



Check Structure Level Regulation in Water Supply Canals using RBO in HEC-RAS

Zahra Nourozrad¹ | Kazem Shahverdi² | Hesam Ghodousi³

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: znourozi.1982@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Water Science Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: k.shahverdi@basu.ac.ir
3. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: ghodousi@znu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 13 March 2023
Received in revised form:
17 April 2023
Accepted: 6 June 2023
Published online: 2 July 2023

Keywords:

Canal Operation Management,
HEC-RAS,
Rules-Based Operation.

ABSTRACT

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 one 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: Nourozrad, Z., Shahverdi, K., & Ghodousi, H. (2023). Check Structure Levels Regulation in Water Supply Canals using RBO in HEC-RAS. *Journal of Water and Irrigation Management*, 13 (2), 341-350.
DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.356700.1062>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.356700.1062>

Publisher: University of Tehran Press.



تنظیم تراز آببندها در کانال‌های آبرسانی با قابلیت RBO در HEC-RAS

زهرا نوروزی راد^۱ | کاظم شاهوردی^۲ | حسام قدوسی^۳۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: znourozi.1982@gmail.com۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: k.shahverdi@basu.ac.ir۳. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: ghodousi@znu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

استراتژی‌های بهره‌برداری در HEC-RAS باعث می‌شود که کاربران بتوانند با استفاده از برخی شرایط مرزی استاندارد مانند شرط مرزی کنترل سطح آب، سازهایی مانند دریچه‌ها را تنظیم کنند. برای استراتژی‌های عملیاتی پیچیده، نیاز به استفاده از یک الگوریتم کنترل وجود دارد که می‌تواند با برنامه‌نویسی یک الگوریتم کنترل در نرم‌افزار برنامه‌نویسی مانند متلب و لینک کردن آن با شبیه‌ساز کانال انجام شود. در این پژوهش، استراتژی بهره‌برداری جدید که در HEC-RAS وجود دارد و کم‌تر شناخته شده است، با استفاده از شرایط مرزی (Rules-based Operation) RBO طراحی شد که در آن کنترلر کلاسیک PID برای تنظیم سازه‌های آب‌بند در کانال EIR1 از شبکه دز در شمال خوزستان کدنویسی شد. بدین منظور مدل HEC-RAS کانال تهیه شد و برای هر سازه آب‌بند، یک کنترل‌کننده PID برای تنظیم عمق آب بالادست طراحی شد. برای ارزیابی مدل طراحی شده از شاخص‌های استاندارد عملکرد استفاده شد. مقدار ضریب کنترل‌گر تناسبی در آببندهای یک تا سه به ترتیب برابر با پنج، ۴/۵ و یک به دست آمد. نتایج نشان داد که حداکثر مقدار شاخص MAE در تمامی گزینه‌های بررسی شده برابر با ۱۳ درصد و حداکثر مقدار شاخص IAE کم‌تر از یک درصد است که بیانگر نتایج مناسب شرط مرزی RBO است. از این‌رو، استفاده از شرط مرزی RBO در کنترل سازه‌ها پیشنهاد می‌شود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۱/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۴/۱۱

کلیدواژه‌ها:

شرط مرزی Rules،
مدیریت بهره‌برداری کانال،
HEC-RAS

استناد: نوروزی راد، زهرا؛ شاهوردی، کاظم و قدوسی، حسام (۱۴۰۲). تنظیم تراز آببندها در کانال‌های آبرسانی با قابلیت RBO در HEC-RAS. نشریه

مدیریت آب و آبیاری، ۱۳ (۲)، ۳۴۱-۳۵۰. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.356700.1062>



۱. مقدمه

مدل‌های هیدرولیکی نقش اساسی در شبیه‌سازی کانال‌ها، رودخانه‌ها، مخازن، سازه‌های مختلف و ... ایفا می‌کنند. برخی از نرم‌افزارهای هیدرولیک تخصصی که تاکنون توسعه یافته‌اند شامل HEC-RAS^۱، SWMM^۲، SIC^۳، SOBEK و ICSS^۴ می‌باشد که شکل کامل معادلات سنت ونانت (SVE)^۵ را حل می‌کنند.

به‌طور کلی، عمده الگوریتم‌های کنترل مورد استفاده در کانال‌ها شامل روش‌های ساده و کلاسیک مانند PID^۶، مدل کنترل پیش‌بین یا MPC^۷ و مدل‌های هوشمند مبتنی بر هوش مصنوعی یا AI^۸ می‌باشد. با توجه به این‌که الگوریتم‌های بهینه‌سازی و کنترل در زبان‌های برنامه‌نویسی مانند متلب و فرترن توسعه یافته‌اند که قابلیت تلفیق با مدل‌های غیرخطی فوق را ندارند، برخی مدل‌های دیگر توسعه یافته‌اند که شکل ساده یا تقریبی معادلات سنت ونانت را حل می‌کنند و قابلیت تلفیق را دارند. از شکل ساده‌شده معادلات سنت ونانت می‌توان روش‌های صریح (Bonet et al., 2017) و روش‌های ضمنی با الگوی پرایزمن (Figueiredo et al., 2013) و از مدل‌های تقریبی نیز می‌توان از مدل رزونانس یکپارچه (Van Overloop et al., 2014). مدل داده محور مبتنی بر شبکه‌های عصبی، سیستم‌های فازی، سیستم‌های خطی و روش‌های جستجوی الگو (Herrera et al., 2013; Tavares et al., 2013) را نام برد.

روش PID یکی از ساده‌ترین روش‌ها می‌باشد که با دریافت ورودی و مقایسه آن با مقدار هدف، خروجی عمل کنترل را محاسبه می‌کند که در پژوهش‌های مختلف برای کنترل یک دریچه کشویی در فلوم (Shahverdi and Monem, 2012)، در تلفیق با شبیه‌ساز Sobek در کانال شماره یک ASCE (Arauz et al., 2020) و در تلفیق با Sobek برای کنترل کانال (Hashemy and Van Overloop, 2013) توسعه یافته و مورد آزمون و ارزیابی قرار گرفته 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 and Merkle (2011) می‌باشد که در آن از هوش مصنوعی جهت خودکارسازی کانال‌ها استفاده شد. در مطالعه Shahverdi and Monem (2015)، از روش هوش مصنوعی جهت خودکارسازی کنترل سطح آب در یک کانال کوچک آزمایشگاهی در تلفیق با مدل هیدرودینامیک استفاده شد. در پژوهش Shahverdi et al. (2016)، از روش مبتنی بر هوش مصنوعی یعنی روش یادگیری تقویتی (Reinforcement Learning) RL برای برنامه‌ریزی تحویل و توزیع آب استفاده شد.

HEC-RAS یک مدل هیدرولیک کاربردی در زمینه مهندسی آب است که به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. با تعریف مدل‌های هندسی و هیدرولیکی، HEC-RAS می‌تواند جریان‌های پایدار و ناپایدار و جریان‌های متغیر تدریجی را تحت شرایط جریان زیربحرانی، فوق بحرانی و مختلط شبیه‌سازی کند. پروفیل‌های سطح آب را در مقاطع با حل معادله انرژی با روش تکراری گام به گام استاندارد محاسبه می‌کند (Daneshfaraz et al., 2019). شرایط مختلف و شناخته‌شده مرزی در HEC-RAS وجود دارد که برای اعمال به سازه‌های مختلف، می‌توان از آن‌ها استفاده کرد. یکی از شرایط مرزی پیشرفته، شرط مرزی کنترل ارتفاع سطح آب^۹ است که برای کنترل سازه‌های آب‌بند در کانال EIR1 مورد استفاده قرار گرفته و ارزیابی شده است (Mollazeynali and Shahverdi, 2022). در مطالعه فوق، نرخ باز و بسته‌شدن دریچه‌ها با رسیدن مقدار بازشدگی دریچه به یک آستانه مشخص، با آزمون و خطا تعیین شد. در گام‌های بزرگ تغییرات، روش تجمیع مقدار بازشدگی‌های محاسبه‌شده، با نرخ‌های یادشده، مورد استفاده قرار گرفت و به دریچه‌ها اعمال شد. نتایج نشان داد که شرط مرزی مذکور قابلیت خوبی در کنترل سطح آب در مقابل تغییرات مختلف دارد. با وجود شرط مرزی کنترل ارتفاع و عملکرد مناسب آن، روش‌های بهره‌برداري پیشرفته‌تری نیز در HEC-RAS وجود دارد که شرط مرزی Rules یا RBO^{۱۰} نام دارد که تاکنون مورد استفاده قرار نگرفته است.

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. در مطالعات قبلی، شرط مرزی نسبتاً ساده کنترل ارتفاع مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. هدف از این پژوهش طراحی یک استراتژی پیشرفته و کدنویسی الگوریتم PID در شرط مرزی RBO است که به مهندسان اجازه می‌دهد، کنترل جریان را بدون تلفیق با سایر زبان‌های برنامه‌نویسی انجام دهند. برای بررسی عملکرد آن و تثبیت عمق آب در عمق هدف در بالادست سازه‌های آب‌بند، کانال EIR1 شبکه دز در شمال خوزستان به‌عنوان مطالعه موردی استفاده شد. این اولین پژوهشی است که در آن یک کنترلر در RBO در HEC-RAS کدنویسی شده و ارزیابی می‌شود.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. کنترلر PID

یکی از روش‌های ساده و رایج کنترل، کنترلر PID است. پس از دریافت ورودی‌ها و مقایسه آن‌ها با نقطه تنظیم مربوطه، خروجی‌ها (تنظیم بازشوندگی‌های دریاچه‌های آب‌بند در این پژوهش)، مقدار خروجی را با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌کند.

$$u(kT) = u(kT - T) + k_1 e(kT) + k_2 e(kT - T) + k_3 e(kT - 2T) \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن، $u(kT)$ مقدار بازشدگی دریاچه در گام زمانی کنونی می‌باشد که بر روی دریاچه‌ها اعمال می‌شود، $u(kT - T)$ مقدار بازشدگی دریاچه در گام زمانی قبلی، $e(kT)$ خطای سطح آب در گام زمانی کنونی، $e(kT - T)$ خطای سطح آب در گام زمانی قبلی، $e(kT - 2T)$ خطای سطح آب در دو گام زمانی قبلی، T گام زمانی و k_1 ، k_2 و k_3 ثابت‌هایی هستند که به ترتیب طبق روابط (۲) تا (۴) محاسبه می‌شوند.

$$k_1 = k_p \left(1 + \frac{k_d}{T} \right) \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$k_2 = -k_p \left(1 + 2 \left(\frac{k_d}{T} \right) - \frac{T}{k_i} \right) \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$k_3 = k_p \left(\frac{k_d}{k_i} \right) \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن، k_p ، k_i و k_d ضرایب تناسبی، انتگرالی و دیفرانسیلی منطق PID می‌باشند. گام زمانی محاسبات معمولاً برابر با ۰/۰۱ ساعت در نظر گرفته می‌شود.

۲-۲. شرط مرزی RBO

شرط مرزی RBO در HEC-RAS برای سازه‌های آب‌بند و آبیگر قابل استفاده است که در آن می‌توان برنامه‌نویسی انجام داد. در شکل (۱)، پنجره مربوط به شرط مرزی RBO که الگوریتم PID در آن کدنویسی شده است، نشان داده شده است. با توجه به شکل، چهار کادر متمایز در این شرط مرزی وجود دارد؛ ۱- توضیحات دلخواهی که می‌توان اضافه کرد، ۲- پارامترهای دریاچه شامل نرخ باز/ بستن دریاچه تحت کنترل، حداکثر، حداقل بازشدگی، ۳- بازشدگی اولیه و ۴- فضای کار برای نوشتن کد مربوط به الگوریتم مورد نظر که در این پژوهش، الگوریتم PID است. در هر گام زمانی شبیه‌سازی، تمامی دستورات نوشته شده از بالا به پایین اجرا می‌شوند.

برای کدنویسی، عملگرهای مختلفی در این شرط مرزی وجود دارد؛ ۱- عملگر ایجاد توضیحات^{۱۱} برای افزودن متن‌های اختیاری، ۲- عملگر ایجاد متغیر جدید^{۱۲} برای تعریف متغیرهای مورد نیاز و مقدار آن‌ها جهت استفاده در طول

برنامه، ۳- عملگر دریافت مقادیر شبیه‌سازی^{۱۳} جهت استفاده در محاسبات مثلاً محاسبه مقدار بازشدگی دریچه با الگوریتم PID، ۴- عملگر اعمال تنظیمات بهره‌برداری^{۱۴} جهت اعمال تنظیمات دریچه‌ها و ۵- عملگرهای شرطی^{۱۵} جهت استفاده در دستورات اگر-آنگاه. لازم به ذکر است که کدهای جداگانه برای هر دریچه آب‌بند یا آبگیر باید نوشته شود، به این معنی که کنترل‌کننده توسعه‌یافته در HEC-RAS یک کنترل‌کننده غیرمتمرکز است. البته تحقیقات پیش‌تری در این زمینه موردنیاز است.

در این پژوهش، حداقل بازشدگی دریچه‌های آب‌بند ۰/۰۵ متر در نظر گرفته شد. بازشدگی دریچه‌ها در شرایط اولیه با توجه به پارامترهای دریچه مانند دبی عبوری، عرض دریچه، ارتفاع آب و ضریب تخلیه و با استفاده از رابطه مربوطه محاسبه شد و سپس به‌طور دقیق‌تر با سعی و خطا در داخل مدل HEC-RAS تعیین می‌شود. لازم به ذکر است که مقادیر مختلفی از تغییرات محدوده مجاز^{۱۶} از یک درصد تا ۲۰ درصد در نظر گرفته شده و مطالعه گردیده است.

Rule Operations

Description:

Gate Parameters					
Location	Open Rate (m/min)	Close Rate (m/min)	Max Opening	Min Opening	Initial Opening
1 Gate #1			0.75	0.05	0.285

Summary of Variable Initializations:

User Variable	Description	Initial Value
1		

Rule Operations

row	Operation
1	! Used Variable
2	'WS EL 0' = Cross Sections:WS Elevation(DEZ,E1R1,183.05,Value at previous time step)
3	'WS EL -1' = Cross Sections:WS Elevation(DEZ,E1R1,183.05,Value at specified lag,0.01666)
4	'WS EL -2' = Cross Sections:WS Elevation(DEZ,E1R1,183.05,Value at specified lag,0.025)
5	'u(KT-T)' = Inline Structures:Gate.Opening(DEZ,E1R1,183.01,Gate #1,Value at previous time...
6	Real 'Target Elevation' (Initial Value = 151.52)
7	Real 'Kp' (Initial Value = 5)
8	Real 'Kt' (Initial Value = 0.001)
9	Real 'Kd' (Initial Value = 0.0001)
10	! Controlling Gate With PID
11	'K1' = ((1) + (120.48 * 'Kd')) * ('Kp')
12	'K2' = (((1) + (240.96 * 'Kd')) - (0.0083 * 'Kt'^(1))) * ('Kp')
13	'K3' = ('Kd' / 'Kt') * 'Kp'
14	'e(KT)' = 'WS EL 0' - 'Target Elevation'
15	'e(KT-T)' = 'WS EL -1' - 'Target Elevation'
16	'e(KT-2T)' = 'WS EL -2' - 'Target Elevation'
17	'Term1' = 'u(KT-T)'
18	'Term2' = 'K1' * 'e(KT)'
19	'Term3' = -1 * 'K2' * 'e(KT-T)'
20	'Term4' = 'K3' * 'e(KT-2T)'
21	'u(KT)' = (('Term1' + 'Term2') + [not set]) + [not set]
22	Gate.Opening(Gate #1) = 'u(KT)'
23	! End Of Operation

Enter/Edit Rule Operations... OK Cancel

Figure 1. RBO boundary condition in HEC-RAS.

۲-۳. کانال E1R1

کانال E1R1، با سه آب‌بند و شش آبگیر با دریچه‌های کشویی، از شبکه آبیاری دز واقع در شمال خوزستان به‌عنوان مطالعه موردی در این مطالعه استفاده شد که دارای ۲۸۳۰/۵ متر طول و مقطع دوزنقه‌ای با پوشش بتنی می‌باشد. عرض

کف ۱-۱/۵ متر، شیب طولی ۰/۰۰۱۲ تا ۰/۰۰۱۵ متغیر بوده و شیب جانبی آن، 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 مورد آزمون و ارزیابی قرار گرفت. 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. آزمون و ارزیابی

برای بررسی عملکرد سیستم توسعه‌یافته در این پژوهش، شش سناریو S1-S6 شامل افزایش و کاهش دبی با تحویل دبی‌های متفاوت به آبیگرها بررسی شد که خلاصه سناریوها در جدول (۱) نشان داده شده است. سناریوهای (۱)، (۳) و (۵) سناریوهای افزایش دبی و سناریوهای (۲)، (۴) و (۶) سناریوهای کاهش دبی می‌باشند. به‌عنوان مثال، در گزینه یک که افزایش جریان ورودی رخ می‌دهد، در وضعیت اول دبی ورودی به کانال و دبی خروجی از آن برابر با یک مترمکعب در ثانیه است که در وضعیت دوم به ۱/۲ مترمکعب در ثانیه افزایش پیدا می‌کند. تمامی آبیگرها در این سناریو در وضعیت اول و دوم بسته می‌باشند. در این جدول وضعیت اول شرایط پایدار قبل از انجام عملیات در آبیگرها است و وضعیت دوم به شرایط پایدار بعد از انجام عملیات بهره‌برداری در آبیگرها و کنترل سازه‌ها با شرط مرزی RBO اشاره دارد. ارتفاع سطح آب در بالادست آب‌بندها در شرایط نرمال برابر با ۱/۲ متر در حالت ماندگار می‌باشد. لازم به ذکر است که آبیگرهای یک و دو در تمامی سناریوها و تمامی وضعیت‌ها بسته بوده و تحویل دبی انجام نمی‌دهند.

Table 1. Flow of turnouts (TO) in different scenarios (m3/s).

Scenario	Steady-state	inflow	TO3	TO4	TO5	TO6	outflow
S1	Initial	1	0	0	0	0	1
	Second	1.2	0	0	0	0	1.2
S2	Initial	1.5	0	0	0	0	1.5
	Second	1.2	0	0	0	0	1.2
S3	Initial	1	0	0	0.1	0.1	0.8
	Second	1.2	0	0	0.2	0.2	0.8
S4	Initial	1.5	0	0	0.2	0.2	1.1
	Second	1.2	0	0	0.05	0.05	1.1
S5	Initial	1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.6
	Second	1.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.6
S6	Initial	1.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.7
	Second	1.2	0.2	0.2	0.05	0.05	0.7

۲-۵. شاخص‌های ارزیابی

از شاخص‌های مبتنی بر عمق شامل شاخص خطای حداکثر مطلق (MAE)^{۱۷} که نشان‌دهنده حداکثر انحراف عمق از عمق هدف در طول شبیه‌سازی است و شاخص خطای مطلق تجمعی (IAE)^{۱۸} (Clemmens *et al.*, 1998)، که بیانگر متوسط انحراف عمق آب از عمق هدف در طول شبیه‌سازی می‌باشد، استفاده شده است که به‌ترتیب به‌صورت روابط (۵) و (۶) تعریف می‌شوند.

$$MAE = \frac{\max (|Y_{target} - Y|)}{Y_{target}} \quad \text{رابطه ۵}$$

$$IAE = \frac{\sum_{T=0}^D (|Y_{target} - Y|)}{Y_{target}} \quad \text{رابطه ۶}$$

در این روابط، D طول دوره بهره‌برداری، Y عمق آب در طول شبیه‌سازی و Y_{target} عمق هدف می‌باشد. مقادیر ایده‌آل برای هر دو شاخص خطای مطلق حداکثر و خطای مطلق تجمعی صفر است.

۳. نتایج و بحث

در این پژوهش، شرط مرزی RBO به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین گزینه‌های بهره‌برداری موردتوجه قرار گرفت و الگوریتم PID برای کنترل سطح آب در بالادست آب‌بندهای کانال EIR1 در آن کدنویسی شد و تحت سناریوهای مختلف افزایشی و کاهش‌ی مورد آزمون و ارزیابی قرار گرفت.

قبل از انجام فرایند کنترل، مقادیر پارامترهای الگوریتم PID با آزمون و خطا استخراج شد و مقادیر k_d و k_i ، k_p به‌ترتیب برابر با ۵، ۴/۵ و ۱ به‌دست آمد. با استفاده از این مقادیر سیستم با کم‌ترین خطا و در سریع‌ترین زمان ممکن، تغییرات عمق را در عمق هدف تثبیت می‌کرد. لازم به ذکر است که کنترل‌گر PID در اولین بازه از کانال بهتر از سایر بازه‌ها عمل می‌کرد، زیرا سازه آب‌بند بازه اول از بازه‌های پایین‌دست کمتر اثرپذیری داشت. این در حالی است که آب‌بند سوم در بازه آخر اثرپذیری بیش‌تری از پایین‌دست خود دارد، زیرا یک سرریز در پایین‌دست تعبیه شده است که به‌علت ثابت‌بودن ارتفاع آب و نزدیک‌بودن به آب‌بند سه، عمق تقریباً ثابتی را در دبی‌های مختلف به‌وجود می‌آورد. با این حال، مقادیر فوق‌الذکر به‌عنوان مقادیر نهایی پذیرفته شد و در همه گزینه‌های ارزیابی استفاده گردید.

در شکل (۲)، خطای عمق به‌دست‌آمده در سناریوهای افزایش دبی و در شکل (۳)، خطای عمق به‌دست‌آمده در سناریوهای کاهش دبی ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در همه سناریوها، عمق آب با آهنگ همگرا در مقدار هدف تثبیت شده است و مقدار خطای نهایی برابر با صفر به‌دست آمده است. البته، در سناریوهای (۱) و (۲) تغییرات دبی و در نتیجه تغییرات بازشدگی بزرگ‌تری ایجاد می‌شود، زیرا به‌علت بسته‌بودن تمام آبیگرها، کل افزایش یا کاهش دبی در تمامی آب‌بندها اثر می‌گذارد و مقدار دبی ورودی از همه آب‌بندها عبور می‌کند. با این حال، مقدار خطا در سناریوی (۲) نسبت به سناریوی (۱) بیش‌تر است، زیرا 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 سازه‌ها می‌رسد. در صورتی که شکل و سرعت موج منفی ناشی از کاهش دبی، ناپایدار است که باعث می‌شود تغییرات در بازه زمانی طولانی‌تری نسبت به موج مثبت به محل سازه آب‌بند برسد در نتیجه، انطباق دریاچه با شرایط جریان پیچیدگی نسبتاً بیش‌تری دارد.

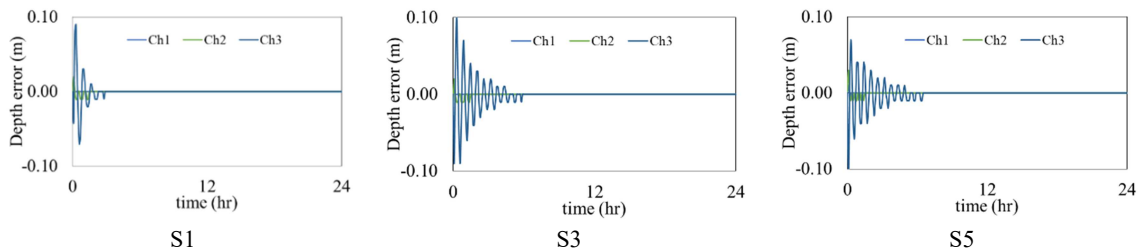


Figure 2. Depth errors upstream of check structures (Ch) under increasing scenarios (S1, S3, and S5).

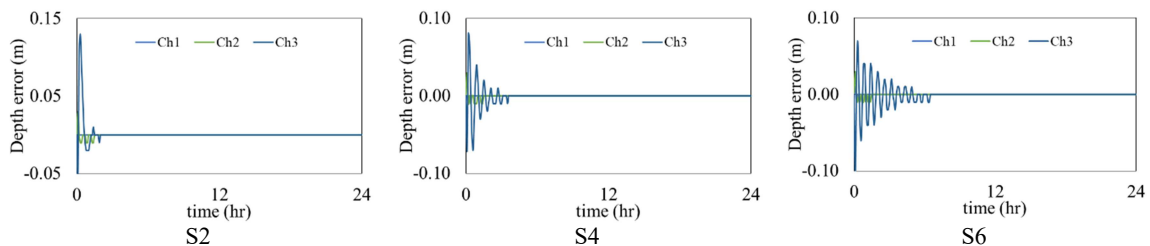


Figure 3. Depth errors upstream of check structures (Ch) under decreasing scenarios (S2, S4, and S6).

همان‌طور که مشاهده می‌شود، خطای عمق در آب‌بند (۱) بسیار کم می‌باشد و این نشان می‌دهد که الگوریتم PID در پیچه‌های مستقل را به سرعت و با کم‌ترین خطا کنترل می‌کند، اما در پیچه‌هایی که تحت تأثیر بالادست یا پایین‌دست می‌باشند، تغییرات عمق در آن‌ها نیز بیش‌تر می‌باشد. این موضوع در جدول‌های (۲) و (۳) نیز که به ترتیب مقادیر شاخص‌های MAE و IAE را نشان می‌دهند، قابل مشاهده است. در آب‌بند یک در تمامی سناریوها مقدار MAE حداکثر برابر با دو درصد و در سناریوی (۲) است، در صورتی که برای همین سناریو در آب‌بندهای (۲) و (۳) برابر با سه و ۱۳ درصد است. علت بالابودن MAE در آب‌بند (۳)، وجود سرریز بعد از آن می‌باشد.

Table 2. MAE performance indicators (%).

	Ch1	Ch2	Ch3
S1	1	2	9
S2	2	3	13
S3	1	2	10
S4	0	3	8
S5	1	2	6
S6	1	3	7

Table 3. IAE performance indicators (%).

	Ch1	Ch2	Ch3
S1	0.00	0.04	0.25
S2	0.01	0.04	0.22
S3	0.00	0.04	0.51
S4	0.00	0.04	0.28
S5	0.00	0.05	0.52
S6	0.01	0.04	0.43

تغییرات IAE نیز مشابه با تغییرات MAE است و در آب‌بند سه بیش‌تر از سایر آب‌بندها در تمامی سناریوها است. بیش‌ترین مقدار آن نیز برابر با ۰/۵۲ درصد است. مقدار IAE در همه گزینه‌ها بسیار کم می‌باشد که نشان این است که متوسط تغییرات عمق نسبت به عمق هدف تغییرات کمی داشته است و در نتیجه راندمان بالاست.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، شرط مرزی RBO در HEC-RAS جهت تنظیم سطح آب در بالادست سازه‌های آب‌بند در کانال E1R1 از شبکه دز واقع در شمال خوزستان ارزیابی استفاده شد. در این شرط مرزی، الگوریتم PID به‌عنوان کنترل‌گر غیرمتمرکز کدنویسی شد و مدلی تهیه شد که هم‌زمان شبیه‌ساز و کنترل‌گر می‌باشد بدون این که تلفیقی بین دو برنامه متفاوت صورت بگیرد. مقادیر ضرایب تناسبی برابر با پنج، ۴/۵ و یک در آب‌بندهای یک و مقادیر ضرایب انتگرالی و دیفرانسیلی در همه آب‌بندها برابر با ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۰۱ به‌دست آمد. همچنین منحنی‌های عمق نشان داد که تغییرات عمق با آهنگ ملایمی به سمت عمق هدف میل می‌کند، به‌طوری که متوسط تغییرات عمق کم‌تر از یک درصد به‌دست آمد. تغییرات حداکثر خطای عمق نیز نشان داد که بیش‌تر مقدار خطا برابر با ۱۳ درصد است. نتایج نشانگر عملکرد مناسب روش مورد استفاده در این پژوهش است که با سهولت زیادی قابل انجام است. نکته مهمی که در پژوهش‌های بعدی باید بررسی شود امکان‌پذیری استفاده از الگوریتم‌های متمرکز و کنترل مرکزی در شرط مرزی RBO است که به علاقه‌مندان پیشنهاد می‌شود.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Hydrologic Engineering Center-River Analysis System
2. Storm Water Management Model
3. Simulation of Irrigation Canals
4. Irrigation Canal System Simulation
5. Saint-Venant Equations
6. Proportional- Integral-Derivative
7. Model Predictive Control
8. Artificial Intelligence
9. Elevation controlled gates
10. Rules-Based Operation
11. Comment operator
12. New Variable
13. Get Simulation Value
14. Set Operational Parameter
15. Branch operator
16. Dead band
17. Maximum Absolute Error
18. Integral of Absolute Magnitude Error

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی بین نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- 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.
- Bonet, E., Gómez, M., Yubero, M., & Fernández-Francos, J. (2017). GOROSOBO: an overall control diagram to improve the efficiency of water transport systems in real time. *Journal of Hydroinformatics*, 19(3), 364-384.
- Clemmens, A. J., Kacerek, T. F., Grawitz, B., & Schuurmans, W. (1998). Test cases for canal control algorithms. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 124(1), 23-30.
- Daneshfaraz, R., Dasineh, M., & Ghaderi, A. (2019). Evaluation of Scour Depth around Bridge Piers with HEC-RAS (Case study: Bridge of Simineh Rood, Miandoab, Iran). *Environment and Water Engineering*, 5(2), 91-102.
- Figueiredo, J., Botto, M. A., & Rijo, M. (2013). SCADA system with predictive controller applied to irrigation canals. *Control Engineering Practice*, 21(6), 870-886.
- 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.
- Herrera, J., Ibeas, A., & de la Sen, M. (2013). Identification and control of integrative MIMO systems using pattern search algorithms: An application to irrigation channels. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(1), 334-346.

- Mollazeynali, H., & shahverdi, k. (2022). Application and Evaluation of Elevation Controlled Gates Boundary Condition in HEC-RAS in Water Conveyance and Distribution Systems. *Water and Irrigation Management*, 12(4), 847-858. (In Persian)
- 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.
- Tavares, I., Borges, J., Mendes, M. J., & Botto, M. A. (2013). Assessment of data-driven modeling strategies for water delivery canals. *Neural Computing and Applications*, 23(3), 625-633.
- van Overloop, P.-J., Horváth, K., & Aydin, B. E. (2014). Model predictive control based on an integrator resonance model applied to an open water channel. *Control Engineering Practice*, 27, 54-60.