

## Research Paper

# A New Approach for Geometric Modeling and Calculation of Volumes of Flood Protection Levees (Case Study)

Alireza Mohebzadeh Fattahi<sup>i</sup>, Saeed Farzin<sup>ii\*</sup>, Khosrow Hosseini<sup>iii</sup>, Sayed-Farhad Mousavi<sup>iv</sup>

10.22125/IWE.2023.168170

Received:  
**September 12, 2021**  
Accepted:  
**February 19, 2022**  
Available online:  
**April 18, 2023**

**Keywords:****Flood, Flood control structures, Levee, Flood zoning, GIS, HEC-RAS****Abstract**

Increasing encroachment on rivers along with climate change has increased major floods. Levees are considered the most important structures to protect river banks and floodplains from flooding due to their simplicity of structure, inexpensive materials, and ease of implementation. In this research, an attempt was made to introduce a new approach in geometric modeling, to develop mathematical relationships to calculate the volumes of levees based on different location of each scenario in the floodplain. Study scenarios supply the protection of three kilometers of the Chabahr-Zahedan arterial road and its widening, which is located in the floodplain of the Karvandar River in southeastern Iran. Hydraulic simulations implemented in HEC-RAS for the existing condition and 13 different scenarios with 13 unique topographies based on the new approach, and the rate of reduction of the flood zone and embankment volume of levees for each scenario calculated in ArcMap. Based on the results, changes in the volume of embankments in different scenarios did not correlate well with the flood zone area reduction. Due to the direct dependence of scouring and thus geometry and volumes of levees on flow velocity, by calculating the flow maximum velocity in the study interval, the dimensionless coefficients of maximum velocity in different scenarios were calculated and applied to the calculated volumes of levees. Thus, by this approach and using quadratic polynomial equations, the coefficient of determination ( $R^2$ ) increased from 0.35, 0.48 and 0.50 to acceptable values of 0.88, 0.91 and 0.92, for floods with return periods of 50, 100 and 200 years, respectively, which indicate the high efficiency of the proposed approach and also increasing in  $R^2$  values with an increase in the flood return period. Moreover, results show that the computational accuracy of regression relationships in the scenarios with levee locations in the middle distances from the road axis is higher than other scenarios which are closer or farther. This result is due to more irregular river geometry in the scenarios closer to the road and the intensification of nonlinear changes in flood parameters in the farther scenarios.

<sup>i</sup> PhD Candidate in Civil Engineering- Water Engineering and Water Resources Management, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

<sup>ii</sup> Associate Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran\*

<sup>iii</sup> Associate Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

<sup>iv</sup> Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

\* **Corresponding Author:** Saeed Farzin

**Address:** Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Semnan University, Iran

**Email:** saeed.farzin@semnan.ac.ir

**Tel:** +989174112891

## 1. Introduction

Large river floodplains, due to fertile soil, suitable environment for diverse plant and animal species, easier access to river water and mild topography are of great value in terms of environmental issues, urban planning, agriculture, industry, and development of transportation infrastructures. In recent years, encroachment on rivers and climate change have increased the frequency severity of major floods, and the potential for flood damages. Due to the simplicity of structure, availability and cheap price of soil materials, and ease of implementation, maintenance and repair, the levees are considered as the most important and widely used hydraulic structures to protect the floodplains and river banks against floods. Various researches have been done in the field of flood zoning and flood protection methods. Dierauer et al. (2012) used one-dimensional hydraulic modeling and flood-loss modeling to test the effectiveness of levee setbacks for flood-loss reduction along the Middle Mississippi River (MMR). This research showed designing a levee setback around existing high-value infrastructure can maximize the benefit of the setback while simultaneously minimizing the costs. Naeem et al. (2021) performed 2D unsteady flow modeling for Tori Levee breach computed residual flood inundation by coupling a HEC-RAS 2D with remote sensing and GIS techniques. The results showed good performance with a range of difference from 0.13 to  $-0.54$  m between the simulated and observed water levels (stage) and 84% match for the maximum flood inundation area. Investigating previous researches shows that they did not consider the effect of levee construction on changing the geometry of river cross sections. They have only focused on reducing the flood zone due to the implementation of levees and resulting economic benefits. Also, in previous researches, regression equations have not been proposed to calculate the volume of levees and flood zone changes, which can be used in the optimal locating of the levees. In this research, an attempt has been made to answer these two questions by using new approaches and methods.

## 2. Materials and Methods

To solve the one-dimensional flow in a steady state, energy and momentum equations are used in HEC-RAS. Studies have been carried out on a reach of about 14.5 km in the Karvandar River which is located at a distance of about 30 km upstream of the Daman hydrometric station and a distance of about 60 km north of Iranshahr city. Simulation and hydraulic analysis of the levees have been performed on a reach of about 3 km at the downstream end of the above-mentioned reach which is located near the Chabahr-Iranshahr-Zahedan arterial road axis. The Karvandar Watershed is located in the central part of Sistan and Baluchistan province in southeastern Iran. Karvandar River catchment area at outlet point of Daman hydrometric station, has an area of 3450 km<sup>2</sup>, slope of 0.1662, average elevation of 1300 m above sea level, shape factor of 2.14, length of the longest waterway equal to 153 km and the slope of the longest waterway equal to 0.0062 (Figure 1). Peak discharge with return periods of 50, 100 and 200 years are shown in Table 1. In the process of geometric modeling of levees for 13 study scenarios in HEC-RAS, a new approach using GIS has been used. In all previous researches, modeling of levees in HEC-RAS has been done by activating the Levee option and determining the required levee heights. In this approach, the levees are modeled only as a thick wall with a certain height, which doesn't correspond to the actual and executive conditions of the levees and their significant effect on the geometric change of the study reach. It does not have the geometry of river sections. In this research, with a new innovative approach and with the aid of GIS, the geometry of the levees is modeled in any of the 13 scenarios completely similar to the real conditions and as a trapezoidal section by changing the geometry of the river cross sections. Obviously, this new approach in calculating the characteristics of flood flow, flood zone and levee volumes has much higher accuracy than the previous approach.

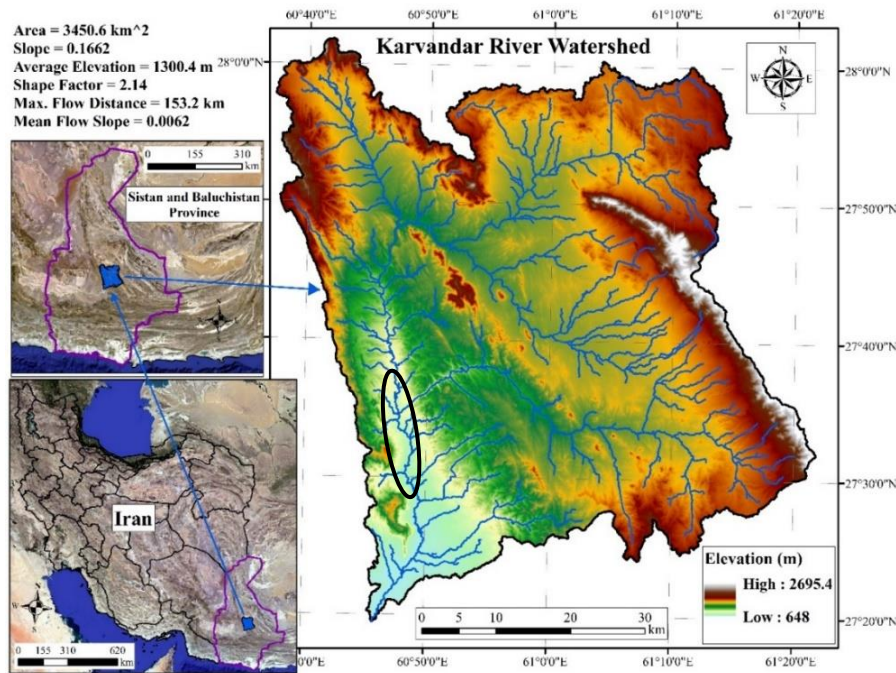


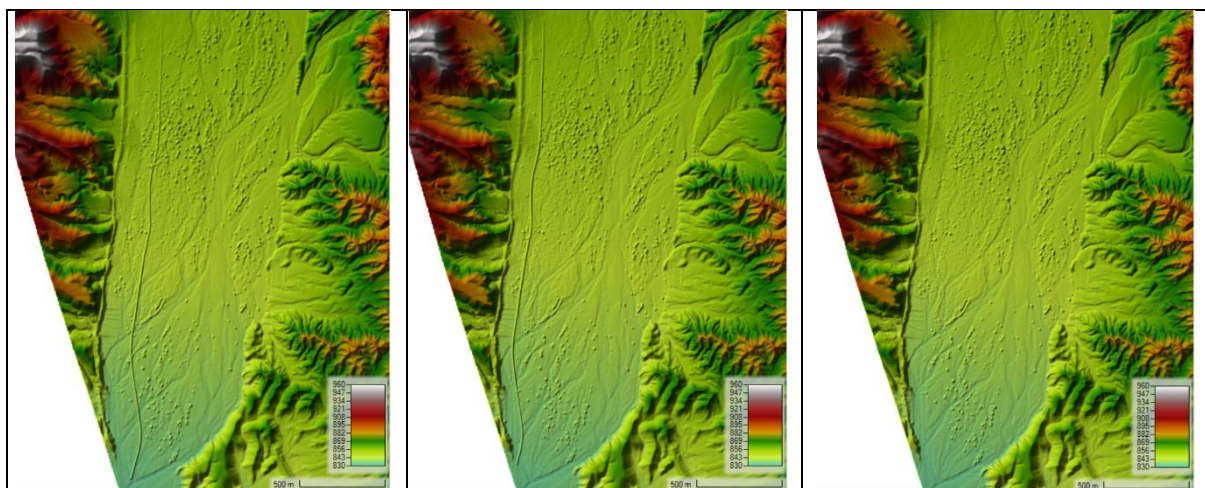
Figure 1 Location and physiographic properties of the Karvandard River watershed at the Daman hydrometric station outlet and the location of the river study reach (black oval)

Table 1 Design peak discharge of floods in the study reach of the Karvandard River

200-Year Peak Discharge (m <sup>3</sup> /s)	100-Year Peak Discharge (m <sup>3</sup> /s)	50-Year Peak Discharge (m <sup>3</sup> /s)
1950	1660	1270

### 3. Results

For 13 flood zone reduction areas in each of the three design floods (a total of 39 values), 13 corresponding values were calculated for the earthfill volumes required for levee implementations (Figure 2). The correlation analysis was performed between these two corresponding variables. The results showed that the obtained coefficient of determination (R<sup>2</sup>) is less than 0.1, which, contrary to expectations, shows a very low and undesirable. By applying the maximum velocity dimensionless weight factor to the volumes of the levees after deleting the outliers, the above mentioned correlation increased from 0.35, 0.48 and 0.50 to acceptable values of 0.88, 0.91 and 0.92, for floods with return periods of 50, 100 and 200 years, respectively. It has good accuracy and the obtained formulas (Figure 3 and Table 2) can be used to calculate the volumes of levees for three designs in the 3 km study reach.



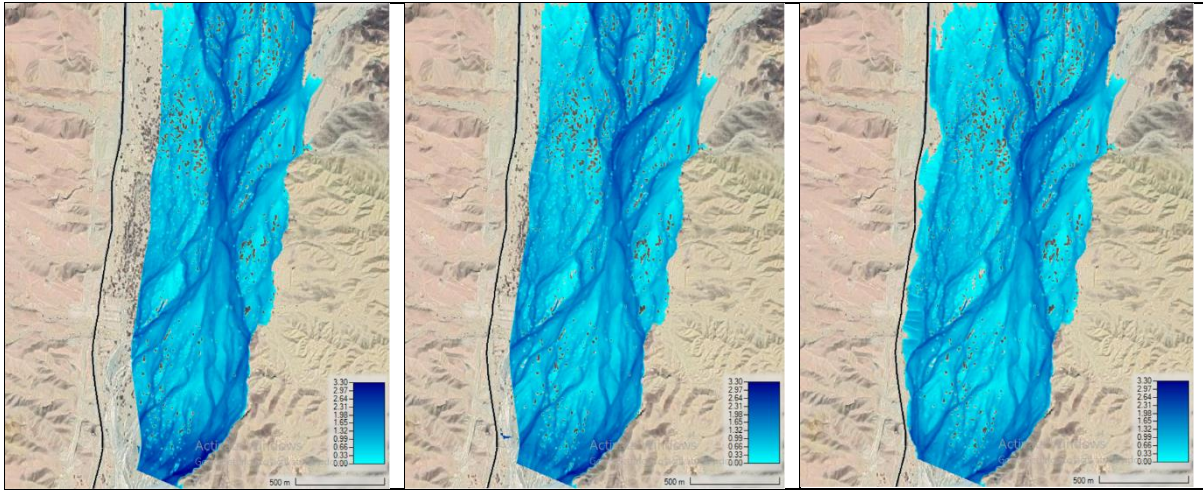


Figure 2 Plan view of the digital topographic model and satellite image, and the results of 200-year flood zoning in the study reach of Karvandard River for the existing condition (top), scenario 7 (middle) and scenario 13 (bottom)

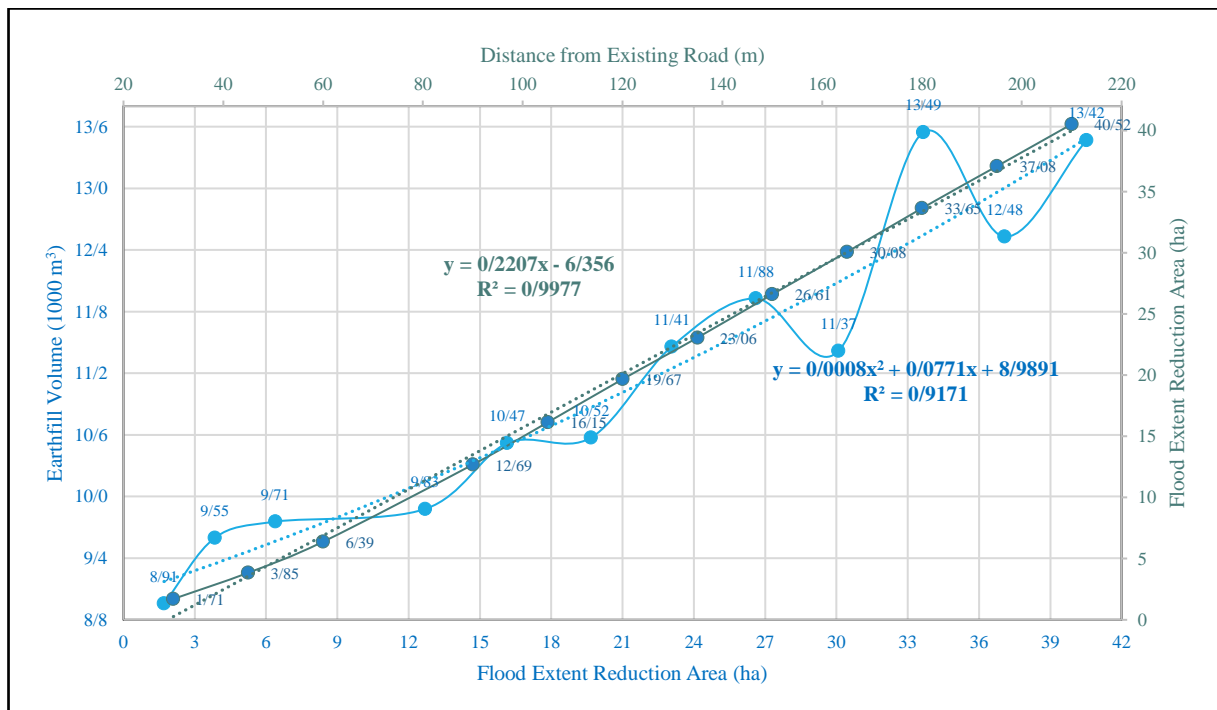


Figure 3 Chart of the required volume of earthwork for the reduction of 200-year flood zone in the study reach of Karvandard River (blue) and the reduction of 200-year flood zone for increasing the distance of the levees from the Chabahr-Zahedan road axis (orange) - by deleting the outlier data and applying the maximum velocity factor

#### 4. Discussion and Conclusion

In determining the formula for calculating the volumes of the levees, the polynomial equation of degree 2 provided a higher correlation with the coefficient of determination ( $R^2$ ) than the other equations of fit. Results also show increasing in  $R^2$  values with an increase in the flood return period. Moreover, results showed that computational accuracy of regression relationships in the scenarios with levee locations in the middle distances from the road axis is higher than other scenarios which are closer or farther. This result is due to more irregular river geometry in the scenarios closer to the road and the intensification of nonlinear changes in flood parameters in the farther scenarios.

**Table 2** Correlation relationships of embankment volume required by the levees,  $V_L$  ( $1000 \text{ m}^3$ ) based on the area extracted from the river floodplain,  $A$  (ha) for floods with return periods of 200, 100 and 50 years based on different states of analysis in a study reach of three km Karvandar River near the axis of Chabahar-Zahedan arterial road

Return period (Year)	State of analysis	Correlation of levee volume ( $1000 \text{ m}^3$ ) based on the area extracted from the floodplain (ha)	Coefficient of determination	Validity range of the correlation relationship based on the distance from the existing road axis (m)
200	without outlier deletion and without maximum velocity weighting factor	$V_L = 0.0006A^2 - 0.0074A + 9.6213$	0.0655	$15 < d < 210$
200	with outlier deletion and without maximum velocity weighting factor	$V_L = 0.0009A^2 - 0.0079A + 9.2132$	0.5049	$15 < d < 210$
200	without outlier deletion and with maximum velocity weighting factor	$V_L = 0.0009A^2 - 0.0079A + 9.2132$	0.6306	$15 < d < 210$
200	with outlier deletion and with maximum velocity weighting factor	$V_L = 0.0008A^2 + 0.0771A + 8.9891$	0.9171	$15 < d < 210$
100	without outlier deletion and without maximum velocity weighting factor	$V_L = 0.0006A^2 - 0.0088A + 9.536$	0.0567	$15 < d < 210$
100	with outlier deletion and without maximum velocity weighting factor	$V_L = 0.001A^2 - 0.0081A + 9.1215$	0.4833	$15 < d < 210$
100	without outlier deletion and with maximum velocity weighting factor	$V_L = 0.0004A^2 + 0.0764A + 9.3658$	0.6025	$15 < d < 210$
100	with outlier deletion and with maximum velocity weighting factor	$V_L = 0.0008A^2 + 0.0773A + 8.9036$	0.9091	$15 < d < 210$
50	without outlier deletion and without maximum velocity weighting factor	$V_L = 0.0007A^2 - 0.0172A + 9.0275$	0.0195	$15 < d < 210$
50	with outlier deletion and without maximum velocity weighting factor	$V_L = 0.0011A^2 - 0.0154A + 8.6129$	0.3504	$15 < d < 210$
50	without outlier deletion and with maximum velocity weighting factor	$V_L = 0.0003A^2 + 0.0691A + 8.857$	0.5084	$15 < d < 210$
50	with outlier deletion and with maximum velocity weighting factor	$V_L = 0.0007A^2 + 0.0711A + 8.4057$	0.8767	$15 < d < 210$

## 5. Six important references

- 1) Bozorg Haddad, O., Ashofteh, P., & Mariño, M. 2015. Levee layouts and design optimization in protection of flood areas. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE*, 141, 04015004.
- 2) Bozorg Haddad, O. 2018. Levee layouts and design optimization in protection of flood areas (Retraction of Vol 141, art no 04015004, 2015).
- 3) Dierauer, J., Pinter, N., & Remo, J. W. F. 2012. Evaluation of levee setbacks for flood-loss reduction, Middle Mississippi River, USA. *Journal of Hydrology*, 450, 1–8.
- 4) Naeem, B., Azmat, M., Tao, H., Ahmad, S., Khattak, M. U., Haider, S., Ahmad, S., Khero, Z., & Goodell, C. R. 2021. Flood hazard assessment for the Tori Levee Breach of the Indus River Basin, Pakistan. *Water*, 13(5), 604.
- 5) Lagasse, P. F., Clopper, P. E., Pagán-Ortiz, J. E., Zevenbergen, L. W., Arneson, L. A., Schall, J. D., & Girard, L. G. 2009. Bridge scour and stream instability countermeasures: Experience, selection, and design guidance. Third Edition, Volume 1, National Highway Institute, US.
- 6) USACE. 2021. HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual. Version 6.0. Hydrologic Engineering Center (HEC), US Army Corps of Engineers.

## Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

## معرفی رویکردی نوین به منظور مدل سازی هندسی و محاسبه احجام گوره های حفاظت سواحل رودخانه ها در برابر سیلاب (مطالعه موردی)

علیرضا محب زاده فتاحی<sup>۱</sup>، سعید فرزین<sup>۲</sup>، خسرو حسینی<sup>۳</sup>، سیدفرهاد موسوی<sup>۴</sup>

تاریخ ارسال: ۱۴۰۰/۰۶/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰

مقاله پژوهشی

### چکیده

افزایش تجاوز به حریم رودخانه ها به همراه تغییرات اقلیمی، موجب افزایش رخداد سیلاب های بزرگ و آسیب پذیری بیشتر سیلابدشت ها شده است. گوره ها، از مهم ترین و پرکاربردترین سازه های حفاظت سواحل رودخانه ها در برابر سیل محسوب می شوند. در این تحقیق، کوشش شد تا با معرفی یک رویکرد نوین در مدل سازی هندسی، رابطه ای ریاضی برای محاسبه احجام گوره ها بر اساس سناریوهای مختلف جانمایی در سیلابدشت توسعه داده شود. سناریوهای مطالعاتی شامل گوره های حفاظت از تعریض سه کیلومتر از راه شریانی چابهار- زاهدان واقع در سیلابدشت رودخانه کارواندر در جنوب شرق ایران است. شبیه سازی هیدرولیکی در HEC-RAS برای وضعیت موجود و ۱۳ سناریوی مختلف جانمایی گوره ها با ۱۳ توپوگرافی منحصربه فرد بر اساس رویکرد نوین مذکور، انجام شده و میزان کاهش پهنه سیلابی و حجم خاکریزی گوره ها برای هر یک از سناریوها در ArcMap محاسبه شده است. بر اساس نتایج، تغییرات حجم خاکریزی گوره ها در سناریوهای مختلف، همبستگی خوبی با پهنه سیلابی استحصال شده نداشت. با توجه به وابستگی مستقیم آبستگمی، هندسه و احجام گوره ها به سرعت جریان، با محاسبه سرعت حداکثر جریان، ضرایب بی بعد سرعت حداکثر در سناریوهای مختلف، محاسبه و به احجام گوره ها اعمال شد. به این ترتیب و با به کارگیری معادلات چندجمله ای درجه دو در روابط همبستگی، ضریب تعیین ( $R^2$ ) برای سیلاب های با دوره های بازگشت ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال، به ترتیب از مقادیر ۰/۳۵، ۰/۴۸ و ۰/۵۰ به مقادیر قابل قبول ۰/۸۸، ۰/۹۱ و ۰/۹۲ افزایش یافت که نشان دهنده کارآیی بالای رویکرد پیشنهادی و نیز افزایش  $R^2$  با افزایش دوره بازگشت سیلاب است. همچنین، دقت محاسباتی روابط رگرسیونی در سناریوهای جانمایی گوره ها در فواصل میانی از محور راه نسبت به سایر سناریوهای نزدیک تر یا دورتر، بیشتر است که ناشی از هندسه نامنظم تر رودخانه در سناریوهای نزدیک تر و تشدید تغییرات غیرخطی پارامترهای سیلاب در سناریوهای دورتر است.

واژه های کلیدی: سیلاب، سازه های کنترل سیلاب، گوره، پهنه بندی سیلاب، GIS، HEC-RAS

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری تخصصی، گروه مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران mohebzadeh.alireza@semnan.ac.ir

<sup>۲</sup> نویسنده مسئول و دانشیار، گروه مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران saeed.farzin@semnan.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشیار، گروه مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران khoseini@semnan.ac.ir

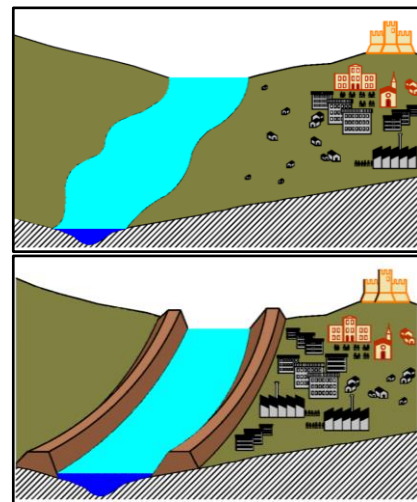
<sup>۴</sup> استاد، گروه مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران fmousavi@semnan.ac.ir

### مقدمه

در زمینه مطالعات پهنه‌بندی سیلاب و روش‌های حفاظت سیلابدشت در برابر سیل، پژوهش‌های مختلفی انجام شده است. دیراتور و همکاران (۲۰۱۲) مؤثر بودن گوره‌ها را در کاهش تلفات سیل در طول رودخانه می‌سی‌سی‌پی میانی با استفاده از HEC-RAS بررسی کردند. چهار سناریو برای جانمایی گوره‌ها در نظر گرفته شد و میزان تلفات سیل برای دوره‌های بازگشت مختلف تخمین زده شد. ایشان نتیجه گرفتند که گوره‌ها یک راه‌حل بادوام در کاهش پهنه سیلاب هستند. علاقه‌مند و همکاران (۲۰۱۲) قابلیت دو مدل هیدرولیکی HEC-RAS و MIKE-11 را در مطالعات ریسک سیلاب روی رودخانه‌ای در مالزی مقایسه کردند. مقایسه نتایج با مقادیر مشاهداتی نشان داد که HEC-RAS دارای قابلیت بیشتری در پهنه‌بندی و تهیه نقشه‌های ریسک سیلاب است. بزرگ حداد و همکاران (۲۰۱۵) کاهش آسیب سیل را با مکان‌یابی گوره‌ها و تعیین ارتفاع آنها با استفاده از الگوریتم ژنتیک مطالعه کردند. نتایج نشان داد که استفاده از گوره‌ها، نرخ آسیب‌های سیل را تا ۹۹٪ کاهش داد. تانگ و همکاران (۲۰۲۰) تالاب‌هایی را با اندازه‌های مختلف در بالادست، میانه و پایین‌دست حوضه آبریزی در تگزاس آمریکا با استفاده از نرم‌افزارهای HEC-HMS و HEC-RAS جانمایی کرده و مدل‌سازی کردند تا اثرات اندازه و موقعیت مکانی تالاب‌ها را در کاهش سیلاب بررسی کنند. نتایج نشان داد که هر چه موقعیت تالاب‌ها به بالادست حوضه نزدیک‌تر و اندازه تالاب‌ها بزرگ‌تر باشد، تأثیر بیشتری در کاهش عمق و سرعت جریان سیلاب خواهند داشت. گارسیا و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که با استفاده از مدل هیدرولیکی HEC-RAS 2D در مدل‌سازی هیدرولوژیک، هیدرولیکی و مخازن، می‌توان اثرات دقیق سیلاب را مدل‌سازی کرده و نتایج را در طرح‌های کنترل سیل آینده به کار برد. نوفال و ون‌دیلینت (۲۰۲۱) رویکردی برای کمی‌سازی اثرات سیاست‌های کنترل سیل در مناطق شهری با یکپارچه‌سازی اطلاعات شهرسازی و توپوگرافی به کمک نرم‌افزار HEC-RAS توسعه دادند. نتایج نشان داد که یک سیاست کنترل سیل منفرد برای کاهش سیل کافی نبوده و به این منظور نیاز به روش‌های متنوع کنترل سیل وجود دارد. نعیم و همکاران (۲۰۲۱)

سیلابدشت‌های رودخانه‌های بزرگ، به دلیل خاک حاصلخیز، محیط‌زیست مناسب برای گونه‌های متنوع گیاهی و جانوری، دسترسی راحت‌تر به آب رودخانه، توپوگرافی ملایم و ... از نظر مسائل زیست‌محیطی و اکوسیستم‌های گیاهی و جانوری، شهرسازی، کشاورزی، صنعت، احداث و توسعه زیرساخت‌های حمل و نقل از جمله محورهای راه و راه‌آهن، احداث سازه‌های بهره‌برداری و آبرگیری از رودخانه و ... دارای ارزش و اهمیت بسیار زیادی هستند. در سال‌های اخیر، تجاوز به حریم رودخانه‌ها و تغییرات اقلیمی، تناوب، شدت سیلاب‌های بزرگ و پتانسیل خسارات سیلابدشت‌ها در برابر سیل را افزایش داده و اهمیت حفاظت از سیلابدشت‌ها در برابر سیلاب‌ها را تشدید کرده است.

گوره‌ها<sup>۱</sup> به دلیل سادگی ساختار، در دسترس بودن و قیمت ارزان مصالح خاکی، و سهولت بیشتر اجرا، نگهداری و تعمیر از مهم‌ترین و پرکاربردترین سازه‌های هیدرولیکی حفاظت سواحل و حریم رودخانه‌ها در برابر سیل محسوب می‌شوند. در شکل ۱، شماتیک یک رودخانه، پیش و پس از اجرای گوره‌ها نمایش داده شده است (دی‌بالداساره و همکاران - ۲۰۱۸).



شکل (۱): رودخانه در وضعیت اولیه (بالا) و پس از اجرای گوره‌ها برای حفاظت سیلابدشت در برابر سیلاب (پایین) - برگرفته از دی‌بالداساره و همکاران (۲۰۱۸)

<sup>۱</sup> Levees





نخستین بار هندسه واقعی گوره‌ها در مدل‌سازی هندسی سناریوهای مطالعاتی و تغییرات ناشی از آن در مقاطع عرضی رودخانه و هندسه اعمال شده و بر اساس نتایج شبیه‌سازی هیدرولیکی رابطه‌ای رگرسیونی برای محاسبه حجم گوره‌ها بر اساس کاهش پهنه سیلابی برای دوره‌های بازگشت مختلف توسعه داده شده است.

## مواد و روش‌ها

### معرفی حوضه آبریز، رودخانه مطالعاتی و مطالعات هیدرولوژی

مطالعات روی بازه‌ای به طول حدود ۱۴/۵ کیلومتر از رودخانه کارواندر در فاصله حدود ۳۰ کیلومتر از بالادست ایستگاه هیدرومتری دامن و در فاصله حدود ۶۰ کیلومتری شمال شهر ایرانشهر انجام شده است. شبیه‌سازی و تحلیل هیدرولیکی گوره‌ها روی بازه‌ای به طول حدود ۳ کیلومتر، در پایین‌دست بازه فوق‌الذکر، واقع در مجاورت محور راه شریانی چابهار- ایرانشهر- زاهدان، انجام شده است.

حوضه آبریز و رودخانه مطالعاتی، رود کارواندر واقع در ناحیه مرکزی استان سیستان و بلوچستان در جنوب شرق ایران است. بر اساس نتایج مطالعات فیزیوگرافی در GIS، حوضه آبریز رودخانه کارواندر در محل ایستگاه هیدرومتری دامن، دارای مساحت ۳۴۵۰ کیلومترمربع، شیب ۰/۱۶۶۲، ارتفاع میانگین ۱۳۰۰ متر از سطح آب‌های آزاد، ضریب شکل ۲/۱۴، طول طولانی‌ترین آبراهه ۱۵۳ کیلومتر و شیب طولانی‌ترین آبراهه ۰/۰۰۶۲ است (شکل ۲).

با استفاده از تحلیل فراوانی دبی‌های اوج سالانه سیلاب در ایستگاه هیدرومتری دامن و به‌کارگیری تحلیل منطقه‌ای سیلاب، دبی‌های اوج با دوره‌های بازگشت ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال رودخانه کارواندر در بازه مطالعاتی محاسبه شده است (جدول ۱). از این مقادیر، در شبیه‌سازی هیدرولیکی استفاده شده است.

مدل‌سازی جریان غیردائمی را در شکست گوره توری<sup>۱</sup> رودخانه ایندوس<sup>۲</sup> پاکستان با ترکیب HEC-RAS 2D و تکنیک‌های GIS و RS<sup>۳</sup> انجام دادند. عملکرد مدل با مقایسه مقادیر مشاهداتی در هفت ایستگاه هیدرومتری مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل HEC-RAS عملکرد خوبی در شبیه‌سازی شکست گوره توری داشته و دارای دقت ۸۴ درصدی در محاسبه پهنه سیلابی حداکثر است. اورزیکا و همکاران (۲۰۲۱) یک رویکرد مفهومی کوچک‌مقیاس را با استفاده از HEC-RAS 2D مطابق با سه سناریوی شکست سد روی رودخانه باس او<sup>۴</sup> در شمال شرقی رومانی توسعه دادند. نتایج نشان داد که سیستم چندمخزنه شبیه‌سازی شده نقش مهمی در کاهش سیلاب دارد.

یخکشی و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از HEC-RAS و GIS پهنه‌بندی سیلاب‌های با دوره‌های بازگشت مختلف را در رودخانه نرماب واقع در استان گلستان انجام داده و تأثیر احداث سد نرماب را در کاهش پهنه سیلاب اراضی پایین‌دست مطالعه کردند. سناریوهای مختلفی برای حجم ذخیره سیلاب سد مورد بررسی قرار گرفت. صابری تنسوان و همکاران (۱۳۹۹) به کمک HEC-RAS، GIS و HEC-GeoRAS سیل بخشی از رودخانه اترک و سرشاخه‌های آن را شبیه‌سازی کردند و آنالیز حساسیت پارامترهای سیل نسبت به تغییرات ضریب زبری برای سیلاب با دوره‌های بازگشت مختلف را بررسی کردند. بر اساس نتایج، پارامترهای سرعت و عمق جریان، بیشترین و کمترین تغییرات را نسبت به تغییرات زبری نشان دادند.

بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که در آنها تأثیر احداث و خاکریزی گوره‌ها بر تغییر هندسه مقاطع عرضی رودخانه‌ها در نظر گرفته نشده و تمرکز آنها تنها بر میزان کاهش پهنه سیلابی ناشی از اجرای گوره‌ها و منافع اقتصادی حاصل بوده است. همچنین، در تحقیقات پیشین، روابط ریاضی برای محاسبه حجم گوره‌ها بر حسب میزان کاهش پهنه سیلابی رودخانه‌ها که می‌تواند در مکان‌یابی بهینه گوره‌ها استفاده شود، ارائه نشده است. در این تحقیق، تلاش شده است که با استفاده از رویکردها و روش‌های نوین به این دو مسأله مهم و کاربردی پاسخ داده شود. به این منظور، برای

<sup>3</sup> Remote Sensing

<sup>4</sup> Bas eu

<sup>1</sup> Tori

<sup>2</sup> Indus

اصطکاکی و افت‌های تنگ‌شدگی یا بازشدگی است. معادله افت هد انرژی به صورت زیر است:

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (2)$$

که،

$L$  = طول بازه وزن‌دار شده بر اساس فاصله،  $\bar{S}_f$  شیب اصطکاکی بین دو مقطع عرضی و  $C$  = ضریب افت تنگ‌شدگی یا بازشدگی است.

طول بازه وزن‌دار شده بر اساس فاصله با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$L = \frac{L_{lob}\bar{Q}_{lob} + L_{ch}\bar{Q}_{ch} + L_{rob}\bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}} \quad (3)$$

که،

$L_{lob}$ ،  $L_{ch}$  و  $L_{rob}$  = طول بازه جریان به ترتیب در سیلابدشت چپ، مقطع اصلی و سیلابدشت راست بین دو مقطع عرضی رودخانه است و  $\bar{Q}_{lob}$ ،  $\bar{Q}_{ch}$  و  $\bar{Q}_{rob}$  = میانگین حسابی جریان بین مقاطع عرضی به ترتیب در سیلابدشت چپ، مقطع اصلی و سیلابدشت راست است (مرجع هیدرولیکی USACE، HEC-RAS 6.0، ۲۰۲۱).

جدول (۱): دبی اوج سیلاب‌های طراحی بازه مطالعاتی رودخانه

کارواندر

دبی اوج با دوره بازگشت ۲۰۰ سال (m <sup>3</sup> /s)	دبی اوج با دوره بازگشت ۱۰۰ سال (m <sup>3</sup> /s)	دبی اوج با دوره بازگشت ۵۰ سال (m <sup>3</sup> /s)
۱۹۵۰	۱۶۶۰	۱۲۷۰

معادلات حاکم

در HEC-RAS، پروفیل‌های سطح آب از یک مقطع عرضی تا مقطع عرضی بعدی با حل معادله انرژی<sup>۱</sup> با یک روند تکراری<sup>۲</sup> به نام روش گام به گام استاندارد محاسبه می‌شوند. معادله انرژی به صورت زیر است:

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

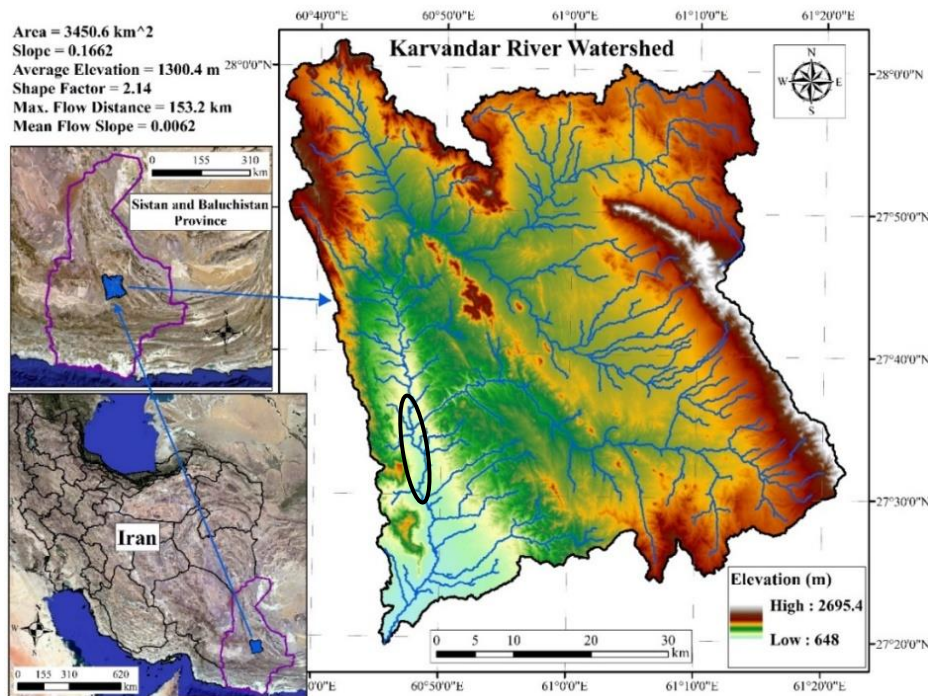
که،

$Z_1$  و  $Z_2$  = ارتفاع کف آبراهه اصلی در دو مقطع عرضی متوالی ۱ و ۲،  $V_1$  و  $V_2$  = میانگین سرعت‌ها در دو مقطع عرضی متوالی ۱ و ۲ (دبی تقسیم بر سطح مقطع جریان)،  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  = ضرایب وزنی سرعت،  $g$  = شتاب ثقل و  $h_e$  = افت هد انرژی است.

افت هد انرژی (he) بین دو مقطع عرضی متشکل از افت‌های

<sup>2</sup> Iterative procedure

<sup>1</sup> Energy equation



شکل (۲): موقعیت و مشخصات فیزیوگرافیک حوضه آبریز رودخانه کارواندر در محل ایستگاه هیدرومتری دامن و موقعیت بازه مطالعاتی رودخانه (بیضی مشکی)

ناشی از سیل احداث شوند (لاگاس و همکاران، ۲۰۰۹). رابطه محاسبه آبشستگی دیوارها یا گوره‌های موازی و در تماس با سیل به صورت زیر است (لاگاس و همکاران، ۲۰۰۹):

$$\frac{y_s}{y_1} = 0.73 + 0.14\pi Fr^2 \quad (5)$$

که،

$y_s$  = عمق آبشستگی (m)،  $y_1$  = میانگین عمق جریان بالادست (m) و  $Fr$  = میانگین عدد فرود<sup>۱</sup> بالادست است. رابطه محاسبه آبشستگی دیوارها یا گوره‌های دارای زاویه و در تماس با سیل که در این مطالعات صادق است، به صورت زیر است (لاگاس و همکاران، ۲۰۰۹):

$$\frac{y_s}{y_1} = (0.73 + 0.14\pi Fr^2) \cos \theta + 4Fr^{0.33} \sin \theta \quad (6)$$

که  $\theta$  زاویه جریان سیل با دیوار یا گوره است. به طوری که ملاحظه می‌شود، عمق آبشستگی گوره تابعی از عدد فرود است که رابطه مستقیمی با سرعت جریان دارد. بنابراین، افزایش سرعت جریان، منجر به افزایش عدد فرود و افزایش عدد فرود بر اساس روابط (۵) و (۶) منجر به افزایش

در شرایطی که رژیم جریان از زیربحرانی به فوق‌بحرانی و یا بالعکس تغییر کرده و از عمق بحرانی عبور کند که به معنای رخداد پرش هیدرولیکی است، معادله انرژی قابلیت کاربرد نداشته و از معادله اندازه حرکت استفاده می‌شود. معادله اندازه حرکت برای جریان دائمی به صورت زیر است:

$$\frac{Q_2^2 \beta_2}{gA_2} + A_2 \bar{Y}_2 + \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) L S_0 - \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) L S_f = \frac{Q_1^2 \beta_1}{gA_1} + A_1 \bar{Y}_1 \quad (4)$$

که،

$Q_1$  و  $Q_2$  = دبی جریان در مقاطع عرضی ۱ و ۲،  $A_1$  و  $A_2$  = مساحت تر شده در مقاطع عرضی ۱ و ۲،  $S_0$  = شیب کف بر اساس ارتفاع میانگین بستر آبراهه است.

یکی از عوامل مهم تأثیرگذار در طراحی مشخصات هندسی و فیزیکی سازه‌های هیدرولیکی در معرض جریان‌های سیلابی، آبشستگی موضعی ایجاد شده در سازه‌های مذکور است؛ به طوری که تراز کف سازه‌های مذکور باید در زیر تراز زمین طبیعی و در عمقی پایین‌تر نسبت به تراز چاله آبشستگی

<sup>۱</sup> Froude Number

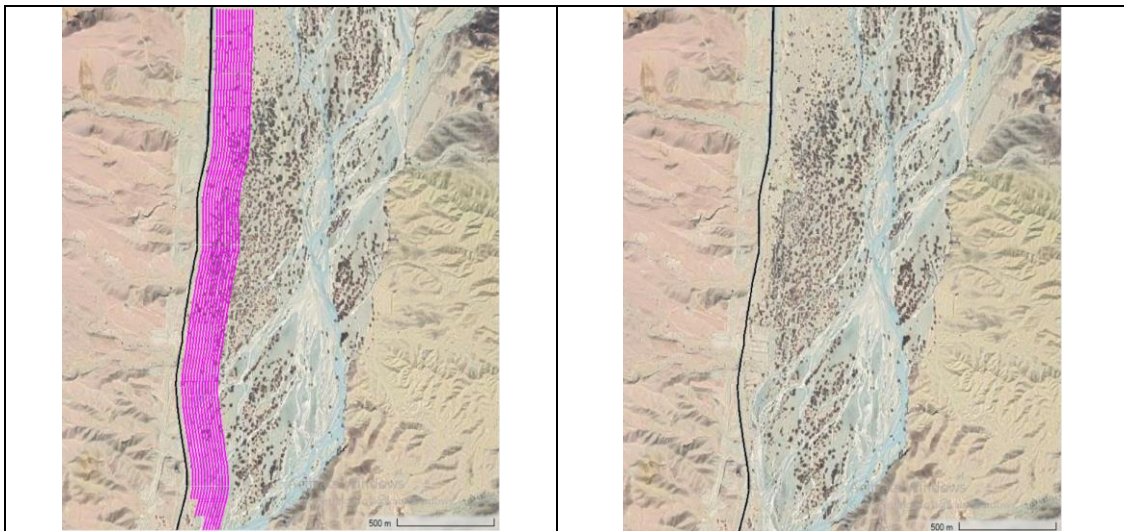
عمق آبشستگی گوره می‌گردد.

جدول (۲): سناریوهای ۱۳ گانه مطالعاتی جانمایی گورها

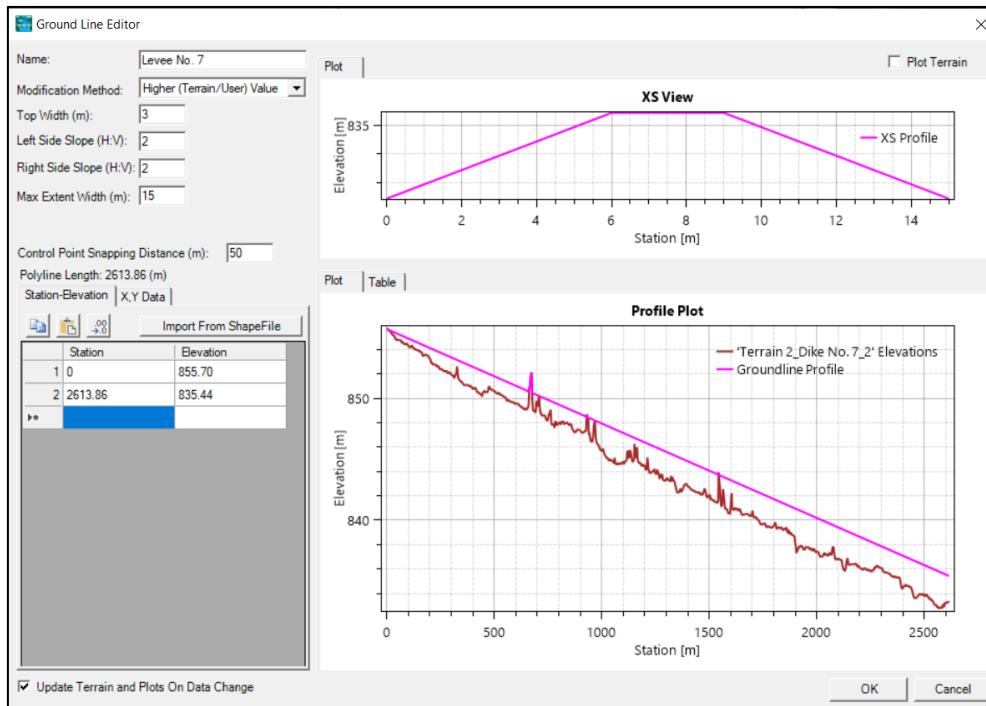
سناریو	فاصله از محور موجور (m)
بدون گوره	۰
۱	۳۰
۲	۴۵
۳	۶۰
۴	۷۵
۵	۹۰
۶	۱۰۵
۷	۱۲۰
۸	۱۳۵
۹	۱۵۰
۱۰	۱۶۵
۱۱	۱۸۰
۱۲	۱۹۵
۱۳	۲۱۰

### سناریوهای مطالعاتی

به منظور ارزیابی و مطالعه رابطه میان موقعیت مکانی گورها با احجام خاکریزی لازم برای آنها، ۱۳ سناریوی مختلف جانمایی گوره‌های خاکی با فواصل ثابت ۳۰، ۴۵، ۶۰، ... و ۲۱۰ متری از محور راه مطالعاتی و فاصله ۱۵ متری از یکدیگر پیاده‌سازی شد (جدول ۲ و شکل ۳). مقطع عرضی گورها در هر یک از ۱۳ سناریوی مطالعاتی، دوزنقه‌ای با عرض بالای ۳ متر و شیب طرفین ۱V:2H در نظر گرفته شد (شکل ۴).



شکل (۳): بازه مطالعاتی رودخانه کارواندر و راه چابهار - زاهدان در تصویر ماهواره‌ای (راست) و موقعیت گوره‌های موازی راه مربوط به سناریوهای ۱۳ گانه (چپ)



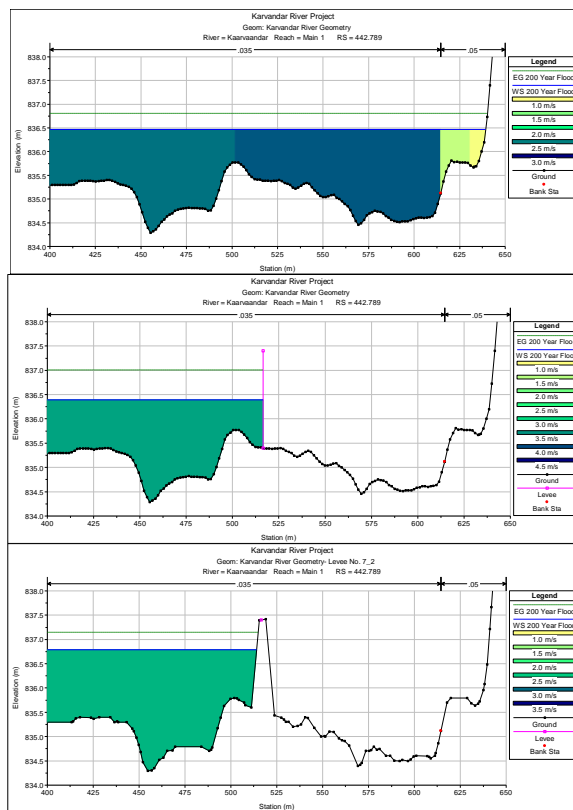
شکل (۴): نمونه مقطع عرضی و پروفیل‌های طولی زمین طبیعی و تاج مدل‌سازی شده برای گوره سناریوی ۷

### رویکرد نوین در مدل‌سازی هندسی گورها

در این تحقیق و در فرآیند مدل‌سازی هندسی گورها برای ۱۳ سناریوی مطالعاتی در HEC-RAS، از یک رویکرد نوین به کمک GIS استفاده شده است. در تحقیقات پیشین، مدل‌سازی گورها در HEC-RAS با فعال‌سازی گزینه Levee و تعیین ارتفاع لازم برای گوره، با انتخاب تراز بالتر از تراز داغاب جریان سیل طراحی انجام شده است. در تحقیقات مذکور، به طوری که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود، گوره، تنها به صورت یک تیغه با ارتفاع مشخص مدل‌سازی می‌شود که مطابقتی با شرایط واقعی و اجرایی گورها و نیز تأثیر قابل توجه آنها در تغییر هندسه مقاطع رودخانه ندارد. در تحقیق حاضر، با یک رویکرد ابتکاری نوین و به کمک GIS، هندسه گورها در هر یک از سناریوهای ۱۳ گانه، کاملاً مشابه با شرایط واقعی و شرایط اجرایی و به صورت یک مقطع عرضی دوزنقه‌ای شکل با اعمال تغییر هندسه مقاطع عرضی رودخانه مدل‌سازی شده است.

مربوط به سناریوی ۷ در شکل ۶ نمایش داده شده است. شیب رودخانه در این بازه برابر با ۰/۰۰۶۵ است که برای یک رودخانه بزرگ با دبی سیلابی قابل توجه، شیب تندی محسوب می‌شود.

یک سرشاخه اصلی به نام رودخانه ایرندگان و دو سرشاخه فرعی در محل اتصال بازه‌های سه‌گانه، به ترتیب در حرکت از بالادست به پایین‌دست، به رودخانه کارواندر می‌پیوندند (شکل ۷). طول بازه انتهایی پایین‌دست مدل‌سازی شده رودخانه ایرندگان و دو سرشاخه فرعی ۱ و ۲، به ترتیب ۱/۷، ۲ و ۰/۸ کیلومتر است. مجموع تعداد مقاطع عرضی مدل‌سازی شده رودخانه کارواندر در بازه‌های مطالعاتی، برابر با ۲۶۸ عدد، و تعداد مقاطع عرضی مدل‌سازی شده رودخانه ایرندگان (سرشاخه اصلی) و دو سرشاخه فرعی به ترتیب برابر با ۳۶، ۵۴ و ۲۳ عدد است. سناریوهای مطالعاتی ۱۳ گانه جانمایی گوره‌ها در بخشی از بازه انتهایی رودخانه کارواندر به طول ۳/۱ کیلومتر شامل ۵۸ مقطع عرضی انجام شده است. این بازه رودخانه محدوده‌ای است که راه اصلی چابهار- زاهدان با نزدیک‌ترین فاصله از سیلابدشت سمت راست رودخانه عبور می‌کند. این بازه در پایین‌دست سه سرشاخه اتصال به رودخانه اصلی واقع شده است.

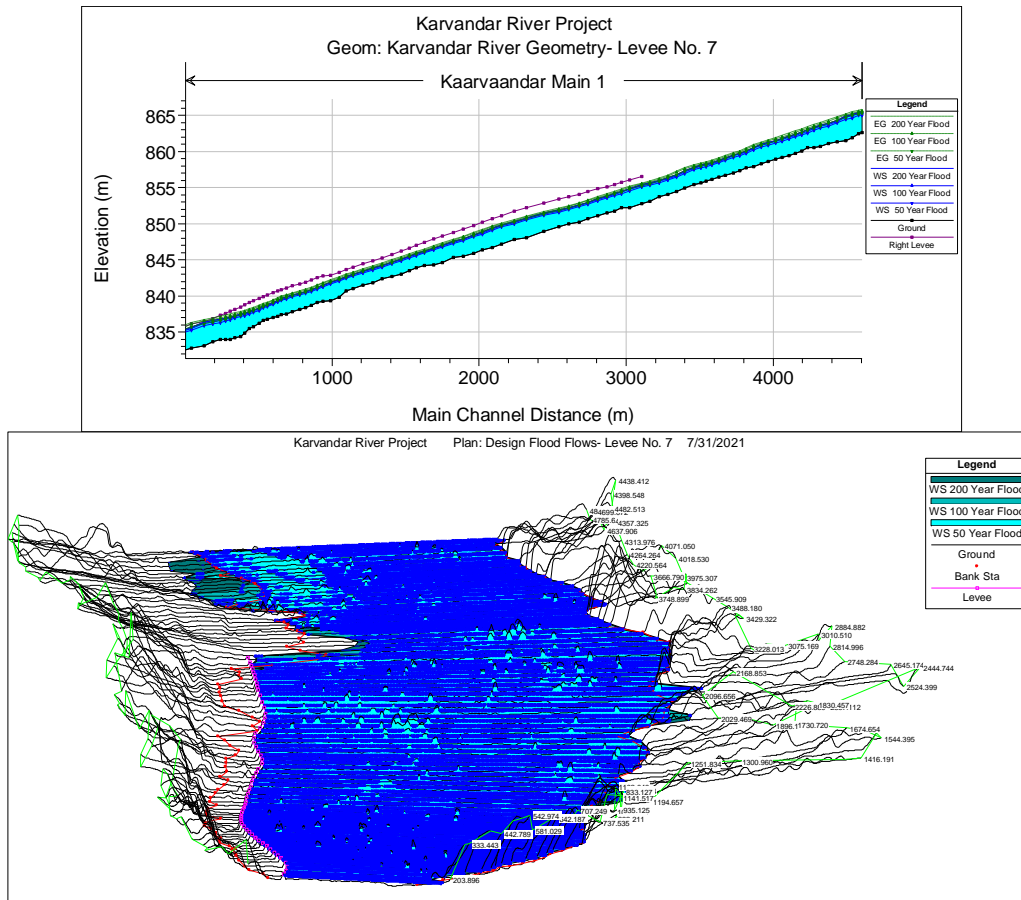


شکل (۵): سیلابدشت راست در یک نمونه مقطع عرضی

رودخانه مطالعاتی در شرایط بدون مدل‌سازی گوره (بالا)، مدل‌سازی گوره به صورت یک تیغه عمودی (وسط) و مدل‌سازی گوره مشابه با واقعیت به صورت یک مقطع دوزنقه‌ای و با تغییر هندسه مقطع عرضی رودخانه (پایین)

## نتایج و بحث

مدل‌سازی هندسی بازه مطالعاتی رودخانه کارواندر و استخراج مقاطع عرضی، با استفاده از مدل توپوگرافی رقومی با وضوح مکانی ۲ متر که از تصاویر پهبادی منطقه استخراج شده است، در HEC-RAS انجام شد. مدل هندسی ساخته شده دارای طول ۱۴/۵ کیلومتر و سه بازه اصلی است. پروفیل طولی و نمای سه‌بعدی بستر و داغاب سیلاب‌های طراحی ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله رودخانه کارواندر در بازه ۳/۱ کیلومتری



شکل (۶): پروفیل طولی (بالا) و نمای سه بعدی با بزرگنمایی ارتفاعی ۱۰ برابر (پایین) بستر و داغاب سیلاب‌های طراحی ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله در بازه پایین دست رودخانه کارواندر شامل بازه ۳/۱ کیلومتری مدل سازی گوره‌ها

طراحی در هر سناریو محاسبه شد. با کسر این مقادیر از مقادیر پهنه‌های سیلابی وضعیت موجود، مساحت کاهش یافته پهنه‌های سیلابی سناریوهای مطالعاتی ناشی از احداث گوره‌ها محاسبه شده است. همچنین، حجم خاکریزی گوره‌ها با کسر توپوگرافی وضعیت موجود از توپوگرافی‌های منحصر به فرد تولید شده در هر یک از سناریوها در ArcMap محاسبه شد.

بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی وضعیت موجود و ۱۳ سناریوی جانمایی گوره‌ها، عمق حداکثر برای سیلاب‌های با دوره‌های بازگشت ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال در محدوده ۲/۹ تا ۳/۳ متر محاسبه شده است.

همچنین، سرعت متوسط و عدد فرود جریان برای سیلاب‌های با دوره‌های بازگشت ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال به ترتیب در محدوده ۳ تا ۳/۳ متر در ثانیه، و ۰/۵۵ تا ۰/۹۵

در سناریوی اول، هندسه بازه مطالعاتی در وضعیت موجود، و در ۱۳ سناریوی بعدی با جانمایی محور گوره‌ها در پلان مدل توپوگرافی، و تغییر هندسه رودخانه بر اساس هندسه گوره‌ها مدل‌سازی شدند (شکل‌های ۷ و ۸).

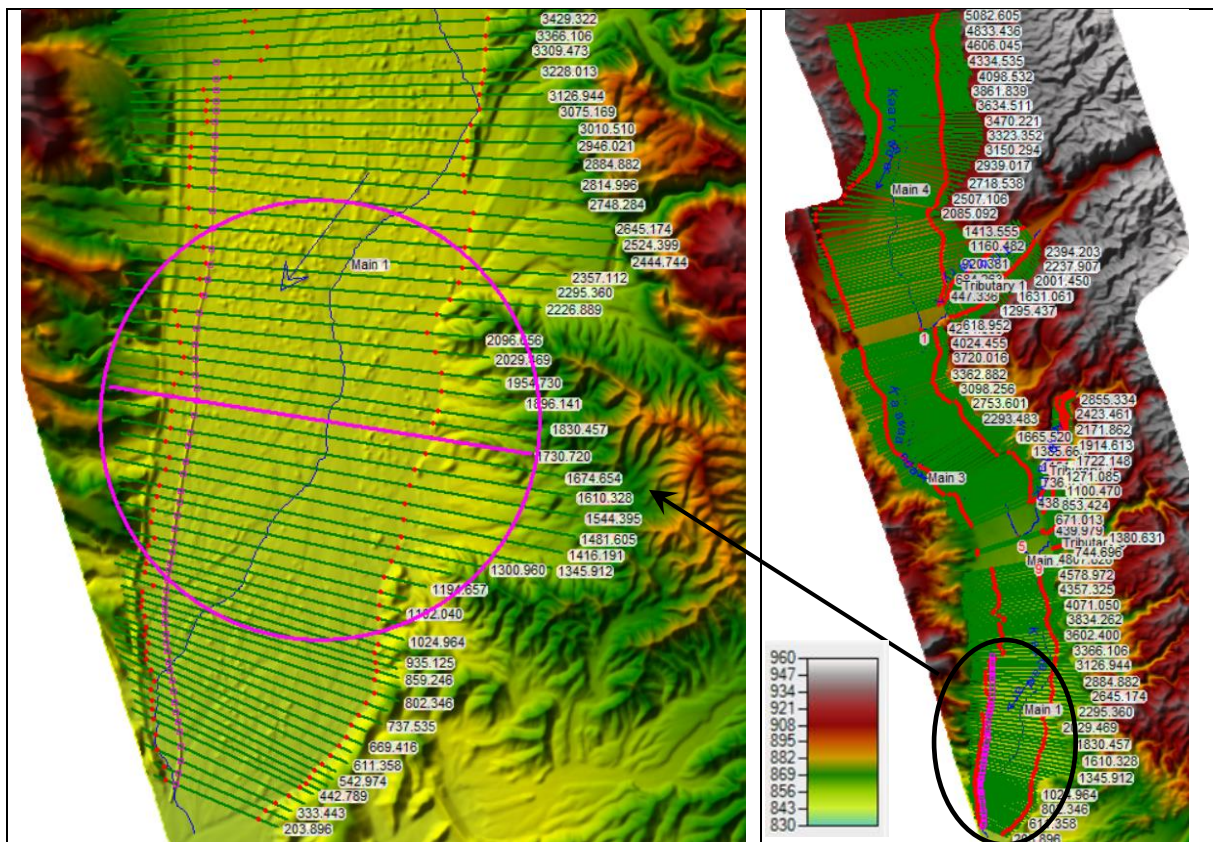
شبیه‌سازی و محاسبات هیدرولیکی وضعیت موجود و ۱۳ سناریو جانمایی گوره‌ها برای سه دبی اوج سیلاب با دوره‌های بازگشت ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال انجام شده است. با انجام آزمون و خطا، ارتفاع گوره‌ها در هر سناریو به صورتی بهینه شده است که اولاً جریان سیل به پشت آنها نفوذ نکند و ثانیاً حداقل ارتفاع آزاد ۲۰ سانتی‌متر برای داغاب سیل تأمین شود. به این ترتیب، در هر سناریو، سه ارتفاع و حجم متفاوت برای گوره‌ها، متناظر با سه سیل طراحی پیش‌گفته حاصل گردیده است. در شکل‌های ۹ و ۱۰ نمونه نتایج شبیه‌سازی هیدرولیکی در سه سناریو نمایش داده شده است.

در ادامه، مساحت پهنه‌های سیلابی برای سه دبی اوج

اجرای خاکریزی گوره‌ها بر حسب ۱۰۰۰ مترمکعب به‌دست آمد، نمودارهای مربوطه ترسیم گردید و آنالیز همبستگی بین دو متغیر مذکور انجام شد. نتایج مربوط به سیلاب ۲۰۰ ساله در شکل ۱۰، و نتایج مربوط به هر سه دبی سیلاب طراحی، در جدول‌های ۳، ۴، ۵ ارائه شده است. روابط همبستگی متناظر با سیلاب‌های سه‌گانه نیز، در جدول ۹ جمع‌بندی شده است.

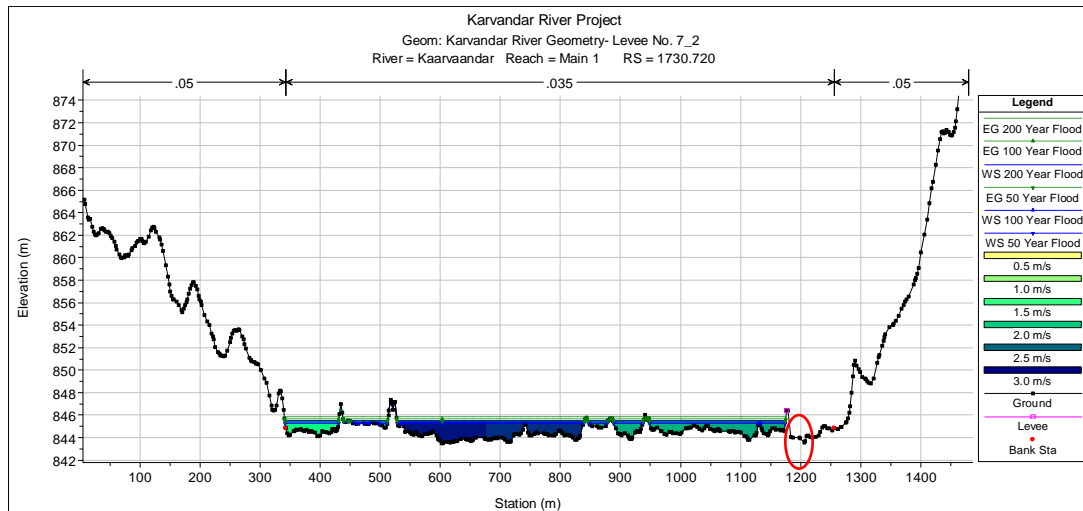
محاسبه شده است که علی‌رغم زیربحرانی بودن رژیم جریان- های سیلابی مطالعاتی، فاصله کمی تا رسیدن به شرایط بحرانی، ایجاد پرش‌های هیدرولیکی و رخداد آشفستگی در جریان‌های مذکور را نشان می‌دهد.

به این ترتیب، به ازای ۱۳ مقدار کاهش پهنه سیلابی بر حسب هکتار در هر یک از سیلاب‌های سه‌گانه طراحی (در مجموع ۳۹ مقدار)، ۱۳ مقدار متناظر برای حجم مورد نیاز



شکل (۷): پلان هندسی بازه سه کیلومتری رودخانه کارواندر برای جانمایی گوره‌ها (راست) و مقاطع عرضی به‌کار رفته در مدل‌سازی هیدرولیکی رودخانه- موقعیت گوره‌ها روی مقاطع عرضی با نقاط صورتی‌رنگ مشخص شده و یکی از مقاطع عرضی (شماره ۱۷۳۰/۷۲۰) برای نمایش در شکل ۸ هایلایت شده است.





شکل (۸): مقطع عرضی شماره ۱۷۳۰/۷۲۰ بازه مطالعاتی رودخانه کارواندر در سناریوی ۷. موقعیت گوره با بیضی قرمز رنگ مشخص شده است.

باشد، تأثیر بیشتری در کاهش همبستگی مذکور دارد. با توجه به تأثیر مستقیم سرعت جریان در عمق آبستگي گوره‌ها و تغییر ابعاد هندسی گوره‌ها ناشی از آن، توجه به پارامتر سرعت جریان و وزن دار کردن احجام گوره‌ها در سناریوهای مطالعاتی با به‌کارگیری پارامتر بی‌بعدی به نام "ضریب سرعت حداکثر" مورد بررسی قرار گرفت. این عامل مهم و تأثیر قابل توجه آن در احجام گوره‌ها در تحلیل‌های انجام شده تحقیق تا این مرحله در نظر گرفته نشده بود.

از طرفی، نتایج تحلیل‌های هیدرولیکی وضعیت موجود و سناریوهای ۱۳ گانه مطالعاتی نشان داد که مقادیر سرعت و عدد فرود جریان‌های سیلابی سه‌گانه قابل توجه بوده و نزدیک به رخداد شرایط رژیم جریان بحرانی و فوق بحرانی است. بنابراین، عامل سرعت در بازه مطالعاتی رودخانه کارواندر دارای تأثیرگذاری زیادی در عملیات مهندسی رودخانه و از جمله مشخصات هندسی گوره‌ها است.

سرعت میانگین و سرعت حداکثر در بازه مطالعاتی سه-کیلومتری رودخانه در وضعیت موجود و نیز سناریوهای ۱۳ گانه برای سیلاب‌های با سه دوره بازگشت ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال محاسبه و تعیین شد (جدول‌های ۶، ۷ و ۸، و شکل ۱۳). نسبت سرعت‌های مذکور در سناریوهای ۱۳ گانه به سرعت‌های متناظر در وضعیت موجود، به ترتیب به‌عنوان "ضریب بی‌بعد سرعت میانگین" و "ضریب بی‌بعد سرعت

به‌طوری که ملاحظه می‌شود، ضریب تعیین<sup>۱</sup> ( $R^2$ ) متناظر با هر سه سیلاب طراحی، کمتر از ۰/۱ است که برخلاف انتظار، همبستگی بسیار پایین و نامطلوب دو متغیر را نشان می‌دهد.

با بررسی داده‌های محاسباتی، یک داده پرت<sup>۲</sup> که مربوط به سناریوی ۴ است، شناسایی شد و به منظور بهبود همبستگی، حذف گردید. با استفاده از معادلات چندجمله-ای درجه دو در روابط همبستگی، ضریب تعیین ( $R^2$ ) برای سیلاب‌های با دوره‌های بازگشت ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال به ترتیب از مقادیر ۰/۰۲۰، ۰/۰۵۷ و ۰/۰۶۶ به مقادیر ۰/۳۵، ۰/۴۸ و ۰/۵۰ افزایش یافت (شکل‌های ۱۱ و ۱۲، و جمع-بندی در جدول ۹) که علی‌رغم بهبود قابل توجه همبستگی نسبت به حالت اولیه، باز هم با شرایط مطلوب فاصله داشت.

### رویکرد نوین در توسعه رابطه همبستگی محاسبه احجام گوره‌ها بر حسب کاهش پهنا سیل

نتایج آنالیزهای همبستگی نشان داد که برخلاف انتظار، تغییرات حجم خاکریزی احداث گوره‌ها در سناریوهای مختلف، همبستگی خوبی با پهنا سیلابی استحصال شده از رودخانه ندارد. این موضوع ناشی از توپوگرافی و هندسه نامنظم و پیچیده رودخانه است؛ به‌طوری که می‌توان گفت که هر چه عرض رودخانه بزرگ‌تر و هندسه آن نامنظم‌تر

<sup>2</sup> Outlier

<sup>1</sup> Coefficient of determination

بازگشت ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال به ترتیب به مقادیر قابل قبول ۰/۸۸، ۰/۹۱ و ۰/۹۲ افزایش یافت (شکل ۱۴ و جدول ۹). این یافته‌ها بار دیگر تأکید می‌کنند که رویکرد پیشنهادی اعمال ضریب بی‌بعد سرعت حداکثر، علی‌رغم ابعاد بزرگ و هندسه پیچیده رودخانه دارای کارایی بالایی است. به‌علاوه، بر اساس نتایج جدول ۹، با افزایش دوره بازگشت سیلاب طراحی،  $R^2$  افزایش یافته است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که دقت محاسباتی روابط رگرسیونی در سناریوهای مربوط به جانمایی گوره‌ها در فواصل میانی از محور راه نسبت به سایر سناریوهای نزدیک‌تر به یا دورتر از محور راه، بیشتر است. در سناریوهای دارای گوره‌های نزدیک‌تر به محور راه، این نتیجه ناشی از هندسه پیچیده‌تر و نامنظم‌تر رودخانه است. در سناریوهای دارای گوره‌های دورتر از محور راه نیز تغییرات غیرخطی پارامترهای سیلاب از جمله عمق و سرعت، نسبت به میزان فاصله گوره‌ها از محور راه، منجر به کاهش دقت روابط همبستگی محاسبه احجام گوره‌ها می‌گردد.

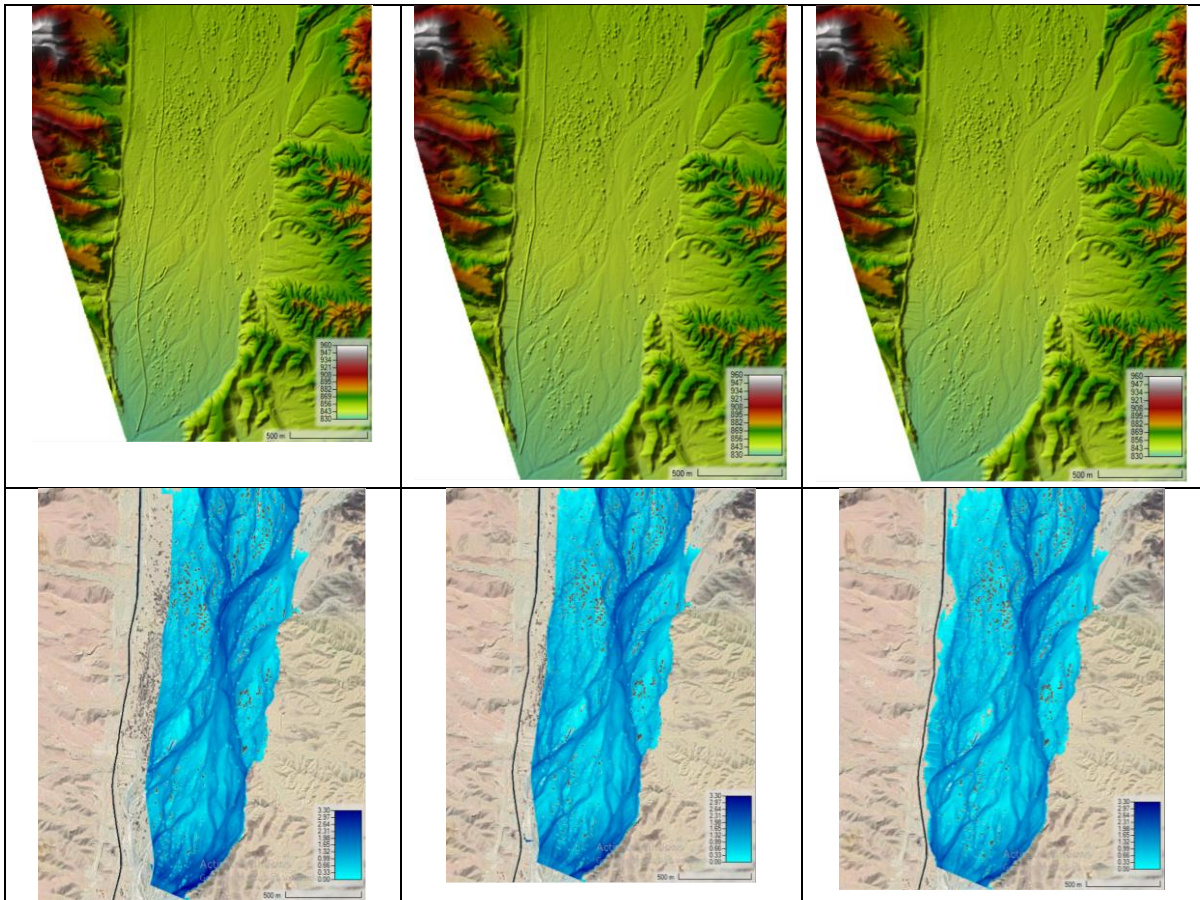
به‌طوری که گفته شد و در نتایج ارائه شده در جدول ۹ مشاهده می‌شود، برای محاسبه احجام گوره‌ها از معادلات چندجمله‌ای درجه ۲ استفاده شده است؛ زیرا این نوع معادلات نسبت به سایر معادلات برازش، رابطه همبستگی با ضریب تعیین ( $R^2$ ) بالاتری ارائه می‌کنند. همچنین، بر اساس نتایج جدول ۹، ملاحظه می‌شود که میزان همبستگی رابطه محاسبه احجام گوره‌ها با افزایش دوره بازگشت سیلاب، افزایش یافته است. این امر ناشی از آن است که در سیلاب‌های با دوره بازگشت کمتر، در بعضی از مقاطع عرضی رودخانه، جریان سیلاب تماس کمتری با گوره‌ها دارد و یا حتی ممکن است تماسی نداشته باشد؛ در صورتی که با افزایش دوره بازگشت و دبی سیلاب طراحی، سطح تماس و عمق جریان در تعداد بیشتری از مقاطع عرضی با معیارهای طراحی در نظر گرفته شده برای گوره‌ها، از جمله ارتفاع آزاد حداقل داغاب سیلاب، مطابقت پیدا می‌کند.

حداکثر "تعریف و محاسبه گردید (جدول‌های ۶، ۷ و ۸) و به احجام محاسباتی گوره‌ها اعمال گردید (جدول‌های ۳، ۴ و ۵، و شکل ۱۴). همچنین درصد تغییرات سرعت‌های حداکثر جریان بازه مطالعاتی در سناریوهای ۱۳ گانه جانمایی گوره‌ها نسبت به وضعیت موجود، در ستون سمت راست جدول‌های ۶، ۷ و ۸ ارائه شده است. به‌طوری که ملاحظه می‌شود، با فاصله گرفتن گوره‌ها از محور راه موجود (حرکت از سناریوی ۱ تا سناریوی ۱۳)، سرعت حداکثر جریان در بازه مطالعاتی برای سیلاب‌های با دوره بازگشت ۲۰۰، ۱۰۰ و ۵۰ سال، از ۰ درصد تا به ترتیب ۳/۳، ۵/۳، ۲۹/۳ و ۲۷/۵ درصد افزایش یافته است که افزایش قابل توجهی محسوب می‌گردد.

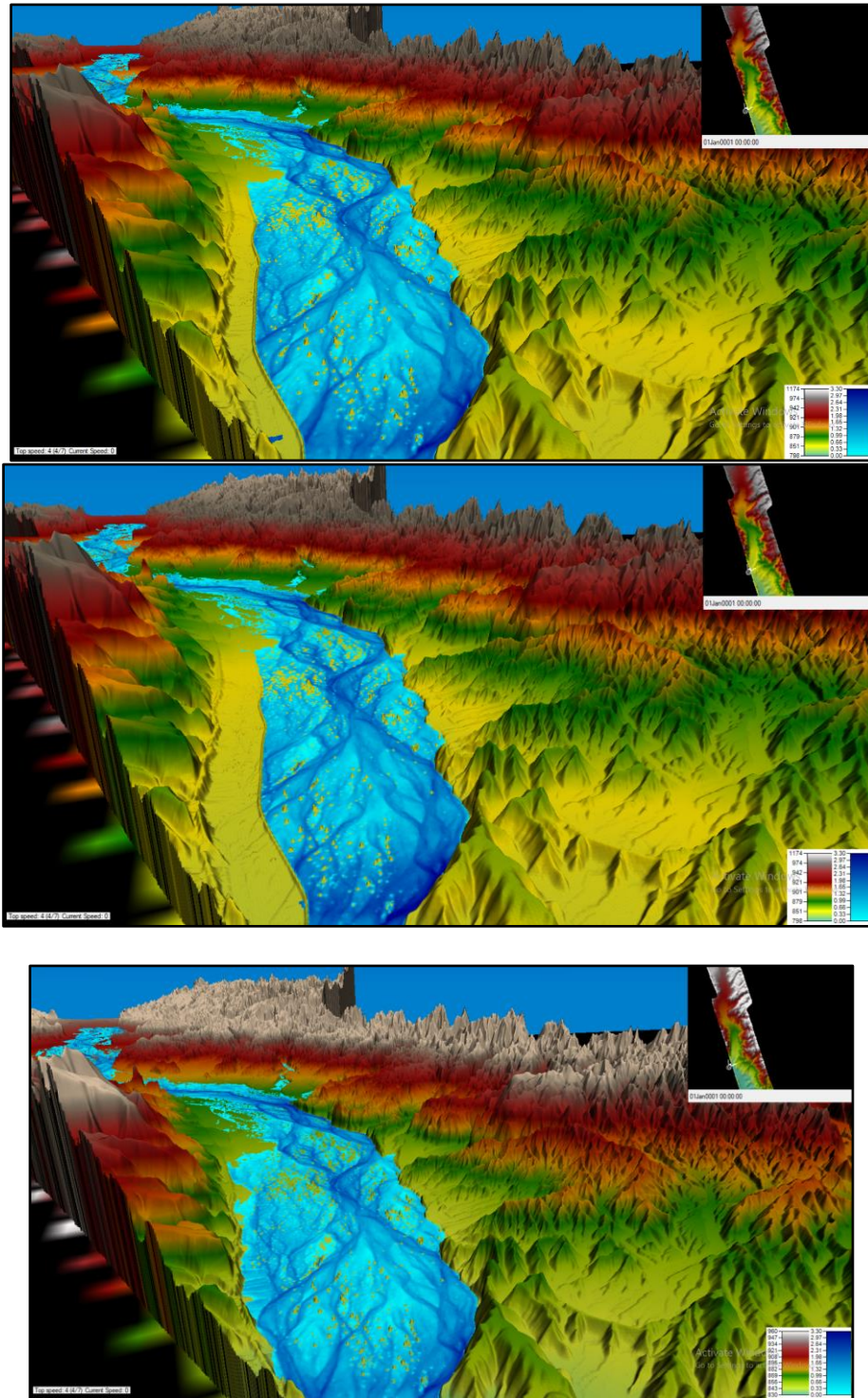
در گام نخست، با استفاده از معادلات چندجمله‌ای درجه دو در روابط همبستگی، ضریب  $R^2$  برای سیلاب‌های با دوره‌های بازگشت ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال، در حالت عدم حذف داده پرت و بدون اعمال ضریب بی‌بعد سرعت حداکثر، به ترتیب برابر با مقادیر ۰/۰۲، ۰/۰۶ و ۰/۰۷ محاسبه شد (شکل ۱۱ و جدول ۹) که بسیار نامطلوب است. مقادیر  $R^2$  مذکور، پس از حذف داده پرت مربوط به سناریو ۴، به ترتیب به ۰/۳۵، ۰/۴۸ و ۰/۵۰ افزایش یافت (شکل ۱۲ و جدول ۹).

سپس ضریب  $R^2$  برای سیلاب‌های با دوره‌های بازگشت ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال، در حالت عدم حذف داده پرت و پس از اعمال ضریب بی‌بعد سرعت حداکثر، بار دیگر محاسبه شد و به مقادیر ۰/۵۱، ۰/۶۰ و ۰/۶۳ تغییر یافت (جدول ۹) که افزایش و بهبود همبستگی بسیار خوبی را نشان داده و در عین حال بیانگر تأثیر بسیار قوی رویکرد پیشنهادی در افزایش همبستگی معادلات رگرسیونی مورد نظر است. با این حال مقادیر  $R^2$  جدید هنوز هم از مقادیر مطلوب و قابل قبول فاصله دارد. بنابراین به منظور افزایش بیشتر همبستگی، در گام نهایی، محاسبات مربوط به معادلات رگرسیون با حذف داده پرت و اعمال ضریب بی‌بعد سرعت حداکثر تکرار شد.

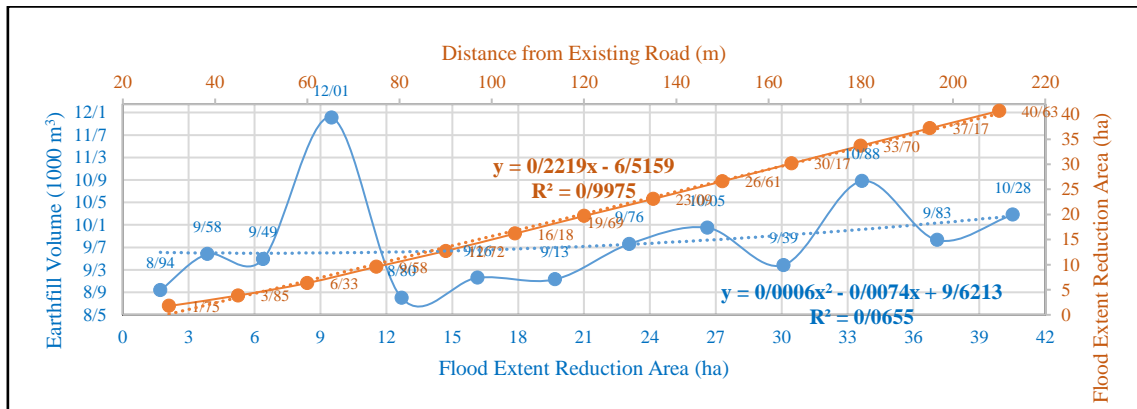
در گام نهایی، ضریب  $R^2$  برای سیلاب‌های با دوره‌های



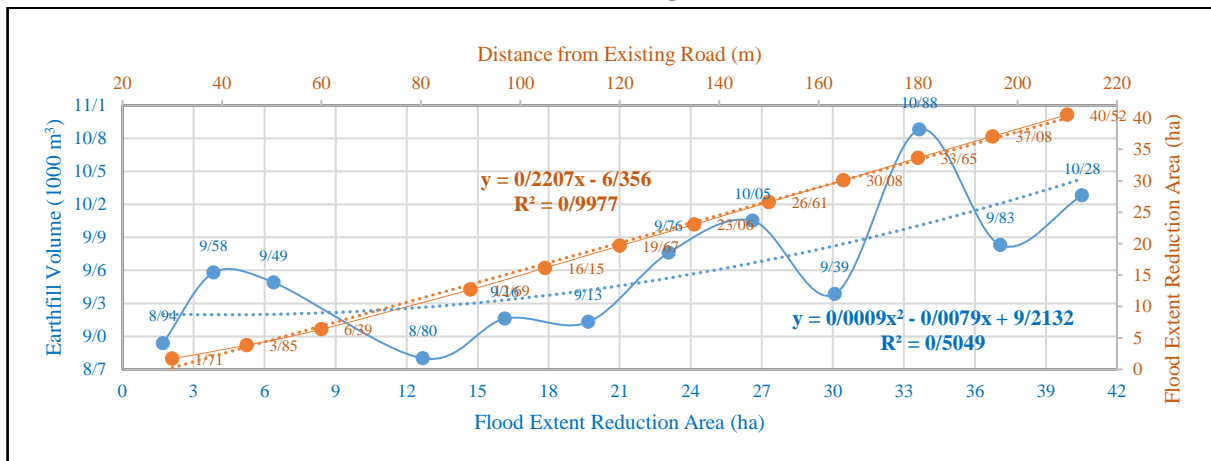
شکل (۹): مدل رقومی توپوگرافی و نتایج پهنه‌بندی سیلاب ۲۰۰ ساله در بازه مطالعاتی رودخانه کارواندر در سناریوهای وضعیت موجود (راست)، احداث گوره در فاصله ۱۳۰ متری راه موجود (سناریوی ۷) (وسط) و احداث گوره در فاصله ۲۱۰ متری راه موجود (سناریوی ۱۳) (چپ)



شکل (۱۰): نمای سه بعدی مدل توپوگرافی رقومی با بزرگنمایی ارتفاعی ۵ برابر و نتایج پهنه بندی سیلاب ۲۰۰ ساله در بازه مطالعاتی رودخانه کارواندر در سناریوهای وضعیت موجود (بالا)، احداث گوره در فاصله ۱۳۰ متری راه موجود (سناریوی ۷) (وسط) و احداث گوره در فاصله ۲۱۰ متری راه موجود (سناریوی ۱۳) (پایین)



شکل ۱۱ نمودار حجم موردنیاز خاکریزی گوره‌ها به ازای کاهش پهنه سیلاب ۲۰۰ ساله در بازه مطالعاتی رودخانه کارواندر (آبی) و کاهش پهنه سیلاب ۲۰۰ ساله به ازای افزایش فاصله گوره‌ها از محور راه چابهار- زاهدان (نارنجی) - بدون حذف داده پرت و بدون اعمال ضریب وزنی سرعت حداکثر



شکل (۱۲): نمودار حجم موردنیاز خاکریزی گوره‌ها به ازای کاهش پهنه سیلاب ۲۰۰ ساله در بازه مطالعاتی رودخانه کارواندر (آبی) و کاهش پهنه سیلاب ۲۰۰ ساله به ازای افزایش فاصله گوره‌ها از محور راه چابهار- زاهدان (نارنجی) - با حذف داده پرت و بدون اعمال ضریب وزنی سرعت حداکثر

جدول (۳): حجم مورد نیاز خاکریز گوره‌ها به ازای کاهش پهنه سیلاب ۲۰۰ ساله در بازه مطالعاتی سه کیلومتری رودخانه کارواندر - با و بدون اعمال ضریب وزنی سرعت حداکثر - قرمز: داده پرت

سناریو	فاصله گوره از راه موجود (m)	کاهش پهنه سیلاب ۲۰۰ ساله (ha)	حجم خاکریز گوره بدون اعمال ضریب سرعت حداکثر (1000 m³)	ضریب سرعت حداکثر	حجم خاکریز گوره با اعمال ضریب سرعت حداکثر (1000 m³)
بدون گوره	۰	۰	۰	۱	۰
۱	۳۰	۱/۷۱	۸/۹۴	۰/۹۹۷	۸/۹۱
۲	۴۵	۳/۸۵	۹/۵۸	۰/۹۹۷	۹/۵۵
۳	۶۰	۶/۳۹	۹/۴۹	۱/۰۲۳	۹/۷۱
۴	۷۵	۹/۵۰	۱۲/۰۱	۱/۰۷۵	۱۲/۹۱
۵	۹۰	۱۲/۶۹	۸/۸۰	۱/۱۱۷	۹/۸۳
۶	۱۰۵	۱۶/۱۵	۹/۱۶	۱/۱۴۳	۱۰/۴۷
۷	۱۲۰	۱۹/۶۷	۹/۱۳	۱/۱۵۳	۱۰/۵۲
۸	۱۳۵	۲۳/۰۶	۹/۷۶	۱/۱۶۹	۱۱/۴۱

ادامه جدول (۳): حجم مورد نیاز خاکریز گوره‌ها به ازای کاهش پهنه سیلاب ۲۰۰ ساله در بازه مطالعاتی سه کیلومتری رودخانه کارواندر - با و بدون اعمال ضریب وزنی سرعت حداکثر - قرمز: داده پرت

۹	۱۵۰	۲۶/۶۱	۱۰/۰۵	۱/۱۸۲	۱۱/۸۸
۱۰	۱۶۵	۳۰/۰۸	۹/۳۹	۱/۲۱۱	۱۱/۳۷
۱۱	۱۸۰	۳۳/۶۵	۱۰/۸۸	۱/۲۴۰	۱۳/۴۹
۱۲	۱۹۵	۳۷/۰۸	۹/۸۳	۱/۲۶۹	۱۲/۴۸
۱۳	۲۱۰	۴۰/۵۲	۱۰/۲۸	۱/۳۰۵	۱۳/۴۲

جدول (۴): حجم مورد نیاز خاکریز گوره‌ها به ازای کاهش پهنه سیلاب ۱۰۰ ساله در بازه مطالعاتی سه کیلومتری رودخانه کارواندر - با و بدون اعمال ضریب وزنی سرعت حداکثر - قرمز: داده پرت

سناریو	فاصله گوره از راه موجود (m)	کاهش پهنه سیل ۱۰۰ ساله (ha)	حجم خاکریز گوره بدون اعمال ضریب سرعت حداکثر (1000 m <sup>3</sup> )	ضریب سرعت حداکثر	حجم خاکریز گوره با اعمال ضریب سرعت حداکثر (1000 m <sup>3</sup> )
بدون گوره	۰	۰	۰	۱	۰
۱	۳۰	۱/۶۸	۸/۸۶	۰/۹۹۷	۸/۸۳
۲	۴۵	۳/۷۱	۹/۴۸	۰/۹۹۷	۹/۴۵
۳	۶۰	۶/۱۳	۹/۳۹	۱/۰۲۱	۹/۵۹
۴	۷۵	۹/۰۹	۱۱/۹۱	۱/۰۷۲	۱۲/۷۷
۵	۹۰	۱۲/۱۱	۸/۷۰	۱/۱۱۴	۹/۶۹
۶	۱۰۵	۱۵/۴۵	۹/۰۵	۱/۱۳۸	۱۰/۳۰
۷	۱۲۰	۱۸/۹۱	۹/۰۲	۱/۱۴۸	۱۰/۳۵
۸	۱۳۵	۲۲/۱۹	۹/۶۵	۱/۱۶۲	۱۱/۲۱
۹	۱۵۰	۲۵/۶۱	۹/۹۳	۱/۱۷۲	۱۱/۶۴
۱۰	۱۶۵	۲۹/۰۲	۹/۲۷	۱/۲۰۰	۱۱/۱۲
۱۱	۱۸۰	۳۲/۵۲	۱۰/۷۵	۱/۲۳۱	۱۳/۲۳
۱۲	۱۹۵	۳۵/۹۱	۹/۶۹	۱/۲۵۹	۱۲/۲۰
۱۳	۲۱۰	۳۹/۳۱	۱۰/۱۳	۱/۲۹۳	۱۳/۱

جدول (۵): حجم مورد نیاز خاکریز گوره‌ها به ازای کاهش پهنه سیلاب ۵۰ ساله در بازه مطالعاتی سه کیلومتری رودخانه کارواندر- با و بدون اعمال ضریب وزنی سرعت حداکثر - قرمز: داده پرت

سناریو	فاصله گوره از راه موجود (m)	کاهش پهنه سیل ۵۰ ساله (ha)	حجم خاکریز گوره بدون اعمال ضریب سرعت حداکثر (1000 m <sup>3</sup> )	ضریب سرعت حداکثر	حجم خاکریز گوره با اعمال ضریب سرعت حداکثر (1000 m <sup>3</sup> )
بدون گوره	۰	۰	۰	۱	۰
۱	۳۰	۱/۷۳	۸/۴۲	۱	۸/۴۲
۲	۴۵	۳/۴۸	۸/۹۲	۱	۸/۹۲
۳	۶۰	۵/۶۲	۸/۸۲	۱/۰۱۵	۸/۹۵
۴	۷۵	۸/۳۵	۱۱/۳۲	۱/۰۶۵	۱۲/۰۵
۵	۹۰	۱۰/۹۸	۸/۰۸	۱/۱۰۷	۸/۹۴
۶	۱۰۵	۱۳/۹۳	۸/۴۱	۱۳۰/۱	۹/۵۰
۷	۱۲۰	۱۷/۰۸	۸/۳۴	۱/۱۴۱	۹/۵۲
۸	۱۳۵	۲۰/۰۷	۹/۰۰	۱/۱۵۳	۱۰/۳۷
۹	۱۵۰	۲۳/۱۶	۹/۲۴	۱/۱۶۴	۱۰/۷۵
۱۰	۱۶۵	۲۶/۳۲	۸/۵۸	۱/۱۹۱	۱۰/۲۱
۱۱	۱۸۰	۲۹/۵۵	۹/۹۸	۱/۲۱۸	۱۲/۱۵
۱۲	۱۹۵	۳۲/۷۴	۸/۹۰	۱/۲۴۴	۱۱/۰۸
۱۳	۲۱۰	۳۵/۹۶	۹/۲۸	۱/۲۷۵	۱۱/۸۳

جدول (۶): مقادیر سرعت متوسط و سرعت حداکثر جریان سیلاب طراحی ۲۰۰ ساله در بازه مطالعاتی رودخانه کارواندر در وضعیت موجود و در سناریوهای ۱۳ گانه احداث گوره‌های کنترل سیل

سناریو	کاهش پهنه سیل ۲۰۰ ساله (ha)	سرعت متوسط (m/s)	سرعت حداکثر (m/s)	ضریب سرعت حداکثر	تغییر سرعت حداکثر
بدون گوره	۰	۲/۳۶	۳/۰۸	۱	۰/۰٪
۱	۱/۷۱	۲/۳۷	۳/۰۷	۰/۹۹۷	-۰/۳۲٪
۲	۳/۸۵	۲/۳۸	۳/۰۷	۰/۹۹۷	-۰/۳۲٪
۳	۶/۳۹	۲/۳۹	۳/۱۵	۱/۰۲۳	۲/۲۷٪
۴	۹/۵۰	۲/۴۰	۳/۳۱	۱/۰۷۵	۷/۴۷٪
۵	۱۲/۶۹	۲/۴۲	۳/۴۴	۱/۱۱۷	۱۱/۶۹٪
۶	۱۶/۱۵	۲/۴۳	۳/۵۲	۱/۱۴۳	۱۴/۲۹٪
۷	۱۹/۶۷	۲/۴۵	۳/۵۵	۱/۱۵۳	۱۵/۲۶٪
۸	۲۳/۰۶	۲/۴۶	۳/۶۰	۱/۱۶۹	۱۶/۸۸٪
۹	۲۶/۶۱	۲/۴۸	۳/۶۴	۱/۱۸۲	۱۸/۱۸٪
۱۰	۳۰/۰۸	۲/۵۰	۳/۷۳	۱/۲۱۱	۲۱/۱۰٪
۱۱	۳۳/۶۵	۲/۵۲	۳/۸۲	۱/۲۴۰	۲۴/۰۳٪
۱۲	۳۷/۰۸	۲/۵۴	۳/۹۱	۱/۲۶۹	۲۶/۹۵٪
۱۳	۴۰/۵۲	۲/۵۵	۴/۰۲	۱/۳۰۵	۳۰/۵۲٪

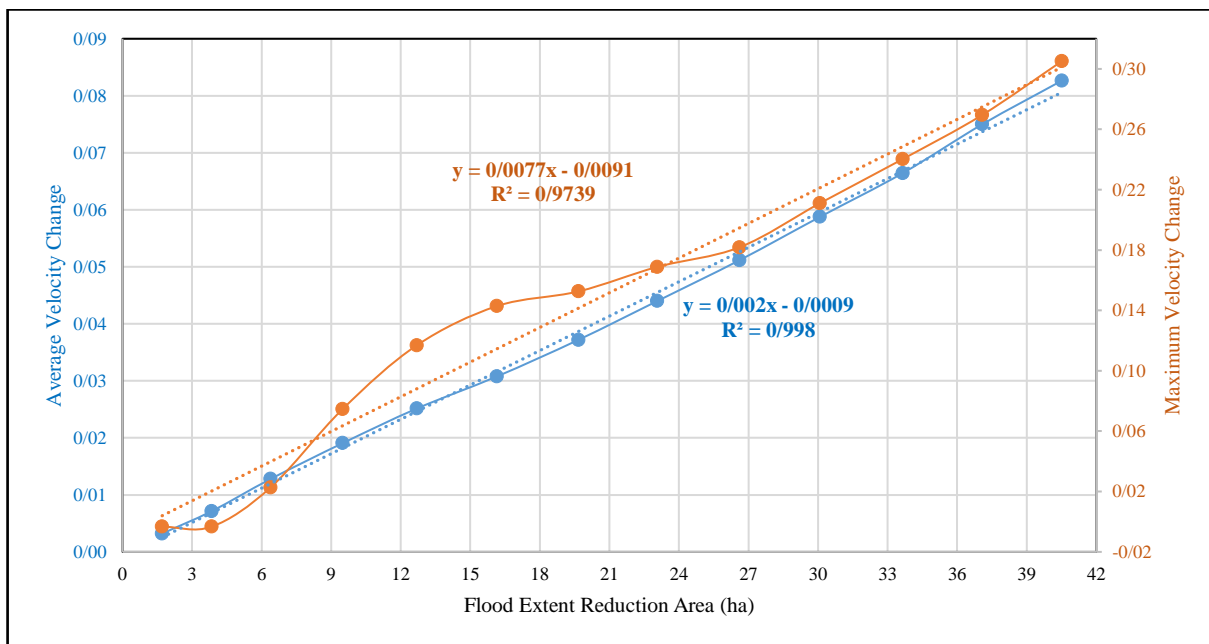
جدول (۷): مقادیر سرعت متوسط و سرعت حداکثر جریان سیلاب طراحی ۱۰۰ ساله در بازه مطالعاتی رودخانه کارواندر در وضعیت موجود و در سناریوهای ۱۳ گانه احداث گوره‌های کنترل سیل

سناریو	کاهش پهنه سیل ۱۰۰ ساله (ha)	سرعت متوسط (m/s)	سرعت حداکثر (m/s)	ضریب سرعت حداکثر	تغییر سرعت حداکثر
بدون گوره	۰	۲/۲۳	۲/۹۰	۱	۰/۰۰٪
۱	۱/۶۸	۲/۲۴	۲/۸۹	۰/۹۹۷	-۰/۳۴٪
۲	۳/۷۱	۲/۲۵	۲/۸۹	۰/۹۹۷	-۰/۳۴٪
۳	۶/۱۳	۲/۲۶	۲/۹۶	۱/۰۲۱	۲/۰۷٪
۴	۹/۰۹	۲/۲۷	۳/۱۱	۱/۰۷۲	۷/۲۴٪
۵	۱۲/۱۱	۲/۲۹	۳/۲۳	۱/۱۱۴	۱۱/۳۸٪
۶	۱۵/۴۵	۲/۳۰	۳/۳۰	۱/۱۳۸	۱۳/۷۹٪
۷	۱۸/۹۱	۲/۳۱	۳/۳۳	۱/۱۴۸	۱۴/۸۳٪
۸	۲۲/۱۹	۲/۳۳	۳/۳۷	۱/۱۶۲	۱۶/۲۱٪
۹	۲۵/۶۱	۲/۳۵	۳/۴۰	۱/۱۷۲	۱۷/۲۴٪
۱۰	۲۹/۰۲	۲/۳۶	۳/۴۸	۱/۲۰۰	۲۰/۰۰٪
۱۱	۳۲/۵۲	۲/۳۸	۳/۵۷	۱/۲۳۱	۲۳/۱۰٪
۱۲	۳۵/۹۱	۲/۴۰	۳/۶۵	۱/۲۵۹	۲۵/۸۶٪
۱۳	۳۹/۳۱	۲/۴۲	۳/۷۵	۱/۲۹۳	۲۹/۳۱٪

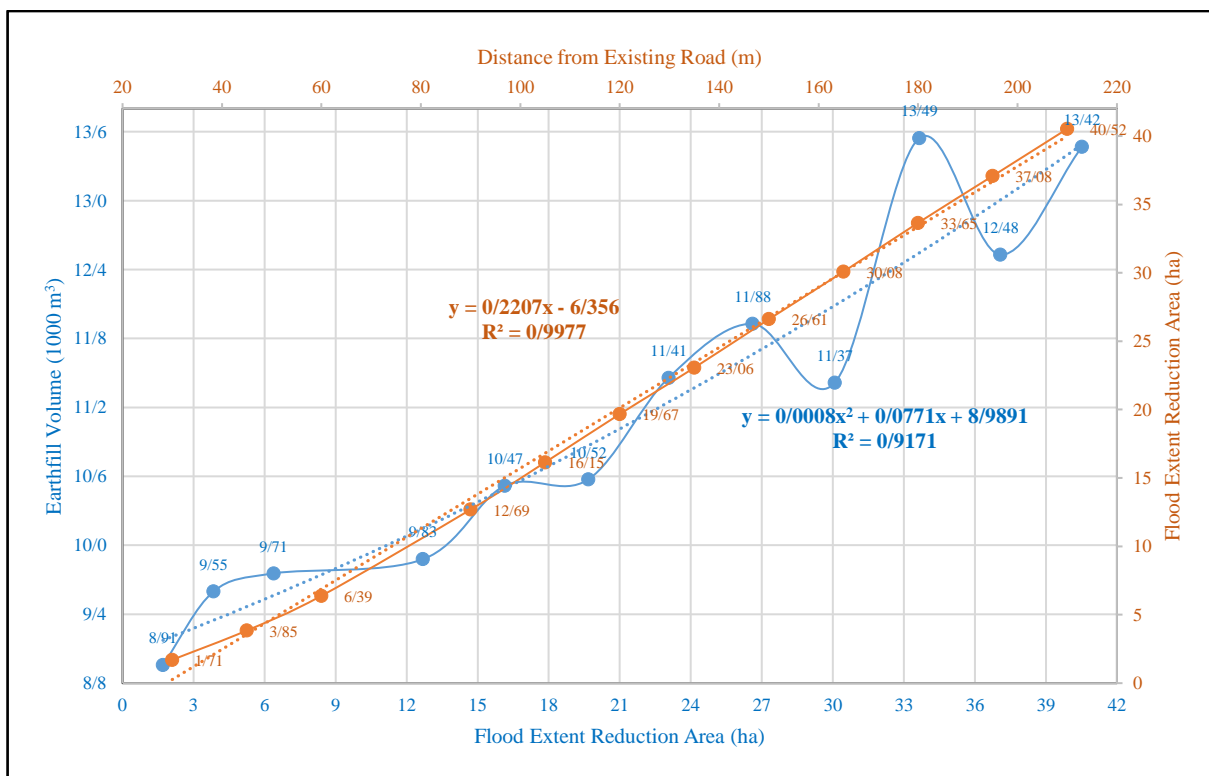
جدول (۸): مقادیر سرعت متوسط و سرعت حداکثر جریان سیلاب طراحی ۵۰ ساله در بازه مطالعاتی رودخانه کارواندر در وضعیت موجود و در سناریوهای ۱۳ گانه احداث گوره‌های کنترل سیل

سناریو	کاهش پهنه سیل ۵۰ ساله (ha)	سرعت متوسط (m/s)	سرعت حداکثر (m/s)	ضریب سرعت حداکثر	تغییر سرعت حداکثر
بدون گوره	۰	۲/۰۴	۲/۶۲	۱	۰/۰۰٪
۱	۱/۷۳	۲/۰۵	۲/۶۲	۱	۰/۰۰٪
۲	۳/۴۸	۲/۰۵	۲/۶۲	۱	۰/۰۰٪
۳	۵/۶۲	۲/۰۶	۲/۶۶	۱/۰۱۵	۱/۵۳٪
۴	۸/۳۵	۲/۰۸	۲/۷۹	۱/۰۶۵	۶/۴۹٪
۵	۱۰/۹۸	۲/۰۹	۲/۹۰	۱/۱۰۷	۱۰/۶۹٪
۶	۱۳/۹۳	۲/۱۰	۲/۹۶	۱/۱۳۰	۱۲/۹۸٪
۷	۱۷/۰۸	۲/۱۱	۲/۹۹	۱/۱۴۱	۱۴/۱۲٪
۸	۲۰/۰۷	۲/۱۳	۳/۰۲	۱/۱۵۳	۱۵/۲۷٪
۹	۲۳/۱۶	۲/۱۴	۳/۰۵	۱/۱۶۴	۱۶/۴۱٪
۱۰	۲۶/۳۲	۲/۱۶	۳/۱۲	۱/۱۹۱	۱۹/۰۸٪
۱۱	۲۹/۵۵	۲/۱۷	۳/۱۹	۱/۲۱۸	۲۱/۷۶٪
۱۲	۳۲/۷۴	۲/۱۹	۳/۲۶	۱/۲۴۴	۲۴/۴۳٪
۱۳	۳۵/۹۶	۲/۲۱	۳/۳۴	۱/۲۷۵	۲۷/۴۸٪





شکل (۱۳): نمودار تغییرات سرعت متوسط به ازای کاهش پهنه سیلاب ۲۰۰ ساله در بازه مطالعاتی رودخانه کارواندر (آبی) و تغییرات سرعت حداکثر به ازای کاهش پهنه سیلاب ۲۰۰ ساله در بازه مطالعاتی رودخانه کارواندر (نارنجی)



شکل (۱۴): نمودار حجم موردنیاز خاکریزی گورهاها به ازای کاهش پهنه سیلاب ۲۰۰ ساله در بازه مطالعاتی رودخانه کارواندر (آبی) و کاهش پهنه سیلاب ۲۰۰ ساله به ازای افزایش فاصله گورهاها از محور راه چابهار- زاهدان (نارنجی) - با حذف داده پرت و با اعمال ضریب وزنی سرعت حداکثر

جدول (۹): روابط همبستگی حجم خاکریزی مورد نیاز گوره ( $1000 \text{ m}^3$ ) بر اساس مساحت استحصال شده از رودخانه ( $\text{ha}$ ) برای سیلاب - های با دوره‌های بازگشت ۲۰۰، ۱۰۰ و ۵۰ سال بر اساس حالت‌های مختلف تحلیل در بازه مطالعاتی سه کیلومتری رودخانه کارواندر مجاور محور راه چابهار - زاهدان

دوره بازگشت سیلاب (سال)	حالت تحلیل	رابطه همبستگی حجم گوره ( $1000 \text{ m}^3$ ) بر اساس مساحت استحصال شده از سیلاب دشت ( $\text{ha}$ )	ضریب تعیین	محدوده اعتبار رابطه همبستگی بر اساس میزان فاصله از محور راه موجود ( $\text{m}$ )
۲۰۰	بدون حذف داده پرت و بدون اعمال ضریب وزنی سرعت حداکثر	$V_L = 0.0006A^2 - 0.074A + 9/6213$	$R^2 = 0.0655$	$15 < d < 210$
۲۰۰	با حذف داده پرت و بدون اعمال ضریب وزنی سرعت حداکثر	$V_L = 0.0009A^2 - 0.079A + 9/2132$	$R^2 = 0.0549$	$15 < d < 210$
۲۰۰	بدون حذف داده پرت و با اعمال ضریب وزنی سرعت حداکثر	$V_L = 0.0009A^2 - 0.079A + 9/2132$	$R^2 = 0.06306$	$15 < d < 210$
۲۰۰	با حذف داده پرت و با اعمال ضریب وزنی سرعت حداکثر	$V_L = 0.0008A^2 + 0.0771A + 8/9891$	$R^2 = 0.09171$	$15 < d < 210$
۱۰۰	بدون حذف داده پرت و بدون اعمال ضریب وزنی سرعت حداکثر	$V_L = 0.0006A^2 - 0.088A + 9/536$	$R^2 = 0.0567$	$15 < d < 210$
۱۰۰	با حذف داده پرت و بدون اعمال ضریب وزنی سرعت حداکثر	$V_L = 0.001A^2 - 0.081A + 9/1215$	$R^2 = 0.04833$	$15 < d < 210$
۱۰۰	بدون حذف داده پرت و با اعمال ضریب وزنی سرعت حداکثر	$V_L = 0.0004A^2 + 0.0764A + 9/3658$	$R^2 = 0.06025$	$15 < d < 210$

ادامه جدول (۹): روابط همبستگی حجم خاکریزی مورد نیاز گوره ( $1000 \text{ m}^3$ ) بر اساس مساحت استحصال شده از رودخانه ( $\text{ha}$ ) برای سیلاب‌های با دوره‌های بازگشت ۲۰۰، ۱۰۰ و ۵۰ سال بر اساس حالت‌های مختلف تحلیل در بازه مطالعاتی سه کیلومتری رودخانه کارواندر مجاور محور راه چابهار - زاهدان

۱۰۰	با حذف داده پرت و با اعمال ضریب وزنی سرعت حداکثر	$V_L = 0.0008A^2 + 0.0773A + 8/9036$	$R^2 = 0.09091$	$15 < d < 210$
۵۰	بدون حذف داده پرت و بدون اعمال ضریب وزنی سرعت حداکثر	$V_L = 0.0007A^2 - 0.0172A + 9/0275$	$R^2 = 0.0195$	$15 < d < 210$
۵۰	با حذف داده پرت و بدون اعمال ضریب وزنی سرعت حداکثر	$V_L = 0.0011A^2 - 0.0154A + 8/6129$	$R^2 = 0.03504$	$15 < d < 210$
۵۰	بدون حذف داده پرت و با اعمال ضریب وزنی سرعت حداکثر	$V_L = 0.0003A^2 + 0.0691A + 8/857$	$R^2 = 0.05084$	$15 < d < 210$
۵۰	با حذف داده پرت و با اعمال ضریب وزنی سرعت حداکثر	$V_L = 0.0007A^2 + 0.0711A + 8/4057$	$R^2 = 0.08767$	$15 < d < 210$

یافته و افزایش تجاوز به حریم و بستر رودخانه‌ها، ریسک خسارات ناشی از سیل در سیلاب‌دشت‌ها را تشدید نموده است. گوره‌ها به‌عنوان یکی از پرکاربردترین و مهم‌ترین سازه‌های

### نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر، شدت و تناوب سیلاب‌ها به‌دلیل تغییرات اقلیمی که عمدتاً ناشی از عامل انسانی است، افزایش

تا بازه تغییرات ۰/۸۸ تا ۰/۹۲، برای سیل‌های با دوره بازگشت ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال، افزایش یافت که دارای دقت مطلوبی است و می‌توان از روابط به‌دست آمده برای محاسبه احجام گوره‌ها، در بازه سه‌کیلومتری رودخانه مطالعاتی استفاده کرد. همچنین میزان همبستگی رابطه محاسبه احجام گوره‌ها با افزایش دوره بازگشت سیلاب، افزایش یافت و دقت روابط همبستگی در سناریوهای با جانمایی گوره‌ها در فواصل میانی نسبت به محور راه بیشتر از سایر سناریوها بود. در پایان، پیشنهاد می‌شود که شبیه‌سازی هیدرولیکی سناریوهای مطالعاتی در این تحقیق، در حالت مدل‌سازی دوبعدی در HEC-RAS 2D تکرار شده و نتایج حاصل با نتایج این تحقیق مقایسه شود. به‌علاوه، تأثیر تغییرات هندسه مقطع عرضی گوره‌ها از تغییرات جمله عرض تاج و شیب دو طرف در تغییرات همبستگی فوق‌الذکر ارزیابی گردد.

حفاظت سیلابدشت‌های رودخانه‌ها در برابر سیل محسوب می‌شوند. در این تحقیق، با اعمال رویکردی نوین در مدل‌سازی هندسی گوره‌ها به کمک GIS در نرم‌افزارهای HEC-RAS و ArcMap، دقت مدل‌سازی هندسی و شبیه‌سازی هیدرولیکی در سناریوهای مطالعاتی ۱۳ گانه جانمایی گوره‌ها، و نیز با تعریف، محاسبه و اعمال ضریب بی‌بعد سرعت حداکثر، دقت محاسبه احجام گوره‌ها به میزان زیادی افزایش یافت. در تعیین رابطه محاسبه احجام گوره‌ها، معادله چندجمله‌ای درجه ۲ نسبت به سایر معادلات برازش، رابطه همبستگی با ضریب تعیین ( $R^2$ ) بالاتری ارائه کرد. با محاسبه و اعمال ضریب وزنی بی‌بعد سرعت حداکثر به احجام گوره‌ها پس از حذف داده پرت، میزان همبستگی محاسبه متغیر احجام گوره‌ها بر اساس متغیر سطح استحصال شده از سیلابدشت رودخانه مطالعاتی، از مقادیر  $R^2$  با بازه تغییرات ۰/۳۵ تا ۰/۵۰

## منابع

- صابری تنسوان، م.، گنجی نوروژی، ز. دلقدی، م. نیک‌قلب عاشوری، س.، درستکار، و. ۱۳۹۹. بررسی آنالیز حساسیت پارامترهای سیل نسبت به تغییرات زبری (مطالعه موردی: منطقه شیروان). نشریه مهندسی آبیاری و آب ایران، سال دهم، شماره چهارم، ص ۱۸۰-۱۶۷.
- یخکشی، م. مفتاح هلقی، م.، ظهیری، ع.، یخکشی، م. ا.، مددی، م. ۱۳۹۳. نقش احداث سد مخزنی نرم‌آب بر کاهش پهنه سیل و خسارات وارده به اراضی پایین‌دست. نشریه مهندسی آبیاری و آب ایران، سال چهارم، شماره شانزدهم، ص ۳۶-۲۴.
- Alaghmand, S., Bin Abdullah, R., Abustan, I., & Eslamian, S. 2012. Comparison between capabilities of HEC-RAS and MIKE11 hydraulic models in river flood risk modelling (a case study of Sungai Kayu Ara River basin, Malaysia). *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 2(3), 270-291.
- Baldassarre, G. Di, Kreibich, H., Vorogushyn, S., Aerts, J., Arnbjerg-Nielsen, K., Barendrecht, M., Bates, P., Borga, M., Botzen, W., & Bubeck, P. 2018. Hess Opinions: An interdisciplinary research agenda to explore the unintended consequences of structural flood protection. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5629-5637.
- Bozorg Haddad, O., Ashofteh, P., & Mariño, M. 2015. Levee layouts and design optimization in protection of flood areas. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE*, 141, 04015004.
- Bozorg Haddad, O. 2018. Levee layouts and design optimization in protection of flood areas (Retraction of Vol 141, art no 04015004, 2015).
- Dierauer, J., Pinter, N., & Remo, J. W. F. 2012. Evaluation of levee setbacks for flood-loss reduction, Middle Mississippi River, USA. *Journal of Hydrology*, 450, 1-8.
- Garcia, M., Juan, A., & Bedient, P. 2020. Integrating Reservoir Operations and Flood Modeling with HEC-RAS 2D. *Water*, 12(8), 2259.
- Juárez, A., Alfredsen, K., Stickler, M., Adeva-Bustos, A., Suárez, R., Seguí-García, S., & Hansen, B. 2021. A conflict between traditional flood measures and maintaining river ecosystems? A case study based upon the River Lærdal, Norway. *Water*, 13(14). <https://doi.org/10.3390/w13141884>
- Lagasse, P. F., Clopper, P. E., Pagán-Ortiz, J. E., Zevenbergen, L. W., Arneson, L. A., Schall, J. D., & Girard, L. G. 2009. Bridge scour and stream instability countermeasures: Experience, selection, and design guidance. Third Edition, Volume 1, National Highway Institute, USA.
- Mihu-Pintilie, A., Cîmpianu, C. I., Stoleriu, C. C., Pérez, M. N., & Paveluc, L. E. 2019. Using high-



density LiDAR data and 2D streamflow hydraulic modeling to improve urban flood hazard maps: A HEC-RAS multi-scenario approach. *Water*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/w11091832>

Naeem, B., Azmat, M., Tao, H., Ahmad, S., Khattak, M. U., Haider, S., Ahmad, S., Khero, Z., & Goodell, C. R. 2021. Flood hazard assessment for the Tori Levee Breach of the Indus River Basin, Pakistan. *Water*, 13(5), 604.

Siviglia, A., Stocchino, A., & Colombini, M. 2009. Case study: Design of flood control systems on the Vara River by numerical and physical modeling. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(12), 1063–1072.

Tang, Y., Leon, A. S., & Kavvas, M. L. 2020. Impact of size and location of wetlands on watershed-scale flood control. *Water Resources Management*, 34(5), 1693–1707.

Urzică, A., Mișu-Pintilie, A., Stoleriu, C. C., Cîmpianu, C. I., Huțanu, E., Pricop, C. I., & Grozavu, A. 2021. Using 2D HEC-RAS modeling and embankment dam break scenario for assessing the flood control capacity of a multi-reservoir system (NE Romania). *Water*, 13(1), 57.

USACE. 2021. HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual. Version 6.0. Hydrologic Engineering Center (HEC), US Army Corps of Engineers.



## A New Approach for Geometric Modeling and Calculation of Volumes of Flood Protection Levees (Case Study)

Alireza Mohebzadeh Fattahi<sup>1</sup>, Saeed Farzin<sup>2</sup>, Khosrow Hosseini<sup>3</sup>, Sayed-Farhad Mousavi<sup>4</sup>

### Abstract

Increasing encroachment on rivers along with climate change has increased major floods. Levees are considered the most important structures to protect river banks and floodplains from flooding due to their simplicity of structure, inexpensive materials, and ease of implementation. In this research, an attempt was made to introduce a new approach in geometric modeling, to develop mathematical relationships to calculate the volumes of levees based on different location of each scenario in the floodplain. Study scenarios supply the protection of three kilometers of the Chabahar-Zahedan arterial road and its widening, which is located in the floodplain of the Karvandar River in southeastern Iran. Hydraulic simulations implemented in HEC-RAS for the existing condition and 13 different scenarios with 13 unique topographies based on the new approach, and the rate of reduction of the flood zone and embankment volume of levees for each scenario calculated in ArcMap. Based on the results, changes in the volume of embankments in different scenarios did not correlate well with the flood zone area reduction. Due to the direct dependence of scouring and thus geometry and volumes of levees on flow velocity, by calculating the flow maximum velocity in the study interval, the dimensionless coefficients of maximum velocity in different scenarios were calculated and applied to the calculated volumes of levees. Thus, by this approach and using quadratic polynomial equations, the coefficient of determination ( $R^2$ ) increased from 0.35, 0.48 and 0.50 to acceptable values of 0.88, 0.91 and 0.92, for floods with return periods of 50, 100 and 200 years, respectively, which indicate the high efficiency of the proposed approach and also increasing in  $R^2$  values with an increase in the flood return period. Moreover, results show that the computational accuracy of regression relationships in the scenarios with levee locations in the middle distances from the road axis is higher than other scenarios which are closer or farther. This result is due to more irregular river geometry in the scenarios closer to the road and the intensification of nonlinear changes in flood parameters in the farther scenarios.

**Keywords:** Flood, Flood control structures, Levee, Flood zoning, GIS, HEC-RAS

<sup>1</sup> PhD Candidate, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, mohebzadeh.alireza@semnan.ac.ir

<sup>2</sup> Corresponding Author, Associate Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, saeed.farzin@semnan.ac.ir

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, khoseini@semnan.ac.ir

<sup>4</sup> Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University,