



# River Geometry Improvement and Flood Control: Application of Teaching Learning-Based Optimization Algorithm

Mohammad Mahdi Malekpour <sup>a\*</sup>, Mohammad Mehdi Ahmadi <sup>b</sup>, Kouros Qaderi <sup>c</sup>, Yousef Rajabizadeh <sup>d</sup>

<sup>a</sup> Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

[mm.malekpour@agr.uk.ac.ir](mailto:mm.malekpour@agr.uk.ac.ir)

<sup>b</sup> Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

[ahmadi\\_mm@uk.ac.ir](mailto:ahmadi_mm@uk.ac.ir)

<sup>c</sup> Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

[kourosqaderi@uk.ac.ir](mailto:kourosqaderi@uk.ac.ir)

<sup>d</sup> Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

[yousef.rajabi@agr.uk.ac.ir](mailto:yousef.rajabi@agr.uk.ac.ir)

## Original Article

Use your device to scan and read the article online



**Citation:** Malekpour M M, Ahmadi M M, Qaderi K, Rajabizadeh Y. River Geometry Improvement and Flood Control: Application of Teaching Learning-Based Optimization Algorithm. *Industrial Innovations*. 2024;2(3):285-300.

 <https://doi.org/10.61882/jii.2.3.285>

## KEYWORDS

Dredging;  
HEC-RAS;  
Hydraulic simulation;  
Zayandehrud River.

## ABSTRACT

The geometry and morphological variations of river cross-sections represent one of the key issues in water and river engineering, exerting a direct influence on river management, stability, and flow dynamics. Achieving an optimal cross-sectional geometry is among the most critical structural measures for river management, as it contributes to flood control and the reduction of human and economic losses. In this study, the HEC-RAS software was initially employed to extract the geometric parameters of cross-sections and to analyze the hydraulic conditions of flow along a one-kilometer reach of the Zayandehrud River in Iran. Following the hydraulic simulations, the optimal cross-sectional geometry was determined using the Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) algorithm, with the primary objective of maximizing dredging volume while maintaining hydraulic stability. Subsequently, the conformity of each cross-section with its optimal state was evaluated. The hydraulic simulation results indicated that, from upstream to downstream, channel width exhibited a 69.26% increase, while channel depth showed a notable 28.78% decrease. After optimization, the cross-sectional area increased between 2.16% and 28.24%, with a clear increasing trend from upstream to downstream, highlighting the greater need for cross-sectional modification in downstream sections. Ultimately, this optimization approach demonstrated significant effectiveness, enhancing the river's flow capacity by 10.13% and thereby fulfilling the main objective of the study—namely, flood risk mitigation and reduction of human and economic losses.

## Extended Abstract

### 1. Introduction

The geometry and morphological evolution of river cross-sections are among the most critical and influential aspects of water and river engineering. These characteristics determine how rivers behave under different flow conditions and directly affect river management, planning, and ecological health by controlling flow patterns, sediment transport, and channel stability. Any alteration in cross-sectional geometry can lead to significant changes in hydraulic performance and

\* Corresponding author

E-mail address: [mm.malekpour@agr.uk.ac.ir](mailto:mm.malekpour@agr.uk.ac.ir)

DOI: <https://doi.org/10.61882/jii.2.3.285>

Received: August 16, 2025; Received in revised form: September 4, 2025; Accepted: September 6, 2025.

Article type: Research Paper



ecological balance, making their study essential for both engineering and environmental purposes. Achieving the optimal river cross-section is therefore regarded as a key structural intervention in sustainable river management. A properly designed cross-section contributes not only to efficient flood control but also to risk reduction, erosion prevention, and the long-term protection of life and property. At the same time, it helps maintain ecological integrity by supporting aquatic habitats and sustaining natural hydrological processes. To reach these objectives, cross-sectional geometry and hydraulic flow characteristics must be assessed regularly under a variety of flow regimes. Such evaluations are crucial not only for engineering design and construction but also for developing long-term scientific understanding and effective management strategies. In this context, hydraulic modeling emerges as an indispensable tool. By simulating flow dynamics and predicting geometric responses, it provides accurate and reliable data that guide decision-making. Ultimately, hydraulic modeling forms the foundation for achieving stable, efficient, and ecologically balanced river conditions.

## 2. Approach

In this study, hydraulic modeling was conducted using the HEC-RAS software for a selected section of the Zayandehrud River in Iran. The Zayandehrud originates from the Zagros Mountains in the north of Chaharmahal and Bakhtiari Province, flows eastward into Isfahan Province, passes through the historic city of Isfahan, and eventually discharges into the Gavkhouni Wetland. As a major river in the region, it plays a crucial role in supplying water for domestic use, irrigation, and maintaining ecological balance, making its hydraulic assessment especially important for sustainable management. The hydraulic simulation was performed using a one-dimensional, unsteady flow model to represent a flood event with a 25-year return period and a peak discharge of 521 m<sup>3</sup>/s. The main goal of the simulation was to evaluate potential floodplain inundation and to analyze its impacts on adjacent lands, infrastructure, and human settlements. By providing detailed information on flow depth, velocity, and inundation extent, the model enabled a comprehensive understanding of flood behavior along the study reach. Following the hydraulic analysis, the Teaching Learning-Based Optimization (TLBO) algorithm was applied. Using a defined objective function and relevant constraints, the algorithm determined the optimal dredging volumes required to improve channel capacity while maintaining hydraulic stability. This combined approach ensured not only enhanced flood management but also the long-term structural and hydraulic stability of the river system, balancing the needs for safety, efficiency, and ecological preservation.

## 3. Findings

The flood simulation results revealed substantial inundation across the floodplains in the study area, emphasizing the urgent need for channel modification and proper hydraulic interventions. The hydraulic model not only quantified the extent of flooding but also provided critical geometric parameters, including cross-sectional area, flow depth, channel width, wetted perimeter, and hydraulic radius, all of which are fundamental for understanding river behavior under flood conditions. To better interpret these results, the trends in the geometric parameters were systematically analyzed using correlation coefficients. Interestingly, the variation in river depth and width did not follow a uniform pattern from upstream to downstream, reflecting the influence of local morphological conditions and sediment dynamics. This non-uniformity highlights the complexity of hydraulic processes within the Zayandehrud River and the necessity of localized optimization strategies rather than adopting a uniform dredging scheme. For a detailed evaluation, 10 monitoring stations were analyzed, each including 5 cross-sections, resulting in a total of 50 cross-sections covering approximately 1000 meters of the river reach. After applying the Teaching Learning-Based Optimization (TLBO) algorithm with 1000 iterations, the final optimized dredging volume was determined to be 89,237.04 cubic meters. This optimized dredging volume reflects a balance between flood control efficiency and hydraulic stability, ensuring that excessive excavation is avoided while sufficient channel capacity is achieved. The analysis of changes in cross-sectional area across the stations demonstrated significant improvements. The increase in area ranged from as little as 2.16% at station 2, where the channel geometry was relatively stable, to as high as 24.28% at station 10, where flood risk and morphological instability were more pronounced. Overall, the trend of cross-sectional optimization exhibited a clear increasing pattern from upstream to downstream, indicating that downstream sections of the Zayandehrud River require more intensive modifications to effectively mitigate flood hazards. These findings provide valuable guidance for targeted dredging and sustainable river management practices.

## 4. Conclusion

An assessment of depth and width trends revealed notable geometric changes along the studied reach of the river. Specifically, there was a significant decrease in depth coupled with a marked increase in channel width toward downstream sections, a pattern most likely associated with the river's high sediment transport capacity and the resulting deposition processes. A direct comparison between the first and last stations illustrated these variations clearly, showing a 69.26% increase in width and a 28.78% decrease in depth, highlighting the spatial heterogeneity of river morphology along the Zayandehrud. In terms of volumetric capacity, the total pre-dredging volume of the studied stations was calculated at 881,256.23 m<sup>3</sup>. Following the optimization process, an additional 89,237.04 m<sup>3</sup> of cross-sectional capacity was effectively generated, representing a considerable improvement in the channel's ability to convey water. This enhancement translated into a 10.13% increase in the overall flow capacity of the Zayandehrud River, thereby improving its resilience against high-magnitude flood events. The results also demonstrated that as the river progressed downstream, the optimal cross-sectional area requirements increased significantly, indicating a higher need for dredging and channel modification in those sections. This pattern reflects the cumulative impact of sediment deposition and geomorphic changes, which intensify downstream and reduce the natural flow-carrying capacity of the channel. Ultimately, the implementation of channel modification and optimized dredging, as proposed in this study, along the one-kilometer reach of the river resulted in substantial improvements in hydraulic performance. Not only did it enhance the efficiency of water conveyance and stabilize flow conditions, but it also significantly reduced the risk of potential human casualties and financial losses associated with flooding.



## بهبود هندسه رودخانه و کنترل سیلاب: کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری

محمد مهدی ملک‌پور<sup>الف\*</sup>، محمد مهدی احمدی<sup>ب</sup>، کورش قادری<sup>ج</sup>، یوسف رجیبی‌زاده<sup>د</sup>

<sup>الف</sup> گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. [mm.malekpour@agr.uk.ac.ir](mailto:mm.malekpour@agr.uk.ac.ir)

<sup>ب</sup> گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. [ahmadi\\_mm@uk.ac.ir](mailto:ahmadi_mm@uk.ac.ir)

<sup>ج</sup> گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. [kouroshqaderi@uk.ac.ir](mailto:kouroshqaderi@uk.ac.ir)

<sup>د</sup> گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. [yousef.rajab@agr.uk.ac.ir](mailto:yousef.rajab@agr.uk.ac.ir)

واژگان کلیدی	چکیده
لایروبی؛ HEC-RAS؛ شبیه‌سازی هیدرولیکی؛ رودخانه زاینده‌رود.	هندسه مقطع رودخانه و تغییر شکل آن یکی از مسائل مهم و تأثیرگذار در زمینه مهندسی آب و رودخانه بوده و تأثیر 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، ابتدا از نرم‌افزار HEC-RAS به منظور استخراج پارامترهای هندسی مقاطع عرضی و بررسی شرایط هیدرولیکی جریان بر روی بازه یک کیلومتری از رودخانه زاینده‌رود در ایران استفاده شد. پس از انجام شبیه‌سازی هیدرولیکی، هندسه بهینه مقطع عرضی رودخانه توسط الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری (TLBO) تعیین شد که هدف آن، حداکثرسازی حجم لایروبی در عین حفظ پایداری هیدرولیکی بود. سپس، ارزیابی میزان تطابق هر مقطع با حالت بهینه آن انجام پذیرفت. بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی هیدرولیکی نشان داد که روند تغییرات دو پارامتر عرض و عمق به ترتیب افزایش ۶۹/۲۶ درصد و کاهش ۲۸/۷۸ درصدی را از بالادست به پایین‌دست داشته‌اند. پس از فرآیند بهینه‌سازی، مساحت بهینه مقطع بین ۲/۱۶٪ تا ۲۸/۲۴٪ افزایش داشته و روند افزایشی آن از بالادست به پایین‌دست مشهود بود که بیانگر نیاز بیشتر به اصلاح مقطع در مقاطع پایین‌دست است. در نهایت، این رویکرد بهینه‌سازی اثربخشی قابل توجهی نشان داد، به گونه‌ای که ظرفیت آبگذری رودخانه پس از اجرای بهینه‌سازی تا ۱۰/۱۳٪ افزایش یافت و این امر در راستای هدف اصلی پژوهش، یعنی کنترل و کاهش ریسک سیلاب و کاهش خسارات جانی و مالی، محقق شد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۵	

### ۱- مقدمه

هندسه مقطع رودخانه و ویژگی‌های جریان در مواقع ضروری برای اهداف علمی یا مدیریتی کنترل و بررسی می‌شوند [۱]. شکل مقطع کانال‌های طبیعی به‌طور کلی نامنظم بوده [۲] و تغییر شکل مقطع یکی از پارامترهای مهم در رابطه با سلامت رودخانه است [۳]. مقطع رودخانه به‌عنوان تغییر عمق در کانال با توجه به فاصله افقی، از یک کرانه به کرانه دیگر تعریف می‌شود [۴]. وسعت مقطع یک رودخانه در هر مکانی تابعی از جریان، ویژگی رسوب عبوری از آن مقطع و ترکیب مواد تشکیل‌دهنده بستر و کرانه‌های کانال می‌باشد [۴].

\* نویسنده مسئول؛

حوزه‌های آبخیزی که در مناطق انتقالی خشک و ساحلی قرار دارند، به‌طور فزاینده‌ای در معرض سیلاب‌های شدید ناشی از هر دو عامل انسانی و فرآیندهای طبیعی قرار گرفته‌اند [۵]. 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 آبخیزهای ساحلی، لایروبی یا کانال‌کشی مسیر رودخانه است [۶]. لایروبی به مجموعه‌ای از فعالیت‌ها اطلاق می‌شود که شامل حذف رسوبات و پوشش گیاهی بستر و حاشیه رود، تغییر عرض، عمق و شیب کانال و همچنین صاف‌سازی مسیر رودخانه می‌باشد [۷]. برای نمونه، پرستگارد و همکاران (۱۹۹۴) گزارش دادند که نواحی پایین‌دست یک مقطع اصلاح‌شده از رودخانه راگون در ایالت آیووا، سیلاب‌هایی با شدت بیشتری را نسبت به مقاطع مشابه در رودخانه‌هایی با حوزه‌های آبخیز مشابه در بالادست تجربه کرده‌اند. رز و پیترز (۲۰۰۱) نیز نشان دادند که افزایش ابعاد مقطع کانال موجب افزایش سرعت موج سیلاب شده و در نتیجه، زمان رسیدن اوج سیلاب به پایین‌دست را کاهش می‌دهد.

در حالت کلی، دو رویکرد اصلی برای تعیین هندسه کانال در رودخانه‌های آبرفتی وجود دارد، روش‌های تحلیلی و روش‌های تجربی که هر یک دارای مزایا و معایب خاص خود هستند [۸]. در میان مدل‌های تحلیلی، در دهه‌های اخیر، فرضیه‌های مختلفی به‌عنوان توابع هدف برای تخمین ابعاد بهینه کانال مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۸]. به دلیل ناکافی بودن روابط جریان پایه مانند پیوستگی، مقاومت، و انتقال رسوب برای بیان حالت تعادل، هوانگ و نانسون (۲۰۰۲) استفاده از فرضیه‌های افراطی را پیشنهاد کردند. به نظر آن‌ها، تعداد بیشتر مجهولات نسبت به معادلات را می‌توان با تعریف یک ضریب شکل کانال (نسبت عرض به عمق) حل کرد. متداول‌ترین روش برای طراحی کانال پایدار، روش تجربی است [۹]. از آنجایی که فرمول‌های تجربی بر اساس رودخانه‌های خاصی به‌دست آمده‌اند، این فرمول‌ها قابلیت تعمیم برای پیش‌بینی هندسه تمامی رودخانه‌ها در شرایط مختلف را ندارند و منجر به خطاهای پیش‌بینی بالا می‌شوند. در نتیجه، پژوهشگرانی مانند چنگ (۱۹۸۰) با حل چندین مسئله اساسی مکانیک سیالات، ابعاد کانال را با روش‌های منطقی و تحلیلی به‌دست آوردند. همچنین، چهار (۲۰۰۷) از روش لاگرانژ برای به‌دست آوردن پارامترهای بهینه مربوط به حداقل سطح مقطع و حداقل تلفات نفوذی جهت طراحی مقطع بهینه استفاده کرد. با این وجود، به دلیل وجود محدودیت‌های فراوان در روش‌های مذکور، رویکردهای جدید مانند روش‌های عددی، بهینه‌سازی و تلفیق آن‌ها مدنظر محققان قرار گرفته است.

مدل‌های رقومی ارتفاعی با وضوح متوسط که دارای اصلاح انحراف خطی در بعد ارتفاعی هستند، به‌طور گسترده‌ای برای مدل‌سازی هیدرودینامیکی شبکه‌های رودخانه‌ای در نواحی مرتفع مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۰]. لامین و همکاران (۲۰۲۱) از دو روش مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای برای برآورد مقطع عرضی رودخانه نیجر در غرب آفریقا استفاده کردند. پارامترهای هندسه هیدرولیکی که روابط هیدروژئومورفیک رودخانه را توصیف می‌کنند، برای تعیین ظرفیت کانال در انتقال جریان آب بسیار حیاتی هستند [۱۱]. برای بهبود سرعت و دقت محاسبه این پارامترها، استفاده از نرم‌افزارهای متنوعی نظیر HEC-RAS، SAM، MATLAB و غیره در دهه‌های اخیر رایج شده است. تیل و اندرسون (۲۰۰۵) از نرم‌افزار SAM و مهتا و همکاران (۲۰۲۰) و بول و همکاران (۲۰۱۴) از نرم‌افزار HEC-RAS برای شبیه‌سازی شرایط پایدار کانال و محاسبه ابعاد پایدار کانال استفاده کرده‌اند. یک مدل تحلیلی اصلاح شده توسط محمودی و همکاران (۲۰۱۹) 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.

وضعیت ژئومورفیک رودخانه ایچاماتی توسط موندال و همکاران (۲۰۱۶) با در نظر گرفتن ویژگی‌های مقطع عرضی کانال مانند ارزیابی تقارن، الگوی توپوگرافی بستر، پروفیل کناره‌ها و نسبت عرض به عمق، بررسی شد. در نهایت، مقاطع بهینه براساس عمق و عرض طراحی شده و با شاخص مقطع بهینه مقایسه شدند. نتایج نشان داد که مقاطع پایین‌دست رودخانه نیاز به اصلاحات بیشتری دارند [۳]. برای طراحی و بهینه‌سازی ابعاد مقطع رودخانه جهت عبور سیلاب‌های ناگهانی و جریان‌های دارای مواد معلق، فازانیک و همکاران (۲۰۰۶) از دو مدل ریاضی یک‌بعدی در مقاطع باریک و یک مدل دو بعدی استفاده کردند. آنالیز حساسیت بر پارامترهایی مانند ویسکوزیته دینامیکی، تنش برشی، و ضریب زبری مانینگ انجام شد. نلسون و همکاران (۲۰۲۴) نیز رویکردی برای بهینه‌سازی عرض رودخانه به‌منظور حفظ قابلیت انتقال سیلاب و بهبود عملکرد زیستگاهی پیشنهاد دادند.

استفاده از روش‌های محاسبات نرم به‌عنوان ابزاری قدرتمند، در دهه‌های اخیر به‌طور فزاینده‌ای برای شبیه‌سازی، پیش‌بینی و حل مسائل پیچیده در موضوعات مختلف محبوب شده است [۱۲]. به‌دلیل وجود محدودیت‌ها و کاستی‌هایی در هر یک از مدل‌های شبیه‌سازی، پژوهشگران مختلف نتایج شبیه‌سازی را با بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی بهبود داده‌اند [۱۳] و همچنین استفاده از این الگوریتم‌ها باعث افزایش دقت فرآیند برآورد شده است [۱۴]. چنگ و همکاران (۲۰۲۴) مدل‌های یادگیری ماشین را برای ارائه پیش‌بینی‌های بهبودیافته از عرض و عمق رودخانه به کار گرفتند. آن‌ها از یک مجموعه داده از اندازه‌گیری‌های رودخانه‌ای به همراه مجموعه‌ای از داده‌های پیش‌بینی‌شده حوزه آبخیز استفاده کردند تا رویکردهای نوین مبتنی بر داده برای تخمین دقیق‌تر هندسه رودخانه توسعه دهند. ماهش (۲۰۲۴) از سامانه تحلیل لایروبی و پشتیبانی تصمیم‌گیری بهره برد که یک راه‌حل مبتنی بر داده است و داده‌های تاریخی رسوب‌گذاری، الگوهای آب‌وهوایی و آمار جریان آب را با مدل‌های طبقه‌بندی و رگرسیون جنگل تصادفی ترکیب می‌کند تا نیازهای لایروبی را پیش‌بینی کرده و هزینه‌های مربوطه را تخمین بزند. ریدولفی و همکاران (۲۰۱۴) روش آنتروپی و الگوریتم ژنتیک را برای بهینه‌سازی مقاطع عرضی رودخانه و تعیین تعداد و مکان‌های بهینه آن‌ها به کار گرفتند. طباطبایی و همکاران (۲۰۱۸) از یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی همراه با الگوریتم رقابت استعماری برای طراحی مقاطع پایدار رودخانه با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های ساخت استفاده کردند. یانگ (۲۰۲۴) طرحی برای بهینه‌سازی هزینه‌های کانال با بهره‌گیری از سه الگوریتم ژنتیک، الگوریتم مستعمره شبیه‌سازی‌شده، و الگوریتم کلونی مورچگان پیشنهاد داد. توران و یوردوسی (۲۰۱۱) از الگوریتم تکامل تفاضلی برای بهینه‌سازی هندسه کانال استفاده کردند و اثربخشی آن را نشان دادند. شقاقی و همکاران (۲۰۱۷) الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات را برای طراحی مقطع عرضی مقایسه کردند و دریافتند که الگوریتم ژنتیک بر اساس دبی جریان، اندازه میانه رسوبات، و پارامتر شیلدرز پیش‌بینی‌های دقیق‌تری ارائه می‌دهد.

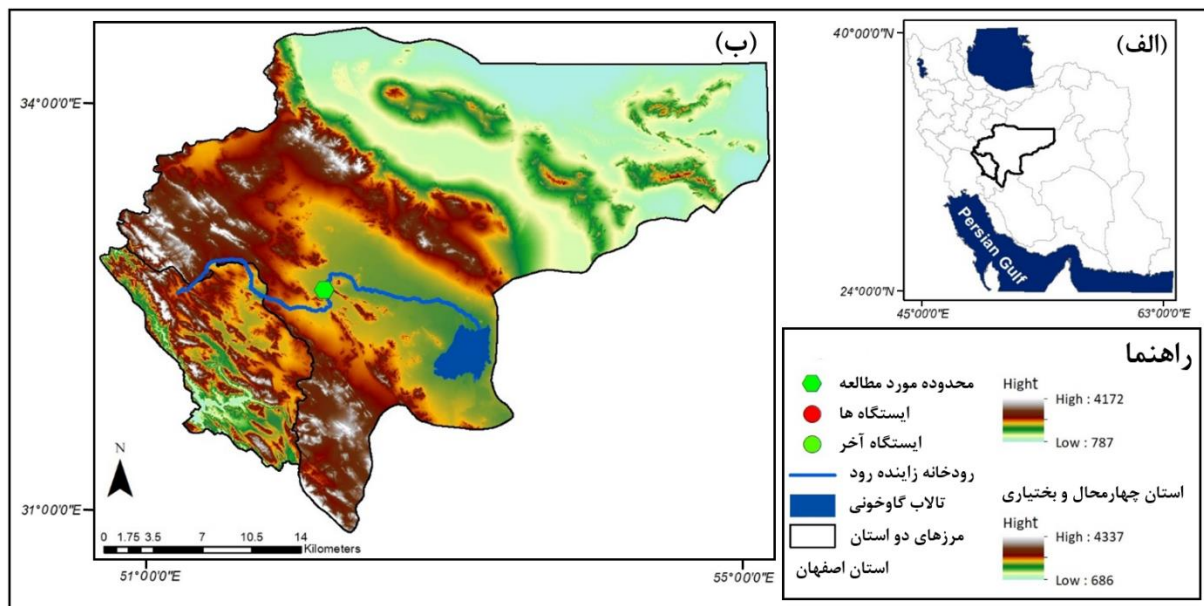
در این مطالعه، یک بازه یک کیلومتری از رودخانه زاینده‌رود در استان اصفهان مورد بررسی قرار گرفت و پارامترهای هیدرولیکی و هندسی این بازه با استفاده از شبیه‌سازی هیدرولیکی در نرم‌افزار HEC-RAS محاسبه شدند. برای بهینه‌سازی مقاطع عرضی کانال رودخانه، تابع هدف و قیود مرتبط به‌وسیله نویسندگان معرفی شده و الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری (TLBO<sup>2</sup>) به کار گرفته شد. این الگوریتم نوین و قدرتمند، به دلیل رویکرد خلاقانه‌اش و کاربرد آن برای نخستین بار در زمینه بهینه‌سازی مقاطع رودخانه، انتخاب گردید تا حداکثر حجم لایروبی و اصلاح مقاطع حاصل شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- 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 به‌شدت به بارش سالانه برف در کوه‌های زاگرس وابسته است [۱۵]. حوضه آبریز این رودخانه مساحتی در حدود ۴۱۵۲۴ کیلومتر مربع را در برمی‌گیرد [۱۶] و میانگین بارندگی سالانه آن حدود ۱۳۰ میلی‌متر است. بیش از ۴ میلیون نفر در این حوضه سکونت دارند [۱۷]. این رودخانه فرصت مناسبی برای تأمین آب کشاورزی و شرب، تولید برق، و همچنین مکانی برای تفریح فراهم می‌کند [۱۵]. با این حال، این رودخانه که زمانی پرآب و پررونق بود، اکنون در برهه‌های 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 داشته، از جمله بروز تنش‌ها میان بهره‌برداران آب و چالش‌های شدید در مسیر پایداری و توسعه منطقه‌ای [۱۶ و ۱۷].

مختصات نقاط ابتدایی و انتهایی بازه انتخاب‌شده به ترتیب برابر  $32^{\circ}27'05.70''N$   $51^{\circ}32'50.54''E$  و  $32^{\circ}31'56.53''N$   $51^{\circ}31'11.53''E$  هستند. پروفیل‌های مقاطع عرضی هر رودخانه برای بررسی‌های مختلفی از جمله ثبت تغییرات پایداری عمودی (بستر) و جانبی (ساحل) مفید هستند [۱۸]. مجموعه داده‌های استفاده‌شده در این مطالعه، شامل دبی، عمق، عرض و مختصات مقاطع عرضی، از اداره کل منابع آب استان اصفهان جمع‌آوری شده است.



شکل ۱ موقعیت رودخانه زاینده‌رود: الف) مرزهای دو استان با مقیاس ۱: ۳۱۰۰۰۰۰، ب) کل مسیر ۳۵۰ کیلومتری رودخانه از مبدأ (استان چهارمحال و بختیاری) تا مقصد (تالاب گاوخونی) با مقیاس ۱: ۴۰۰۰۰۰

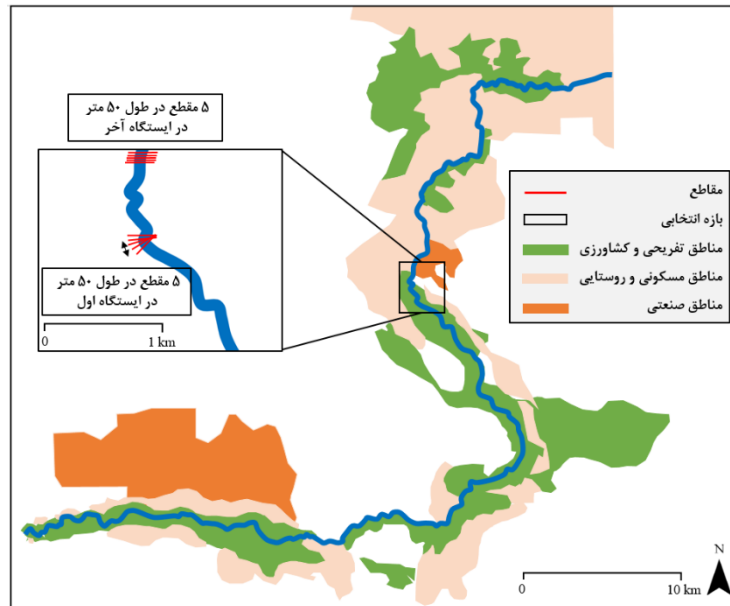
## ۲-۲- شبیه‌سازی هیدرولیکی

نرم‌افزار تحلیل رودخانه مرکز مهندسی هیدرولیک (HEC-RAS) یک نرم‌افزار رایگان است که برای مدل‌سازی هیدرولیک جریان آب در رودخانه‌های طبیعی و سایر کانال‌ها استفاده می‌شود. این مدل از سال ۱۹۹۵ در اختیار عموم قرار گرفته که به دو صورت یک‌بعدی و دو بعدی مدل‌سازی می‌کند. از این نرم‌افزار برای مدل‌سازی جریان آب در سامانه‌های کانال باز و محاسبه پروفیل سطح آب استفاده می‌شود و کاربرد گسترده‌ای در مطالعات مدیریت سیلاب دارد [۱۹].

در این پژوهش، شبیه‌سازی هیدرولیکی یک‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS نسخه ۶/۱ انجام شد. یک بازه یک کیلومتری از این 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 ۱۰ ایستگاه انتخاب شد که هر ایستگاه شامل ۵ مقطع عرضی بود. این مقاطع در طول ۵۰ متر در هر ایستگاه بررسی شده و میانگین نتایج آن‌ها در نظر گرفته شده است (شکل ۲).

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



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

### ۳-۲- تابع هدف

هدف این مطالعه، بیشینه‌سازی معادله 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.

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

$$L_s = 50m, N_s = 10, N_{cs} = 5$$

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 لایروبی در ۱۰ ایستگاه است، و  $\bar{A}_s$  مساحت میانگین در یک ایستگاه است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} \bar{A}_s = A_h / N_{cs} \\ \bar{A}_s, A_h \in \{\bar{D}_h, T_h\} \\ \bar{D}_h, T_h > 0 \end{cases} \quad (2)$$

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

### ۴-۲- قیود مسئله

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

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

$$\sum_{i=1}^{N_{cs}} Q_{in(i)} = \sum_{i=1}^{N_{cs}} Q_{out(i)} \quad (3)$$

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

- 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 به‌طور کامل ممنوع شود تا عرض آن ثابت باقی بماند.

$$\sum_{i=1}^{N_{cs}} |(\Delta T_h)_i| = 0 \quad (4)$$

که  $\Delta T_h$  تغییرات در عرض بالایی را تعریف می‌کند.

- 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 به‌صورت 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.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot D}} < 1 \quad (5)$$

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 عرض بالایی به دست می‌آید.

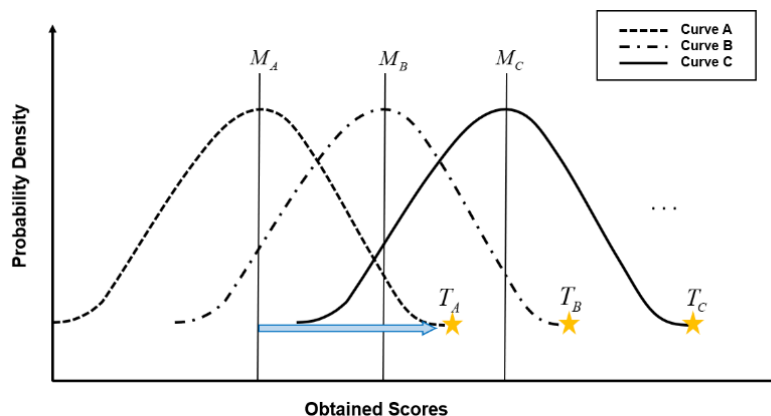
- آخرین محدودیت، محدودیت سطح آب است که باید برابر با کمترین مقدار بین سطح کرانه راست (R.B.L) و سطح کرانه چپ (L.B.L) باشد این محدودیت حجم لایروبی را در فرآیند بهینه‌سازی کنترل می‌کند و تضمین می‌کند که پایداری هیدرولیکی حفظ شود.

$$WL_d = \begin{cases} R.B.L & \text{if } R.B.L \leq L.B.L \\ L.B.L & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

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

## ۲-۵- الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری (TLBO)

رائو و همکاران (۲۰۱۱) یک الگوریتمی با عنوان بهینه‌ساز مبتنی بر آموزش و یادگیری (TLBO) پیشنهاد کردند که فرایند آموزش در مدرسه را شبیه‌سازی می‌کند [۲۰]. این الگوریتم به‌عنوان یک روش بهینه‌سازی نوین برای دستیابی مؤثرتر به داده‌های ورودی به کار گرفته می‌شود. اساس عملکرد این روش بر تأثیر معلم بر فراگیران استوار است. الگوریتم TLBO یک کلاس را بر مبنای فرایند آموزش-یادگیری شبیه‌سازی می‌کند، درست همانند کلاس درس که در آن معلم آموزش می‌دهد و دانش‌آموزان یاد می‌گیرند [۲۱].



شکل ۳ فرآیند توزیع نمرات به دست آمده برای یک گروه از یادگیرندگان [۲۲]

مشابه دیگر الگوریتم‌های الهام گرفته از طبیعت، TLBO نیز یک روش مبتنی بر جمعیت بوده و از مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها برای حرکت به سوی راه‌حل بهینه کلی استفاده می‌کند. جمعیت به عنوان یک گروه از یادگیرندگان یا یک کلاس یادگیرنده در نظر گرفته می‌شود. الگوریتم TLBO (بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش-یادگیری) شامل دو مرحله یادگیری شامل مرحله معلم و مرحله یادگیرنده است [۲۰]. این الگوریتم بر اساس اثر معلم بر عملکرد خروجی دانش‌آموزان در یک کلاس یا گروهی از افراد عمل می‌کند. معلم (T) آگاه است که در کلاس نمره بهتری دارد و می‌تواند با به اشتراک گذاری دانش خود به بهبود سایر دانش‌آموزان کمک کند. یک معلم خوب میانگین نمرات بهتری برای دانش‌آموزان ایجاد می‌کند و همچنین می‌تواند در هر مرحله تغییر کند. اگر شکل ۲ نمودار توزیع احتمال نمرات فردی را نشان دهد، نمودار سمت چپ به کلاس A و نمودارهای سمت راست به کلاس‌های B و C مربوط هستند. با مقایسه این سطوح نمره، مشخص است که معلم سوم آموزش بهتری ارائه کرده است، زیرا میانگین نمرات کلاس بالاتر است (شکل ۳). در واقع، آموزش در هر مرحله بعدی اثر بخش‌تر می‌شود تا زمانی که به بهبود نهایی برسیم [۲۳]. برای نمرات به دست آمده، یک توزیع نرمال فرض می‌شود، اما در عمل ممکن است این توزیع دارای خمیدگی باشد. توزیع نرمال به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۳]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

که در آن،  $\sigma^2$  واریانس،  $\mu$  میانگین، و  $x$  هر مقداری است که تابع توزیع نرمال برای آن مورد نیاز باشد. در مرحله آموزش،  $M_i$  میانگین و  $T_i$  معلم در هر تکرار  $i$  هستند (شکل ۲). پارامتر  $T_i$  تلاش می‌کند  $M_i$  را به سمت سطح خود حرکت دهد، بنابراین میانگین جدید که با  $M_{new}$  نشان داده می‌شود، جایگزین میانگین قبلی خواهد شد. به روزرسانی راه‌حل بر اساس اختلاف میان میانگین موجود و میانگین جدید به صورت زیر انجام می‌شود [۲۳]:

$$Difference\_Mean_i = r_i(M_{new} - T_F M_i) \quad (8)$$

که در آن،  $T_F$  یک ضریب آموزش است که میزان تغییر میانگین را تعیین می‌کند، و  $r_i$  یک عدد تصادفی در بازه  $[0, 1]$  می‌باشد. این اختلاف، راه حل موجود را بر اساس رابطه زیر اصلاح می‌کند:

$$X_{new,i} = X_{old,i} + Difference\_Mean_i \quad (9)$$

یادگیرندگان به دو روش دریافت آموزش از معلم و دیگری از طریق تعامل با یکدیگر دانش خود را افزایش می‌دهند. یک یادگیرنده به صورت تصادفی با سایر یادگیرندگان تعامل می‌کند و این تعامل می‌تواند از طریق بحث‌های گروهی، ارائه‌ها، ارتباطات رسمی و غیره انجام شود. اگر یادگیرنده دیگر دانش بیشتری نسبت به او داشته باشد، یادگیرنده اطلاعات جدیدی یاد می‌گیرد. تغییرات ایجاد شده در یادگیرنده به صورت زیر بیان می‌شود [۲۳]:

برای  $i=1:P_n$  دو یادگیرنده  $X_i$  و  $X_j$  به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند، که در آن  $i \neq j$  باشد.

$$\begin{aligned}
 & \text{If } f(X_i) \leq f(X_j) \\
 & X_{new,i} = X_{old,i} + r_i(X_i - X_j) \\
 & \text{Else} \\
 & X_{new,i} = X_{old,i} + r_i(X_j - X_i) \\
 & \text{End If} \\
 & \text{End For} \\
 & \text{Accept } X_{new} \text{ if it gives a better function value.}
 \end{aligned} \tag{10}$$

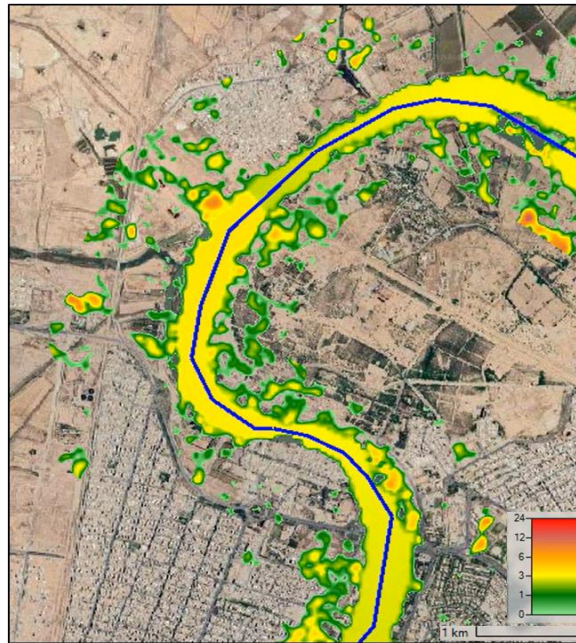
برای مطالعه عمیق‌تر، فرآیند این الگوریتم به‌طور کامل در مطالعه راثو و همکاران (۲۰۱۱) قابل دسترسی است.

### ۳- نتایج

با انجام شبیه‌سازی هیدرولیکی، ویژگی‌های هندسی مقاطع عرضی در منطقه مورد مطالعه استخراج شده و میانگین مساحت مقاطع در هر ایستگاه تعیین گردید (جدول ۱). 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 می‌سازد. بر اساس نتایج به دست آمده، ایستگاه‌های شماره ۱۰ و ۲ به ترتیب دارای کمترین و بیشترین مساحت مقطع عرضی بوده‌اند که مقادیر آن‌ها برابر با  $۶۲۰/۴۵$  و  $۱۱۲۰/۲۰$  مترمربع گزارش شده است. همچنین، بیشترین عمق جریان در ایستگاه ۴ و کمترین عمق در ایستگاه ۹ مشاهده گردید. سایر پارامترهای هندسی شامل عمق، عرض، محیط خیس شده و شعاع هیدرولیکی برای هر ایستگاه در جدول ۱ ارائه شده‌اند. طبق اطلاعات موجود در این جدول، عرض رودخانه در بازه مورد بررسی بین  $۳۲/۱۴$  تا  $۹۰/۷۱$  متر متغیر بوده است. در شکل ۴، شبیه‌سازی وقوع سیلاب برای رودخانه نمایش داده شده است که نشان‌دهنده آب‌گرفتگی سیلاب‌دشت‌ها 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.

جدول ۱ ویژگی‌های هندسی مقاطع عرضی ایستگاه‌ها شامل عمق متوسط، عرض، مساحت، محیط خیس شده و شعاع هیدرولیکی

Station	Average depth (m)	Width (m)	Area (m <sup>2</sup> )	Wet perimeter (m)	HR (m)
S1	3.51	36.11	1057.36	120.18	8.80
S2	4.55	40.25	1120.20	123.20	9.10
S3	4.85	32.14	1081.35	114.42	9.45
S4	5.61	50.42	983.41	225.49	4.36
S5	3.10	70.25	950.21	110.73	8.58
S6	3.24	50.43	756.30	150.91	5.01
S7	3.40	42.32	715.40	177.72	4.03
S8	3.00	90.71	845.20	165.44	5.11
S9	1.75	85.55	682.68	120.40	5.67
S10	2.50	61.12	620.45	108.36	5.73

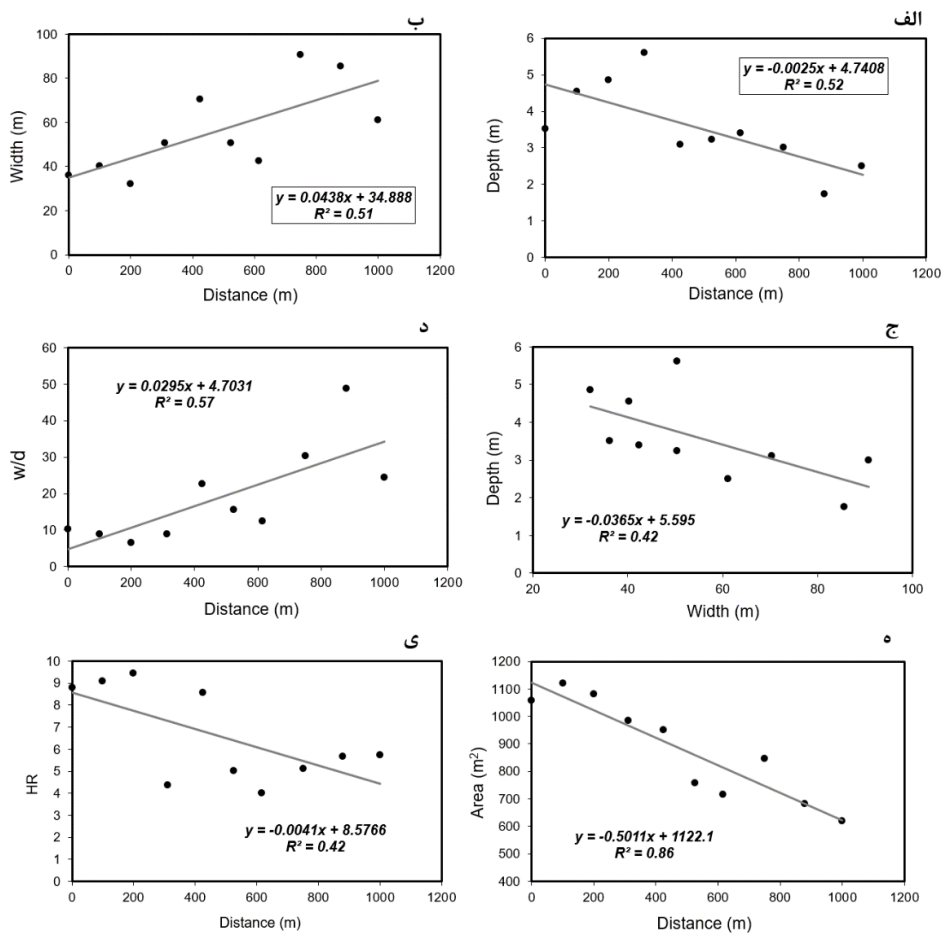


شکل ۴ شبیه‌سازی سیلاب با استفاده از HEC-RAS: آب‌گرفتگی قسمتی از سیلاب‌دشت‌ها در جریان وقوع سیلاب

فرآیند تغییرات بین عمق و فاصله (طول رودخانه) با ضریب همبستگی  $0/52$  نشان‌دهنده روند کاهشی عمق از بالادست به پایین‌دست بوده است (شکل ۵ الف)، که به‌وضوح بیانگر تجمع رسوبات در مناطق پایین‌دست می‌باشد. بر اساس شکل ۵ ب، رابطه مثبت بین عرض و فاصله با ضریب همبستگی  $0/51$  حاکی از افزایش عرض رودخانه در طول مسیر جریان است.

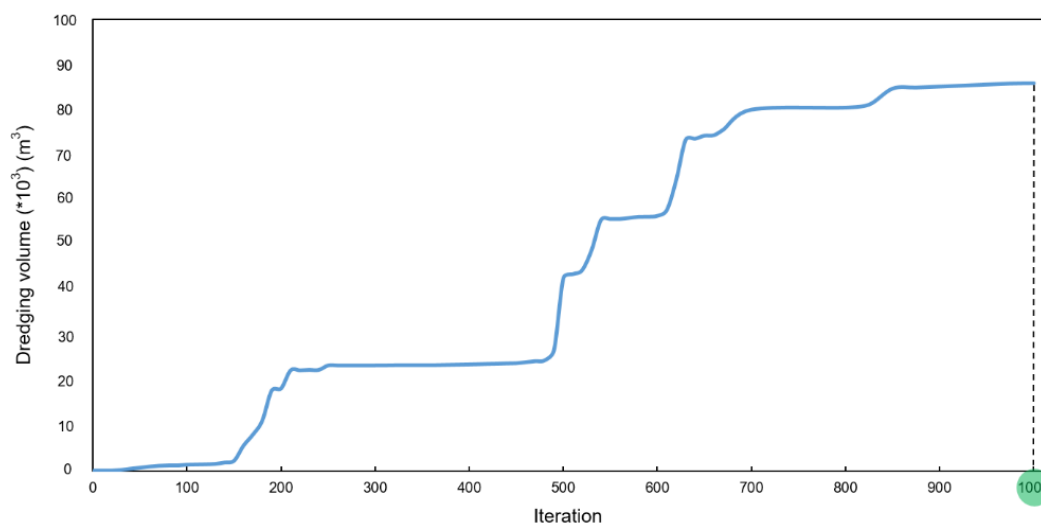
در این شکل، مقطع عرضی شماره ۸ بیشترین عرض را به خود اختصاص داده است. اگر مقطع رودخانه به‌طور قابل‌توجهی پهن و کم‌عمق باشد، مقدار عددی نسبت عرض به عمق ( $w/d$ ) بالا خواهد بود، و در مقابل، زمانی که رودخانه عمیق و باریک باشد، این مقدار کاهش می‌یابد. در این مطالعه، تغییرات نسبت عرض به عمق به‌صورت جداگانه و همچنین در ارتباط با افزایش فاصله بررسی شد. ضریب همبستگی نسبت عرض به عمق برابر با  $0/42$  به‌دست آمد (شکل ۵ ج) ضریب همبستگی بین نسبت عرض به عمق و فاصله نیز برابر با  $0/57$  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.

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 یک کیلومتری، نوسانات عمق روندی کاهشی داشته و عرض دارای روندی افزایشی بوده است. با مقایسه ایستگاه‌های ابتدایی و انتهایی، میزان افزایش عرض برابر با  $69/26$  درصد و کاهش عمق معادل  $28/78$  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 منفی بوده و ضریب همبستگی آن برابر با  $0/86$  به‌دست آمده است به‌گونه‌ای که کاهش قابل‌توجهی در مساحت ایستگاه‌ها از بالادست به پایین‌دست مشاهده شد. این موضوع بیانگر آن است که مقاطع رودخانه‌ای 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.

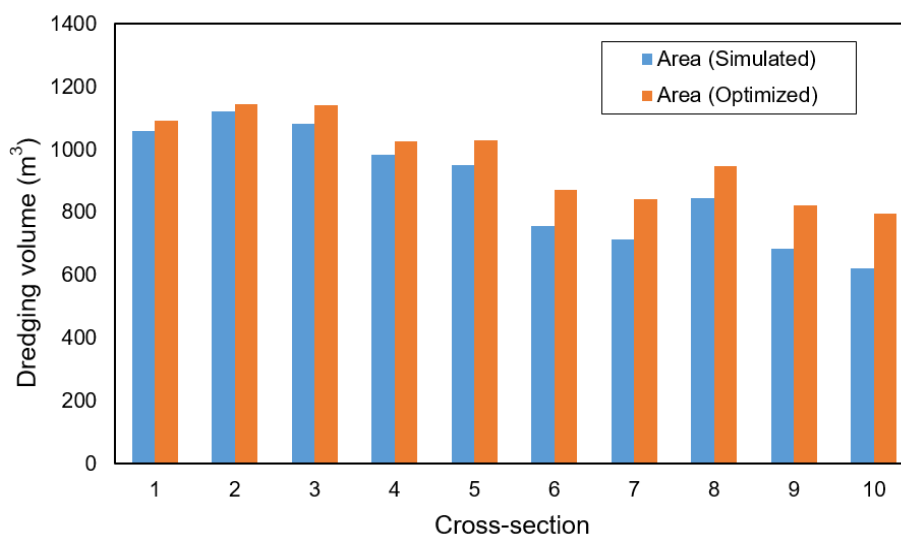


شکل ۵ فرآیند تغییرات بین عمق و فاصله (الف)، عرض و فاصله (ب)، عرض و عمق (ج)، عرض به عمق و فاصله (د)، مساحت و فاصله (ه) و شعاع هیدرولیکی (HR) و فاصله

در این مطالعه، تغییرات شعاع هیدرولیکی (HR) در طول رودخانه به‌عنوان یکی دیگر از پارامترهای مهم در تعیین هندسه مقاطع عرضی ایستگاه‌ها بررسی گردید. این مقایسه 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 این رابطه نیز نشان می‌دهد که ظرفیت انتقال جریان به‌طور ملایم از بالادست به پایین‌دست روند نزولی داشته است (شکل ۵ ی). فرآیند بهینه‌سازی در نرم‌افزار متلب ۲۰۲۴ انجام و تحلیل حساسیت برای تمامی پارامترهای اولیه الگوریتم انجام شد و بهترین مقادیر برای هر کدام انتخاب گردید. فرآیند بهینه‌سازی حجم اصلاح و لایروبی توسط الگوریتم TLBO در شکل ۶ نمایش داده شده است. بر اساس بررسی ۱۰ ایستگاه، ۵۰ مقطع عرضی (هر ایستگاه شامل ۵ مقطع عرضی) و طول ۱۰۰۰ متر از مسیر رودخانه زاینده‌رود، حجم بهینه نهایی ایستگاه‌ها پس از لایروبی، پس از ۱۰۰۰ تکرار برابر با  $۸۹۲۳۷/۰۴$  متر مکعب حاصل شده است. مساحت ایستگاه‌ها قبل و بعد از بهینه‌سازی در شکل ۷ نمایش داده شده است. میزان بهینه‌سازی و لایروبی ایستگاه‌ها به ترتیب از ایستگاه اول تا دهم  $۳۲/۳۳$ ،  $۲۴/۲۲$ ،  $۶۰/۱۷$ ،  $۴۲/۲۰$ ،  $۷۸/۹۳$ ،  $۱۱۴/۸۵$ ،  $۱۲۵/۴۴$ ،  $۱۰۰/۳۴$ ،  $۱۳۸/۶۹$  و  $۱۷۵/۲$  متر مربع بوده است. به طور کلی، تغییرات مساحت در همه مقاطع رخ داده که این افزایش سطح بین  $۲/۱۶\%$  (ایستگاه دوم) تا  $۲۸/۲۴\%$  (ایستگاه دهم) متغیر بوده است. در برخی از ایستگاه‌ها مانند شماره‌های ۹ و ۱۰، بیش‌ترین تغییرات را متحمل شده و ایستگاه‌های ۱ و ۲ کمترین افزایش سطح و لایروبی را به خود اختصاص داده‌اند. بر این اساس، روند بهینه‌سازی مقاطع از بالادست به سمت پایین‌دست افزایش پیدا کرده است. بر اساس نتایج بهینه‌سازی، حجم کل مسیر انتخابی پیش از لایروبی برابر با  $۸۸۱۲۵۶/۲۳$  متر مکعب بوده است که پس از لایروبی، به مقدار  $۹۷۰۴۹۳/۲۷$  متر مکعب رسیده است.



شکل ۶ روند بهینه‌سازی حجم لایروبی با استفاده از الگوریتم TLBO طی ۱۰۰۰ تکرار



شکل ۷ مساحت‌های حاصل از شبیه‌سازی و بهینه‌سازی برای تمامی مقاطع

در واقع حجم اضافه شده به میزان  $89237/04$  مترمکعب فضای اضافی در مقاطع عرضی ایجاد شده است توانسته به‌طور مؤثری ظرفیت مسیر رودخانه زاینده‌رود را به میزان  $10/13\%$  افزایش داده است. یکی از محدودیت‌های مطالعه حاضر می‌تواند حذف عوامل هزینه‌ای لایروبی باشد، که در هر پروژه لایروبی و اصلاح بستر رودخانه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در نظر گرفتن هم‌زمان عوامل حجم و هزینه می‌تواند کارایی عملیات لایروبی را افزایش داده و فرآیند بهینه‌سازی هندسه کانال را کاربردی‌تر و ملموس‌تر نماید. استفاده از چند الگوریتم دیگر نیز می‌توانست به بهبود نتایج و ارزیابی الگوریتم TLBO منجر شود که امکان استفاده آن‌ها در این مطالعه فراهم نشد. این مورد نیز می‌تواند به‌عنوان پیشنهاد برای مطالعات پیش‌رو در نظر گرفته شود. همچنین استفاده از شبیه‌سازی یک‌بعدی به‌وسیله نرم‌افزار HEC-RAS از دیگر محدودیت‌های این مطالعه می‌باشد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

بازه یک کیلومتری از رودخانه زاینده‌رود در استان اصفهان ایران برای بررسی هندسه مقاطع عرضی در مقایسه با شرایط

بهینه انتخاب شد. به منظور استخراج ویژگی‌های هندسی مقاطع عرضی رودخانه، شبیه‌سازی هیدرولیکی با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS نسخه ۶/۱ انجام گردید. سپس، به کمک الگوریتم TLBO، مقاطع عرضی بهینه برای بستر رودخانه حاصل شد و مقدار اصلاح مقاطع مشخص گردید. با تحلیل نتایج و استخراج روند تغییرات نسبت عرض به عمق نسبت به فاصله، نتایج نشان‌دهنده افزایش چشمگیر عرض و کاهش عمق بود به طوری که عرض رودخانه با افزایش ۶۹/۲۶ درصدی و عمق با کاهش ۲۸/۷۸ درصدی از ایستگاه اول تا آخر تغییر یافت. این وضعیت می‌تواند نشان‌دهنده ظرفیت بالای حمل رسوبات در رودخانه باشد. پس از فرآیند بهینه‌سازی، مساحت بهینه مقاطع بین ۲/۱۶٪ تا ۲۸/۲۴٪ افزایش داشته و روند افزایشی آن از بالادست به پایین دست مشهود بود که بیانگر نیاز بیشتر به اصلاح مقطع در مناطق پایین دست است. در نهایت، اجرای اصلاحات و لایروبی بر اساس رویکرد حاضر در طول یک کیلومتر از رودخانه، با حجم کل ۸۹،۲۳۷.۰۴ مترمکعب، ظرفیت آگذری رودخانه را تا ۱۰/۱۳ درصد افزایش داده، شرایط جریان را بهبود بخشیده و به طور قابل توجهی ریسک خسارات جانی و مالی را کاهش می‌دهد.

## ۵- پی‌نوشت‌ها

1. HEC-RAS: Hydraulic Engineering Center—River Analysis System
2. TLBO: Teaching learning base optimization

## ۶- فهرست علائم مهم

$A_h$ : مساحت مقطع عرضی

$N_s$ : تعداد ایستگاه‌ها

$N_{cs}$ : تعداد مقاطع عرضی در هر ایستگاه

$f(V_T)$ : حجم کل لایروبی

$L_s$ : طول لایروبی شده

R.B.L: سطح کرانه سمت راست

L.B.L: سطح کرانه سمت چپ

$T_h$ : عرض بالایی مقطع

## ۷- مراجع

- [1] Lord M. L, Germanaski D, Allmandinger N. E. Fluvial geomorphology: monitoring stream systems in response to a changing environment. The Geol Soc of Am, 2009; pp. 69–103.
- [2] Singh V. P. On the theories of hydraulic geometry. Int J of Sediment Res, 2003; 18(3): 196–218.
- [3] Mondal M, Ghosh S, Satpati L. N, Kolakata W. B. 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, 2016; 38(2): 201.
- [4] Mondal M, Ghosh S, Satpati L.N. 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, 2018; 11: 333. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3667-3>.
- [5] Rose S, Peters N. E. Effects of urbanization on stream flow in the Atlanta area (Georgia, USA): a comparative hydrological approach. Hydrol. Process. 2001; 15: 1441–1457. doi: 10.1002/hyp.218.

- [6] Liao K. H, Chan J. K. H, Huang Y. L. Environmental justice and flood prevention: the moral cost of floodwater redistribution. *Landsc. Urban Plan.* 2019; 189: 36–45. doi: 10.1016/j.landurbplan.2019.04.012.
- [7] Hooke J. M. *Channelized rivers: perspectives for environmental management*, Andrew Brookes, Wiley, Chichester, 1988. No. of pages: 326. *Earth Surf. Process. Landforms*, 1990; 15: 291–292. doi: 10.1002/esp.3290150312.
- [8] Mahmudi M, Tabatabai M. R. M, Nadoushani S. M. An analytical approach to the estimation of optimum river channel dimensions. *Scientia Iranica A*, 2019; 26(3): 1169–1181.
- [9] Lee J.S, Julien P.Y. Downstream hydraulic geometry of alluvial channels, *J. Hydraul. Eng.* 2006; 132(12): 1347–1352.
- [10] Biswal S, Sahoo B, Jha M.K, Bhuyan M.K. A hybrid machine learning-based multi-DEM ensemble model of river cross-section extraction: Implications on streamflow routing. *Journal of Hydrology*, 2023; 625(Part A): 129951.
- [11] 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. The Geometry of Flow: Advancing Predictions of River Geometry With Multi-Model Machine Learning. *Water Resources Research*, 2024; 60(10). <https://doi.org/10.1029/2023WR036733>.
- [12] Shaghghi S, Bonakdari H, Gholami A, Ebtehaj I, Zeinolabedini M. Comparative analysis of GMDH neural network based on genetic algorithm and particle swarm optimization in stable channel design. *Applied Mathematics and Computation*, 2017; 313: 271–286. <http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2017.06.012>.
- [13] Malekpour M. M, Mohammad Rezapour Tabari M. Implementation of supervised intelligence committee machine method for monthly water level prediction. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020; 13: 1049 <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06034-x>.
- [14] Malekpour M. M, Ahmadi M. M, Gugliotta M. Tabari M. M. R, Qaderi K. Estimation of suspended sediment load utilizing a super-optimized deep learning approach informed by the red fox optimization algorithm. *Earth Sci Inform*, 2025; 18: 286. <https://doi.org/10.1007/s12145-025-01801-4>.
- [15] Nasiri N, Asghari A, Besalatpour A. A. Quantitative analysis of the human intervention impacts on hydrological drought in the Zayande-Rud River Basin, Iran. *Journal of Water and Climate Change*, 2022; 13(9): 3473. doi: 10.2166/wcc.2022.188.
- [16] Ghenaati B, Ahmadi M. Modeling Hydrologic Consequences of Land Use and Climate Changes: The Case of Zayanderud Basin. *AUT Journal of Modeling and Simulation*, 2023; 55(2): 327–342. doi:10.22060/miscj.2024.22881.5347.
- [17] Abou Zaki N, Torabi Haghighi A, M. Rossi P, Tourian MJ, Bakhshae A, Kløve B. Evaluating Impacts of Irrigation and Drought on River, Groundwater and a Terminal Wetland in the Zayanderud Basin, Iran. *Water*, 2020; 12(5): 1302.
- [18] Ogdahl M, Steinman A, Uzarski D, Thompson K. A methodology for assessing erosion control best management practice (BMP) effectiveness, 2014; pp. 15–16.
- [19] Mehta D, Yadav S. M, Waikhom S, Prajapati K. Stable channel design of tapi river using HEC-RAS for surat region. *Environmental Processes and Management, Water Science and Technology Library*, 2020; 91: 25–36. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-38152-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-38152-3_2).
- [20] Sayari S, Mahdavi-Meymand A, Zounemat-Kermani M. Prediction of Critical Velocity in Pipeline Flow of Slurries Using TLBO Algorithm: A Comprehensive Study. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2019; 11(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000439](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000439).
- [21] Kumar V, Yadav S. M. Optimization of Reservoir Operation with a New Approach in Evolutionary Computation Using TLBO Algorithm and Jaya Algorithm. *Water Resources Management*, 2018; 32: 4375–4391. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2067-5>.

- [22] Malekpoor M. M, Malekpoor H. Reservoir water level forecasting using wavelet support vector regression (WSVR) based on teaching learning-based optimization algorithm (TLBO). *Soft Computing*, 2022; 26: 8897–8909. <https://doi.org/10.1007/s00500-022-07296-1>.
- [23] Rao R. V, Rao V. J, Vakharia D. P. Teaching–learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems. *Computer-Aided Design*, 2011; 43: 303–315. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.12.015>.
- [24] Burele S, Sharma S, Ahmad Z, Gupta I. Numerical simulation-optimization for channelization of River Kosi. *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, 2014; 3(9):1149-1155.
- [25] Chahar B. Optimal design of a special class of curvilinear bottomed channel section. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007. Doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:5(571).
- [26] Chang H.H. Geometry of gravel streams, *J. Hydraul. Div.* 1980; 106(9): 1443–1456.
- [27] Fazarinc R, Majes B, Mikoš M. Using results of mathematical modeling of debris flows for optimization of a river channel form to convey debris flows and floods. *International Conference on Fluvial Hydraulics - River Flow*, 2006; (2). DOI:10.1201/9781439833865.ch234.
- [28] Huang, H.Q, Nanson, G.C. A stability criterion inherent in laws governing alluvial channel flow, *Earth Surface Processes and Landforms*, 2002; 27(9): 929-944.
- [29] Lamine B. O. M, Ferreira V. G, Yang Y, Ndehedehe C. E, He X. Estimation of the Niger River cross-section and discharge from remotely-sensed products. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2021; 36: 100862. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100862>.
- [30] Mahesh K. Dredging Analysis and Decision Support System. *International Journal of Engineering Innovations and Management Strategies*, 2024; 1(5): 1-15.
- [31] Nelson A. D, Collins V. D, Payne J. S, Abbe T. B. Proactive river corridor definition: Recommendations for a process-based width optimization approach illustrated in the context of the coastal Pacific Northwest. *Wires Water*, 2024; 11(3): e1711. <https://doi.org/10.1002/wat2.1711>.
- [32] Prestegard K. L, Matherne Katyl N. Spatial variations in the magnitude of the 1993 floods, Raccoon River Basin, Iowa. *Geomorphol. Nat. Hazards*, 1994; 10: 169–182. doi: 10.1016/B978-0-444-82012-9.50016-5.
- [33] Ridolfi E, Alfonso L, Di Baldassarre G, Dottori F, Russo F, Napolitano F. An entropy approach for the optimization of cross-section spacing for river modelling. *Hydrological Sciences Journal*, 2014; 59(1). <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.822640>.
- [34] Tabatabaei M. M, Shourian M, Karaimi M. Optimum stable channel geometry design using imperialist competitive algorithm. *Environmental Earth Sciences*, 2018; 77: 445. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7634-9>.
- [35] Teal M. J, Anderson P.E. Sediment investigation and stable channel design for the lower mud river, in: *Proceedings of Impacts of Global Climate Change*, ASCE, 2005; pp. 1–12.
- [36] Turan M. E, Yurdusev M. A. Optimization of open canal cross sections by differential evolution algorithm. *Mathematical and Computational Applications*, 2011; 16(1): 77-86.
- [37] Yang Y. Construction period and cost optimization for river dredging engineering based on NSGA-II. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*, 2024; 24(4-5): 2879-2894. <https://doi.org/10.3233/JCM-247524>.