

Case Report

Impact of Digital Elevation Model Resolution on Flood Hazard Simulation: A Case Study of the River Downstream of Khorramabad City, Iran



Iraj Vayskarami¹ , *Ali Haghizadeh¹ , Aboalhasan Fathabadi² 

1. Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran.

2. Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Gonbad Kavous, Iran.



Citation Vayskarami, I., Haghizadeh, A., & Fathabadi, A. (2025). Impact of Digital Elevation Model Resolution on Flood Hazard Simulation: A Case Study of the River Downstream of Khorramabad City, Iran. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 15(3):384-413. <https://doi.org/10.32598/DMKP.15.3.919.1>

 <https://doi.org/10.32598/DMKP.15.3.919.1>

ABSTRACT

Background and Objective Despite significant advancements in the development of hydraulic models, the accuracy of flood predictions is influenced by various factors, including topography, the precision of digital elevation models (DEMs), and roughness coefficients. This study aimed to evaluate the effect of DEM resolution on the efficiency of the 2D HEC-RAS model in simulating flood hazard zones.

Method Three DEM layers with resolutions of 0.5, 2, and 3 meters were used to assess the efficiency of the 2D HEC-RAS model. Water flow simulations were conducted in a 3-kilometer-long section of the river downstream of Khorramabad City, Lorestan Province, Iran. Measured flow rates in April and November 2024 (34 and 15 m³/s, respectively) and the flow rate during a flood event in April 2019 (1000 m³/s) were considered. The flow variables (including depth, velocity, and spread width) measured based on the DEM layers were compared with the values measured at four cross-sections within the study area for the specified flow rates. The evaluation metrics were the root mean square error (R.M.S.E) and mean absolute percentage error (M.A.P.E).

Results Using the DEM with a resolution of 0.5 meters yielded simulation results for flow and flood hazard maps that were much closer to the real data compared to those obtained from DEMs with lower resolutions of 2 and 5 meters. The average prediction errors for flow depth and velocity using the 0.5-m resolution DEM were 10% and 12% lower, respectively, than those of the 2-m and 5-m resolution DEMs. Additionally, analyses of hydraulic parameters, including flow depth, velocity, and spread width, revealed a significant correlation between DEM resolution and flood prediction accuracy.

Conclusion The resolution of DEMs plays a crucial role in enhancing the performance of the 2D HEC-RAS model in simulating flood hazard zones. With higher DEM resolution, better flood prediction results can be obtained. Therefore, it should be considered as an effective strategy in flood risk management and reducing flood-related damages. The findings underscore the importance of hydraulic model precision and the necessity of utilizing high-resolution models in studies related to flood risk management and mitigation.

Keywords Digital elevation model (DEM), HEC-RAS, Sensitivity analysis, Uncertainty

Article Info:

Received: 10 Jan 2025

Accepted: 31 May 2025

Available Online: 01 Oct 2025

* Corresponding Author:

Ali Haghizadeh, Professor.

Address: Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran.

Tel: +98 (66) 33120106

E-mail: haghizadeh.a@lu.ac.ir



Copyright © 2025 The Author(s);

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY-NC: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.en>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

English Version

Introduction

Floods are among the most common and dangerous natural disasters worldwide. A deeper understanding of the flood hazard phenomenon and its potential consequences for society is considered a fundamental criterion for developing effective flood management policies, risk reduction projects, and other flood-related strategies (Amrei & Britta, 2022). Over time, the need for protection against floods and the ability to control them led to a shift in perspective on flood control and management. Modern concepts of flood risk management began to emerge in the early 20th century. With the development of research and the increase in losses caused by floods, a need was felt for a new approach that applies the concept of risk in decision-making, not theoretically, but practically (Alexander & Mees, 2016). Flood risk is the result of the interplay between flood hazard (probability and severity) and the vulnerability of people and their property. Both hazard and vulnerability depend on the type of flood and its determining processes (Yin et al., 2021). Flood risk studies indicate that the flood hazard maps, along with economic assessments, are used as planning and decision-making support tools (Dalledonne et al., 2019). Therefore, it is essential that methods and tools for examining adverse flood outcomes are presented in a comprehensive, coherent, and inclusive manner to enable competent authorities and experts to make decisions by identifying priority solutions through a balance between economic/social/ environmental functions and social conflicts.

Flood risk assessment includes three components: Hazard, vulnerability, and exposure analysis (Liu & Merwade, 2014). Flood hazard mapping is usually done using hydrological and hydraulic models and field surveys. The process of preparing such maps, which ranges from data collection to modeling, is accompanied by a series of uncertainties. Conventional hydraulic-hydrodynamic modeling methods can lead to inaccurate results due to neglect of sources of uncertainty (Alfonso et al., 2016). Despite the development of many hydraulic models, the lack of understanding of flood processes and the spatial and temporal variations of key model inputs, as well as variables such as topography and surface roughness, hinders the better prediction of flood risk. Measuring and reducing uncertainty in flood modeling is an important issue for improving the accuracy of flood forecasting (Teng et al., 2017).

The precision of the models used in flood risk simulation has a significant impact on the efficiency of flood risk management (Merwade et al., 2008). Of course, uncertainty cannot be avoided in the use of flood analysis models, because these models often capture ideals of reality only and the value of model inputs cannot be measured with absolute resolution (Yeou-Koung & Chi-Leung, 2016). Various sources of uncertainty in hydrological and hydraulic modeling include: Natural (intrinsic) uncertainty; uncertainties related to the model structure, parameters and input data; and operational uncertainties (Teng et al., 2017; Koo et al., 2020). Natural uncertainties are related to natural random processes such as precipitation, turbulent river flow, and sediment transport; model structure uncertainties stem from the mathematical structure of the processes and the inability of model equations to accurately describe real systems; parameter uncertainties are related to imprecision in determining parameter values, as well as data and information uncertainties resulting from measurement errors, data heterogeneity, and information deficiencies; operational uncertainties are related to model construction and development, as well as human factors (Dysarz et al., 2019). In this regard, preparing a digital elevation model (DEM) with appropriate precision as large-scale topographic data is considered one of the most sensitive factors and inputs of hydrodynamic models.

Several studies have investigated the impact of the resolution of DEMs on the simulation of hydrological processes and flood risk zoning. Among these studies, we can mention the study by Kavian and Mohammadi (2019) on the effect of spatial precision of DEMs on simulation of discharge and total nitrate in the Talar watershed, Mazandaran province, Iran, using the SWAT model and three different DEMs (ASTER with a resolution of 30 meters, SRTM with a resolution of 90 meters, and GTOPO30 with a resolution of 1000 meters). Their results showed that the ASTER model had higher accuracy and provided the best simulation results. As the spatial precision decreased, the overestimation or underestimation error rate also increased. In a study by Parizi and Hosseini 2023, the TanDEM-X model with a resolution of 12 meters was used to simulate the hydraulic characteristics of floods in the Atrak River basin. In their study, which was conducted with the HEC-RAS 2D model, the results showed that TanDEM-X was able to model the flood extent with an accuracy of over 85%. Comparison with the ASTER and SRTM models showed that TanDEM-X was significantly more accurate and had a high ability to display topographic details. In a study by Fereshtehpour et al. (2024), the effect of DEM type and resolution on flood prediction using one-dimensional convolutional neural networks was investigated. They used elevation

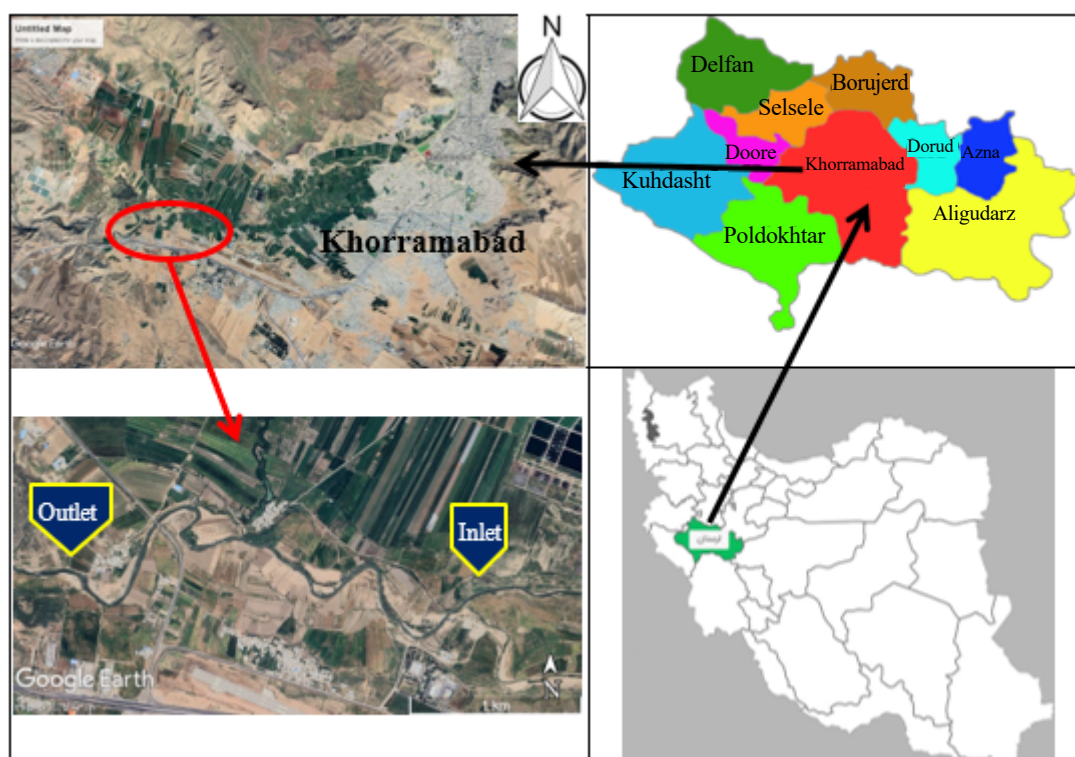


Figure 1. Geographical location of the study area

data with accuracies of 15 and 30 m in the city of Carlisle, England, and found that DTM-type DEMs with a precision of 30 m performed better in predicting flood depths compared to DSM-type DEMs. Increasing the precision to 15 m increased the root mean square estimation by 50%, indicating the sensitivity of the model to the precision of the DEM. Muthusamy et al. (2021) investigated the impact of DEM resolution on urban flood modeling. They showed that reducing the resolution of DEM from 1 m to 50 m resulted in a 30% increase in flood extent and a 150% increase in flow depth, highlighting the importance of using high-accuracy DEMs in urban flood modeling. In a study in southern Niger, Muench et al. (2022) evaluated the accuracy of global DEMs such as SRTM, ASTER, ALOS, and MERIT in flood modeling. They found that the ALOS-type DEM had the best similarity to LiDAR data, and that in floods less than 3 m deep, higher-accuracy DEMs showed a greater similarity in estimated flood extent to measured values.

The review of the literature showed that the effect of the resolution of DEMs on the efficiency of the HEC-RAS hydraulic model in simulating flood hazard zones has received less attention, especially in Iran. Therefore, this study aims to evaluate the impact of the resolution of DEMs on the efficiency of the HEC-RAS model in mapping flood hazards in a 3-kilometer-long area of the river downstream of Khorramabad City, Iran.

Materials and Methods

Study area

The study area is located 3 km downstream of Khorramabad City, Lorestan province, in an area called Cham-Anjir, which is actually the outlet of the Khorramabad river watershed. The study area is located between geographical coordinates of X: 247128.7, Y: 3704013.16 (inlet of the area) and X: 245084.7, Y: 3704099 (outlet of the area), as shown in Figure 1. The watershed of this river is a sub-watershed of the Kashkan River. The Khorramabad River is formed by the confluence of the two headwaters of the Karganeh and Robat in Khorramabad and joins the Kashkan River in Doab town, 40 km from Khorramabad. The Cham-Anjir hydrometric station is located at the outlet of the study area.

Hydrodynamic model

Two-dimensional (2D) hydrodynamic models are the most useful models for flood mapping and flood risk assessment (Roberts et al., 2015). In this study, the 2D HEC-RAS 5.0.1 model, developed in February 2016, was used. In addition to one-dimensional modeling of steady, unsteady, and quasi-steady flows, as well as intersectional and lateral structures, this model also has the capability for 2D flow modeling, especially in flood-

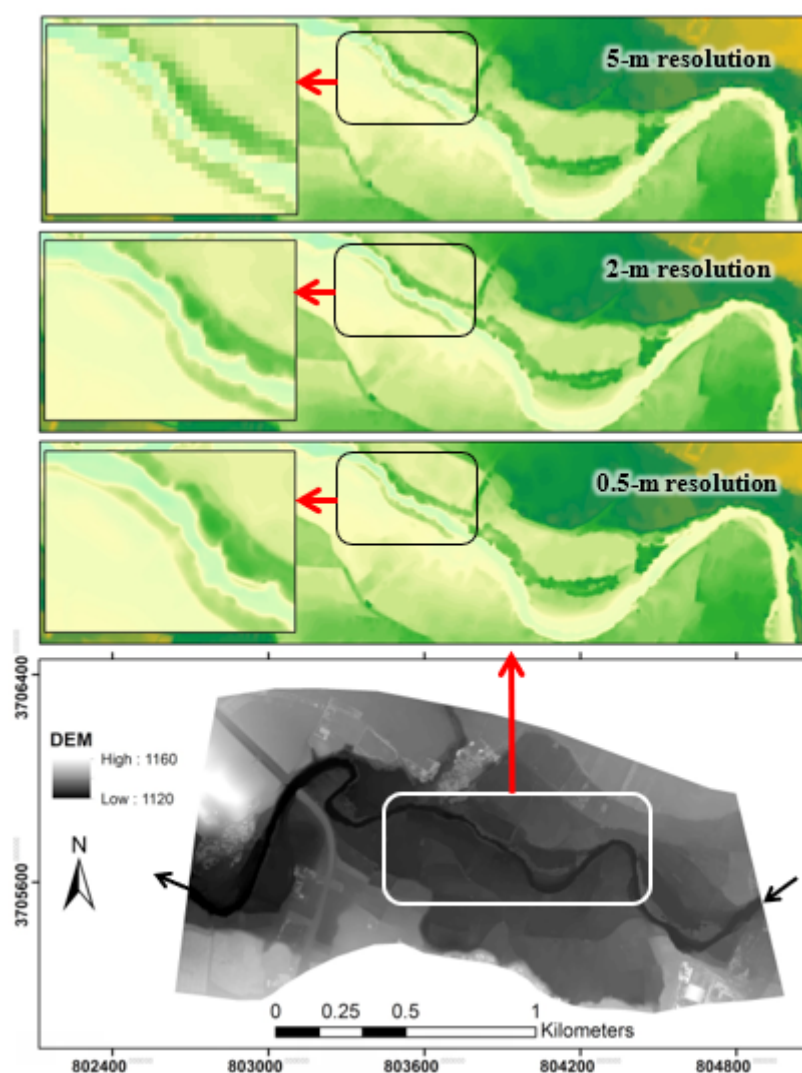


Figure 2. Three DEM layers with resolutions of 0.5, 2 and 5 meters for the study area

plains. One-dimensional models are efficient and capable of reproducing processes within channels, but problems begin when flood overflows the channel banks and enters the floodplain (Pinos & Timbe, 2019; Costabile et al., 2020). This model is one of the most common flood modeling software in hydrodynamic simulation, developed by the US Army Engineer Hydrologic Engineering Center (HEC). It can connect to online maps such as Google Earth. The HEC-RAS model uses the 2D Saint-Venant equations (with optional momentum additions for turbulence and Coriolis effects) or 2D diffusion wave (DW) equations to simulate the flow. In general, 2D DW equations enable the model to run faster and achieve much greater stability. In the 2D HEC-RAS model, it is possible to choose one of these two equations based on the available data and the type of project (Brunner, 2016).

Topographic map and measurement of water flow variables

To determine the effect of the resolution of the DEMs on the HEC-RAS model results, three DEM layers were prepared with resolutions of 0.5, 2, and 5 meters. The layer with 0.5-m resolution was generated from 2024 World-view stereo imagery developed by DigitalGlobe Inc; validated using several control points with a field mapping camera (Figure 2 and 3). and the layers with 2- and 5-m resolutions were generated from 2023 drone maps, prepared from the Regional Water Company in Lorestan Province and verified using a number of control points with a field mapping camera (Figure 3). Large-scale topographic maps were converted to .hdf format for loading into HEC-RAS software. After entering the geometric data into the software and determining the boundaries, the desired area was gridded using algebraic and computa-

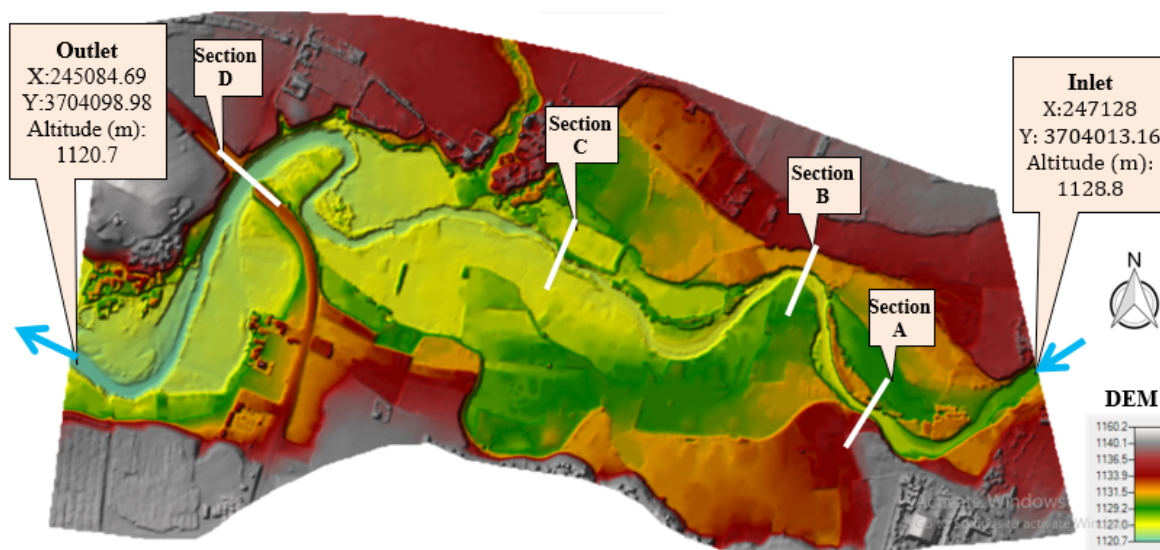


Figure 3. Position of measured cross sections on topographic map (DEM layer with 0.5-m resolution)

tional methods. The optimal grid dimensions were selected based on the required accuracy and the time allocated for the calculations (Figure 4). To evaluate the calibration and accuracy of the model results, flow parameters (velocity, depth, and spread width) were measured in four of the mapped cross sections, with the greatest emphasis on consecutive river bends to examine the effects of secondary flows and centrifugal forces on flow variables. A Moulinet speedometer and computational mesh were used to measure the flow velocity and depth (Figures 4 and 5). The flow velocity was measured using a speedometer at depths of 0.2, 0.4, 0.6, and 0.8 meters below the water surface (Alizadeh, 2010). Since in flood flows, the velocity varies at different points of the river and at different water depths and is accompanied by turbulence, the average flow velocity in each cross-section (considering

the width of each section) was measured at 6-10 points with equal distances from the water depth.

Tables 1 and 2 show the values of flow velocity, flow rate, and flow depth for different cross sections measured in April and November 2024, respectively. The criteria for field measurement of depth and width at the flood flow ($1000 \text{ m}^3/\text{s}$) were based on the results of the overflow water and flood extent determined by the Regional Water Company in Lorestan Province. In other words, based on the flood extent and the height difference between the overflow line and the elevation level at different points of a cross-section, the flood flow depth at different points of a cross-section was obtained and used as a criterion for model calibration and validation.

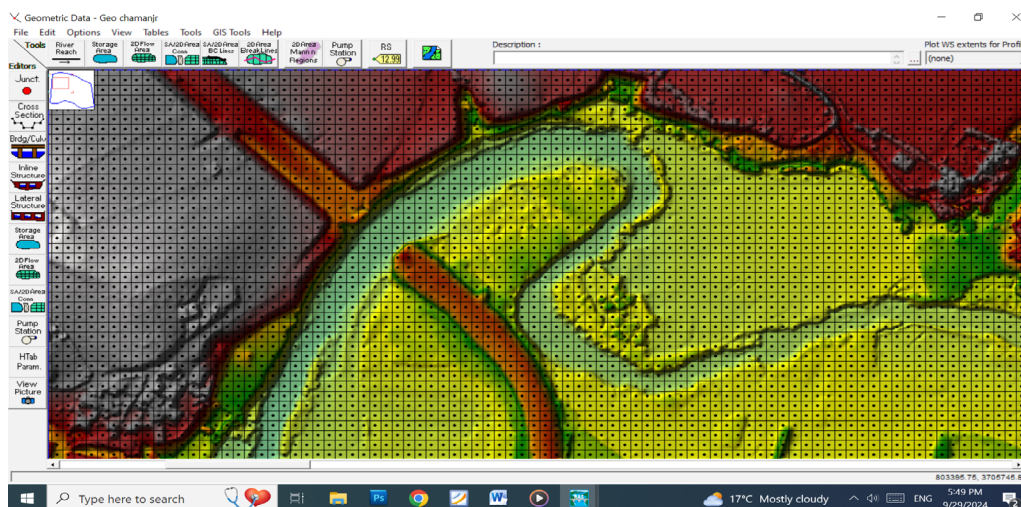


Figure 4. Computational mesh used for 2D simulation in HEC-RAS 5.0.7



Figure 5. Measuring flow velocity in the study area

Determining the roughness coefficients

Understanding the factors affecting Manning's roughness coefficient is a good way to estimate this coefficient more accurately. These factors include: Roughness of the riverbed or the type and grain size of riverbed materials, roughness degree of the riverbed surface, presence of obstructions in the channel and changes in its cross sections, type and density of vegetation cover, shape and size of the channel, and even hydraulic conditions such as flow depth and discharge which, in addition to affecting the longitudinal loss in the flow path, somehow have a role in losses due to flow deformation (local losses). Among the methods available for estimating Manning's roughness coefficient, Cowen's method includes the role of all the aforementioned factors in its calculations (Arcement & Schneider, 1989). Manning's roughness coefficient (n) by this method is defined as (Equation 1):

$$1. n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \times m$$

Where, n_b : Base value of roughness coefficient according to the bed material and grain size of the river bed materials in the case of a smooth and straight channel; n_1 : value of roughness coefficient related to the surface irregularities; n_2 : value of roughness coefficient for variations in the channel cross section; n_3 : Value of roughness coefficient for obstructions; n_4 : Value of roughness coefficient for vegetation; and m : Value of roughness coefficient for meandering of the channel. The value and method of selecting these coefficients are included in the tables and instructions in the open-channel hydraulics books (Trinh et al., 2021) and also in the study by Arcement and Schneider (1989).

To determine the roughness coefficient n , the study area was first homogenized based on field visits to the river and observations of changes in effective parameters, considering morphological status and land uses. Then, the roughness coefficient values were determined based on the photographs and descriptions contained in Chow's open-channel hydraulics book and other sources, such as

Table 1. The values of flow parameters for different cross-sections (measured in April 2024)

Cross Section	Velocity at Depth 0.2 (m/s)	Velocity at Depth 0.4 (m/s)	Velocity at Depth 0.6 (m/s)	Velocity at Depth 0.8 (m/s)	Average Velocity (m/s)	Average Flow Depth (m)	Flow Rate (m ³ /s)
A	2.4	1.8	1.2	0.85	1.5	0.88	34
B	2.1	1.68	1.1	0.73	1.25	0.92	
C	2.65	2	1.2	1	1.62	1.05	
D	1.87	1.16	0.98	0.63	1.1	0.85	

Table 2. The values of flow parameters for different cross-sections (measured in November 2024)

Cross section	Velocity at Depth 0.2 (m/s)	Velocity at Depth 0.4 (m/s)	Velocity at Depth 0.6 (m/s)	Velocity at Depth 0.8 (m/s)	Average Velocity (m/s)	Average Flow Depth (m)	Flow Rate (m ³ /s)
A	1.35	0.95	0.8	0.72	0.96	0.5	15
B	1.2	0.92	0.74	0.68	0.9	0.62	
C	1.4	1	0.77	0.74	1.05	0.74	
D	1.1	0.82	0.64	0.57	0.8	0.43	

the USGS reference. The values were determined for different cross sections according to all effective parameters.

Determining boundary conditions

Boundary conditions include the inflow and outflow conditions of the study area. Considering the steady or unsteady state of the flow and the available information (flow hydrograph, water surface level, and flow rate-water surface level relations), they were considered as flow boundary conditions. In this study, the boundary conditions for simulating unsteady river flow were determined based on observational statistics from the Cham-Anjir hydrometric station for three events: The flood event in April 2019, the water flow discharge on 04/12/2024, and the water flow discharge on 11/15/2024.

Model calibration

To simulate river flow using the 2D HEC-RAS in the study area, the objective function needs to be optimized by adjusting some parameters of the roughness coefficient

(Trinh et al., 2021). Also, the lack of access to recorded data of large historical floods, such as the flood event that occurred in April 2019 in the study area, poses a serious problem for model calibration. Therefore, for this event, a simulation operation was performed based on data on the overflow water, flood depth, and the upper flood level (Pinos & Timbe, 2019). The model was calibrated by optimizing the Manning's roughness coefficient values for the flood event in April 2019 (daily peak flow rate =1000 m³/s) based on the overflow level and flood spread width, and also for the water flow hydrograph in April and November 2024 based on field measurements of flow variables, including depth and velocity, at four cross sections of the study area.

Sensitivity analysis of the HEC-RAS model

Changes in the resolution of the DEM lead to changes in the geometry of the river channel and, consequently, to changes in the pattern of water flow variables. One of the most important sources of uncertainty in the results of hy-

Table 3. Flow velocity predicted by the model at different roughness ranges using three DEM layers for flow rates 15 and 34 m³/s

Flow Rate/ Event	Cross Section	Average Velocity (m/s)	Flow Velocity Predicted by the Model (m/s)					
			0.5-m DEM		2-m DEM		5-m DEM	
			N Range (0.034-0.063)	N Range (0.033-0.052)	N Range (0.034-0.063)	N Range (0.033-0.052)	N Range (0.034-0.063)	N Range (0.033-0.052)
34 m ³ /s - April 2024	A	1.5	1.56	1.35	1.62	1.37	1.78	1.6
	B	1.25	1.29	1.11	1.41	1.14	1.55	1.43
	C	1.62	1.73	1.58	1.72	1.7	1.78	1.68
	D	1.1	1.18	0.90	1.22	0.92	1.36	1.24
15 m ³ /s - November 2024	A	0.96	1.09	0.75	1.34	0.78	1.54	1.36
	B	0.9	1.02	0.6	1.25	0.7	1.33	1.3
	C	1.05	1.14	0.81	1.33	0.85	1.46	1.4
	D	0.8	0.74	0.68	1.05	0.7	1.18	1.15

n= Roughness coefficient.

Table 4. Flow depth predicted by the model at different roughness ranges using three DEM layers

Flow Rate. event	Cross Section	Flow Width	Flow depth	Flow Depth Predicted by the Model (m)					
				0.5-m DEM		2-m DEM		5-m DEM	
				n Range (0.034-0.063)	n Range (0.033-0.052)	n Range (0.034-0.063)	n Range (0.033-0.052)	n Range (0.034-0.063)	n Range (0.033-0.052)
34 m ³ /s - April 2024	A	33	0.88	0.82	0.68	1.02	1	1.12	1.06
	B	29	0.92	1.03	0.78	1.15	1.14	1.24	1.09
	C	22	1.05	0.91	0.93	1.17	1.13	1.26	1.12
	D	37	0.85	0.88	0.76	1.02	1	1.12	1
15 m ³ /s - November 2024	A	24	0.5	0.56	0.33	0.7	0.67	0.8	0.69
	B	21	0.62	0.58	0.51	0.78	0.71	0.86	0.79
	C	18	0.74	0.67	0.62	0.86	0.8	0.95	0.9
	D	27	0.43	0.48	0.39	0.58	0.53	0.75	0.66
1000 m ³ /s - April 2019	A	257	2.74	2.95	3.1	3.2	3.1	3.4	3.2
	B	437	1.95	1.87	1.72	2.2	2.12	2.4	2.3
	C	598	1.3	1.25	1.18	1.4	1.36	1.6	1.48
	D	58	4.36	4.48	4.1	4.7	4.53	4.82	4.63

n= Roughness coefficient

draulic models is related to related to the model parameters. Therefore, in this study, an attempt was made to evaluate the sensitivity of the 2D HEC-RAS model to the resolution of DEMs. In this regard, the simulation results, including the depth and velocity of water flow, based on the three DEM layers with resolutions of 0.5, 2, and 3 meters, were compared with the measured values in four cross sections of the study area for the aforementioned flow rates. The analyses were performed along with measuring the root mean square error (R.M.S.E) and mean absolute percent-age error (M.A.P.E) as follows (Equations 2, 3):

$$2. \text{R.M.S.E} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_o - Q_e)^2}$$

Where Q_o is an observed value and Q_e is the calculated value of the model

$$3. \text{M.A.P.E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_t - \hat{y}}{y_t} \right| * 100$$

Where y_t is an observed value and $\hat{y}$ is the calculated value of the model.

Results

Calibration and sensitivity analysis of the 2D HEC-RAS model

The results of the velocity, depth, and width of the flow extent for three DEM layers compared to the results mea-

Table 5. Results of evaluation metrics for the accuracy of the model in estimating flow velocity and depth using three DEMs

Flow rate/event	Evaluation Metric	Flow Velocity			Flow Depth		
		DEM			DEM		
		0.5-m	2-m	5-m	0.5-m	2-m	5-m
34 m ³ /s - April 2024	R.M.S.E	0.035	0.042	0.048	0.075	0.086	0.093
	M.A.P.E	0.027	0.033	0.035	0.047	0.052	0.058
15 m ³ /s - November 2024	R.M.S.E	0.028	0.033	0.037	0.054	0.062	0.066
	M.A.P.E	0.027	0.028	0.031	0.039	0.047	0.054
1000 m ³ /s - April 2019	R.M.S.E	-	-	-	0.098	0.12	0.13
	M.A.P.E	-	-	-	0.064	0.072	0.089

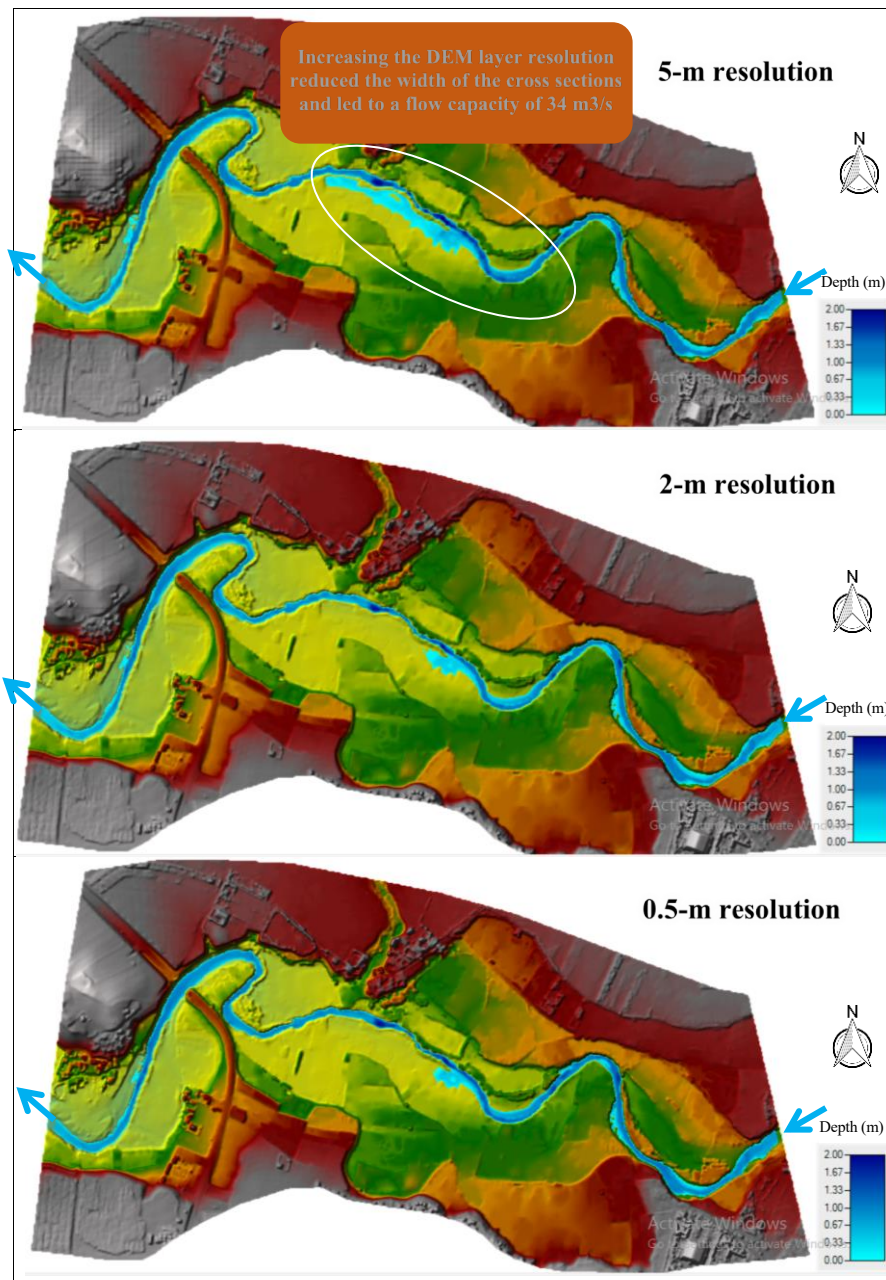


Figure 6. Image of flow depth with a flow rate of $34 \text{ m}^3/\text{s}$ (April 2024 event) for three DEM layers

sured at different cross sections (A, B, C, D) are presented in Tables 3 and 4 and Figures 6 and 7. As shown in Table 3 and Figure 6, for the flow rates measured in April and November 2024, the predicted values closest to the observational values (velocity, depth, and spread width) of the water flow in the four cross sections were related to the DEM layer with 0.5-m resolution followed by the layers with 2- and 5-m resolutions, and the roughness coefficient was in the range of 0.033-0.063. At these flow rates, the difference in the estimated values of water flow variables was significant using the 5-m DEM layer compared to when the layers with 0.5 and 2 meters of resolution were

used. This is due to the variations in the geometry of the full cross-section channel with the change in the dimensions of the DEM layer. In particular, this change affected the full cross-section channel width; as the dimensions of the DEM layer increased, the full cross-section channel width decreased. Therefore, these changes in the channel geometry have led to changes in the depth and velocity of water flow in the full cross-section channel.

As shown in Table 4 and Figure 7, for the April 2019 event with a flow rate of $1000 \text{ m}^3/\text{s}$, similar to the flow rates measured in April and November 2024, the predict-

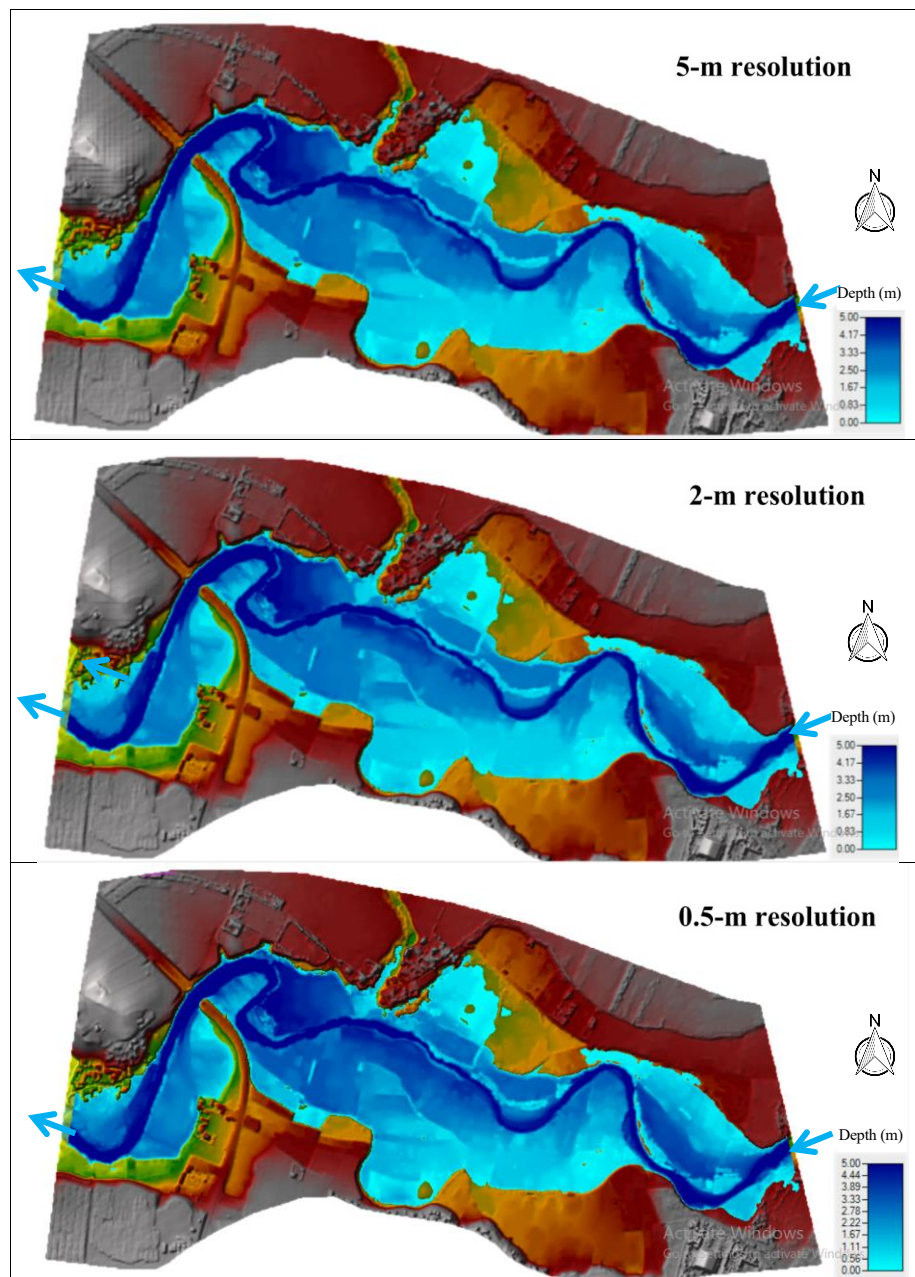


Figure 7. Image of flow depth with a flow rate of $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ (April 2019 event) for three DEM layers

ed values closest to the observational values (depth and spread width) of the water flow in the four cross sections were related to the DEM layer with 0.5-m resolution followed by the layers with 2- and 5-m resolutions, and the roughness coefficient was in the range of 0.033-0.063. However, at the flow rate of $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ (for the April 2019 event), the difference in flood flow variables (flow depth and velocity) among the three DEM layers was not significant. Therefore, when the water flow rate increases to the point where it moves out of the channel and enters the floodplain, and the flood extent width becomes several times more than the width of the water surface in the full

cross-section channel, the effect of increasing the DEM layer resolution from 2 to 5 meters on the flood flow depth and velocity is not significant.

For a flow rate of $34 \text{ m}^3/\text{s}$, the maximum flow depth caused by the narrowing of the channel at several sections and the centrifugal force in the concave curve was 2 meters. Due to the high curvature in the arches of the study area, maximum flow changes (increase in velocity) occur in the second half of the arch (Figure 6). On the other hand, as shown in Figure 7, for a flow rate of $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ (April 2019 event), the maximum flow depth at the bridge

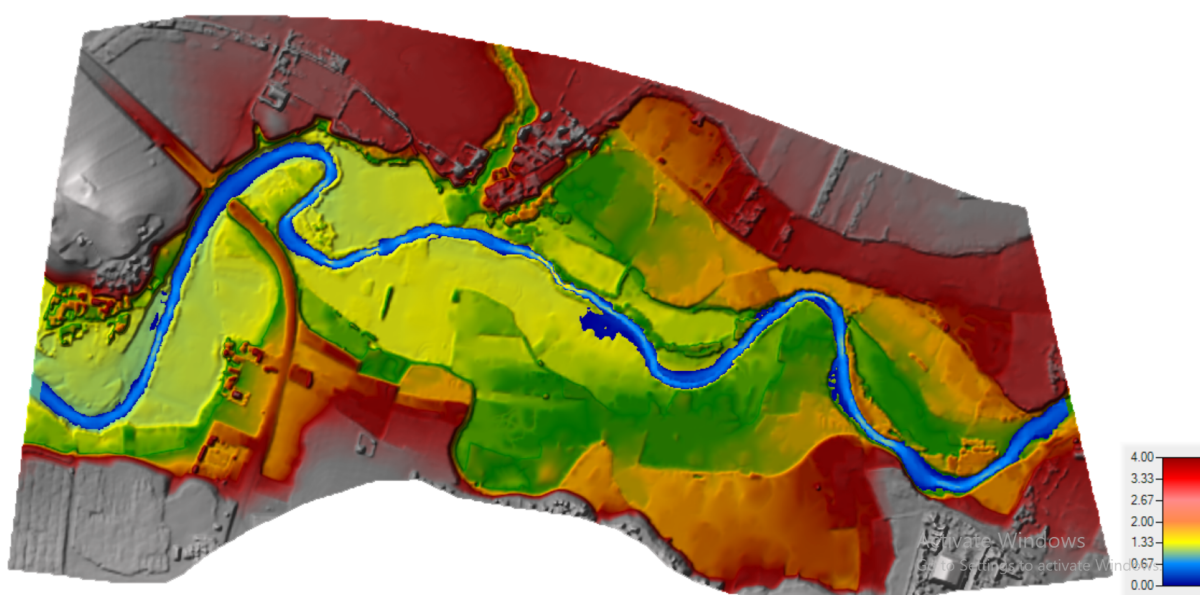


Figure 8. Flood risk map (depth $\times$ velocity) at a flow rate of 34 m³/s based on the DEM layer with 0.5-m resolution

location (section D) was 5 meters. The entire territory of the study area does not have the capacity to pass this flood; therefore, the flood overflows 95% of the banks and spreads to the flood plain. The largest flood spread width of about 600 meters occurred at section C, and the smallest flood spread, due to the presence of a transverse obstruction, was at the bridge location (section D). Also, for this event (April 2019), given that the flood spread widely to the banks, the water velocity was affected by flow turbulence, trend, topography, and obstructions in the floodplain. For these conditions, the flow velocity in the study area lacks a stable pattern; with changes in the

flow rate, the flow velocity pattern changes throughout the study area. For the April 2019 event, the highest water flow velocity due to the transverse obstructions was seen at the bridge location (section D).

As shown in Figures 8 and 9, for a flow rate of 34 m³/s and the 0.5-m DEM layer, given that the study area had the capacity to pass this flow, the quantitative values of the flood hazard zone were less than the threshold limit. Therefore, the flood risk in these conditions is at a normal level. For the April 2019 event with a flow rate of 1000 m³/s, generally, the highest numerical flood risk level was

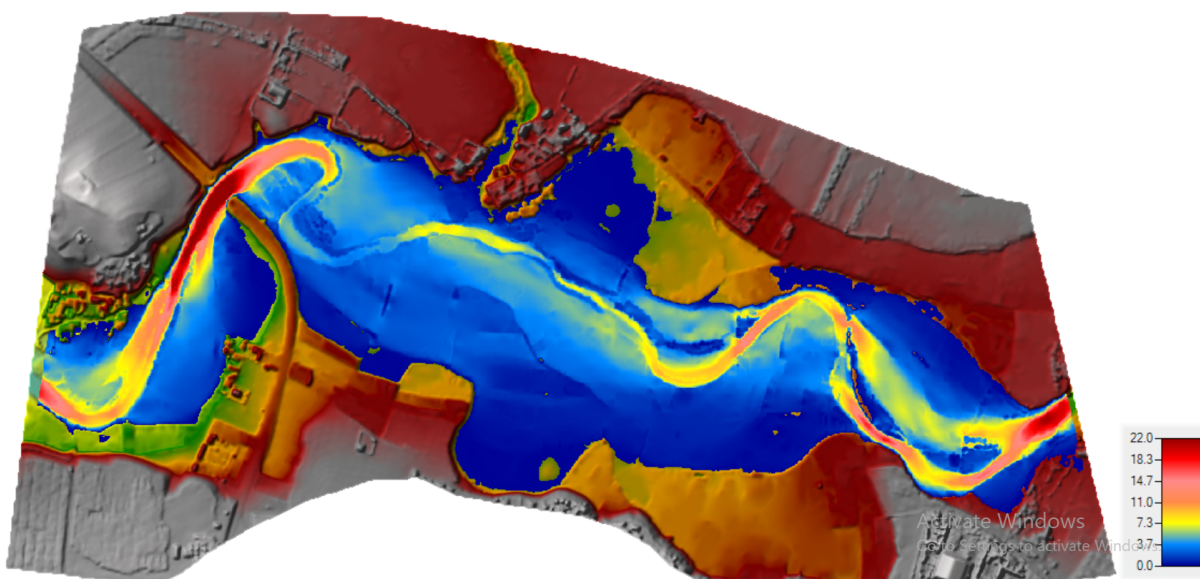


Figure 9. Flood risk map (depth $\times$ velocity) at a flow rate of 1000 m³/s based on the DEM layer with 0.5-m resolution

in the full cross-section channel of the study area, but specifically, the highest flood risk was in the third arch/bridge location (section D). On average, the transverse extent of the flood, with a value greater than 10, was approximately 160 meters. In the arches of the studied area, the maximum flood hazard occurs on the outer side of the arches.

Table 6 shows the accuracy of the 2D HEC-RAS model in estimating the parameters of flow velocity and depth using three DEMs with resolutions of 0.5, 2, and 5 meters and based on the R.M.S.E. and M.A.P.E. evaluation metrics. As can be seen, for the three events studied, the lowest evaluation metrics for predicted values (velocity and depth) compared to observational values were related to the DEM with resolutions of 0.5 and 2 meters.

Discussion

The findings of this study, which demonstrated the superiority of DEM with 0.5-m resolution in flood risk simulation, are consistent with the results of Muthusamy et al. (2021) and Fereshtehpour et al. (2024), who showed that high-resolution DEMs (0.5-1 m) significantly reduce flood risk zoning errors. The study by Parizi and Hosseini (2023) also revealed that the TanDEM-X model with a resolution of 12 meters had a significant error in estimating flood depth compared to local DEMs with a resolution of 1 meter, which confirms the importance of the spatial accuracy of DEMs. This study's recommendation for the use of high-resolution DEMs in flood management is in line with the recommendations of Alfonso et al. (2016) and Alexander and Mees (2016), who emphasized the role of accurate data in reducing flood risk.

Conclusion

One of the most important sources of uncertainty in the results of hydraulic models is the uncertainty related to the model parameters. On the other hand, the most sensitive stage in this field is the preparation of a DEM with appropriate precision and resolution. Therefore, in this study, by preparing the maps of flow depth, flow velocity, and flood risk in 3 km downstream of Khorramabad City, an attempt was made to evaluate the sensitivity of the 2D HEC-RAS model to the precision of DEMs with resolutions of 0.5, 2, and 5 meters. The results of this research show that the resolution of DEMs plays a key role in improving the efficiency of the HEC-RAS model for simulating the flood hazard zone. By using a DEM with 0.5-m resolution, we obtained simulation results that were closer to real (observational) data compared to the other two DEMs with lower resolutions (2 and 5 meters). These findings emphasize that high accuracy of elevation

data is an effective factor in reducing the uncertainty of flood predictions.

The analyses showed that the geometric changes caused by the different resolutions of DEMs had a major impact on the flow depth, flow velocity, and flow spread width. When the water flow rate increases to the point where the water overflows the channel, the impact of DEM resolution on flood predictions is significantly reduced. This is important because in flood conditions, channel geometry and topography changes can lead to a decrease in the accuracy of predictions. For a flow rate of 1000 m³/s, given that the flood spreads widely to the banks, the water velocity pattern is affected by flow turbulence, flow direction, topography, and obstructions in the channel. For these conditions, the water flow velocity in the study area lacks a stable pattern, and with changes in the flow rate, the flow velocity pattern changes throughout the study area.

The results of the model sensitivity analysis showed that the 2D HEC-RAS model had high sensitivity to the equations used. The model's performance in simulating the measured flow in April and November 2024, using the DW equations, was much better. In contrast, for the April 2019 flood event, the use of dynamic wave equations provided better results. Among the various hydraulic properties, the water surface level showed the least sensitivity to computational equations.

The results of this study can help in the optimal planning and management of water resources and reduce the damages caused by floods. Policymakers and water resources managers in Iran should pay special attention to the importance of DEM resolution in decision-making related to flood risk management so that they can develop effective programs to reduce damages and improve the resilience of communities against floods.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

All ethical principles were observed in this study. Since there were no experiments on human or animal samples, the need for ethical code was waived.

Funding

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



Authors' contributions

Conceptualization, methodology and, initial draft preparation: Iraj Vayskarami and Ali Haghizadeh; Software, visualization, review and editing: Iraj Vayskarami, Ali Haghizadeh, and Aboalhasan Fathabadi; Supervision: Ali Haghizadeh; Final approval: All authors.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.



مطالعه موردی ارزیابی تأثیر دقت مدل رقومی ارتفاعی بر شبیه‌سازی پهنه خطر سیل مطالعه موردی: بازه مکانی رودخانه پایین دست شهر خرم‌آباد

ایرج ویسکرمی^۱، علی حقی‌زاده^۱، ابوالحسن فتح‌آبادی^۲

۱. گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.

۲. گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس، ایران.

Use your device to scan
and read the article online



Citation Vayskarami, I., Haghizadeh, A., & Fathabadi, A. (2025). Impact of Digital Elevation Model Resolution on Flood Hazard Simulation: A Case Study of the River Downstream of Khorramabad City, Iran. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 15(3):384-413. <https://doi.org/10.32598/DMKP.15.3.919.1>

doi <https://doi.org/10.32598/DMKP.15.3.919.1>

چکیده

زمینه و هدف: علی‌رغم پیشرفت‌های قابل‌توجه در زمینه توسعه مدل‌های هیدرولیکی، دقت پیش‌بینی سیلاب‌ها تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله توپوگرافی و دقت مدل رقومی ارتفاعی (DEM) و ضریب زبری قرار دارد. به‌ویژه، دقت مدل رقومی ارتفاعی می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر نتایج شبیه‌سازی‌های سیلاب و برآورد نقشه‌های خطر سیل داشته باشد. هدف اصلی این تحقیق، ارزیابی تأثیر دقت مدل رقومی ارتفاعی بر کارایی مدل دو بعدی HEC-RAS در شبیه‌سازی پهنه خطر سیل می‌باشد.

روش: در این پژوهش، تأثیر دقت مدل رقومی ارتفاعی بر نتایج مدل HEC-RAS با استفاده از سه لایه رقومی ارتفاعی با دقت تفکیک ۰/۵، ۲ و ۳ متر مورد تحلیل قرار گرفت. شبیه‌سازی جریان آب در ناحیه‌ای از رودخانه پایین‌دست شهر خرم‌آباد در استان لرستان به طول ۳ کیلومتر انجام شد. دبی‌های اندازه‌گیری‌شده در فروردین و آبان سال ۱۴۰۳ به‌ترتیب برابر با ۳۴ و ۱۵ مترمکعب بر ثانیه و همچنین رخداد سیل فروردین معادل ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه در نظر گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی شامل عمق و سرعت جریان آب براساس سه لایه رقومی ارتفاعی فوق‌الذکر با مقادیر اندازه‌گیری‌شده در چهار مقطع عرضی از بازه مورد مطالعه برای دبی‌های مذکور مقایسه گردید. تحلیل‌های انجام‌شده از طریق ارزیابی عوامل اندازه‌گیری‌شده (عمق، سرعت و عرض گسترش جریان) و نتایج شبیه‌سازی چهار مقطع مشاهداتی، همراه با استفاده از شاخص‌های آماری RMSE و MAPE، انجام شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد دقت مدل رقومی ارتفاعی تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد مدل HEC-RAS دارد. به‌ویژه، برای مدل رقومی ارتفاعی با دقت ۰/۵ متر نسبت به دو مدل رقومی ارتفاعی با دقت ۲ و ۵ متر، نتایج شبیه‌سازی جریان و نقشه‌های خطر سیل به مراتب به واقعیت اندازه‌گیری‌شده نزدیک‌تر است. میانگین خطای پیش‌بینی عمق و سرعت جریان به‌ترتیب ۱۰ و ۱۲ درصد کمتر از مدل‌های با دقت ۲ و ۵ متر بود. همچنین، تحلیل‌های انجام‌شده بر روی عوامل هیدرولیکی شامل عمق، سرعت و عرض گسترش جریان، ارتباط معناداری بین دقت مدل رقومی ارتفاعی و دقت پیش‌بینی‌های سیلاب را نشان داد.

نتیجه‌گیری: به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که دقت مدل رقومی ارتفاعی نقش کلیدی در بهبود کارایی مدل HEC-RAS در شبیه‌سازی پهنه خطر سیلاب ایفا می‌کند. در شرایطی که دقت مدل رقومی ارتفاعی بالا باشد، نتایج پیش‌بینی به‌مراتب بهتر و قابل اطمینان‌تری حاصل می‌شود. بنابراین، بهبود دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی می‌تواند به‌عنوان یک استراتژی مؤثر در مدیریت خطر سیلاب در نظر گرفته شود. همچنین، بهینه‌سازی و ارتقای تکنیک‌های تولید داده‌های ارتفاعی می‌تواند به تقویت دقت پیش‌بینی‌های سیلاب و در نتیجه کاهش آسیب‌های ناشی از سیلاب‌ها کمک نماید. این نتایج بر لزوم توجه به دقت مدل‌های هیدرولیکی و ضرورت به‌کارگیری داده‌های با کیفیت بالا در مطالعات مرتبط با مدیریت ریسک سیل و کاهش خطر سیلاب تأکید می‌ورزد.

کلیدواژه‌ها: DEM، مدل HEC-RAS، حساسیت مدل، عدم قطعیت

اطلاعات مقاله:

تاریخ دریافت: ۲۱ دی ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۰ خرداد ۱۴۰۴

تاریخ انتشار: ۰۹ مهر ۱۴۰۴

* نویسنده مسئول:

دکتر علی حقی‌زاده

نشانی: لرستان، خرم‌آباد، دانشگاه لرستان، دانشکده منابع طبیعی، گروه مهندسی آبخیزداری.

تلفن: ۳۳۱۲۰۱۰۶ (۶۶) ۹۸+

پست الکترونیکی: haghizadeh.a@lu.ac.ir



Copyright © 2025 The Author(s);

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY-NC: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode/en>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.



مقدمه

سیلاب یکی از شایع‌ترین و خطرناک‌ترین بلایای طبیعی در سراسر جهان به شمار می‌آید. فهم عمیق‌تر از پدیده خطر سیل و پیامدهای بالقوه آن برای جامعه به‌عنوان معیاری اساسی برای توسعه سیاست‌های مؤثر در مدیریت سیلاب، پروژه‌های کاهش ریسک و سایر استراتژی‌های مرتبط با مدیریت سیلاب محسوب می‌شود (آمری و بریتا، ۲۰۲۲). در طول زمان، ضرورت حفاظت در برابر سیلاب و اعتقاد به توانایی و قابلیت‌های انسان‌ها در کنترل آن، به‌طور فزاینده‌ای موجب تغییر در دیدگاه کنترل و مهار سیلاب شده است. باین‌حال، در اوایل قرن بیستم، مفاهیم مدرن مدیریت ریسک سیلاب شروع به ظهور کردند. با توسعه تحقیقات و افزایش تلفات ناشی از سیلاب، نیاز به رویکردی جدید احساس شد؛ رویکردی که مفهوم ریسک را در تصمیم‌گیری‌ها نه به‌صورت نظری، بلکه به‌صورت عملی به کار گیرد (الکساندر و میس، ۲۰۱۶).

ریسک سیلاب نتیجه ارتباط متقابل بین خطر سیل (ترکیب احتمال و شدت آن) و آسیب‌پذیری انسان‌ها و اموال و دارایی‌های آن‌هاست. هم‌خطر و هم آسیب‌پذیری به نوع سیلاب و فرآیندهای تعیین‌کننده آن وابسته‌اند (ین و همکاران، ۲۰۲۱). نتایج ریسک سیلاب، پتانسیل پیامدهای ناگوار مرتبط با سیلاب در یک مکان را نشان می‌دهند و استفاده از این نقشه‌ها همراه با ارزیابی‌های اقتصادی به‌عنوان ابزارهای برنامه‌ریزی و حمایت از تصمیم‌گیری به کار می‌رود (داله دون و همکاران، ۲۰۱۹). بنابراین، ضروری است روش‌ها و ابزارهای بررسی نتایج نامطلوب ریسک سیلاب به‌طور جامع، منسجم و فراگیر ارائه شوند تا به مسئولین و کارشناسان ذی‌صلاح امکان دهند با شناسایی راه‌حل‌های اولویت‌دار از طریق توازن بین عملکردهای اقتصادی، اجتماعی و محیطی و نیز تضادهای اجتماعی، تصمیم‌گیری کنند. به‌طور کلی، ارزیابی ریسک سیلاب شامل سه مؤلفه خطر، آسیب‌پذیری و در معرض قرار گرفتن است (لیو و مروید و همکاران، ۲۰۱۴).

تهیه نقشه خطر سیلاب معمولاً با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و پیمایش میدانی انجام می‌شود. فرآیند تهیه چنین نقشه‌ای از جمع‌آوری اطلاعات تا مدل‌سازی، همراه با یک سری عدم قطعیت‌ها است. روش‌های متداول مدل‌سازی هیدرولیکی-هیدرودینامیکی می‌توانند به‌دلیل غفلت از منابع عدم قطعیت، به نتایج نادرست منجر شوند (آلفونزو و همکاران، ۲۰۱۶).

با وجود توسعه بسیاری از مدل‌های هیدرولیکی، عدم درک ما

از فرآیندهای سیلاب و تغییرات مکانی و زمانی ورودی‌های اصلی مدل و همچنین متغیرهایی مانند توپوگرافی و زبری سطح، مانع از پیش‌بینی بهتر این پدیده‌ها می‌شود. اندازه‌گیری و کاهش عدم قطعیت در مدل‌سازی سیلاب، موضوعی مهم برای بهبود دقت مدل‌سازی و پیش‌بینی سیلاب است (تنگ و همکاران، ۲۰۱۷). در این راستا، دقت مدل‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی خطر سیلاب تأثیرات قابل توجهی بر کارایی طراحی و مدیریت ریسک سیلاب دارد (مروید و همکاران، ۲۰۰۸).

همچنین، نمی‌توان از عدم قطعیت در استفاده از مدل‌های تحلیل سیلاب اجتناب کرد، زیرا مدل‌ها معمولاً تنها ایده‌آل‌های واقعیت را دربر می‌گیرند و ارزش ورودی‌های مدل با دقت مطلق قابل اندازه‌گیری نیست (یوکونگ و همکاران، ۲۰۱۶). منابع مختلف مولد عدم قطعیت در مدل‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی شامل عدم قطعیت طبیعی (ذاتی)، عدم قطعیت‌های مربوط به مدل و پارامترها و داده‌های ورودی آن و عدم قطعیت‌های عملکردی هستند (تنگ و همکاران، ۲۰۱۷؛ کو و همکاران، ۲۰۲۰).

عدم قطعیت‌های طبیعی، مربوط به فرآیندهای تصادفی طبیعی مانند بارش، جریان آشفته رودخانه و انتقال رسوبات است، درحالی‌که عدم قطعیت در مدل ناشی از ساختار ریاضی فرآیندها و ناتوانی معادله‌های مدل در توصیف دقیق سیستم‌های واقعی است. عدم قطعیت پارامترها به عدم دقت در تعیین مقادیر آن‌ها و همچنین عدم قطعیت‌های داده‌ها و اطلاعات ناشی از خطاهای اندازه‌گیری، ناهمگنی داده‌ها و کمبود اطلاعات مرتبط است. درنهایت، عدم قطعیت‌های عملکردی به ساخت و توسعه مدل و همچنین عوامل انسانی مربوط می‌شوند (دیسار و همکاران، ۲۰۱۹). از مهم‌ترین منابع عدم قطعیت در نتایج مدل‌های هیدرولیکی، عدم قطعیت‌های مرتبط با مدل و پارامترها هستند. در این خصوص تهیه مدل رقومی ارتفاعی با دقت مناسب به‌عنوان داده توپوگرافی بزرگ‌مقیاس یکی از حساس‌ترین عوامل ورودی‌های مدل‌های هیدرودینامیکی در این بخش محسوب می‌شود.

مطالعات متعددی به بررسی تأثیر دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی^۲ (DEM) بر شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی و پهنه‌بندی خطر سیلاب پرداخته‌اند. از جمله این مطالعات می‌توان به پژوهش کاویان و محمدی (۱۳۹۸) اشاره کرد که در حوزه آبخیز تالار، استان مازندران، با استفاده از مدل SWAT و سه مدل DEM مختلف (ASTER با دقت ۳۰ متر، SRTM با دقت ۹۰ متر و GTOPO30 با دقت ۱۰۰۰ متر)، تأثیر دقت مکانی مدل‌های ارتفاعی را بر شبیه‌سازی دبی و نیترات کل بررسی

1. Amrei and Britta

2. Alexander and Mees

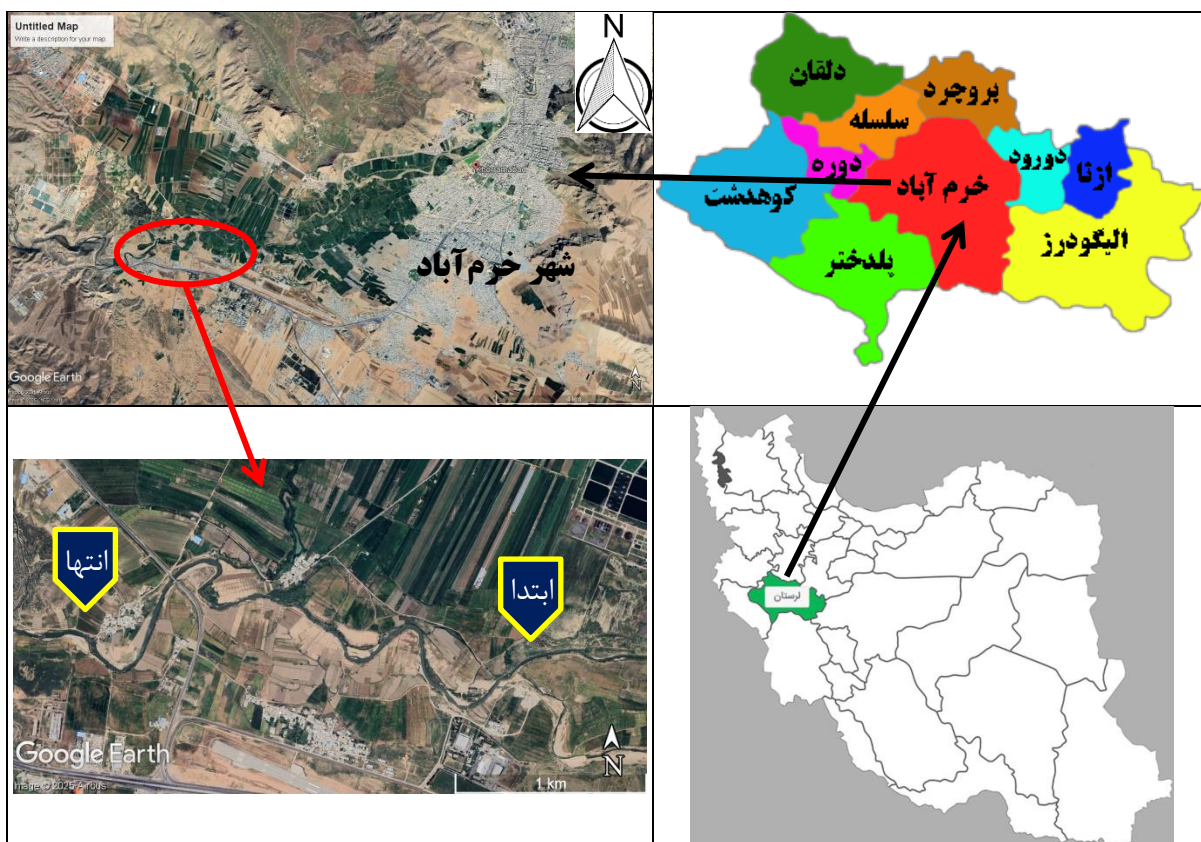
3. Yin

4. Dalledonne

5. Koo

6. Dysarz

7. Digital Elevation Model (DEM)



تصویر ۱. موقعیت بازه مکانی مورد مطالعه

افزایش RMSE تا ۵۰ درصد شد که نشان دهنده حساسیت مدل به دقت DEM است.

موتوسامی و همکاران (۲۰۲۱) تأثیر دقت DEM را در مدل سازی سیلاب شهری بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند کاهش دقت مکانی DEM از ۱ متر به ۵۰ متر باعث افزایش ۳۰ درصد در پهنه سیلابی و ۱۵۰ درصد در عمق جریان می‌شود که اهمیت استفاده از DEM‌های با دقت بالا را در مدل سازی سیلاب‌های شهری برجسته می‌کند. در مطالعه‌ای در نیجر جنوبی، **موتنج و همکاران (۲۰۲۲)** دقت DEM‌های جهانی مانند SRTM، AS-TER، ALOS و MERIT را در مدل سازی سیلاب ارزیابی کردند. آن‌ها دریافتند DEM نوع ALOS بیشترین شباهت را به داده‌های LIDAR دارد و در سیلاب‌هایی با عمق کمتر از ۳ متر، DEM‌های با دقت بالاتر، پهنه سیلابی برآوردی مشابهت بیشتر با مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهند.

باتوجه به مرور منابع، تأثیر دقت مدل رقومی ارتفاعی بر کارایی مدل HEC-RAS در شبیه‌سازی پهنه خطر سیلاب به‌ویژه در داخل کشور، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. لذا، در این پژوهش سعی می‌شود به ارزیابی تأثیر دقت مدل رقومی ارتفاعی بر کارایی مدل HEC-RAS در شبیه‌سازی نقشه خطر سیلاب در بازه مکانی به طول ۳ کیلومتر در پایین‌دست شهر خرم‌آباد

کردند. نتایج نشان داد مدل ASTER دقت بالاتری داشته و بهترین نتایج شبیه‌سازی را فراهم کرده است. با کاهش دقت مکانی، میزان خطای بیش تخمینی یا کم تخمینی نیز افزایش یافت. در مطالعه‌ای پاریزی و حسینی، از مدل رقومی ارتفاعی TanDEM-X با قدرت تفکیک ۱۲ متر برای شبیه‌سازی ویژگی‌های هیدرولیکی سیلاب در حوضه رودخانه اترک استفاده شد.

در این تحقیق که با مدل HEC-RAS 2D انجام گرفت، نتایج نشان داد TanDEM-X توانست پهنه سیلاب را با دقت بالای ۸۵ درصد مدل سازی کند. مقایسه با مدل‌های ASTER و SRTM نشان داد که TanDEM-X به‌طور قابل ملاحظه‌ای دقیق‌تر عمل می‌کند و توان بالایی در نمایش جزئیات توپوگرافی دارد. در مطالعه‌ای که **فرشته‌پور و همکاران (۲۰۲۴)** انجام دادند، تأثیر نوع و دقت DEM بر پیش‌بینی سیلاب با استفاده از شبکه‌های عصبی کانولوشنی یک‌بعدی بررسی شد.

آن‌ها از داده‌های ارتفاعی با دقت‌های ۱۵ و ۳۰ متر در شهر کارلایل^۸ انگلستان استفاده کردند و دریافتند که DEM‌های نوع DTM با دقت ۳۰ متر در مقایسه با DSM‌ها عملکرد بهتری در پیش‌بینی عمق سیلاب دارند. افزایش دقت به ۱۵ متر باعث

8. Carlisle



پرداخته شود.

روش

محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بازه‌ای از رودخانه پایین‌دست شهر خرم‌آباد- استان لرستان به طول ۳ کیلومتر و در منطقه‌ای موسوم به چمنجیر واقع گردیده که در واقع خروجی حوزه آبخیز رودخانه خرم‌آباد است. موقعیت این بازه بین مختصات جغرافیایی (ابتدای بازه، $X: 247128/7$ و $Y: 3704013/16$) و (انتهای بازه، $X: 245084/7$ و $Y: 3704099$) قرار گرفته است. حوزه آبخیز این رودخانه جزء زیرحوزه‌های رودخانه کشکان می‌باشد. رودخانه خرم‌آباد از تلاقی دو سرشاخه کرگانه و رباط در محل شهر خرم‌آباد تشکیل و در محل دوآب در فاصل ۴۰ کیلومتری شهر خرم‌آباد به رودخانه کشکان می‌پیوندد. ایستگاه هیدرومتری چمنجیر در خروجی بازه مورد مطالعه واقع شده است (تصویر شماره ۱).

مدل عددی هیدرودینامیکی مورد استفاده در این پژوهش

مدل‌های دو بعدی نشان‌دهنده جریان سیلاب به‌صورت زمینه دو بعدی است، با فرض اینکه بعد سوم - عمق آب - در مقایسه با دو بعد دیگر، کم عمق است. مدل‌های هیدرودینامیک دو بعدی، کاربردی‌ترین مدل‌ها برای تهیه نقشه سیل و مطالعات برآورد خطر سیل می‌باشند (روبرتس و همکاران، ۲۰۱۵). لذا در این پژوهش از مدل دو بعدی HEC-RAS استفاده و مورد ارزیابی قرار گرفته است. مدل 2D HEC-RAS، با عنوان HEC-RAS ۵.۱۰ در فوریه سال ۲۰۱۶ توسعه داده شده است.

این مدل، علاوه بر مدل‌سازی جریان‌های ماندگار، غیرماندگار، شبه غیرماندگار، سازه‌های تقاطعی و جانبی به‌صورت یک بعدی، از توانایی لازم برای مدل‌سازی دو بعدی جریان به‌ویژه در سیلاب‌دشت‌ها نیز برخوردار می‌باشد. این مدل توانایی حل معادلات سنت - ونانت را در قالب دو فرم موج دینامیک و موج پخشیدگی برای مدل‌ساز فراهم می‌نماید. امکان اتصال به نقشه‌های آنلاین همچون گوگل ارث^۹ از ویژگی‌های اصلی این مدل عددی می‌باشد. این مدل یکی از متداول‌ترین نرم‌افزارهای مدل‌سازی سیلاب در شبیه‌سازی هیدرودینامیکی است که به‌وسیله مرکز مهندسی هیدرولوژیکی ارتش آمریکا^{۱۰} تولید شده است. توسعه روش‌های عددی بیشتر و قابل اعتمادتر، قدرت محاسباتی کارآمدتر و تکنیک‌های جدید تهیه نقشه توپوگرافی به افزایش استفاده از مدل‌های دو بعدی در شبیه‌سازی رخدادهای سیلابی منجر شده است، به‌طوری‌که با وجود اینکه زمان لازم

برای پردازش کمتر شده است، اما از دقت مناسب برخوردار است. مدل‌های یک بعدی از کارایی و توانایی تولید فرایندهای درون کانال‌ها برخوردار هستند، اما مشکلات از زمانی شروع می‌شود که جریان سیلابی از کناره‌های کانال سرریز^{۱۱} نموده و وارد دشت سیلابی می‌شود (پوینز و تیم، ۲۰۱۹ و کاستیل ۱۲ و همکاران، ۲۰۲۰).

در مدل HEC-RAS از معادلات دوبعدی سنت ونانت (با اضافات اختیاری مومنتوم برای اثرات آشفتگی و کوریولیس^{۱۳}) و معادلات موج پخشیدگی دوبعدی برای شبیه‌سازی جریان استفاده می‌کنند. به‌طور کلی معادلات موج پخشیدگی دوبعدی موجب اجرای مدل با سرعت بیشتری می‌شود و پایداری آن به مراتب بیشتر خواهد بود. معادلات دوبعدی سنت ونانت دوبعدی برای محدوده وسیعی از مسائل قابل کاربرد هستند. هرچند در بسیاری از مدل‌سازی‌ها، معادلات موج پخشیدگی در مقایسه با معادلات موج دیفیوژن نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌دهند. در مدل دوبعدی هک رس این امکان وجود دارد تا بتوان با داده‌های در دسترس و نوع پروژه موردنظر یکی از دو روش را انتخاب نمود (برونر، ۲۰۱۶).

تهیه نقشه توپوگرافی و اندازه‌گیری متغیرهای جریان آب در بازه مورد مطالعه

در این پژوهش، به‌منظور تأثیر دقت مدل رقومی ارتفاعی بر نتایج مدل HEC-RAS، سه لایه رقومی ارتفاعی با دقت تفکیک ۵/۰، ۲/۰ و ۵/۰ متر از طریق تصاویر ماهواره‌ای Worldview و لایه‌های توپوگرافی ۲ و ۵ متر از طریق نقشه‌برداری با پهباد تولید شده‌اند. در خصوص نقشه توپوگرافی با قدرت تفکیک مکانی نیم متر، این لایه رقومی ارتفاعی (DEM) بزرگ‌مقیاس برای بازه مکانی مورد مطالعه از تصاویر ماهواره‌ای Worldview سال ۲۰۲۴ اخذ شده از شرکت Digital Globe به‌صورت استریو استفاده شد و در ادامه لایه مذکور با استفاده از تعدادی نقاط کنترلی با دوربین نقشه‌برداری میدانی، صحت سنجی گردید (تصاویر شماره ۲، ۳).

شایان ذکر است ماهواره WorldView از سری ماهواره‌های با توان تفکیک بالا است که با هدف نقشه‌برداری، پایش محیط زیست، تحلیل و مدیریت شهری و مدیریت بلایای طبیعی است. این ماهواره در ارتفاع ۵۵۰ کیلومتری از سطح زمین و در یک مدار خورشیدآهنگ در حال چرخش می‌باشد و در ساعت دوره گردش ماهواره در مدار ۱۰۰ دقیقه و مدت زمان بازبینی مجدد ماهواره ۱/۱ روز می‌باشد. این ماهواره شامل یک لنز با فاصله کانونی ۱۲/۲ متر است. هر خط تصویربرداری دارای بیش از ۲۷۰۰۰ آشکار ساز با

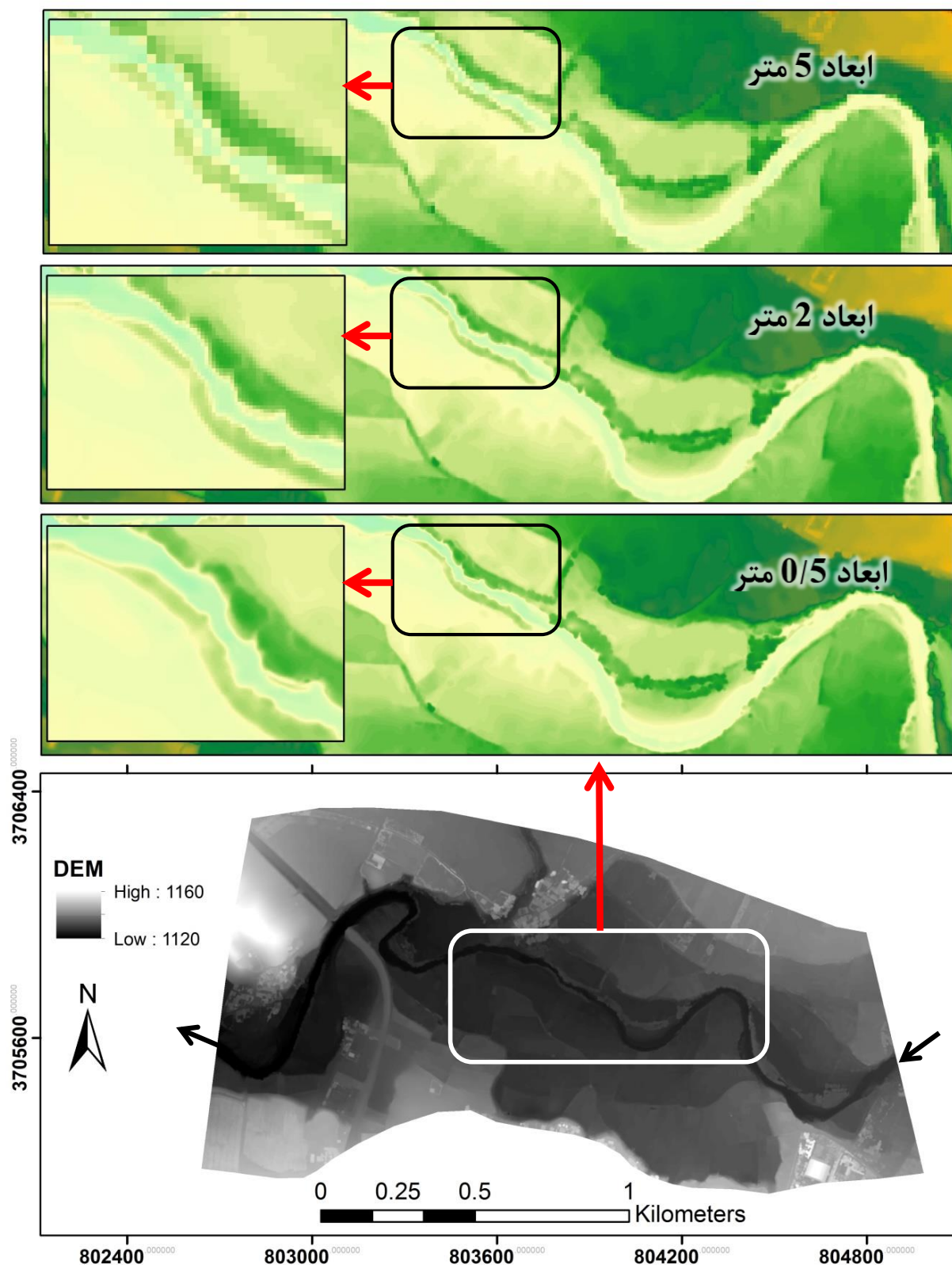
11. Overbank flow

12. Costabile

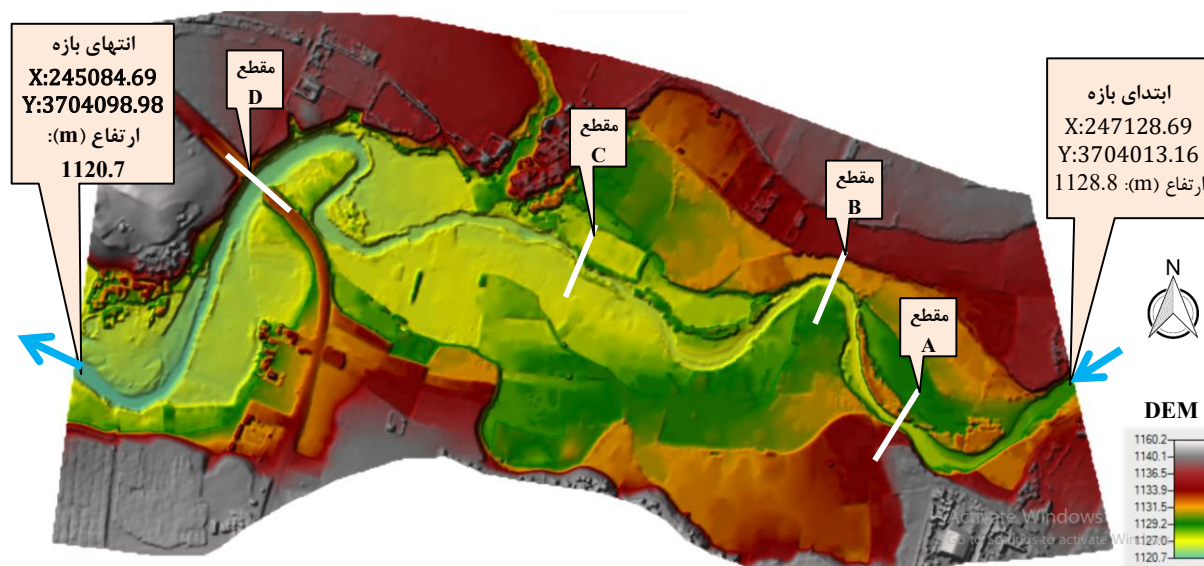
13. Turbulence and Coriolis

9. Google Earth

10. U.S. Army Engineer Hydrologic Engineering Center (HEC)



تصویر ۲. نقشه مقایسه سه لایه رقومی ارتفاعی (MED) با دقت مکانی ۵/۰، ۲ و ۵ متر از بازه مکانی مورد مطالعه

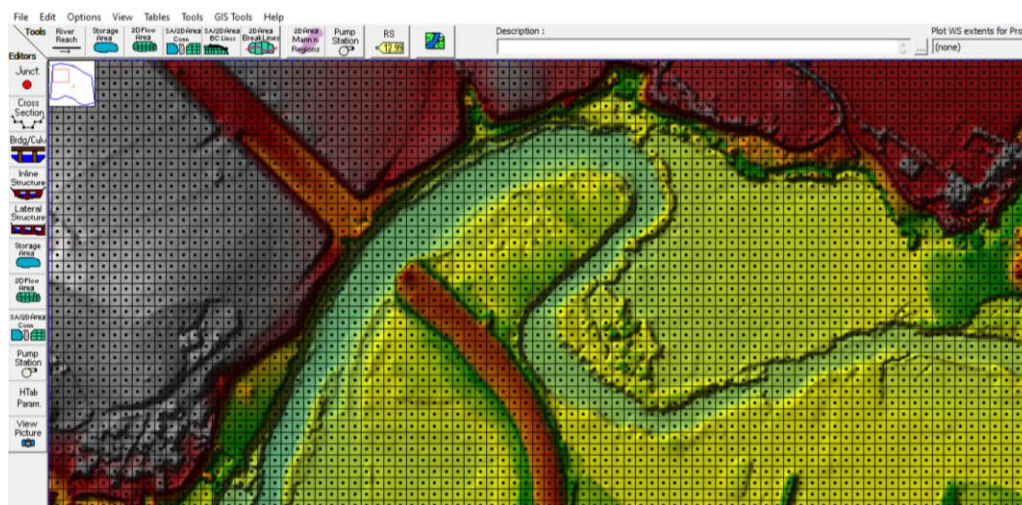


تصویر ۳. موقعیت مقاطع عرضی اندازه‌گیری شده روی نقشه توپوگرافی / لایه رقومی ارتفاعی (MED) با دقت نیم متر

به منظور ارزیابی واسنجی و صحت‌سنجی نتایج مدل در چهار مقطع از مقاطع نقشه‌برداری شده به اندازه‌گیری پارامترهای جریان (سرعت، عمق و عرض گسترش جریان) پرداخته شد و بیشترین تأکید بر روی قوس‌های متوالی رودخانه بود تا بتوان تأثیر جریان‌های ثانویه و نیروهای گریز از مرکز را بر متغیرهای جریان بررسی کرد. برای اندازه‌گیری سرعت جریان و عمق آب از دستگاه سرعت‌سنج مولینه و شاخص اندازه‌گیری استفاده شد (تصویر شماره ۴). همان‌طور که در تصویر شماره ۵ مشاهده می‌شود، سرعت جریان با استفاده دستگاه سرعت‌سنج از ساحل سمت چپ تا راست و از سطح آب تا کف بستر به فواصل ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ از عمق، اندازه‌گیری شد (علیزاده، ۱۳۸۹).

نظر به اینکه در جریان‌های سیلابی، مقدار سرعت در نقاط

ابعاد ۸ میکرون در حالت پانکروماتیک می‌باشد. در خصوص نقشه توپوگرافی با قدرت تفکیک مکانی ۲ و ۵ متر، این لایه رقومی ارتفاعی (DEM) بزرگ‌مقیاس که از طریق نقشه‌برداری با پهباد در سال ۱۴۰۲ تولید شده است از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان لرستان دریافت و با استفاده از تعدادی نقاط کنترلی با دوربین نقشه‌برداری میدانی، صحت‌سنجی گردید (تصویر شماره ۳). نقشه توپوگرافی بزرگ‌مقیاس به فرمت hdf برای بارگذاری به نرم‌افزار HEC-RAS تبدیل شدند. پس از ورود داده‌های هندسی به محیط نرم‌افزار و تعیین مرزها، محدوده موردنظر با استفاده از روش‌های جبری و محاسباتی شبکه‌بندی شد. ابعاد بهینه شبکه بر مبنای دقت لازم و زمان اختصاص یافته به‌منظور انجام محاسبات، انتخاب شده است (تصویر شماره ۴).



تصویر ۴. نمایی شبکه محاسباتی مورد استفاده برای شبیه‌سازی دویبعی توسط HEC-RAS ۵.۰.۷



تصویر ۵. نحوه اندازه‌گیری سرعت جریان در بازه مکانی مورد مطالعه

نقش کلیه عوامل نامبرده را در محاسبات خود وارد می‌کند (آرسمنت و اشنایدر ۱۴، ۱۹۸۹).

نحوه برآورد ضریب زبری مانینگ در این روش با فرمول شماره ۱ بیان می‌شود:

۱.

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \times m$$

که در این رابطه عوامل معادله به ترتیب عبارتند از:

n : ضریب زبری مانینگ ترکیبی

n_b : ضریب زبری پایه باتوجه به جنس بستر و دانه‌بندی مصالح کف رودخانه در حالت رودخانه صاف و مستقیم

n_1 : ضریب زبری مربوط به نامنظمی در سطح بستر رودخانه

n_2 : ضریب زبری مربوط به تغییرات سطح مقطع رودخانه

n_3 : ضریب زبری مربوط به وجود موانع در مسیر رودخانه

n_4 : ضریب زبری مربوط به وضعیت پوشش گیاهی

m : ضریب زبری مربوط به درجه پیچ و خم مسیر رودخانه

محدوده و نحوه انتخاب این ضرایب در جداول و دستورالعمل‌های موجود در مراجع معتبر هیدرولیکی ارائه شده است که در این بین کتاب هیدرولیک کانال‌های باز، اثر چاو (Chow) و نیز کتاب هیدرولیک کانال‌های باز اثر فرنچ (French) که از منابع مهم و معتبر در این زمینه می‌باشند، مورد توجه قرار گرفته‌اند (ترین و همکاران ۱۵، ۲۰۲۱). محدوده این ضرایب برای اجزاء مختلف

مختلف عرض رودخانه و همچنین در اعماق آب متغیر و همراه با تلاطم است، سرعت متوسط در طول هر مقطع (باتوجه به عرض هر مقطع) حداقل در ۶ نقطه و حداکثر ۱۰ نقطه با فواصل مساوی از عمق آب اندازه‌گیری شد.

همان‌طور که در جداول شماره ۱ و ۲، مشاهده می‌شود برای دبی‌های اندازه‌گیری‌شده در ماه فروردین و آبان ۱۴۰۳ به ترتیب با دبی ۳۴ و ۱۵ مترمکعب بر ثانیه، پارامترهایی از قبیل سرعت، دبی و عمق جریان در مقاطع اندازه‌گیری‌شده ارائه شده است. معیار اندازه‌گیری میدانی عمق و عرض جریان دبی سیلابی (۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه) براساس نتایج داغاب و پهنه سیلاب تعیین شده توسط شرکت آب منطقه‌ای استان لرستان می‌باشد. به عبارت دیگر بر اساس حد پهنه سیل و اختلاف ارتفاع بین خط داغاب و تراز ارتفاعی در نقاط مختلف یک مقطع عرضی، عمق جریان سیل در نقاط مختلف یک مقطع به دست آمد و به عنوان معیارهایی برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت.

تعیین ضریب زبری برای قلمرو بازه مکانی مورد مطالعه

شناخت عوامل مؤثر در ضریب زبری مانینگ راه مناسبی برای برآورد صحیح‌تر و دقیق‌تر این ضریب است. این عوامل عبارت‌اند از: زبری بستر رودخانه یا جنس و نوع دانه‌بندی مواد بستر، میزان ناهمواری در سطح بستر رودخانه، وجود موانع در مسیر جریان رودخانه و تغییرات در مقاطع آن، نوع و تراکم پوشش گیاهی، شکل مسیر و ریخت‌شناسی رودخانه و حتی شرایط هیدرولیکی مثل عمق و دبی جریان که علاوه بر تأثیر در افت طولی در مسیر جریان تا حدودی دربرگیرنده افت‌های ناشی از تغییر شکل جریان (افت‌های موضعی) نیز هستند. از میان روش‌های موجود در برآورد ضریب زبری مانینگ، روش معروف کاون (Cowen)

14. Arcement and Schneider

15. Trinh



جدول ۱. مقادیر پارامترهای سرعت، عمق و دبی جریان اندازه‌گیری‌شده در مقاطع مختلف (فروردین سال ۱۴۰۳)

مقاطع اندازه‌گیری‌شده	سرعت در عمق ۲/۲ (m/s)	سرعت در عمق ۲/۴ (m/s)	سرعت در عمق ۲/۶ (m/s)	سرعت در عمق ۲/۸ (m/s)	سرعت متوسط (m/s)	عمق متوسط جریان (m)	دبی جریان (s/m ^۳)
مقطع (A)	۲/۴	۱/۸	۱/۲	۰/۸۵	۱/۵	۰/۸۸	۳۴
مقطع (B)	۲/۱	۱/۶۸	۱/۱	۰/۷۳	۱/۲۵	۰/۹۲	۳۴
مقطع (C)	۲/۶۵	۲	۱/۲	۱	۱/۶۲	۱/۰۵	۳۴
مقطع (D)	۱/۸۷	۱/۱۶	۰/۹۸	۰/۶۳	۱/۱	۰/۸۵	۳۴

جدول ۲. مقادیر پارامترهای سرعت، عمق و دبی جریان اندازه‌گیری‌شده در مقاطع مختلف (آبان سال ۱۴۰۳)

مقاطع اندازه‌گیری‌شده	سرعت در عمق ۲/۲ (m/s)	سرعت در عمق ۲/۴ (m/s)	سرعت در عمق ۲/۶ (m/s)	سرعت در عمق ۲/۸ (m/s)	سرعت متوسط (m/s)	عمق متوسط جریان (m)	دبی جریان (s/m ^۳)
مقطع (A)	۱/۳۵	۰/۹۵	۰/۸	۰/۷۲	۰/۹۶	۰/۵	۱۵
مقطع (B)	۱/۲	۰/۹۲	۰/۷۴	۰/۶۸	۰/۹	۰/۶۲	۱۵
مقطع (C)	۱/۴	۱	۰/۷۷	۰/۷۴	۱/۰۵	۰/۷۴	۱۵
مقطع (D)	۱/۱	۰/۸۲	۰/۶۴	۰/۵۷	۰/۸	۰/۴۳	۱۵

تعیین شرایط مرزی

شرایط مرزی شامل جریان‌های ورودی و خروجی بازه‌های مکانی می‌باشد. باتوجه به ماندگاری یا غیرماندگاری جریان و اطلاعات در دسترس (هیدروگراف دبی، تراز سطح آب و رابطه دبی - تراز سطح آب) به‌عنوان شرایط مرزی جریان در نظر گرفته می‌شوند. در بازه مورد مطالعه، شرایط مرزی برای شبیه‌سازی جریان رودخانه در شرایط غیرماندگار از آمار رخدادهای مشاهداتی ایستگاه هیدرومتری چم انجیر برای سه واقعه ۱. واقعه سیل فروردین ۱۳۹۸ و ۲. دبی جریان آب مورخ ۱۴۰۳/۰۱/۲۴ و

رودخانه در منبع آرسمنت و اشنایدر (۱۹۸۹) ارائه شده است. به‌منظور تعیین ضریب زبری، ابتدا بر اساس بازدیدهای صحرایی از رودخانه و مشاهده تغییرات پارامترهای مؤثر در تعیین ضریب زبری، محدوده مورد مطالعه براساس وضعیت مورفولوژیکی و کاربری‌ها همگن‌بندی شدند. سپس ضریب زبری کناره‌های هر بازه باتوجه به عکس‌ها و توصیفات مندرج در مرجع چاو و همچنین سایر کتب و مراجع دیگر مثل مرجع USGS، تعیین شده‌اند. مقادیر ضریب زبری بستر رودخانه باتوجه به تمام مؤلفه‌های روش کاون، برای محدوده‌های مختلف تعیین گردید.

جدول ۳. مقایسه متغیر سرعت جریان (m/s) در حالت تغییر ضریب زبری و ابعاد لایه رقمی ارتفاعی برای دبی ۴۳ و ۵۱ (m^۳/s)

واقع و مقدار سیل	مقاطع اندازه‌گیری شده	پارامتر متوسط سرعت جریان اندازه‌گیری شده (m/s)	پارامتر سرعت جریان (V) پیش‌بینی شده توسط مدل (m/s)					
			لایه رقمی ارتفاعی با ابعاد ۵ متر	لایه رقمی ارتفاعی با ابعاد ۲ متر	لایه رقمی ارتفاعی با ابعاد نیم متر	لایه رقمی ارتفاعی با ابعاد ۵ متر	لایه رقمی ارتفاعی با ابعاد ۲ متر	لایه رقمی ارتفاعی با ابعاد نیم متر
			زبری (۰/۰۳۳-۰/۰۵۲)	زبری (۰/۰۳۴-۰/۰۶۴)	زبری (۰/۰۳۳-۰/۰۵۲)	زبری (۰/۰۳۴-۰/۰۶۴)	زبری (۰/۰۳۳-۰/۰۵۲)	زبری (۰/۰۳۴-۰/۰۶۴)
دبی ۳۴ مترمکعب بر ثانیه ثبت شده در فروردین سال ۱۴۰۳	مقطع A	۱/۵	۱/۵۶	۱/۳۵	۱/۶۲	۱/۳۷	۱/۷۸	۱/۶
	مقطع B	۱/۲۵	۱/۲۹	۱/۱۱	۱/۴۱	۱/۱۴	۱/۵۵	۱/۴۳
	مقطع C	۱/۶۲	۱/۷۳	۱/۵۸	۱/۷۲	۱/۷	۱/۷۸	۱/۶۸
	مقطع D	۱/۱	۱/۱۸	۰/۹۰	۱/۲۲	۰/۹۲	۱/۳۶	۱/۳۴
دبی ۱۵ مترمکعب بر ثانیه ثبت شده در آبان سال ۱۴۰۳	مقطع A	۰/۹۶	۱/۰۹	۰/۷۵	۱/۳۴	۰/۷۸	۱/۵۴	۱/۳۶
	مقطع B	۰/۹	۱/۰۲	۰/۶	۱/۲۵	۰/۷	۱/۳۳	۱/۳
	مقطع C	۱/۰۵	۱/۱۴	۰/۸۱	۱/۳۳	۰/۸۵	۱/۴۶	۱/۴
	مقطع D	۰/۸	۰/۷۴	۰/۶۸	۱/۰۵	۰/۷	۱/۱۸	۱/۱۵

جدول ۴. مقایسه پارامتر عمق جریان (m) در حالت تغییر ضریب زبری و ابعاد لایه رقومی ارتفاعی

واقع و مقدار سیل	مقاطع اندازه گیری شده	پارامتر متوسط عمق و عرض گسترش آب اندازه گیری شده (m)	پارامتر عمق آب پیش بینی شده توسط مدل (m)					
			لایه رقومی ارتفاعی با ابعاد ۲ متر		لایه رقومی ارتفاعی با ابعاد ۵ متر		لایه رقومی ارتفاعی با ابعاد ۵ متر	
			عمق	زبری	زبری	زبری	زبری	زبری
			عرض	(+/-0.34)	(+/-0.34)	(+/-0.34)	(+/-0.34)	(+/-0.34)
دبی ۳۴ مترمکعب بر ثانیه (فروردین سال ۱۴۰۳)	مقطع A	۳۳	۰/۸۸	۰/۸۲	۰/۶۸	۱/۰۲	۱	۱/۱۲
	مقطع B	۲۹	۰/۹۲	۱/۰۳	۰/۷۸	۱/۱۵	۱/۱۴	۱/۲۴
	مقطع C	۲۲	۱/۰۵	۰/۹۱	۰/۹۳	۱/۱۷	۱/۱۳	۱/۲۶
	مقطع D	۳۷	۰/۸۵	۰/۸۸	۰/۷۶	۱/۰۲	۱	۱/۱۲
دبی ۱۵ مترمکعب بر ثانیه (آبان سال ۱۴۰۳)	مقطع A	۲۴	۰/۵	۰/۵۶	۰/۳۳	۰/۷	۰/۶۷	۰/۸
	مقطع B	۲۱	۰/۶۲	۰/۵۸	۰/۵۱	۰/۷۸	۰/۷۱	۰/۸۶
	مقطع C	۱۸	۰/۷۴	۰/۶۷	۰/۶۲	۰/۸۶	۰/۸	۰/۹۵
	مقطع D	۲۷	۰/۴۳	۰/۴۸	۰/۳۹	۰/۵۸	۰/۵۳	۰/۷۵
دبی ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه (فروردین سال ۱۳۹۸)	مقطع A	۲۵۷	۲/۷۴	۲/۹۵	۳/۱	۳/۲	۳/۱	۳/۴
	مقطع B	۴۳۷	۱/۹۵	۱/۸۷	۱/۷۲	۲/۲	۲/۱۲	۲/۴
	مقطع C	۵۹۸	۱/۳	۱/۲۵	۱/۱۸	۱/۴	۱/۳۶	۱/۶
	مقطع D	۵۸	۴/۳۶	۴/۴۸	۴/۱	۴/۷	۴/۵۳	۴/۸۲

۳- دبی جریان آب مورخ ۱۴۰۳/۰۸/۲۵ در نظر گرفته شده است.

واسنجی مدل

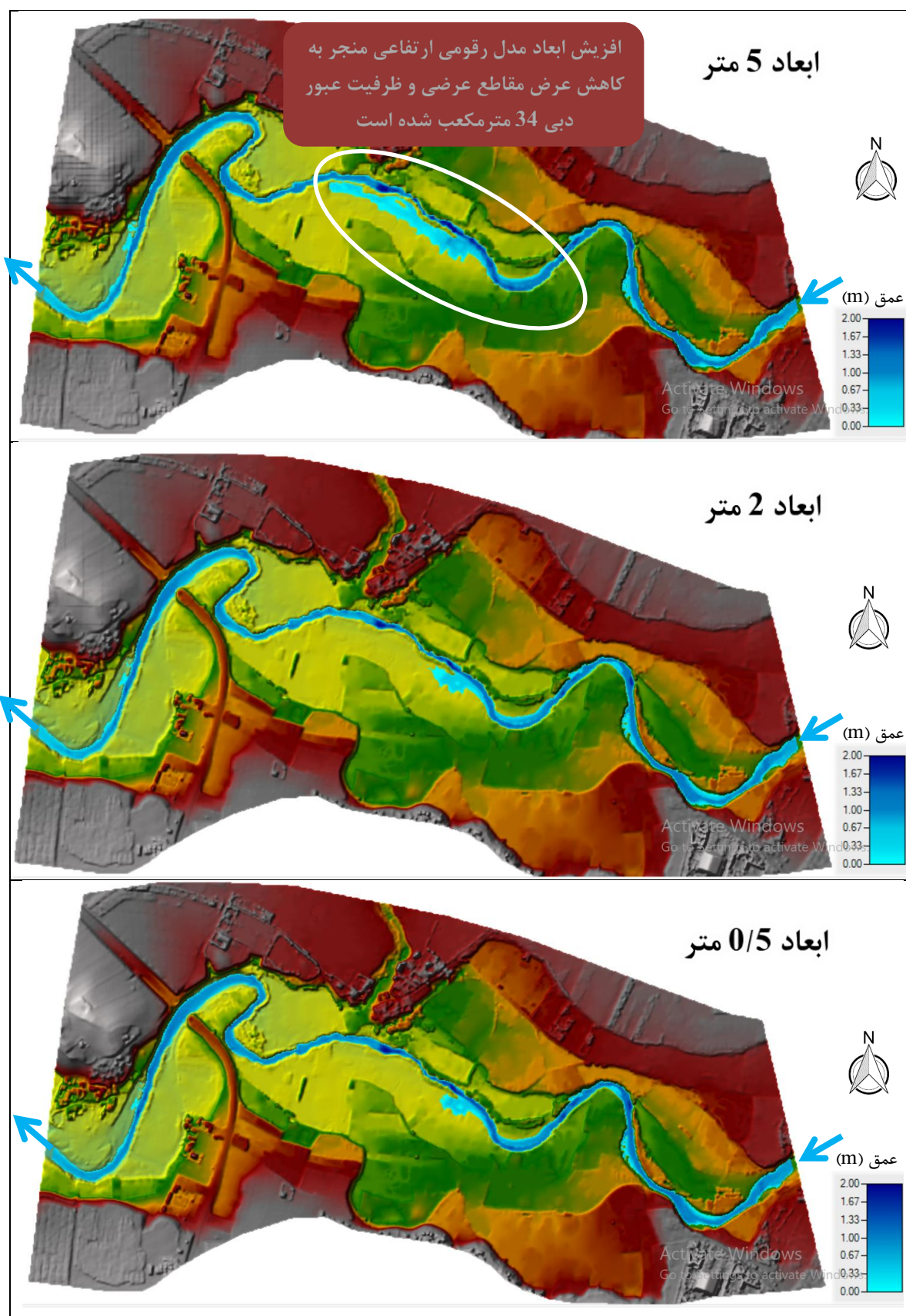
مواجه می‌نماید، بنابراین برای این واقعه براساس داده‌های داغاب، عمق سیل و سطح بالای تراز سیل، عملیات وانسجی انجام شد (پوینز و تیم، ۲۰۱۹).

در این تحقیق واسنجی مدل با بهینه‌سازی مقادیر ضریب زبری مانینگ برای رخداد سیل فروردین سال ۱۳۹۸ (حداکثر پیک روزانه معادل ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه) براساس تراز داغاب و عرض گسترش سیل و همچنین برای هیدروگراف جریان آب در فروردین و آبان سال ۱۴۰۳ براساس اندازه‌گیری‌های میدانی متغیرهای جریان شامل عمق و سرعت در چهار مقطع اندازه‌گیری از باز مکانی مورد مطالعه انجام شد.

در شبیه‌سازی جریان سیلابی ضریب زبری مانینگ رودخانه حساس‌ترین پارامتر محسوب می‌شود. برای شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده مدل دو بعدی HEC-RAS در بازه موردنظر، مقادیر مذکور رودخانه و دشت سیلابی لازم است با تنظیم مجموعه‌ای از پارامترها تابع هدف بهینه‌سازی شوند (ترین و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین کمبود و عدم دسترسی به سوابق ثبت‌شده سیل‌های تاریخی بزرگ مانند واقعه سیل فروردین ۱۳۹۸ در محدوده مورد مطالعه، واسنجی مدل را با مشکل جدی

جدول ۵. نتایج مقایسه سرعت جریان، عمق آب مشاهداتی و برآوردی براساس سه مدل رقومی ارتفاعی و دو معیار آماری EPM و ESMR

واقع و مقدار سیل	نوع روش	پارامتر سرعت جریان آب					
		لایه رقومی ارتفاعی با ابعاد			لایه رقومی ارتفاعی با ابعاد		
		۰/۵ متر	۰/۲ متر	۰/۰۵ متر	۰/۵ متر	۰/۲ متر	۰/۰۵ متر
دبی ۳۴ مترمکعب بر ثانیه (فروردین سال ۱۴۰۳)	RMSE	۰/۳۵	۰/۴۲	۰/۴۸	۰/۷۵	۰/۸۶	۰/۹۳
	MAPE	۰/۲۷	۰/۳۳	۰/۳۵	۰/۴۷	۰/۵۲	۰/۵۸
دبی ۱۵ مترمکعب بر ثانیه (آبان سال ۱۴۰۳)	RMSE	۰/۲۸	۰/۳۳	۰/۳۷	۰/۵۴	۰/۶۲	۰/۶۶
	MAPE	۰/۲۷	۰/۲۸	۰/۳۱	۰/۳۹	۰/۴۷	۰/۵۴
دبی ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه (فروردین سال ۱۳۹۸)	RMSE	-	-	-	۰/۹۸	۰/۱۲	۰/۱۳
	MAPE	-	-	-	۰/۶۴	۰/۷۲	۰/۸۹



تصویر ۶. تصویر توزیع متغیر عمق جریان با دبی ۴۳ مترمکعب بر ثانیه (رخداد فروردین سال ۱۴۰۳) برای سه MED با ابعاد ۵، ۲ و ۰/۵ متر

آنالیز حساسیت مدل HEC-RAS نسبت به دقت و ابعاد لایه‌های
رقومی ارتفاعی

در این تحقیق علی‌رغم شبیه‌سازی و تحلیل نقشه خطر سیل، اما تمرکز اصلی روی آنالیز حساسیت مدل HEC-RAS نسبت به دقت و ابعاد لایه رقومی ارتفاعی است. همان‌طور که اشاره گردید یکی از مهم‌ترین منابع عدم قطعیت در نتایج مدل‌های هیدرولیکی مربوط به عدم قطعیت مربوط به مدل و پارامترها است و از طرفی حساس‌ترین عوامل در این بخش، تهیه مدل رقومی ارتفاعی با دقت مناسب به‌عنوان داده توپوگرافی بزرگ‌مقیاس است. تغییر در دقت و ابعاد مدل رقومی ارتفاعی به تغییر در هندسه کانال رودخانه و به تبع تغییر در الگوی متغیرهای جریان آب منجر می‌شود. لذا در این پژوهش سعی گردید تا ضمن بیان منابع عدم قطعیت، به ارزیابی حساسیت مدل دو بعدی HEC-RAS نسبت به دقت و ابعاد مدل رقومی ارتفاعی پرداخته شود. در این خصوص سه لایه رقومی ارتفاعی با دقت تفکیک ۰/۵، ۲ و ۳ متر مورد تحلیل قرار گرفتند.

نتایج شبیه‌سازی شامل عمق و سرعت جریان آب براساس سه لایه رقومی ارتفاعی فوق‌الذکر با مقادیر اندازه‌گیری‌شده در چهار مقطع عرضی از بازه مورد مطالعه برای دبی‌های مذکور مقایسه گردید. تحلیل‌های انجام‌شده از طریق ارزیابی پارامترهای اندازه‌گیری‌شده (عمق، سرعت و عرض گسترش جریان) و نتایج شبیه‌سازی چهار مقطع مشاهداتی، همراه با معیارهای آماری ارزیابی شامل جذر میانگین مربع خطا (RMSE) و میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) انجام شد که روابط آن‌ها در فرمول‌های شماره ۲ و ۳ قابل مشاهده است:

$$2. \text{R.M.S.E} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_o - Q_e)^2}$$

که در این معادله، Q_o مقدار مشاهداتی در طبیعت و Q_e مقدار محاسباتی مدل است.

$$3. \text{M.A.P.E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_t - \hat{y}_t}{y_t} \right| * 100$$

که در این معادله، y_t مقدار مشاهداتی در طبیعت و $\hat{y}_t$ مقدار محاسباتی مدل است.

یافته‌ها

در این تحقیق برای شبیه‌سازی متغیرهای جریان آب، از سه لایه‌های رقومی ارتفاعی با ابعاد ۰/۵، ۲ و ۵ متر استفاده شد. نتایج آماری شبیه‌سازی سرعت، عمق و عرض گسترش جریان برای این سه لایه‌های رقومی ارتفاعی در مقایسه با نتایج اندازه‌گیری‌شده در مقاطع مختلف (C، B، A و D) در جدول‌های شماره ۳ و ۴ و تصاویر شماره ۶ و ۷ ارائه شده است.

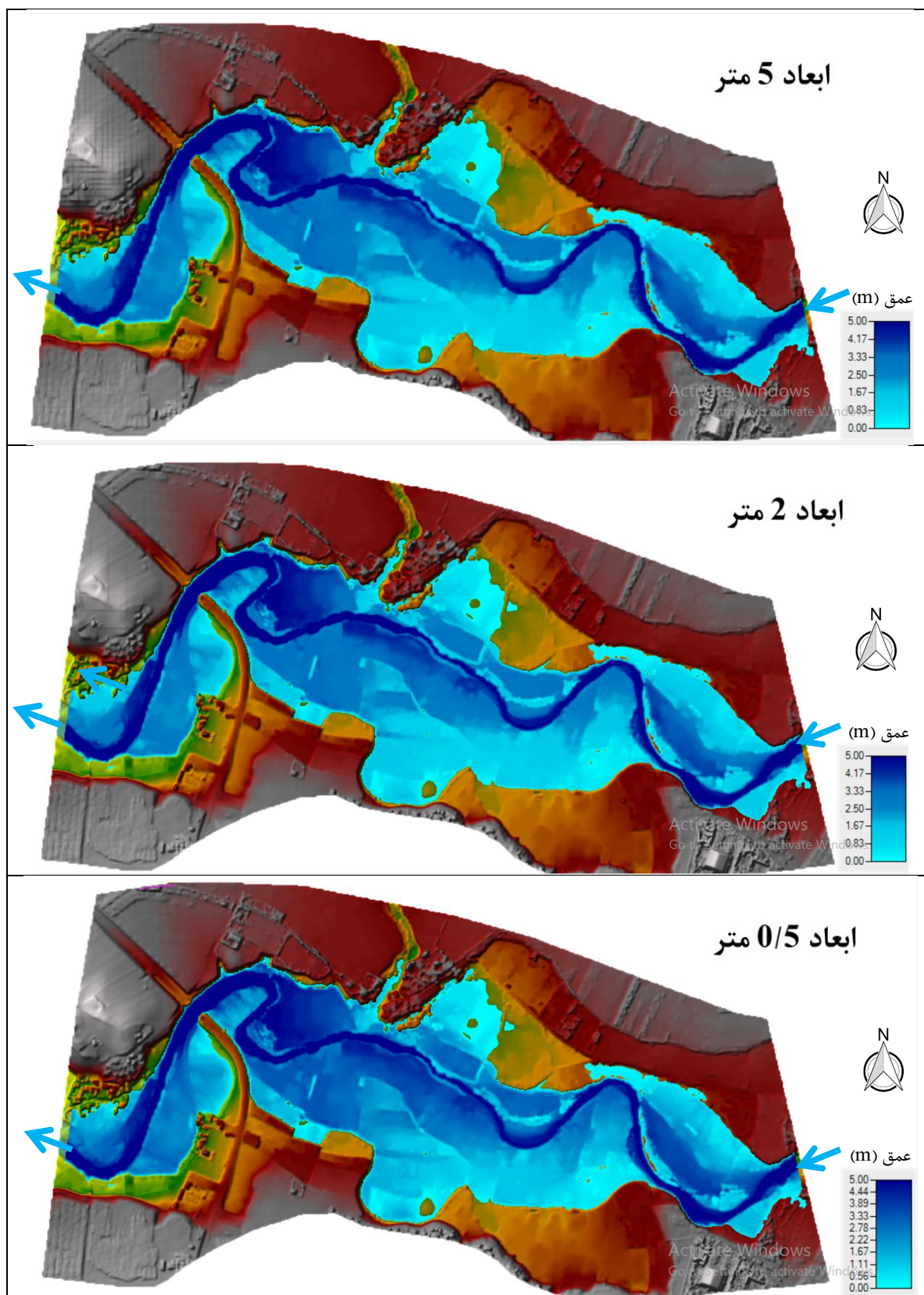
همان‌گونه که در جدول شماره ۳ و تصویر شماره ۶ مشاهده می‌شود، به‌طور کلی برای دبی اندازه‌گیری‌شده در فروردین و آبان سال ۱۴۰۳، نزدیک‌ترین مقادیر پیش‌بینی‌شده نسبت به اندازه‌گیری‌های مشاهداتی (متغیرهای سرعت و عمق و عرض گسترش) جریان آب در ۴ مقطع اندازه‌گیری، به‌ترتیب مربوط به لایه رقومی ارتفاعی با ابعاد ۰/۵، ۲ و ۵ متر و همچنین ضریب زبری در دامنه (۰/۳۳ تا ۰/۶۳) است. در شرایط دبی‌های مذکور، اختلاف مقادیر برآوردی متغیرهای جریان آب با استفاده از لایه رقومی ارتفاعی با ابعاد ۵ متر نسبت به لایه‌ها با ابعاد ۰/۵ و ۲ متر معنادار است. این امر به‌دلیل تغییر هندسه کانال مقطع پر رودخانه با تغییر ابعاد لایه رقومی ارتفاعی اتفاق می‌افتد. به‌ویژه، این تغییر روی عرض کانال مقطع پر تأثیر گذاشته است و نتایج نشان می‌دهد با افزایش ابعاد لایه رقومی ارتفاعی، عرض مقطع پر کانال رودخانه کاهش می‌یابد. لذا این تغییرات در هندسه کانال، به تغییر عمق و سرعت جریان آب در کانال مقطع lk_v پر شده است.

از طرف دیگر، همان‌طور که در جدول شماره ۴ و تصویر شماره ۷ نشان داده شده است، برای واقعه فروردین سال ۱۳۹۸ با دبی ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه، مشابه دبی‌های اندازه‌گیری‌شده در فروردین و آبان سال ۱۴۰۳، نزدیک‌ترین مقادیر پیش‌بینی‌شده نسبت به اندازه‌گیری‌های مشاهداتی (متغیرهای عمق و عرض گسترش) جریان آب در ۴ مقطع اندازه‌گیری به‌ترتیب مربوط به لایه رقومی ارتفاعی با ابعاد ۰/۵، ۲ و ۵ متر و همچنین ضریب زبری در دامنه (۰/۳۳ تا ۰/۶۳) است.

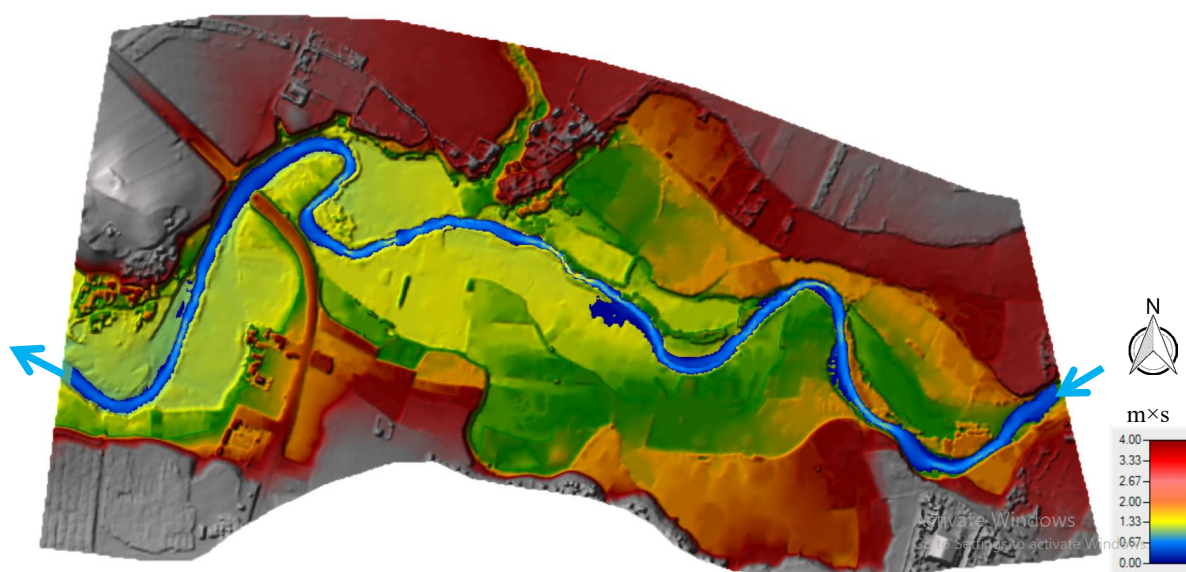
با این حال نتایج این تحقیق نشان می‌دهد در شرایط دبی سیلابی (واقعه فروردین سال ۱۳۹۸ با دبی ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه)، اختلاف متغیرهای جریان سیلاب (عمق و سرعت جریان) بین سه مدل رقومی ارتفاعی (۰/۵، ۲ و ۳ متر) معنادار نیست. بنابراین هنگامی دبی جریان آب به حدی افزایش یابد که از لبه مقطع پر کانال عبور کند و وارد دشت سیلابی شود و عرض گسترش سیل چندین برابر عرض سطح آب در کانال مقطع پر شود، تأثیر تغییر ابعاد از ۲ به ۵ متر بر متغیرهای عمق و سرعت جریان سیل معنادار نیست.

در خصوص متغیر عمق جریان برای دبی ۳۴ متر مکعب بر ثانیه، بیشترین میزان عمق جریان به‌علت تنگ‌شدگی کانال در چند مقطع و همچنین نیروی گریز از مرکز در قوس مقعر، معادل ۲ متر است. به‌دلیل وجود انحنای زیاد در قوس‌های بازه مورد مطالعه، حداکثر تغییرات جریان (افزایش سرعت)، در نیمه دوم قوس صورت می‌گیرد (تصویر شماره ۶).

از طرف دیگر همان‌طور که در تصویر شماره ۷ نشان داده شده است برای دبی ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه (واقعه فروردین سال ۱۳۹۸)، بیشترین میزان عمق جریان در محل پل (مقطع D) معادل ۵ متر است. کل قلمرو بازه مورد مطالعه ظرفیت عبور این



تصویر ۷. تصویر توزیع متغیر عمق جریان با دبی ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه (رخداد فروردین سال ۱۳۹۸) برای سه MED با ابعاد ۵، ۲ و ۰/۵ متر

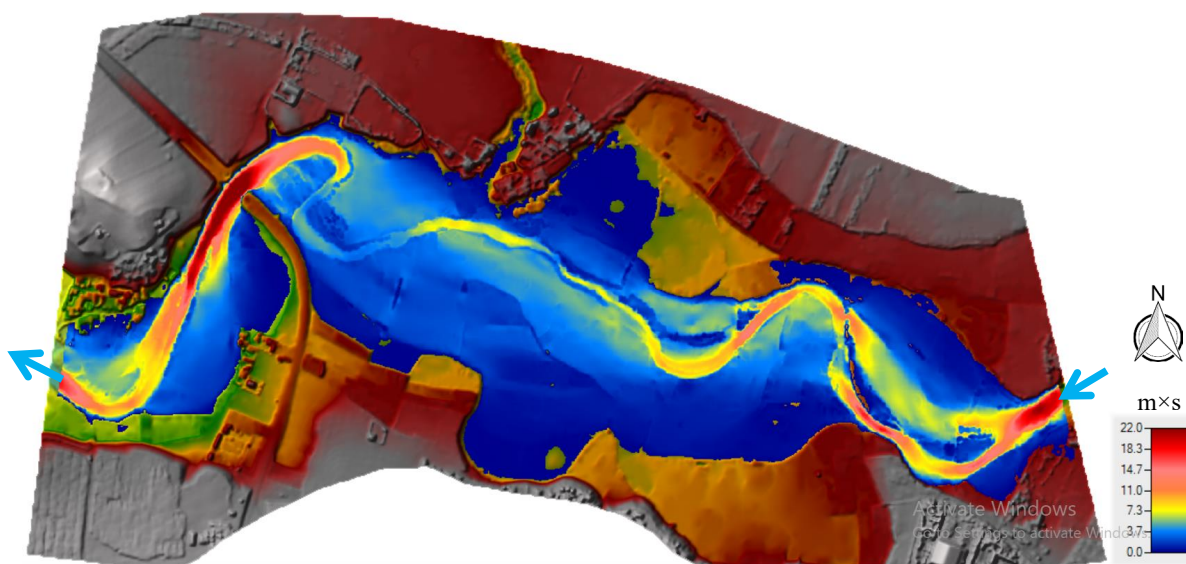


تصویر ۸. توزیع متغیر خطر سیل (عمق × سرعت) برای دبی ۴۳ (m^3/s) و مدل رقومی ارتفاعی با ابعاد نیم متر

بیشترین میزان سرعت جریان آب به دلیل عامل محدودیت عرضی در محل پل (مقطع D) می باشد.

همان طور که در تصاویر شماره ۸ و ۹ نشان داده شده است. برای دبی ۳۴ مترمکعب رو مدل رقومی ارتفاعی نیم متر، باتوجه به اینکه بازه مورد مطالعه ظرفیت عبور این جریان را دارد، مقادیر کمی پهنه خطر سیل کمتر از حد آستانه می باشد. بنابراین میزان خطر سیل در این شرایط در حالت نرمال است. در خصوص سیل فروردین ۱۳۹۸ با دبی ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه، به طور کلی حداکثر میزان خطر سیل در کانال مقطع پر بازه مکانی مورد مطالعه می باشد. اما به طور خاص بیشتر میزان عددی خطر سیل در محل قوس سوم/ محدود پل (مقطع D) است. به طور متوسط دامنه

سیل را ندارد، به طوری که سیل در ۹۵ درصد کرانه ها لبریز و به دشت سیلابی گسترش پیدا کرده است. بیشترین عرض گسترش سیل به طول حدود ۶۰۰ متر در مقطع C اتفاق افتاده است و کمترین میزان گسترش سیل به علت وجود عامل محدودیت عرضی در محل پل (مقطع D) می باشد. همچنین برای این واقعه باتوجه به اینکه سیل به صورت وسیع به کرانه ها گسترش یافته است. لذا الگوی سرعت آب تحت تأثیر آشفتگی جریان، گرایش، توپوگرافی و موانع در دشت سیلابی می باشد. برای این شرایط سرعت جریان آب در قلمرو بازه مورد مطالعه فاقد الگوی پایدار می باشد و با تغییرات میزان دبی، الگوی سرعت جریان در کل قلمرو بازه مکانی مورد مطالعه تغییر می کند. برای این رخداد



تصویر ۹. توزیع متغیر خطر سیل (عمق × سرعت) برای دبی ۱۰۰۰ (m^3/s) و مدل رقومی ارتفاعی با ابعاد نیم متر



داده‌های ارتفاعی می‌تواند به‌عنوان یک عامل مؤثر در کاهش عدم قطعیت پیش‌بینی‌های سیلاب محسوب شود.

تحلیل‌ها نشان داد تغییرات هندسی ناشی از دقت متفاوت مدل‌های رقومی ارتفاعی بر عمق، سرعت و عرض گسترش جریان تأثیر عمده‌ای دارد. به‌ویژه، در شرایطی که دبی جریان آب به حدی افزایش یابد که از لبه مقطع پر کانال عبور کند، تأثیر دقت مدل رقومی ارتفاعی بر پیش‌بینی‌های سیلاب به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. این نکته حائز اهمیت است، زیرا در شرایط سیلابی، تغییرات هندسی کانال و توپوگرافی می‌تواند به کاهش دقت پیش‌بینی‌ها منجر شود.

برای دبی ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه باتوجه‌به اینکه سیل به‌صورت وسیع به کرانه‌ها گسترش یافته است. لذا الگوی سرعت آب تحت تأثیر آشفتگی جریان، گرایش جریان، توپوگرافی و موانع در دشت سیلابی می‌باشد. برای این شرایط سرعت جریان آب در قلمرو بازه مورد مطالعه فاقد الگوی پایدار می‌باشد و با تغییرات میزان دبی، الگوی سرعت جریان در کل قلمرو بازه مکانی مورد مطالعه تغییر می‌کند.

نتایج تحلیل حساسیت نشان داد این مدل به روش حل معادلات حاکم بر جریان حساسیت بالایی دارد. عملکرد مدل در شبیه‌سازی جریان اندازه‌گیری‌شده در ماه فروردین و آبان سال ۱۴۰۳، با استفاده از روش حل موج پخشیده، به مراتب بهتر بود. در مقابل، برای واقعه سیلاب فروردین سال ۱۳۹۸، روش حل معادلات موج دینامیک نتایج بهتری را ارائه داد. شایان ذکر است که در میان خصوصیات هیدرولیکی مختلف، تراز سطح آب کمترین حساسیت را نسبت به معادلات محاسباتی نشان داد.

نتایج این مطالعه می‌تواند به برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه منابع آب و کاهش آسیب‌های ناشی از سیلاب‌ها کمک کند. لذا، سیاست‌گذاران و مدیران منابع آب باید به اهمیت دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی در تصمیم‌گیری‌های مرتبط با مدیریت خطر سیلاب توجه ویژه‌ای داشته باشند تا بتوانند برنامه‌های مؤثری را برای کاهش آسیب‌ها و بهبود تاب‌آوری جوامع در برابر سیلاب‌ها تدوین کنند.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

این مقاله نمونه‌های انسانی و حیوانی نداشته است. براین اساس نیاز به کد اخلاق نبود و تمام قوانین اخلاق در پژوهش رعایت شده است.

عرضی گسترش پهنه خطر سیل با مقدار بیشتر از رقم ۱۰ حدود ۱۶۰ متر است. در قوس‌های بازه مورد مطالعه حداکثر میزان خطر سیل در کناره خارجی اتفاق می‌افتد.

جدول شماره ۵ میزان دقت و کارایی مدل در برآورد پارامترهای سرعت جریان و تراز عمق آب براساس سه مدل رقومی ارتفاعی با ابعاد ۵/۰، ۲ و ۵ متر و براساس معیارهای آماری ارزیابی RMSE و MAPE را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این **جدول** مشاهده می‌شود، برای سه رویداد مورد مطالعه، کمترین میزان معیارهای ارزیابی برای مقادیر پیش‌بینی‌شده نسبت به اندازه‌گیری‌های مشاهداتی (متغیرهای سرعت و عمق) مربوط به مدل رقومی ارتفاعی با دقت نیم و سپس ۲ متر است.

بحث

یافته‌های این پژوهش مبنی بر برتری DEM با دقت ۰/۵ متر در شبیه‌سازی سیلاب، با نتایج موتوسامی و همکاران (۲۰۲۱) و فرشته پور و همکاران (۲۰۲۴) همخوانی دارد که نشان دادند DEM‌های با وضوح بالا (۵/۰-۱ متر) خطای پهنه‌بندی سیل به‌صورت معناداری کاهش می‌دهند. مطالعه **پاریزی و حسینی (۱۴۰۲)** نیز در حوضه رودخانه اترک نشان داد مدل TanDEM-X با دقت ۱۲ متر در مقایسه با DEM‌های محلی با دقت ۱ متر، خطای قابل توجهی در برآورد عمق سیل دارد که تأییدکننده اهمیت دقت مکانی DEM است. پیشنهاد این پژوهش برای استفاده از DEM‌های پرتفیک در مدیریت سیل، با توصیه‌های **آفونسو و همکاران (۲۰۱۶)** و **الکساندر و همکاران (۲۰۱۶)** همسو است که بر نقش داده‌های دقیق در کاهش ریسک سیلاب تأکید کردند.

نتیجه‌گیری

از مهم‌ترین منابع عدم قطعیت در نتایج مدل‌های هیدرولیکی مربوط به عدم قطعیت مربوط به مدل و پارامترها است و از طرفی حساس‌ترین عوامل در این بخش، تهیه مدل رقومی ارتفاعی با دقت و ابعاد مناسب است. لذا در این پژوهش سعی شد ضمن شبیه‌سازی نقشه متغیرهای جریان مانند عمق، سرعت و خطر سیل در بازه مکانی به طول ۳ کیلومتر در پایین‌دست شهر خرم‌آباد، به ارزیابی حساسیت مدل دو بعدی HEC-RAS نسبت به دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی با ابعاد ۵/۰، ۲ و ۵ متر پرداخته شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد دقت مدل رقومی ارتفاعی (DEM) نقش حیاتی و کلیدی در بهبود کارایی مدل هیدرولیکی HEC-RAS برای شبیه‌سازی پهنه خطر سیلاب ایفا می‌کند. باتوجه‌به تجزیه و تحلیل‌های انجام‌شده، مشخص شد استفاده از مدل رقومی ارتفاعی با دقت ۰/۵ متر به نتایج شبیه‌سازی نزدیک‌تر به واقعیت نسبت به دو مدل با دقت‌های پایین‌تر (۲ و ۵ متر) منجر می‌شود. این یافته‌ها تأکید می‌کند دقت بالای



حامی مالی

این پژوهش هیچ‌گونه کمک مالی از سازمانی‌های دولتی، خصوصی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت‌نویسندگان

مفهوم‌سازی، روش‌شناسی و نگارش پیش‌نویس اولیه: علی حقی‌زاده و ایرج ویسکرمی؛ نگارش بازبینی و ویرایش، بصری‌سازی و نرم‌افزار: علی حقی‌زاده، ایرج ویسکرمی و ابوالحسن فتح‌آبادی؛ سرپرستی: علی حقی‌زاده؛ تأیید نسخه نهایی: همه نویسندگان.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.



References

- Alexander, M., Priest, S., & Mees, H. J. (2016). A framework for evaluating flood risk governance. *Environmental Science & Policy*, 64(1), 38-47. [DOI:10.1016/j.envsci.2016.06.004]
- Alfonso, L., Mukolwe, M. M., & Di Baldassare, G. (2016). Probabilistic flood maps to support decision-making: Mapping the value of information. *Water Resources Research*, 52(2), 1026-1043. [DOI:10.1002/2015WR017378]
- Alizadeh, A. (2010). [*Principles of applied hydrology* (Persian)]. Mashhad: University in Mashhad. [Link]
- Amrei, D., & Britta, S. (2020). Flood hazard analysis in small catchments: Comparison of hydrological and hydrodynamic approaches by the use of direct rainfall. *Journal of Flood Risk Management*, 13(4), e12626. [DOI:10.1111/jfr3.12639]
- Arcement, G. J., & Schneider, V. R. (1989). *Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains*. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. [DOI:10.3133/wsp2339]
- Brunner, M. I., Seibert, J., & Favre, A. C. (2016). Bivariate return periods and their importance for flood peak and volume estimation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3(6), 819-833. [DOI:10.1002/wat2.1173]
- Costabile, P., Costanzo, C., Ferraro, D., Macchione, F., & Petaccia, G. (2020). Performances of the new HEC-RAS version 5 for 2-D hydrodynamic-based rainfall-runoff simulations at basin scale: Comparison with a state-of-the-art model. *Water*, 12(9), 2326. [DOI:10.3390/w12092326]
- Dalledonne, G., Kopmann, R., & Brudy-Zippelius, T. (2019). Uncertainty analysis of floodplain friction in hydrodynamic models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(8), 3373-3385. [DOI:10.5194/hess-2019-159]
- Dysarz, T., Wicher-Dysarz, J., Sojka, M., & Jaskuła, J. (2019). Analysis of extreme flow uncertainty impact on size of flood hazard zones for the Wronki gauge station in the Warta river. *Acta Geophys*, 67, 661-676. [DOI:10.1007/s11600-019-00264-8]
- Fereshtehpour, M., Esmailzadeh, M., Alipour, R. S., & Burian, S. J. (2024). Impacts of DEM type and resolution on deep learning-based flood inundation mapping. *Earth Science Informatics*, 17(2), 1125-1145. [Link]
- Kavian, A., & Mohammadi, M. (2019). [Effects of Digital Elevation Models (DEM) spatial resolution on hydrological simulation (Persian)]. *Journal of Watershed Management Research*, 10(19), 36-45. [DOI:10.29252/jwmr.10.19.36]
- Koo, H., Iwanaga, T., Croke, B. F., Jakeman, A. J., Yang, J., & Wang, H. H., et al. (2020). Position paper: Sensitivity analysis of spatially distributed environmental models-A pragmatic framework for the exploration of uncertainty sources. *Environmental Modelling & Software*, 134, 104857. [DOI:10.1016/j.envsoft.2020.104857]
- Liu, Z., & Merwade, V. (2019). Separation and prioritization of uncertainty sources in a raster based flood inundation model using hierarchical Bayesian model averaging. *Journal of Hydrology*, 578, 124100. [DOI:10.1016/j.jhydrol.2019.124100]
- Merwade, V., Olivera, F., Arabi, M., & Edleman, S. (2008). Uncertainty in flood inundation mapping: Current issues and future directions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(7), 608-620. [DOI:10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:7(608)]
- Muench, R., Cherrington, E., Griffin, R., & Mamane, B. (2022). Assessment of open-access global elevation model errors impact on flood extents in Southern Niger. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 547. [DOI:10.3389/fenvs.2022.880840]
- Muthusamy, M., Casado, M. R., Butler, D., & Leinster, P. (2021). Understanding the effects of Digital Elevation Model resolution in urban fluvial flood modeling. *Journal of Hydrology*, 596, 126088. [DOI:10.1016/j.jhydrol.2021.126088]
- Parizi, & Hosseini, S. M. (2023). [Estimating the Accuracy of the TanDEM-X Digital Elevation Model in the Simulation of Flood Hydraulic Characteristics (Case Study: Atrak River Basin) (Persian)]. *Geography and Environmental Planning*, 34(2), 113-134. [DOI:10.22108/gep.2022.134293.1533]
- Pinos, J., & Timbe, L. (2019). Performance assessment of two-dimensional hydraulic models for generation of flood inundation maps in mountain river basins. *Water Science and Engineering*, 12(1), 11-18. [DOI:10.1016/j.wse.2019.03.001]
- Roberts, S., Nielsen, O. M., Gray, D., Sexton, J., & Davies, G. (2015). *ANUGA user manual Release 3.0*. Canberra: Australian National University. [DOI:10.13140/RG.2.2.17267.81446]
- Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F. W., Dutta, D., & Kim, S. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling & Software*, 90, 201-216. [DOI:10.1016/j.envsoft.2017.01.006]
- Trinh, M. X., & Molkenthin, F. (2021). Flood hazard mapping for data-scarce and ungauged coastal river basins using advanced hydrodynamic models, high temporal-spatial resolution remote sensing precipitation data, and satellite imageries. *Natural Hazards*, 109(1), 441-469. [DOI:10.1007/s11069-021-04843-1]
- Yin, J., Guo, S., Gentine, P., Sullivan, S. C., Gu, L., & He, S., et al. (2021). Does the hook structure constrain future flood intensification under anthropogenic climate warming? *Water Resources Research*, 57(2), e2020WR028491. [DOI:10.1029/2020WR028491]
- Yeou-Koung, T., & Chi-Leung, W. (2016). *Sensitivity and uncertainty analysis of hydrologic/hydraulic model for Shenzhen River and Northern New Territory Basin in Hong Kong*. Paper presented at: 12th International Conference on Hydroinformatics, Songdo Convensia, Incheon, Korea, August 21-26, 2016. [Link]

This Page Intentionally Left Blank