



Calibration of Hydraulic Structure Discharge Coefficients by Integrating Firefly Optimizer and HEC-RAS Simulator in Python Environment

Kazem Shahverdi,^{1*}  Fereshteh Bahramifard,²  Hesam Ghodousi,³ 

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 Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: fdhramyfrd@gmail.com
3. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: Ghodousi@znu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 07 October 2025
Revised 08 November 2025
Accepted 11 December 2026
Available online 22 December 2025

Keywords:

Discharge Coefficient,
Firefly Algorithm,
HEC-RAS,
Optimization, Python.

ABSTRACT

Research Topic: Accurate hydraulic modeling is essential for the optimal management of irrigation networks.

Objective: This research aimed to develop an automated method for calibrating the discharge coefficients of structures in the HEC-RAS model. To this end, an innovative computational framework based on the Firefly Algorithm and using the Python programming language was created, which automatically controls the HEC-RAS software through its Application Programming Interface (API).

Method: In this study, 9 discharge coefficients related to three regulatory structures and six offtake structures in the E1R1 canal of the Dez irrigation network were optimized. The objective function was defined as minimizing the Mean Absolute Error between the simulated water depth in HEC-RAS and the target depth (design depth). The algorithm was executed with a population size of 10 over 35 iterations.

Results: Quantitative results demonstrated that the proposed method achieved high accuracy, with the final mean absolute error reaching 0.016 meters across 10 independent runs. Sensitivity analysis performed on the optimized discharge coefficients revealed that the downstream offtake structures had minimum discharge coefficient values of 0.32 and 0.31 respectively, while a key regulatory structure had a maximum discharge coefficient of 0.70. The discharge coefficients of the other structures converged within an intermediate range (0.47 to 0.63), indicating the existence of multiple optimal combinations to achieve the desired accuracy.

Conclusions: This research shows that the integration of HEC-RAS with metaheuristic algorithms can serve as an efficient and precise tool for the automated calibration of hydraulic models.

Cite this article: Shahverdi, K., Bahramifard, F., Ghodousi, H. (2026). Calibration of Hydraulic Structure Discharge Coefficients by Integrating Firefly Optimizer and HEC-RAS Simulator in Python Environment. *Journal of ECOHYDROLOGY*, 12(4), 1050-1067. <http://doi.org/10.22059/ije.2026.408542.1901>



© Kazem Shahverdi, Fereshteh Bahramifard, Hesam Ghodousi.
Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ije.2026.408542.1901>

Introduction

In hydraulics and water management, the discharge coefficient of structures plays a very important role in controlling water levels and regulating flow. This coefficient, which represents the structure's ability to convey or control water flow, does not remain constant over time and changes under the influence of numerous factors such as wear and tear, improper performance of control and regulation equipment, erosion, sedimentation, and seasonal and climatic changes. So, it is important to calibrate it in order to find the optimal value to ensure accurate water delivery to turnouts and accurate water level control upstream of water level controlling structures. Optimizing the discharge coefficient in irrigation canal water management is a vital and applied research area that aims to increase the accuracy of water measurement and allocation in farmlands. By accurately determining the discharge coefficient of hydraulic structures such as gates and weirs, the flow rate can be estimated with less error, which in turn leads to fairer water distribution, reduced losses, increased irrigation efficiency, and ultimately, sustainable use of limited water resources. Meta-heuristic optimization methods play a decisive role in the accurate estimation of the discharge coefficient of hydraulic structures due to their unique ability to solve complex and nonlinear optimization problems. Unlike optimizing one structure discharge coefficient that could be done using simple theoretical formulas and an optimizer, optimizing structures' discharge coefficients in an irrigation canal needs simulating the canal using related models, as simulator. Here, the challenge is simultaneously running of optimizer and simulator that is too difficult for large iterations. As a result, they should be integrated in such cases to do the process automatically. In the last releases of HEC-RAS, the ability of API controller was added that make it possible to be controlled using programming languages. Utilizing this ability in this research, HEC-RAS was integrated with firefly optimizer to calibrate discharge coefficient in irrigation canals and evaluated in a case study.

Purpose

Accurate hydraulic modeling is essential for the optimal management of irrigation networks. This research aimed to develop an automated method for calibrating the discharge coefficients of numerous hydraulic structures, including different types of gates and weirs, in irrigation canal within the HEC-RAS model. To this end, an innovative computational framework was created, based on the Firefly Optimization Algorithm (FA) and implemented using the Python programming language.

Research method

This framework automatically controls the HEC-RAS software through its Application Programming Interface (API). The study focused on optimizing nine discharge coefficients related to three regulating structures and six offtake structures in the E1R1 canal of the Dez irrigation network. The objective function was defined as minimizing the Mean Absolute Error (MAE) between the simulated water depth and the target depth at specified control points. The Firefly Algorithm was executed with a population size of 10 over 35 iterations. Quantitative results demonstrated the high accuracy of the proposed method. The final mean absolute error, averaged over 10 independent runs, reached a remarkably low value of 0.016 meters. This represents a significant 89% improvement in modeling accuracy compared to the initial state.

Results

A sensitivity analysis conducted on the optimal discharge coefficient values revealed distinct patterns. The tail-end offtake structures (numbers 5 and 6) converged to the minimum coefficient values of 0.32 and 0.31, respectively. In contrast, one of the regulating structures (number 2) required the maximum coefficient value of 0.70 for optimal performance. The discharge coefficients for the remaining structures converged within an intermediate range of 0.47 to 0.63. This distribution indicates the existence of an "optimal region" where multiple combinations of parameter values can lead to the desired model accuracy, highlighting the flexibility and robustness of the calibration process.

The key achievements of this research include the successful development of a fully automated calibration framework, a drastic reduction in simulation error, the identification of optimal and critical values for key structures, and the demonstration of a viable optimal parameter space. The primary advantages of the proposed methodology are its reduced dependency on user expertise for calibration,

rapid and reproducible execution, high precision and reliability of results, and its potential for generalization to other irrigation networks and hydraulic models.

Conclusion

This study conclusively shows that the integration of HEC-RAS with metaheuristic optimization algorithms, facilitated by its API, can serve as a highly efficient and precise tool for the automated calibration of hydraulic models. This integrated approach provides water resource managers and engineers with a powerful tool for more accurate simulation and operation of complex irrigation systems, ultimately contributing to improved water distribution equity and conservation. Future work could focus on applying this framework to more complex hydraulic conditions and incorporating additional calibration parameters.

Authors Contributions

KS: Investigation, Methodology, Software, Modeling & Simulation, Formal analysis, Writing original draft. FB: Coding and writing original draft. HGh: Conceptualization, Supervision, Validation, Writing-Review & Editing.

Data Availability Statement

Data available on request from the corresponding authors.

Acknowledgments

The authors would like to thank all participants of the present study.

Ethical considerations

The authors avoided from data fabrication and falsification.

Declaration of generative AI use

All work presented in this manuscript is original. The English and grammar were checked using the Deepseek generative artificial intelligence assistance.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

واسنجی خودکار ضرایب دبی سازه‌های هیدرولیکی با یکپارچه‌سازی بهینه‌ساز کرم شبتاب و شبیه‌ساز HEC-RAS در محیط پایتون

کاظم شاهوردی،^۱ بهرامی فرد فرشته،^۲ حسام قدوسی،^۳

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

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

۳. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: Ghodousi@znu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۵</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۱۷</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۰</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱</p> <p>کلیدواژه‌ها: الگوریتم کرم شبتاب، بهینه‌سازی، HEC-RAS، پایتون، ضریب دبی</p>	<p>موضوع: مدل‌سازی هیدرولیکی دقیق برای مدیریت بهینه شبکه‌های آبیاری ضروری است.</p> <p>هدف: این پژوهش با هدف توسعه یک روش خودکار برای واسنجی ضرایب دبی سازه‌ها در مدل HEC-RAS انجام شد. در این زمینه، نوعی چارچوب محاسباتی نوآورانه مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی کرم شبتاب و با استفاده از زبان پایتون ایجاد شد که از طریق واسط برنامه‌نویسی HEC-RAS (API) را به طور خودکار کنترل می‌کند.</p> <p>روش تحقیق: در این تحقیق، ۹ ضریب دبی مربوط به سه سازه تنظیم‌کننده و شش سازه آبگیر در کانال EIRI شبکه آبیاری دز بهینه‌سازی شد. تابع هدف، کمینه‌سازی میانگین خطای مطلق بین عمق شبیه‌سازی شده HEC-RAS و عمق هدف تعریف شد. الگوریتم با جمعیت ۱۰ و در ۳۵ تکرار اجرا شد.</p> <p>یافته‌ها: نتایج کمی نشان داد روش پیشنهادی به دقت زیادی دست یافته است، به طوری که میانگین خطای مطلق نهایی در ۱۰ اجرای مستقل به ۰/۱۶ متر رسید. تحلیل حساسیت نشان داد سازه‌های آبگیر انتهایی دارای مقادیر ضریب دبی حداقل و به ترتیب برابر با ۰/۳۲ و ۰/۳۱ دارند، در حالی که سازه تنظیم‌کننده دارای مقدار ضریب دبی حداکثر و برابر با ۰/۷ بود. ضریب دبی سایر سازه‌ها در محدوده میانی (۰/۴۷ تا ۰/۶۳) همگرا شدند که بیانگر وجود چندین ترکیب بهینه برای دستیابی به دقت مطلوب است.</p> <p>نتیجه‌گیری: این تحقیق نشان داد که تلفیق HEC-RAS با الگوریتم فراابتکاری می‌تواند به عنوان یک ابزار کارآمد و دقیق برای واسنجی خودکار مدل‌های هیدرولیکی استفاده شود.</p>

استناد: شاهوردی، کاظم؛ بهرامی فرد، فرشته؛ قدوسی، حسام. واسنجی خودکار ضرایب دبی سازه‌های هیدرولیکی با یکپارچه‌سازی بهینه‌ساز کرم شبتاب و شبیه‌ساز HEC-RAS

در محیط پایتون. مجله اکوهیدرولوژی، ۱۲(۴)، ۱۰۵۰-۱۰۶۷.

<http://doi.org/10.22059/ije.2026.408542.1901>

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران. © کاظم شاهوردی، فرشته بهرامی فرد، کاظم قدوسی.



مقدمه

در هیدرولیک و مدیریت آب، ضریب دبی سازه‌ها نقش بسیار مهمی در کنترل سطح آب و تنظیم جریان ایفا می‌کند. روش‌های مبتنی بر رویکردهای تحلیلی (معادلات انرژی - اندازه حرکت) و تجربی برای تخمین دبی و ضریب دبی انواع دریاچه‌های تنظیم مورد استفاده قرار می‌گیرند که با دقت کافی نیز همراه هستند. با این حال، نتایج پژوهش تقیان و همکاران (۱۳۹۰) نشان داد حل توأم معادلات انرژی و مومنتم (که روشی متداول برای تخمین دبی عبوری از دریاچه‌های قطاعی در حالت مستغرق است) به دلیل نادیده گرفتن تلاطم جریان و عدم یکنواختی سرعت پس از دریاچه، عمق استغراق را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند. این خطا به برآورد بیش از اندازه دبی عبوری منجر می‌شود. به منظور کاهش این خطا، کالیبراسیون ضریب فشردگی جریان با استفاده از بهینه‌سازی غیرخطی و تابع هدف کمینه‌سازی مجموع مربعات خطا پیشنهاد شد که برآورد دقیق‌تری از دبی ارائه می‌دهد. از طرف دیگر، روش‌های تحلیلی و تجربی کلاسیک، با همه مزایا و کارایی گسترده‌شان، اغلب بر مفروضات ساده‌کننده‌ای مانند جریان یکنواخت، شرایط ایده‌آل هندسی، یا رفتار مستقل از مقیاس استوار هستند. در شرایط واقعی عملیاتی که پیچیدگی‌هایی مانند آشفتگی‌های شدید، آثار سه‌بعدی، رسوب‌گذاری، تغییرات لزجت، یا هندسه‌های غیراستاندارد وجود دارد، این معادلات ممکن است با خطای قابل توجهی روبه‌رو شوند و ضرایب دبی ارائه‌شده با آن‌ها در یک شبکه آبیاری با مجموعه‌ای از سازه‌ها ممکن است به‌تنهایی پاسخ‌گو نباشند. از این‌رو، علاوه بر روش‌های تحلیلی و تجربی، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی می‌تواند در تخمین دقیق‌تر ضریب دبی مؤثر واقع شوند.

روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری به دلیل توانایی منحصر به فرد در حل مسائل پیچیده و غیرخطی بهینه‌سازی، نقش تعیین‌کننده‌ای در برآورد دقیق ضریب دبی سازه‌های هیدرولیکی ایفا می‌کنند. این روش‌ها با پرهیز از گرفتار شدن در بهینه‌های محلی و جست‌وجوی کارآمد در فضای پاسخ، قادر هستند پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی را با دقت زیاد کالیبره کرده و مدل‌های پیش‌بینی را بهینه‌سازی کنند. برآورد ضریب تخلیه سرریزهای لبه‌تیز مثلثی با زوایای رأس ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۲۸ و ۱۵۰ درجه در شرایط جریان آزاد با استفاده از روش‌هایی مانند برنامه‌نویسی ژنتیک و جنگل تصادفی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد مدل برنامه‌نویسی ژنتیک با ضریب تعیین ۰/۹۷، خطای میانگین مربعات ریشه ۰/۰۳۲ و خطای مطلق میانگین ۰/۰۲۴ بهترین عملکرد را در تخمین ضریب دبی داشته است (قره‌باقی^۱ و قاسملونیا^۲، ۲۰۲۲).

در پژوهشی، یک مدل هوش مصنوعی ترکیبی کارآمد برای پیش‌بینی دقیق پارامترهای هیدرولیکی (از جمله ضریب دبی) سرریزهای متخلخل توسعه داده شده است. با توجه به مکانیسم جریان پیچیده در اطراف سرریزهای متخلخل، این تحقیق از پنج الگوریتم فراابتکاری بهینه‌سازی توزیع نرمال تعمیم‌یافته، الگوریتم بهینه‌سازی کپک مخاطی، الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ و الگوریتم بهینه‌سازی گرگ استفاده شد. این پژوهش بر اساس ۶۵۱۴ داده آزمایشگاهی انجام شد و نشان داد ضریب دبی با دقت زیادی قابل برآورد است (رحمانشاهی^۳ و همکاران، ۲۰۲۴).

در پژوهشی، ارزیابی پنج مدل شامل فرایند گاوسی، مدل‌سازی گروهی داده‌ها، رگرسیون چندجمله‌ای تطبیقی و مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی، ضریب دبی دریاچه‌های قطاعی در شرایط جریان آزاد و مستغرق پیش‌بینی شد. این مطالعه مؤثر بودن مدل‌های مبتنی بر فرایند گاوسی را به عنوان ابزاری دقیق و قابل اعتماد در طراحی هیدرولیکی دریاچه‌های قطاعی تأیید می‌کند (سی‌هاگ^۴ و همکاران، ۲۰۲۲).

در پژوهشی، پیش‌بینی ضریب دبی دریاچه‌های سالونی در شرایط مستغرق و غیرمستغرق با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان و بر اساس تحلیل ابعادی انجام شد. از بین پارامترهای مؤثر شامل نسبت استغراق، نسبت بازشدگی و زاویه بازشدگی، مدل مبتنی بر نسبت استغراق با ضریب همبستگی ۰/۹۹۷ و کمترین خطا به عنوان دقیق‌ترین مدل شناسایی شد و مدل دومتغیره با متغیرهای

نسبت استغراق و نسبت بازشدگی در رتبه دوم قرار گرفت. معادلات ارائه شده برای تخمین ضریب دبی در هر دو حالت فشردگی و بدون فشردگی دارای دقت قابل قبولی بود که برای کاربردهای عملی پیشنهاد شد که از آن استفاده شود (شاهوردی و یاری، ۲۰۲۵). در پژوهشی دیگر، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و روش‌های هوش مصنوعی (رگرسیون فرایند گاوسی و ماشین بردار پشتیبان)، تخمین دقیق‌تر ضریب دبی در نتیجه‌های کشویی در شرایط جریان مستغرق بررسی شد. نتایج پژوهش یادشده نشان داد این روش‌ها نسبت به روابط نیمه تجربی کلاسیک خطای بسیار کمتری دارند. در میان مدل‌های ارائه شده، مدل ماشین بردار پشتیبان دارای دقت و قابلیت اطمینان بسیار بیشتری نسبت به روش‌های تجربی بود (علیرضازاده صدقیانی و همکاران، ۱۴۰۱).

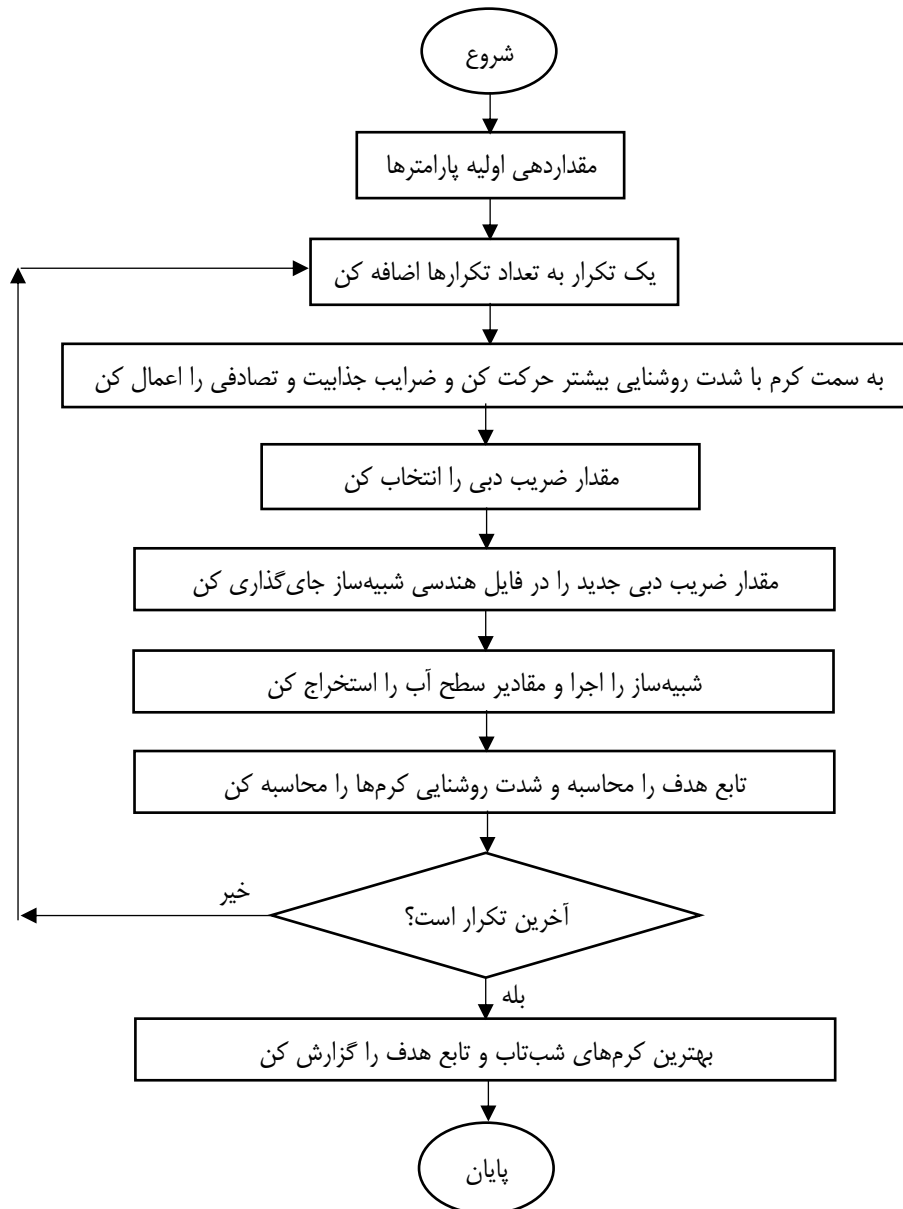
یکی از مشکلاتی که در استفاده هم‌زمان از الگوریتم‌های بهینه‌سازی و مدل‌های ریاضی شبیه‌ساز کانال وجود دارد، اجرای متوالی آن‌ها است که بهینه‌ساز نتایج جست‌وجو را به شبیه‌ساز دهد و نتایج شبیه‌سازی را برای ارزیابی تابع هدف دریافت کند. انجام این عمل به صورت دستی بسیار پیچیده است. به تازگی رابط برنامه‌نویسی کاربردی (API) به نام HECRASController معرفی شده که امکان کنترل پروژه‌ها، تنظیم پارامترها و استخراج نتایج را به صورت خودکار از محیط HEC-RAS فراهم می‌کند. نتایج حاصل از کاربرد این روش‌ها بهبود قابل توجهی در کارایی و دقت شبیه‌سازی‌ها را نشان می‌دهد، به طوری که زمان اجرای پروژه‌های بزرگ را تا ۵۰ درصد کاهش داد و خطاهای دستی را به حداقل رساند. شبیه‌سازی یک شبکه رودخانه‌ای با ده بازه نشان داد اجرای موازی زمان محاسبات را تا ۷۰ درصد کاهش می‌دهد و پروفیل‌های سطح آب با دقت بالا و با خطای کمتر از ۰/۱ متر تولید می‌کند (گودل^۱، ۲۰۱۴؛ گودل، ۲۰۱۶؛ لئون^۲ و گودل، ۲۰۱۶).

واسنجی ضرایب دبی سازه‌ها، معمولاً برای یک سازه واحد و با استفاده از آزمون و خطا صورت می‌گیرد و واسنجی ضریب دبی مجموعه‌ای از سازه‌ها (سازه‌های کنترل و تنظیم) در یک کانال و به صورت یکپارچه به دلیل پیچیدگی آن کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق، بر اساس رابط برنامه‌نویسی کاربردی (API) به نام HECRASController، برنامه‌ای در محیط پایتون برای کنترل و اجرای خودکار HEC-RAS به منظور واسنجی ضریب دبی مجموعه‌ای از سازه‌ها در یک کانال و به صورت یکپارچه، با هدف بررسی تغییرات ضریب دبی سازه‌های آبگیر و تنظیم‌کننده طی زمان و بهینه‌سازی در کانال‌ها، توسعه یافت که نوآوری تحقیق حاضر است. کانال EIR1 از شبکه آبیاری دز به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شد. هدف اصلی، ارائه روشی کارآمد و دقیق برای اصلاح ضرایب دبی بر اساس داده‌های شبیه‌سازی شده توسط HEC-RAS است تا ضمن افزایش دقت مدل‌ها، کارایی سازه‌ها در شرایط عملیاتی مختلف حفظ و بهبود یابد. کاربرد آن در تمام شبکه‌ها و کانال‌های آبیاری است.

مواد و روش‌ها

معرفی چارچوب پیشنهادی

در این پژوهش، نوعی چارچوب مبتنی بر بهینه‌سازی خودکار برای واسنجی ضرایب دبی سازه‌های آبگیر و آب‌بند در کانال E1-R1 شبکه دز با تلفیق مدل HEC-RAS و الگوریتم بهینه‌سازی کرم شبتاب با استفاده از داده‌های بهره‌برداري ۵ روز توسعه داده شد. هدف اصلی، تنظیم بهینه ضرایب دبی مربوط به نه دریچه برای تطابق بهتر نتایج مدل با داده‌های مشاهداتی است. مراحل کار در شکل ۱ نشان داده شده است.



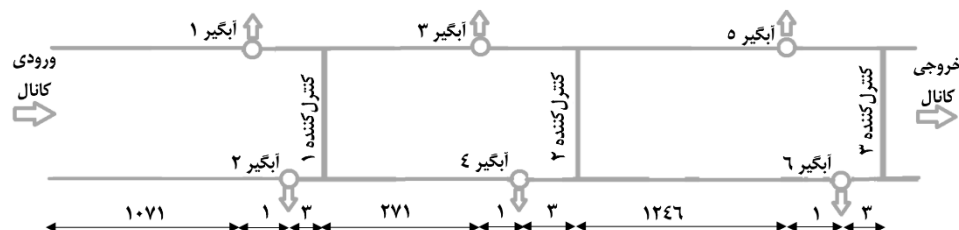
شکل ۱. روندنمای انجام محاسبات در مدل پیشنهادی

ابتدا جمعیتی از کرم‌های شب‌تاب با مقادیر تصادفی برای ضریب دبی (بین ۰/۳ تا ۰/۸) ایجاد می‌شود. سپس، برای هر کرم شب‌تاب، در فایل هندسی پروژه HEC-RAS، مقدار ضریب دبی مربوط به سازه‌ها طی فرایندی که در پایتون کدنویسی شده است، به‌روزرسانی شده و مقادیر جدید جایگزین مقادیر قبلی می‌شوند. در ادامه HEC-RAS فراخوانی شده و شبیه‌سازی انجام می‌شود. پس از اجرای شبیه‌سازی، مقادیر سطح آب در گره‌های مشخصی از مدل استخراج می‌شود و با استفاده از تابع هدف ارزیابی می‌شود. خطای مطلق عمق آب (MAE) بین مقادیر محاسبه‌شده و مقادیر واقعی در بالادست سازه‌های تنظیم‌کننده، که تابع هدف در این تحقیق است، محاسبه می‌شود. کرم‌های شب‌تاب با خطای کمتر (درخشندگی بیشتر) به عنوان راهنما برای حرکت کرم‌های دیگر استفاده می‌شوند. کرم‌های کم‌درخشنده به سمت کرم‌های درخشان‌تر حرکت می‌کنند و در این حرکت، جذابیت و یک عامل تصادفی نیز اعمال می‌شود. این فرایند تکرار می‌شود تا زمانی که شرط توقف تعداد تکرارهای مشخص برآورده شود. در نهایت، نتایج شامل بهترین مقدار ضریب دبی و مقدار تابع هدف نمایش داده می‌شود و نمودارهای مربوط به خطاها و روند بهبود آن‌ها رسم می‌شوند.

برای رسیدن به هدف تحقیق، الگوریتم کرم شب‌تاب^۱ در محیط پایتون برنامه‌نویسی شد و سپس به نرم‌افزار شبیه‌سازی هیدرولیکی HEC-RAS شد. در ادامه، جزئیات مربوط به بخش‌های مختلف این رویکرد شامل مدل‌سازی مسئله، الگوریتم بهینه‌سازی و اتصال HEC-RAS به پایتون مورد بحث قرار می‌گیرد.

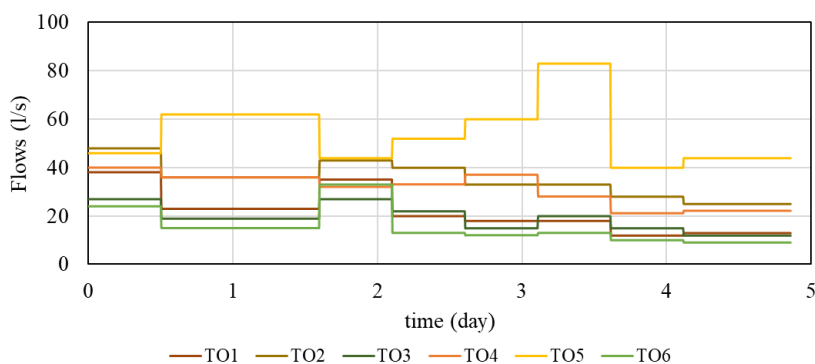
کانال تحقیق

شبکه آبیاری و زهکشی دز، یکی از شبکه‌های بزرگ آبیاری ثقلی کشور است که در استان خوزستان واقع شده و از شمال به تپه‌ماهورهای شمالی دزفول، از جنوب به اراضی هفت‌تپه و رودخانه شاور، از شرق به رودخانه شور (گللال گهنک) و از غرب به رودخانه کرخه محدود می‌شود. این شبکه شامل رودخانه‌های شاور و دز، جاده تهران - خرمشهر، راه‌آهن سراسری و مسیل‌های بالارود و سیاه منصور است و شهرهای دزفول، اندیمشک و شوش را در بر می‌گیرد. سطح زیر کشت خالص آن حدود ۹۳ هزار هکتار است. در این تحقیق، بخشی از کانال E1-R1 با طول ۲۸۳۰ متر، ظرفیت ۲/۴۷ مترمکعب بر ثانیه و شیب ۰/۰۰۱۲ تا ۰/۰۰۱۵ مد نظر قرار گرفت. این کانال دارای ۱۵ سازه تقاطعی (سیفون، چک سیفون و کالورت)، ۲۱ کانال فرعی و ۴۹ سازه آبیگر مزرعه است که آب را بین واحدهای کشت و صنعت و بهره‌برداران محلی توزیع می‌کند. عرض کف کانال در ۱۰۰۳ متر اول ۱/۵ متر و در ادامه ۱ متر است، شیب جانبی آن ۱/۵ به ۱ و ضریب زبری مانینگ آن ۰/۰۱۷ است (شکل ۲).



شکل ۲. شماتیک کانال مورد مطالعه و فاصله سازه‌ها از یکدیگر (بر حسب متر)

با توجه به اینکه سازه‌ها به علت تماس با آب طی زمان مستهلک می‌شوند و شکل مقطع آن‌ها به علت ساییدگی و شرایط محیطی، به‌ویژه در شبکه‌های قدیمی، تغییر می‌کند، در نتیجه ضریب دبی آن‌ها نیز تغییر می‌کند که نیازمند واسنجی و بهینه‌سازی آن‌ها است. همچنین، سازه‌های آبیگر و کنترل‌کننده سطح آب در فاصله کوتاهی از هم قرار دارند؛ در نتیجه روی هم تأثیر می‌گذارند. برای نیل به این هدف، داده‌های بهره‌برداری یک دوره ۵ روزه شامل دبی آبیگرها و دبی کانال، عمق آب، بازشدگی سازه‌ها از شرکت بهره‌برداری کانال دریافت شد. سپس، با استفاده از این داده‌ها و داده‌های هندسی مدل HEC-RAS کانال تهیه شد. شکل ۳ تغییرات دبی هر یک از آبیگرها (محور عمودی) را طی دوره بهره‌برداری ۵ روزه (محور افقی) را نشان می‌دهد (TO نشان‌دهنده آبیگر و شماره جلوی آن بیانگر شماره آبیگر است؛ به عنوان مثال، TO1 یعنی آبیگر شماره ۱). به این معنا که محور عمودی، دبی تحویل داده‌شده برای هر آبیگر در هر روز از دوره بهره‌برداری و محور افقی محور زمان بر حسب روز است. به عنوان مثال، منحنی نارنجی، دبی تحویل داده‌شده به آبیگر ۵ را نشان می‌دهد. در زمان صفر مقدار آن ۴۶ لیتر بر ثانیه بوده که در اواسط روز به مقدار ۶۲ لیتر بر ثانیه افزایش می‌یابد. در اواسط روز بعد به ۴۴ لیتر بر ثانیه کاهش می‌یابد و به همین صورت تغییرات وجود دارد که در شکل قابل مشاهده است. سرانجام، به مقدار نهایی ۴۴ لیتر بر ثانیه در روز آخر می‌رسد. تغییرات سایر آبیگرها نیز به همین صورت قابل تشریح است.



شکل ۳. تغییرات دبی ورودی به مدل HEC-RAS

ضریب دبی سازه‌ها در این مرحله برابر با $0/6$ (ضریب دبی طراحی) در نظر گرفته شد که باید مقدار بهینه آن‌ها با توجه به مستهلک شدن دریچه‌ها با گذشت زمان به دلیل شرایط محیطی و جریان و ... استخراج شود. درخور یادآوری است که ضریب دبی آبگیرها بر اساس برخی روابط شناخته شده برای برآورد ضریب دبی در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر ضریب دبی آبگیرها با تمام روش‌ها تقریباً حدود $0/6$ (با تغییرات جزئی) است که برای یک شرایط جریان محاسبه شده‌اند. با تغییر پارامترهای مؤثر در ضریب دبی، مقدار ضریب دبی نیز تغییر خواهد کرد.

جدول ۱. ضریب دبی محاسبه شده برای آبگیرها برای اساس داده‌های هیدرولیکی و هندسی در کانال مورد مطالعه بر اساس برخی روابط شناخته شده برای برآورد ضریب دبی (C_d : ضریب دبی، C_c : ضریب انقباض، Go : مقدار بازشدگی دریچه، Y_u : عمق آب در بالادست دریچه)

ردیف	مرجع	معادله	آبگیر ۱	آبگیر ۲	آبگیر ۳	آبگیر ۴	آبگیر ۵	آبگیر ۶
۱	رجارتنام ^۱ (۱۹۷۷)	$C_c = C_d = C_c \sqrt{\frac{1}{1 + C_c Go / Y_u}}$ 0.61	0.608	0.606	0.608	0.608	0.609	0.609
۲	گربچت ^۲ (۱۹۷۷)	$C_d = 0.6468 - 0.1641 \sqrt{Go / Y_u}$	0.629	0.622	0.629	0.629	0.632	0.632
۳	اسفرلی ^۳ و هاگر ^۴ (۱۹۹۹)	$C_d = 0.62 - 0.15 \sqrt{Go / Y_u}$	0.597	0.594	0.597	0.597	0.598	0.598
۴	اسفرلی و هاگر (۱۹۹۹)	$C_d = 0.6 / e^{\frac{Go}{Y_u}}$	0.612	0.609	0.612	0.612	0.613	0.613
۵	اسفرلی و هاگر (۱۹۹۹)	$C_d = 0.615 / (1 + 0.3 Go / Y_u)$	0.603	0.597	0.603	0.603	0.606	0.606
۶	سوامی ^۵ (۱۹۹۲)	$C_d = 0.611 \left(\frac{Y_u - Go}{Y_u - 15Go} \right)^{0.072}$	0.608	0.606	0.608	0.608	0.609	0.609

الگوریتم کرم شبتاب

الگوریتم کرم شبتاب یکی از الگوریتم‌های فراکاوشی مبتنی بر رفتار طبیعی کرم‌های شبتاب است که توسط «یانگ» معرفی شد (یانگ^۶، ۲۰۰۹). این الگوریتم از مفهوم جذب نور برای هدایت حرکت و جست‌وجو استفاده می‌کند و کاربردهای گسترده‌ای در مسائل بهینه‌سازی دارد و به عنوان یک راهکار قدرتمند در حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده شناخته می‌شود. الگوریتم کرم شبتاب از نحوه تعامل و جذب نور در کرم‌های شبتاب الگو گرفته است. کرم‌های شبتاب از طریق انتشار و دریافت نور با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند و جذب نور شدیدتر می‌شوند که همین رفتار زیستی، اساس این الگوریتم را تشکیل می‌دهد. مراحل اجرای الگوریتم و کد تهیه شده برای اجرای فرایند در ادامه تشریح می‌شوند.

1. Rajaratnam
2. Garbrecht
3. Sphærli
4. Hager
5. Swamee
6. Yang

۱- تولید جمعیت اولیه از گرم‌های شب‌تاب با موقعیت‌های تصادفی در فضای جست‌وجو

در این مرحله، جمعیت اولیه گرم‌های شب‌تاب به صورت تصادفی در فضای جست‌وجو تولید می‌شوند. هر گرم شب‌تاب نماینده یک راه‌حل کاندید، که نه ضریب دبی برای نه دریاچه دارد، است؛ به این معنا که ابعاد مسئله برابر با تعداد دریاچه‌ها است. اندازه جمعیت اولیه برابر با ۱۰ در نظر گرفته شد. مقادیر اولیه ضرایب دبی به صورت تصادفی بین حد پایین ۰/۳ و حد بالا ۰/۸ انتخاب می‌شوند. تعداد تکرارها بین ۲۰ تا ۴۵ تکرار بود که مقدار مناسب آن استخراج شد.

۲- محاسبه شدت روشنایی و ارزیابی مقدار تابع هدف برای هر گرم شب‌تاب

شدت روشنایی (I) یک گرم شب‌تاب در فاصله r از یک گرم شب‌تاب دیگر طبق رابطه ۱ کاهش می‌یابد:

$$I(r_{ij}) = I_0 e^{-\gamma r_{ij}^2}, \quad r_{ij} = \|x_i - x_j\|^2 \quad (1)$$

که در آن I_0 شدت روشنایی در مبدأ (در فاصله $r_{ij} = 0$)، γ ضریب جذب نور که بین ۰/۱ تا ۱۰ است و در صورت صفر شدن مقدار آن، جذابیت ثابت می‌شود و r_{ij} فاصله بین دو گرم شب‌تاب است که به صورت اقلیدسی محاسبه می‌شود. مسئله اصلی در این تحقیق، یافتن بهترین مقادیر برای ضرایب دبی نه سازه است به گونه‌ای که مجموع خطاهای مطلق میانگین (Mean Absolute Error - MAE) تراز سطح آب پیش‌بینی‌شده توسط HEC-RAS و مقادیر مشاهداتی، به عنوان تابع هدف، در محل سازه‌های آب‌بند به حداقل برسد که به صورت ۲ تعریف شده است.

$$\text{Minimize } F(Cd_1, \dots, Cd_9) = MAE_{18} + MAE_{41} + MAE_{68}$$

$$MAE_x = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |WSE_{x,t}^S - WSE_x^O| \quad (2)$$

که در آن N تعداد گام‌های زمانی مورد استفاده برای محاسبه است، $WSE_{x,t}^S$ تراز سطح آب شبیه‌سازی‌شده در ایستگاه x و گام زمانی t و WSE_x^O تراز سطح آب مشاهداتی در ایستگاه x است. مقادیر ۱۸، ۴۱ و ۶۸ نشان‌دهنده گره محاسباتی مربوط به سازه آب‌بند در HEC-RAS است که داده‌ها برای مقایسه با مقادیر مشاهداتی استخراج می‌شوند. برای هر گرم شب‌تاب در جمعیت، مقدار تابع هدف محاسبه می‌شود. گرم‌های شب‌تاب با مقدار تابع هدف کمتر (بهتر)، روشنایی بیشتری دارند. درخور یادآوری است که در کانال‌های انتقال و توزیع آب دو نوع سازه وجود دارد شامل سازه کنترل‌کننده (یا تنظیم‌کننده) سطح آب در بالادست و سازه‌های آبگیر. در سیستم‌های کنترل بالادست که عمق آب در بالادست سازه تنظیم‌کننده سطح آب کنترل می‌شود و آبگیرها در بالادست آن قرار دارند در صورتی که عمق آب در عمق هدف تثبیت شود و با ثابت بودن عرض دریاچه و ضریب دبی سازه آبگیر، طبق رابطه دبی دریاچه کشویی، دبی عبوری از آبگیر فقط تابع میزان گشودگی آن خواهد بود که به راحتی قابل محاسبه است و میراب می‌تواند آن را تنظیم کند. بنابراین، نکته اصلی کنترل سطح آب است که در تحقیق حاضر و تعداد زیادی از تحقیقات مربوط به کنترل جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳- به‌روزرسانی موقعیت با حرکت گرم‌های کم‌نورتر به سمت گرم‌های پر نورتر

در این مرحله، گرم‌های شب‌تاب با روشنایی کمتر به سمت گرم‌های شب‌تاب با روشنایی بیشتر حرکت می‌کنند. میزان جذابیت (β) بین دو گرم شب‌تاب i و j با توجه به فاصله اقلیدسی r_{ij} و ضریب جذب نور (γ) با رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (3)$$

که β_0 ضریب جذب (مقدار آن معمولاً بین ۰/۵ و دو است) و حداکثر مقدار آن در $r_{ij} = 0$ است. میزان حرکت یک گرم شب‌تاب i به سمت گرم شب‌تاب j (در صورتی که زرخشان‌تر و بهینه‌تر باشد) با رابطه ۴ تعیین می‌شود.

$$x_i = x_i + \beta(x_j - x_i) + \alpha \varepsilon_i \quad (4)$$

که در آن α ضریب نوین تصادفی است که بین صفر و یک قرار دارد و تنوع جست‌وجو را افزایش می‌دهد و از گیر افتادن الگوریتم در بهینه‌های محلی جلوگیری می‌کند و ε_i یک مقدار تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه $[-1, 1]$ است. پس از به‌روزرسانی موقعیت، موقعیت‌های جدید (ضریب دبی‌های جدید) حاصل می‌شوند.

۴- توقف الگوریتم در صورت رسیدن به تعداد تکرار مشخص یا تغییر اندک در پاسخ

فرایند بهینه‌سازی تا زمانی که تعداد تکرارها به حداکثر تکرار برسد، ادامه می‌یابد. در این مطالعه، تعداد تکرار در هفت مرحله ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۴۰ و ۴۵ مورد آزمون قرار گرفت. در نهایت تعداد تکرار ۳۵ به عنوان تعداد تکرار مناسب انتخاب شد. در این تحقیق، الگوریتم کرم شب‌تاب برای یافتن مقادیر بهینه ضریب دبی سه سازه آب‌بند و شش سازه آبگیر (در مجموع نه سازه) در کانال مورد تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. بازه جست‌وجو برای ضریب دبی بین $0/3$ تا $0/8$ در نظر گرفته شد. همان‌طور که در معادلات ارائه شده برای کرم شب‌تاب مشاهده می‌شود، در الگوریتم کرم شب‌تاب سه ضریب ثابت اصلی وجود دارند که رفتار و عملکرد آن را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند. ضریب جاذبیت اولیه مقدار اولیه جاذبیت بین کرم‌های شب‌تاب را تعیین می‌کند. اگر مقدار آن بزرگ باشد، کرم‌ها تمایل بیشتری به حرکت به سمت یکدیگر دارند و همگرایی سریع‌تر می‌شود و اگر مقدار آن کوچک باشد، جاذبیت ضعیف است و کرم‌ها کندتر همگرا می‌شوند و اکتشاف بهتر در فضای جست‌وجو صورت می‌گیرد. ضریب جذب نور نرخ کاهش جاذبیت با افزایش فاصله را کنترل می‌کند. اگر مقدار آن بزرگ باشد، جاذبیت به سرعت با فاصله کاهش می‌یابد و همگرایی محلی و جست‌وجوی موضعی غالب می‌شود و اگر مقدار آن کوچک باشد، جاذبیت در فواصل دورتر بوده و اکتشاف کلی و جست‌وجوی سراسری صورت می‌گیرد. ضریب تصادفی α میزان تصادفی بودن حرکت کرم‌ها را تعیین می‌کند. اگر مقدار آن بزرگ باشد، قدم‌های تصادفی بزرگ‌تر می‌شوند و اکتشاف بهتر می‌شود، اما ممکن است الگوریتم واگرا شود. اگر مقدار آن کوچک باشد، حرکت کرم‌ها منظم‌تر بوده و همگرایی سریع‌تر اتفاق می‌افتد و خطر گیر کردن در بهینه‌های محلی افزایش می‌یابد. معمولاً مقدار آن با گذشت زمان کاهش می‌یابد تا تعادل بین اکتشاف و بهره‌برداری حفظ شود.

مدل شبیه‌ساز

نرم‌افزار HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) نوعی نرم‌افزار قدرتمند برای مدل‌سازی هیدرولیکی جریان در رودخانه‌ها، کانال‌ها و سیستم‌های آبیاری است که توسط مرکز مهندسی هیدرولوژی ارتش ایالات متحده توسعه یافته است. در این تحقیق، با استفاده از اطلاعات هندسی و هیدرولیکی کانال، مدل HEC-RAS کانال مورد مطالعه تهیه شد. برای این منظور، ابتدا پروفیل طولی کانال در بخش هندسه در مدل و سپس مقاطع عرضی در آن تعریف شد. در ادامه، موقعیت و ابعاد سازه‌های تنظیم‌کننده سطح آب و سازه‌های آبگیر تعریف شد و به مدل هندسی اضافه شد. با توجه به اینکه مدل‌سازی هیدرولیکی کانال به صورت جریان غیرماندگار صورت گرفت، شرایط مرزی برای شبیه‌سازی جریان غیرماندگار در مدل تعریف شد. دبی ورودی به کانال به عنوان شرط مرزی ورودی، تنظیم میزان بازشدگی دریچه‌های آبگیر برای تحویل دبی مندرج در شکل ۲، به عنوان شرط مرزی آبگیرها و تنظیم بازشدگی دریچه‌های کنترل‌کننده سطح آب، به عنوان شرط مرزی آن‌ها در نظر گرفته شد. شرط مرزی پایین دست نیز به صورت ارتفاع ثابت انتخاب شد که بر اساس داده‌های واقعی کانال، مقدار ارتفاع ثابت به مدل معرفی شد. این مدل، معادلات سنت و نانت را برای شرایط جریان غیرماندگار حل می‌کند و مقدار سرعت و عمق را در مقاطع عرضی، محاسبه می‌کند.

یکی از ویژگی‌های پیشرفته HEC-RAS، امکان کنترل آن از طریق API (Application Programming Interface) است که به کاربران اجازه می‌دهد به صورت خودکار و برنامه‌ریزی شده با نرم‌افزار تعامل داشته باشند. قابلیت API Controller در HEC-RAS یک رابط برنامه‌نویسی است که به توسعه‌دهندگان و مهندسان امکان می‌دهد تا عملیات مختلف نرم‌افزار را از طریق کدنویسی (معمولاً با پایتون، متلب یا سایر زبان‌ها) کنترل کنند. از آنجا که HEC-RAS می‌تواند از طریق API کنترل شود، می‌توان آن را با الگوریتم‌های یادگیری ماشین و بهینه‌سازی ترکیب کرد. کاهش خطای دستی با حذف عملیات تکراری، صرفه‌جویی

در زمان با اجرای خودکار مدل‌ها به جای انجام دستی هر مرحله و انعطاف‌پذیری بالا با امکان توسعه اسکریپت‌های سفارشی از جمله از مزایای استفاده از API است.

تلفیق بهینه‌ساز و شبیه‌ساز

ساختار کدنویسی و فرایند پیاده‌سازی کدنویسی الگوریتم در محیط پایتون (نسخه ۳.۱۰) انجام شده است. به منظور افزایش دقت و سرعت، از ارتباط فایل محور بین پایتون و نرم‌افزار HEC-RAS استفاده شده است. ارتباط میان کد پایتون و HEC-RAS از طریق کلاس RAS507.HECRASController برقرار شد. در هر تکرار از اجرای خودکار مدل، مراحل زیر انجام می‌شود:

- پروژه با مسیر مشخص PROJECT.prj بارگذاری می‌شود: پیش از هر شبیه‌سازی، مقادیر جدید ضرایب دبی که توسط الگوریتم کرم شب‌تاب پیشنهاد شده‌اند، باید در فایل ورودی مربوط به اطلاعات دریچه‌ها^۱ در HEC-RAS به‌روز شوند. این فایل معمولاً با پسوند g01. در این مورد (PROJECT.g01) مشخص می‌شود. تابع replace_values_in_backup این کار را با خواندن فایل، جایگزینی مقادیر مربوط به هر دریچه (موقعیت شماره ۴ در هر خط مربوط به دریچه در فایل ورودی) بازنویسی فایل موجود انجام می‌دهد.

- شبیه‌سازی HEC-RAS اجرا و نتایج استخراج می‌شود: تابع objective_function مسئول اجرای شبیه‌سازی در-HEC-RAS و استخراج تراز سطح آب در نقاط مورد نظر است. ابتدا، یک HECRASController ایجاد و پروژه HEC-RAS (PROJECT.prj) باز می‌شود، و سپس، شبیه‌سازی طرح فعلی^۲ اجرا می‌شود. پس از اتمام شبیه‌سازی، تراز سطح آب در گام‌های زمانی مشخص و در نقاط مورد نظر استخراج می‌شود. نرم‌افزار HEC-RAS بسته شده و HECRASController حذف می‌شود. در نهایت، خطاهای مطلق میانگین (MAE) برای هر یک از ایستگاه‌ها محاسبه شده و مجموع آن‌ها به عنوان مقدار تابع هدف بازگردانده می‌شود و الگوریتم کرم شب‌تاب که قبلاً تشریح شد اجرا می‌شود.

پس از اجرای HEC-RAS، نتایج خروجی شامل تغییرات عمق در بالادست سازه‌های تنظیم‌کننده استخراج و روند تغییرات مقدار تابع هدف در هر تکرار ذخیره و نمایش داده می‌شود. در نهایت مقدار تابع هدف، یعنی مجموع خطاهای مطلق میانگین تراز سطح آب پیش‌بینی‌شده توسط HEC-RAS و مقادیر مشاهداتی (MAE)، محاسبه می‌شود. گام‌های تشریح‌شده برای اجرای الگوریتم، در یک فرایند تکراری انجام می‌شود و تا آخرین تکرار ادامه می‌یابد. در نهایت، مقادیر بهینه ضریب دبی حاصل از الگوریتم کرم شب‌تاب، استخراج و پیشنهاد می‌شود.

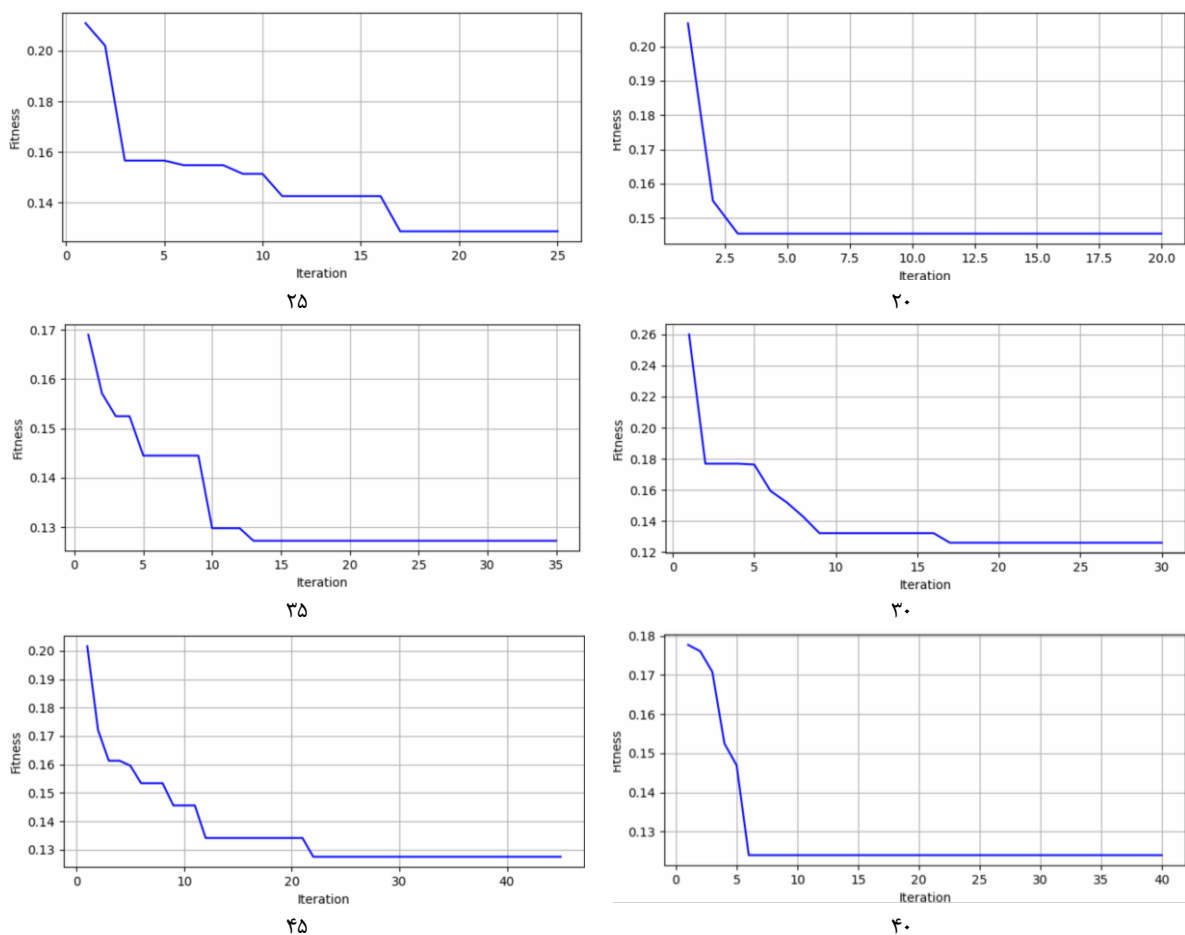
یافته‌های پژوهش

در این پژوهش، یک چارچوب محاسباتی نوآورانه مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی هوشمند کرم شب‌تاب برای واسنجی خودکار مدل هیدرولیکی HEC-RAS توسعه یافته است. در ادامه، تکرارهای مختلف برای به دست آوردن تعداد تکرار بهینه به منظور کاهش زمان انجام محاسبات، به دست آمد. با استفاده از تعداد تکرار بهینه، الگوریتم ۱۰ بار اجرا شد و متوسط ۱۰ بار به عنوان مقادیر ضریب دبی نهایی در نظر گرفته شد. نتایج مربوط به پارامترهای الگوریتم کرم شب‌تاب در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم

پارامتر	مقدار
تعداد جمعیت	۱۰
تعداد تکرار	۲۰-۴۵
ابعاد مسئله (تعداد متغیرها)	۹
α (نویز تصادفی)	۰/۲
β_0 (جاذبه اولیه)	۱
γ (ضریب جذب نوری)	۰/۱

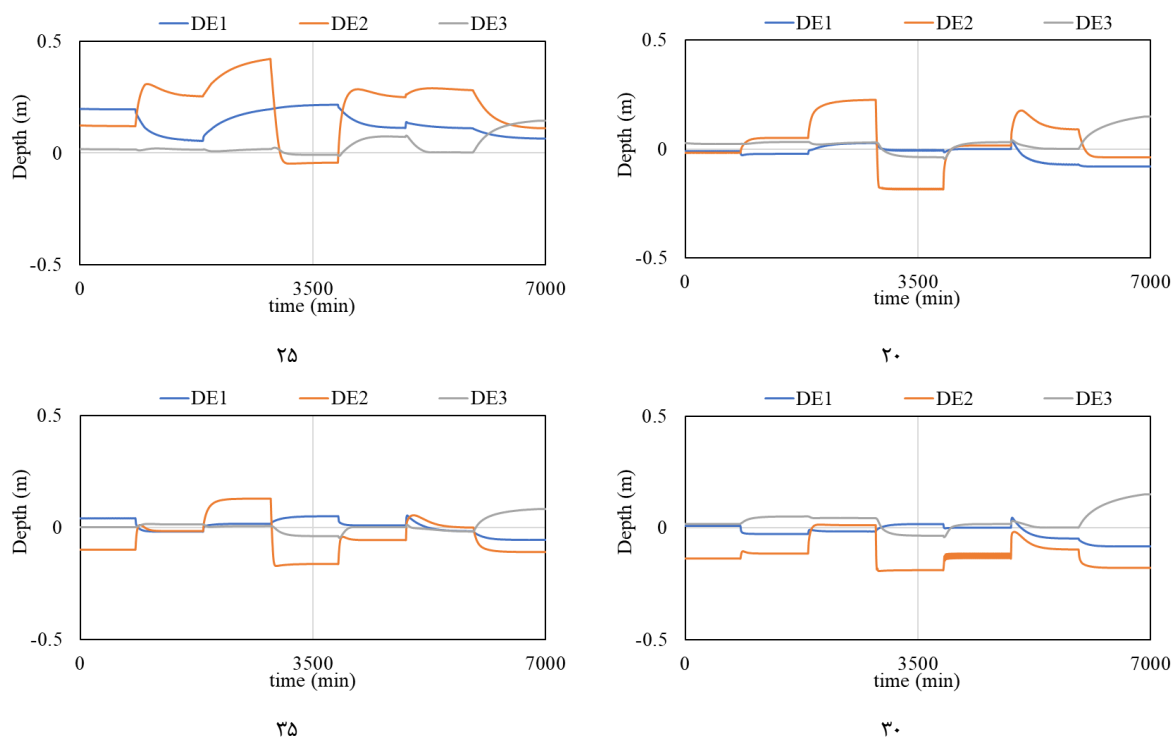
انتخاب جمعیت اولیه ۱۰ تایی در این پژوهش، یک تعادل بهینه بین کارایی محاسباتی و اثربخشی الگوریتم ایجاد کرده است. از آنجا که هر ارزیابی تابع هدف مستلزم اجرای یک شبیه‌سازی زمان‌بر HEC-RAS است، این اندازه جمعیت کوچک، بار محاسباتی را به طور قابل توجهی کاهش داده و فرایند بهینه‌سازی را در بازه زمانی معقولی ممکن ساخته است. اگرچه جمعیت کوچک می‌توانست خطر گیر کردن در بهینه‌های محلی را افزایش دهد، اما نمودارهای همگرایی، که در ادامه تشریح خواهند شد، نشان می‌دهند الگوریتم با همین جمعیت محدود، به خوبی توانسته است با ترکیب هوشمندانه اکتشاف و بهره‌برداری، به سمت یک راه‌حل با دقت بسیار بالا (با خطای عمق در حد سانتی‌متر) همگرا شود. بنابراین، این انتخاب نه تنها عملی و به صرفه بوده، بلکه برای ابعاد مسئله (۹ متغیر) و دقت مورد نیاز این مطالعه کاملاً کافی و مؤثر واقع شده است. همچنین، تنظیم مناسب پارامترهای الگوریتم، از جمله ضریب جاذبه اولیه ($\beta_0=1$) و ضریب جذب نوری ($\gamma=0.1$)، به تعادل مناسبی بین اکتشاف و بهره‌برداری منجر شده است. وجود نویز تصادفی ($\alpha=0.2$) نیز به جلوگیری از گیر کردن الگوریتم در بهینه‌های محلی کمک کرده است. نتایج حاصل از همگرایی الگوریتم کرم شبتاب برای بهینه‌سازی ضرایب دبی سازه‌ها در مدل HEC-RAS برای تعداد تکرارهای بین ۲۰ تا ۴۵ در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴. نمودارهای همگرایی الگوریتم کرم شبتاب در تکرارهای مختلف

نتایج بیانگر کارایی و اثربخشی این الگوریتم در کاهش خطای میانگین مطلق (MAE) بین عمق هدف و عمق شبیه‌سازی شده است. در تمامی نمودارها، روند کاهشی مقدار تابع هدف با افزایش تعداد تکرارها به وضوح مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده همگرایی موفقیت‌آمیز الگوریتم به سمت نقطه بهینه است. در ابتدای فرایند بهینه‌سازی (تکرارهای ۰ تا ۱۰)، کاهش شدید و سریع تابع هدف دیده می‌شود. این امر بیانگر توانایی بالای الگوریتم کرم شبتاب در اکتشاف فضای جست‌وجو و یافتن نواحی مناسب در مراحل اولیه است. با نزدیک شدن به تکرارهای ۱۵ تا ۲۰، نرخ کاهش تابع هدف کندتر شده و نمودار به حالت صاف نزدیک می‌شود. این

تغییر رفتار، نشان از انتقال الگوریتم از فاز اکتشاف به فاز بهره‌برداری و استفاده از تجربیات گذشته دارد، جایی که الگوریتم به‌دقت به جست‌وجوی محلی در اطراف جواب‌های امیدبخش پیدا شده می‌پردازد تا به بهینه محلی (یا سراسری) دست یابد. در انتهای هر تکرار، مقادیر ضریب دبی بهینه مربوط به آن تکرار در HEC-RAS وارد شد و شبیه‌سازی انجام گرفت و مقدار خطای عمق از عمق هدف مربوط به هر سازه تنظیم‌کننده استخراج شد. در شکل ۵، خطای مربوط به عمق نشان داده شده است.



شکل ۵. خطای عمق در تکرارهای مختلف

با توجه به نمودارها، مشاهده می‌شود که برای تکرارهای اولیه، یعنی ۲۰ و ۲۵ تکرار، مقدار خطاها نوسانات قابل توجهی دارند و مقادیر مطلق خطا نسبتاً بالا هستند. این موضوع نشان می‌دهد جمعیت اولیه گرم‌های شب‌تاب هنوز در حال کاوش در فضای جست‌وجو هستند و راه‌حل بهینه یافت نشده است. مقدار خطاها در محدوده -0.18 تا 0.23 برای تکرار ۲۰ و -0.5 تا 0.42 برای تکرار ۲۵ قرار دارند باشند که نشان‌دهنده انحراف زیاد است. در تکرارهای میانی (تکرارهای ۳۰ و ۳۵)، دامنه نوسانات خطا به طور محسوسی کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده این است که الگوریتم از فاز اکتشاف اولیه خارج شده و به تدریج روی راه‌حل‌های امیدبخش‌تر متمرکز می‌شود (فاز بهره‌برداری). مقدار خطا بین -0.19 تا 0.15 برای تکرار ۳۰ و -0.17 تا 0.12 برای تکرار ۳۵ است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در تکرار ۳۵، الگوریتم به یک سطح خطای پایین و قابل قبول رسیده است. در این نقطه، خطای MAE به میزانی کاهش یافته که از نظر مهندسی برای کاربرد مدل رضایت‌بخش محسوب می‌شود. در نتیجه، به منظور صرفه‌جویی در زمان و و جلوگیری از هزینه محاسباتی بالا تکرار ۳۵ به عنوان تکرار نهایی در نظر گرفته شد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مجموعه ضرایب دبی به‌دست‌آمده در تکرار ۳۵، راه‌حلی، کارآمد و بهینه برای واسنجی مدل HEC-RAS ارائه می‌دهد.

مشاهده می‌شود که در بیشتر موارد، الگوریتم پس از حدود ۲۰ تا ۳۰ تکرار به ثبات نسبی می‌رسد و پس از آن تغییرات محسوسی در مقدار تابع هدف رخ نمی‌دهد. این موضوع تأیید می‌کند که انتخاب تعداد تکرار بین ۲۰ تا ۴۵، همان‌طور که در مطالعه گفته شده، انتخاب مناسبی بوده و از هزینه محاسباتی زیاد جلوگیری کرده است. مقدار نهایی تابع هدف در نمودارهای مختلف بین 0.12 تا 0.16 متغیر است که نشان می‌دهد مدل بهینه‌شده توانسته است با دقت قابل قبولی به عمق هدف $1/2$ متر نزدیک شود. نتایج حاصل برای ضریب دبی در تکرارهای مختلف در سازه‌های مختلف و بهترین MAE در جدول ۳ نشان داده شده است. درخور

یادآوری است که TO نشان‌دهندهٔ آبیگر و شمارهٔ جلوی آن بیانگر شمارهٔ آبیگر است؛ به عنوان مثال، TO1 یعنی آبیگر شمارهٔ ۱. پارامتر Ch نیز نشان‌دهندهٔ سازهٔ تنظیم‌کننده است.

جدول ۳. نتایج ضریب دبی برای تکرارهای مختلف

Iterations	TO1	TO2	Ch1	TO3	TO4	Ch2	TO5	TO6	Ch3	MAE
20	0.8	0.49	0.54	0.8	0.38	0.67	0.79	0.69	0.38	0.145
25	0.8	0.65	0.57	0.34	0.67	0.63	0.8	0.67	0.8	0.129
30	0.57	0.69	0.55	0.54	0.79	0.59	0.8	0.67	0.64	0.126
35	0.8	0.51	0.53	0.35	0.8	0.64	0.8	0.7	0.3	0.127
40	0.47	0.75	0.54	0.8	0.8	0.57	0.8	0.64	0.44	0.124
45	0.36	0.8	0.55	0.3	0.7	0.63	0.8	0.77	0.32	0.128

به طور کلی، تغییرات MAE روندی نزولی دارد و از ۰/۱۴۵ در تکرار ۲۰ به ۰/۱۲۴ در تکرار ۴۰ بهبود یافته است. این روند، مؤثر بودن فرایند بهینه‌سازی را تأیید می‌کند. با این حال، این بهبود کاملاً یکنواخت نیست و پس از تکرار ۴۰، مقدار خطا در تکرار ۴۵ دوباره به ۰/۱۲۸ افزایش یافته است که می‌تواند نشانهٔ نوسان الگوریتم حول یک نقطهٔ بهینه باشد. مقادیر ضرایب دبی برای هر ۹ سازه در بین تکرارها نوسانات قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهند. برای مثال، ضریب دبی TO1 از ۰/۸ (تکرار ۲۰) به ۰/۵۷ (تکرار ۳۰) و سپس به ۰/۳۶ (تکرار ۴۵) کاهش یافته است. این تغییرپذیری نشان می‌دهد ممکن است چندین مجموعه یا ترکیب از مقادیر ضرایب وجود داشته باشند که همگی به خطای تقریباً یکسان و پایینی منجر شوند و خطای کلی همچنان پایین باقی بماند. با وجود نوسانات، برخی از سازه‌ها در بیشتر تکرارها به مقادیر حدی (۰/۳ یا ۰/۸) نزدیک می‌شوند. برای مثال، TO3 در تکرار ۴۵ به حد پایین (۰/۳) و TO2 و TO5 در همان تکرار به حد بالا (۰/۸) رسیده‌اند. این الگو بیانگر آن است که این سازه‌ها احتمالاً حساسیت بیشتری در کنترل جریان و رسیدن به عمق هدف دارند و الگوریتم به طور سیستماتیک مقادیر بحرانی برای آن‌ها را شناسایی کرده است.

داده‌ها نشان می‌دهند الگوریتم کرم شب‌تاب با موفقیت در حال کاوش فضای جست‌وجوی پیچیده و چندبعدی مسئله است. اگرچه مقادیر تک‌تک ضرایب بین تکرارها ثابت نیستند، اما روند کلی بهبود در تابع هدف (کاهش خطا) حفظ شده است. این موضوع بر این اصل مهم در بهینه‌سازی تأکید دارد که آنچه در نهایت اهمیت دارد، ارزش تابع هدف (کارایی کلی مدل) است و نه مقادیر دقیق هر یک از پارامترها به تنهایی. تکرار ۴۰ به عنوان نقطهٔ اوج عملکرد با کمترین خطا (۰/۱۲۴) شناخته می‌شود. با این حال، با در نظر گرفتن ملاحظات عملی، تکرار ۳۵ یک گزینهٔ بسیار قوی و عملی محسوب می‌شود، چرا که خطای آن (۰/۱۲۷) بسیار نزدیک به تکرار ۴۰ است و مجموعه پارامترهای آن می‌تواند نشان‌دهندهٔ یک ترکیب باثبات‌تر باشد. ضمن اینکه زمان اجرا در تکرار ۳۵ نیز نسبت به تکرار ۴۰ کمتر است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده و توضیحات یادشده، الگوریتم برای تعداد تکرار ۳۵، ۱۰ بار اجرا شد و ضرایب دبی برای ۱۰ بار استخراج شد که در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. نتایج ضریب دبی در ده ران در تکرار ۳۵ (تکرار بهینه) و متوسط آن‌ها

Iterations	TO1	TO2	Ch1	TO3	TO4	Ch2	TO5	TO6	Ch3	MAE
1	0.46	0.48	0.43	0.48	0.42	0.55	0.30	0.30	0.35	0.018
2	0.77	0.68	0.70	0.56	0.51	0.80	0.30	0.30	0.30	0.016
3	0.61	0.54	0.49	0.65	0.68	0.64	0.36	0.35	0.80	0.018
4	0.64	0.63	0.80	0.57	0.56	0.73	0.30	0.30	0.39	0.015
5	0.64	0.68	0.77	0.76	0.73	0.75	0.35	0.30	0.80	0.020
6	0.48	0.53	0.43	0.57	0.55	0.76	0.30	0.30	0.35	0.015
7	0.65	0.61	0.63	0.56	0.47	0.79	0.30	0.30	0.30	0.015
8	0.52	0.68	0.76	0.48	0.48	0.80	0.30	0.30	0.32	0.016
9	0.36	0.33	0.48	0.30	0.35	0.34	0.36	0.34	0.72	0.014
10	0.68	0.65	0.79	0.60	0.59	0.80	0.30	0.30	0.40	0.015
Average	0.58	0.58	0.63	0.55	0.53	0.70	0.32	0.31	0.47	0.016

همان طور که مشاهده می‌شود، مقدار تابع هدف بسیار پایین و باثبات است. خطا در همه اجراها بین ۰/۱۴ تا ۰/۲۰ متغیر است و میانگین آن به ۰/۱۶ می‌رسد. دقت و تکرارپذیری این سطح از خطا (حدود ۱/۶ سانتی‌متر) در ۱۰ اجرای مستقل، نشان‌دهنده موفقیت چشمگیر فرایند بهینه‌سازی است. با وجود تفاوت در مقادیر دقیق در هر اجرا، الگوهای بسیار پایداری در ضرایب دبی سازه‌ها مشاهده می‌شود. سازه‌های با حساسیت بالا (مقادیر متغیر) یعنی سازه‌های TO1، TO2، Ch1، TO3، TO4 و Ch2 مقادیر متوسطی بین ۰/۵۵ تا ۰/۷ دارند، اما در هر اجرا نوسان می‌کنند که نشان می‌دهد این سازه‌ها در تعامل با یکدیگر هستند و چندین ترکیب از مقادیر آن‌ها می‌تواند به دقت مطلوب منجر شود. در سازه‌های با حساسیت پایین (مقادیر ثابت) یعنی سازه‌های TO5 و TO6 در ۹ اجرا از ۱۰ اجرا، به مقدار حداقلی (۰/۳۰ تا ۰/۳۶) همگرا شده‌اند که نشان می‌دهد برای دستیابی به عمق هدف، این سازه‌ها باید حداقل شدت جریان ممکن را داشته باشند. در مقابل، Ch3 در برخی اجراها به سقف بازه (۰/۸) میل کرده که نشان از نقش متفاوت آن در سیستم دارد. نتایج به‌وضوح نشان می‌دهند یک «نقطه» واحد برای ضرایب وجود ندارد، بلکه یک «منطقه یا فضای بهینه» وجود دارد. در این فضا، با وجود تغییر در ترکیب ضرایب، خروجی نهایی (خطا) تقریباً یکسان و در حد عالی باقی می‌ماند. این یافته از نظر عملی بسیار ارزشمند است، زیرا به مهندس این اطمینان را می‌دهد که اگر مدل با مقادیری نزدیک به میانگین‌های به‌دست‌آمده کالیبره شود، بی‌شک به نتایج دقیقی دست خواهد یافت.

بحث

در یک جمع‌بندی کلی می‌توان گفت که نتایج بیانگر آن است که رویکرد پیشنهادی مبتنی بر یکپارچه‌سازی الگوریتم فراابتکاری کرم شبتاب با شبیه‌ساز HEC-RAS از طریق API آن، به طور مؤثری قادر به کالیبراسیون هم‌زمان ضرایب دبی چندین سازه هیدرولیکی در یک شبکه آبیاری واقعی است. این روش با به حداقل رساندن خطای میانگین مطلق بین عمق شبیه‌سازی شده و عمق هدف طراحی در نقاط کنترل کلیدی، توانست مجموعه‌ای از ضرایب دبی بهینه را استخراج کند. یافته‌ها نشان داد ضرایب دبی بهینه‌شده برای بعضی از سازه‌ها، به‌ویژه آبگیرهای انتهایی، مقداری کمتر از ضریب طراحی اولیه داشتند. این کاهش را می‌توان به عوامل عملیاتی از قبیل استهلاک فیزیکی دریاچه‌ها طی زمان (ناشی از سایش، خوردگی و رسوب‌گذاری)، تغییر در شرایط هندسی واقعی نسبت به حالت ایده‌آل طراحی، و نیز عملکرد احتمالی برخی از سازه‌ها در شرایط جریان مستغرق نسبت داد. موفقیت الگوریتم در کاهش خطای مدل، صحت کارکرد چارچوب محاسباتی ارائه‌شده را تأیید می‌کند. با این حال، تحلیل نتایج نیز محدودیت‌ها و ملاحظات مهمی را آشکار می‌سازد. یک محدودیت کلیدی، وجود چندین جواب بهینه است. در یک شبکه با چندین سازه که به طور هیدرولیکی به هم مرتبط هستند، ممکن است چندین ترکیب مختلف از ضرایب دبی وجود داشته باشد که همگی به خطای کلی مشابه و پایینی منجر شوند؛ به این دلیل که خطای ناشی از بیش‌برآورد ضریب دبی یک آبگیر می‌تواند با کم‌برآورد ضریب دبی آبگیر مجاور جبران شود، در حالی که خروجی کلی سیستم (عمق در نقطه کنترل) ثابت بماند. بنابراین، ضرایب استخراج‌شده لزوماً مقادیر فیزیکی ذاتی و دقیق هر سازه به صورت منفرد نیستند، بلکه مجموعه‌ای از مقادیر مؤثر هستند که در کنار یکدیگر، بهترین تطبیق کلی مدل با داده‌های مشاهداتی سیستم را فراهم می‌کنند. این ویژگی، تفسیر فیزیکی مجزای هر پارامتر را با چالش مواجه می‌سازد. مزیت اصلی روش ارائه‌شده، خودکارسازی و سیستماتیک‌سازی فرایند واسنجی است که وابستگی مطلق و زمان‌بر به آزمون و خطای دستی کاربر را کاهش می‌دهد. این چارچوب امکان جست‌وجوی هوشمند در فضای پارامترهای با ابعاد بالا را فراهم می‌آورد و از توقف در بهینه‌های محلی ذهنی (واسنجی بر اساس آزمون و خطا) جلوگیری می‌کند. همچنین، این روش به طور خاص برای شرایطی مناسب است که داده‌های تفکیک‌شده دقیق از هر سازه (مانند نسبت استغراق دقیق یا هندسه واقعی دهانه) در دسترس نباشد، اما داده‌های کلی سیستم (دبی‌ها و عمق در نقاط کلیدی) موجود باشند. در چنین مواردی، روش‌های تحلیلی - تجربی کلاسیک که برای سازه‌های استاندارد و در شرایط آزمایشگاهی ایده‌آل توسعه یافته‌اند، ممکن است به دلیل عدم تطابق با شرایط واقعی و ناقص بودن داده‌های ورودی لازم، با دشواری مواجه شوند. با وجود مزایا، روش حاضر معایب و حوزه‌هایی برای بهبود دارد. نخست، دقت و قابلیت اعتماد نتایج به کیفیت و کمیت داده‌های مشاهداتی مورد استفاده برای تعریف تابع هدف وابسته است. دوم، ضرایب بهینه‌شده در درجه اول برای بازتولید شرایط هیدرولیکی دوره واسنجی معتبر هستند. اگر

شرایط عملیاتی شبکه به طور اساسی تغییر کند (مانند تغییر از جریان آزاد به مستغرق کامل یا تغییر گسترده در دبی‌ها)، ممکن است نیاز به واسنجی مجدد وجود داشته باشد. سوم، این روش علی‌رغم کاهش بار محاسباتی دستی، خود مستلزم توسعه کد و دانش برنامه‌نویسی اولیه است. همان‌طور که اشاره شد، واسنجی مجموعه‌ای از سازه‌های آبگیر و تنظیم‌کننده در یک کانال با یک روش سیستماتیک و تلفیق بهینه‌ساز و شبیه‌ساز تا کنون مورد توجه قرار نگرفته است. با این حال، مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق برای آبگیرهای ۱ تا ۶ با نتایج معادلات ارائه‌شده در رجارتنام (۱۹۷۷)، که ضریب دبی را برای هر سازه به صورت جداگانه با استفاده از معادله ارائه‌شده در جدول ۱ محاسبه می‌کند، بیانگر آن است که به ترتیب $۰/۴۶$ ، $۰/۴۳$ ، $۰/۳۶$ ، $۰/۹۵$ ، $۰/۱۳$ و $۰/۱۴$ درصد اختلاف در ضریب دبی برآوردشده وجود دارد. نتایج مشابهی در مقایسه با تحقیق سوامی (۱۹۹۲) حاصل شده است. در نهایت، همان‌طور که اشاره شد، این روش یک ابزار کمی قدرتمند برای مهندس به شمار می‌رود و نه جایگزینی برای قضاوت و تجربه مهندسی. تجربه کاربر در مراحل تعریف مسئله، انتخاب پارامترهای واسنجی، تنظیم محدوده جست‌وجوی الگوریتم و تفسیر نهایی نتایج، نقشی حیاتی و تکمیل‌کننده دارد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، یک چارچوب خودکار برای واسنجی مدل هیدرولیکی HEC-RAS با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب در محیط پایتون توسعه داده شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد این روش می‌تواند با دقت و کارایی بالا، ضرایب دبی سازه‌ها را به گونه‌ای بهینه کند که خطای مدل‌سازی به حداقل ممکن برسد. کاهش خطای میانگین مطلق از $۰/۱۴۵$ متر به $۰/۰۱۶$ متر (معادل ۸۹ درصد بهبود دقت)، شناسایی الگوهای بهینه برای ضرایب دبی سازه‌ها، تعیین مقادیر بحرانی برای سازه‌های حساس، اثبات وجود «منطقه بهینه» برای ضرایب دبی که در آن چندین ترکیب مختلف از پارامترها می‌توانند به دقت مطلوب منجر شوند و ایجاد یک سیستم خودکار و قابل اعتماد برای واسنجی مدل‌های هیدرولیکی از نتایج این تحقیق هستند. درخور یادآوری است رویکرد دستی متعارف واسنجی، که در آن کاربر به صورت آزمون و خطا پارامترها را تغییر می‌دهد، با دو چالش همراه است: (۱) فرایندی زمان‌بر و پرهزینه است، و (۲) به دلیل پیچیدگی و ابعاد بالا، ممکن است کاربر نتواند ترکیب بهینه کلی پارامترها را بیابد و در یک بهینه محلی قانع‌کننده ذهنی متوقف شود. کاهش وابستگی به تجربه کاربر در فرایند واسنجی، قابلیت اجرای سریع و تکرارپذیر، دقت بالا و قابلیت اطمینان در نتایج و قابلیت تعمیم و استفاده از چارچوب محاسباتی ارائه‌شده در سایر شبکه‌های آبیاری و مدل‌های هیدرولیکی از مزایای روش پیشنهادی هستند. با این حال، این روش نیازمند زیرساخت‌های سخت‌افزاری به‌روز و داده‌های میدانی دقیق است که در برخی شبکه‌ها ممکن است این داده‌ها موجود نباشند یا جمع‌آوری آن‌ها نیازمند صرف هزینه و زمان زیادی باشد. همچنین، دقت و قابلیت اعتماد نتایج به کیفیت و کمیت داده‌های مشاهده‌ای مورد استفاده برای تعریف تابع هدف وابسته بوده و ضرایب بهینه‌شده، اگر شرایط عملیاتی شبکه به طور اساسی تغییر کند، ممکن است نیاز به واسنجی مجدد وجود داشته باشد. ضمن اینکه، این روش علی‌رغم کاهش بار محاسباتی دستی، خود مستلزم توسعه کد و دانش برنامه‌نویسی اولیه است. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، این چارچوب برای شرایط هیدرولیکی پیچیده‌تر و با در نظر گرفتن پارامترهای اضافی توسعه یابد.

منابع

- 1 Alirezazadeh Sadaghiyani, A., Mohammadi, M., Galvani, M. and Vaheddoost, B. (2022). On the Prediction of Discharge Coefficient for Sluice Gates under Submerged Flow Conditions using Soft Computing Techniques. *Journal of Modeling in Engineering*, 20(71), 1-12. (In Persian).
- 2 Garbrecht, G. 1977. Discussion of "Discharge Computations at River Control Structures". *Journal of the Hydraulics Division*, 103, 1481-1484.
- 3 Gharehbaghi, A. & Ghasemlounia, R. 2022. Application of AI approaches to estimate discharge coefficient of novel kind of sharp-crested V-notch weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 148, 04022001.
- 4 Goodell, C. 2014. *Breaking the HEC-RAS Code: A User's Guide to Automating HEC-RAS*, h21s.
- 5 Goodell, C. 2016. *Advanced Gate Operation Strategies in HEC-RAS 5.0*.
- 6 Leon, A. S. & Goodell, C. 2016. Controlling Hec-Ras using Matlab. *Environmental modelling & software*, 84, 339-348.
- 7 Rahmanshahi, M., Jafari-Asl, J., Fathi-Moghadam, M., Ohadi, S. & Mirjalili, S. 2024. Metaheuristic learning algorithms for accurate prediction of hydraulic performance of porous embankment weirs. *Applied Soft Computing*, 151, 111150.
- 8 Rajaratnam, N. 1977. Free flow immediately below sluice gates. *Journal of the Hydraulics Division*, 103, 345-351.
- 9 Shahverdi, K. & Yari, S. 2025. Investigating Effect of Flow Contraction on Discharge Coefficient of Lopac Gates Using Support Vector Machines. *Water and Irrigation Management*, 15(2), 497-508. (In Persian).
- 10 Sihag, P., Nouri, M., Ahmadpari, H., Seyedzadeh, A. & Kisi, O. 2022. Approximation of the discharge coefficient of radial gates using metaheuristic regression approaches. *Sustainability*, 14, 15145.
- 11 Spheerli, J. & Hager, W. 1999. Discussion of irrotational flow and real fluid effects under planer gates, by JS montes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125, 208-210.
- 12 Swamee, P. K. 1992. Sluice-gate discharge equations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 118, 56-60.
- 13 Yang, X.-S. Firefly algorithms for multimodal optimization. International symposium on stochastic algorithms, 2009. Springer, 169-178.