

Enhancement and Optimization of Zayandehrud River Channel Geometry Using Hydraulic Modeling and Secretary Bird Optimization Algorithm

Abstract

The geometry of a river cross-section and its morphological changes are among the most important and influential issues in water and river engineering, having a direct impact on the management, health, and flow of the river. Achieving an optimal river cross-section shape is one of the most important structural measures in river management, contributing to flood control and the reduction of human and financial losses. To obtain geometric parameters on cross-sections and hydraulic conditions of the flow, the HEC-RAS software was used on the Zayandehrud River in Isfahan. To determine the optimal river cross-section geometry, the Secretary Bird Optimization Algorithm (SBOA) was implemented. The approach of this study aimed to achieve a maximum dredging volume while maintaining hydraulic stability in the river channel. Then, the optimum cross-section index (OCI), which displays the numerical value of the river cross-section according to its optimal condition, was used to evaluate river cross-sections in their optimal state. Based on the results, the area of the optimized cross-sections gradually increased, and the observed area was far from the optimal geometry towards the downstream. The OCI value was changed between 1% and 53% and also increased from upstream to downstream, indicating a greater need for channel modification downstream. Ultimately, the optimization approach proved highly effective, enhancing the river's watercourse capacity by 28.89% post-optimization.

Keywords: Dredging, HEC-RAS, Hydraulic simulation, Optimum cross-section index (OCI), Zayandehrud River

Extended Abstract

Introduction

The geometry and morphological evolution of river cross-sections are among the most critical and influential aspects of water and river engineering. They have a direct impact on river management, planning, and overall ecological health. Achieving the optimal river cross-section is a key structural intervention for sustainable river management and plays a significant role in flood control and the reduction of life and property losses. Cross-sectional geometry and hydraulic flow characteristics must be regularly assessed under different flow conditions for scientific, engineering, and management purposes. Therefore, hydraulic modeling is indispensable to acquire precise geometric and hydraulic data and serves as a foundational step toward achieving optimal river conditions.

Method

In this study, hydraulic modeling was performed using the HEC-RAS software for a section of the Zayandehrud River in Iran. This river originates from the Zagros Mountains in the north of Chaharmahal and Bakhtiari Province, flows westward into Isfahan Province, passes through the city of Isfahan, and eventually empties into the Gavkhouni Wetland. The simulation was conducted as a one-dimensional, unsteady flow model for a flood event with a 25-year return period and a discharge of 521 m³/s, aimed at evaluating floodplain inundation and its impacts on surrounding lands. Subsequently, using a defined objective function and relevant constraints, the Secretary Bird Optimization Algorithm (SBOA) was employed to optimize dredging volumes while maintaining hydraulic stability. A novel metric, the Optimum Cross-Section Index (OCI), was applied to evaluate the degree of deviation of each cross-section from its ideal state. The OCI provides a numerical value reflecting how close each section is to optimal hydraulic performance.

Results

The flood simulation results highlighted significant inundation in floodplains across the study area, underscoring the necessity of channel modification. The hydraulic model provided key geometric parameters such as cross-sectional area, depth, width, wetted perimeter, and hydraulic radius. The trends in these geometric parameters were analyzed using correlation coefficients. Notably, river depth and width did not change uniformly from upstream to downstream. A comparison between the first and last stations showed a 441.58% increase in width and a 55.02% decrease in depth. Based on the analysis of 12 stations, including 120 cross-sections (10 cross-sections per station) of the Zayandehrud River, the final optimized dredging volume after 1,000 iterations was calculated to be 59,765,160 cubic meters. The correlation coefficient of the OCI index along the river length was 0.71, indicating a weak but increasing trend downstream. The OCI values ranged from 1.01 to 1.53 from upstream to downstream, highlighting a growing deviation from optimal geometry in the lower reaches of the river.

Conclusion

An assessment of depth and width trends revealed a significant decrease in depth and an increase in width downstream, likely due to the river's high sediment transport capacity. The total pre-dredging volume of the stations was 46,369,050 m³, while after dredging, the average total volume in the cross-sections reached 59,765,160 cubic meters. This improvement enhanced the flow capacity of the Zayandehrud River by 28.89%. Furthermore, the OCI index was closer to the optimal value in the upstream regions. As the river progressed downstream, optimal cross-sectional area requirements increased, as did the need for dredging. The OCI value rose by 1% to 53%, indicating a significantly growing deviation from optimal hydraulic geometry in the lower segments of the river.

Author Contributions

“Conceptualization, Mohammad Mahdi Malekpour, Mohammad Mehdi Ahmadi, Kourosh Qaderi, and Yousef Rajabizadeh.; methodology, Mohammad Mahdi Malekpour, Mohammad Mehdi Ahmadi, and Kourosh Qaderi.; software, Mohammad Mahdi Malekpour.; validation, Mohammad Mahdi Malekpour and Mohammad Mehdi Ahmadi.; formal analysis, Mohammad Mahdi Malekpour.; investigation, Mohammad Mehdi Ahmadi and Kourosh Qaderi.; resources, Yousef Rajabizadeh.; data curation, Mohammad Mahdi Malekpour and Yousef Rajabizadeh.; writing—original draft preparation, Mohammad Mahdi Malekpour.; writing—review and editing, Mohammad Mehdi Ahmadi and Kourosh Qaderi.; visualization, Mohammad Mahdi Malekpour.; supervision, Mohammad Mehdi Ahmadi.; project administration, Mohammad Mehdi Ahmadi and Kourosh Qaderi.; funding acquisition, not applicable. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.”
All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability

Not applicable.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

توسعه و بهینه‌سازی هندسه کانال رودخانه زاینده‌رود با استفاده از مدل‌سازی هیدرولیکی و الگوریتم بهینه‌سازی پرنده منشی

چکیده

هندسه مقطع رودخانه و تغییر شکل آن یکی از مسائل مهم و تاثیرگذار در زمینه مهندسی آب و رودخانه بوده و تاثیر مستقیم بر مدیریت، سلامت و جریان رودخانه دارد. دستیابی به شکل بهینه مقطع رودخانه از جمله مهمترین اقدامات سازهای برای مدیریت رودخانه بوده که به کنترل سیل و کاهش تلفات جانی و مالی می‌انجامد. در این مطالعه، به منظور استخراج پارامترهای هندسی مقاطع عرضی و بررسی شرایط هیدرولیکی جریان، از نرم‌افزار HEC-RAS برای رودخانه زاینده‌رود در استان اصفهان استفاده شد. برای تعیین هندسه بهینه مقاطع عرضی رودخانه، الگوریتم بهینه‌سازی پرنده منشی (SBOA) به کار گرفته شد که هدف آن، حداکثرسازی حجم لایروبی در عین حفظ پایداری هیدرولیکی بوده است. برای ارزیابی میزان انحراف هر مقطع با حالت بهینه خود، شاخص مقطع بهینه (OCI) مورد استفاده قرار گرفت تا مقدار عددی انحراف هر مقطع از وضعیت بهینه مشخص گردد. نتایج نشان داد که پس از بهینه‌سازی، مساحت مقاطع عرضی به طور کلی افزایش یافته و انحراف از هندسه بهینه در مقاطع پایین‌دست بیشتر بوده است. با تغییر مقدار شاخص OCI بین ۱٪ تا ۵۳٪، روند افزایشی آن از بالادست به پایین‌دست مشهود بوده که بیانگر نیاز بیشتر به اصلاح مقطع در مقاطع پایین‌دست است. در نهایت، این رویکرد بهینه‌سازی عملکرد مؤثری از خود نشان داد و ظرفیت آبگذری رودخانه را پس از بهینه‌سازی تا ۲۸/۸۹٪ افزایش داد.

واژگان کلیدی: رودخانه زاینده‌رود، شاخص مقطع بهینه (OCI)، شبیه‌سازی هیدرولیکی، لایروبی، HEC-RAS.

مقدمه

رسوب‌گذاری و انسداد در سواحل، آبراهه‌ها و مخازن، یکی از چالش‌های مهم زیست محیطی به شمار می‌رود (Mahdavi-Meymand and Zounemat-Kermani 2022). برای مقابله با این مسئله، ایجاد فضای مناسب برای جریان آب به عنوان یکی از راه‌حل‌های مناسب در مدیریت رودخانه‌ها مطرح شده که به رودخانه اجازه می‌دهد انرژی طبیعی خود را به منظور انتقال سیلاب و حفظ عملکردهای زیست محیطی نظیر پشتیبانی از زیستگاه‌ها به کار گیرد (Nelson et al., 2024). اصلاح دقیق بستر و کانال رودخانه برای اجرای مدل‌های هیدرولیکی و تعیین رفتار هیدرولیکی جریان از اهمیت بالایی برخوردار است (Ridolfi et al., 2014). از همین رو، اهمیت کانال‌های رودخانه موجب شده تا مهندسان و طراحان، سرمایه‌گذاری بیشتری بر طراحی مقاطع عرضی کانال‌های بهینه و در عین حال کارآمد از نظر فنی انجام دهند (Easa et al., 2011).

حوزه‌های آبریز که در مناطق بینابینی خشک و ساحلی قرار دارند، به‌طور فزاینده‌ای در معرض سیلاب‌های شدید ناشی از هر دو عامل انسانی و فرآیندهای طبیعی قرار گرفته‌اند (Saad and Habib 2021). به همین دلیل، در مناطق ساحلی معمولاً اقداماتی برای کاهش اثرات سیلاب‌های ناشی از جریان‌های رودخانه‌ای صورت می‌گیرد. یکی از روش‌های سنتی و رایج کاهش خطر سیلاب در حوزه‌های آبریز ساحلی، لایروبی یا کانال‌کشی مسیر رودخانه است (Liao et al., 2019). لایروبی به مجموعه اقداماتی گفته می‌شود که با هدف بهبود شرایط جریان و هندسه رودخانه انجام می‌گیرد و شامل برداشت رسوبات و پوشش گیاهی از بستر و حاشیه رود، اصلاح عرض، عمق و شیب کانال، و نیز به‌سازی و بهینه‌سازی مسیر جریان است. (Nelson et al., 2024).

در حالت کلی، دو رویکرد اصلی روش‌های تحلیلی و روش‌های تجربی برای تعیین هندسه کانال رودخانه وجود دارد که هر یک دارای مزایا و معایب خاص خود هستند (Mahmudi et al., 2019). در میان مدل‌های تحلیلی، در دهه‌های اخیر، فرضیه‌های مختلفی به عنوان تویع هدف برای تخمین ابعاد بهینه کانال مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Mahmudi et al., 2019). برای نمونه، Huang and Nanson (2002) استفاده از فرضیه‌های فراگیر را پیشنهاد کردند زیرا تعداد بیشتر مجهولات نسبت به معادلات را می‌توان با تعریف یک ضریب شکل کانال (نسبت عرض به عمق) حل کرد. همچنین Chang (1980) با حل چندین مسئله اساسی مکانیک سیالات، ابعاد کانال را با روش‌های منطقی و تحلیلی به‌دست آوردند. با این وجود، طبق گفته Lee and Julien (2006) متداول‌ترین روش برای طراحی کانال پایدار، روش تجربی است که بر اساس رودخانه‌های خاصی به‌دست آمده‌اند، ولی این روابط نیز قابلیت تعمیم برای پیش‌بینی هندسه تمامی رودخانه‌ها در شرایط مختلف را نداشته و منجر به خطاهای زیاد در پیش‌بینی می‌شوند. در نتیجه رویکردهای جدید مانند روش‌های عددی، الگوریتم‌های بهینه‌سازی و استفاده تلفیقی از آن‌ها، به عنوان روشی جامع در زمینه تعیین هندسه کانال محسوب می‌شود.

به‌دلیل پوشش جهانی و دسترسی آسان، مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEM) با وضوح متوسط که دارای اصلاح انحراف خطی در بعد ارتفاعی هستند، به‌طور گسترده‌ای برای مدل‌سازی هیدروپدینامیکی شبکه‌های رودخانه‌ای در نواحی مرتفع مورد استفاده قرار می‌گیرند (Biswal et al., 2023). Lamine et al. (2021) از دو روش مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای و ارتفاع‌سنجی برای برآورد مقطع عرضی رودخانه نیجر در غرب آفریقا استفاده کردند. همچنین، Anand and Pradhan (2024) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و مدل رقومی ارتفاعی، یک رودخانه ۷۹۹ کیلومتری را از منظر پایداری و بهینه بودن مقاطع آن تحلیل نمودند.

پارامترهای هندسی که روابط هیدروژئومورفیکی رودخانه را توصیف می‌کنند، برای تعیین ظرفیت کانال در انتقال جریان آب بسیار حیاتی هستند (Chang et al., 2024). برای بهبود سرعت و دقت محاسبه این پارامترها، استفاده از نرم‌افزارهای متنوعی نظیر HEC-RAS^۱ و MATLAB^۴ در دهه‌های اخیر بسیار رواج یافته است. Samal et al. (2025)، Qian et al. (2024)، و Mehta et al. (2020) Burele et al. (2014) از نرم‌افزار HEC-RAS برای شبیه‌سازی شرایط بستر و محاسبه ابعاد پایدار کانال رودخانه استفاده کرده‌اند. Erfani et al. (2024) نیز از طریق روش عددی و داده‌های میدانی هیدرولیکی نظیر عمق متوسط، حداکثر عمق، محیط خیس شده و زبری کانال، برای تخمین پارامترهای هندسی استفاده کردند. یک مدل تحلیلی اصلاح شده توسط Mahmudi et al. (2019) توسعه داده شد تا ابعاد مقطع عرضی رودخانه با در نظر گرفتن پایداری کناره‌ها و پوشش گیاهی تعیین شود. این مدل، فاکتور هندسی کانال، معادلات بار بستر، و میزان پوشش گیاهی را در نظر می‌گیرد و توانایی پیش‌بینی ابعاد بهینه کانال را دارد (Mahmudi et al., 2019). علاوه بر این، Towsif Khan et al. (2024) با ترکیب مدل مدیریت رواناب شهری و نرم‌افزار HEC-RAS تغییرات جریان و هندسه کانال را برای حفظ هندسه و پایداری بستر رودخانه ارائه نمودند. وضعیت ژئومورفیک رودخانه ایچاماتی توسط Mondal et al. (2016)

1 Digital Elevation Model

2 Hydrogeomorphic

3 Hydrologic Engineering Center's River Analysis System

4 MATrix LABratory

با در نظر گرفتن ویژگی‌های مقطع عرضی کانال مانند ارزیابی تقارن، الگوی توپوگرافی بستر، پروفیل کناره‌ها و نسبت عرض به عمق، بررسی و مقاطع بهینه طراحی شده و با شاخص مقطع بهینه مقایسه شدند. (Mondal et al., 2016). (Nelson et al. 2024) نیز رویکردی مناسب برای بهینه‌سازی عرض رودخانه به منظور حفظ همزمان قابلیت انتقال سیلاب و بهبود عملکرد زیستگاهی پیشنهاد دادند.

استفاده از روش‌های هوشمند و بهینه به عنوان ابزاری قدرتمند، در سال‌های اخیر به طور فزاینده‌ای برای شبیه‌سازی، پیش‌بینی و حل مسائل پیچیده در موضوعات مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Shaghghi et al., 2017). به دلیل وجود محدودیت‌ها و کاستی‌هایی در هر یک از مدل‌های شبیه‌سازی، پژوهشگران مختلف نتایج شبیه‌سازی را با بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی بهبود داده (Malekpour and Mohammad Rezapour Tabari 2020) و همچنین استفاده از این الگوریتم‌ها باعث افزایش دقت فرآیند برآوردها شده است (Malekpour et al., 2025). (Chang et al. 2024) مدل‌های یادگیری ماشین را برای ارائه پیش‌بینی‌های بهبود یافته از عرض و عمق رودخانه به کار گرفتند. آن‌ها ترکیبی از داده‌های اندازه‌گیری شده به همراه مجموعه‌ای از داده‌های برآورد شده حوزه آبریز را استفاده کردند تا رویکردهای نوین برای تخمین دقیق‌تر هندسه رودخانه را توسعه دهند (Chang et al., 2024). (Mahesh 2024) از سامانه تحلیل لایروبی و پیش‌بینی تصمیم‌گیری بهره برد که یک راه‌حل مبتنی بر داده است. در این رویکرد، داده‌های رسوب‌گذاری، الگوهای آب و هوایی، و دبی جریان با مدل‌های طبقه‌بندی و رگرسیون جنگل تصادفی ترکیب شده تا نیازهای لایروبی پیش‌بینی و هزینه‌های مربوطه تخمین زده شوند (Mahesh 2024).

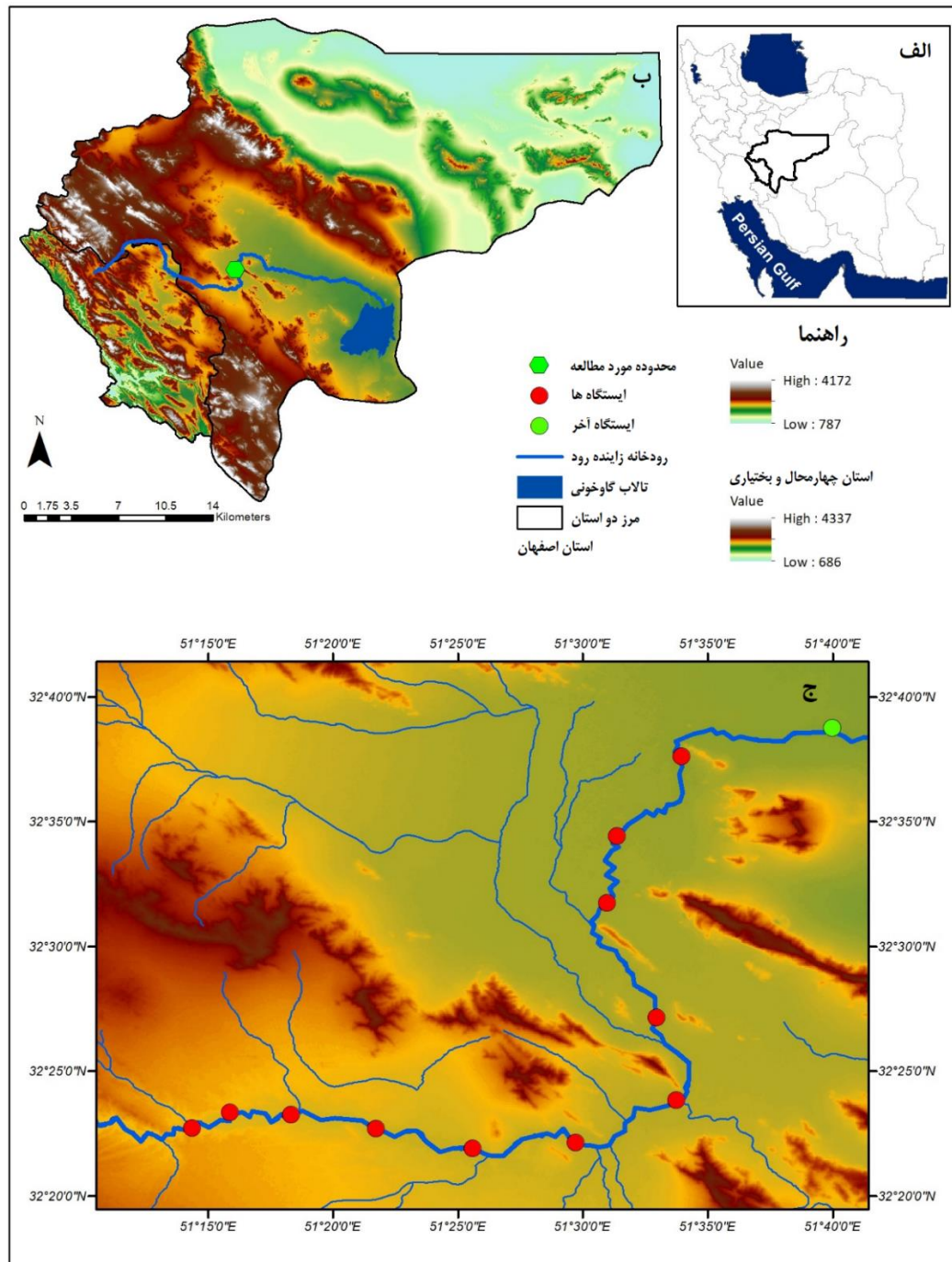
Ridolfi et al. (2014) روش آن‌تروپی و الگوریتم ژنتیک را برای بهینه‌سازی مقاطع عرضی رودخانه و تعیین تعداد و مکان‌های بهینه آن‌ها به کار گرفتند. (Tabatabaei et al. 2018) از یک رویکرد تلفیقی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی همراه با الگوریتم رقابت استعماری برای طراحی مقاطع پایدار رودخانه با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های ساخت استفاده کردند. همچنین، Yang (2024) طرحی برای بهینه‌سازی هزینه‌های کانال رودخانه با بهره‌گیری از سه الگوریتم ژنتیک، الگوریتم مستعمره شبیه‌سازی شده و الگوریتم کلونی مورچگان پیشنهاد داد. در مطالعه‌ای دیگر، Wang et al. (2024) جهت بهینه‌سازی لایروبی، مدل‌های بهینه‌سازی تک هدفه و چند هدفه را به وسیله روش‌های ترکیبی وزن‌دهی جامع ذهنی و عینی مبتنی بر نظریه بازی‌ها به کار گرفتند. همچنین، Sihombing et al. (2022) با استفاده از الگوریتم ژنتیک موفق به یافتن عمق لایروبی بهینه در کانالی در کشور اندونزی شدند. الگوریتم ژنتیک همچنین در مطالعات مربوط به (Turan et al. 2011)، Shaghghi et al., (2017) و Feng (2019) به ترتیب برای بهینه‌سازی مقاطع عرضی، هندسه کانال و لایروبی رودخانه مورد استفاده قرار گرفت.

در این مطالعه، یک بازه ۹۱ کیلومتری از رودخانه زاینده‌رود در استان اصفهان مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای هیدرولیکی و هندسی این بازه با استفاده از شبیه‌سازی هیدرولیکی در نرم‌افزار HEC-RAS محاسبه شدند. پس از معرفی تابع هدف و قیود مسئله، از الگوریتم بهینه‌سازی پرنده منشی (SBOA) برای بهره‌برداری از رویکرد تلفیقی جدید شبیه‌سازی-بهینه‌سازی استفاده شد. این الگوریتم نوین، به دلیل توانمندی بالا و کاربرد آن برای نخستین بار در زمینه بهینه‌سازی مقاطع عرضی، انتخاب گردید تا حداکثر حجم لایروبی حاصل شود. سپس، برای ارزیابی دقیق هندسه رودخانه از بالادست به پایین‌دست، شاخص مقطع بهینه (OCI) به کار رفت تا مقاطع مشاهده شده با حالت بهینه شده مقایسه و تحلیل شوند.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

رودخانه زاینده‌رود از رشته‌کوه‌های زاگرس در شمال استان چهارمحال و بختیاری سرچشمه می‌گیرد و پس از طی مسافتی حدود ۳۵۰ کیلومتر به سمت شرق، در نهایت به تالاب گاوخونی، یک دریاچه نمکی فصلی در جنوب شرقی شهر اصفهان در مرکز ایران، ختم می‌شود (شکل ۱). این رودخانه به شدت به بارش سالانه برف در کوه‌های زاگرس وابسته است (Nasiri et al., 2022).



شکل ۱. موقعیت رودخانه زاینده‌رود: الف) مرزهای دو استان، ب) کل مسیر ۳۵۰ کیلومتری رودخانه از مبدأ (استان چهارمحال و بختیاری) تا مقصد (تالاب گاوخونی)، ج) موقعیت ۱۲ مقطع عرضی در بازه انتخابی ۹۱ کیلومتری (منطقه مورد مطالعه).

حوضه آبریز این رودخانه مساحتی در حدود ۴۱۵۲۴ کیلومتر مربع را در بر می‌گیرد (Ghenaati and Ahmadi 2023) و میانگین بارندگی سالانه آن حدود ۱۳۰ میلی‌متر است. بیش از ۴ میلیون نفر در این حوضه سکونت دارند (Abou Zaki et al., 2020). این رودخانه فرصت مناسبی برای تأمین آب کشاورزی و شرب، تولید برق، و همچنین مکانی برای تفریح فراهم می‌کند (Malekpour and Malekpour 2022). با این حال، این رودخانه که زمانی پرآب و پررونق بود، اکنون در برهه‌ای حساس با آینده‌ای نامشخص روبه‌روست. استفاده‌های ناپایدار از منابع آبی و انتقال بین‌حوضه‌ای، باعث کاهش قابل توجه جریان رودخانه و خشک شدن بخش‌هایی از بستر آن شده است. این کم‌آبی فزاینده پیامدهای گسترده‌ای از جمله بروز تنش‌ها میان بهره‌برداران آب و چالش‌های شدید در مسیر پایداری و توسعه منطقه‌ای داشته است (Abou Zaki et al., 2020؛ Ghenaati and Ahmadi 2023).

مختصات ابتدایی و انتهایی بازه انتخاب شده در جدول ۱ و شکل ۱ نمایش داده شده‌اند. پروفیل‌های مقاطع عرضی هر رودخانه برای بررسی‌های مختلفی از جمله ثبت تغییرات پایداری عمودی (بستر) و جانبی (ساحل) مفید هستند (Ogdahl et al., 2014). مجموعه داده‌های استفاده شده در این مطالعه، شامل دبی، عمق، عرض و مختصات مقاطع عرضی، از اداره کل منابع آب استان اصفهان جمع‌آوری شده است.

جدول ۱. مختصات و مشخصات مقاطع مورد بررسی.

ایستگاه	نام ایستگاه	موقعیت	فاصله از نقطه شروع (کیلومتر)	جهت
۱	S1	32°22'47.94"N 51°14'21.70"E	۰	غرب
۲	S2	32°23'20.79"N 51°15'49.98"E	۳/۸۰	
۳	S3	32°23'17.85"N 51°18'27.57"E	۹/۳۲	
۴	S4	32°22'40.27"N 51°21'59.55"E	۱۵/۶۰	
۵	S5	32°21'54.70"N 51°24'59.90"E	۲۲/۶۱	
۶	S6	32°22'15.16"N 51°29'31.81"E	۳۲/۷۰	
۷	S7	32°23'45.61"N 51°33'43.47"E	۴۲/۸۰	
۸	S8	32°27'05.70"N 51°32'50.54"E	۵۰/۸۶	
۹	S9	32°31'56.53"N 51°31'11.53"E	۵۲/۲۷	
۱۰	S10	32°34'24.85"N 51°31'20.70"E	۶۹/۳۷	
۱۱	S11	32°37'39.13"N 51°33'58.35"E	۷۹/۴۶	
۱۲	S12	32°38'46.03"N 51°40'03.21"E	۹۰/۷۸	شرق

شبیه‌سازی هیدرولیکی

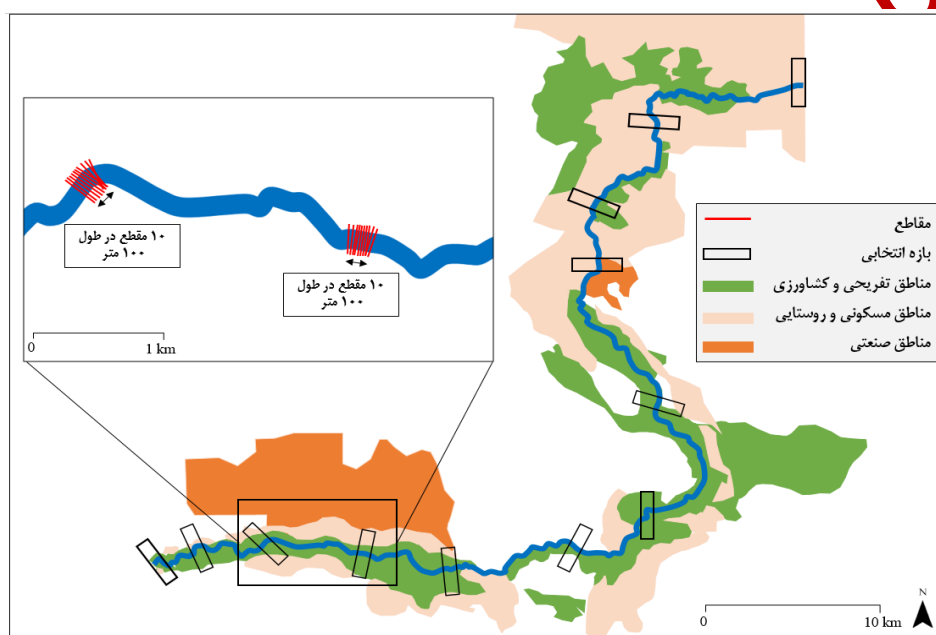
نرم‌افزار تحلیل رودخانه مرکز مهندسی هیدرولوژیک (HEC-RAS) یک نرم‌افزار رایگان است که برای مدل‌سازی هیدرولیک جریان آب در رودخانه‌های طبیعی و سایر کانال‌ها استفاده می‌شود. این مدل توسط وزارت دفاع و مهندسی ارتش ایالات متحده آمریکا توسعه یافته و از سال ۱۹۹۵ در اختیار عموم قرار گرفته است (Mehta et al., 2020). این برنامه هم به صورت یک بعدی و هم دو بعدی در اختیار کاربران قرار دارد و کاربرد گسترده‌ای در مطالعات مدیریت سیلاب از خود نشان داده است (Mehta et al., 2020).

در این پژوهش، شبیه‌سازی هیدرولیکی یک بعدی با استفاده از نسخه ۶/۱ این نرم‌افزار انجام شد. یک بازه ۹۱ کیلومتری از رودخانه برای بررسی و شبیه‌سازی انتخاب گردید که این انتخاب بر اساس میزان آسیب‌پذیری، وجود تأسیسات مهم و حساسیت منطقه نسبت به خسارات ناشی از سیلاب انجام شده است. این محدوده شامل مناطق مسکونی، کشاورزی، تفریحی و صنعتی است که در معرض

خطر سیلاب قرار دارند (شکل ۲). تعداد ۱۲ ایستگاه انتخاب شد که هر ایستگاه شامل ۱۰ مقطع عرضی بود. این مقاطع در طول ۱۰۰ متر در هر ایستگاه بررسی شده و میانگین نتایج آن‌ها در نظر گرفته شده است (شکل ۲).

تعیین پارامترها

هدف از این شبیه‌سازی، یافتن پارامترهای هیدرولیکی مقاطع عرضی در این بازه بوده است. مدل‌سازی هیدرولیکی برای جریان با دوره بازگشت ۲۵ ساله با دبی ۵۲۱ مترمکعب بر ثانیه در نظر گرفته شد که نشان‌دهنده شدت سیلاب و تأثیر آن بر اراضی و مناطق مجاور است.



شکل ۲. موقعیت دشت‌های سیلابی مختلف (مناطق مسکونی، کشاورزی، تفریحی و صنعتی) ایستگاه‌ها و مقاطع عرضی.

برای آغاز فرآیند شبیه‌سازی، از نقشه‌های مدل ارتفاعی رقومی (DEM) منطقه مورد مطالعه استفاده شد و ویژگی‌های هندسی مقاطع عرضی رودخانه استخراج گردید. نقشه توپوگرافی توسط ابزار RAS Mapper تهیه و ضریب زبری منینگ (n) برای بستر رودخانه برابر با ۰/۰۳۵ و به ترتیب برای سیلاب‌دشت‌ها بین بازه ۰/۰۵۰ و ۰/۰۵۵ در نظر گرفته شد. این ضرایب از طریق فرآیند کالیبراسیون بین تراز آب مشاهده شده و شبیه‌سازی شده، آزمون و خطا، و همچنین پوشش گیاهی منطقه به دست آمدند. ضرایب انقباض و انبساط نیز به ترتیب برابر با ۰/۱ و ۰/۳ تعیین شدند.

اطلاعات جریان نیز شامل دبی رودخانه (دبی با دوره بازگشت ۲۵ ساله)، شرایط مرزی (هیدروگراف جریان و عمق نرمال پایین‌دست) و جریان اولیه رودخانه (جریان پایه) در مدل وارد گردید. علاوه بر این، اطلاعات هندسی شبیه‌سازی شده با مقاطع عرضی واقعی که از سوی اداره کل منابع آب منطقه‌ای اصفهان جمع‌آوری شده بود، مقایسه و داده‌ها کالیبره شدند.

تابع هدف و قیود

تابع هدف

هدف این مطالعه، بیشینه‌سازی رابطه ۱ است که پارامترهای ابعادی مقاطع عرضی را در قالب یک معادله حجم ترکیب می‌کند. این معادله که توسط نویسندگان ارائه شده ظرفیت کانال رودخانه را با توجه به محدودیت‌های موجود افزایش می‌دهد.

$$\text{رابطه ۱)} \quad \text{Max } f(V_T) = \sum_{g=1}^{N_s} (\bar{A}_s \times L_s)_g = \sum_{g=1}^{N_s} \sum_{h=1}^{N_{cs}} ((A_h / N_{cs}) \times L_s)_g$$

$$L_s = 100m, N_s = 12, N_{cs} = 10$$

که در این رابطه L_s طول بخش لایروبی شده در هر ایستگاه است، A_h مساحت یک مقطع عرضی است، N_s تعداد ایستگاه‌ها است، N_{cs} تعداد مقاطع عرضی در هر ایستگاه را نشان می‌دهد، $f(V_T)$ حجم کل در لایروبی است، و $\bar{A}_s$ مساحت میانگین در یک ایستگاه است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{رابطه ۲)} \quad \begin{cases} \bar{A}_s = A_h / N_{cs} \\ \bar{A}_s, A_h \in \{\bar{D}_h, T_h\} \\ \bar{D}_h, T_h > 0 \end{cases}$$

که در آن $\bar{D}_h$ عمق میانگین در یک مقطع عرضی است، T_h عرض بالایی مقطع عرضی را نشان می‌دهد.

قیود مسئله

برای بیشینه‌سازی حجم لایروبی از طریق تابع هدف، تعیین قیود (محدودیت‌ها) ضروری است که به شرح زیر می‌باشند:

۱. برای مؤثر بودن در کمینه‌سازی تابع هدف، تعیین معادله پیوستگی اهمیت زیادی دارد. معادله کامل پیوستگی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\text{رابطه ۳)} \quad \sum_{i=1}^{N_{cs}} Q_{in(i)} = \sum_{i=1}^{N_{cs}} Q_{out(i)}$$

که $Q_{in(i)}$ و $Q_{out(i)}$ دبی ورودی و خروجی از مقطع هستند که بر اساس معادلات بست و نانت حاصل از شبیه‌سازی هیدرولیکی حاصل شده‌اند.

۲. طبق مقررات تعیین شده توسط اداره آب منطقه‌ای، عرض رودخانه باید در تمام مراحل لایروبی بدون تغییر باقی بماند. بنابراین، هرگونه تغییر در عرض رودخانه باید به طور کامل ممنوع شود تا عرض آن ثابت باقی بماند.

$$\text{رابطه ۴)} \quad \sum_{i=1}^{N_{cs}} |(\Delta T_h)_i| = 0$$

که ΔT_h تغییرات در عرض بالایی را تعریف می‌کند.

۳. یکی از محدودیت‌های اساسی در فرآیند لایروبی، عدد فرود است که رابطه بین سرعت جریان و عمق آب را کنترل می‌کند. در رودخانه مورد بررسی، رژیم جریان به صورت زیر بحرانی طبقه‌بندی شده است که نشان‌دهنده عدد فرود کمتر از یک است. برای حفظ پایداری هیدرولیکی و جلوگیری از تغییرات ناخواسته جریان، این وضعیت زیر بحرانی باید در طول و پس از فرآیند بهینه‌سازی حفظ شود.

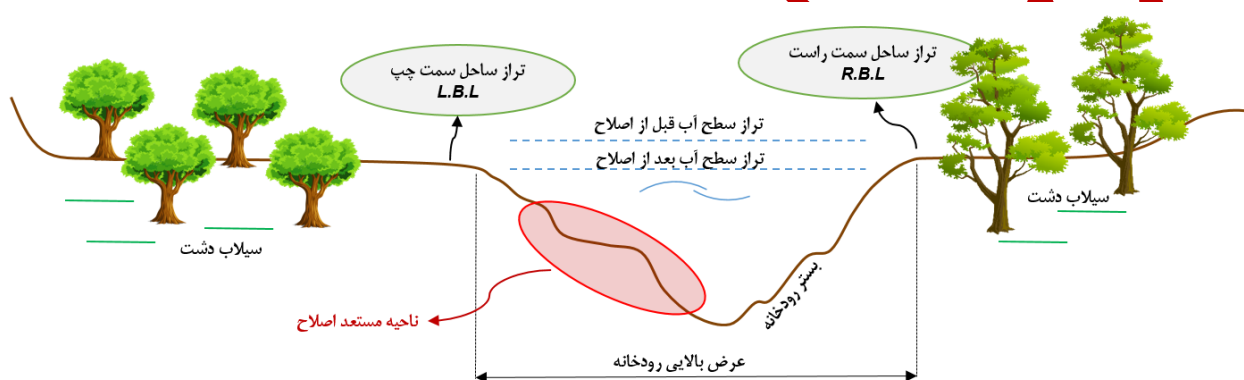
$$\text{رابطه ۵)} \quad Fr = \frac{V}{\sqrt{g.D}} < 1$$

در این معادله، Fr عدد فرود است، g شتاب گرانش زمین را نشان می‌دهد و D عمق هیدرولیکی است که از تقسیم A (مساحت مقطع جریان) بر T_h (عرض بالایی) به دست می‌آید.

۴. آخرین محدودیت، محدودیت سطح آب است که باید برابر با کوچک‌ترین مقدار بین سطح کرانه راست (R.B.L) و سطح کرانه چپ (L.B.L) باشد (شکل ۳). این محدودیت حجم لایروبی را در فرآیند بهینه‌سازی کنترل می‌کند و تضمین می‌کند که پایداری هیدرولیکی حفظ شود.

$$WL_d = \begin{cases} R.B.L & \text{if } R.B.L \leq L.B.L \\ L.B.L & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{رابطه ۶}$$

که در آن، WL_d سطح آب پس از لایروبی را تعریف می‌کند.



شکل ۳. پارامترهای رودخانه در داخل و خارج از کانال شامل: سیلاب‌دشت‌ها، سطح آب، عرض رودخانه و سطوح کرانه‌های راست و چپ.

الگوریتم بهینه‌سازی پرنده منشی (SBOA)

الگوریتم بهینه‌سازی پرنده منشی یک الگوریتم فراابتکاری پیشرفته است که بر اساس استراتژی‌های بقا در پرنده منشی طراحی شده و برای حل مسائل پیچیده دنیای واقعی مهندسی شده است (Fu et al., 2024). این الگوریتم توسط Fu et al. (2024) پیشنهاد شده است. این روش یک رویکرد مبتنی بر جمعیت است که همانند دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری، مجموعه‌ای از جواب‌های کاندید را به صورت تصادفی در فضای جستجو تولید می‌کند (Zhu et al. 2025).

این الگوریتم رفتارهای بقا پرنده منشی را در محیط طبیعی شبیه‌سازی می‌کند (Wang and Wang 2025). الگوریتم شامل سه مرحله مقداردهی اولیه، اکتشاف (رفتار شکار) و توسعه (رفتار فرار) است. در مرحله اکتشاف، الگوریتم شکار مار را شبیه‌سازی می‌کند (Fu et al., 2024)، در حالی که مرحله بهره‌برداری فرار از شکارچیان را تقلید می‌کند (Yang et al., 2024). هنگام استفاده در بهینه‌سازی مدل، این الگوریتم توانایی جستجوی بسیار خوبی دارد و سازگاری بالایی نشان می‌دهد. ریسک رسیدن به بهینه موضعی را کاهش داده و همچنین بهره‌وری محاسباتی آن بهبود یافته است که موجب ارتقا عملکرد کلی بهینه‌سازی شده است (Yang et al., 2024).

هر پرنده منشی به عنوان یکی از اعضای جمعیت الگوریتم در نظر گرفته می‌شود. موقعیت هر پرنده در فضای جستجو، مقادیر متغیرهای تصمیم را تعیین می‌کند. بنابراین، در الگوریتم SBOA، موقعیت هر پرنده منشی نمایانگر یک جواب کاندید برای مسئله مورد

نظر است. در پیاده‌سازی اولیه الگوریتم SBOA، معادله ۷ برای مقداردهی اولیه تصادفی موقعیت پرندگان منشی در فضای جستجو استفاده می‌شود (Wang and Wang 2025) و جواب‌ها به صورت تصادفی تولید می‌شوند (رابطه ۸).

$$X_{i,j} = lb_j + r(ub_j - lb_j), i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, Dim \quad \text{(رابطه ۷)}$$

$$X_{i,j} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1j} & \dots & X_{1,Dim} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2j} & \dots & X_{2,Dim} \\ \dots & \dots & & \dots & & \dots \\ X_{i1} & X_{i2} & \dots & X_{ij} & \dots & X_{i,Dim} \\ \dots & \dots & & \dots & & \dots \\ X_{N1} & X_{N2} & \dots & X_{Nj} & \dots & X_{N,Dim} \end{bmatrix} \quad \text{(رابطه ۸)}$$

که در آن $X_{i,j}$ موقعیت پرنده منشی i^{th} ام را نشان می‌دهد، ub_j و lb_j به ترتیب حدود پایین و بالا هستند، r یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱ است و Dim نشان دهنده بعد متغیرها می‌باشد (Fu et al., 2024).

رفتار شکار پرنده‌های منشی عموماً به سه مرحله جستجوی شکار، آنالیز شکار و حمله به شکار تقسیم می‌شود (Fu et al., 2024). بازه‌های زمانی این مراحل شامل مرحله اول ($t < 1/3 T$)، مرحله دوم ($1/3 T < t < 2/3 T$) و مرحله سوم ($2/3 T < t < T$) هستند (یانگ و همکاران، ۲۰۲۴). در این مرحله، تفاوت بین افراد به کار گرفته می‌شود و از استراتژی تفاضلی برای به‌روزرسانی تکراری موقعیت پرنده منشی از طریق رابطه ۹ استفاده می‌شود (Yang et al., 2024).

$$x_{i,j}^{newP_1} = x_{i,j} + (x_{random_1} - x_{random_2}) \times R_1, t < \frac{1}{3}T \quad \text{(رابطه ۹)}$$

که $x_{i,j}^{newP_1}$ مقدار بعد j را نشان می‌دهد، t شماره تکرار جاری است، T حداکثر تعداد تکرارها است؛ x_{random_1} و x_{random_2} جواب‌های کاندید تصادفی تولید شده در مرحله اولیه تکرار هستند، R_1 آرایه‌ای با اندازه $1 \times Dim$ است که به صورت تصادفی در بازه $[0, 1]$ تولید شده است و M بعد فضای جواب را نشان می‌دهد.

پس از شناسایی شکار، پرنده منشی حمله را به تعویق می‌اندازد و به جای آن، حرکات مار را با دقت زیر نظر می‌گیرد. با دور زدن و پریدن در اطراف مار، پرنده به طور استراتژیک توان مار را تحلیل می‌برد. بنابراین، مسیر حرکت تصادفی مار در این مرحله با استفاده از حرکت براونی مدل‌سازی می‌شود. همان‌طور که در رابطه ۱۰ نشان داده شده موقعیت پرنده منشی در مرحله آنالیز شکار بوده و سپس مطابق معادله ۱۱ به‌روزرسانی می‌شود (Fu et al., 2024; Yang et al., 2024).

$$RB = randn(1, Dim) \quad \text{(رابطه ۱۰)}$$

$$x_{ij}^{newP_1} = x_{best} + \exp((t/T)^4) \times (RB - 0.5) \times (x_{best} - x_{ij}), \frac{1}{3}T < t < \frac{2}{3}T \quad \text{(رابطه ۱۱)}$$

که در آن $randn(1, Dim)$ آرایه‌ای با ابعاد $1 \times Dim$ است که به صورت تصادفی از توزیع نرمال استاندارد تولید شده و همچنین x_{best} مقدار بهینه کنونی را نشان می‌دهد. زمانی که شکار ضعیف شد، پرنده منشی بهترین لحظه برای حمله را شناسایی می‌کند. در این مرحله، موقعیت آن با استفاده از فاکتور پرواز لوی^۱ به روزرسانی می‌شود (Fu et al., 2024; Yang et al., 2024).

$$x_{ij}^{newP_1} = x_{best} + \left(\left(1 - \frac{t}{T} \right)^{2 \times \frac{t}{T}} \right) \times x_{ij} \times RL, t > \frac{2}{3}T \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$RL = 0.5 \times Levy(Dim) \quad \text{رابطه ۱۳}$$

که در آن $\left(1 - \frac{t}{T} \right)^{2 \times \frac{t}{T}}$ عامل اختلال غیرخطی را نشان می‌دهد و RL ضریب وزن دار پرواز لوی است. همچنین، $Levy(Dim)$ تابع توزیع پرواز لوی را تعریف می‌کند که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Levy(Dim) = s \times \frac{u \times \sigma}{|v|^{-1}} \quad \text{رابطه ۱۴}$$

که در آن s یک ثابت با مقدار 0.01 است، σ یک ثابت برابر با $1/5$ است، u و v اعداد تصادفی در بازه $[0, 1]$ می‌باشند. پرنده منشی در مواجهه با خطر از دو طریق استوار (C1) و پرواز (C2) فرار استفاده می‌کند، که هر کدام با احتمال برابر رخ می‌دهند. پس از احساس تهدید، پرنده ابتدا تلاش می‌کند محیط مناسبی برای پنهان شدن بیابد. اگر مکان امنی در نزدیکی وجود نداشت، از پرواز یا حرکت سریع برای فرار استفاده می‌کند. به روزرسانی موقعیت برای این دو استراتژی به شرح زیر است (Yang et al., 2024):

$$x_{ij}^{newP_2} = \begin{cases} C_1 : x_{best} + (2 \times RB - 1) \times \left(1 - \frac{t}{T} \right)^2 \times x_{ij}, & r < r_i \\ C_2 : x_{ij} + R_2 \times (x_{random} - K \times x_{ij}), & \text{else} \\ K = round(1 + rand(1, 1)) \end{cases} \quad \text{رابطه ۱۵}$$

که در آن $r = 0.5$ و R_2 آرایه‌هایی با بعد $(1 \times Dim)$ هستند که به صورت تصادفی از توزیع نرمال تولید شده‌اند، x_{random} جواب کاندید تصادفی برای تکرار جاری را نشان می‌دهد، K یک عدد صحیح انتخاب شده به صورت تصادفی است که مقدار آن ۱ یا ۲ می‌باشد (Wang and Wang 2025; Yang et al., 2024).

شاخص مقطع بهینه (OCI)

شاخص OCI با تقسیم مساحت مقطع بهینه شده (A_{op}) بر مساحت مقطع مشاهده شده (A_{ob}) در یک مقطع خاص تعریف می‌شود (رابطه ۱۶) (Mondal et al., 2018). شاخص OCI با یک عدد، وضعیت بهینه مقطع رودخانه را نشان می‌دهد. زمانی که مقدار این شاخص برابر با یک باشد، مقطع کانال بهینه است که نشان‌دهنده حداکثر ظرفیت جریان می‌باشد. هر چه مقدار این شاخص بیشتر باشد، کانال از شرایط بهینه فاصله بیشتری دارد.

$$OCI = \frac{A_{op}}{A_{ob}}, \quad OCI \geq 1 \quad \text{رابطه ۱۶}$$

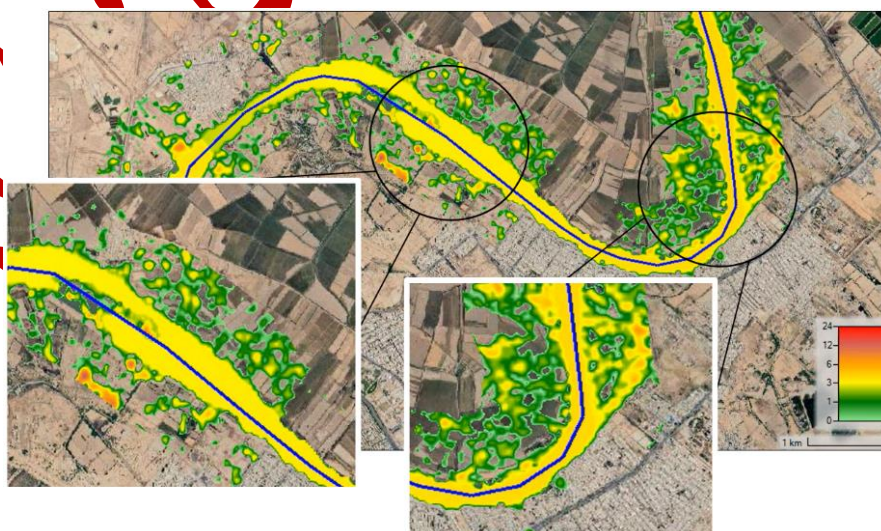
نتایج و بحث

¹ Levy flight factor

با انجام شبیه‌سازی هیدرولیکی، ویژگی‌های هندسی مقاطع عرضی در منطقه مورد مطالعه استخراج شده و میانگین مساحت مقاطع در هر ایستگاه تعیین گردید (جدول ۲). استفاده از میانگین چند مقطع عرضی در هر ایستگاه به جای اتکا به یک مقطع منفرد، درک جامع‌تر و دقیق‌تری از مشخصات هندسی مقطع فراهم ساخته است. بر اساس نتایج به دست آمده، ایستگاه‌های شماره ۱۲ و ۶ به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مساحت مقطع عرضی بوده‌اند که مقادیر آن‌ها برابر با ۹۷۷/۹۱ و ۳۰۲/۲۸ متر مربع شبیه‌سازی شده است. همچنین، بیشترین عمق جریان در ایستگاه ۳ و کمترین عمق در ایستگاه ۱۲ مشاهده گردید. سایر پارامترهای هندسی شامل عمق، عرض، محیط خیس‌شده و شعاع هیدرولیکی (HR) برای هر ایستگاه در جدول ۲ ارائه شده‌اند. طبق اطلاعات موجود در این جدول، عرض رودخانه در بازه مورد بررسی بین ۳۸/۶۵ تا ۳۱۶/۹۲ متر متغیر بوده است. داده‌های تراز ارتفاعی نیز نشان می‌دهند که بستر رودخانه از ناحیه بالادست به پایین‌دست دارای شیب کاهشی بوده است.

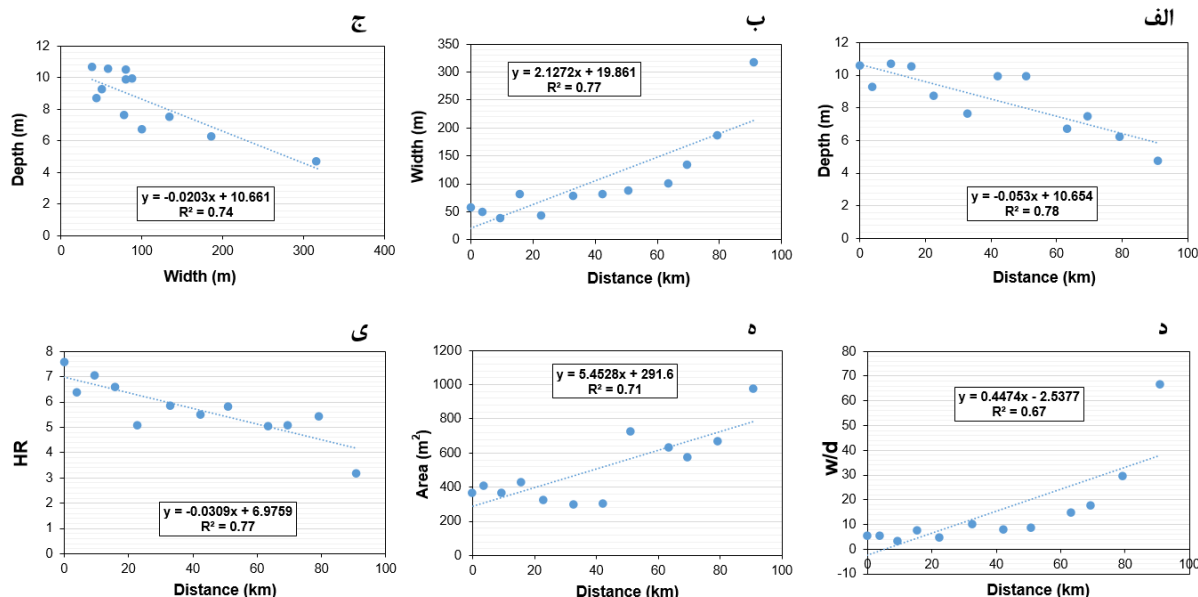
جدول ۲. ویژگی‌های هندسی مقاطع عرضی ایستگاه‌ها شامل عمق متوسط، عرض، مساحت، محیط خیس‌شده و شعاع هیدرولیکی (HR).

ایستگاه	عمق متوسط (m)	عرض (m)	مساحت (m ²)	محیط خیس شده (m)	شعاع هیدرولیکی (m)
S1	۱۰/۵۶	۵۸/۵۲	۳۶۷/۳۰	۴۸/۲۷	۷/۶۱
S2	۹/۲۶	۵۰/۳۰	۴۱۰/۴۵	۶۴/۳۱	۶/۳۸
S3	۱۰/۶۸	۳۸/۶۵	۳۷/۳۱	۵۲/۵۶	۷/۰۵
S4	۱۰/۵۲	۸۱/۵۳	۴۲۵/۴۶	۶۵/۷۶	۶/۶۳
S5	۸/۷۱	۴۴/۰۷	۴۳۰/۵۳	۶۴/۷۲	۵/۱۱
S6	۷/۶۴	۷۸/۴۶	۳۰۲/۲۸	۵۱/۴۵	۵/۸۸
S7	۹/۸۹	۸۱/۲۵	۳۰۶/۵۷	۵۵/۲۷	۵/۵۵
S8	۹/۹۲	۸۸/۶۰	۷۳۱/۳۸	۱۲۵/۵۰	۵/۸۳
S9	۶/۷۰	۱۰۰/۲۷	۶۳۴/۵۱	۱۲۴/۷۵	۵/۰۹
S10	۷/۵۳	۱۳۴/۵۷	۵۷۵/۲۶	۱۱۲/۳۲	۵/۱۲
S11	۶/۲۵	۱۸۶/۵۸	۶۷۲/۴۱	۱۲۳/۵۳	۵/۴۴
S12	۴/۷۵	۳۱۶/۹۲	۹۷۷/۹۱	۳۰۵/۶۸	۳/۲۰



شکل ۴. شبیه‌سازی سیلاب با استفاده از HEC-RAS: آب‌گرفتگی سیلاب‌دشت‌ها در جریان وقوع سیلاب.

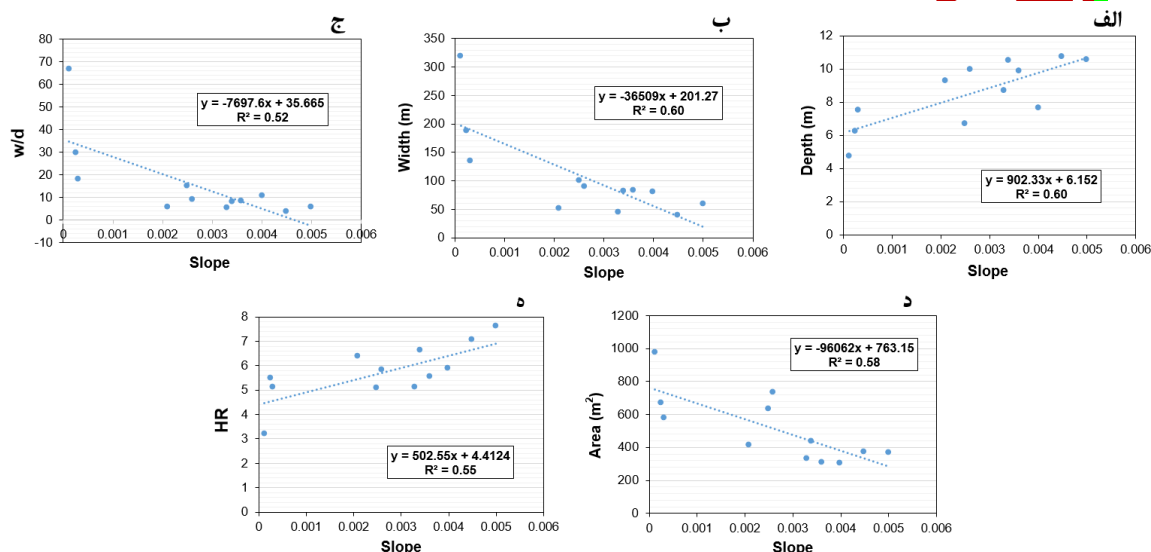
در شکل ۴، شبیه‌سازی وقوع سیلاب برای رودخانه نمایش داده شده است که نشان‌دهنده آب‌گرفتگی دشت‌های سیلابی در جریان یک سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ سال می‌باشد. برخی از این دشت‌ها به دلیل هم‌جواری با اراضی مسکونی و کشاورزی، دارای آسیب‌پذیری بالاتری بوده و اصلاح هندسی بستر رودخانه می‌تواند به‌طور مؤثری در کاهش خسارات ناشی از سیلاب مؤثر واقع شود. فرآیند تغییرات بین عمق و فاصله (طول رودخانه) با ضریب همبستگی 0.78 نشان‌دهنده روند کاهشی عمق از بالادست به پایین‌دست بوده است (شکل ۵ الف)، که به وضوح بیانگر تجمع رسوبات در مناطق پایین‌دست می‌باشد. بر اساس شکل ۵ ب، رابطه مثبت بین عرض و فاصله با ضریب همبستگی 0.77 حاکی از افزایش عرض رودخانه در طول مسیر جریان است. اگر مقطع رودخانه به‌طور قابل‌توجهی پهن و کم‌عمق باشد، مقدار عددی نسبت عرض به عمق (w/d) بالا خواهد بود، و در مقابل، زمانی که رودخانه عمیق و باریک باشد، این نسبت کاهش می‌یابد. ضریب همبستگی نسبت عرض به عمق برابر با 0.74 به‌دست آمد، و ایستگاه انتهایی به‌دلیل عرض زیاد به‌طور مشخصی از سایر ایستگاه‌ها متمایز بود (شکل ۵ ج). ضریب همبستگی بین نسبت عرض به عمق و فاصله نیز برابر با 0.67 محاسبه شد، و روند تغییرات آن افزایشی و مثبت بود (شکل ۵ د). این مقدار حاکی از افزایش نسبت " w/d " از بالادست به پایین‌دست رودخانه است.



شکل ۵. فرآیند تغییرات بین عمق و فاصله (الف)، عرض و فاصله (ب)، تغییرات بین عرض و عمق (ج)، عرض به عمق و فاصله (د)، تغییرات بین مساحت و فاصله (ه) و شعاع هیدرولیکی (HR) و فاصله (ی).

بر اساس نتایج، افزایش عرض و عمق رودخانه از بالادست به پایین‌دست به‌صورت یکنواخت و هم‌زمان رخ نداده است. این ارزیابی‌ها نشان داد که در ایستگاه‌های مختلف، عرض و عمق به‌طور نامنظم تغییر کرده‌اند، اما در مجموع و در طول مسیر ۹۱ کیلومتری، نوسانات عمق روندی کاهشی داشته و عرض دارای روندی افزایشی بوده است. با مقایسه ایستگاه‌های ابتدایی و انتهایی، میزان افزایش عرض برابر با $441/56$ درصد و کاهش عمق معادل $55/02$ درصد بوده است. این کاهش در عمق و افزایش قابل‌توجه در عرض می‌تواند ناشی از ظرفیت بالای انتقال رسوب در رودخانه باشد.

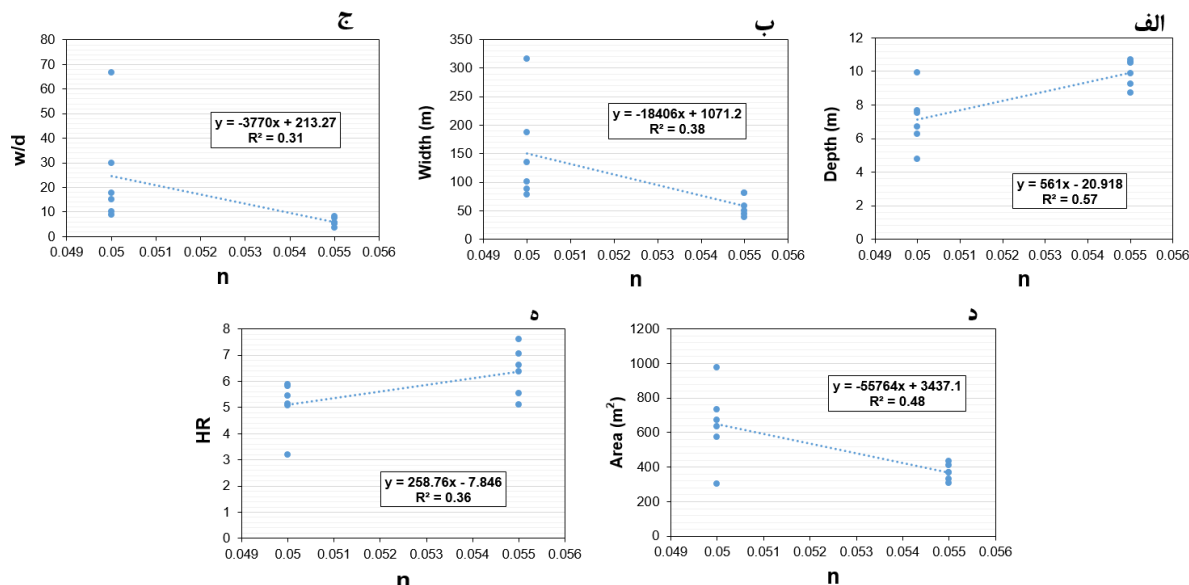
نتایج تحلیل‌ها نشان داد که مساحت مقاطع ایستگاه‌ها با افزایش فاصله از بالادست به پایین‌دست کاهش یافته است (شکل ۵ ه). رابطه بین مساحت ایستگاه‌ها در طول رودخانه دارای شیب مثبت بوده و ضریب همبستگی آن برابر با ۰/۷۱ به‌دست آمده است به‌گونه‌ای که کاهش قابل‌توجهی در مساحت ایستگاه‌ها از بالادست به پایین‌دست مشاهده شد. این موضوع بیانگر آن است که مقاطع رودخانه در طول مسیر کاهش یافته‌اند و تغییرات مساحت از یک ایستگاه به ایستگاه دیگر به‌صورت نامنظم بوده است. یکی از عوامل مؤثر در این تغییرات نامنظم، تنوع مورفولوژیکی بستر رودخانه است. رودخانه از مسیرهای کوهستانی با دره‌های نسبتاً عمیق عبور کرده و سپس وارد دشت‌های وسیع با دشت‌های سیلابی گسترده می‌شود. همچنین، تغییرات شعاع هیدرولیکی در طول رودخانه موجب درک بهتر از بازدهی جریان در طول مسیر رودخانه شد. نتایج این تحلیل نشان داد که مقدار HR به‌صورت تدریجی از بالادست به پایین‌دست کاهش یافته است. ضریب همبستگی (۰/۷۷) این رابطه نیز نشان می‌دهد که ظرفیت انتقال جریان از بالادست به پایین‌دست روند نزولی داشته است (شکل ۵ ی).



شکل ۶. فرآیند تغییرات بین عمق (الف)، عرض (ب)، عرض به عمق (ج)، مساحت (د) و شعاع هیدرولیکی (HR) (ه) با شیب طولی رودخانه.

نتایج بررسی فرآیند تغییرات عمق و شعاع هیدرولیکی با شیب طولی رودخانه مثبت و ضریب همبستگی به ترتیب برابر ۰/۶۰ و ۰/۵۵ شد (شکل ۶). در حالی که تغییرات عرض، مساحت و عرض به عمق منفی بوده و مقادیر ضریب همبستگی به ترتیب برابر ۰/۶۰، ۰/۵۲ و ۰/۵۸ حاصل گردید (شکل ۶). به علاوه، روند تغییرات پارامترهای هندسی با ضریب زبری مانینگ نیز انجام گرفت که نتایج مشابه بررسی قبل بوده، به طوریکه برای عمق و شعاع هیدرولیکی مثبت و برای بقیه پارامترها منفی بدست آمد. ضریب همبستگی این پارامترها در مقایسه با ضریب زبری مانینگ در شکل ۷ نشان داده شده است.

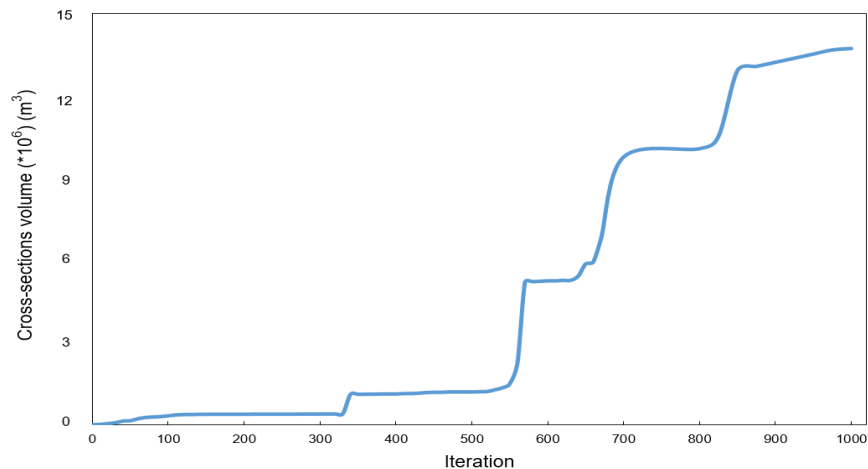
به طور کلی تمامی بررسی‌ها و روند تغییرات انجام شده به صورت هماهنگ و منسجم نشان‌دهنده تغییرات هر یک از پارامترهای هندسی از بالادست به سمت پایین‌دست بوده و افزایش نیاز به اصلاح و مدیریت کانال رودخانه به سمت پایین‌دست را مشخص ساخته است.



شکل ۷. فرآیند تغییرات بین عمق (الف)، عرض (ب)، عرض به عمق (ج)، مساحت (د) و شعاع هیدرولیکی (HR) (ه) با ضریب زبری مانینگ.

جدول ۳. پارامترهای اولیه الگوریتم پرند منشی.		
الگوریتم	پارامتر	مقدار
SBOA	فاکتور Levy flight	۱/۵۰
	RB	[۱ ۲]
	R_1	[۱ ۲]
	R_2	[۱ ۲]
	K	{۱ و ۲}
	r	۰/۵۰
	حداکثر تکرار	۱۰۰۰

پس از بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی هیدرولیکی، فرآیند بهینه‌سازی در نرم‌افزار متلب نسخه ۲۰۲۴ انجام شد. پارامترهای الگوریتم SBOA شامل فاکتور پرواز لوی، RB، R_1 ، R_2 و K و حداکثر تعداد تکرار، تعیین و در جدول ۳ خلاصه شده‌اند. جمعیت اولیه فرآیند برابر با ۱۰ در نظر گرفته شده و تحلیل حساسیت برای تمامی پارامترهای اولیه انجام شد و بهترین مقادیر برای هر کدام انتخاب گردید. فرآیند بهینه‌سازی حجم بعدی توسط الگوریتم SBOA در شکل ۸ نمایش داده شده است. بر اساس بررسی ۱۲ ایستگاه و ۱۲۰ مقطع عرضی (هر ایستگاه شامل ۱۰ مقطع عرضی)، حجم بهینه نهایی ایستگاه‌ها پس از لایروبی، پس از ۱۰۰۰ تکرار برابر با ۱۳۳۹۶۱۱۰ متر مکعب به دست آمد.

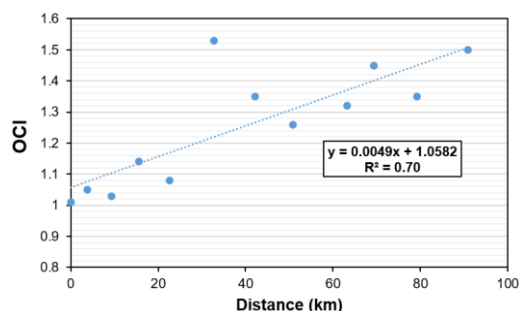


شکل ۸. روند بیشینه‌سازی حجم لایروبی با استفاده از الگوریتم SBOA طی ۱۰۰۰ تکرار.

جدول ۴. کم‌ترین ارتفاع بستر و ارتفاع آب ایستگاه‌ها قبل و بعد از فرآیند بهینه‌سازی با الگوریتم SBOA.

ایستگاه	شبه‌سازی شده		بهینه شده	
	کمترین تراز بستر (m)	تراز سطح آب (m)	کمترین تراز بستر (m)	تراز سطح آب (m)
S1	۱۶۴۶/۳۵	۱۶۵۵/۹۲	۱۶۴۶/۳۵	۱۶۵۵/۷۵
S2	۱۵۴۸/۱۲	۱۵۵۸/۴۲	۱۵۴۸/۱۲	۱۵۵۷/۹۴
S3	۱۴۹۶/۱۵	۱۵۰۸/۶۵	۱۴۹۶/۱۰	۱۵۰۷/۳۶
S4	۱۴۲۰/۲۲	۱۴۳۶/۹۲	۱۴۱۹/۸۵	۱۴۳۶/۴۹
S5	۱۳۷۱/۳۴	۱۳۸۲/۵۴	۱۳۷۱/۱۶	۱۳۸۲/۱۵
S6	۱۲۵۵/۳۰	۱۲۶۴/۴۰	۱۲۵۴/۹۱	۱۲۶۳/۹۷
S7	۱۱۳۷/۴۲	۱۱۴۷/۸۵	۱۱۳۷/۲۵	۱۱۴۷/۴۵
S8	۱۰۸۳/۵۵	۱۰۹۵/۴۱	۱۰۸۳/۰۵	۱۰۹۵/۱۰
S9	۱۰۴۰/۸۱	۱۰۴۹/۸۸	۱۰۴۰/۱۳	۱۰۴۹/۴۸
S10	۹۶۴/۲۶	۹۷۴/۵۲	۹۶۳/۹۲	۹۷۴/۱۲
S11	۹۰۵/۸۴	۹۱۸/۲۳	۹۰۵/۸۴	۹۱۸/۰۲
S12	۸۱۵/۳۲	۸۲۲/۳۸	۸۱۵/۰۳	۸۲۲/۰۹

اطلاعات ایستگاه‌ها قبل و بعد از بهینه‌سازی در جدول ۴ خلاصه شده و کم‌ترین ارتفاع بستر و سطح آب هر ایستگاه به دست آمده است. در برخی از ایستگاه‌ها مانند شماره‌های ۱، ۲ و ۱۱، کم‌ترین ارتفاع‌ها تغییری نکرده‌اند، در حالی که این ایستگاه‌ها بهینه شده‌اند. علت این موضوع وجود ناهمواری‌های زیاد و متعدد در بستر رودخانه در این نقاط است. شاخص OCI به منظور رصد تغییرات آن در طول محدوده مورد مطالعه و ارزیابی الگوی تغییرات در طول رودخانه، نسبت به فاصله تحلیل شد. این شاخص روندی مثبت با ضریب ۰/۷۰ نشان داد (شکل ۹). این روند بیانگر آن است که مقادیر OCI در بخش‌های بالادست به مقدار بهینه نزدیک‌تر بوده و از بالادست به پایین‌دست رودخانه، وسعت مقاطع بهینه افزایش یافته است. این روند نیاز به افزایش لایروبی از بالادست به پایین‌دست را نشان می‌دهد (جدول ۵).



شکل ۹. روند تغییرات شاخص OCI نسبت به فاصله.

جدول ۵. مقدار شاخص OCI و مساحت ایستگاه‌های بهینه.

OCI	مساحت (m ²)		ایستگاه
	بهینه شده	شبیه‌سازی شده	
۱/۰۱	۳۷۰/۹۷	۳۶۷/۳۰	S1
۱/۰۵	۴۳۰/۹۷	۴۱۰/۴۵	S2
۱/۰۳	۳۸۱/۴۲	۳۷۰/۳۱	S3
۱/۱۴	۴۹۶/۶۵	۴۳۵/۶۶	S4
۱/۰۸	۳۵۶/۹۷	۳۳۰/۵۲	S5
۱/۵۳	۴۶۲/۴۹	۳۰۲/۲۸	S6
۱/۳۵	۴۱۳/۸۷	۳۰۶/۵۷	S7
۱/۲۶	۹۲۱/۴۱	۷۳۱/۲۸	S8
۱/۳۲	۸۳۷/۶۶	۶۳۴/۵۹	S9
۱/۴۵	۸۳۴/۱۳	۵۷۵/۲۶	S10
۱/۳۵	۹۰۷/۷۵	۶۷۲/۴۱	S11
۱/۵۰	۱۴۶۶/۸۷	۹۷۷/۹۱	S12

جدول ۵ مقادیر شاخص OCI همراه با مساحت‌های مشاهده شده و بهینه‌شده برای تمامی ۱۲ ایستگاه را نشان می‌دهد. مقادیر این شاخص از بالادست به پایین‌دست روند افزایشی داشته است که مقدار تغییرات آن بین ۱/۰۱ (۱٪) تا ۱/۵۳ (۵۳٪) متغیر بوده است. هندسه ایستگاه ۶ در وضعیتی بحرانی قرار دارد و بیشترین نیاز به لایروبی را دارا است که در جدول ۵ نیز مشخص شده است. مقدار OCI این ایستگاه به عدد قابل توجه ۱/۵۳ رسیده است که ضرورت فوری اصلاح و لایروبی را نشان می‌دهد. اختلاف مساحت این ایستگاه با حالت بهینه برابر با ۱۶۰/۲۱ متر مربع است که نیازمند افزایش ۵۳٪ برای رسیدن به شرایط بهینه و مطلوب می‌باشد. بر اساس نتایج بهینه‌سازی، متوسط حجم کل مسیل پیش از لایروبی برابر با ۴۶۳۶۹۰۵۰ متر مکعب بوده است. پس از لایروبی، متوسط حجم کل به میزان ۵۹۷۶۵۱۶۰ متر مکعب در مقاطع عرضی رسیده است. این فرآیند بهینه‌سازی به طور مؤثری ظرفیت مسیر رودخانه زاینده‌رود را به میزان ۲۸/۸۹٪ افزایش داده است. در نهایت، حجم آزاد شده به میزان ۱۳۳۹۶۱۱۰ متر مکعب که عموماً به وسیله عملیات مکانیکی با ادوات مربوطه انجام می‌گیرد منجر به کاهش خسارات و آبگرفتگی حاصل از سیلاب شده که هدف اصلی این مطالعه می‌باشد.

با بررسی مطالعات پیشین مشخص شد که ادغام نتایج شبیه‌سازی HEC-RAS با الگوریتم SBOA به عنوان یک رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی، روشی نوآورانه در اصلاح و لایروبی کانال رودخانه به شمار می‌رود که حجم اصلاح و لایروبی را به خوبی

مشخص می‌کند. بر اساس سوابق مطالعاتی، استفاده جداگانه از رویکردهای شبیه‌سازی یا بهینه‌سازی در تحقیقات وانگ و همکاران (۲۰۲۴)، یانگ (۲۰۲۴) فنگ (۲۰۱۹)، مهتا و همکاران (۲۰۲۰)، سعد و حبیب (۲۰۲۱)، بول و همکاران (۲۰۱۴) انجام گرفته است. علاوه بر این، رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی توسط طباطبایی و همکاران (۲۰۱۸) و ماهش (۲۰۲۴) استفاده شده، که هیچ یک از آن‌ها نیز از روش‌هایی مانند نرم‌افزار HEC-RAS، الگوریتم SBOA و شاخص OCI بهره نبرده‌اند. بنابراین، مطالعه حاضر با رویکرد تلفیقی جدید توانسته هم از نظر روش‌شناسی و هم نتایج، نسبت به سایر مطالعات پیشین تعیین کننده‌تر عمل نماید.

از جمله محدودیت‌های رویکرد حاضر تعیین پارامترهای اولیه الگوریتم پرنده منشی است که به صورت سعی و خطا تعیین گردید. دیگر محدودیت مربوط به شبیه‌سازی هیدرولیکی یک بعدی است که نسبت به حالت دو بعدی محدودیت‌های خاص خود را دارا است. همچنین یکی دیگر از محدودیت‌های این مطالعه، عدم در نظر گرفتن فرآیند رسوب‌گذاری و فرسایش به شمار می‌رود که **دلیل اصلی آن عدم در دسترس بودن داده‌های دقیق و قابل اعتماد برای رودخانه زاینده‌رود می‌باشد.**

در نظر گرفتن عوامل مربوط به هزینه در هر پروژه‌ای از جمله لایروبی و اصلاح بستر رودخانه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بنابراین پیشنهاد می‌شود با در نظر گرفتن هزینه لایروبی و فرآیند رسوب‌گذاری و فرسایش (در صورت در دسترس بودن داده‌ها)، کارایی عملیات لایروبی افزایش پیدا کند و فرآیند بهینه‌سازی هندسه کانال کاربردی‌تر و ملموس‌تر صورت پذیرد.

نتیجه‌گیری

بازه ۹۱ کیلومتری از رودخانه زاینده‌رود در استان اصفهان برای توسعه و بهینه‌سازی هندسه مقاطع عرضی انتخاب شد. به منظور استخراج ویژگی‌های هندسی مقاطع عرضی رودخانه، شبیه‌سازی هیدرولیکی با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS نسخه ۶/۱ انجام گردید. به کمک الگوریتم SBOA، مقاطع عرضی بهینه برای بستر رودخانه حاصل شد و خروجی‌ها توسط شاخص OCI برای ارزیابی کانال رودخانه مورد استفاده قرار گرفته که شرایط بهینه مقاطع عرضی را به صورت عددی به نمایش گذاشته است. با استخراج روند تغییرات دو پارامتر عرض و عمق نسبت به فاصله، نتایج نشان‌دهنده افزایش چشمگیر عرض و کاهش عمق بود، به طوری که عرض رودخانه با افزایش ۴۴۱/۵۶ درصدی و عمق با کاهش ۵۵/۰۲ درصدی از ایستگاه اول تا آخر تغییر یافت. این وضعیت می‌تواند نشان‌دهنده ظرفیت بالای حمل رسوبات در رودخانه باشد. همچنین، روند تغییرات پارامترهای هندسی در مقایسه با شیب طولی رودخانه و ضریب زبری مانینگ بر نتایج بدست آمده صحنه گذاشته است. مقدار شاخص OCI در بخش‌های بالادست به مقدار بهینه نزدیک‌تر بود، مساحت مقاطع بهینه از بالادست به پایین‌دست افزایش یافته و به تبع آن، نیاز به لایروبی نیز افزایش یافت. در نهایت، رویکرد حاضر پس از فرآیند بهینه‌سازی، حجم آزاد شده به میزان ۱۳۳۹۶۱۱۰ متر مکعب که عموماً به وسیله عملیات مکانیکی با ادوات مربوطه انجام می‌گیرد منجر به کاهش خسارات و آبگرفتگی حاصل از سیلاب شده و ظرفیت مسیر آبرسانی رودخانه را تا ۲۸/۸۹ درصد افزایش داده است. به طور کلی پس از تجزیه و تحلیل شاخص‌های مختلف مشخص گردید که: (۱) اصلاح کانال و انجام لایروبی مقطع آن اقدامی ضروری برای رودخانه زاینده‌رود در محدوده مورد مطالعه است. (۲) نیاز به انجام لایروبی از بالادست به سمت پایین‌دست رودخانه افزایش می‌یابد و اهمیت نظارت و مدیریت مورفولوژی رودخانه را برجسته می‌کند.

تعارض منافع^۱

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد."

REFERENCES

¹ Conflict of interest

- Abou Zaki, N., Torabi Haghighi, A. M., Rossi, P., Tourian, M. J., Bakhshaei, A., & Kløve, B. (2020). Evaluating Impacts of Irrigation and Drought on River, Groundwater and a Terminal Wetland in the Zayanderud Basin, Iran. *Water* 12(5):1302.
- Anand, A. K., & Pradhan, S. P. (2024). Modelling of insitu channel migration vis-à-vis bank stability of Brahmani River, Odisha. *Model. Earth Syst. Environ.* 10:3157–3179. <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01948-3>.
- Biswal, S., Sahoo, B., Jha, M. K., & Bhuyan, M. K. (2023). A hybrid machine learning-based multi-DEM ensemble model of river cross-section extraction: Implications on streamflow routing. *Journal of Hydrology* 625(Part A):129951.
- Burele, S., Sharma, S., Ahmad, Z., & Gupta, I. (2014). Numerical simulation-optimization for channelization of River Kosi. *International Journal of Scientific Engineering and Technology* 3(9):1149-1155.
- Chang H. H. (1980). Geometry of gravel streams, *J. Hydraul. Div.* 106(9):1443–1456.
- Chang, S. Y., Ghahremani, Z., Manuel, L., Erfani, S. M. H., Shen, C., Cohen, S., Van Meter, K. J., Pierce, J. L., Meselhe, E. A., & Goharian, E. (2024). The Geometry of Flow: Advancing Predictions of River Geometry With Multi-Model Machine Learning. *Water Resources Research* 60(10). <https://doi.org/10.1029/2023WR036733>.
- Easa, S. M., Vatankhah, A. R., & Abd El Halim, A. O. (2011). A simplified direct method for finding optimal stable trapezoidal channels. *Intl. J. River Basin Management* 9(2):85-92. <http://dx.doi.org/10.1080/15715124.2011.565771>.
- Erfani, S. M. H., Erfani, M., Cohen, S., Downey, A. R. J., & Goharian, E. (2024). A large dataset of fluvial hydraulic and geometry attributes derived from USGS field measurement records. *Environmental Modelling & Software*, 180:106136. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106136>.
- Feng, X. (2019). Construction time-cost optimization of river dredging project in cold region based on NSGA-II algorithm. *Earth and Environmental Science*, 371: 022032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/371/2/022032>.
- Fu, Y., Liu, D., Chen, J., & He, L. (2024). Secretary bird optimization algorithm: a new metaheuristic for solving global optimization problems. *Artificial Intelligence Review*, 57:123. <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10729-y>.
- Ghenaati, B., Ahmadi, M. (2023). Modeling Hydrologic Consequences of Land Use and Climate Changes: The Case of Zayanderud Basin. *AUT Journal of Modeling and Simulation*, 55(2):327-342. <https://doi.org/10.22060/miscj.2024.22891.5347>.
- Huang, H. Q., & Nanson, G. C. (2002). A stability criterion inherent in laws governing alluvial channel flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27(9):929-944.
- Lamine, B. O. M., Ferreira, V. G., Yang, Y., Ndehedehe C. E., & He, X. (2021). Estimation of the Niger River cross-section and discharge from remotely-sensed products. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 36:100862. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100862>.
- Lee, J. S., & Julien, P. Y. (2006). Downstream hydraulic geometry of alluvial channels. *J. Hydraul. Eng.*, 132(12):1347–1352.
- Liao, K. H., Chan, J. K. H., & Huang, Y. L. (2019). Environmental justice and flood prevention: the moral cost of floodwater redistribution. *Landscape Urban Plan*, 189:36–45. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.04.012>.
- Mahdavi-Meymand, A., Zounemat-Kermani, M. (2022). Application of mayfly algorithm for prediction of removed sediment in hydro-suction dredging systems. *Ships and Offshore Structures*, 18(12):1737-1745. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2140528>.
- Mahesh, K. (2024). Dredging Analysis and Decision Support System. *International Journal of Engineering Innovations and Management Strategies*, 1(5):1-15.
- Mahmudi, M., Tabatabai, M. R. M., & Nadoushani, S. M. (2019). An analytical approach to the estimation of optimum river channel dimensions. *Scientia Iranica*, 26(3): 1169-1181.
- Malekpour, M. M., Ahmadi, M. M., Gugliotta, M., Tabari, M. M. R., & Qaderi, K. (2025). Estimation of suspended sediment load utilizing a super-optimized deep learning approach informed by the red fox optimization algorithm. *Earth Sci Inform*, 18:286. <https://doi.org/10.1007/s12145-025-01801-4>.
- Malekpour, M. M., & Malekpour, H. (2022). Reservoir water level forecasting using wavelet support vector regression (WSVR) based on teaching learning-based optimization algorithm (TLBO). *Soft Computing*, 26:8897–8909. <https://doi.org/10.1007/s00500-022-07296-1>.
- Malekpour, M. M., & Mohammad Rezapour Tabari, M. (2020). Implementation of supervised intelligence committee machine method for monthly water level prediction. *Arabian Journal of Geosciences*, 13:1049 <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06034-x>.

- Mehta, D., Yadav, S. M., Waikhom, S., & Prajapati, K. (2020). Stable channel design of tapi river using HEC-RAS for surat region. *Environmental Processes and Management, Water Science and Technology Library*, 91:25-36. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38152-3_2.
- Mondal, M., Ghosh, S., & Satpati, L. N. (2018). Optimum cross section index (OCI): a new approach for identification of an optimum channel—a case study of the Ichamati River, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 11:333. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3667-3>.
- Mondal, M., Ghosh, S., Satpati, L. N., & Kolakata, W. B. (2016). Character of cross-profiles with respect to the optimum channel cross-sections in the middle reach of the Ichamati River of West Bengal, India. *Trans. Inst. Indian Geographers*, 38(2): 201.
- Nasiri, N., Asghari, A., & Besalatpour, A. A. (2022). Quantitative analysis of the human intervention impacts on hydrological drought in the Zayande-Rud River Basin, Iran. *Journal of Water and Climate Change*, 13(9):3473. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.188>.
- Nelson, A. D., Collins, V. D., Payne, J. S., & Abbe, T. B. (2024). Proactive river corridor definition: Recommendations for a process-based width optimization approach illustrated in the context of the coastal Pacific Northwest. *Wires Water*, 11(3):e1711. <https://doi.org/10.1002/wat2.1711>.
- Ogdahl, M., Steinman, A., Uzarski, D., & Thompson, K. (2014). A methodology for assessing erosion control best management practice (BMP) effectiveness. 15–16.
- Qian, Q., Edwards, D. J., Zhang, Y., Haselbach, L. (2024). Improving Flood Inundation Mapping Accuracy Using HEC-RAS Modeling: A Case Study of the Neches River Tidal Floodplain in Texas. *Journal of Hydrologic Engineering*, 29(4). <https://doi.org/10.1061/JHYEFF.HEENG-6037>.
- Ridolfi, E., Alfonso, L., Di Baldassarre, G., Dottori, F., Russo, F., & Napolitano, F. (2014). An entropy approach for the optimization of cross-section spacing for river modelling. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1). <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.822640>.
- Saad, H. A., & Habib, E. H. (2021). Assessment of riverine dredging impact on flooding in low-gradient coastal rivers using a hybrid 1D/2D hydrodynamic model. *Front. Water*, 3:628829.
- Samal, P., Swain, P. C., & Samantaray, S. (2025). Flood analysis using HEC-RAS 1D model for the delta of Brahmani river, Odisha, India. *Nat Hazards*, 121: 7941–7966. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07121-6>.
- Shaghaghi, S., Bonakdari, H., Gholami, A., Ebtehaj, I., & Zeinolabedini, M. (2017). Comparative analysis of GMDH neural network based on genetic algorithm and particle swarm optimization in stable channel design. *Applied Mathematics and Computation*, 313: 271–286. <http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2017.06.012>.
- Sihombing, R., Muin, M., & Tawekal, R. L. (2022). Vessel Size and Dredging Depth Optimization for Tol Laut Program using Genetic Algorithm: Hub Port Case Study. *Earth and Environmental Science*, 1065: 012008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1065/1/012008>.
- Tabatabaei, M. M., Shourian, M., & Karaimi, M. (2018). Optimum stable channel geometry design using imperialist competitive algorithm. *Environmental Earth Sciences*, 77:445. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7634-9>.
- Towsif Khan, S., Wynn-Thompson, T., Sample, D., Al-Smadi, M., Shahed Behrouz, M., & Miller, A. J. (2024). Effectiveness of stormwater control measures in protecting stream channel stability. *Hydrological Processes* 38(6):e15178. <https://doi.org/10.1002/hyp.15178>.
- Turan, M. E., & Yurdusev, M. A. (2011). Optimization of open canal cross sections by differential evolution algorithm. *Mathematical and Computational Applications*, 16(1): 77-86.
- Wang, F., & Wang, B. (2025). Multi-Strategy Improved Secretary Bird Optimization Algorithm. *Journal of Computer and Communications*, 13(1): 90-107. <https://doi.org/10.4236/jcc.2025.131007>.
- Wang, Y., Han, C., & Zhao, X. (2024). Optimization Study on Sequential Emptying and Dredging for Water Diversity Reservoir Group. *Water*, 16(17): 2482. <https://doi.org/10.3390/w16172482>.
- Yang, T., Gao, X., Wang, L., Xue, Y., Fan, H., Zhu, Z., Zhao, J., & Dong, B. (2024). Multi-Strategy Improved Secretary Bird Optimization Algorithm. *Journal of Computer and Communications*, 13(1): 90-107. <https://doi.org/10.4236/jcc.2025.131007>.
- Yang, Y. (2024). Construction period and cost optimization for river dredging engineering based on NSGA-II. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*, 24(4-5):2879-2894. <https://doi.org/10.3233/JCM-247524>.
- Zhu, Y., Zhang, M., Huang, Q., Wu, X., Wan, L., & Huang, J. (2025). Secretary bird optimization algorithm based on quantum computing and multiple strategies improvement for KELM diabetes classification. *Scientific Reports*, 15:3774. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87285-0>.