



Hybrid control framework to improve stability and efficiency in irrigation canals under various conditions

Kazem Shahverdi¹ | Majid Ghaniee Zarch² | Reyhaneh Loni³

1. Corresponding Author, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: k.shahverdi@basu.ac.ir
2. Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Yazd University, Yazd, Iran. E-mail: m.ghaniee@yazd.ac.ir
3. Faculty of Governance, Faculties of Management, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: rloni@ut.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 22 September 2025

Received in revised form

24 October 2025

Accepted 4 December 2025

Published online 17 March 2026

Keywords:

Evaluation

Canal

Integrator-Delay Model

Simulation

ABSTRACT

Optimizing water management in irrigation networks, especially in arid and semi-arid regions, is of critical importance. This research aimed to design an intelligent control system for surface water conveyance canals. To this end, an integrator-delay linear model was first developed, capable of simulating the canal's hydraulic behavior. Subsequently, an innovative hybrid control system based on the integration of a classic PID controller and a continuous reinforcement learning agent was designed and implemented. The controller gains were set to 0.209, 0.243, and 0.086 via manual tuning, and to 1.69, 0.055, and 0.086 respectively when tuned by reinforcement learning. Performance evaluation under scenarios with 10%, 20%, and 30% flow changes demonstrated that the RL-tuned controller has significantly superior stability and accuracy compared to the manually tuned controller. The most important indicator of this superiority was a five-fold reduction in the maximum depth error for the 10% input change. The proposed system represents an effective step towards intelligent water management in irrigation canals; however, its application under critical conditions requires integration with more complex non-linear models, which is suggested for future research.

Cite this article: Shahverdi, K., Ghaniee Zarch, M., & Loni, R. (2026). Hybrid control framework to improve stability and efficiency in irrigation canals under various conditions. *Journal of Water and Irrigation Management*, 15 (4), 827-842. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.402879.1260>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.402879.1260>

Publisher: University of Tehran Press.



ارائه چارچوب کنترل هیبرید برای افزایش پایداری و کارایی در کانال‌های آبیاری تحت شرایط مختلف

کاظم شاهوردی^۱ | مجید غنی‌ئی زارچ^۲ | ریحانه لونی^۳

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

۲. گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران. رایانامه: m.ghaniee@yazd.ac.ir

۳. دانشکده حکمرانی، دانشکده‌گان مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: rioni@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

بهبودسازی مدیریت آب در شبکه‌های آبیاری به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک از اهمیت حیاتی برخوردار است. پژوهش حاضر با هدف طراحی یک سیستم کنترل هوشمند برای کانال‌های انتقال آب سطحی انجام شد. برای این منظور، ابتدا یک مدل خطی انتگرالی-تأخیری توسعه یافت که قابلیت شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی کانال را دارا می‌باشد. سپس، یک سیستم کنترل هیبریدی نوآورانه مبتنی بر تلفیق کنترلر کلاسیک و عامل یادگیری تقویتی پیوسته طراحی و پیاده‌سازی گردید. مقادیر ضرایب کنترلر با تنظیم دستی به‌ترتیب برابر با ۰/۲۰۹، ۰/۲۴۳ و ۰/۰۸۶ و با تنظیم با یادگیری تقویتی به‌ترتیب برابر با ۱/۶۹، ۰/۰۵۵ و ۰/۰۸۶ می‌باشد. ارزیابی عملکرد سیستم در سناریوهای با تغییرات ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد دبی نشان داد که کنترلر تنظیم‌شده با یادگیری تقویتی در مقایسه با کنترلر تنظیم دستی، برتری قابل‌توجهی در ثبات و دقت عملکرد دارد. مهم‌ترین شاخص‌های این برتری شامل کاهش پنج برابری حداکثر خطای عمق در تغییر ۱۰ درصد ورودی بود. سیستم پیشنهادی گامی مؤثر در جهت هوشمندسازی مدیریت آب در کانال‌های آبیاری است، اما کاربرد آن در شرایط بحرانی نیازمند تلفیق با مدل‌های غیرخطی پیچیده‌تر می‌باشد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۲۶

کلیدواژه‌ها:

ارزیابی

شبیه‌سازی

کانال

مدل انتگرالی-تأخیری

استناد: شاهوردی، کاظم؛ غنی‌ئی زارچ، مجید و لونی، ریحانه (۱۴۰۴). ارائه چارچوب کنترل هیبرید برای افزایش پایداری و کارایی در کانال‌های آبیاری

تحت شرایط مختلف. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۵ (۴)، ۸۲۷-۸۴۲. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.402879.1260>



۱. مقدمه

با توجه به بحران روزافزون آب در جهان و ایران که ناشی از رشد جمعیت، تغییر اقلیم و توسعه کشاورزی است، بهینه‌سازی مصرف آب در بخش کشاورزی که بخش عمده‌ای از منابع آبی را مصرف می‌کند، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. اگرچه اقدامات مؤثری مانند توسعه آبیاری بارانی (با راندمان ۷۰ درصد) و قطره‌ای (با راندمان ۹۰ درصد) در سطح مزارع انجام شده است، اما راندمان پایین شبکه‌های انتقال آب همچنان چالش بزرگی محسوب می‌شود. شبکه‌های آبیاری به‌عنوان شریان‌های حیاتی بخش کشاورزی، نقش تعیین‌کننده‌ای در مدیریت بهینه منابع آب دارند. روش‌های توزیع آب شامل سه شیوه اصلی گردشی (با کم‌ترین انعطاف‌پذیری)، برحسب تمایل (با حداکثر انعطاف) و برحسب درخواست (ترکیبی از انعطاف و عملی بودن) می‌شود که هر کدام مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند (Shahverdi and Maestre, 2022). مطالعات نشان می‌دهد روش‌های سنتی مانند سیستم گردشی که در بسیاری از شبکه‌های ایران رایج است، به دلیل عدم تطابق با نیاز واقعی مزارع، منجر به تلفات قابل توجه آب و کاهش راندمان می‌شود. در مقابل، روش‌های نوین مانند کنترل پیش‌بینی تطبیقی که براساس مدل‌های ریاضی مانند مدل انتگرالی تأخیری عمل می‌کند، قادرند خطای سطح آب را تا ۶۰ درصد کاهش داده و دقت تحویل آب را بهبود بخشند.

استفاده از مدل‌های غیرخطی شبیه‌سازی کانال مبتنی بر معادلات سنت-ونانت، که قادر به پیش‌بینی دقیق جریان هستند، گسترده می‌باشد (Zahran et al., 2024, Shahverdi et al., 2024, Shahverdi and Maestre, 2023, Khaeez and Shahdany, 2021). اما، وابستگی به داده‌های پایه مانند هندسه و پارامترهای مدل، همراه با هزینه محاسباتی بالا، از محدودیت‌های اساسی آن‌ها محسوب می‌شود. در طراحی کنترلرها، استفاده از مدل‌های خطی با توجه به سهولت کاربرد و تلفیق با کنترلرها، مرسوم می‌باشد. مدل تأخیری-انتگرال به‌طور گسترده در طراحی کنترلرهای پیشرفته برای پروژه‌های اتوماسیون کانال‌های آبیاری استفاده شده است. این مدل فرض می‌کند که تمام خروجی‌های آب در پایین‌دست‌ترین نقطه هر حوضچه کانال متمرکز شده‌اند.

در پژوهشی یک سیستم کنترل پیش‌بین برای کانال رودشت جهت بررسی توزیع آب در شرایط کمبود آب توسعه یافت. مدل هیدرولیکی انتگرالی-تأخیری به کار گرفته شد. نتایج نشان داد شاخص عدالت در شرایط عادی به ۱/۲۱ درصد و در نوسانات شدید به ۴/۳۳ درصد رسید، اما در شرایط کم‌آبی عملکرد مطلوب حاصل نشد (Yaltaghian Khiabani, 2018). در پژوهشی، یک الگوریتم هوشمند جدید به نام Double Q-PI برای مدیریت آب در کانال‌های آبیاری از طریق کنترل عمق آب توسعه یافت. این الگوریتم با ترکیب یادگیری تقویتی گسسته Q و یک ماتریس به‌روزرسانی دوگانه، پارامترهای کنترلر تناسبی-انتگرالی را برای تنظیم دریاچه‌های کنترل در کانال‌های آبیاری بهینه می‌کند. در این پژوهش، از مدل خطی و غیرخطی کانال استفاده شد. مدل فضای حالت توسعه‌یافته در محدوده تغییرات ۲۰ درصد بازشدگی دریاچه‌ها، تطابق خوبی بین مدل خطی و غیرخطی نشان داد، اما برای تغییرات شدیدتر نیاز به مدل‌سازی دقیق‌تر است. بیش‌ترین خطا ۱۱/۶ درصد و میانگین خطا ۱۰/۵ درصد بود که نشان‌دهنده عملکرد مطلوب سیستم در تثبیت سطح آب در مقادیر هدف است (Shahverdi et al., 2022).

با توسعه یک مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی انتگرالی-تأخیری، ارزیابی عملکرد شبکه آبیاری آبشار اصفهان انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش شدت کم‌آبی، کارایی سیستم توزیع آب به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد، به طوری که در کمبودهای پنج، ۱۵ و ۳۰ درصدی، شاخص کفایت تحویل آب به ترتیب به ۴۱-۶۹، ۲۹-۹۵ و ۱۹-۶۵ درصد رسید. تحلیل داده‌ها حاکی از آن است که این کاهش کارایی عمدتاً ناشی از محدودیت‌های سیستم کنترل بالادستی، روش‌های سنتی بهره‌برداری دستی و عدم انعطاف‌پذیری سازه‌های تنظیم آب است. نکته قابل توجه این که در شرایط کم‌آبی، تنها

آبگیرهای بالادست قادر به تأمین آب موردنیاز بودند، درحالی که عملکرد آبگیرهای پایین دست به شدت تحت تأثیر قرار گرفت. این یافته‌ها به وضوح نشان می‌دهد که سیستم‌های آبیاری سنتی در برابر تغییرات اقلیمی و شرایط خشک‌سالی آسیب‌پذیر هستند و نیازمند بازنگری اساسی در روش‌های کنترل و مدیریت منابع آب می‌باشند. مطالعه حاضر بر لزوم توسعه سیستم‌های هوشمند کنترل آب و بهینه‌سازی سازه‌های توزیع برای بهبود کارایی شبکه‌های آبیاری در شرایط مختلف تأکید دارد (Barkhordari et al., 2022).

مدل انتگرالی-تأخیری دوگانه اثر تأخیر تغییرات جریان خروجی‌ها را در طول کانال آبیاری در نظر می‌گیرد. برای بررسی اثربخشی این مدل اصلاح‌شده، دو کنترل‌کننده پیش‌بین مبتنی بر مدل مرکزی با مدل‌های مدل انتگرالی-تأخیری و مدل انتگرالی-تأخیری دوگانه طراحی شد و شبیه‌سازی بر روی کانال اصلی سوم سیستم آبیاری ژانگه در جنوب چین انجام شد. دو شاخص عملکردی خطای مجذور عمق بی‌بعد و تغییرات مجذور دبی بی‌بعد برای ارزیابی پایداری به ترتیب سطح آب و دبی استفاده شدند. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از مدل انتگرالی-تأخیری دوگانه مقدار شاخص‌های عملکردی مذکور به ترتیب ۴۶ و ۱۰ درصد نسبت به کاربرد مدل انتگرالی-تأخیری بهبود می‌یابد (Zhu et al., 2023). در پژوهشی، یک الگوریتم کنترل خطی-درجه دوم طراحی و بر روی کانال آزمایشی نونگچانگ اعمال شد. مدل عددی جریان ناپایدار پیش‌بینی‌های رضایت‌بخشی از سطح آب ارائه داد و ضریب همبستگی، خطای میانگین مربعات و خطای مطلق به ترتیب ۰/۹۲۹، ۰/۲۹۳ و ۱۲/۸۶ درصد حاصل شد. این الگوریتم تحت تمام شرایط آزمایشی عملکرد خوبی داشت؛ حداکثر خطای مطلق بین ۳/۶۶ تا ۸/۶۵ درصد بود. سطح آب انحراف کم‌تر از ۰/۰۵ متر داشت و تحویل آب با کفایت ۹۲/۵۱ تا ۹۸/۹۴ درصد بود که نشان‌دهنده عملکرد مناسب می‌باشد (Yang et al., 2023).

در مطالعه‌ای به توسعه یک الگوریتم کنترل خودکار تناسبی-انتگرالی برای بهبود عملکرد کانال اصلی شبکه آبیاری آبشار پرداخته شده است. با استفاده از یک مدل انتگرالی-تأخیری که با داده‌های واقعی کالیبره و اعتبارسنجی شد، یک سیستم کنترل غیرمتمرکز طراحی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که این سیستم تحت شرایط عادی‌ارای خطای حداکثر ۶ تا ۱۸ سانتی‌متر و شاخص‌های MAE، IAE و STE به ترتیب در محدوده ۰/۱۱-۰/۱۴، ۰/۱۳-۰/۱۸ و ۰/۰۰۱-۰/۰۱۱ است و عملکرد مطلوبی دارد. با این حال، در سناریوهای کم‌آبی و کم‌آبی شدید همراه با نوسانات، عملکرد سیستم در بخش‌های پایین دست شبکه نامناسب بوده و خطای حداکثر ۳۵ تا ۴۵ سانتی‌متر و شاخص‌های MAE تا ۰/۱۷۲ و IAE تا ۰/۰۹۹۱ بوده به طوری که توزیع آب در این مناطق به شدت مختل شد (Ahmadi et al., 2024).

برای پیش‌بینی سطح آب در کانال‌های پروژه انتقال آب جنوب به شمال چین روش یادگیری عمیق با مدل انتگرالی-تأخیری تلفیق شد. نتایج نشان داد این مدل به طور میانگین موجب کاهش ۴۵ درصدی خطای حداکثر مطلق ۴۵ درصدی در صد خطای مطلق متوسط و ۴۹ درصدی خطای مربعات میانگین نسبت به مدل‌های موجود شده است (Lei et al., 2025). یک مدل ترکیبی برای توزیع بهینه آب و کنترل عمق آب، برنامه‌های توزیع و زمان‌بندی دریاچه‌ها ارائه شد و در منطقه آبیاری بوجیلی پیاده شد. مدل شبیه‌ساز کار مدل انتگرالی-تأخیری بود. نتایج نشان داد که مدل قادر به کاهش دفعات تنظیم، کمینه‌سازی کمبود/مازاد آب و تضمین پایدار کانال است. نتایج نشان داد سطوح هدف آب در دو سناریو در ۲/۲ متر تثبیت شد و انحرافات کمی در عمق نهایی تثبیت‌شده در برخی سناریوها وجود داشت، به طوری که عمق سطح نهایی آب به جای ۲/۰۲ متر در ۲/۱۲ متر تثبیت شده بود (Zhou et al., 2025).

عمده سامانه‌های روباز انتقال آب در ایران قدیمی هستند و برای رسیدن به عملکرد مطلوب نیاز به نوسازی و مدرن‌سازی دارند. شناخت وضعیت موجود و ارزیابی قبل از نوسازی ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. ارزیابی میدانی سامانه‌های روباز انتقال آب قدیمی، نیازمند زمان و هزینه زیادی است. در نتیجه، باید از مدل‌ها برای این منظور استفاده

شود. استفاده از مدل‌های غیرخطی با توجه به قدیمی بودن و تغییر مشخصات فیزیکی و هندسی کانال با چالش‌هایی همراه است و نیاز به ساده‌سازی‌های زیادی دارد. با این حال، استفاده از مدل‌های خطی به علت عدم نیاز به خصوصیات هندسی کانال مناسب‌تر می‌باشد. ضمن این که، روش‌های یادگیری مورد استفاده تاکنون بیش‌تر روش‌های یادگیری نظارت‌شده و یا یادگیری تقویتی گسسته بوده‌اند که در عمل نیازمند گسسته‌سازی فضای عمل است. به‌منظور طراحی یک سیستم کنترل بهینه برای کانال‌های آبیاری، در این پژوهش یک مدل خطی انتگرالی-تأخیری برای کانال EIR1 در شبکه آبیاری دز توسعه داده شد. جهت ارزیابی کارایی و دقت این مدل در کنترل سطح آب، یک کنترل‌کننده کلاسیک پیاده‌سازی گردید. نوآوری این پژوهش، به‌کارگیری یک چارچوب پیشرفته یادگیری تقویتی پیوسته برای اولین بار، به‌عنوان یکی از روش‌های قدرتمند یادگیری تقویتی پیوسته در فضاهای عمل که در آن نیاز به گسسته‌سازی فضای عمل نیست و منجر به جستجوی پیوسته‌تر و دقیق‌تر می‌شود، برای تنظیم خودکار و بهینه ضرایب کنترلر است. مدل دینامیکی کانال و کل سیستم کنترل، در محیط شبیه‌سازی سیمولینک پیاده‌سازی و مورد تحلیل قرار گرفت.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. مدل‌های غیرخطی و خطی

مدل‌سازی کانال‌های انتقال آب برای بررسی وضعیت کانال در جهت بهینه‌سازی مصرف آب و افزایش بهره‌وری مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای این منظور، بیش‌تر مدل کامل معادلات سنت و نانت شامل معادله مومنوم و معادله پیوستگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما، پیچیدگی حل معادلات، زمان‌بر و پرهزینه بودن محاسبات از محدودیت‌های اصلی آن است. بسته‌های نرم‌افزاری مختلفی برای حل این معادلات وجود دارد. در این پژوهش از نرم‌افزار AICSS^۱ استفاده شده است که مدل هیدرودینامیکی برای شبیه‌سازی جریان در مجاری روباز تحت شرایط مختلف مانند جریان‌های ورودی، هندسه کانال و شرایط مختلف بهره‌برداری است. برای شبیه‌سازی جریان ماندگار و محاسبه پروفیل سطح آب، معادله جریان متغیر تدریجی و برای شبیه‌سازی جریان غیرماندگار، معادلات سنت و نانت را حل می‌کند که معادلات پیوستگی و مومنوم در آن به‌صورت روابط (۱) و (۲) تعریف می‌شوند:

$$\frac{A}{B} \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{V}{B} A_x^y - \frac{1}{B} (p - i) = 0 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial x} + g(s_0 - s_f) + \frac{V}{B} (p - i) = 0 \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن، A سطح مقطع، B عرض سطح آب، V سرعت، x فاصله، t زمان، y عمق، p جریان‌های ورودی، i جریان‌های خروجی، s_0 شیب کانال، s_f شیب اصطکاکی و g شتاب ثقل است. این مدل با گرفتن ورودی‌ها از کاربر در قالب یک فایل متنی، به‌صورت خودکار تمام محاسبات را انجام داده و خروجی‌های موردنظر کاربر را در فایل‌های متنی ذخیره می‌کند (Shahverdi, 2023). پژوهش‌گران مدل‌های ساده‌تر با پارامترهای کم‌تری را برای طراحی کنترل‌گرها براساس معادلات سنت و نانت ارائه کرده‌اند. در پژوهش حاضر، یکی از پرکاربردترین مدل‌های ریاضی ساده‌شده به‌نام مدل انتگرالی-تأخیری یا ID استفاده شده است. این مدل نیاز محاسباتی کم‌تر، زمان شبیه‌سازی کوتاه‌تر داشته و برای سیستم‌های کنترل عملی مناسب‌ترند.

برای تحلیل دینامیک جریان در کانال‌ها، مدل انتگرالی-تأخیری ارائه شده است. این مدل برای کانال‌های طولانی، کم‌عمق و با شیب متوسط عملکرد مطلوبی دارد و قادر است رفتار جریان را با دقت قابل‌قبولی شبیه‌سازی کند. اساس این مدل بر تقسیم هر بازه از کانال به دو بخش اصلی شامل بخش جریان یکنواخت که مشخصه اصلی آن زمان تأخیر (τ)

می‌باشد و بخش منحنی برگشت آب که مشخصه اصلی آن سطح ذخیر (A_s) می‌باشد، استوار است. مقادیر صحیح دو پارامتر زمان تأخیر و سطح ذخیره نقش اساسی در دقت و عملکرد مدل دارند.

در بخش جریان یکنواخت، فرض می‌شود که امواج در جهت پایین دست حرکت می‌کنند و هرگونه تغییر در دبی ورودی در بالادست بازه، باعث ایجاد موجی می‌شود که با تأخیر زمانی متناسب با عمق آب و سرعت موج سینماتیکی به بخش پایین دست می‌رسد. این تأخیر، است. معادله حاکم بر این بخش و معادله تبدیل شده آن با تبدیل لاپلاس به صورت رابطه (۳) است:

$$q_{canal} = q_{in}(t - \tau) \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن، q_{in} دبی ورودی به بخش جریان یکنواخت برحسب مترمکعب بر ثانیه، q_{canal} دبی خروجی از این بخش برحسب مترمکعب بر ثانیه و t و τ به ترتیب زمان و زمان تأخیر برحسب ثانیه است. مفهوم تبدیل فوق این است که تغییرات دبی ورودی با تأخیر زمانی به بخش بعدی منتقل می‌شود.

فرض می‌شود بخش منحنی برگشت آب مشابه یک مخزن ذخیره عمل می‌کند. در این بخش، تغییرات تراز آب (h) متناسب با اختلاف بین دبی ورودی و خروجی به مخزن است. معادله دیفرانسیل حاکم بر این بخش در حوزه زمان به صورت رابطه (۴) است:

$$A_s \times \frac{dh(t)}{dt} = q_{canal}(t) - q_{out}(t) \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن، q_{out} دبی خروجی از بخش منحنی برگشت آب برحسب مترمکعب بر ثانیه است. ترکیب دو بخش جریان یکنواخت و منحنی برگشت آب، مدل کامل انتگرالی-تأخیری را تشکیل می‌دهد. این مدل به ویژه برای کانال‌های با طول زیاد و شیب متوسط مناسب است. برای کانال‌های کوتاه، عمیق و کم‌شیب، این مدل ممکن است دقت کمتری داشته باشد، زیرا اثرات دینامیکی سریع را به طور کامل لحاظ نمی‌کند.

۲.۲. توسعه مدل خطی برای کانال مورد مطالعه

در این پژوهش، کانال بتنی E1-R1 با مقطع دوزنقه‌ای به عنوان نمونه مطالعه شده است (شکل ۱). مشخصات فنی این کانال شامل طول: ۲۸۳۰ متر، عرض کف: ۱/۵ متر در ۱۰۰۳ متر ابتدایی و ۱ متر در بقیه مسیر، شیب طولی: ۰/۰۰۱۲ تا ۰/۰۰۱۵، شیب جانبی: به نسبت ۱/۵ افقی به ۱ عمودی، ضریب زبری مانینگ: ۰/۰۱۷، ظرفیت انتقال: ۲/۴۷ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. این کانال دارای شش آبگیر ثقیلی، سه سازه آب‌بند، دو حوضچه آرامش و یک سیفون است. سازه‌های آب‌بند جریان (۱۵ سازه تقاطعی شامل سیفون، چک سیفون و کالورت) به صورت روزانه توسط اپراتورها تنظیم می‌شوند. توزیع آب بین واحدهای کشت و صنعت و بهره‌برداران محلی از طریق ۲۱ کانال فرعی و ۴۹ سازه آبگیر مزرعه انجام می‌پذیرد.

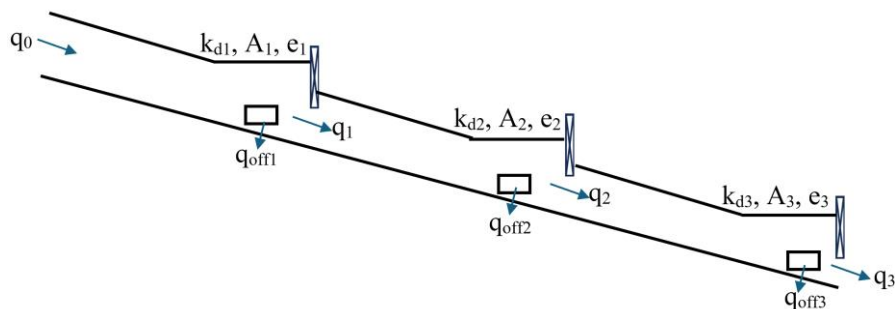


Figure 1. Schematic of the studied canal and its conceptual model

برای پیاده‌سازی عملی این مدل در کنترل کانال‌ها، از فرم گسسته‌سازی شده رابطه (۴) بعد از جایگذاری مقدار q_{canal} از رابطه (۴) به فرم رابطه (۵) استفاده می‌شود:

$$h(k+1) = h(k) + \frac{T}{A_s} \times [q_{in}(k - k_d) - q_{out}(k)] \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در آن، k و k_d به ترتیب نشان‌دهنده گام‌های زمانی گسسته و تأخیر است و $\Delta h(k) = h(k) - h(k-1)$ است که می‌توان تساوی $\Delta h(k) = h(k) - h(k-1) = h_{sp} + e(k) - [h_{sp} + e(k-1)] = \Delta e(k)$ را استخراج کرد و Δe را به جای Δh در رابطه (۵) جایگذاری کرد و با استفاده از آن، مدل انتگرالی-تأخیری برای کانال EIR1 با سه بازه و با $k_{d1} = k_{d2} = k_{d3} = 1$ برای هر سه بازه را تهیه کرد. لازم به ذکر است که چهار رابطه اول معادله (۶) برای بازه اول، چهار رابطه دوم معادله (۶) برای بازه دوم و چهار رابطه سوم معادله (۶) برای بازه سوم است (Schuurmans, 1997). فضای حالت این معادلات در بازه اول به صورت معادله (۷) نوشته می‌شود. لازم به ذکر است که سه پیکربندی مختلف سطح ذخیره در این پژوهش بررسی شد و نتایج آن مورد مقایسه قرار گرفت.

$$e_1(k+1) = e_1(k) + \Delta e_1(k) + \frac{T}{A_1} [\Delta q_0(k-2) - \Delta q_1(k) - \Delta q_{off1}(k)] \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$\Delta e_1(k+1) = e_1(k) + \Delta e_1(k) + \frac{T}{A_1} [\Delta q_0(k-2) - \Delta q_1(k) - \Delta q_{off1}(k)]$$

$$\Delta q_0(k) = \Delta q_0(k)$$

$$\Delta q_0(k-1) = \Delta q_0(k-1)$$

$$e_2(k+1) = e_2(k) + \Delta e_2(k) + \frac{T}{A_2} [\Delta q_1(k-2) - \Delta q_2(k) - \Delta q_{off2}(k)]$$

$$\Delta e_2(k+1) = e_2(k) + \Delta e_2(k) + \frac{T}{A_2} [\Delta q_1(k-2) - \Delta q_2(k) - \Delta q_{off2}(k)]$$

$$\Delta q_1(k) = \Delta q_1(k)$$

$$\Delta q_1(k-1) = \Delta q_1(k-1)$$

$$e_3(k+1) = e_3(k) + \Delta e_3(k) + \frac{T}{A_3} [\Delta q_2(k-2) - \Delta q_3(k) - \Delta q_{off3}(k)]$$

$$\Delta e_3(k+1) = e_3(k) + \Delta e_3(k) + \frac{T}{A_3} [\Delta q_2(k-2) - \Delta q_3(k) - \Delta q_{off3}(k)]$$

$$\Delta q_2(k) = \Delta q_2(k)$$

$$\Delta q_2(k-1) = \Delta q_2(k-1)$$

$$\begin{Bmatrix} e_1(k+1) \\ \Delta e_1(k+1) \\ \Delta q_0(k) \\ \Delta q_1(k-1) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 & 1 & 0 & \frac{T}{A_1} \\ 0 & 1 & 0 & \frac{T}{A_1} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{T}{A_1} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} e_1(k) \\ \Delta e_1(k) \\ \Delta q_0(k-1) \\ \Delta q_1(k-2) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 & -\frac{T}{A_1} \\ 0 & \frac{T}{A_1} \\ 1 & -\frac{T}{A_1} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \Delta q_0(k) \\ \Delta q_1(k) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -\frac{T}{A_1} \\ \frac{T}{A_1} \\ -\frac{T}{A_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \times \{\Delta q_{off1}\} \quad \text{رابطه (۷)}$$

۳.۲ یادگیری تقویتی پیوسته

یادگیری تقویتی (RL) نوعی از یادگیری ماشین است که در آن یک عامل (دریچه در کانال) با تعامل با یک محیط (جریان کانال)، یاد می‌گیرد چگونه تصمیم‌گیری کند. عامل براساس اقداماتی که انجام می‌دهد، بازخوردی به شکل پاداش یا جریمه دریافت می‌کند که به آن اجازه می‌دهد در طول زمان راهبردهای بهینه را یاد بگیرد. در این چارچوب، عامل، یادگیرنده یا تصمیم‌گیرنده است، درحالی‌که محیط، سیستم خارجی است که عامل با آن تعامل دارد. حالت

نشان‌دهنده وضعیت کنونی محیط است و عمل تصمیمی است که عامل می‌گیرد و بر این حالت تأثیر می‌گذارد. پاداش به‌عنوان بازخوردی از محیط براساس عمل انجام‌شده عمل می‌کند و سیاست راهبردی است که عامل برای تعیین اقدامات براساس حالت‌ها به‌کار می‌برد.

الگوریتم TD3 یا Twin Delayed DDPG (Deep Deterministic Policy Gradient)، یک روش پیشرفته یادگیری تقویتی است که برای فضاهای عمل پیوسته-مانند تنظیم پارامترهای هیدرولیکی همچون دبی جریان، عمق آب و موقعیت دریچه طراحی شده است. یکی از ویژگی‌های کلیدی TD3 استفاده از شبکه‌های Q دوقلو است که به کاهش بیش‌برازش در تخمین تابع ارزش کمک می‌کند و با گرفتن حداقل مقدار از دو شبکه، TD3 چندین بهبود را برای افزایش پایداری و عملکرد معرفی می‌کند (شکل ۲).

برخلاف double Q-Learning که گسترشی از Q-Learning با هدف کاهش بیش‌برازش با حفظ دو تخمین جداگانه از تابع ارزش و برای فضاهای عمل گسسته و تخمین ارزش طراحی شده است، الگوریتم TD3 برای وظایف کنترل پیوسته مانند رباتیک و انواع وظایف کنترلی، توسعه یافته است. جنبه مهم دیگر TD3، به‌روزرسانی‌های تأخیری سیاست است. سیاست با تأخیر و با فرکانس کم‌تری نسبت به شبکه‌های Q به‌روز می‌شود. این اجازه می‌دهد تا شبکه‌های Q قبل از تنظیم سیاست، تثبیت شوند که منجر به عملکرد بهتر می‌شود. علاوه بر این، TD3 از هموارسازی سیاست هدف بهره می‌برد که نویز را به سیاست هدف اضافه می‌کند تا کاوش را بیش‌تر کرده و از حساسیت بیش از حد سیاست به تغییرات کوچک در حالت جلوگیری کند.

الگوریتم TD3 به‌عنوان یک روش پیشرفته در حوزه یادگیری تقویتی برای محیط‌های با فضای عمل پیوسته شناخته می‌شود. این الگوریتم با هدف حل مشکلات بیش‌برآورد مقدار action-value و افزایش پایداری فرایند آموزش توسعه یافته است. هسته اصلی TD3 بر سه نوآوری اساسی استوار است؛ استفاده از دو شبکه منتقد (Twin Critic)، اعمال تأخیر در به‌روزرسانی سیاست (Policy Delay) و افزودن نویز کنترل‌شده به هدف سیاست (Target Policy Noise). فرایند اجرای الگوریتم با مقداردهی اولیه پارامترهای شبکه سیاست θ و پارامترهای دو شبکه منتقد ϕ_1 و ϕ_2 آغاز می‌شود. بافر replay D نیز خالی است.

۱. مقداردهی اولیه:

پارامترهای اصلی شامل سیاست θ و تابع Q با پارامترهای ϕ_1 و ϕ_2 مقداردهی می‌شوند. بافر replay D نیز خالی است.

۲. مقداردهی هدف:

$$\theta_{\text{target}} \rightarrow \theta$$

$$\phi_{\text{target},1} \rightarrow \phi_1$$

$$\phi_{\text{target},2} \rightarrow \phi_2$$

۳. تکرار تا همگرایی:

o انتخاب عمل:

در هر گام زمانی، عامل با مشاهده حالت فعلی s ، عمل a با افزودن نویز نرمال ϵ (از توزیع نرمال و $\epsilon \sim \mathcal{N}(0, \sigma)$) به خروجی سیاست $\mu_\theta(s)$ و سپس اعمال برش (clip) در محدوده مجاز، یعنی حد بالا و حد پایین عمل انتخاب می‌شود.

$$a = \text{clip}(\mu_\theta(s) + \epsilon, a_{\text{Low}}, a_{\text{High}})$$

o اجرا و ذخیره:

عمل a اجرا شده و حالت بعدی s' ، پاداش r و سیگنال پایان d مشاهده و نمونه (s, a, r, s', d) در بافر replay ذخیره می‌شود. بافر replay حاوی تجربیات ذخیره شده (s, a, r, s', d) است.

○ به‌روزرسانی شبکه‌ها (در زمان‌های مشخص):

نمونه‌برداری یک دسته B از بافر.

▪ محاسبه عمل هدف:

$$a'(s') = \text{clip}(\mu_{\theta_{\text{target}}}(s') + \text{clip}(\epsilon, -c, c), a_{\text{Low}}, a_{\text{High}})$$

که در آن ϵ از توزیع نرمال با انحراف معیار σ گرفته می‌شود.

▪ محاسبه هدف Q و مقدار پاداش:

$$y(r, s', d) = r + \gamma(1 - d) \min_{i=1,2} Q_{\phi_{\text{target},i}}(s', a'(s'))$$

$$r = \lim_{T \rightarrow \infty} E \left(\int_0^T (H_{\text{ref}} - y(t))^2 + 0.01a(t)^2 dt \right)$$

که در آن، γ فاکتور تخفیف بوده و بین صفر و ۱ است. مقدار H_{ref} مقدار عمق هدف که در این

تحقیق برابر با ۱/۲ متر، $\gamma(t)$ برابر با عمق آب در زمان t و مقدار عمل استفاده شده در زمان t

است. مقدار r برابر با مقدار پاداش در صورت مثبت‌بودن و جریمه در صورت منفی‌بودن است.

▪ به‌روزرسانی توابع Q :

با کاهش گرادینان خطای میانگین مربعات بین $Q_{\phi_i}(s, a)$ و $y(r, s', d)$ برای $i = 1, 2$.

▪ به‌روزرسانی سیاست (با تأخیر):

هرچند گام یکبار و براساس policy delay سیاست با افزایش گرادینان میانگین $Q_{\phi_1}(s, \mu_{\theta}(s))$

به‌روز می‌شود.

▪ به‌روزرسانی شبکه‌های هدف:

پارامترهای هدف با ترکیب مقادیر قبلی و جاری به‌روز می‌شوند:

$$\phi_{\text{target},i} \leftarrow \rho \phi_{\text{target},i} + (1 - \rho) \phi_i$$

$$\theta_{\text{target}} \leftarrow \rho \theta_{\text{target}} + (1 - \rho) \theta$$

این فرایند تا زمانی که الگوریتم همگرا شود یا معیار توفقی برآورده شود، تکرار می‌گردد. لازم به ذکر است که از

جعبه‌ابزار موجود در متلب در پژوهش حاضر استفاده شده است.

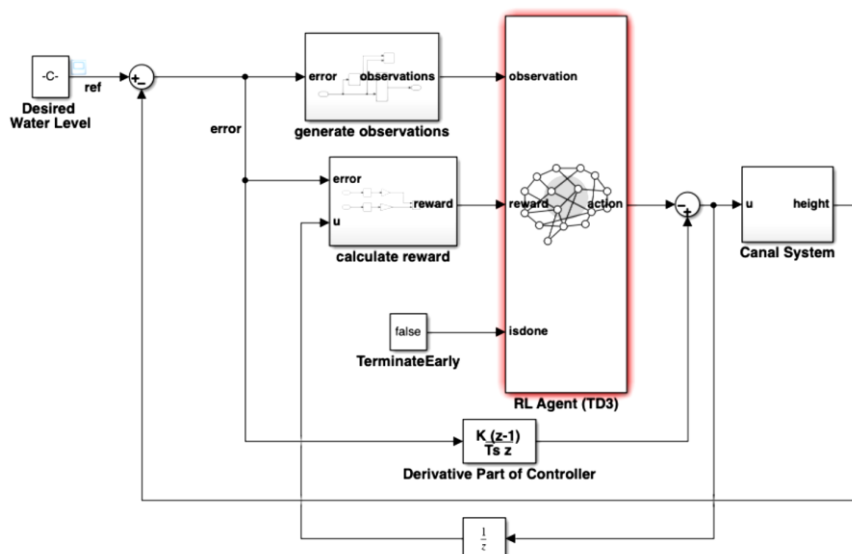


Figure 2. Simulated environment in MATLAB Simulink for training the reinforcement learning agent

در این پژوهش، علاوه آزمون و خطا، الگوریتم یادگیری تقویتی پیوسته برای تخمین ضرایب کنترلر کلاسیک شامل ضریب تناسبی k_p ، ضریب انتگرالی k_i و ضریب دیفرانسیلی k_d استفاده شد. در این کنترلر مقدار خروجی u با داشتن خطای e بین عمق هدف و عمق آب در زمان $k+1$ با رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$u(k+1) = k_p e(k) + k_i \int e(k) + k_d \frac{de(k)}{dt} \quad \text{رابطه (۸)}$$

۴.۲. سناریوهای بهره‌برداری و سنج‌های ارزیابی

جهت بررسی دقت مدل خطی تهیه‌شده سناریوهای مختلفی بهره‌برداری شامل سناریوهای با تغییرات ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد، که تغییرات مرسوم برای بهره‌برداری در شرایط نرمال و کمبود آب هستند، در نظر گرفته شد. بدین معنی که تغییرات دبی ورودی به اندازه ۱۰ درصد، ۲۰ درصد و ۳۰ درصد دبی نرمال (دبی ۱ مترمکعب در ثانیه) افزایش یافت و دقت مدل خطی در شبیه‌سازی کردن کانال با این تغییرات با مقایسه با نتایج مدل غیرخطی بررسی شد. انتخاب سناریوها بر پایه دو فرض عملیاتی و متدولوژیک صورت گرفت: پرهیز از ورود به ناحیه‌ای که مدل خطی اعتبار ندارد. بدین معنی که مدل خطی انتگرالی-تأخیری توسعه‌یافته برای بازه‌های کوچکتر تغییرات حول نقطه کاری طراحی و معتبر تأیید شده است. آزمایش با تغییرات فراتر (مثلاً $\leq 40\%$ درصد) عملاً خارج از محدوده اعتبار مدل است و نتایج آن گمراه‌کننده خواهد بود. لذا برای ارزیابی دقت مدل خطی در بازه‌ای که فرض‌های خطی‌سازی برقرارند، سناریوهای تا ۳۰ درصد انتخاب شد. تطابق با شرایط عملیاتی مرسوم علت دیگر انتخاب سناریوها بود. تغییرات تا حدود ۱۰-۳۰ درصد، به‌عنوان نوسانات مرسوم در شرایط نرمال و کمبود آب در منابع آبی مطالعه‌شده مطرح می‌باشند. بنابراین، سناریوها نماینده شرایط عملیاتی واقع‌گرایانه و پرکاربرد برای بهره‌برداران هستند. این موضوع سازگار با پژوهش‌های همچون *Fatemeh et al.* (2020) است.

جهت ارزیابی عملکرد مدل در میزان موفقیت کنترل سطح آب و مقدار انحراف عمق از عمق هدف، از سنج‌های آماری ریشه میانگین مربع خطاها (RMSE)، ضریب خطای پس‌ماند (CRM) و میانگین خطای مطلق (MAE) با توجه به مقادیر محاسباتی و مشاهداتی استفاده شد که روابط آن‌ها در ادامه ارائه شده است. لازم به ذکر است که مقدار مطلوب این سنج‌ها، صفر است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{Dp} - Q_{Dm})^2}{N}} \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^N Q_{Dm} - \sum_{i=1}^N Q_{Dp}}{\sum_{i=1}^N Q_{Dm}} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |Q_{Dm} - Q_{Dp}|}{N} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

در روابط بالا، پارامتر Q_{Dm} مقادیر مشاهداتی و پارامتر Q_{Dp} مقادیر محاسباتی و N تعداد داده‌هاست.

۳. نتایج و بحث

نتایج حاصل از اجرای مدل انتگرالی-تأخیری برای سناریوهای مختلف با سه پیکربندی مختلف (سطوح ذخیره مختلف) بررسی شده در این پژوهش، در این بخش ارائه شده است. نتایج نشان‌دهنده رفتارهای متمایز در شرایط مختلف تغییرات دبی تحویلی است که در ادامه تشریح شده می‌شوند.

با بررسی نتایج سه پیکربندی مختلف در شرایط تغییرات عادی، پیکربندی اول با $As=[6000 \ 2000 \ 6000]$ به‌عنوان گزینه برتر می‌باشد که در جدول (۱) نشان داده شده است. در جدول مذکور، سناریوهای ۱ تا ۳ به ترتیب مربوط به

تغییرات ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد دبی جریان است. در سناریوی ۳، با ۳۰ درصد تغییر جریان، خطای بازه سوم به ۰/۲۳۵ رسیده که ۳/۷ برابر بیش‌تر از میانگین خطا در سایر سناریوهاست. مقایسه بین پیکربندی‌های مختلف بازه نشان داد که توزیع نامتعادل ظرفیت ذخیره (پیکربندی دوم) می‌تواند این خطا را تا ۱۲ درصد افزایش دهد. به‌طور کلی نتایج نشان می‌دهد که سیستم بیش‌ترین حساسیت را به تغییرات شدید جریان (بیش از ۳۰ درصد) نشان می‌دهد. در نتیجه، مدل انتگرالی - تأخیری توسعه‌یافته برای تغییرات جریان تا ۳۰ درصد مناسب است و نسبت به استفاده از مدل در تغییرات بیش‌تر از ۳۰ درصد باید محتاطانه عمل کرد. ذکر این نکته ضروری است که توزیع متعادل برداشتها در طول کانال می‌تواند خطای نسبی را کاهش دهد. لازم به ذکر است که تغییرات ۴۰ درصد نیز در این پژوهش بررسی شد، اما با توجه به این که مدل تا ۳۰ درصد تغییرات معتبر بود، نتایج تغییرات ۴۰ درصد ارائه نگردید.

با بررسی نتایج سه پیکربندی مختلف در شرایط مختلف، پیکربندی اول با $As=[6000\ 2000\ 6000]$ به‌عنوان گزینه برتر می‌باشد. نتایج تغییرات سطح آب در مدل خطی و مقایسه آن با مدل غیرخطی برای سناریوهای مختلف پیکربندی بهینه در شکل (۳) نشان داده شده است. حداکثر خطا در پیکربندی اول برابر با ۰/۲۳۵ است که در مقایسه با پیکربندی‌های دیگر (۰/۲۶۳ و ۰/۲۱۵) کمتر است. با توجه به نتایج فوق و انتخاب پیکربندی اول، به‌عنوان پیکربندی برتر، نتایج شاخص‌های آماری RMSE، CRM و MAE در جدول (۲) ارائه شده است.

Table 1. The relative error of water depth in different scenarios in different storage areas

Configuration	As (m ²)	Scenario	Pool1	Pool2	Pool3
1	As=[6000 2000 6000]	1	0.051	0.210	0.054
		2	0.047	0.118	0.235
		3	0.038	0.107	0.088
2	As=[6000 2100 6000]	1	0.051	0.215	0.094
		2	0.047	0.132	0.199
		3	0.038	0.118	0.153
3	As=[6000 1500 6500]	1	0.051	0.175	0.056
		2	0.047	0.047	0.263
		3	0.038	0.040	0.050

نتایج ارزیابی سه سناریو نشان می‌دهد که سناریو ۲ از نظر دقت پیش‌بینی، بهترین عملکرد را دارا می‌باشد. این برتری به‌وضوح در مقادیر شاخص‌های کلیدی مشاهده می‌شود، به‌طوری‌که سناریو ۲ با کم‌ترین RMSE برابر ۰/۰۹۴، پایین‌ترین سطح خطای کلی را به خود اختصاص داده است. همچنین MAE برابر ۰/۰۵۵ (در این سناریو تقریباً معادل سناریوی ۱ است که نشان از پایداری آن دارد). در مقابل، سناریو ۳ با دارا بودن بالاترین مقادیر RMSE و MAE، به‌طور محسوسی از دقت پایین‌تری برخوردار است و سناریو ۱ نیز با مقدار RMSE بالاتر در جایگاه میانی قرار می‌گیرد. نکته قابل‌تأمل مشترک در تمامی سناریوها، وجود یک سوگیری سیستماتیک منفی در مدل است که توسط شاخص CRM (حدود ۰/۰۴۵-) آشکار می‌شود. این مقدار منفی حاکی از آن است که مدل‌های توسعه یافته، صرف‌نظر از سناریو، تمایل پایداری به کم‌برآوردی (Underestimation) مقادیر دارند. بنابراین، اگرچه سناریو ۲ از لحاظ دقت از دو سناریوی دیگر پیشی گرفته است، اما رفع این سوگیری ذاتی می‌تواند زمینه‌ساز بهبود بیش‌تر دقت و قابلیت اطمینان مدل در مطالعات آتی باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش تغییرات و رسیدن به ۳۰ درصد، عملکرد مدل با چالش مواجه شده و دقت آن کاهش می‌یابد. این امر به وضوح محدودیت‌های ذاتی یک مدل خطی در مدل‌کردن رفتار غیرخطی یک سیستم در خارج از نقطه مبنا را نشان می‌دهد. بدین معنی که مدل‌های خطی در اطراف نقطه کاری (در این پژوهش دبی ۱ مترمکعب بر ثانیه) معتبر هستند و در نقاط دورتر از نقطه کاری، عملکرد آن‌ها ضعیف می‌شود، به همین دلیل است که مدل‌های خطی نمی‌توانند دینامیک کامل جریان را مدل کنند.

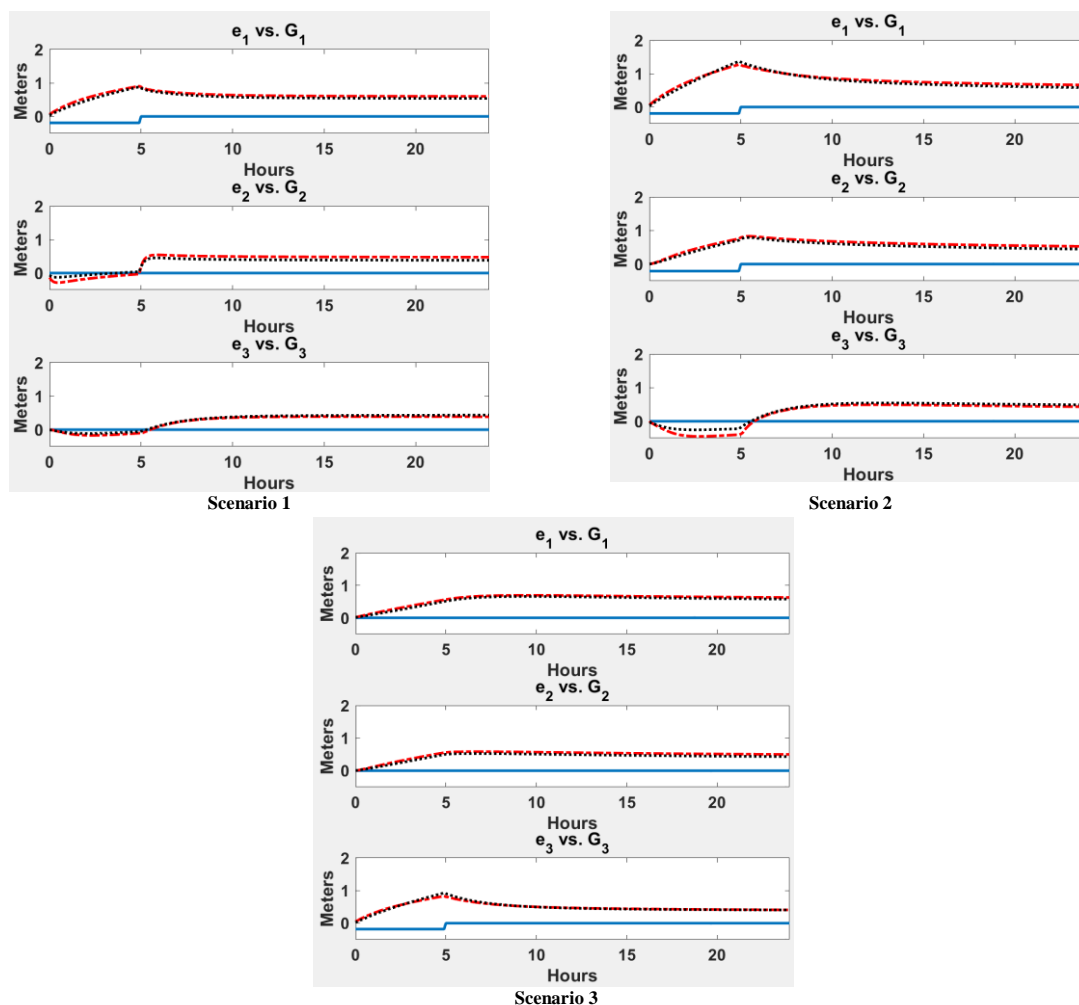


Figure 3. The water depth comparison of different water deficit scenarios in the optimum storage area

Table 2. Performance indicators of water delivery at turnouts in water deficit operation scenarios

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
RMSE	0.110	0.094	0.151
CRM	-0.045	-0.044	-0.046
MAE	0.054	0.055	0.087

پس از توسعه مدل خطی انتگرالی-تأخیری و اطمینان از دقت آن با مقایسه نتایج آن با نتایج مدل غیرخطی، مدل خطی انتگرالی-تأخیری با کنترلر کلاسیک در محیط سیمولینک متلب تلفیق شد. در مدل خطی انتگرالی-تأخیری، اطلاعات ورودی کانال و خروجی آبگیرها (به صورت اغتشاش تعریف شده است) به سیستم داده می شود و با داشتن ضرایب مدل خطی انتگرالی-تأخیری، مقادیر سطح آب و دبی های جریان محاسبه می شوند. مقدار ضرایب تناسبی، انتگرالی و دیفرانسیلی کنترلر کلاسیک برای کنترل سطح آب در مدل خطی با آزمون و خطا به ترتیب برابر با ۰/۲۰۹، ۰/۰۸۶ و ۰/۲۴۳ به دست آمد. همان طور که اشاره شد، با دریافت عمق هدف و مقایسه آن با عمق واقعی در کانال، مقدار خروجی کنترلر که عمق آب است محاسبه می شود و عمق آب در عمق هدف تثبیت می شود. همان طور که قبلاً نتیجه گیری شد مدل خطی برای محدوده تغییرات تا ۳۰ درصد معتبر است.

با توجه به این که مدل خطی ناپایدار است، وجود ضریب دیفرانسیلی برای پایداری آن ضروری است. بعد از تنظیم دقیق ضرایب، کنترلر تنظیم شده با کنترلر تنظیم شده با آزمون و خطا مقایسه شد. برای اجرای شبیه‌سازی‌ها، زمان نمونه برداری $T_s = 0.1$ s و زمان کل شبیه‌سازی $T_f = 100$ s در نظر گرفته شد. برای آموزش عامل حداکثر ۶۰۰ اپیزود مدنظر قرار گرفته که هر اپیزود حداکثر ۱۰۰۰ گام زمانی ادامه خواهد داشت. نتیجه حاصل از آموزش در شکل (۴) آورده شده است. با توجه به نتیجه آموزش، ضرایب کنترلر کلاسیک به ترتیب برابر با $K_p = 1/69$ ، $K_i = 0/055$ و $K_d = 0/086$ به دست آمد. لازم به ذکر است که مقادیر CRM برابر با $-0/046$ ، $-0/044$ و $-0/045$ با میانگین $-0/045$ نشان دهنده یک سوگیری منفی کوچک و ثابت در برآوردهاست، به طوری که کنترلگر به طور متوسط حدود ۴/۵ درصد کم برآورد می‌کند؛ پراکندگی بسیار کم (انحراف معیار $\approx 0/0008$) حاکی از پایداری شاخص در تکرارهاست. از دید کاربردی، این خطا در بازه‌های قابل قبول عملی (به عنوان مثال ± 5 درصد) قرار دارد. با این وجود، در تنظیم ضرایب کنترلر، این سوگیری م نظر قرار گرفت که منجر به تنظیم دقیق و رفتار درست عمق جریان گردید. نتایج عملکرد دو کنترلر در سناریوهای تغییر ورودی آزمایش شده (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) به ترتیب در شکل‌های (۵) تا (۷) ارائه شده است.

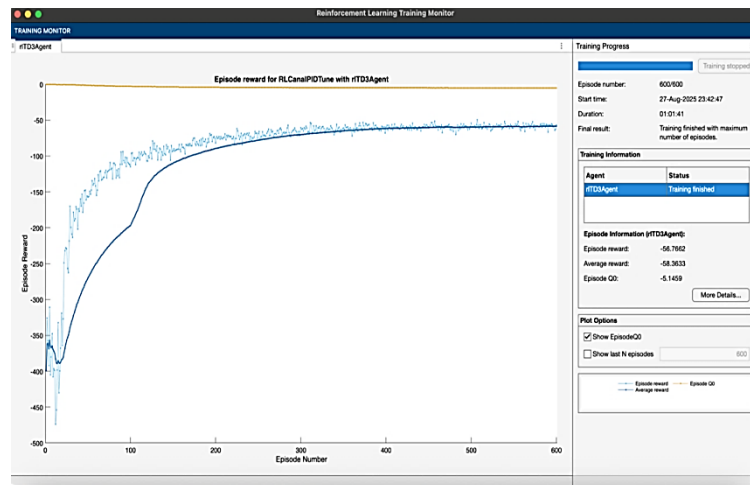


Figure 4. The learning process and agent convergence

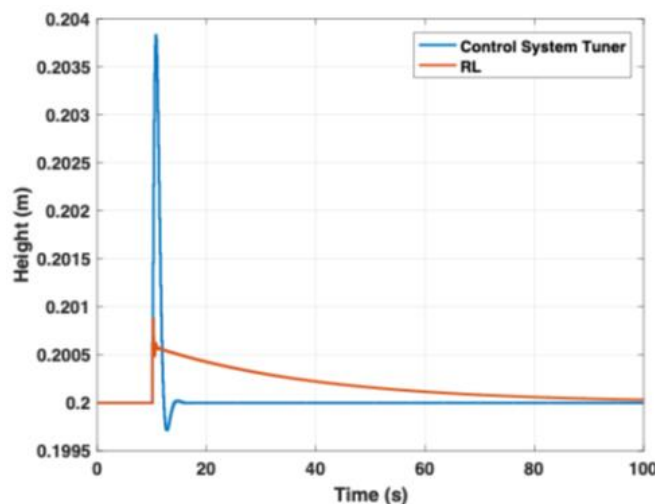


Figure 5. Comparison of the performance of the two controllers with a 10% change in the canal input

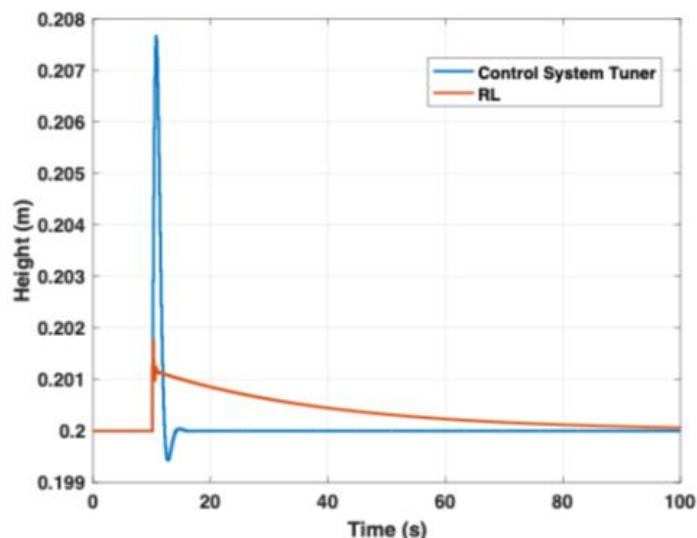


Figure 6. Comparison of the performance of the two controllers with a 20% change in the canal input

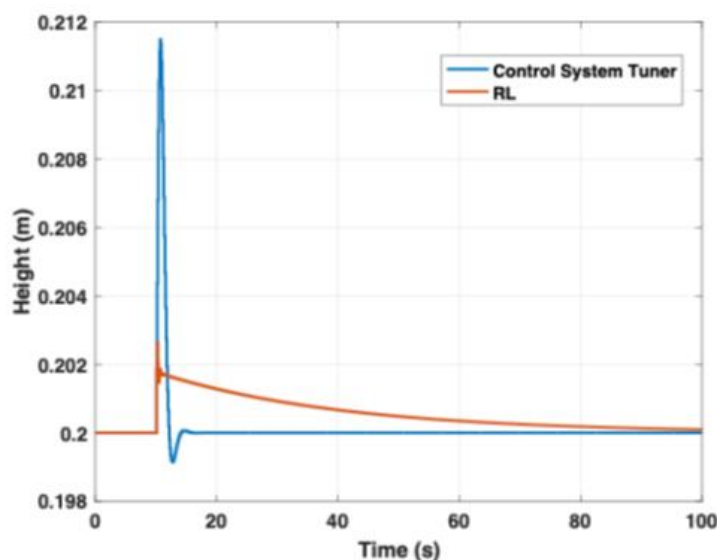


Figure 7. Comparison of the performance of the two controllers with a 30% change in the canal input

در شکل (۵)، با اعمال تغییر ۱۰ درصد در ورودی کانال، هر دو کنترلر توانستند سطح آب را به نقطه تنظیم مطلوب بازگردانند. با این حال، کنترلر تنظیم شده با RL عملکرد به مراتب برتری را از خود نشان داد که دارای خطای انحراف عمق کم تر و زمان پاسخ دهی به طور محسوس کوتاه تر برای رسیدن به پایداری است. این کنترلر سطح آب را تنها در چند گام زمانی به مقدار مطلوب رسانده است. قابل توجه است که حداکثر تغییرات عمق مشاهده شده با کنترلر RL، پنج برابر کوچک تر از کنترلر تنظیم شده دستی بود که نشان دهنده یک پاسخ عملی باثبات تر و قابل قبول تر است. این عملکرد بهبود یافته کنترلر تنظیم شده با RL در تمامی سناریوهای آزمایش شده یکسان بود، همان طور که به وضوح در شکل های (۶) و (۷) به ترتیب برای تغییرات ۲۰ و ۳۰ درصد نشان داده شده است کنترلر تنظیم شده با RL در هر سناریو عملکرد بهتری داشته است.

۴. نتیجه‌گیری

این پژوهش به طراحی و ارزیابی یک سیستم کنترل هوشمند برای مدیریت بهینه آب در کانال‌های آبیاری با استفاده از تلفیق مدل‌سازی هیدرولیکی و یادگیری تقویتی پرداخت. مدل خطی انتگرالی-تأخیری توسعه یافته برای کانال E1R1 در شبکه آبیاری دز با خطای نسبی متوسط ۰/۰۶۶ دقت قابل‌قبولی در شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی کانال نشان داد. نتایج ارزیابی سناریوهای تغییرات ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد دبی حاکی از آن بود که این مدل در محدوده تغییرات تا ۳۰ درصد از کارایی محاسباتی مناسب و دقت کافی برخوردار است. با این حال، وابستگی عملکرد مدل به میزان تغییرات جریان و الگوی توزیع آبگیرها به‌عنوان یک محدودیت مهم شناسایی شد. به‌طور خاص، در شرایط کم‌آبی شدید (بیش از ۳۰ درصد)، دقت مدل کاهش محسوسی داشت.

سیستم کنترل هیبریدی پیشنهادی که مبتنی بر تلفیق کنترلر کلاسیک و عامل یادگیری تقویتی پیوسته طراحی شده بود، عملکرد برجسته‌ای در مدیریت سطح آب کانال از خود نشان داد. مقایسه نتایج حاصل از سناریوهای مختلف تغییر ورودی (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) نشان داد که کنترلر تنظیم‌شده با RL در مقایسه با کنترلر تنظیم دستی، با کاهش پنج برابری حداکثر انحراف عمق از عمق هدف در تغییر ۱۰ درصد و زمان پاسخ کم‌تر، برتری قابل‌توجهی در ثبات و دقت عملکرد دارد. با وجود نتایج موفقیت‌آمیز، این پژوهش محدودیت‌هایی نیز داشت که زمینه را برای مطالعات آینده فراهم می‌کند. شناسایی سوگیری سیستماتیک منفی (مقادیر CRM حول ۰/۰۴۵-) در تمامی سناریوها نشان از نیاز به بهبود مدل پایه دارد. همچنین کارایی پایین مدل در شرایط تغییرات بیش از ۴۰ درصد لزوم تلفیق این چارچوب با مدل‌های غیرخطی پیچیده‌تر را برای شبیه‌سازی شرایط اضطراری نمایان می‌سازد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که رویکرد پیشنهادی اگرچه گامی مهم در جهت هوشمندسازی مدیریت آب در کانال‌های آبیاری محسوب می‌شود، اما برای کاربرد در گستره وسیع‌تری از شرایط عملیاتی نیازمند توسعه‌های بیشتر می‌باشد.

۵. پی‌نوشت

1. Automatic Irrigation Conveyance Simulation System

۶. تشکر و قدردانی

این طرح تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (INSF) برگرفته‌شده از طرح شماره «۴۰۲۷۸۶۲» انجام شده است.

۷. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۸. منابع

- Ahmadi, S. M., Hashemy Shahdany, S. M., Soltani, J., & Varavipour, M. (2024). Developing a decentralized proportional-integral automatic control system and evaluating its performance in improving the operation of the Abshar irrigation district' main canal. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55, 729-747. (In Persian).
- Barkhordari, S., Ebrahim Najari, M., & Hashemy Shahdany, S. M. (2022). Performance Appraisal of Irrigation Water Distribution within the Abshar Irrigation Districts' Main and Lateral Canals in Normal and Water Shortages Operational Scenarios. *Water and Irrigation Management*, 12, 389-404. (In Persian).

- 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*, 146,9, 04020028.
- Khaeez, S., & Shahdany, S. M. H. (2021). Non-structural modification of agricultural water distribution systems in large scale irrigation districts. *Computers and Electronics in Agriculture*, 184, 1061.02
- Lei, X., Wu, J., Long, Y., Chen, L., Liu, X., & Xu, H. (2025). Integral delay inspired deep learning model for single pool water level prediction. *Journal of Hydrology*, 133328.
- Schuurmans, J. (1997). Control of water levels in open-channels.
- Shahverdi, K. (2023). AICSS: Automatic simulator-controller/optimizer model of open channels. *Irrigation and Drainage*, 72, 1124-1136.
- Shahverdi, K., Alamiyan-Harandi, F., & Maestre, J. (2022). Double Q-PI architecture for smart model-free control of canals. *Computers and Electronics in Agriculture*, 197, 106940.
- Shahverdi, K., & Maestre, J. M. (2023). Holistic framework for canal modernization: operation optimization, and economic and environmental analyses. *Water Resources Management*, 37, 6145-6164.
- Shahverdi, K., & Maestre, J.M. (2022). Gray wolf optimization for scheduling irrigation water. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 148(7), 04022020.
- Shahverdi, K., Noorali, A., Ghodousi, H., & Berndtsson, R. (2024). Developing Internal and External Proportional Integral Derivative Water Surface Controller in HEC-RAS. *Water*, 16, 1699.
- Yaltaghian Khiabani, M. (2018). Design of Automatic Control System to Equitable Water Distribution under Water Shortages and Inflow Fluctuation Operational Conditions, Case study of Roodasht Irrigation district. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25, 185-200.
- Yang, Z., Wang, Z., Liu, J., Zhang, T., & Zheng, Z. (2023). Canal controllability identification based on automation theory to improve water delivery efficiency in irrigation canal systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 149, 04023015.
- Zahran, S., Gooda, E. A., & Abdelmegeed, N. (2024). Modeling Al-Qaraqoul canal before and after rehabilitation using HEC-RAS. *Scientific Reports*, 14, 14760.
- Zhou, K., Fan, Y., Gao, Z., Chen, H., Zheng, X., Yang, Y., & Liu, J. (2025). The coupled model of water delivery and distribution regulation for single-canal pool systems. *Agricultural Water Management*, 313, 109475.
- Zhu, Z., Guan, G., Tian, X., Shahdany, S. H., & Wang, K. (2023). The Integrator Dual-Delay model for advanced controller design of the open canal irrigation systems with multiple offtakes. *Computers and Electronics in Agriculture*, 205, 107616.