



## Integration of Automatic Upstream and Downstream Control Systems with Nonlinear Channel Models: Implementation, Running, and Comparison

Zahra Nourozirad<sup>1</sup> | Kazem Shahverdi<sup>2</sup>  | Hesam Ghodousi<sup>3</sup> 

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Zanjan University, Zanjan, Iran. E-mail: [znorozi1982@gmail.com](mailto:znorozi1982@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](mailto:k.shahverdi@basu.ac.ir)
3. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Zanjan University, Zanjan, Iran. E-mail: [ghodousi@znu.ac.ir](mailto:ghodousi@znu.ac.ir)

### Article Info

**Article type:**  
Research Article

### Article history:

Received 28 April 2023  
Received in revised form  
15 May 2023  
Accepted 14 July 2023  
Published online 12 October 2023

### Keywords:

Canal  
Combination  
Controller  
HEC-RAS  
ICSS  
Nonlinear model

### ABSTRACT

ICSS model has been used in various researches in irrigation canals. Due to the new capabilities of recent versions of the HEC-RAS model and its advanced strategies, this model has also been considered. The combination of upstream and downstream control systems of classical controller with nonlinear channel simulation models (HEC-RAS and ICSS), the way of implement, and the results comparison are the main objectives of this research. The utilization of the rules strategy in HEC-RAS and comparison of the model is the novelty of this research. For this purpose, a controller has been developed for each regulating structure and an operational program has been developed for each turnout in advanced boundary conditions in the Eastern Dez Canal. The results showed that the HEC-RAS model performed very well and showed a lower error value in the upstream control system than the downstream control, and the maximum MAE and IAE were equal to 5.3% and 1.8%, respectively. Also, the water flow is stable most of the time and there are no fluctuations in the water depth. In the ICSS model, almost similar results were observed, so that the upstream control performs better than the downstream control, but there are more depth changes and instability, and the maximum MAE and IAE were obtained as 9.9% and 0.3%, respectively. In terms of discharge delivery indicators, HEC-RAS outperformed ICSS.

**Cite this article:** Nourozirad, Z., Shahverdi, K., & Ghodousi, H. (2023). Integration of Automatic Upstream and Downstream Control Systems with Nonlinear Channel Models: Implementation, Running, and Comparison. *Journal of Water and Irrigation Management*, 13 (3), 769-781. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.358462.1070>





## تلفیق سیستم‌های کنترل بالادست و پایین دست خودکار با مدل‌های غیر خطی کانال: پیاده‌سازی، اجرا و مقایسه

زهرا نوروزی‌راد<sup>۱</sup> | کاظم شاهوردی<sup>۲</sup> | حسام قدوسی<sup>۳</sup>

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: [znorози1982@gmail.com](mailto:znorози1982@gmail.com)

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

۳. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: [ghodousi@znu.ac.ir](mailto:ghodousi@znu.ac.ir)

### اطلاعات مقاله

### چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۷/۲۰

### کلیدواژه‌ها:

تلفیق

کانال

کنترلر

مدل غیرخطی

ICSS

HEC-RAS

در پژوهش‌های مختلف در کانال‌های آبیاری از مدل ICSS، استفاده فراوانی شده است. با توجه به قابلیت‌های جدید نسخه‌های اخیر مدل HEC-RAS و استراتژی‌های پیشرفته‌ای که در آن وجود دارد، این مدل نیز مورد توجه قرار گرفته است. هدف از این پژوهش، تلفیق سیستم کنترل بالادست و پایین دست کنترلر کلاسیک با مدل‌های غیرخطی شبیه‌سازی کانال‌ها (ICSS و HEC-RAS)، نحوه پیاده‌سازی و مقایسه نتایج آن‌هاست. استفاده از راهبرد پیشرفته rules در HEC-RAS و مقایسه آن با دیگر مدل غیرخطی، نوآوری این پژوهش می‌باشد. برای هر سازه تنظیم‌کننده یک کنترلر و برای هر آبگیر یک برنامه بهره‌برداری در شرایط مرزی پیشرفته در کانال دز شرقی توسعه یافت. نتایج نشان داد که مدل HEC-RAS عملکرد مناسبی داشته و در حالت کنترل بالادست مقدار خطای کمتری را نسبت به کنترل پایین دست نشان می‌دهد، به طوری که حداکثر MAE و IAE به ترتیب برابر با ۵/۳ درصد و ۱/۸ درصد به دست آمد و جریان آب در عمده مواقع به حالت پایدار بوده و هیچ‌گونه نوساناتی در عمق آب مشاهده نمی‌شود. در مدل ICSS، نتایج تقریباً مشابهی مشاهده شد، به طوری که کنترل بالادست نسبت به کنترل پایین دست عملکرد بهتری دارد، اما تغییرات عمق و ناپایداری بیش‌تری وجود دارد و حداکثر MAE و IAE به ترتیب برابر با ۹/۹ درصد و ۰/۳ درصد به دست آمد. از نظر شاخص‌های تحویل دبی، HEC-RAS نتایج بهتری نسبت به ICSS ارائه کرده است.

**استناد:** نوروزی‌راد، زهرا؛ شاهوردی، کاظم؛ و قدوسی، حسام (۱۴۰۲). تلفیق سیستم‌های کنترل بالادست و پایین دست خودکار با مدل‌های غیرخطی کانال:

پیاده‌سازی، اجرا و مقایسه. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۳ (۳)، ۷۶۹-۷۸۱. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.358462.1070>



## ۱- مقدمه

مدل HEC-RAS یکی از مدل‌های شبیه‌سازی مجاری روباز است که در مهندسی رودخانه به‌وفور مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما در مسائل مربوط به بهره‌برداری از کانال‌ها کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. در نسخه‌های اخیر این مدل، قابلیت‌های مختلفی به آن اضافه شده است که امکان شبیه‌سازی هر نوع سازه با هر نوع شرط مرزی را فراهم نموده است. به‌علاوه، امکان لینک آن با زبان‌های برنامه‌نویسی نیز فراهم شده است. یکی از مدل‌های هیدرولیکی که در پژوهش‌های مربوط به بهره‌برداری، بهینه‌سازی و کنترل کانال‌ها، به‌ویژه در ایران، مورد استفاده فراوان قرار گرفته است، مدل ICSS<sup>۱</sup> می‌باشد که یک مدل غیرخطی بوده و شکل کامل معادلات سنت و نانت (SVE)<sup>۲</sup> را حل می‌کند.

مدل ICSS جهت خودکارسازی کنترل سطح آب مورد استفاده قرار گرفته است و با توسعه الگوریتم مبتنی بر هوش مصنوعی به زبان فرترن و اضافه کردن آن به ICSS، یک مدل جدیدی توسعه یافته است (Shahverdi and Monem, 2015). ویژگی اصلی این مدل، که در نسخه اولیه وجود ندارد، این است که در هر گام زمانی اطلاعات را ذخیره کرده و در گام زمانی بعدی از آن استفاده می‌کند. این مدل جهت برنامه‌ریزی تحویل و توزیع آب در سیستم کنترل بالادست با روش یادگیری تقویتی (Reinforcement Learning) RL تلفیق شد و در کانال‌های دز شرقی و عقیلی شرقی مورد آزمون و ارزیابی قرار گرفت (Shahverdi et al., 2016). بهره‌برداری دستی کانال عقیلی شرقی با استفاده از مدل ICSS در شرایط مختلف بهره‌برداری مانند شرایط عادی و شرایط کمبود آب مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور، گزینه‌های مختلف بهره‌برداری تعریف و با ICSS شبیه‌سازی شد. روش بهره‌برداری برحسب درخواست با استفاده از ICSS در کانالی در استان خوزستان در ایران پیاده‌سازی شد و با توافق بین مدیر کانال و مصرف‌کنندگان، درخواست هر یک از آن‌ها تعیین گردید. سپس، کانال مورد نظر با توجه به درخواست‌های مذکور، شبیه‌سازی شد و نتایج آن مثبت ارزیابی گردید (Shahverdi 2015).

مدل ریاضی درجه سالونی در ICSS توسعه یافت و به‌عنوان یک شرط مرزی جدید با استفاده از هشت زیربرنامه به آن اضافه شد. برای این منظور، کلیه زیربرنامه‌ها در ICSS که یک برنامه متن باز می‌باشد، به زبان فرترن برنامه‌نویسی شد (Naghaei et al., 2016). بهینه‌سازی الگوهای بهره‌برداری، موضوع پژوهش دیگری است که با استفاده از ICSS و در تلفیق با آن انجام شده است. الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان در دو حالت کمبود آب و بدون کمبود مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور، الگوریتم جامعه مورچگان در برنامه ICSS به زبان فرترن برنامه‌نویسی شد و به‌عنوان زیربرنامه جدید به آن اضافه گردید (Fateme et al., 2020). لازم به ذکر است که علاوه بر پژوهش‌های بالا، مطالعات مختلف دیگری نیز با استفاده از ICSS انجام شده است. نکته اصلی و مشترک در تمام پژوهش‌ها این است که در اکثر آن‌ها زیربرنامه جدیدی به ICSS با استفاده از زبان برنامه‌نویسی فرترن اضافه شده است. در برخی موارد نیز با سایر زبان‌های برنامه‌نویسی تلفیق شده است که پیچیدگی زیادی دارد.

مدل HEC-RAS به‌عنوان یک مدل هیدرولیکی کاربردی که معادلات سنت و نانت را حل می‌کند، به‌طور گسترده‌ای در مطالعات مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است. در نسخه‌های اخیر آن، امکان تلفیق HEC-RAS با زبان‌های برنامه‌نویسی فراهم شده است (Shahverdi and Talebmorad, 2023). هرچند که استفاده از آن در کانال‌های آبیاری اندک می‌باشد. جهت افزایش راندمان و کاهش تلفات آب در شبکه آبیاری شیب‌آب در دشت سیستان، مدل HEC-RAS جهت ارزیابی کانال مورد استفاده قرار گرفته است و نتایج حاصل، حاکی از آنست که شاخص‌های مختلف مدیریتی مانند عدالت، کفایت، راندمان و پایداری بهبود یافته‌اند. در HEC-RAS، شرایط مرزی پیشرفته‌ای وجود دارد که یکی از آن‌ها، شرط مرزی کنترل ارتفاع سطح آب<sup>۳</sup> است که برای کنترل سازه‌های تنظیم‌کننده در کانال دز شرقی مورد استفاده قرار

گرفته و ارزیابی شده است. نتایج نشان داد که شرط مرزی مذکور قابلیت خوبی در کنترل سطح آب دارد (Mollazeynali and shahverdi, 2022). مزیت اصلی HEC-RAS نسبت به ICSS این است که هر نوع شرط مرزی و برنامه‌نویسی به‌سادگی قابلیت تلفیق با آن را دارد و نیاز به آشنایی با ساختار برنامه اصلی آن نیست. در صورتی که در ICSS زیربرنامه‌های مختلفی باید به آن اضافه شود و قبل از آن، باید با ساختار و نوع برنامه‌نویسی با آن آشنا شد. لازم به ذکر است که تمامی پژوهش‌های مورد اشاره انجام شده با ICSS، با سهولت بیشتر در HEC-RAS قابل انجام است. با این حال، متن باز بودن ICSS یک مزیت مهم و کاربردی به‌شمار می‌رود. با توجه به توسعه کاربرد HEC-RAS نیاز است تا مقایسه‌ای بین این دو برنامه صورت بگیرد.

جهت کنترل سازه‌های تنظیم، دو روش کنترل بالادست و پایین‌دست وجود دارد که به‌صورت کنترل محلی نزدیک یا دور قابل انجام است. الگوریتم کنترل کلاسیک (یعنی PID) به‌عنوان یکی از ساده‌ترین کنترلرها، با دریافت ورودی و مقایسه آن با مقدار هدف، خروجی عمل کنترل را محاسبه می‌کند که در پژوهش‌های مختلف در مقیاس آزمایشگاهی و کانال واقعی مورد استفاده قرار گرفته است (Shahverdi and Monem, 2012). روش هوش مصنوعی با روش اینترنت اشیا تلفیق شد و به‌عنوان یک مدل جدید در شبکه کانال‌ها، مورد آزمون و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که رویکرد مورد استفاده به‌طور قابل ملاحظه‌ای منجر به بهبود عملکرد می‌شود (Ren et al., 2021). با تلفیق مدل HEC-RAS با MATLAB یک مدل کنترلی ترکیبی جدیدی توسعه یافت که مدل‌های مذکور به‌طور هم‌زمان و خودکار اجرا می‌شوند. این مدل ترکیبی در دو کانالی مورد آزمون و ارزیابی قرار گرفت و نتایج حاصل موفقیت‌آمیز گزارش شد که منجر به بهبودی عملکرد کانال‌ها می‌گردد (Deshays et al., 2021). با هدف حل مشکل توزیع آب در نواحی آبیاری، براساسبراساس شبیه‌سازی هیدرودینامیکی کانال و افزایش تراز سطح آب در منطقه برگشت آب، مدل توزیع و برنامه‌ریزی آب مبتنی بر عرضه و توزیع آب پیشنهاد شد و در یک کانال آبیاری در چین اجرا گردید. نتایج نشان داد که با تنظیم طول محدوده برگشت آب، می‌توان تقاضای آبیاری را در زمان مناسب برآورد نمود ضمن این‌که تعداد بهره‌برداری از سازه‌ها کاهش می‌یابد که از نظر مدیریتی بسیار ایده‌آل می‌باشد (Fan et al., 2023).

اهداف اصلی که در این پژوهش دنبال می‌شود که در مطالعات قبلی مورد توجه قرار نگرفته‌اند، عبارتند از توسعه سیستم کنترل بالادست و پایین‌دست کنترلر کلاسیک در HEC-RAS در یک شرط مرزی پیشرفته در کانال دز شرقی، تشریح روش پیاده‌سازی و اجرای دو مدل HEC-RAS و ICSS و مقایسه نتایج دو مدل در کانال مورد مطالعه. لازم به ذکر است که با آنکه ICSS مورد استفاده فراوانی قرار گرفته است، اما اطلاعات مدون و کاملی از نحوه مدل کردن کانال در آن وجود ندارد. در این پژوهش، این موضوع نیز مورد توجه قرار گرفته است. برای رسیدن به اهداف فوق، مدل‌های مربوطه با جهت کنترل بالادست و پایین‌دست در HEC-RAS تهیه شد و با تعریف سناریوهای مختلف بهره‌برداری، شبیه‌سازی، ارزیابی نتایج و مقایسه نتایج دو مدل HEC-RAS و ICSS انجام شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- HEC-RAS

در شکل (۱)، نمونه مدل‌سازی و تلفیق کنترلر با HEC-RAS نشان داده شده است. که شامل سه پنجره اصلی بوده و با شماره‌های ۱-۳ نشان داده شده است و به‌ترتیب پنجره اصلی، پنجره تعریف شرایط هندسی و پنجره تعریف شرایط مرزی می‌باشد. با استفاده از پنجره دو تمامی شرایط هندسی به‌علاوه افزودن سازه‌های کنترل و تنظیم (پنجره ۱-۲) قابل انجام است. در پنجره ۱-۳ انواع شرایط مرزی قابل مشاهده است. یکی از مهم‌ترین شرط‌های مرزی در پنجره ۲-۳ نشان داده

شده است (شرط مرزی Rules). در این پژوهش، کنترلر کلاسیک در این شرط مرزی و با استفاده از عملگرهای مختلفی که در آن وجود دارد کدنویسی انجام شد. برای سازه‌های تنظیم‌کننده کنترلر کلاسیک پیاده‌سازی شد و برای آبگیرها، الگوی تغییرات دبی در زمان‌های مختلف یک برنامه تحویل آب تعریف شد که نمونه آن بر روی شکل (۱) (پنجره ۲-۳) قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پیاده‌سازی هر نوع شرط مرزی با هر پیچیدگی HEC-RAS قابل انجام است بدون این‌که نیاز به تغییری در ساختار برنامه اصلی وجود داشته باشد. همچنین، نیاز به هیچ‌گونه اطلاع از فلسفه برنامه‌نویسی آن نمی‌باشد. بنابراین، تلفیق کنترلر با آن به سهولت انجام می‌شود.

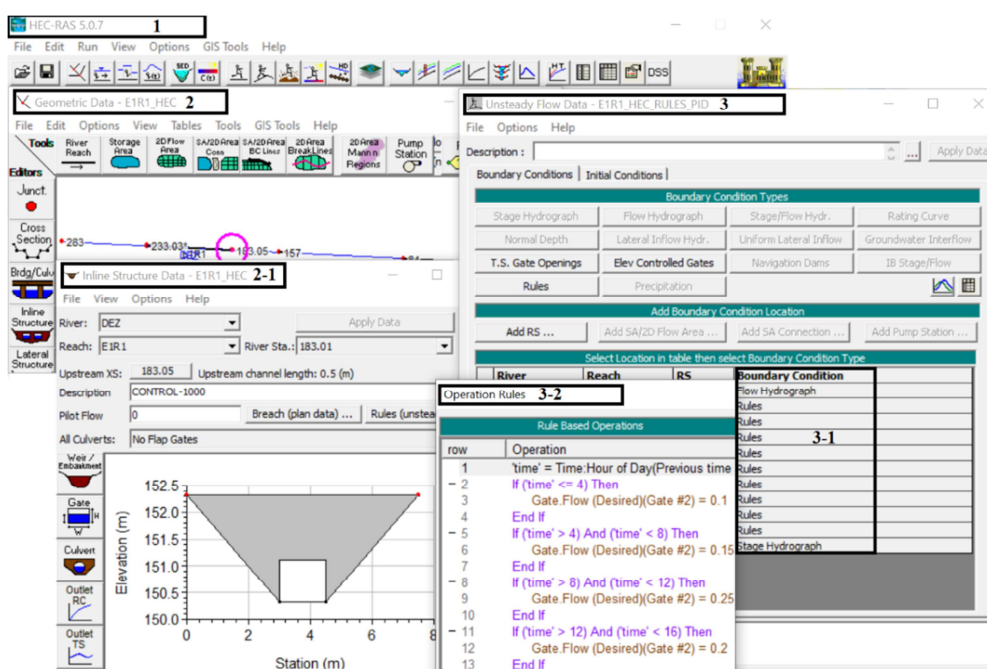


Figure 1. Implementing the controller in HEC-RAS, including regulators and turnouts coding

## ICSS - ۲-۲

در این بخش، نحوه تلفیق ICSS، که یک شبیه‌ساز متن-باز می‌باشد، با کنترلر با تفصیل تشریح شده است. به جز برخی فایل‌های موردنیاز که در مسیر این برنامه قرار می‌گیرد و نیازی به تغییری در آن‌ها وجود ندارد، دو فایل متنی RCHN و ICSS.REP باید متناسب با شرایط هندسی و هیدرولیکی کانال مورد مطالعه تهیه شود که در مقایسه با HEC-RAS تا حدودی مشابه پنجره‌های دو و سه می‌باشند.

برای هر سازه تنظیم‌کننده و آبگیر یا هر سازه دیگری در داخل کانال دو ماتریس در فایل RCHN وجود دارد که نشان‌دهنده شرایط مرزی بالادست یا UBC و شرایط مرزی پایین دست یا DBC می‌باشند. فایل RCHN حاوی تمام اطلاعات لازم برای توصیف کانال‌ها و سازه‌های هیدرولیکی است که در آن، ردیف داده‌ها دارای فرمت آزاد است و فقط باید ترتیب قرارگیری آن‌ها رعایت شود. در هر بازه از کانال موردنظر، ابتدا اطلاعات مطابق با جدول (۱) درج شده و سپس ماتریس‌های شرایط مرزی قرار می‌گیرد (جدول‌های ۲ و ۳). این ساختار برای کل بازه‌ها باید تکرار شود. در جدول (۱)، برخی پارامترها باید همیشه به صورت یک عدد قرار گیرد و نیاز به تغییر آن‌ها نیست. در مورد سایر پارامترها، توضیحات مربوطه در جدول ارائه شده است. در جدول‌های (۲) و (۳) نیز برخی از آرایه‌ها صفر می‌باشد و نیاز به تغییر یا اختصاص

مقدار خاصی به آن‌ها نیست. مدل ICSS در طول اجراء از این آرایه‌ها استفاده کرده و مقادیر شبیه‌سازی را در آن‌ها ذخیره می‌کند. برخی آرایه‌ها نیز، پارامترهای هندسی می‌باشند. سایر پارامترها نیز مربوط به کنترلر می‌باشند که در ادامه به آن‌ها اشاره شده است. این برنامه به دو صورت دستی و خودکار قابل اجرا است که با استفاده از پارامترهای automatic/non-automatic و dependent/independent قابل تعریف است. همچنین، جهت کنترل نیز به صورت بالادست یا پایین‌دست با گزینه automatic direction قابل تعریف است.

**Table 1.** RCHN file format definition

1	Total Number of Canals	The total number of canals appears only once at the top of the file.
The following data is repeated for each canal until the total number of canals as indicated in 1 is reached		
2	Canal Number	Number of the current canal
3	Canal Order	Order in which calculations are carried out, usually same as the Canal Number
4	Total Number of Reaches	The following data is repeated for each reach until the total number of reaches as indicated in 4 is reached
5	Hydraulic and Hydrologic Time Increment	Hydraulic and Hydrologic time increments are specified for this canal both in a row
6	Reach Number	Number of the current reach [Length of Reach] indicates the total reach length from U/S to D/S structures. [No. of Nodes] is the number of computational nodes between U/S and D/S. [Type of dx Calculations] indicates how the node spacing is calculated. Three options are available as below.
7	[Length of Reach] [No. of Nodes] [Type of dx Calculation] [No. of Reach Parameters] [FSL]	<ol style="list-style-type: none"> <li>Evenly spaced throughout the reach</li> <li>Evenly spaced in two sections throughout the reach</li> <li>User specified</li> </ol> [No. of Reach Parameters] indicates the total number of reach parameters for the spacing of the nodes. For option 1 this value is always 0. Option 2 value is always 2. Option 3 value should always have an equal node number. [Reach Parameters] only required if [No. of Reach Parameters] is not zero. [FSL] indicates the full supply level of the canal. (Depth)
8	[U/S Bottom Elevation] [D/S Bottom Elevation]	[U/S Bottom Elevation] is the elevation of the canal bottom at the U/S end of the reach. [D/S Bottom Elevation] is canal bottom elevation at the D/S end of the reach.
9	[Channel Geometry Index]	A '1' in the channel geometry index indicates that the geometry of the channel will be specified using polynomial equations. The coefficients for this equation will be entered below.
10	[A] [B] [C] [D]	Area coefficients as $AREA = A + By + Cy^2 + Dy^3$
11	[A] [B] [C] [D]	Top width coefficients as $TOP WIDTH = A + By + Cy^2 + Dy^3$
12	[A] [B] [C] [D]	Perimeter Coefficients as $PERIMETER = A + By + Cy^2 + Dy^3$
13	[B] [C] [D]	Differentiated Area Coefficients as $dAREA = B + Cy + Dy^2$
14	[B] [C] [D]	Differentiated Top width Coefficients as $dTOP WIDTH = B + Cy + Dy^2$
15	[B] [C] [D]	Differentiated Perimeter Coefficients as $dPERIMETER = B + Cy + Dy^2$
16	[Roughness Index]	is always 2
17	[Number of Roughness Parameters]	is always 2
18	[Manning 'n' Value] [2.000000]	Manning coefficient and number 2.000000 always
19	[Distributed Lateral Inflow]	set to 0.00 if there is no inflow
20	[Distributed Lateral Inflow Index]	set to 2
21	[Seepage Index]	set to 2
22	[Number of Seepage Parameters]	set to 3
23	[Seepage Parameter 1] [Seepage Parameter 2] [Seepage Parameter 3]	included but not implemented
24	[Precipitation Index]	set to 1
25	[Number of Precipitation Parameter]	set to 3
26	[Precipitation Parameter 1] [Precipitation Parameter 2] [Precipitation Parameter 3]	included but not implemented
27	[Evaporation Index]	set to 1
28	[Number of Evaporation Parameter]	set to 3
29	[Evaporation Parameter 1] [Evaporation Parameter 2] [Evaporation Parameter 3]	set to 0
30	[Other Distributed Lateral Inflow/Outflow Index]	set to 1
31	[Number of distributed flow parameters]	set to 3
32	[distributed parameter 1] [distributed parameter 2] [distributed parameter 3]	set to 0
33	[Satisfactoriness of the Downstream Boundary Condition]	2= Unsatisfactory 1= Satisfactory
34	[Satisfactoriness of the Upstream Boundary Condition]	2= Unsatisfactory 1= Satisfactory
35	[Name of the UBC structure Reach 1.	[Name of DBC structure reach number greater than reach 1]. It should have 30 characteristics maximum.
36	[Number of Parameters in the UBC Matrix]	Based on the structure type (given in Appendix)
37	[UBC Matrix as defined for each structure]	Based on the structure type (given in Appendix)
38	[Rating Table for UBC index]	set to 2
39	[Storage Reservoir Rating Table Index]	set to 2

در جدول (۴)، تعریف فایل ICSS.REP برای اخذ خروجی‌های موردنظر شامل عمق، بازشدگی و دبی در نقاط مختلف نشان داده شده است که با استفاده از راهنما به صورت طیف رنگی پارامترهای مختلف و تعاریف آن‌ها مشخص شده است. با استفاده از این فایل، ۱۰ فایل خروجی با پسوند prn قابل استخراج است. جهت تلفیق مدل ICSS، باید کد فرتن کنترلر در داخل مدل، نوشته شود. در مقایسه با مدل HEC-RAS، مدل HEC-RAS سهولت بیشتری برای مدل‌سازی داشته و پارامترهای هیدرولیکی زیادی را می‌توان با استفاده از آن استخراج کرد. در صورتی که در ICSS فقط پارامترهای عمق، دبی و بازشدگی محاسبه می‌شوند.

**Table 2.** Matrices of slide gate's boundary conditions, left side (DBC) and right side (UBC)

65				20			
12	2	0	0	12	2	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	Gate width	Maximum gate opening	0	0	0	1-dependent	0
Cd	Cc	0	0	0	0	2-independent	0
0	0	0	1	0	0	0	0
Maximum adjustment	Target depth U.S. of gate YT	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
Minimum gate opening	0	Upstream invert elevation	Downstream invert elevation				
1-dependent	0	0	0				
2-independent	0	Time filter constant (TF)	0				
0	1-automatic 2-non-automatic	0	Kp				
0	0	0	0				
Zdb	Ki	0	0				
0	0	0	0				
Gate dead-band	gate speed (m/mm)	Automatic direction, [1] U.S. [2] D.S.	Depth filter [1] on, [2] off				
Depth dead-band [1] on, [2] off	gate dead-band: [1] on, [2] off	Motor speed [1] on, [2] off	Target depth D.S. of gate (YT)				

**Table 3.** Matrices of turnout's boundary conditions, left side (DBC) and right side (UBC)

44				20			
10	2	2	0	1	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	2	0
0	0	0	Sill height	0	0	0	0
Gate width	Max gate opening	0	Cd	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
2	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

**Table 4.** ICSS.REP file format to gain desired outputs

1 (Number of report, e.g., "1.prn", "2.prn", ...)	0.01 (Time step in hr)	1 (Reach number based on the required parameter)	24 (Parameter number defined based on the RCHN UBC/DBC matrices)
1 (Either 1: produces the report file, or 0: not produces)	1 (Canal number that is 1 always)	1 (Reach number based on the required parameter)	13 (Parameter number defined based on the RCHN UBC/DBC matrices)
4 (Type of data; Depth: 1, Flow: 2, RCHN UBC matrix: 3, RCHN DBC matrix: 4, no data: 0)	1 (Canal number that is 1 always)	2 (Reach number based on the required parameter)	
4 (Type of data; Depth: 1, Flow: 2, RCHN UBC matrix: 3, RCHN DBC matrix: 4, no data: 0)			

## ۲-۳- کنترلر کلاسیک

اجزای سامانه کنترلر کلاسیک شامل کنترل تناسب (P)<sup>۵</sup>، انتگرالی (I)<sup>۶</sup> و دیفرانسیلی (D)<sup>۷</sup> است که به ترتیب مقدار تغییر

در بازشدگی دریاچه را متناسب با میزان انحراف، میانگین تغییرات عمق آب از عمق هدف در صورت خارج بودن سطح آب از محدوده مجاز عمق (به صورت درصدی از عمق هدف در نظر گرفته می شود) و سرعت حرکت دریاچه جهت کنترل نوسان های شدید و ناگهانی سطح آب را تنظیم می کنند (Rogers *et al.*, 1998). مجموع کل بازشدگی دریاچه (GO) در هر گام زمانی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود و با مقدار بازشدگی در گام زمانی قبلی جمع می شود.

$$GO = k_p(Y_t - Y) + k_i \int_0^t (Y_t - Y) + k_d \frac{d}{dt}(Y_t - Y) \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن،  $Y_t$  عمق هدف،  $Y$  عمق اندازه گیری شده،  $k_p$  ضریب تناسبی،  $k_i$  ضریب انتگرالی،  $k_d$  ضریب دیفرانسیلی و  $t$  زمان است. در این پژوهش، ثابت های کنترلر با استفاده از سعی و خطا تعیین شد، به طوری که حداکثر و میانگین تغییرات خطا عمق حداقل باشد.

## ۲-۴- کانال پژوهش، گزینه ها و معیارهای ارزیابی

کانال بتنی E1R1 با طول ۲۸۳۰ کیلومتر و دبی تا ۲/۴۷ مترمکعب در ثانیه، دارای سه سازه تنظیم کننده سطح آب و شش سازه تحویل آب در شبکه آبیاری دز در شمال خوزستان واقع شده است. مقطع آن ذوزنقه ای با شیب جانبی ۱/۵، عرض کف ۱-۱/۵ متر، شیب طولی ۰/۰۰۰۱۲ تا ۰/۰۰۰۱۵ است. مشخصات مربوط به تغییرات دبی در ادامه ارائه شده است. در این مطالعه، مدل ریاضی این کانال در ICSS و HEC-RAS برای سیستم های کنترل بالادست و پایین دست تهیه شد. برای بررسی عملکرد کنترلر و شبیه ساز تلفیق شده، تغییرات دبی در ورودی کانال و یکی از آبیگرها (با توجه به جهت کنترل) در دو جهت بالادست و پایین دست استفاده شد. در حالت اول، دبی ورودی به کانال در شروع شبیه سازی یک مترمکعب در ثانیه و دبی آبیگر دوم برابر با صفر می باشد که به ترتیب به ۱/۵ و ۰/۵ مترمکعب در ثانیه به طور ناگهانی افزایش می یابد. پس از ۱۰ ساعت شبیه سازی، دبی ورودی به کانال و دبی آبیگر دوم به ترتیب به ۱/۵ و ۰/۲ مترمکعب در ثانیه کاهش می یابد. بر این اساس، دو سناریو برای کنترل بالادست و پایین دست با ICSS و دو سناریو برای کنترل بالادست و پایین دست با HEC-RAS استفاده از مقادیر مذکور تعریف شد. در حالت دوم، در ساعت های ۰/۱، ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ مقدار دبی به کانال به ترتیب به مقادیر یک، ۱/۲، ۱/۵، ۱/۲ و یک مترمکعب در ثانیه تغییر می یابد و در همان زمان ها، مقدار دبی آبیگر به ۰/۱، ۰/۱۵، ۰/۲۵، ۰/۲ و ۰/۱۲ مترمکعب در ثانیه تغییر می یابد. بر این اساس، دو سناریو برای کنترل بالادست و پایین دست با ICSS و دو سناریو برای کنترل بالادست و پایین دست با HEC-RAS استفاده از مقادیر مذکور تعریف شد. لازم به ذکر است که این سناریوها، براساس مطالعات قبلی و تغییراتی که در آبیگرها اتفاق می افتد، انتخاب شد. کالیبراسیون مدل ها با استفاده از تغییر ضرایب دبی انجام شد و مقادیری که منجر به یکسان شدن نتایج مدل با نتایج واقعی گردید، انتخاب شد. شاخص های حداکثر و میانگین خطای مطلق که به ترتیب با MAE<sup>۱</sup> و IAE<sup>۱</sup> نشان داده می شوند مقدار حداکثر و میانگین انحراف عمق آب از عمق هدف را مشخص می کنند (Clemmens *et al.*, 1998) که به صورت روابط (۲) و (۳) تعریف می شوند. در این روابط،  $D$  طول دوره بهره برداری می باشد. مقدار کم تر نشان دهنده مطلوبیت بیش تر شاخص ها می باشد. شاخص های کفایت (Adequacy) و راندمان (Efficiency) تحویل آب (Molden and Gates, 1990). مبتنی بر دبی آبیگرها بوده و بیانگر دقت تحویل آب می باشند و به ترتیب به صورت روابط (۴) و (۵) تعریف می شوند.

$$MAE = \frac{\max (|Y_t - Y|)}{Y_t} \quad \text{رابطه ۲}$$



$$IAE = \frac{T}{D} \sum_{T=0}^D (|Y_t - Y|) \quad \text{رابطه ۳}$$

$$MPA = \frac{1}{N} \sum_N \frac{1}{M} \sum_M (PA): PA = \frac{QD}{QR} \text{ if } QR > QD, PA = 1 \text{ if } 1 < \frac{QD}{QR} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$MPE = \frac{1}{N} \sum_N \frac{1}{M} \sum_M (PE): PE = \frac{QR}{QD} \text{ if } QR < QD, PE = 1 \text{ if } QR > QD \quad \text{رابطه ۵}$$

در این روابط، MPA شاخص کفایت، MPE شاخص راندمان، M تعداد آبیگرها، QR دبی موردنیاز یا دبی درخواستی در آبیگر M، QD دبی واقعی تحویلی به آبیگر M، N تعداد گام‌های زمانی مناسب در یک دوره تحویل است. مقدار ایده-آل شاخص‌های کفایت و راندمان برابر یک است.

### ۳- نتایج و بحث

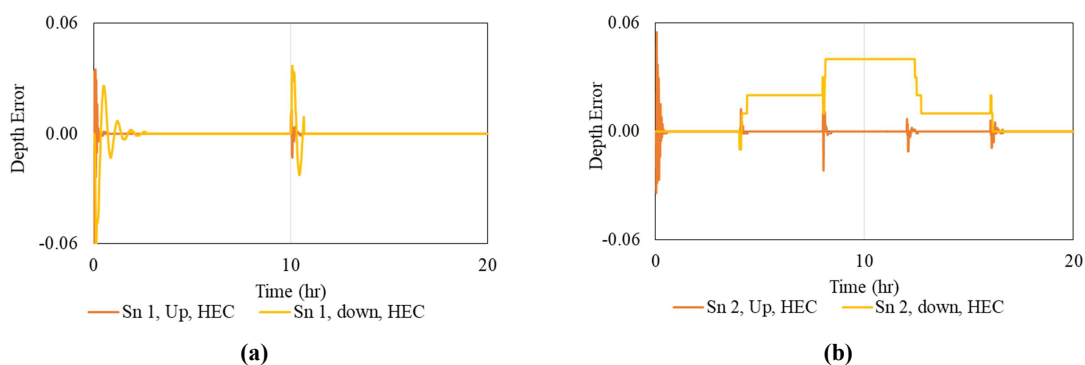
در این پژوهش، تلفیق کنترلر کلاسیک با جهت کنترل بالادست و پایین دست با دو مدل غیرخطی HEC-RAS و ICSS انجام شد و نحوه پیاده‌سازی آن‌ها تشریح گردید. سپس با تعریف گزینه‌های مختلف بهره‌برداری در کانالی در شبکه دز شرقی مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از انجام تلفیق، ضرایب تناسبی، انتگرالی و دیفرانسیلی کنترلر کلاسیک تعیین گردید. برای این منظور، مقادیر مختلف ضریب تناسبی (با صفر در نظر گرفتن سایر ضرایب) انتخاب و بازشدگی دریاچه‌ها با مقادیر انتخاب شده تعیین گردید. مقداری که منجر به حداقل شدن حداکثر و میانگین خطای عمق آب (به عنوان معیار مورد نظر) می‌شود، به عنوان مقدار مناسب و نهایی انتخاب گردید. سپس، مقادیر مختلف ضرایب انتگرالی و دیفرانسیلی با آزمون و خطا بررسی شد و مقادیری که منجر به حداقل شدن نوسانات عمق می‌شوند، انتخاب گردید (جدول ۵). نتایج نشان داد که ضرایب انتگرالی و دیفرانسیلی برابر با ۰/۰۱ و مقادیر مناسب می‌باشند و تغییر اندک در مقدار آن‌ها منجر به ایجاد نوسان در نتایج مدل‌های غیرخطی می‌شود. در ادامه، نتایج این پژوهش براساس، مقادیر ضرایب تناسبی، انتگرالی و دیفرانسیلی مذکور انجام شد.

Table 5. Proportional, integral, and differential coefficients obtained by trial and error

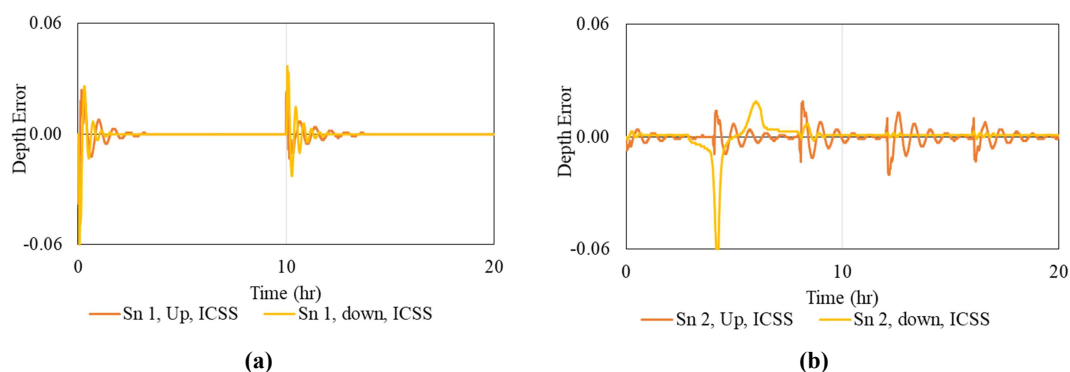
$k_p$	$k_i$	$k_d$	MAE	IAE
0.1			1.75	0.26
0.3			1.42	0.10
0.5	0.01	0.01	1.33	0.06
0.7			1.42	0.05
0.9			1.50	0.04

نتایج خطای عمق در گزینه‌های مورد بررسی با استفاده از HEC-RAS در شکل (۲- الف و ب) و با استفاده از ICSS در شکل (۳- الف و ب) ارائه شده است. در سناریوی یک، تغییرات دبی بزرگ‌تری نسبت به سناریوی دو اعمال شده است. مدل HEC-RAS در سناریوی دو نیز عملکرد مناسبی داشته و قادر بوده تمامی تغییرات ایجاد شده را با کمترین خطا کنترل کند. با آن‌که در برخی زمان‌ها در کنترل پایین دست، مقدار عمق آب را در مقداری متفاوت از عمق هدف تثبیت کرده است، خطای میانگین و حداکثر اندک می‌باشد. نکته مهمی که در نتایج HEC-RAS وجود دارد این است که جریان آب در عمده مواقع به حالت پایدار بوده و هیچ‌گونه نوساناتی در عمق آب مشاهده نمی‌شود. در یک جمع‌بندی کلی، مدل HEC-RAS در هر دو سناریو عملکرد خیلی خوب داشته و در حالت کنترل بالادست مقدار خطای کم‌تری را نسبت به کنترل پایین دست نشان می‌دهد.

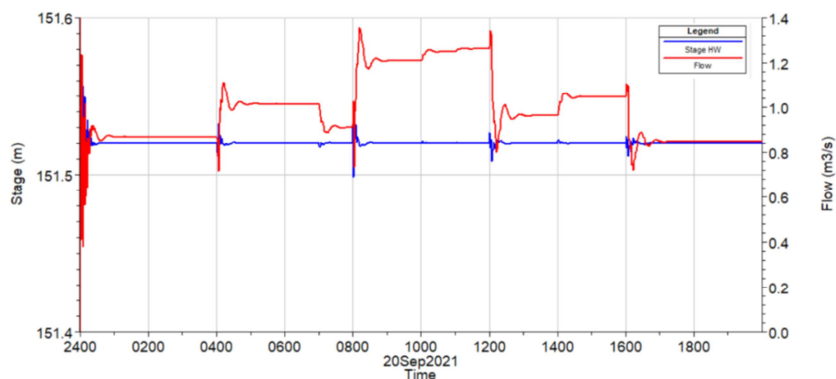
در مدل ICSS، نتایج تقریباً مشابهی با HEC-RAS مشاهده می‌شود، به طوری که کنترل بالادست نسبت به کنترل پایین دست عملکرد بهتری دارد، اما تغییرات عمق و ناپایداری بیشتری مشاهده می‌شود. به عنوان مثال، برای سناریوی یک و کنترل پایین دست، زمان رسیدن به پایداری در ICSS حدود سه برابر آن در HEC-RAS می‌باشد. در سناریوی دو نیز برای هر دو سیستم بالادست و پایین دست، جریان به پایداری کامل نرسیده است و نوسانات هرچند کوچک در آن مشاهده می‌شود. در مقایسه سیستم کنترل بالادست و پایین دست نوسانات در سیستم بالادست بیشتر، اما با دامنه کم تر مشاهده می‌شود. در شکل (۴)، نوسانات سطح آب در HEC-RAS برای سناریوی دو و سیستم کنترل پایین دست نشان داده شده است.



**Figure 2.** Depth errors upstream and downstream of check structure using HEC-RAS with upstream and downstream controller in a) scenario 1 and b) scenario 2



**Figure 3.** Depth errors upstream and downstream of check structure using ICSS with upstream and downstream controller in a) scenario 1 and b) scenario 2



**Figure 4.** Depth and flow variations as the HEC-RAS output in scenario 1 with downstream control system

مقادیر شاخص‌های ارزیابی نیز، بحث‌های فوق را تأیید می‌کند (جدول ۶). در HEC-RAS مقادیر شاخص‌های عمق در کنترل پایین دست بیش‌تر از کنترل بالادست می‌باشد. میانگین تغییرات عمق نیز در آن بیش‌تر است. با مقایسه دو مدل، مشاهده می‌شود که ICSS با کنترل بالادست رفتار بهتری نسبت به HEC-RAS با کنترل بالادست دارد. اما در کنترل پایین دست، نتیجه معکوس بوده و HEC-RAS نتایج بهتری دارد. علت این موضوع در این است که ICSS فقط جریان متغیر تدریجی را حل می‌کند و در پایین دست درجه ممکن است که جریان متغیر سریع اتفاق بیفتد که ICSS قادر به حل آن نیست، اما HEC-RAS قادر است تا جریان متغیر تدریجی و سریع را هم‌زمان حل کند.

Table 6. Performance indicators

	HEC-RAS				ICSS			
	MAE (%)	IAE (%)	MPA	MPE	MAE (%)	IAE (%)	MPA	MPE
Sn 1, up	5.1	0.0	1.000	1.000	3.6	0.1	0.999	1.000
Sn 1, down	5.3	0.1	1.000	0.999	7.2	0.1	0.999	1.000
Sn 2, up	4.6	0.0	1.000	1.000	1.7	0.2	0.993	0.995
Sn 2, down	4.9	1.8	0.994	0.977	9.9	0.3	0.994	0.977

از نظر شاخص‌های تحویل دبی، HEC-RAS نتایج بهتری نسبت به ICSS ارائه کرده است. زیرا، شاخص راندمان در ICSS در تمامی حالت‌ها کم‌تر از یک است. در صورتی که در HEC-RAS در ۷۵ درصد حالت‌ها، مقدار شاخص راندمان برابر با مقدار ایده‌ال به دست آمده است. در مورد شاخص کفایت نیز HEC-RAS نتایج بهتری نشان داده است. البته قابل ذکر است که در همه حالت‌ها هر دو مدل در حالت کلی نتایج مناسبی ارائه کرده‌اند، اما در حالت کلی مقایسه نتایج دو مدل نشان‌گر بهتر بودن نتایج HEC-RAS می‌باشد. ضمن این که مدل‌سازی با آن نیز بسیار ساده‌تر از مدل‌سازی با ICSS است. با آنکه پژوهش‌های مختلفی با ICSS، به‌ویژه در زمینه خودکار سازی سازه‌ها انجام شده است، به نظر می‌رسد که HEC-RAS را با توجه به قابلیت‌هایی که در نسخه‌های جدید ارائه داده است، می‌توان از هر نظر جایگزین ICSS نمود و از آن در پژوهش‌ها و کارهای مهندسی استفاده کرد. قابلیت تلفیق آن با سایر محیط‌ها و برنامه‌ها نیز در مطالعه قبلی مورد تأیید قرار گرفته است (Shahverdi and Talebmorad, 2023). تهیه نسخه تحت ویندوز ICSS می‌تواند آن را قابل رقابت با HEC-RAS در مسائل کنترلی و بهینه‌سازی در زمینه مهندسی آب کند که پژوهش‌هایی در این زمینه در حال انجام است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

با توجه به قابلیت‌های جدید نسخه‌های اخیر مدل HEC-RAS و استراتژی‌های پیشرفته‌ای که در آن وجود دارد، این مدل مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، سیستم کنترل بالادست و پایین دست کنترلر کلاسیک در HEC-RAS و ICSS در یک شرط مرزی پیشرفته در کانال دز شرقی با تشریح روش پیاده‌سازی و اجرا توسعه یافت. نتایج دو مدل در کانال مورد مطالعه مقایسه شد. نتایج نشان داد که مدل HEC-RAS عملکرد خیلی خوب داشته و در حالت کنترل بالادست مقدار خطای کم‌تری را نسبت به کنترل پایین دست نشان می‌دهد و حداکثر MAE و IAE به ترتیب برابر با ۵/۳ درصد و ۱/۸ درصد به دست آمد. همچنین، جریان آب در عمده مواقع به حالت پایدار بوده و هیچ‌گونه نوسانی در عمق آب مشاهده نمی‌شود. در مدل ICSS، نتایج تقریباً مشابهی مشاهده شد. به طوری که کنترل بالادست نسبت به کنترل پایین دست عملکرد بهتری دارد، اما تغییرات عمق و ناپایداری بیش‌تری وجود دارد و حداکثر MAE و IAE به ترتیب برابر با ۹/۹ درصد و ۰/۳ درصد به دست آمد. از نظر شاخص‌های تحویل دبی، HEC-RAS نتایج بهتری نسبت به ICSS ارائه کرده است. قابل ذکر است که هر دو مدل نتایج مناسبی ارائه کرده‌اند، هر چند عملکرد HEC-RAS بهتر

می‌باشد و مدل‌سازی با آن نیز ساده‌تر است. با آنکه مطالعات مختلفی با ICSS، به‌ویژه در زمینه خودکارسازی سازه‌ها، انجام شده است، به‌نظر می‌رسد که HEC-RAS را می‌توان از هر نظر جایگزین ICSS نمود. عمده مزیت ICSS نیز در دسترس بودن متن برنامه است.

## ۵- پی‌نوشت‌ها

1. Irrigation Canal System Simulation
2. Saint-Venant Equations
3. Elevation controlled gates
4. Proportional- Integral-Derivative
5. Proportional
6. Integral
7. Differential
8. Maximum Absolute Error
9. Integral of Absolute Magnitude Error

## ۶- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

## ۷- منابع

- 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.
- Deshays, R., Segovia, P., & Duviella, E. (2021). Design of a MATLAB HEC-RAS Interface to Test Advanced Control Strategies on Water Systems. *Water*, 13(6), 763.
- Fan, Y., Chen, H., Gao, Z., Fan, Y., Chang, X., Yang, M., & Fang, B. (2023). Water distribution and scheduling model of an irrigation canal system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 209, 107866.
- 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), 1-10.
- 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)
- Naghaei, R., Monem, M. J., & Hashemy Shahedany, S. M. (2016). Evaluating Various Hydraulic and Operation Conditions of Lopac Gate and Developing its Mathematical Model in Accordance with the ICSS Hydrodynamic Model. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 10(1), 24-35. (In Persian)
- Ren, T., Niu, J., Cui, J., Ouyang, Z., & Liu, X. (2021). An application of multi-objective reinforcement learning for efficient model-free control of canals deployed with IoT networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 182, 1030.
- Shahverdi, K. (2015). Development of on-request Operation System for Irrigation Networks Using Reinforcement Learning Algorithm (Case Study: East Aghili Canal). Ph.D., Tarbiat Modares University, Tehran.
- 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.
- Shahverdi, K., & Talebmorad, H. (2023). Automating HEC-RAS and Linking with Particle Swarm Optimizer to Calibrate Manning's Roughness Coefficient. *Water Resources Management*, 1-19.