. شاخص‌های مذکور به ترتیب به صورت روابط (۱) و (۲) تعریف می‌شوند:

$$MAE = \frac{\max(|Y_{target} - Y|)}{Y_{target}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$IAE = \frac{\sum_{T=0}^T (|Y_{target} - Y|)}{Y_{target}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این روابط، T گام زمانی محاسباتی، D طول دوره بهره برداری، Y عمق آب در طول شبیه سازی و Y_{target} عمق هدف می باشد. مقادیر ایده آل برای هر دو شاخص خطای مطلق حداکثر و خطای مطلق تجمعی صفر است.

۳. نتایج و بحث

نرخ باز و بسته شدن آب بندهای مختلف در هر دو حالت افزایش و کاهش دبی که با آزمون و خطا به دست آمده است، در جدول (۱) ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، حداقل، میانگین و حداکثر نرخ باز شدن در حالت افزایش دبی به ترتیب برابر با ۰/۲۳، ۰/۳ و ۰/۳۸ سانتی متر در دقیقه به دست آمده است. مقادیر مذکور در حالت کاهش دبی به ترتیب برابر با ۰/۲۲، ۰/۳۵ و ۰/۶ سانتی متر در دقیقه به دست آمده است. مقایسه بین دامنه تغییرات باز شدگی در دو حالت افزایشی و کاهش دبی نشان می دهد که دامنه تغییرات در حالت کاهش دبی نسبت به افزایش دبی بیشتر است. علت این پدیده را می توان این گونه بیان کرد که در حالت افزایش دبی، موج مثبت در کانال وجود دارد که تقریباً شکل و سرعت ثابتی دارد و کل موج افزایشی تقریباً در یک زمان مشخصی به محل سازه ها می رسد. در صورتی که شکل و سرعت موج منفی ناشی از کاهش دبی، ناپایدار است که باعث می شود تغییرات در بازه زمانی طولانی تری نسبت به موج مثبت به محل سازه آب بند برسد در نتیجه، انطباق در پیچه با شرایط جریان پیچیدگی نسبتاً بیشتر تری دارد.

سرعت متناظر با هر یک از دبی ها به معنای نرخ تغییر باز شدگی مناسب (برای هر آب بند) برای تغییر دبی به مقدار ۰/۰۵ مترمکعب بر ثانیه از یک دبی اولیه می باشد. به عنوان مثال، نرخ تغییر باز شدگی مناسب برای تغییر دبی از ۱/۲ به ۱/۲۵ برای هر آب بند به ترتیب ۰/۲۶، ۰/۳۲ و ۰/۲۵ سانتی متر بر دقیقه می باشد. جهت به کار به کارگیری سرعت ها، در شرایطی که نرخ تغییر دبی بیش از ۰/۰۵ باشد، از الگوی جمع سرعت ها استفاده شد. به عنوان نمونه، نحوه استخراج سرعت مناسب برای سناریوی یک و دو که شرح آن پیش تر ذکر شد به ترتیب در جدول های (۲) و (۳) آورده شده است. لازم به ذکر است که در هر دو گزینه، تغییر دبی در آب بند سوم صفر می باشد، بنابراین برای آب بند سوم نرخ تغییر باز شدگی در پیچه صفر است.

Table 1. Gate opening or closing rate for cross flow change (cm/min)

Increase cross flow (m ³ /s)	Ch 1	Ch 2	Ch 3	Decrease cross flow (m ³ /s)	Ch 1	Ch 2	Ch 3
0.70				1.5			
0.75	0.24	0.36	0.28	1.45	0.32	0.34	0.60
0.80	0.23	0.34	0.28	1.40	0.36	0.35	0.60
0.85	0.27	0.33	0.25	1.35	0.30	0.34	0.60
0.90	0.28	0.33	0.28	1.30	0.32	0.35	0.50
0.95	0.30	0.34	0.25	1.25	0.30	0.34	0.50
1.00	0.28	0.34	0.30	1.20	0.32	0.33	0.50
1.05	0.28	0.38	0.30	1.15	0.28	0.34	0.50
1.10	0.28	0.34	0.30	1.10	0.28	0.34	0.30
1.15	0.28	0.34	0.24	1.05	0.28	0.34	0.27
1.20	0.30	0.34	0.23	1.00	0.30	0.33	0.36
1.25	0.26	0.32	0.25	0.95	0.25	0.35	0.32
1.30	0.32	0.36	0.25	0.90	0.26	0.34	0.26
1.35	0.30	0.34	0.30	0.85	0.27	0.34	0.29
1.40	0.32	0.34	0.30	0.80	0.23	0.35	0.30
1.45	0.32	0.34	0.30	0.75	0.22	0.32	0.24
1.50	0.32	0.34	0.30	0.70	0.23	0.34	0.27
min	0.23	0.32	0.23	min	0.22	0.32	0.24
mean	0.29	0.34	0.28	mean	0.28	0.34	0.40
max	0.32	0.38	0.30	max	0.36	0.35	0.60

Ch: Check structure

Table 2. Gate opening rate for cross flow change in scenario 1 (cm/min)

Flow change (m ³ /s)	Check 1	Check 2	Check 3
1.00	0	0	0
1.05	0.28	0.38	0
1.10	0.28	0.34	0

1.15	0.28	0.34	0
1.20	0.3	0.34	0
Sum	1.14	1.40	0

Table 3. Gate closing rate for cross flow change in scenario 2 (cm/min)

Flow change (m ³ /s)	Check 1	Check 2	Check 3
1.50	0	0	0
1.45	0.32	0.34	0
1.40	0.36	0.35	0
1.35	0.30	0.34	0
1.30	0.32	0.35	0
1.25	0.30	0.34	0
1.20	0.32	0.33	0
Sum	1.92	2.05	0

برای نمونه، دبی ورودی به کانال در گزینه یک از یک به ۱/۲ مترمکعب در ثانیه افزایش می‌یابد. با توجه به بسته‌بودن آبگیرهای یک و دو که در بالادست آب‌بند یک قرار دارند، دبی ورودی به کانال عیناً به محل آب‌بند یک می‌رسد. در آب‌بند یک، جهت تغییر دبی از یک به ۱/۰۵ مترمکعب در ثانیه نرخ بازشدن دریچه باید برابر با ۰/۲۸ سانتی‌متر در دقیقه، جهت تغییر دبی از ۱/۰۵ به ۱/۱ مترمکعب در ثانیه نرخ بازشدن دریچه باید برابر با ۰/۲۸ سانتی‌متر در دقیقه، جهت تغییر دبی از ۱/۱ به ۱/۱۵ مترمکعب در ثانیه نرخ بازشدن دریچه باید برابر با ۰/۲۸ سانتی‌متر در دقیقه و جهت تغییر دبی از ۱/۱۵ به ۱/۲ مترمکعب در ثانیه نرخ بازشدن دریچه باید برابر با ۰/۳۰ سانتی‌متر در دقیقه باشد. حال اگر به‌طور مستقیم دبی از یک به ۱/۲ مترمکعب در ثانیه افزایش یابد، نرخ بازشدگی باید برابر با جمع نرخ تک‌تک تغییرات یعنی $۱/۱۴ = ۰/۳۰ + ۰/۲۸ + ۰/۲۸ + ۰/۲۸$ سانتی‌متر در دقیقه می‌باشد. این قاعده در طول پژوهش برای همه دریچه‌ها با توجه به جدول (۱) استفاده شد.

Table 4. Gate closing rate for cross flow change in scenario 1 (cm/min)

Flow change (m ³ /s)	Check 1	Check 2	Check 3
1.00	0	0	0
1.05	0.28	0.38	0
1.10	0.28	0.34	0
1.15	0.28	0.34	0
1.20	0.3	0.34	0
Sum	1.14	1.40	0

سرعت‌های به‌دست‌آمده با استفاده از الگوی جمع در شرط مرزی کنترل ارتفاع سطح آب در شبیه‌سازی‌ها به‌کار گرفته شد. برای هرکدام از سناریوهای یک و دو، یک‌بار در محدوده مجاز پنج درصد و یک‌بار در محدوده ۲/۵ درصد، مدل HEC-RAS به‌مدت ۲۴ ساعت اجرا و نتایج تغییرات عمق در مقطع بالادست نسبت به زمان برای هر آب‌بند ترسیم شد. تغییرات عمق در گزینه یک برای محدوده مجاز ۲/۵ و پنج درصد در شکل‌های (۱) و (۲) و در گزینه دو در شکل‌های (۳) و (۴) و شاخص‌های ارزیابی مربوطه در جدول (۵) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییرات عمق در زمان‌های ابتدایی بعد از تغییرات از محدوده مجاز خارج شده است و بعد از مدت کوتاهی به داخل محدوده مجاز برگشته است. این تغییرات در گزینه افزایشی کم‌تر بوده به‌طوری‌که حداکثر مقدار MAE برابر با ۱۰ درصد به‌دست آمده است. در گزینه کاهش‌ی مقدار تغییرات، با توجه به توضیحاتی که قبلاً در مورد موج منفی ارائه شد، بزرگ‌تر بوده به‌طوری‌که حداکثر مقدار MAE برابر ۱۵ درصد می‌باشد. حتی در محدوده مجاز ۲/۵ درصد نیز مقدار MAE برابر با ۱۲/۵ درصد به‌دست آمده است که نسبت به حداکثر مقدار آن در تغییرات افزایشی حتی در محدوده مجاز پنج درصد نیز

بیش تر می باشد.

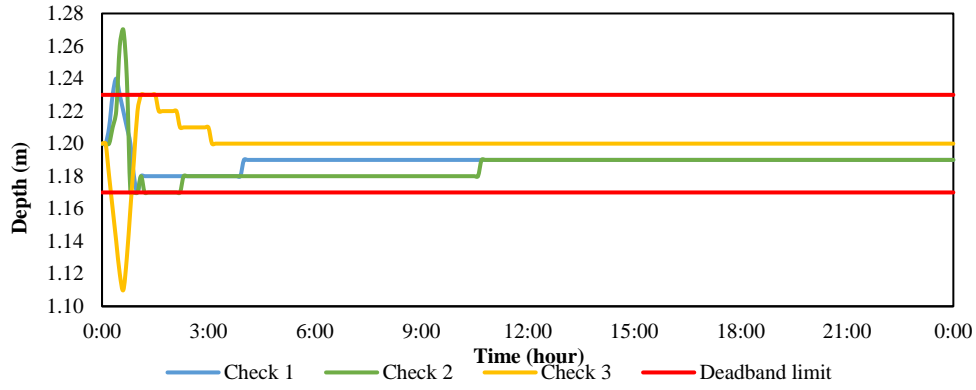


Figure 1. Results for scenario 1 with a deadband of 2.5 percent

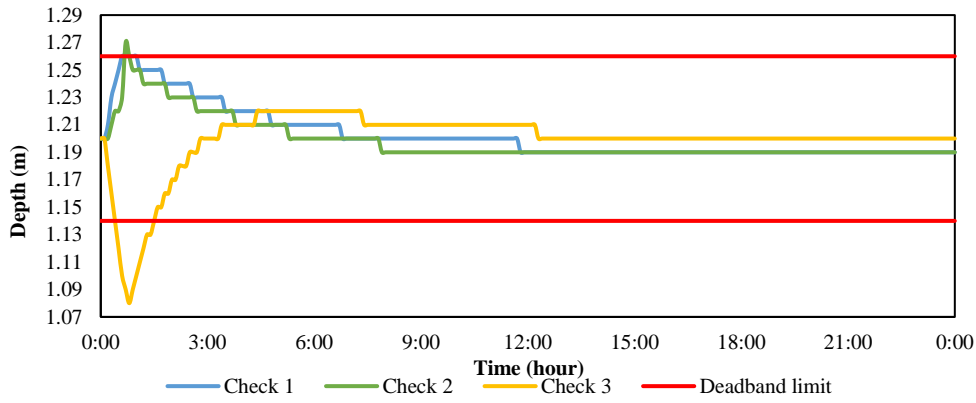


Figure 2. Results for scenario 1 with a deadband of 5 percent

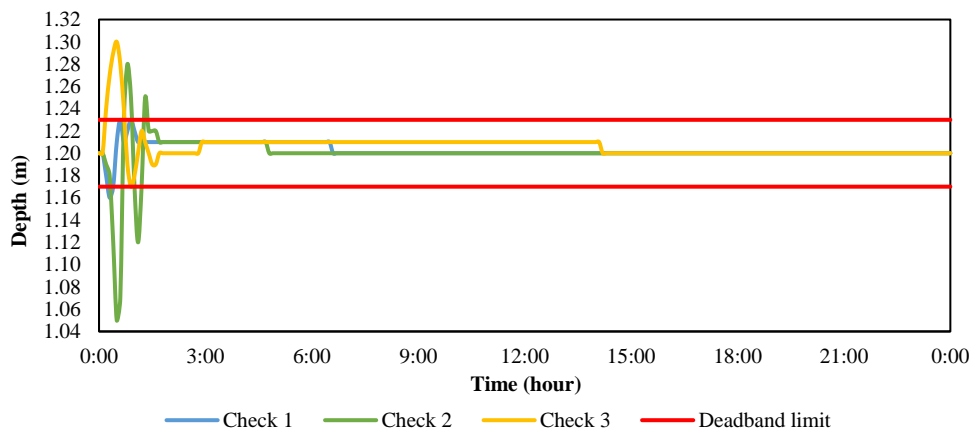


Figure 3. Result for scenario 2 with a deadband of 2.5 percent

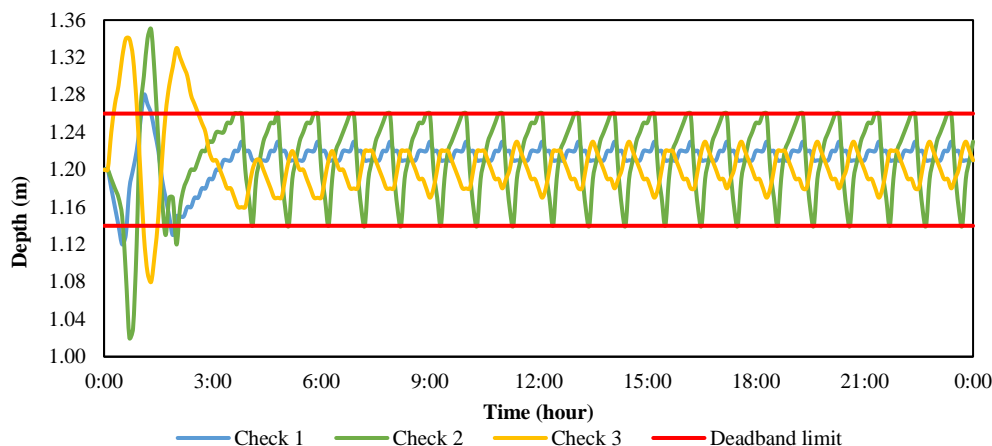


Figure 4. Result for scenario 2 with a deadband of 2.5 percent

Table 5. Performance indicators in scenarios 1 and 2

	Reach	Scenario 1		Scenario 2	
		DB=2.5%	DB=5%	DB=2.5%	DB=5%
MAE (%)	1	3.3	5.0	3.3	6.7
	2	5.8	5.8	12.5	15.0
	3	7.5	10.0	8.3	11.7
IAE (%)	1	1.0	1.1	0.3	1.6
	2	1.3	1.0	0.4	3.2
	3	0.3	0.9	0.6	1.8

رسیدن به حالت پایداری نیز در گزینه‌های کاهش‌ی زمان بیش‌تری را طول کشیده است و حتی برای محدوده مجاز پنج درصد یک حالت ناپایداری بین حد بالا و حد پایین به وجود آمده است که نشان می‌دهد مدام دریچه نسبت به تغییرات عمق، واکنش نشان می‌دهد. البته ذکر این نکته ضروری است که در عمل محدوده مجاز بزرگ‌تری در نظر گرفته می‌شود. مقدار IAE در همه گزینه‌ها بسیار کم می‌باشد که نشان اینست که متوسط تغییرات عمق نسبت به عمق هدف تغییرات کمی داشته است و در نتیجه راندمان بالاست. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که شرط مرزی کنترل سطح آب در HEC-RAS گزینه خوبی برای اعمال تنظیمات می‌باشد، هرچند که تنظیمات به صورت موضعی بوده و به کل تغییرات در کانال توجه نمی‌کند.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، شرط مرزی کنترل سطح آب در HEC-RAS جهت تنظیم سطح آب در سامانه‌های انتقال و توزیع آب در کانال E1R1 از شبکه دز مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت ارزیابی، ابتدا کانال مورد مطالعه در HEC-RAS مدل‌سازی شد و هندسه و شرایط مرزی در آن تعریف شد. سپس، پارامترهای شرط مرزی کنترل ارتفاع در HEC-RAS شامل نرخ باز و بسته شدن دریچه با آزمون و خطا برای دبی‌های ورودی با گام 0.05 مترمکعب در ثانیه تعیین شد. در ادامه، مقادیر مذکور مورد استفاده قرار گرفت و در قالب سناریوهایی ارزیابی شد که با توجه به مقادیر پایین شاخص‌های MAE و IAE، عملکرد قابل است. برای دبی‌های با گام بزرگ‌تر از 0.50 ، نرخ بازشدگی و بسته شدن با توجه به تعداد گام‌ها، جمع شد و سپس به مدل اعمال شد. نتایج نشان داد که شاخص IAE در حدود یک درصد در تمامی گزینه‌های بررسی شده می‌باشد و جز در چند مورد که حداکثر مقدار MAE از 10 درصد بیش‌تر شده و تا 15 درصد می‌رسد، مقدار آن نیز پایین

می‌باشد. جهت بررسی عملکرد آبیگرها می‌توان شاخص‌های ارزیابی عملکرد آبیگرها را نیز مورد بررسی قرار داد. از محدودیت‌های این پژوهش می‌توان گفت که الگوی استفاده‌شده (جمع کردن سرعت‌ها برای دبی‌های بزرگ‌تر) برای گام‌های بزرگ‌تر تغییر دبی، ممکن است نتیجه مطلوبی نداشته باشد؛ از این‌رو، پیشنهاد می‌شود در کانال‌های دیگر این روش به کار گرفته شود. برای غلبه بر این محدودیت، می‌توان سایر شرایط مرزی موجود در مدل HEC-RAS را موردآزمون قرار داد.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Flow hydrograph
2. Stage hydrograph
3. Stage/Flow hydrograph
4. Normal depth
5. Time series gate opening
6. Elevation controlled gates
7. Dead band
8. Gate opening/closing rate
9. Flow changing rate
10. Maximum Absolute Error
11. Integral of Absolute Magnitude Error

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع مورد استفاده

- Arauz, T., Maestre, J. M., Tian, X., & Guan, G. (2020). Design of PI controllers for irrigation canals based on linear matrix inequalities. *Water*, 12(3), 855.
- Barkhordari, S., & Shahdany, S. M. H. (2021). Developing a smart operating system for fairly distribution of irrigation water, based on social, economic, and environmental considerations. *Agricultural Water Management*, 250, 106833.
- Fatemeh, O., Hesam, G., & Shahverdi, K. (2020). Comparing Fuzzy SARSA Learning (FSL) and Ant Colony Optimization (ACO) Algorithms in Water Delivery Scheduling under Water Shortage Conditions. *Irrigation and Drainage Engineering*.
- Hashemy, S., Monem, M., Maestre, J., & Van Overloop, P. (2013). Application of an In-Line Storage Strategy to Improve the Operational Performance of Main Irrigation Canals Using Model Predictive Control. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(8), 635-644.
- Hashemy, S., & Van Overloop, P. (2013). Applying decentralized water level difference control for operation of the Dez main canal under water shortage. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 139(12), 1037-1044.
- Hernández, J., & Merkley, G. (2011). Canal Structure Automation Rules Using an Accuracy-Based Learning Classifier System, a Genetic Algorithm, and a Hydraulic Simulation Model. I: Design. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 137, 1.
- Liu, Y., Yang, T., Zhao, R.-H., Li, Y.-B., Zhao, W.-J., & Ma, X.-Y. (2018). Irrigation Canal System Delivery Scheduling Based on a Particle Swarm Optimization Algorithm. *Water*, 10(9), 1281.
- Lord, S. A., Shahdany, S. M. H., and Roozbahani, A. (2021). Minimization of Operational and Seepage Losses in Agricultural Water Distribution Systems Using the Ant Colony

- Optimization. *Water Resources Management*, 3(35) 846-827.
- Malaterre, P. O., Rogers, D. C., & Schuurmans, J. (1998). Classification of canal control algorithms. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 124(1), 3-10.
- Monem, M. J., & Hoseinzadeh, Z. (2012). Development and Test of a Mathematical Model for Automatic Pivot Weir Based on PID Control. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 43(1), 87-94.
- Shahdany, S. H., Taghvaeian, S., Maestre, J., & Firoozfar, A. (2019). Developing a centralized automatic control system to increase flexibility of water delivery within predictable and unpredictable irrigation water demands. *Computers and Electronics in Agriculture*, 163, 104862.
- Shahverdi, K., & Monem, M. J. (2012). Construction and evaluation of the bival automatic control system for irrigation canals in a laboratory flume. *Irrigation and drainage*, 61(2), 201-207.
- Shahverdi, K., & Monem, M. J. (2015). Application of reinforcement learning algorithm for automation of canal structures. *Irrigation and drainage*, 64(1), 77-84.
- Shahverdi, K., Monem, M. J., & Nili, M. (2016). Fuzzy SARSA learning of operational instructions to schedule water distribution and delivery. *Irrigation and Drainage*, 65(3), 276-284.