

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

کاظم شاهوردی^{۱*}، مجید غنی‌ئی^۲، ریحانه لونی^۳

^۱استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

^۲استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

^۳استادیار، دانشکده حکمرانی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

چکیده

بهینه‌سازی 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-تاخیری 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 به ترتیب برابر با ۰/۲۰۹، ۰/۲۴۳ و ۰/۰۸۶ و با تنظیم با یادگیری تقویتی به ترتیب برابر با ۱/۶۹، ۰/۰۵۵ و ۰/۰۸۶ می‌باشد. ارزیابی عملکرد سیستم در سناریوهای با تغییرات ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی نشان داد که کنترلر تنظیم‌شده با یادگیری تقویتی در مقایسه با کنترلر تنظیم دستی، برتری قابل توجهی 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.

کلیدواژه‌ها: ارزیابی، شبیه‌سازی، کانال، مدل انتگرالی-تاخیری.

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 به عنوان 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 بر اساس مدل‌های ریاضی مانند مدل انتگرالی تأخیری عمل می‌کنند، 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-وانت، که قادر به پیش‌بینی دقیق جریان هستند، گسترده می‌باشد (Zahran et al., 2024, Shahverdi et al., 2024, Shahverdi and Maestre, 2023, Khaez 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 ترکیب یادگیری تقویتی گسسته Q و یک ماتریس به‌روزرسانی دوگانه، پارامترهای کنترلر تناسبی-انتگرالی را برای تنظیم دریچه‌های کنترل در کانال‌های آبیاری بهینه می‌کند. در این تحقیق، از مدل خطی و غیرخطی کانال استفاده شد. مدل فضای حالت توسعه‌یافته در محدوده تغییرات ۲۰ درصد بازشدگی دریچه‌ها، 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 به طور محسوسی کاهش می‌یابد، به طوری که در کمبودهای پنج، ۱۵ و ۳۰ درصدی، شاخص کفایت تحویل آب به ترتیب به ۶۹-۴۱، ۹۵-۲۹ و ۶۵-۱۹ 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 آبیگرهای بالادست قادر به تأمین آب مورد نیاز بودند، در حالی که عملکرد آبیگرهای پایین‌دست 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 مدل انتگرالی-تأخیری بهبود می‌یابد (Zhu et al., 2023). در تحقیقی، 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 درصد 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 عایداری 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 ۰/۰۰۱-۰/۰۰۱۱ است و عملکرد مطلوبی دارد. با این حال، در سناریوهای کم‌آبی و کم‌آبی شدید همراه با نوسانات، عملکرد سیستم در بخش‌های پایین‌دست شبکه نامناسب بوده و خطای حداکثر ۳۵ تا ۴۵ سانتیمتر و شاخص‌های MAE تا ۰/۱۷۲ و IAE تا ۰/۰۹۹۱ بوده به‌طوری که توزیع آب در این مناطق به‌شدت 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 به‌طور میانگین موجب کاهش ۴۵ درصدی خطای حداکثر مطلق ۴۵ درصدی 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 درجه‌ها 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 پایداری کانال است. نتایج نشان داد سطوح هدف آب در دو سناریو در ۲/۲ متر تثبیت شد و انحرافات کمی در عمق نهایی تثبیت شده در برخی سناریوها وجود داشت به‌طوری‌که عمق سطح نهایی آب به‌جای 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 اینکه، روشهای یادگیری مورد استفاده تاکنون عمدتاً روشهای یادگیری نظارت شده 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-تاخیری برای کانال E1R1 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 تحقیق، به‌کارگیری یک چارچوب پیشرفته یادگیری تقویتی پیوسته برای اولین بار، به عنوان 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، عمدتاً 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 تحقیق از نرم‌افزار AICSS¹ 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 1 و 2 تعریف می‌شوند:

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

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial x} + g(s_0 - s_f) + \frac{V}{B} (p - i) = 0 \quad 2$$

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 مورد نظر کاربر را در فایل‌های متنی ذخیره می‌کند (Shahverdi, 2023). محققان مدل‌های ساده‌تر با پارامترهای کمتری را برای طراحی کنترل‌گرها بر اساس معادلات سنت و نانت ارائه کرده‌اند. در تحقیق حاضر، یکی از پرکاربردترین مدل‌های ریاضی ساده شده به‌نام مدل انتگرالی-تاخیری^۲ 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-تاخیری ارائه شده است. این مدل برای کانال‌های طولانی، کم‌عمق و با شیب متوسط عملکرد مطلوبی دارد و قادر است رفتار جریان را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کند. اساس این مدل بر تقسیم هر بازه از کانال به دو بخش اصلی شامل بخش جریان یکنواخت که مشخصه اصلی آن زمان تاخیر (τ) می‌باشد و بخش منحنی برگشت آب که مشخصه اصلی آن سطح ذخیره (A_s) می‌باشد، استوار است. مقادیر صحیح دو پارامتر زمان تاخیر و سطح ذخیره نقش اساسی در دقت و عملکرد مدل دارند.

در بخش جریان یکنواخت، فرض می‌شود که امواج در جهت پایین‌دست حرکت می‌کنند و هرگونه تغییر در دبی ورودی در بالادست بازه، باعث ایجاد موجی می‌شود که با تاخیر زمانی متناسب با عمق آب و سرعت موج سینماتیکی به بخش پایین‌دست می‌رسد. این تاخیر، است. معادله حاکم بر این بخش و معادله تبدیل شده آن با تبدیل لاپلاس به صورت رابطه 3 است:

$$q_{canal} = q_{in}(t - \tau) \quad 3$$

که در آن q_{in} دبی ورودی به بخش جریان یکنواخت برحسب متر مکعب بر ثانیه، q_{canal} دبی خروجی از این بخش برحسب متر مکعب بر ثانیه و t و τ به ترتیب زمان و زمان تاخیر بر حسب ثانیه است. مفهوم تبدیل فوق اینست که تغییرات دبی ورودی با تاخیر 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 دبی ورودی و خروجی به مخزن است. معادله دیفرانسیل حاکم بر این بخش در حوزه زمان به صورت رابطه 4 است:

$$A_s \times \frac{dh(t)}{dt} = q_{canal}(t) - q_{out}(t) \quad 4$$

که در آن q_{out} دبی خروجی از بخش منحنی برگشت آب بر حسب متر مکعب بر ثانیه است. ترکیب دو بخش جریان یکنواخت و منحنی برگشت آب، مدل کامل انتگرالی-تاخیری را تشکیل می‌دهد. این مدل به‌ویژه 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 به‌طور کامل لحاظ نمی‌کند.

۲-۲- توسعه مدل خطی برای کانال مورد مطالعه

در این تحقیق، 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 ۶ آبرگیر ثقلی، ۳ سازه آبنند، ۲ حوضچه آرامش و ۱ سیفون است. سازه‌های آبنند 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 آبرگیر مزرعه انجام می‌پذیرد.

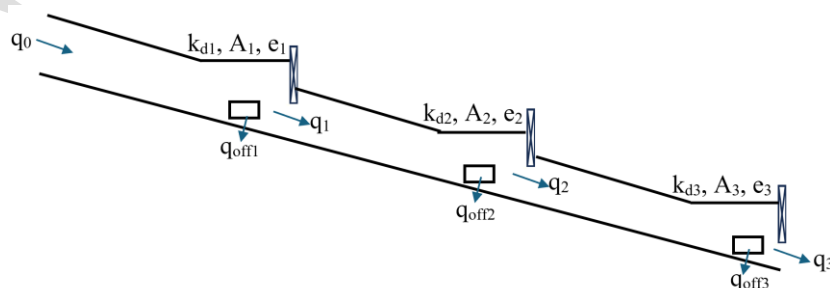


Figure 1. Schematic of the studied canal and its conceptual model.

برای پیاده‌سازی عملی این مدل در کنترل کانال‌ها، از فرم گسسته‌سازی شده معادله 4 بعد از جایگذاری مقدار q_{canal} از معادله 4 به فرم معادله استفاده می‌شود:

$$h(k+1) = h(k) + \frac{\tau}{A_s} \times [q_{in}(k - k_d) - q_{out}(k)] \quad 5$$

که در آن k و k_d به ترتیب نشان‌دهنده گام‌های زمانی گسسته و تاخیر 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 5 جایگذاری کرد و با استفاده از آن، مدل انتگرالی-تاخیری 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 6 برای بازه اول، چهار رابطه دوم معادله 6 برای بازه دوم و چهار رابطه سوم معادله 6 برای بازه سوم است (Schuurmans, 1997). فرم فضای حالت این معادلات در بازه اول به صورت معادله 7 نوشته می‌شود. لازم به ذکر است که سه پیکربندی مختلف سطح ذخیره در این تحقیق بررسی شد و نتایج آن مورد مقایسه قرار گرفت.

$$\begin{aligned} e_1(k+1) &= e_1(k) + \Delta e_1(k) + \frac{T}{A_1} [\Delta q_0(k-2) - \Delta q_1(k) - \Delta q_{off1}(k)] \\ \Delta e_1(k+1) &= e_1(k) + \Delta e_1(k) + \frac{T}{A_1} [\Delta q_0(k-2) - \Delta q_1(k) - \Delta q_{off1}(k)] \\ \Delta q_0(k) &= \Delta q_0(k) \\ \Delta q_0(k-1) &= \Delta q_0(k-1) \\ e_2(k+1) &= e_2(k) + \Delta e_2(k) + \frac{T}{A_2} [\Delta q_1(k-2) - \Delta q_2(k) - \Delta q_{off2}(k)] \\ \Delta e_2(k+1) &= e_2(k) + \Delta e_2(k) + \frac{T}{A_2} [\Delta q_1(k-2) - \Delta q_2(k) - \Delta q_{off2}(k)] \\ \Delta q_1(k) &= \Delta q_1(k) \\ \Delta q_1(k-1) &= \Delta q_1(k-1) \\ e_3(k+1) &= e_3(k) + \Delta e_3(k) + \frac{T}{A_3} [\Delta q_2(k-2) - \Delta q_3(k) - \Delta q_{off3}(k)] \\ \Delta e_3(k+1) &= e_3(k) + \Delta e_3(k) + \frac{T}{A_3} [\Delta q_2(k-2) - \Delta q_3(k) - \Delta q_{off3}(k)] \\ \Delta q_2(k) &= \Delta q_2(k) \\ \Delta q_2(k-1) &= \Delta q_2(k-1) \end{aligned}$$

$$\begin{Bmatrix} e_1(k+1) \\ \Delta e_1(k+1) \\ \Delta q_0(k) \\ \Delta q_1(k-1) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 & 1 & 0 & \frac{T}{A_1} \\ 0 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 0 & \frac{T}{A_1} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} e_1(k) \\ \Delta e_1(k) \\ \Delta q_0(k-1) \\ \Delta q_1(k-2) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 & -\frac{T}{A_1} \\ 0 & T \\ 1 & -\frac{T}{A_1} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \Delta q_0(k) \\ \Delta q_1(k) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -\frac{T}{A_1} \\ -\frac{T}{A_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \times \{\Delta q_{off1}\} \quad 7$$

۲-۳- 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 بر اساس 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، در حالی که 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 به عنوان بازخوردی از محیط بر اساس عمل انجام‌شده عمل می‌کند و سیاست راهبردی است که عامل برای تعیین اقدامات بر اساس حالت‌ها به کار 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 به عنوان 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 فرآیند 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 کنترل شده به هدف سیاست (Target Policy Noise). فرآیند اجرای الگوریتم با مقداردهی اولیه پارامترهای شبکه سیاست θ و پارامترهای دو شبکه منتقد ϕ_1 و ϕ_2 آغاز می‌شود. بافر replay $\mathcal{D}$ 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 $\mathcal{D}$ نیز خالی است.

۲. مقداردهی هدف:

$$\begin{aligned}\theta_{\text{target}} &\rightarrow \theta \\ \phi_{\text{target},1} &\rightarrow \phi_1 \\ \phi_{\text{target},2} &\rightarrow \phi_2\end{aligned}$$

۳. تکرار تا همگرایی:

○ 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.

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

○ 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 D 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:

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

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

که در آن γ فاکتور تخفیف بوده و بین ۰ و ۱ است. مقدار H_{ref} مقدار عمق هدف که در این تحقیق برابر با ۱/۲ متر، $y(t)$ برابر با عمق آب در زمان t و $a(t)$ مقدار عمل استفاده شده در زمان t است. مقدار r برابر با مقدار پاداش در صورت مثبت بودن و جریمه در صورت منفی بودن 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 تاخیر):

هر چند گام یکبار و بر اساس 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 فرآیند تا زمانی که الگوریتم همگرا شود یا معیار توقفی برآورده شود، تکرار می‌گردد. لازم به ذکر است که از جعبه‌ابزار موجود در متلب در تحقیق حاضر استفاده شده است.

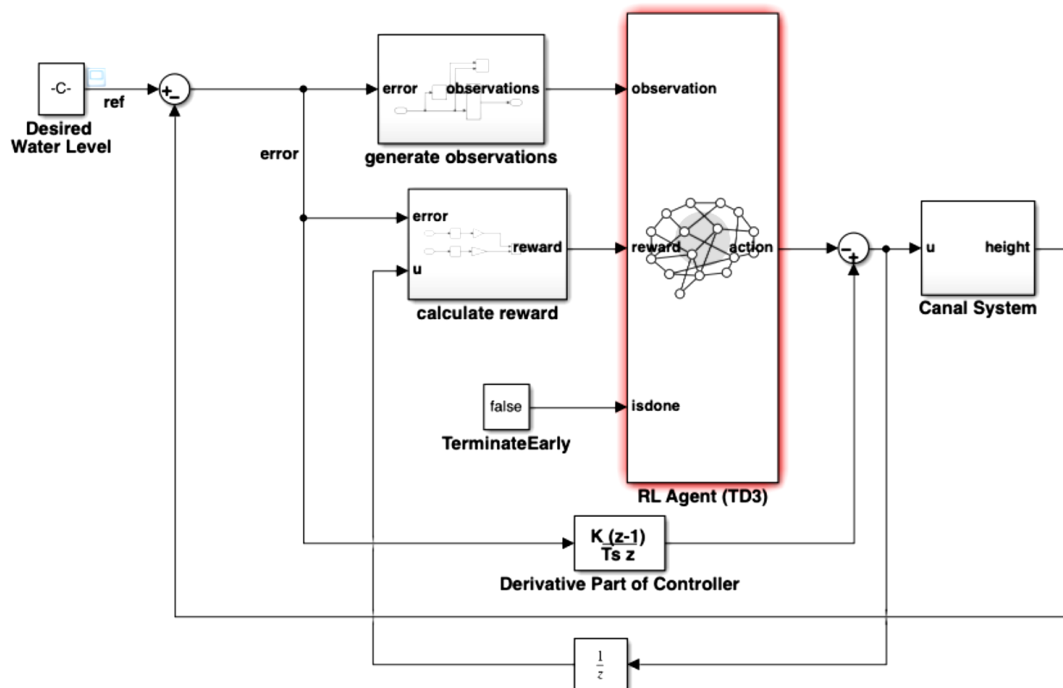


Figure 2: simulated environment in MATLAB Simulink for training the reinforcement learning agent.

در این تحقیق، 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.

$$u(k+1) = k_p e(k) + k_i \int e(k) + k_d \frac{de(k)}{dt} \quad 8$$

۲-۴- سناریوهای بهره‌برداری و سنج‌های ارزیابی

جهت بررسی دقت مدل خطی تهیه شده 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-تاخیری توسعه‌یافته برای بازه‌های کوچک‌تر تغییرات حول نقطه کاری طراحی و معتبر تایید شده است. آزمایش با تغییرات فراتر (مثلاً $\leq 40\%$) 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٪ انتخاب شد. تطابق با شرایط عملیاتی مرسوم علت دیگر انتخاب سناریوها بود. تغییرات تا حدود ۱۰-۳۰٪،

به عنوان نوسانات مرسوم در شرایط نرمال و کمبود آب در منابع آبی مطالعه شده مطرح اند. بنابراین سناریوها نماینده شرایط عملیاتی واقع گرایانه و پرکاربرد برای بهره برداران هستند. این موضوع سازگار با تحقیقاتی مانند (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 پس ماند (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.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{Dp} - Q_{Dm})^2}{N}} \quad 9$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^N Q_{Dm} - \sum_{i=1}^N Q_{Dp}}{\sum_{i=1}^N Q_{Dm}} \quad 10$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |Q_{Dm} - Q_{Dp}|}{N} \quad 11$$

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

۳- نتایج و بحث

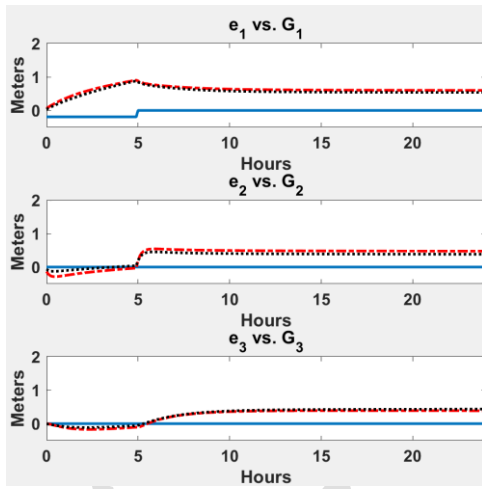
نتایج حاصل از اجرای مدل انتگرالی-تأخیری برای سناریوهای مختلف با سه پیکربندی مختلف (سطوح ذخیره مختلف) بررسی شده در این تحقیق، در این بخش ارائه شده است. نتایج نشان‌دهنده رفتارهای متمایز در شرایط مختلف تغییرات دبی تحویلی است که در ادامه تشریح شده می‌شوند.

با بررسی نتایج سه پیکربندی مختلف در شرایط تغییرات عادی، پیکربندی اول با $As=[6000 \ 2000 \ 6000]$ به عنوان 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. به طور کلی نتایج نشان می‌دهد که سیستم بیشترین حساسیت را به تغییرات شدید جریان (بیش از ۳۰ درصد) نشان می‌دهد. در نتیجه، مدل انتگرالی-تأخیری توسعه یافته 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 تحقیق بررسی شد اما با توجه به اینکه مدل تا ۳۰ درصد تغییرات معتبر بود، نتایج تغییرات ۴۰ درصد ارائه نگردید.

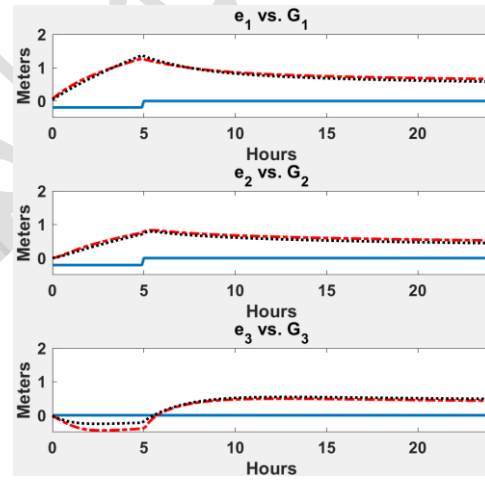
با بررسی نتایج سه پیکربندی مختلف در شرایط مختلف، پیکربندی اول با $As=[6000 \ 2000 \ 6000]$ به عنوان گزینه برتر می‌باشد. نتایج تغییرات سطح آب در مدل خطی و مقایسه آن با مدل غیرخطی برای سناریوهای مختلف پیکربندی بهینه در شکل ۳ نشان داده شده است. حداکثر خطا در پیکربندی اول برابر با ۰/۲۳۵ است که در مقایسه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

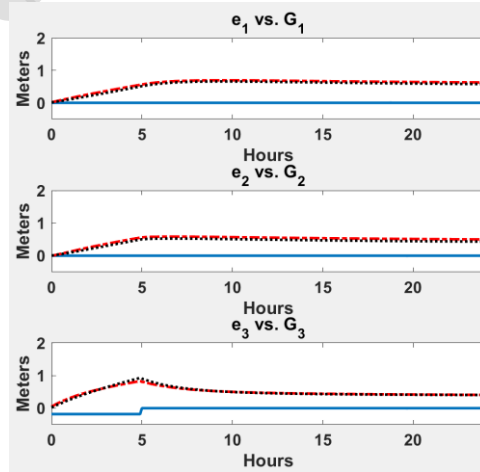
Pool3	Pool2	Pool1	Scenario	As (m ²)	configuration
0.054	0.210	0.051	1	As=[6000 2000 6000]	1
0.235	0.118	0.047	2		
0.088	0.107	0.038	3		
0.094	0.215	0.051	1	As=[6000 2100 6000]	2
0.199	0.132	0.047	2		
0.153	0.118	0.038	3		
0.056	0.175	0.051	1	As=[6000 1500 6500]	3
0.263	0.047	0.047	2		
0.050	0.040	0.038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



Scenario 1



Scenario 2



Scenario 3

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

نتایج ارزیابی سه سناریو نشان می‌دهد که سناریو ۲ از نظر دقت پیش‌بینی، بهترین عملکرد را دارا می‌باشد. این برتری به وضوح در مقادیر شاخص‌های کلیدی مشاهده می‌شود؛ به طوری که 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 سناریو ۱ است که نشان از پایداری آن دارد). در مقابل، سناریو ۳ با دارا بودن بالاترین مقادیر RMSE و MAE، به طور محسوسی از دقت پایین‌تری برخوردار است و سناریو ۱ نیز با مقدار RMSE بالاتر در جایگاه میانی قرار می‌گیرد. نکته قابل تأمل 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، صرف نظر 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 مدل کردن رفتار غیرخطی یک سیستم در خارج از نقطه مبنا را نشان می‌دهد. بدین معنی که مدل‌های خطی در اطراف نقطه کاری (در این تحقیق دبی ۱ متر مکعب 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.

پس از توسعه مدل خطی انتگرالی-تاخیری و اطمینان از دقت آن با مقایسه نتایج آن با نتایج مدل غیرخطی، مدل خطی انتگرالی-تاخیری با کنترلر کلاسیک در محیط سیمولینک متلب تلفیق شد. در مدل خطی انتگرالی-تاخیری، اطلاعات ورودی کانال و خروجی آبگیرها (بصورت اغتشاش تعریف شده است) به سیستم داده می‌شود و با داشتن ضرایب مدل خطی انتگرالی-تاخیری، مقادیر سطح آب و دبی‌های جریان محاسبه می‌شوند. 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، ۰/۲۴۳ و ۰/۰۸۶ به دست آمد. همانطور که اشاره شد، با دریافت عمق هدف و مقایسه آن با عمق واقعی در کانال، مقدار خروجی کنترلر که عمق آب است محاسبه می‌شود و عمق آب در عمق هدف تثبیت می‌شود. همانطور که قبلاً نتیجه‌گیری 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 تنظیم‌شده با کنترلر تنظیم شده با آزمون و خطا مقایسه شد. برای اجرای شبیه‌سازی‌ها، زمان نمونه‌برداری $T_s = 0.1$ s و زمان کل شبیه‌سازی $T_f = 100$ s در نظر گرفته شد. برای آموزش عامل حداکثر ۶۰۰ اپیزود مد نظر 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 ، -0.045 با میانگین -0.045 نشان دهنده یک سوگیری منفی کوچک و ثابت در برآوردها است، به طوری که کنترلر به طور متوسط حدود $\pm 0.4/5\%$ کم برآورد می کند؛ پراکندگی بسیار کم (انحراف معیار ≈ 0.0008) حاکی از پایداری شاخص در تکرارهاست. از دید کاربردی، این خطا در بازه های قابل قبول عملی (مثلاً $\pm 0.5\%$) قرار دارد با این وجود، در تنظیم ضرایب کنترلر، این سوگیری مد نظر قرار گرفت که منجر به تنظیم دقیق و رفتار درست عمق جریان گردید. نتایج عملکرد دو کنترلر در سناریوهای تغییر ورودی آزمایش شده (10% ، 20% ، 30%) به ترتیب در شکل های ۵-۷ ارائه شده است.

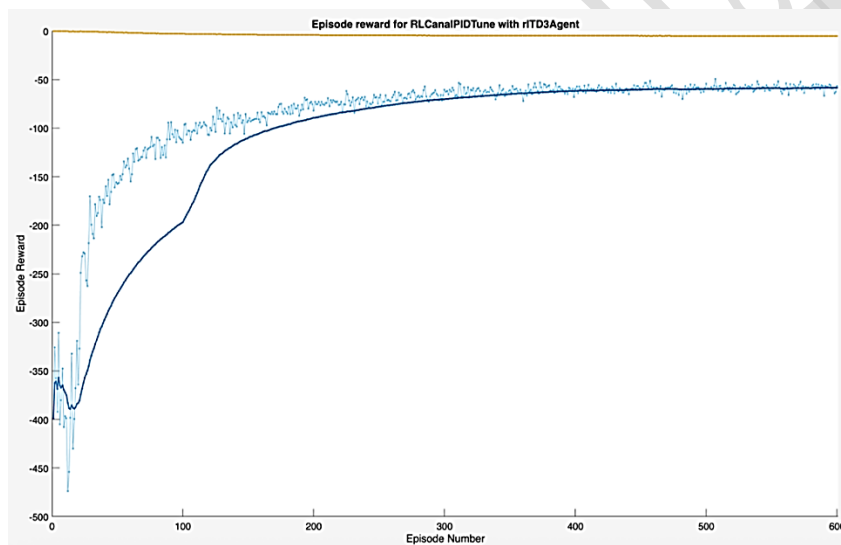


Figure 4. The learning process and agent convergence.

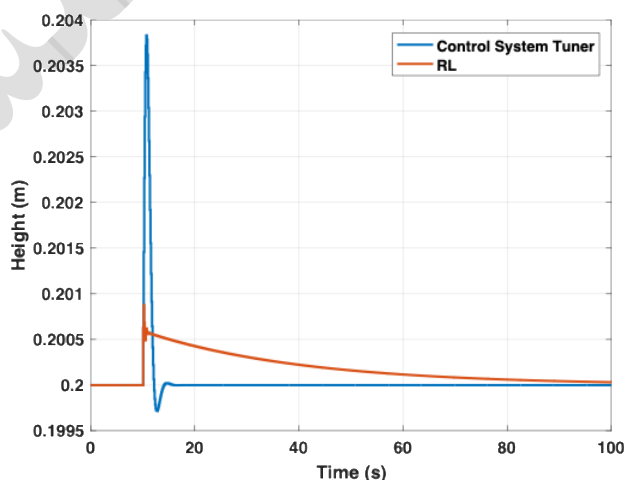


Figure 5. Comparison of the performance of the two controllers with a 10% change in the canal input.

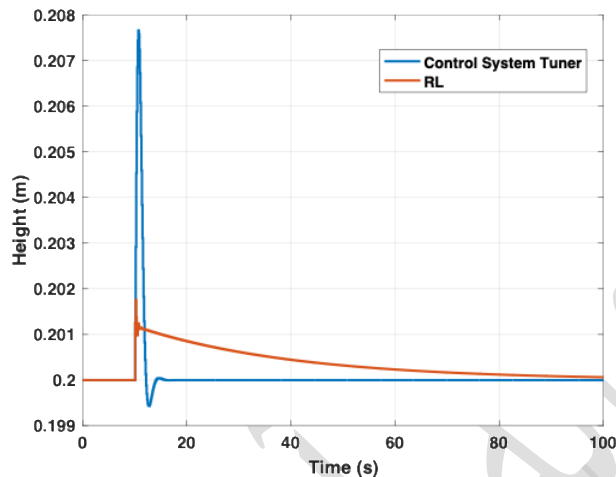


Figure 6. Comparison of the performance of the two controllers with a 20% change in the canal input.

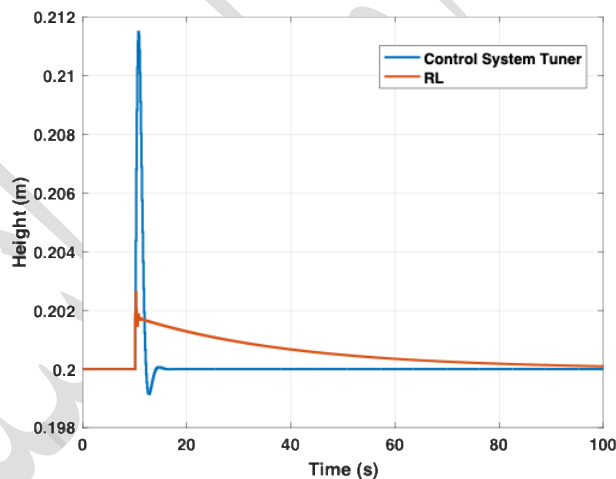


Figure 7. Comparison of the performance of the two controllers with a 30% change in the canal input.

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 تنظیم‌شده با RL عملکرد به مراتب برتری را از خود نشان داد که دارای خطای انحراف عمق کمتر و زمان پاسخ‌دهی به طور محسوس کوتاه‌تر 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 مشاهده‌شده با کنترلر RL، پنج برابر کوچک‌تر از کنترلر تنظیم‌شده دستی بود که نشان‌دهنده یک پاسخ عملی باثبات‌تر و قابل قبول‌تر است. این عملکرد بهبودیافته کنترلر تنظیم‌شده با RL در تمامی سناریوهای آزمایش‌شده یکسان بود، همان‌طور که به وضوح در شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب برای تغییرات ۲۰ و ۳۰ درصد نشان داده شده است. کنترلر تنظیم‌شده 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-تاخیری توسعه یافته برای کانال EIR1 در شبکه آبیاری دز با خطای نسبی متوسط ۰/۰۶۶ دقت قابل قبولی 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 به عنوان یک محدودیت مهم شناسایی شد. به طور 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 تنظیم شده 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 قابل توجهی در ثبات و دقت عملکرد دارد. با وجود نتایج موفقیت‌آمیز، این تحقیق 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 پائین 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، ولی برای کاربرد در گستره وسیع‌تری از شرایط عملیاتی نیازمند توسعه‌های بیشتر می‌باشد.

سپاسگزاری

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

پی‌نوشت‌ها

¹ Automatic Irrigation Conveyance Simulation System

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.
- Khaez, 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.
- Schuermans, 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. and 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. & Abdelmeged, 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.

Hybrid Control Framework to Improve Stability and Efficiency in Irrigation Canals Under Various Conditions

Kazem Shahverdi^{1*}, Magid Ghaniee², Reyhaneh Loni³

^{1*}Assistant Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

²Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

³Assistant Professor, Faculty of Governance, Tehran University, Tehran, Iran.

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.

Keywords: Evaluation, Canal, Integrator-Delay Model, Simulation.