

Research Paper


Estimation of Flood Impacts on Urban Transportation Time and the Assessment of Its Economic Damage

Mohammadreza Meraji¹, *Jafar Yazdi¹ , Mohammad Shahsavandi¹ , Jamal Aghayari², Amirhosein Abdi²

1. Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
2. Space Research Center, Iranian Space Research Institute, Tehran, Iran.



Citation Meraji, M., Yazdi, J., Shahsavandi, M., Aghayari, J., & Abdi, A. (2026). Estimation of Flood Impacts on Urban Transportation Time and the Assessment of Its Economic Damage. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 15(4):574-599. <https://doi.org/10.32598/DMKP.15.4.882.2>

 <https://doi.org/10.32598/DMKP.15.4.882.2>

ABSTRACT

Background and objective This study investigates urban flood inundation in road networks, its effects on urban traffic, and the estimation of indirect economic losses caused by increased travel time in a region located in northern Tehran. The main objective was to assess how urban flooding affects transportation performance and to quantify the associated economic damages resulting from travel delays.

Method A two-dimensional hydraulic model, MIKE 21, was applied using a 5-m computational mesh and a 1-m digital elevation model over an area of 41.44 km², including several main channels in northeastern Tehran. The model performance was validated at the channel flow scale using field measurements, including water level observations obtained from ultrasonic level sensors and discharge estimations based on the float method. After model implementation, flood inundation extents corresponding to the 10-year and 100-year return periods were derived. To estimate economic losses due to travel delay, the analysis considered the difference between the maximum allowable highway speed under normal and flood conditions, the average cost of one hour of delay, and traffic volume counts recorded on different days of the week.

Results The results showed that the inundation area for the 10-year and 100-year floods was approximately 140 and 640 hectares, respectively. The maximum flow depth and velocity during the 10-year flood were 1.89 m and 2.19 m/s, respectively, while for the 100-year flood they reached 3.83 m and 4.15 m/s. The estimated travel delay losses on Imam Ali, Hakim, and Hemmat highways under the 10-year flood were approximately 2.65, 1.0, and 1.1 billion rials per day, respectively. For the 100-year flood, the corresponding losses were estimated at about 942, 371.4, and 810 billion rials per day in the year 2023.

Conclusion The findings demonstrate that urban flooding can have substantial impacts on transportation system performance and can impose significant indirect economic losses on urban areas through increased travel time. These results highlight the importance of integrating flood hazard assessment with transportation and economic analysis in urban flood risk management.

Keywords Floodplain, 2D Simulation, Economic Damage, Urban Traffic, MIKE21, Delay Time

Article Info:

Received: 06 Aug 2025

Accepted: 28 Oct 2025

Available Online: 01 Jan 2026

* Corresponding Author:

Jafar Yazdi, PhD.

Address: Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Tel: +98 (21) 73932403

E-mail: j_yazdi@sbu.ac.ir



Copyright © 2026 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

In urban areas, many land uses and assets are exposed to flooding. Urban transportation infrastructure is one such example. In everyday life, transportation affects economic well-being, cultural development, social norms, recreational methods, and customs. Economists have estimated the annual contribution of transportation to the gross national product at 16% and its share of industrial employment at 11% of the labor force (Norouzi, 2013). In this context, the transportation system significantly impacts the industry and economy of the country and its people. Furthermore, transportation networks play a crucial role in economic activity by facilitating the movement of people and goods. During extreme weather events, transport infrastructure can suffer direct or indirect damage, posing a threat to human safety and causing widespread disruption with significant economic and social consequences (Pyatkova, 2018). Flooding, particularly due to heavy rainfall, is a major cause of weather-related disruptions in the transport sector. The inundation of highways, streets, and passages during flood conditions can lead to significant direct and indirect economic consequences for society. Indirect losses encompass the cost of delays in passenger travel and the increased fuel consumption resulting from these delays. Despite the paramount importance of this issue, few studies worldwide have examined the economic effects of flooding on urban traffic. The following section will mention some of the research conducted in this field.

Chang et al. 2011 examined the potential impacts of climate change on transportation systems. The study included regional economic impacts resulting from changing transportation conditions in northern Canada and reported that, among all potential climate impacts on transportation, urban flooding had the largest cost impact. They also showed a nonlinear relationship between rainfall changes and flooding in the city, and that the effects on transportation disruption depend on local weather conditions and geometric conditions.

Existing approaches to assess the disruptive effects of flooding on road transport usually ignore the interaction between flooding and the transport system and often assume that a road is either fully usable or completely blocked. This assumption is not consistent with actual observations. Pregolato et al. presented a novel approach to assessing the effects of flooding on roads and showed that the binary assumption of ‘open or closed road’ is not consistent with real-world conditions. By analyzing video

data and safety sources, they developed a relationship between water depth and vehicle speed that had high accuracy ($R^2=0.95$) and indicated that the road only becomes practically impassable at depths greater than 30 cm. The importance of their work lies in the possibility of simply integrating this function with transport models and improving the estimation of delays due to flooding.

Further, (Kasmalkar et al., 2020) focusing on coastal areas, showed that sea level rise and flooding caused by tides and climate change could seriously disrupt urban transport networks. By combining transportation models and flood maps for the San Francisco Bay Area, they found that while employee absences were mostly confined to flooded areas, transportation delays extended further inland. Communities with little access to alternative roads experienced the greatest disruption. Their results also showed that the ‘meter accessibility’ index, as a measure of road network density, is a better predictor of delays than the flood exposure rate alone. In this regard, Choo et al. 2020 simulated rainfall runoff and urban flooding using the S-RAT tool and the FLO-2D model, and extracted rainfall–flood depth and flood–vehicle speed curves. By comparing the model results with the 2011 flood event, they showed that the model has a high level of accuracy and that roads have different degrees of passability depending on rainfall conditions and the depth of flooding. Their findings indicate that these types of models can play a practical role in choosing safer routes for drivers and reducing the disruptive effects of flooding.

He et al. 2021 examined how urban flooding causes delays and reduced access to jobs by increasing public transport delays, rerouting, and reducing transportation speeds. They estimated that these disruptions cost commuters an estimated \$1.2 million per day in economic costs, with low-income groups being most affected. Rajput et al. 2022 analyzed the structure of post-flood traffic networks and found that even after waters receded, significant increases in transportation times—up to 8%—may persist for weeks, with impacts extending beyond the floodplains. Park et al. 2024 examined the economic impacts of floods on transportation and labor force participation using an urban resilience approach. By utilizing network analysis and damage functions, they demonstrated that factors such as sustainability, resource capacity, and recovery rate play a decisive role in reducing the socio-economic costs of floods.

Zeng et al. 2024a analyzed changes in vehicular access during peak and off-peak hours using flood data and WAZE in the Hampton Roads area of the United States. Their results showed that access during morning hours



was reduced by 49.6% for work trips and by 87.9% for non-work trips, with socially vulnerable areas being the most affected. Furthermore, Zeng et al. 2011b showed that frequent flooding in coastal areas, such as Hampton Roads (Virginia), especially during peak hours, significantly reduces access to urban transportation (by up to 88.2% for work trips and up to 99.9% for non-work trips), with socially vulnerable populations being more affected than others. Afsari and Shahsavari examined the spatial distribution of flood resilience in a region of Tehran and found that eastern areas are more resilient than western areas; this finding is significant for analyzing inequality in the impacts of floods on traffic. Finally, Golmohammadi and Shokohi presented an algorithm for estimating damage to passenger cars in floods based on water depth and flow velocity. They evaluated seven theories from the Australian rainfall and runoff (AR&R) Guide and produced risk maps for the Pride 131 vehicle model, showing that combining depth and velocity was more accurate in estimating risk than using depth alone.

Regarding the estimation of the economic impacts of flooding caused by increased urban traffic, no specific, comprehensive, or focused study has been conducted nationwide. Although some studies have examined the technical or hydrological dimensions of flooding in urban environments, less attention has been paid to the economic aspects of disruptions to the transportation system, including increased transportation times, traffic delays, reduced labor productivity, and indirect costs to citizens and the urban economy. This research gap is especially significant in a situation where the country's major cities are facing excessive expansion, inadequate runoff management infrastructure, and an increasing frequency of heavy rainfall. Therefore, this study aims to address this gap by utilizing a combination of hydraulic simulation models, traffic analysis, and economic evaluation to conduct a precise, practical assessment of the economic consequences of flooding on urban traffic, thereby taking an effective step toward improving crisis management and urban planning.

Materials and Methods

Case study

“The studied area was part of the East Tehran flood diversion and is located in the northern half of Tehran. This area extends from the north to Sadr Highway, from the south to Damavand Street, from the east to Imam Ali Highway, and from the west to Shahid Modarres Highway. It includes parts of districts 3, 4, 7, and 8 of Tehran, and the study area is approximately 41.65 km². The run-

off collection channels in this area generally extend north-south along the dominant slope of the city; as a result, they have steep slopes and high flow rates. All channels in the East Tehran Watershed are defined based on different watercourse conditions. The main function of these channels is to collect and transport runoff from the mountainous and urban sub-basins. Figure 1 shows the channels in the studied area: The blue lines represent the main open channels and the red lines represent the main covered channels (Mohab Qods, 2011a). There are various bridges along the eastern flood diversion channel, some of which greatly restrict the flow path and cause water to back up and flow out of the channel during flood conditions (Mohab Qods, 2011). These structures affect the values of precipitation thresholds.

The general relationship between precipitation intensity, duration, and frequency in Tehran, representing the city's short-term precipitation, has been presented by Mahab Ghodss Consulting Engineers Company in the studies for the comprehensive surface water plan (Mahab Ghodss, 2010b):

$$1. i = C_{Alt.RP} D^{-0.645}$$

In Equation 1, i is rainfall intensity (millimeters per hour), D is rainfall duration (minutes), and $C_{Alt.RP}$ is the equation coefficient. This coefficient is selected from the guide table in proportion to the design return period and the average elevation of the (sub)basin. It is also worth noting that in the aforementioned studies, a time pattern of alternating blocks was proposed for creating artificial rainfall or design rainfall (Mahab Ghodss, 2010a).

In this study, rainfall with return periods of 10 and 100 years—standard return periods used in many studies—was used to determine the flood hydrographs entering the channels of the simulation area. These rainfalls were constructed using the method proposed in the Tehran City Surface Water Master Plan. Based on the desired return period, the intensity-duration-frequency (IDF) relationship for Tehran was obtained by considering a 6-hour duration of rainfall intensity and depth. The 6-hour duration was obtained based on the comprehensive plan proposal and by performing sensitivity analysis in the aforementioned studies (Mohab Ghods, 2011b). Then, the precipitation depth was distributed over time using the alternating block method (Chow et al. 1988) to extract the design precipitation hyetograph with the desired return period. This hyetograph was converted into a flood hydrograph with the desired return period using the basin precipitation-runoff model and used in hydraulic modeling.

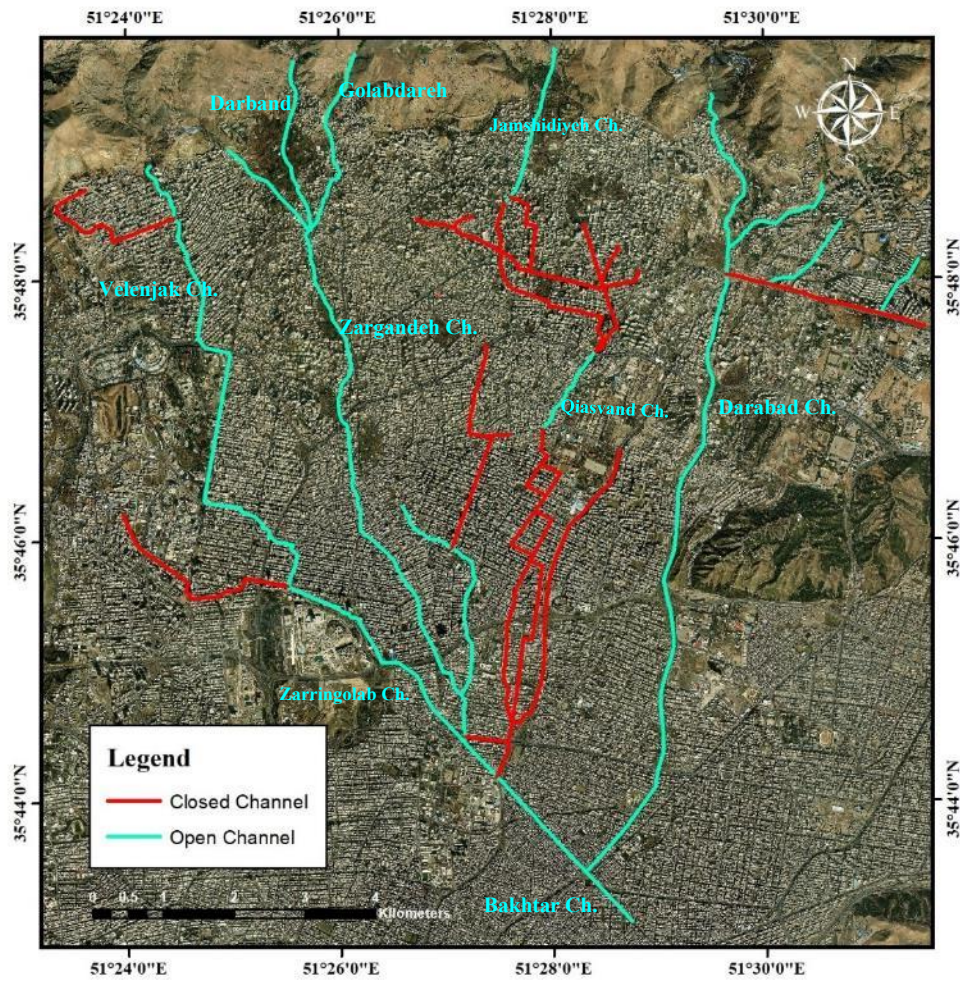


Figure 1. Main channels in the watershed of the East Tehran flood diversion system.

Precipitation-runoff modeling and flood zoning

In this study, EPA-SWMM software was employed as the precipitation-runoff model. SWMM is a dynamic model primarily utilized for the quantitative and qualitative simulation of runoff in urban areas. This model is widely used globally for the planning, analysis, and design of stormwater, combined sewer, sanitary sewer, and other urban drainage systems (Rossman and Huber, 2015). Following the flowchart in Figure 2, sub-basins receive input from precipitation, with some of this input being lost through evaporation and infiltration. To model precipitation losses, the U.S. natural resources conservation service (NRCS) curve number (CN) method was applied. Excess precipitation was then routed through Manning and continuity equations at each time step at the sub-basin level to obtain the surface runoff hydrographs for the sub-basins. Within this model, the sub-basins were treated as equivalent rectangles. Surface runoff hydrographs from the sub-basins are numerically routed through the channel system by solving the Saint-Venant Equation (SVE).

It is important to note that sensitivity analysis of the parameters and calibration for the studied area have been previously conducted by Kamver. For hydraulic modeling and flood zoning, the MIKE 21 model (DHI, 2012) was utilized.

The main equations for the flow, which are solved numerically by the MIKE21 HD model, include the continuity and momentum equations (DHI, 2012):

Equation 2:

$$2. \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0$$

Momentam formula (Equation 3) in the x direction:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{H} \right) + gy \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 H^2} - fVV_x + \frac{y}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0$$

3.

$$- \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{xy}) \right] + \Omega q$$

Momentam formula (Equation 4) in the y direction:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{H} \right) + gy \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 H^2} - fVV_y + \frac{y}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0$$

4.

$$- \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{yy}) \right]$$

The parameters and variables in these equations are as follows:

$H(x, y, t) = \xi - d$: Depth of water column (m); $\xi(x, y, t)$: Water level at the cross-section (m); $d(x, y, t)$: Water depth varying with time (m); $C(x, y)$: Chézy roughness coefficient ($m^{1/2}/s$); u, v : Average velocity at depth in the x and y directions; ρ_w : Water density (kg/m^3); $\rho(x, y, t) = H \cdot u(x, y, t)$: Current density in the x direction ($m^3/(s \cdot m)$); $\rho(y, x, t) = H \cdot v(x, y, t)$: Current density in the y direction ($m^3/(s \cdot m)$); g : Acceleration of gravity (m/s^2); $f(v)$: Wind friction coefficient; V, V_x, V_y : Wind speed and its components in the x and y directions (m/s); $\Omega(x, y)$: Coriolis coefficient depending on longitude (S^{-1}); $p_a(x, y, t)$: Atmospheric pressure ($kg/(m \cdot s^2)$); $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$: Effective shear stress components

The MIKE21 HD software employs an implicit solution method called ADI to solve the algebraic system derived from the discretization of the continuity and probability equations. In this method, the matrix of equations obtained in each direction is solved using the dual sweep algorithm. To construct the geometry of the channels and passages, a digital surface elevation model (DSM) with an accuracy of 1 m was utilized. For this purpose, the purchased GeoEye-II satellite image was used. Manning coefficient values for different land uses and roads were incorporated into the hydraulic modeling as variables within the study area, consistent with the values reported by Gallegos et al. for urban land uses. The number of computational meshes was determined to be 19,335,862 across the entire solution domain, considering dimensions of 5 m². This mesh count is substantial, resulting in

a very heavy computational load for the implementation of the hydraulic mode.

Indirect economic losses due to increased traffic time

Transportation networks are among the infrastructures that have a significant impact on economic activity by facilitating the movement of people and goods. This infrastructure can experience considerable direct and indirect damage under flood conditions. Among the indirect damages are the costs associated with delays in passenger travel and the increased fuel consumption resulting from these delays. To quantify this indirect damage, it is first necessary to calculate the duration of the delay caused by the reduction in vehicle speed and then use the estimated amount of indirect damage (per unit of time) to determine the total damage. Equation 4 is one of the equations used to calculate the maximum speed of vehicles for a given flood depth. By comparing the maximum speed obtained from this equation with the maximum permitted speed at each crossing, an estimate of the delay can be made:

1) Grading of urban roads: All urban roads can be categorized as first-class arterial streets, including freeways and highways; second-class arterial streets, including main arterial streets and secondary arterial streets; and local thoroughfares.

2) Determining the maximum speed limit for each roadway: Each roadway in the city has a specific speed limit corresponding to its grade. These values can be derived for all city roads based on traffic regulations. Table 1 shows the maximum speed limit for city roads.

3) Calculation of maximum vehicle speed in flooded conditions: Equation 5 shows the maximum speed of vehicles at different flood depths according to Pregnotato et al. In this equation, the flood depth is in millimeters and the maximum speed of the vehicle is in kilometers per hour.

$$5. v(w) = 0.0009w^2 - 0.5529w + 86.9448$$

It is worth noting that vehicle speeds can also be reduced by traffic conditions or by obstructions caused by objects carried by floodwaters (such as garbage and wood, especially in foothill areas). However, the above equation does not take these factors into account.

4) Estimation of the delay at each intersection using the difference between the values obtained in steps 2 and 3;

Table 1. Maximum permitted speed on urban roads (Pregolato et al. 2017)

Road Type		Maximum Permitted Speed (km/h)
First class arterial roads	Freeways	125
	Highways	100
Secondary arterial roads	Main arterial streets	60
	Secondary arterial streets	50
	Local roads	30

5) Estimation of indirect damage: Indirect damage—such as the cost of delays in economic activities or the increased fuel costs due to delays—can be estimated per unit of time. These values are derived from the average income of each person per unit of time or from the amount of fuel consumed per hour. Table 2 presents these values as reported in various references.

6) Estimating the number of vehicles passing through each crossing: Estimating the volume and types of passengers; The number of vehicles passing through each intersection is a key factor in determining the extent of damage. Several services can provide such information; one example is Google Traffic Maps, which offers traffic data for certain areas. Using these data layers, an estimate of the number of people passing through each intersection can be obtained.

7) According to Equation 6, the estimated damage for each urban road can be calculated by multiplying the values obtained in Steps 4–6 (Pregolato et al. 2017).

$$6. D = T_d * Pop * \alpha$$

In Equation 6, D is the total damage amount, is the delay at each road, the passing population per unit of time, and α is the damage rate per unit of time and person.

Model implementation and results

For precipitation-runoff calculations within the model, precipitation hydrographs for 10 and 100-year return periods were determined using the IDF curves of Tehran city and the time pattern of alternating blocks. The SWMM model parameters were adjusted in accordance with the information provided in the Tehran City Surface Water Master Plan (Mohab Ghods, 2011).

By running the area rainfall-runoff model in this software for 10- and 100-year rainfalls, the hydrograph of the inflow into the canal network from the sub-basin level was obtained. For instance, Figure 3 displays the hydrograph reaching the basin outlet during the 10- and 100-year floods. In this figure, the flattening of the peak of the 100-year flood hydrograph indicates that some upstream channels are unable to accommodate the 100-year flood, resulting in a portion of the channel runoff exiting the channel. The sub-basin hydrographs were then input

Table 2. Indirect flood damage rate due to transportation delays (Pyatkova, 2018)

Ref.	Estimation Method	Cost of Delay per Hour				Cost of Keeping the Car Running Per Hour	
		Taxi Driver	Employed passenger	Non-taxi Driver	Non-Employed Passenger	Commercial Vehicle	Non-Commercial Vehicle
Vickerman, 2000	Fee	13.0£	10.7£	3.2 £	3.2 £	14.1 £	5.5 £
Heatco D5. 2006	Fee+Willingness to Pay (WTP)	25.95€		10.9 €		-	
Douglas et al., 2000	Visit (WTP)	9.9\$ in peak traffic		7.4\$ in off-peak conditions		-	
Department for Transport, UK 2000	Visit (WTP)	27.06 £	20.52 £	6.81 £		Depended on distance	
Brownstone and Small, 2005	Announced+ Preferred			20\$; 9\$			

Table 3. Number of vehicles passing through flooded highways on weekdays

Day	Visiting Period	Hemmat Highway		Imam Ali Highway		Hakim Highway	
		Taxi	Private hire vehicles	Taxi	Private Hire Vehicles	Taxi	Private Hire Vehicles
Sunday	8 -9	612	11231	687	12312	98	11023
	12 -13	789	13652	626	13025	253	13641
	16 -17	503	12361	512	12632	201	12312
Tuesday	8 -9	523	10241	615	11212	54	9937
	12 -13	612	12341	568	11898	198	12173
	16 -17	429	11361	483	11716	152	13012
Thursday	8 -9	498	10112	485	9951	36	9126
	12 -13	566	12399	398	12153	102	10518
	16 -17	312	12365	362	12852	58	10201

into the MIKE21 model to perform hydraulic modeling and flood zoning across the entire solution domain. Triangular gridding was employed for the study area, utilizing two different mesh sizes: 0.1 m² for the canal area and 5 m² for the remaining areas. Figure 4 provides an example

of a portion of the modeling area’s gridding. Figure 5a illustrates the modeling scope within the MIKE21 software environment, and Figure 5b depicts the flood depth zone for a 100-year return period resulting from the model run.

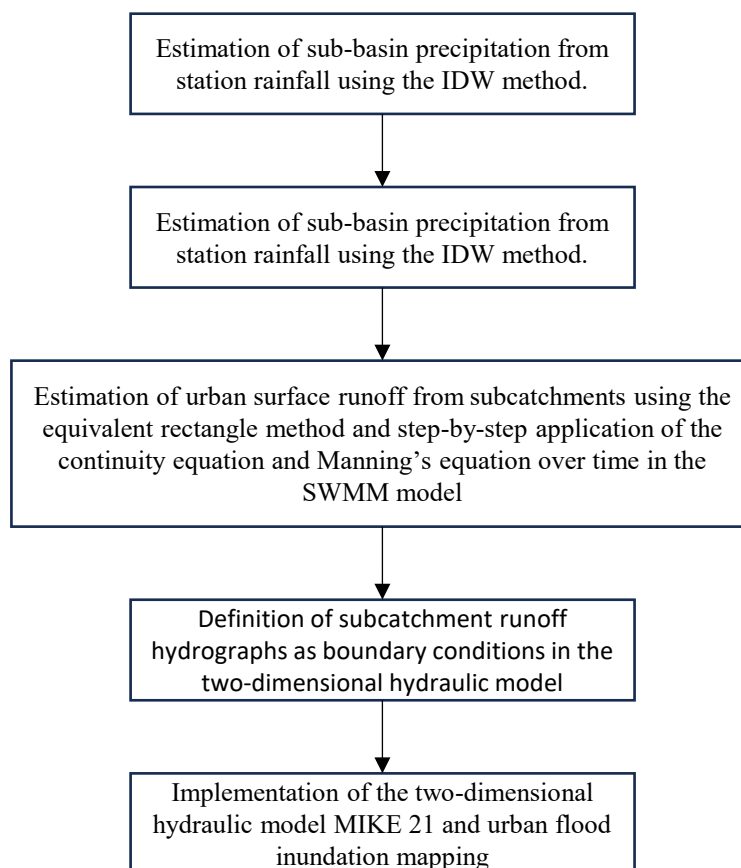


Figure 2. Steps of rainfall–runoff simulation in the present study

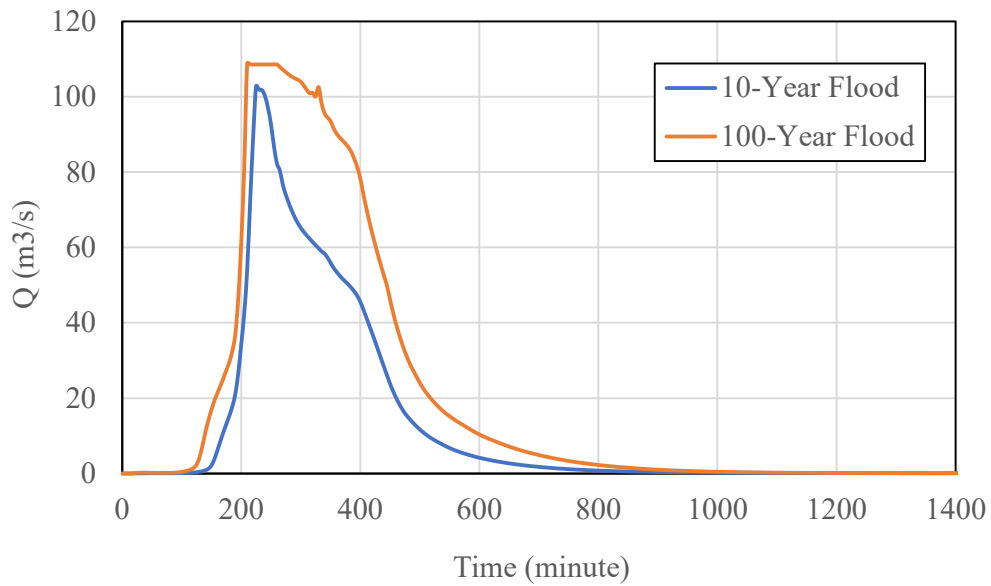


Figure 3. 10-year and 100-year flood hydrographs at the basin outlet

To run the models built in MIKE21, a system with the following specifications was used: 40 GB of RAM, an Intel® Xeon® CPU E5-2695 v3 @ 2.3 GHz processor (16 cores), and an NVIDIA GeForce GTX 1080 Ti graphics card. MIKE21 is capable of utilizing both the system’s central processor (CPU) and graphics processing unit (GPU) memory. This study utilized GPU acceleration to expedite the software’s numerical calculations. Using a system with these specifications, a single model run for the study area took approximately 215 hours.

Through field visits and vehicle counts (Figure 6), the number of vehicles passing through flood-affected sections of the Hemmat, Imam Ali (AS), and Hakim highways was estimated across three different days of the week (Sunday, Tuesday, and Thursday). These counts were conducted during the 8:00–9:00 AM, 12:00–1:00 PM, and 4:00–5:00 PM time periods, respectively. The results are presented in Table 3.

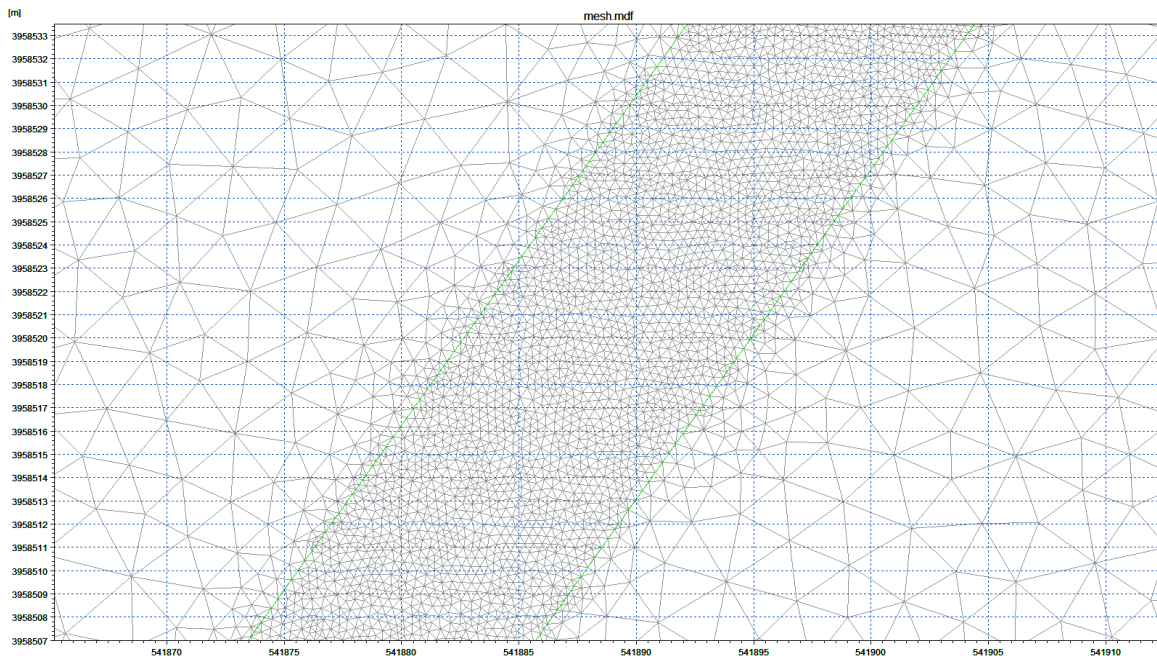


Figure 4. An example of mesh generation with $1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ cells inside the channels and $5.0 \text{ m} \times 25.0 \text{ m}$ cells in the areas outside the channels

Table 4. Estimated average vehicle speeds on highways on normal days

Highway	Time period	Average Speed on Weekdays (km/h)		
		Sunday	Tuesday	Thursday
Hakim	8-9	80	85	90
	12-13	85	85	87.5
	16-17	65	60	55
Hemmat	8-9	70	75	90
	12-13	80	82.5	80
	16-17	40	40.5	35
Imam Ali	8-9	85	90	90
	12-13	84.3	90	80
	16-17	67.5	65	65

Based on field observations, site visits, and an analysis of traffic conditions in Tehran, it was concluded that driving at the maximum speed limit on Tehran's highways is not feasible on normal days. Consequently, the average speed during the times when the number of passing vehicles was estimated was determined using the Neshan system on the studied days. The results are presented in Table 4. It is noteworthy that when estimating the speed under flooded conditions (Equation 5), if the calculated speed in flooded conditions exceeds the average traffic speed under normal conditions (Table 4), the speed reduction due to flooding is considered to be zero. Furthermore, in Tehran, considering the presence of suburban and urban sediment and garbage traps, we accounted for the overflow of muddy water from canals. It was assumed that heavy suspended objects and garbage would remain within the canals, allowing only runoff to flow on the street level. Therefore, the impact of flood debris on reducing speed on the surface of streets and highways was disregarded.

Using the method described, the damages caused by increased urban traffic due to flooding on different days were estimated and are presented below. The basis for calculating these damages was the estimation of delay hours caused by the flood, combined with the consideration of an average wage or income per working hour, derived from the average monthly salary for the year 2023.

The estimated average wage or income for passengers is as follows:

Hourly wage for taxi drivers: 1,071,500 Rials (based on inquiries from taxi drivers). Hourly wage for employees:

1,190,500 Rials (based on inquiries from the Ministry of Cooperatives, Labor, and Social Welfare)

Also:

Unit damage cost for business vehicles (taxis): 95,830 Rials (based on inquiries from taxi drivers and mechanics); Unit damage cost for non-business vehicles (personal): 50,000 Rials (based on inquiries from taxi drivers and mechanics); Number of passengers per business vehicle: 3 individuals.

Furthermore, it is assumed that when the flood depth reaches 0.5 meters, vehicles are unable to pass; consequently, that section of the highway is considered blocked, and drivers must take an alternative route.

The estimated amount of damage caused by the 10- and 100-year floods on Imam Ali Highway (AS) for Sunday, Tuesday, and Thursday is presented in Tables 5 and 6. The damage from a 100-year flood is estimated to be more than 300 times the damage from a 10-year flood. It should be noted that during a flood with a 100-year return period, sections of the highways are flooded to depths greater than 0.5 meters, reaching approximately 3 meters in some areas. At these depths, vehicles are essentially unable to cross the water. Therefore, it can be assumed that the highway is blocked, and drivers will opt for alternative routes such as Sadr Highway, Sayyad Shirazi Highway, and other streets. However, the results of the 100-year flood zoning indicate that a significant portion of the streets and highways in the studied area will be severely flooded. Given that both the main highway ar-

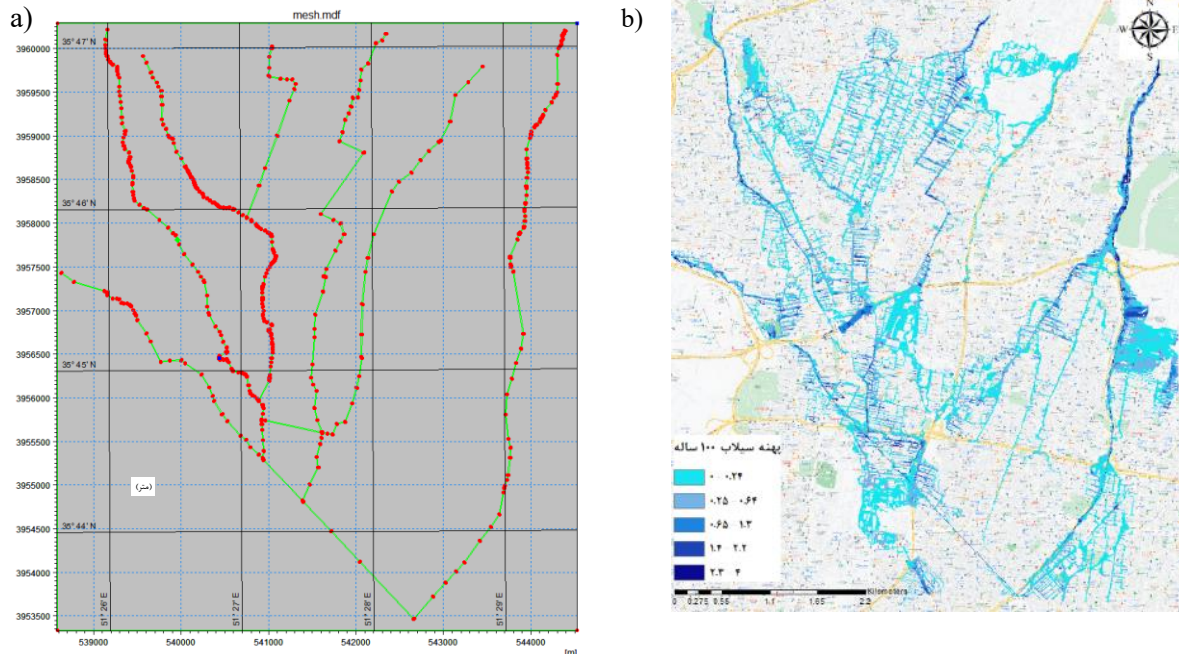


Figure 5. (a) Modeling domain of the study-area channels in MIKE 21; (b) flood inundation extent for the 100-year return period

terials and surrounding streets will be inundated, a working day in such conditions is practically considered lost. With this assumption, the traffic-related damages for the 100-year flood zone were calculated based on the loss of a full working day. In the case of the 10-year flood, due to the calculated flooding depth on the highways within the flood zone, vehicles could still travel on them. Consequently, the basis for calculating the damage was the

number of hours of delay caused. Similar calculations were performed for the Hemmat and Hakim highways, which can be found in the Meraj study.

Conclusion

This study accurately simulated flooding in the eastern part of Tehran and analyzed the economic impacts of high-

Table 5. Estimated 10-year flood damage due to increased urban traffic on Imam Ali Highway

Day	Visit Time	Amount of Damage (Million Tomans)				Total Damages (Million Tomans)
		Taxi Drivers	Employees	commercial Vehicles	to Non-commercial Vehicles	
Sunday	8-9	1.15	267.5	1.4	3	273.05
	12-13	1.84	285.07	1	4	291.91
	16-17	1.83	271.60	0.8	2	276.23
Tuesday	8-9	1.05	249.76	1	4	255.81
	12-13	1	242.02	1.4	4	248.42
	16-17	0.83	251.88	0.94	3	256.65
Thursday	8-9	1.2	214	0.74	3.8	219.74
	12-13	1.5	255.86	0.6	4	261.97
	16-17	2.15	272.94	0.55	5.51	281.15



Figure 6. Example of field visits on a weekday to estimate the number of vehicles passing through highways affected by the 100-year flood.

way flooding using the MIKE21 2D hydraulic model, along with precise spatial and topographic data. The results demonstrated that an increased flood return period significantly enhances the flood’s extent, depth, and flow velocity. The

economic damage analysis further revealed that floods have the most substantial impact on traffic along north-south highways, particularly during peak hours. This leads to a significant increase in indirect losses, especially for groups such

Table 6. Estimated 100-year flood damage due to increased urban traffic on Imam Ali Highway

Day	Visit time	Amount of Damage to Taxi Drivers (Billion Tomans)	Amount of Damage to Employees (Billion Tomans)	Amount of Damage to Commercial Vehicles (Billion Tomans)	Amount of Damage to Non-commercial Vehicles (Billion Tomans)	Total damages (Billion Tomans)
Sunday	8-9	3.97	92.39	0.35	3.32	100
	12-13	3.62	95.8	0.32	3.51	103.25
	16-17	2.96	91.1	0.26	3.41	97.73
Tuesday	8-9	3.56	84	0.32	3.03	90.91
	12-13	3.29	87.45	0.29	3.21	94.24
	16-17	2.80	84.67	0.25	3.16	90.85
Thursday	8-9	2.81	73.32	0.25	2.7	79.1
	12-13	3.28	85.80	0.21	3.28	92.57
	16-17	2.1	91.53	0.19	3.55	97.37

as taxi drivers and employees. Overall, the findings indicate that the inefficiency of some urban infrastructures, including Overall, the findings suggest that the inadequacy of certain urban infrastructures, including bridges and flood diversion channels, plays a crucial role in intensifying flood damages. Consequently, reviewing the design of hydraulic structures, developing early warning systems, and enhancing public transportation are among the effective strategies to mitigate urban vulnerability to extreme events.

Finally, it is important to note that due to the numerous uncertainties inherent in the economic estimates related to increased urban traffic, the figures obtained should be regarded as a general overview of the damage's extent and scale, rather than definitive values. Future research, by improving the quality of available information—such as more accurate data on vehicle numbers, affected populations, and traffic patterns—can undoubtedly lead to more realistic and reliable estimates.

Among the limitations of this study are the uncertainties in traffic and economic data, which affect the accuracy of damage estimations. Additionally, the limited scope of spatial and temporal data, along with the use of hypothetical data in simulations, may have influenced the results. Beyond the direct impact of traffic and the debris load from floodwaters on reducing vehicle speeds on highways, other limitations of this study can be addressed in future research. Therefore, future studies can enhance the accuracy and effectiveness of damage estimates and urban vulnerability reduction strategies by employing more realistic and comprehensive data, developing integrated flood forecasting models that consider the effects of climate change and urban development, and examining various flood management scenarios.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

In this study, all ethical principles were observed. Since no experiments on animal or human samples were conducted, no ethical code was obtained.

Funding

The paper was extracted from the thesis of the Mohammadreza Meraji. This research was financially supported by Space Research Center, Iranian Space Research Institute.

Authors' contributions

Visualization and software: Mohammad Reza Meraji, Jafar Yazdi, and Mohammad Shahsavandi; Conceptual-

ization and methodology: Jafar Yazdi and Mohammad Shahsavandi; Validation, formal analysis, research, sources, and data collection: Mohammad Reza Meraji and Jafar Yazdi; Writing the original draft, reviewing, editing, supervising, and managing the project: Jafar Yazdi; Fundraising: Jamal Aghayari and Amirhossein Abdi.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

This Page Intentionally Left Blank



مقاله پژوهشی

برآورد اثرات سیلاب بر زمان سفر تردهای شهری و تخمین خسارت اقتصادی آن

محمد رضا معراجی^۱، * جعفر یزدی^۱، محمد شاهسوندی^۱، جمال آغایاری^۲، امیرحسین عبدی^۲

۱. گروه مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲. مرکز تحقیقات فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران.

Use your device to scan and read the article online

**Citation** Meraji, M., Yazdi, J., Shahsavandi, M., Aghayari, J., & Abdi, A. (2026). Estimation of Flood Impacts on Urban Transportation Time and the Assessment of Its Economic Damage. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 15(4):574-599. <https://doi.org/10.32598/DMKP.15.4.882.2>**doi** <https://doi.org/10.32598/DMKP.15.4.882.2>

حکیده

زمینه و هدف: سیلاب‌های شهری می‌توانند تأثیرات قابل توجهی بر ترافیک و اقتصاد شهری داشته باشند. هدف این پژوهش مدل‌سازی پهنه سیل در معابر شهری شمال تهران و بررسی تأثیرات آن بر ترافیک و ارزیابی خسارات غیرمستقیم اقتصادی ناشی از افزایش زمان سفر بود. **روش:** در این مطالعه، از مدل دوبعدی هیدرولیکی MIKE21 با شبکه محاسباتی ۵ متری و مدل رقمی ارتفاعی ۱ متری برای محدودهای به وسعت ۴۱.۴۴ کیلومتر مربع استفاده شد. صحت مدل با داده‌های میدانی شامل سطح‌سنج‌های اتراسونیک و اندازه‌گیری دبی به روش جسم شناور تأیید شد. پهنه‌های سیل با دوره بازگشت ۱۰ و ۱۰۰ ساله استخراج گردید و خسارت ناشی از تأخیر در سفر با مقایسه سرعت‌های مجاز و شرایط سیلابی و هزینه هر ساعت تأخیر همراه با شمارش ترافیک محاسبه شد.

یافته‌ها: مساحت پهنه سیلاب ۱۰ و ۱۰۰ ساله به ترتیب حدود ۱۴۰ و ۶۴۰ هکتار بود. بیشینه عمق و سرعت جریان در سیلاب ۱۰ ساله به ترتیب ۱/۸۹ متر و ۲/۱۹ متر بر ثانیه و در سیلاب ۱۰۰ ساله ۳/۸۳ متر و ۴/۱۵ متر بر ثانیه به دست آمد. خسارت ناشی از تأخیر سفر در بزرگراه‌های امامعلی، حکیم و همت برای سیلاب ۱۰ ساله به ترتیب ۲/۶۵، ۱ و ۱/۱ میلیارد ریال و برای سیلاب ۱۰۰ ساله به ترتیب حدود ۹۴۲، ۳۷۱/۴ و ۸۱۰ میلیارد ریال در یک روز سال ۱۴۰۲ برآورد شد.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه سیلاب‌های شهری بر عملکرد حمل‌ونقل و اقتصاد شهری است و نیاز به برنامه‌ریزی و مدیریت بهتر سیلاب‌ها برای کاهش خسارات اقتصادی و ترافیکی را تأکید می‌کند.

کلیدواژه‌ها: پهنه سیل، شبیه‌سازی دوبعدی، خسارت اقتصادی، ترافیک شهری، MIKE21، زمان تأخیر

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۵ مرداد ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۰۶ آبان ۱۴۰۴

تاریخ انتشار: ۰۹ مهر ۱۴۰۴

* نویسنده مسئول:

دکتر جعفر یزدی

نشانی: تهران، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، گروه مهندسی منابع آب.

تلفن: +۹۸ (۲۱) ۷۳۹۳۲۴۰۳

پست الکترونیکی: j_yazdi@sbu.ac.ir



Copyright © 2026 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

داده‌های ویدئویی و منابع ایمنی، رابطه‌ای میان عمق آب و سرعت وسایل نقلیه توسعه دادند که دقت بالایی ($R^2=0/95$) داشت و بیانگر آن بود که جاده تنها در عمق بیش از ۳۰ سانتی‌متر عملاً غیرقابل عبور می‌شود. اهمیت کار آن‌ها در امکان تلفیق ساده این تابع با مدل‌های حمل‌ونقل و بهبود برآورد تأخیرهای ناشی از سیلاب است.

در ادامه، کاسمالکر و همکاران، (۲۰۲۰) با تمرکز بر مناطق ساحلی نشان دادند افزایش سطح دریا و سیلاب‌های ناشی از جزر و مد و تغییرات اقلیمی می‌تواند شبکه‌های حمل‌ونقل شهری را دچار اختلال جدی کند. آنان با ترکیب مدل حمل‌ونقل و نقشه‌های سیلاب برای خلیج سان‌فرانسیسکو دریافتند که گرچه غیبت کارکنان بیشتر به نواحی آب‌گرفته محدود می‌شود، اما تأخیرهای سفر به مناطق داخلی‌تر نیز گسترش می‌یابد و جوامعی که به جاده‌های جایگزین دسترسی کمی دارند با بیشترین اختلال مواجه می‌شوند. نتایج آنان همچنین نشان داد شاخص «دسترسی متری» به‌عنوان معیاری از تراکم شبکه جاده‌ای، پیش‌بینی‌کننده بهتری برای تأخیرها نسبت به صرفاً میزان مواجهه با سیلاب است.

در همین راستا، چو و همکاران، (۲۰۲۰) با بهره‌گیری از ابزار S-RAT و مدل FLO-2D، رواناب ناشی از بارش و میزان آب‌گرفتگی شهری را شبیه‌سازی کردند و منحنی‌های بارش-عمق سیلاب و سیلاب-سرعت خودرو را استخراج نمودند. آنان با مقایسه نتایج مدل با رخداد سیلاب سال ۲۰۱۱ نشان دادند مدل از دقت بالایی برخوردار است و جاده‌ها بسته به شرایط بارش و عمق آب‌گرفتگی، درجات متفاوتی از قابلیت عبور دارند. یافته‌های آنان نشان می‌دهد این نوع مدل‌ها می‌توانند در انتخاب مسیرهای ایمن‌تر برای رانندگان و کاهش اثرات اختلالی سیلاب نقش کاربردی داشته باشند.

هی و همکاران، (۲۰۲۱) بررسی کردند سیلاب‌های شهری چگونه با افزایش فاصله زمانی در خدمات حمل‌ونقل عمومی، تغییر مسیرها و کاهش سرعت سفر، موجب تأخیر در تردد و کاهش دسترسی به مشاغل می‌شوند؛ آن‌ها برآورد کردند این اختلالات، هزینه‌های اقتصادی روزانه حدود ۱/۲ میلیون دلار برای مسافران به بار می‌آورد و گروه‌های کم‌درآمد بیشترین تأثیرپذیری را دارند.

ریپوت و همکاران، (۲۰۲۲) با تحلیل ساختار شبکه‌های ترافیکی پس از سیلاب، دریافتند حتی پس از فروکش کردن آب، افزایش قابل توجه در زمان سفر—تا حدود ۸ درصد—ممکن است هفته‌ها ادامه یابد و این تأثیرات فراتر از محدوده‌های سیلابی گسترش پیدا می‌کنند.

پارک و همکاران، (۲۰۲۳) با رویکردی مبتنی بر تاب‌آوری شهری، اثرات اقتصادی سیلاب را بر حمل‌ونقل و مشارکت نیروی کار بررسی کردند. آنان با استفاده از تحلیل شبکه‌ای و توابع خسارت نشان دادند عواملی مانند پایداری، ظرفیت منابع و نرخ بازبایی نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش هزینه‌های اجتماعی—اقتصادی ناشی از سیلاب دارند.

در مناطق شهری، کاربری‌ها و دارایی‌های زیادی در معرض سیلاب قرار دارند. یکی از این موارد، زیرساخت‌های حمل‌ونقل شهری است. در زندگی روزمره حمل‌ونقل روی رفاه اقتصادی، پیشرفت‌های فرهنگی، قوانین اجتماعی، روش‌های تفریح و آداب‌ورسوم تأثیر می‌گذارد. اقتصاددانان نقش سالانه‌ی حمل‌ونقل را ۱۶ درصد تولید ناخالص ملی و اشتغال صنعتی آن را ۱۱ درصد از نیروی کار تخمین زده‌اند (نوروزی، ۱۳۹۲). در چنین وضعیتی است که سیستم حمل‌ونقل یا همان سیستم ترابری دارای اثرات مهمی بر صنعت و اقتصاد کشور و آحاد جامعه آن دارد.

یکی دیگر از ویژگی‌های شبکه‌های حمل‌ونقل این است که با فراهم کردن امکان جابه‌جایی افراد و کالاها تأثیر زیادی بر فعالیت اقتصادی دارد. در طی رخدادهای شدید جوی، زیرساخت‌های حمل‌ونقل می‌توانند به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم آسیب ببینند که این موضوع، تهدیدی برای ایمنی انسان‌ها محسوب شده و موجب اختلالات گسترده و پیامدهای اقتصادی و اجتماعی قابل توجهی می‌شود (پیاتکوا و همکاران، ۲۰۱۸). سیلاب، به‌ویژه در اثر بارش‌های شدید، عامل اصلی اختلالات جوی در بخش حمل‌ونقل محسوب می‌شود. زیر آب رفتن بزرگراه‌ها، خیابان‌ها و معابر در شرایط سیلابی می‌تواند تبعات اقتصادی مستقیم و غیرمستقیم زیادی را به جامعه وارد کند؛ از جمله خسارات غیرمستقیم آن می‌توان به هزینه تأخیر ایجادشده در سفر مسافران و همچنین افزایش میزان مصرف سوخت به واسطه این تأخیر اشاره کرد. با وجود اهمیت فراوان این موضوع، تاکنون مطالعات اندکی در سطح جهان به بررسی اثرات اقتصادی سیلاب بر ترافیک شهری پرداخته‌اند. در ادامه، به برخی از پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه اشاره خواهد شد.

چانگ و همکاران، (۲۰۱۱) تأثیرات بالقوه تغییرات آب‌وهوایی را بر روی سیستم‌های حمل‌ونقل بررسی کردند. این تحقیق شامل تأثیرات اقتصادی منطقه‌ای در نتیجه تغییر شرایط حمل‌ونقل در شمال کانادا است و گزارش می‌کند که از بین تمام تأثیرات احتمالی آب‌وهوا بر حمل‌ونقل، بیشترین تأثیر از نظر هزینه مربوط به سیلاب شهری است. نتایج نشان می‌دهد یک رابطه غیرخطی بین تغییر بارندگی و جاری شدن سیل در شهر وجود دارد و تأثیرات آن در ایجاد اختلال در سفر به شرایط آب‌وهوایی محلی و شرایط ژئومتریکی بستگی دارد. رویکردهای موجود برای ارزیابی تأثیرات اختلالی سیلاب بر حمل‌ونقل جاده‌ای معمولاً تعامل میان سیلاب و سامانه حمل‌ونقل را نادیده می‌گیرند و اغلب فرض می‌کنند که یک جاده یا کاملاً قابل استفاده است یا به‌طور کامل مسدود شده، در حالی که این فرض با مشاهدات واقعی همخوانی ندارد.

پرگنولاتو و همکاران، (۲۰۱۷) رویکردی نو برای ارزیابی اثرات سیلاب بر جاده‌ها ارائه دادند و نشان دادند که فرض دوحالت «باز یا بسته بودن جاده» با شرایط واقعی سازگار نیست. آنان با تحلیل



مواد و روش‌ها

مطالعه موردی

محدوده مورد بررسی، بخشی از حوضه آبریز سیل‌برگردان شرق شهر تهران است که در نیمه شمالی شهر تهران قرار دارد. این بخش از شمال تا اتوبان صدر، از جنوب تا خیابان دملوند، از شرق تا اتوبان امام علی (ع) و از غرب تا اتوبان شهید مدرس ادامه دارد که شامل بخشی از مناطق ۳، ۴، ۷ و ۸ تهران می‌شود و مساحت محدوده مطالعاتی تقریباً $41/65$ کیلومتر مربع است. کانال‌های جمع‌آوری رواناب در این بخش عموماً در امتداد شیب غالب شهر به صورت شمالی-جنوبی امتداد یافته‌اند. در نتیجه، دارای شیب‌های تند و سرعت جریان بالایی هستند. تمام کانال‌های واقع در حوضه آبریز شرق تهران براساس شرایط مختلف آبراهه‌ها تعریف شده‌اند. وظیفه اصلی این کانال‌ها جمع‌آوری و انتقال رواناب از زیرحوضه‌های کوهستانی و شهری است.

تصویر شماره ۱ کانال‌های موجود در منطقه مطالعه را نشان می‌دهد؛ خطوط آبی نمایانگر کانال‌های اصلی روباز و خطوط قرمز نمایانگر کانال‌های اصلی سرپوشیده هستند (مهتاب قدس، ۱۳۹۰ الف). در مسیر کانال سیل برگردان شرق پل‌های مختلفی قرار گرفته است که بعضی از آن‌ها مسیر عبور جریان را بسیار محدود کرده و در شرایط سیلابی باعث پس‌زدگی آب و خروج آب از کانال می‌شود (مهتاب قدس، ۱۳۹۰ ب). این سازه‌ها بر روی مقادیر آستانه‌های بارش تأثیرگذارند. رابطه عمومی شدت-مدت-فراوانی بارش در شهر تهران که معرف بارش‌های کوتاه‌مدت شهر است، توسط شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس در مطالعات طرح جامع آب‌های سطحی ارائه شده است (فرمول شماره ۱) (مهتاب قدس، ۱۳۹۰ الف):

$$1. i = CAIt.PP D^{-0.645}$$

در این معادله i = شدت بارش (میلی‌متر بر ساعت)، D = تداوم بارندگی (دقیقه) و $C_{Alt.RP}$ = ضریب معادله که متناسب با دوره بازگشت طراحی و ارتفاع متوسط (زیر) حوضه از جدول راهنما انتخاب می‌شود. همچنین در مطالعات مذکور، الگوی زمانی بلوک‌های متناوب برای ساخت بارش‌های مصنوعی یا بارش طرح پیشنهاد شده است (مهتاب قدس، ۱۳۹۰ ب).

در این مقاله، بارش با دوره بازگشت‌های ۱۰ و ۱۰۰ سال که دوره‌های بازگشت شاخص در بسیاری از مطالعات هستند، برای تعیین هیدروگراف‌های سیلاب ورودی به کانال‌های محدوده شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند. این بارش‌ها با استفاده از روش پیشنهادشده در طرح جامع آب‌های سطحی شهر تهران ساخته شده‌اند. براساس دوره بازگشت مورد نظر، از رابطه

زنگ و همکاران، (۲۰۲۴a) با بهره‌گیری از داده‌های سیلاب و اپلیکیشن WAZE در منطقه هامپتون رودز آمریکا، تغییرات دسترسی خودروبی را در ساعات اوج و غیر اوج تحلیل کردند. نتایج آنان نشان داد دسترسی در ساعات صبحگاهی تا $49/6$ درصد برای سفرهای کاری و تا $87/9$ درصد برای سفرهای غیرکاری کاهش می‌یابد و مناطق آسیب‌پذیر اجتماعی بیشترین تأثیر را متحمل می‌شوند.

زنگ و همکاران، (۲۰۲۴b) نشان دادند سیلاب‌های مکرر در مناطق ساحلی مانند هامپتون رودز (ویرجینیا) به‌ویژه در ساعات اوج، به‌طور قابل توجهی دسترسی به حمل‌ونقل شهری را کاهش می‌دهند (تا $88/2$ درصد برای سفرهای کاری و تا $99/9$ درصد برای سفرهای غیرکاری) و جمعیت‌های آسیب‌پذیر اجتماعی بیش از دیگران متأثر می‌شوند.

افسری و شهسواری (۱۴۰۱) وضعیت فضایی تاب‌آوری سیل را در منطقه‌ای از تهران بررسی کردند و نشان دادند نواحی شرقی تاب‌آوری بیشتری نسبت به نواحی غربی دارند؛ که این نکته برای تحلیل نابرابری در تأثیر سیلاب و ترافیک قابل توجه است.

گل‌محمدی و شکوهی الگوریتمی برای برآورد خسارت خودروهای سواری در سیلاب، بر پایه عمق و سرعت جریان ارائه دادند. ایشان هفت نظریه از راهنمای بارش و رواناب استرالیا (AR&R) را ارزیابی و نقشه‌های ریسک برای خودروی شاخص پراید ۱۳۱ را تولید کردند. نتایج نشان داد ترکیب عمق و سرعت نسبت به استفاده صرف از عمق، دقت بیشتری در برآورد ریسک دارد.

درخصوص برآورد اثرات اقتصادی سیلاب ناشی از افزایش ترافیک شهری، تاکنون مطالعه مشخص، جامع و متمرکزی در سطح کشور انجام نشده است. اگرچه برخی پژوهش‌ها به بررسی ابعاد فنی یا هیدرولوژیکی سیلاب در محیط‌های شهری پرداخته‌اند، اما جنبه‌های اقتصادی ناشی از اختلال در سیستم حمل‌ونقل، از جمله افزایش زمان سفر، تأخیر در تردد وسایل نقلیه، کاهش بهره‌وری نیروی کار و هزینه‌های غیرمستقیم وارد شده به شهروندان و اقتصاد شهری، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این خلأ پژوهشی به‌ویژه در شرایطی که شهرهای بزرگ کشور با گسترش بی‌رویه، ضعف زیرساخت‌های مدیریت رواناب، و افزایش فراوانی بارش‌های شدید مواجه هستند، از اهمیت بیشتری برخوردار است. از این رو، پژوهش حاضر با هدف پر کردن این شکاف، تلاش دارد با بهره‌گیری از تلفیق مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولیکی، تحلیل ترافیکی و ارزیابی اقتصادی، به ارزیابی دقیق و کاربردی از پیامدهای اقتصادی سیلاب بر ترافیک شهری بپردازد و گامی مؤثر در جهت بهبود مدیریت بحران و برنامه‌ریزی شهری بردارد.

1. Australian Rainfall and Runoff (AR&R)



معادله مؤمنتم در جهت x:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{H} \right) + gy \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 H^2} - fVV_x + \frac{y}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0$$

$$- \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{xy}) \right] + \Omega q$$

معادله مؤمنتم در جهت y:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{H} \right) + gy \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 H^2} - fVV_y + \frac{y}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0$$

$$- \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{yy}) \right]$$

پارامترها و متغیرها در فرمول‌های شماره ۳ و ۴ عبارت‌اند از:

$$(m) \quad H(x, y, t) = x-d \quad \text{عمق ستون آب}$$

$$(m) \quad x(x, y, t) \quad \text{تراز سطح آب در مقطع}$$

$$(m) \quad d(x, y, t) \quad \text{عمق آب متغیر با زمان}$$

$$(m^{1/2}/s) \quad C(x, y) \quad \text{شزی}$$

$$u, v \quad \text{متوسط سرعت در عمق در جهت } x, y$$

$$(kg/m^3) \quad p_w \quad \text{چگالی آب}$$

$$x \quad p(x, y, t) = h \cdot u(x, y, t) \quad \text{چگالی جریان در جهت } x \quad (m^3/s/m)$$

$$x \quad p(x, y, t) = h \cdot v(x, y, t) \quad \text{چگالی جریان در جهت } x \quad (m^3/s/m)$$

$$(m/s^2) \quad g \quad \text{شتاب گرانش زمین}$$

$$f(v) \quad \text{ضریب اصطکاک باد}$$

$$(m/s) \quad v_x, v_y, v \quad \text{سرعت باد و مؤلفه‌های آن در جهت } x \text{ و } y \text{ برحسب}$$

$$(x, y) \quad \Omega \quad \text{ضریب کوریولیس وابسته به طول جغرافیایی (S-1)}$$

$$(kg/m \cdot s^2) \quad p_a(x, y, t) \quad \text{فشار اتمسفر}$$

$$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy} \quad \text{مؤلفه‌های تنش برشی مؤثر}$$

نرم‌افزار MIKE21 HD از روش حل ضمنی به نام ADI برای حل دستگاه جبری به‌دست‌آمده از گسسته‌سازی معادلات پیوستگی و مؤمنتم استفاده می‌کند. در این روش، ماتریس معادلات به‌دست‌آمده در هر جهت با استفاده از الگوریتم جاروب کردن دوگانه حل می‌شود. برای ساخت هندسه کانال‌ها و معابر،

(شدت-مدت-فراوانی) (IDF)^۲ شهر تهران، با در نظر گرفتن تداوم ۶ ساعت شدت و عمق بارش طراحی به دست آمد. تداوم ۶ ساعت براساس پیشنهاد طرح جامع و با انجام تحلیل حساسیت در مطالعات مذکور به دست آمده است (مهتاب قدس، ۱۳۹۰ ب). سپس عمق بارش با روش بلوک‌های متناوب (Chow et al. 1988) در زمان توزیع شد تا هیئوگراف بارش طرح با دوره بازگشت مورد نظر استخراج شود. این هیئوگراف با استفاده از مدل بارش-رواناب حوضه به هیئوگراف سیل با دوره بازگشت مورد نظر تبدیل شد و در مدل‌سازی هیدرولیکی مورد استفاده قرار گرفت.

مدل‌سازی بارش-رواناب و پهنه‌بندی سیل

در این پژوهش، نرم‌افزار EPA-SWMM به‌عنوان مدل بارش-رواناب مورد استفاده قرار گرفت. SWMM یک مدل دینامیکی است که به‌طور عمده برای شبیه‌سازی کمی و کیفی رواناب در مناطق شهری به کار می‌رود. این مدل در سراسر جهان برای برنامه‌ریزی، تحلیل و طراحی سامانه‌های رواناب ناشی از بارش، فاضلاب‌های ترکیبی، فاضلاب‌های بهداشتی و سایر سامانه‌های زهکشی شهری به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد (رزمن و هاب، ۲۰۱۵).

مطابق تصویر شماره ۲، زیرحوضه‌ها ورودی خود را از بارش دریافت می‌کنند، اما بخشی از آن از طریق تبخیر و نفوذ از دست می‌رود. برای مدل‌سازی تلفات ناشی از بارش، از روش عدد منحنی (CN) سازمان حفاظت منابع طبیعی آمریکا^۳ (NRCS) استفاده شد و بارش مازاد از طریق معادلات مانینگ و پیوستگی در هر گام زمانی در سطح زیرحوضه‌ها روندیابی شده تا هیئوگراف‌های رواناب سطحی زیرحوضه‌ها به‌دست آید. در این مدل، زیرحوضه‌ها به‌صورت مستطیلی معادل فرض شده‌اند. هیئوگراف‌های رواناب سطحی حاصل از زیرحوضه‌ها از طریق حل معادلات سنت-ونان به‌صورت عددی در سیستم کانال‌ها روندیابی می‌شوند. تحلیل حساسیت پارامترها و واسنجی آن برای حوضه مطالعاتی پیش‌تر توسط کامور (۱۴۰۰) انجام شده است. به‌منظور مدل‌سازی هیدرولیکی و پهنه‌بندی سیل، از مدل ماژول هیدرودینامیک-۲۱، (MIKE21) (موسسه هیدرولیک دانمارک، ۲۰۱۲) استفاده شد.

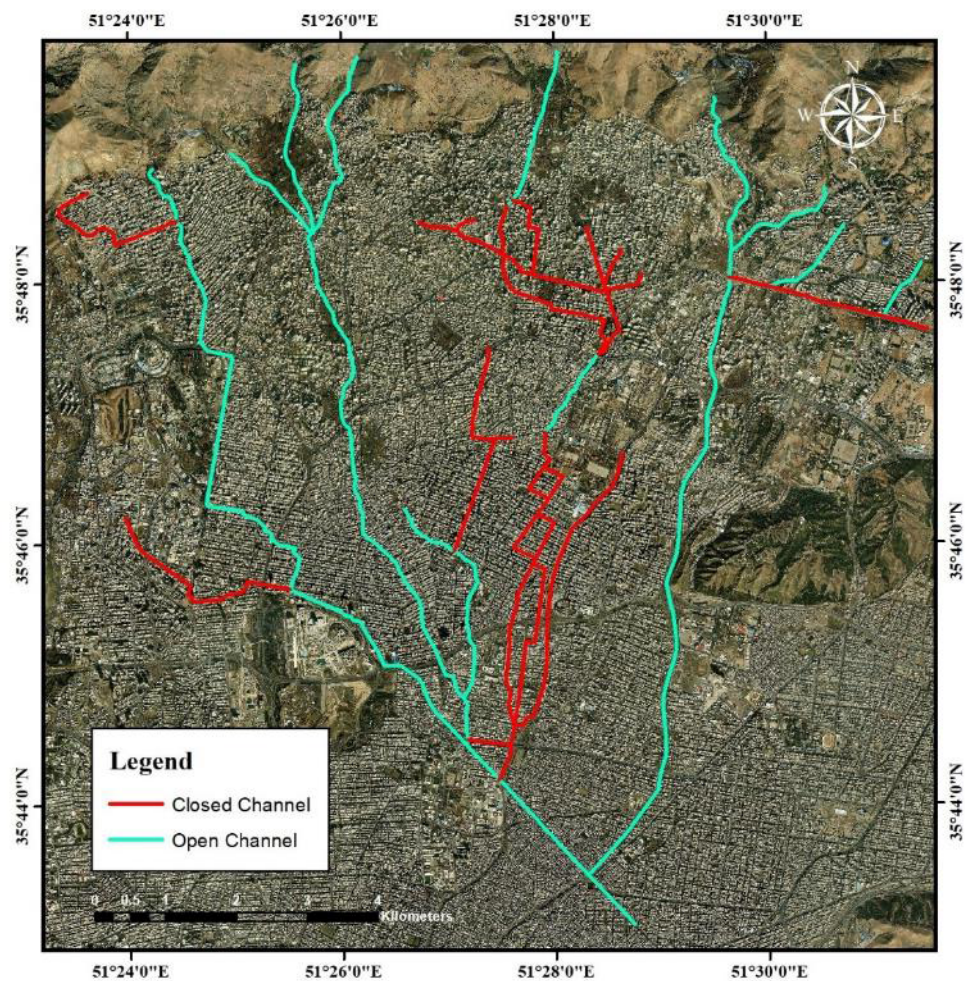
معادلات اساسی حاکم بر جریان که توسط مدل MIKE21 HD به‌صورت عددی حل می‌شوند، شامل معادلات پیوستگی و اندازه حرکت است (موسسه هیدرولیک دانمارک، ۲۰۱۲):

معادله پیوستگی (معادله شماره ۲):

$$2. \quad \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0$$

2. Intensity-Duration-Frequency (IDF)

3. Natural Resources Conservation Service (NRCS)



تصویر ۱. کانال‌های اصلی در حوضه آبریز سیل‌برگردان شرق شهر تهران

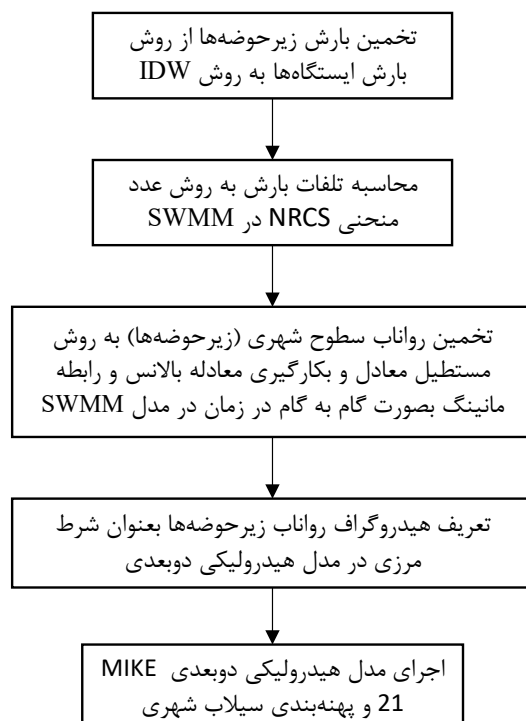
شدند، برای کاربری‌های شهری، به کار گرفته شد. تعداد مش‌های محاسباتی با توجه به ابعاد ۵ مترمربع برابر ۱۹۳۳۵۸۶۲ در کل دامنه حل به دست آمد. این تعداد مش بسیار قابل ملاحظه است و اجرای مدل هیدرولیکی، بار محاسباتی بسیار سنگینی را داراست.

از مدل رقومی ارتفاعی سطح ۴ با دقت ۱ متر استفاده شده است. برای این منظور از تصویر ماهواره‌ای GeoEye-II که خریداری شد، استفاده گردید. مقادیر ضرایب مانینگ کاربری‌ها و معابر مختلف در مدل‌سازی هیدرولیکی، به صورت متغیر در پهنه مطالعاتی و مطابق با مقادیری که گالگوس و همکاران، (۲۰۰۹) گزارش

4. DSM

جدول ۱. حداکثر سرعت مجاز در معابر شهری (پرگنولاتو و همکاران، ۲۰۱۷)

نوع معبر	حداکثر سرعت مجاز (کیلومتر در ساعت)	
شریانی درجه یک	آزادراهها	۱۲۵
	بزرگراهها	۱۰۰
شریانی درجه دو	خیابان‌های شریانی اصلی	۶۰
	خیابان‌های شریانی فرعی	۵۰
	معابر محلی	۳۰



تصویر ۲. مراحل شبیه‌سازی بارش-رواناب در مطالعه حاضر

خسارت غیرمستقیم ایجادشده (در واحد زمان)، میزان خسارت را برآورد نمود.

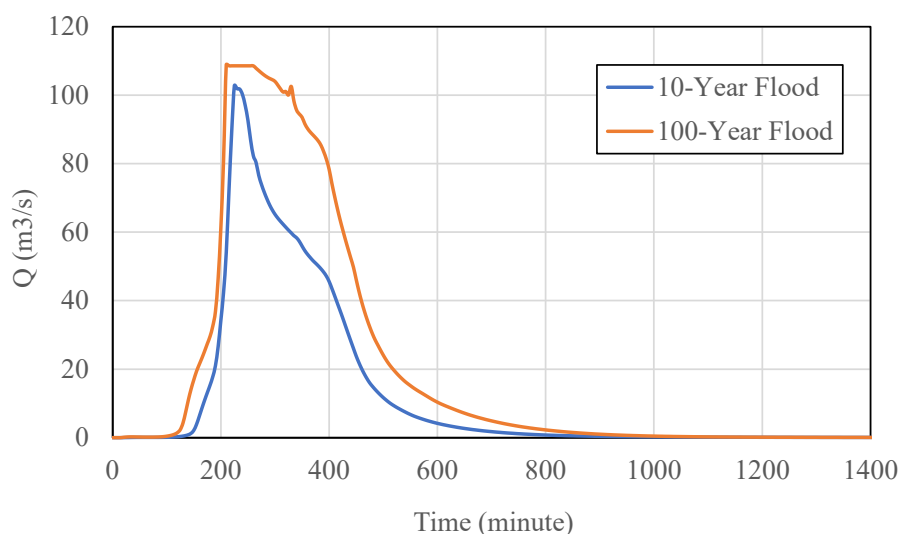
فرمول شماره ۴ یکی از معادلاتی است که در سابقه تحقیق برای محاسبه حداکثر سرعت وسایل نقلیه به‌ازای یک عمق سیل مشخص ارائه شده است. با استفاده از حداکثر سرعت به‌دست‌آمده از این رابطه و حداکثر سرعت مجاز در هر معبر، می‌توان تخمینی از تأخیر ایجادشده را برآورد نمود. به‌طور کلی گام‌های محاسبه خسارت غیرمستقیم سیل بر فعالیت‌های اقتصادی بر اثر ترافیک را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه نمود:

زیان‌های اقتصادی غیرمستقیم ناشی از افزایش زمان تردد

شبکه‌های حمل‌ونقل یکی از زیرساخت‌هایی است که با فراهم نمودن امکان جابه‌جایی افراد و کالاها تأثیر زیادی بر فعالیت اقتصادی دارد. این زیرساخت در شرایط سیلابی می‌تواند خسارت مستقیم و غیرمستقیم زیادی را به همراه داشته باشد؛ از جمله خسارت غیرمستقیم آن می‌توان به هزینه تأخیر ایجادشده در سفر مسافران و همچنین افزایش میزان مصرف سوخت به‌واسطه این تأخیر اشاره کرد. به‌منظور کمی کردن این خسارت غیرمستقیم، ابتدا می‌بایست مدت‌زمان تأخیر ایجادشده به‌واسطه کاهش سرعت را حساب نمود و با استفاده از میزان تخمینی

جدول ۲. نرخ خسارت غیرمستقیم سیل بر اثر تأخیر به‌وجودآمده در سفر (پیاتکووا و همکاران، ۲۰۱۸)

هزینه روشن بودن خودرو در هر ساعت		هزینه تأخیر سفر در هر ساعت			روش تخمین	مرجع/سال
خودرو کاری	خودرو غیرکاری	مسافر غیرشاغل	راننده غیر تاکسی	مسافر شاغل		
۵/۵ £	۱۴/۱ £	۳/۲ £	۳/۲ £	۱۰/۷ £	۱۳/۰ £	ویکرم، ۲۰۰۰
-	-	۱۰/۹ £	-	۲۵/۹۵ £	-	هیتکو، ۲۰۰۶
-	-	۷/۴ در شرایط غیرپیک \$	۹/۹ در پیک ترافیک \$	-	-	داگلاس و همکاران، ۲۰۰۰
تابعی از مسافت	-	۶/۸۱ £	۲۰/۵۲ £	۳۷/۰۶ £	-	وزارت حمل‌ونقل، بریتانیا ۲۰۰۰
-	-	۲۰ \$	-	-	-	براون‌استون و اسمال، ۲۰۰۵
-	-	۹ \$	-	-	-	اعلام‌شده+ترجیحی



تصویر ۳. هیدروگراف سیلاب ۱۰ و ۱۰۰ ساله در خروجی حوضه

درجه‌بندی معابر شهری

کلیه معابر شهری را می‌توان به‌صورت خیابان‌های شریانی درجه ۱ شامل آزادراه و بزرگراه، معابر شریانی درجه ۲ شامل خیابان‌های شریانی اصلی و خیابان‌های شریانی فرعی و همچنین معابر محلی دسته‌بندی کرد.

تعیین حداکثر سرعت مجاز در هر معبر

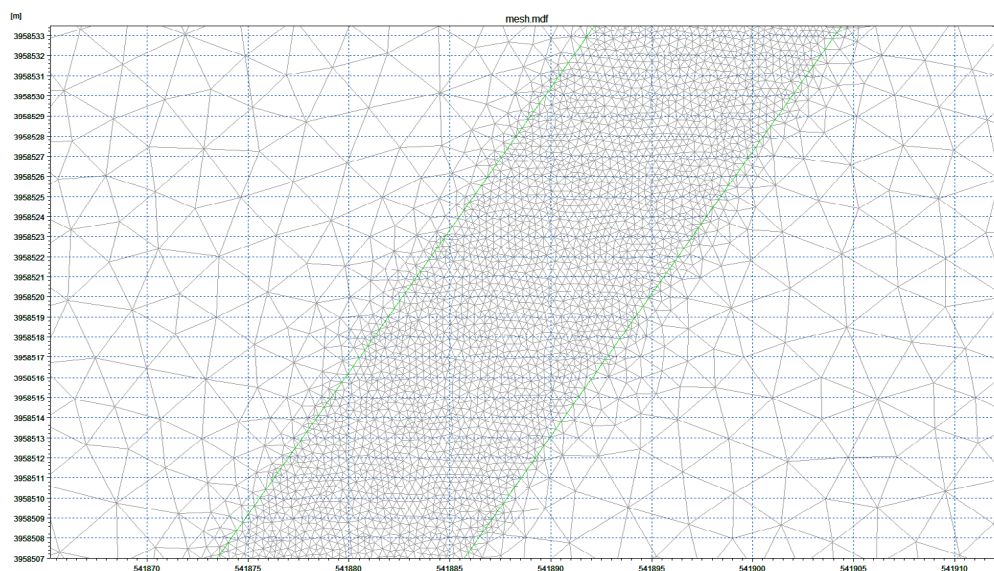
هر کدام از معابر شهری، متناظر با درجه خود، میزان مشخصی از سرعت مجاز را دارا هستند. این مقادیر برای تمامی معابر شهری براساس ضوابط راهنمایی و رانندگی قابل استخراج است. **جدول شماره ۱** حداکثر سرعت مجاز را در معابر شهری نشان می‌دهد.

محاسبه حداکثر سرعت وسائل نقلیه در شرایط سیلابی

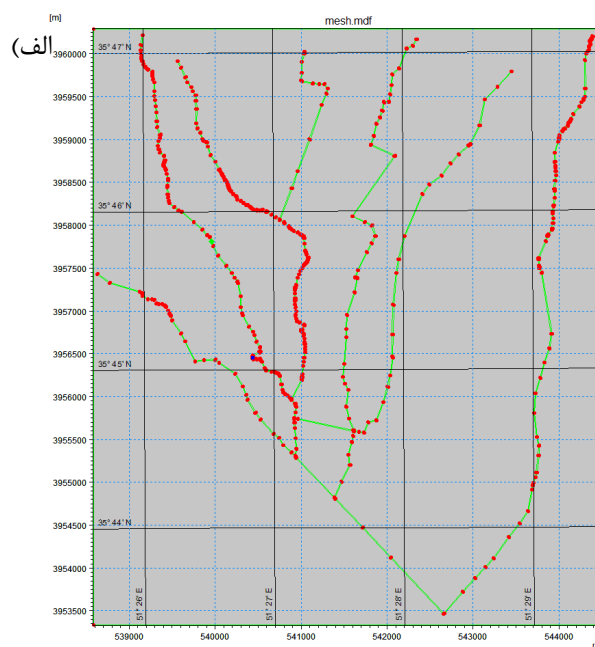
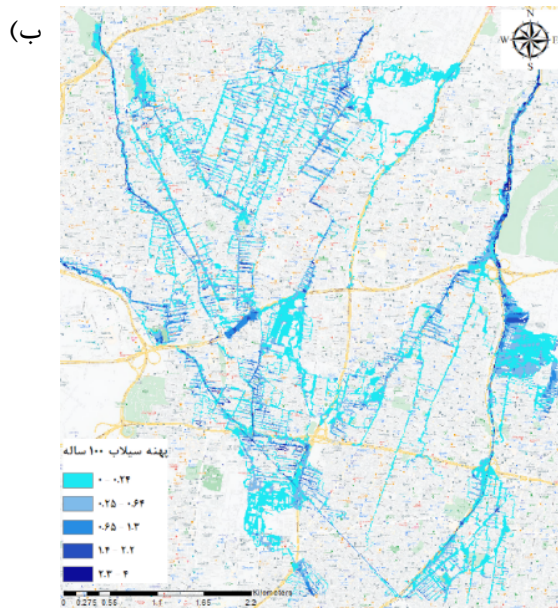
فرمول شماره ۴ یکی از روابطی است که حداکثر سرعت وسایل نقلیه را در عمق‌های مختلف سیل مطابق مرجع **پرگنولاتو و همکاران، (۲۰۱۷)** نشان می‌دهد. در این رابطه، عمق سیل بر حسب میلی‌متر و حداکثر سرعت وسیله نقلیه بر حسب کیلومتر بر ساعت است.

$$5. v(w) = 0.0009w^2 - 0.5529w + 86.9448$$

سرعت خودروها می‌تواند تحت تأثیر شرایط ترافیکی و یا انسداد ناشی از اجسام همراه جریان سیل (مانند زباله و چوب به‌ویژه در نواحی کوهپایه‌ای) نیز کاهش یابد، اما فرمول شماره ۵ این فاکتورها را در نظر نمی‌گیرد.



تصویر ۴. نمونه‌ای از شبکه‌بندی داخل کانال‌ها با ابعاد ۰/۱ مترمربع و محدوده بیرون کانال‌ها با ابعاد ۵ مترمربع



تصویر ۵. الف- دامنه مدل سازی کانال های محدوده مطالعاتی در نرم افزار MIKE21، ب- پهنه سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰ سال

برآورد تعداد وسایل نقلیه عبوری در هر معبر

تخمین حجم و ترکیب مسافران

تعداد وسایل نقلیه عبوری یکی از عوامل اصلی در برآورد میزان خسارت است. سرویس های مختلفی وجود دارند که می توانند برای تهیه چنین اطلاعاتی مورد استفاده قرار گیرند. یکی از این سرویس ها نقشه های گوگل ترافیک^۵ است که در برخی از مناطق این اطلاعات را ارائه می دهد. با داشتن چنین لایه های اطلاعاتی می توان تخمینی از تعداد جمعیت عبوری در هر معبر را به دست آورد.

5. Google Traffic

تخمین تأخیر به وجود آمده

در هر معبر با استفاده از اختلاف مقادیر به دست آمده در گام های ۲ و ۳؛

تخمین خسارت غیر مستقیم

به طور مثال هزینه تأخیر در فعالیت های اقتصادی و یا هزینه افزایش سوخت به وجود آمده بر اثر تأخیر، در واحد زمان که می تواند از تخمین متوسط درآمد هر فرد در واحد زمان و یا میزان مصرف سوخت در هر ساعت به دست آید. **جدول شماره ۲** این مقادیر را در مراجع مختلف نشان می دهد.

جدول ۳. تعداد وسایل عبوری از بزرگراه های درگیر سیل در روزهای هفته

روز هفته	بازه زمانی بازدید	بزرگراه همت		بزرگراه امام علی (ع)		بزرگراه حکیم	
		شخصی	تاکسی	شخصی	تاکسی	شخصی	تاکسی
یکشنبه	۸ الی ۹	۶۱۲	۱۱۳۳۱	۶۸۷	۱۳۳۱۲	۹۸	۱۱۰۲۳
	۱۲ الی ۱۳	۷۸۹	۱۳۶۵۲	۶۲۶	۱۳۰۲۵	۲۵۳	۱۳۶۴۱
	۱۶ الی ۱۷	۵۰۳	۱۲۳۶۱	۵۱۲	۱۲۶۳۲	۲۰۱	۱۲۳۱۲
سه شنبه	۸ الی ۹	۵۲۳	۱۰۲۴۱	۶۱۵	۱۱۲۱۲	۵۴	۹۹۳۷
	۱۲ الی ۱۳	۶۱۲	۱۲۳۴۱	۵۶۸	۱۱۸۹۸	۱۹۸	۱۲۱۷۳
	۱۶ الی ۱۷	۴۲۹	۱۱۳۶۱	۴۸۳	۱۱۷۱۶	۱۵۲	۱۳۰۱۲
پنجشنبه	۸ الی ۹	۴۹۸	۱۰۱۱۲	۴۸۵	۹۹۵۱	۳۶	۹۱۲۶
	۱۲ الی ۱۳	۵۶۶	۱۲۳۹۹	۳۹۸	۱۲۱۵۲	۱۰۲	۱۰۵۱۸
	۱۶ الی ۱۷	۳۱۲	۱۲۳۶۵	۳۶۲	۱۲۸۵۲	۵۸	۱۰۲۰۱



تقاطع بزرگراه همت با شریعتی ساعت ۱۲ ظهر روز سه‌شنبه ۱۴۰۲/۳/۱۳



تقاطع بزرگراه امام علی (ع) با همت ساعت ۸ صبح روز سه‌شنبه ۱۴۰۲/۳/۱۳



تقاطع بزرگراه امام علی (ع) با همت ساعت ۱۶ عصر روز سه‌شنبه



تقاطع بزرگراه همت با شریعتی ساعت ۸ صبح روز سه‌شنبه ۱۴۰۲/۳/۱۳



تقاطع بزرگراه همت با شریعتی ساعت ۱۶ عصر روز سه‌شنبه ۱۴۰۲/۳/۱۳



تقاطع بزرگراه بزرگراه امام علی (ع) با همت ساعت ۱۲ ظهر روز سه‌شنبه

تصویر ۶. نمونه‌ای از انجام بازدیدهای میدانی در یک روز کاری هفته برای تخمین تعداد خودروهای عبوری از بزرگراه‌های درگیر سیل ۱۰۰ ساله

زمانی بلوک‌های متناوب، هیتوگراف بارش با دوره بازگشت ۱۰ و ۱۰۰ ساله تعیین شد. تنظیم پارامترهای مدل SWMM مطابق اطلاعات طرح جامع آب‌های سطحی شهر تهران انجام شده است (مهتاب قدس، ۱۳۹۰، ب).

با اجرای مدل بارش-رواناب محدود در محیط این نرم‌افزار به‌ازای بارش‌های ۱۰ و ۱۰۰ ساله، هیدروگراف جریان ورودی به شبکه کانال‌ها از سطح زیرحوضه‌ها به دست آمد. به‌عنوان مثال، تصویر شماره ۳ هیدروگراف رسیده به خروجی حوضه را در سیلاب ۱۰ و ۱۰۰ ساله نشان می‌دهد. در این تصویر، افقی شدن قله هیدروگراف سیل ۱۰۰ ساله نشان می‌دهد که در بالادست برخی کانال‌ها ظرفیت عبور سیل ۱۰۰ ساله را نداشته و بخشی از رواناب کانال از کانال خارج شده است. هیدروگراف زیرحوضه‌ها به مدل MIKE21 داده شد تا مدل‌سازی هیدرولیکی و پهنه‌بندی سیل در کل دامنه حل انجام شود. برای شبکه‌بندی محدوده مورد مطالعه از شبکه‌بندی مثلی استفاده شده اما با دو سایز متفاوت، سایز ۰/۱ مترمربع برای شبکه‌بندی محدوده کانال‌ها

تخمین خسارت به‌وجودآمده

مطابق فرمول شماره ۶، تخمین خسارت به‌وجودآمده با استفاده از ضرب مقادیر به‌دست‌آمده از گام‌های ۴، ۵ و ۶ برای هر کدام از معابر شهری قابل انجام است (پرگنولاتو و همکاران، ۲۰۱۷).

$$6. D = T_d * Pop * \alpha$$

در فرمول شماره ۶، D میزان خسارت، T_d میزان تأخیر در هر معبر، Pop جمعیت عبوری در واحد زمان و α نرخ خسارت در واحد زمان و فرد است.

یافته‌ها

اجرای مدل

برای انجام محاسبات بارش-رواناب در مدل، با استفاده از منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی شهر تهران و به کمک الگوی

جدول ۴. سرعت متوسط برآوردشده خودروها در بزرگراهها در روزهای عادی

سرعت متوسط در ایام هفته (کیلومتر بر ساعت)			بازه زمانی	بزرگراه
پنجشنبه	سهشنبه	یکشنبه		
۹۰	۸۵	۸۰	۸ الی ۹	حکیم
۸۷/۵	۸۵	۸۵	۱۲ الی ۱۳	
۵۵	۶۰	۶۵	۱۶ الی ۱۷	
۹۰	۷۵	۷۰	۸ الی ۹	همت
۸۰	۸۲/۵	۸۰	۱۲ الی ۱۳	
۳۵	۴۰/۵	۴۰	۱۶ الی ۱۷	
۹۰	۹۰	۸۵	۸ الی ۹	امام علی (ع)
۸۰	۹۰	۸۴/۳	۱۲ الی ۱۳	
۶۵	۶۵	۶۷/۵	۱۶ الی ۱۷	

نرم افزار MIKE21 قابلیت استفاده از هم پردازنده (CPU) و هم حافظه کارت گرافیک (GPU) سیستم را دارد. در پژوهش از قابلیت به کارگیری حافظه کارت گرافیک (GPU) جهت تسریع محاسبات عددی این نرم افزار استفاده شد. با استفاده از سیستمی با مشخصات فوق، یک بار اجرای مدل برای محدوده مطالعاتی، حدوداً ۲۱۵ ساعت به طول انجامید.

با انجام بازدیدهای میدانی و شمارش خودروها (تصویر شماره ۶)، تعداد خودروی عبوری در سه روز مختلف هفته (یکشنبه، سهشنبه و پنجشنبه) در بخش های تحت تأثیر سیل در بزرگراه های همت،

6. Central Processing Unit (CPU)

7. Graphics Processing Unit (GPU)

و سائز ۵ مترمربع برای بقیه مناطق استفاده شده است. تصویر شماره ۴ به عنوان نمونه بخشی از شبکه بندی محدوده مدل سازی را نشان می دهد.

تصویر شماره ۵-الف، محدوده مدل سازی را در محیط نرم افزار MIKE21 نشان می دهد و تصویر شماره ۵-ب، پهنه عمق سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله را که حاصل از اجرای مدل بوده است، به تصویر می کشد.

جهت اجرای مدل های ساخته شده در نرم افزار MIKE21 از یک سیستم با مشخصات: حافظه: 40 GB، پردازنده: Intel(R)Xeon(R) CPU E5-2695 v3 @ 2.3 GHz، تعداد هسته های پردازنده: ۱۶ و کارت گرافیک: NVIDIA GeForce GTX 1080 Ti استفاده شد.

جدول ۵. خسارات برآوردشده سیلاب ۰۱ ساله ناشی از افزایش ترافیک شهری در بزرگراه امام علی

روز هفته	زمان بازدید	میزان خسارت به رانندگان تاکسی (میلیون تومان)	میزان خسارت به کارمندان (میلیون تومان)	میزان خسارت به خودروهای کاری (میلیون تومان)	میزان خسارت به خودروهای غیر کاری (میلیون تومان)	کل خسارات (میلیون تومان)
یکشنبه	۸ الی ۹	۱/۱۵	۲۶۷/۵	۱/۴	۳	۲۷۳/۰۵
	۱۲ الی ۱۳	۱/۸۴	۲۸۵/۰۷	۱	۴	۲۹۱/۹۱
	۱۶ الی ۱۷	۱/۸۳	۲۷۱/۶۰	۰/۸	۲	۲۷۶/۲۳
سهشنبه	۸ الی ۹	۱/۰۵	۳۴۹/۷۶	۱	۴	۲۵۵/۸۱
	۱۲ الی ۱۳	۱	۲۴۲/۰۲	۱/۴	۴	۲۴۸/۴۲
	۱۶ الی ۱۷	۰/۸۳	۲۵۱/۸۸	۰/۹۴	۳	۲۵۶/۶۵
پنجشنبه	۸ الی ۹	۱/۲	۲۱۴	۰/۷۴	۳/۸	۲۱۹/۷۴
	۱۲ الی ۱۳	۱/۵	۲۵۵/۸۶	۰/۶۱	۴	۲۶۱/۹۷
	۱۶ الی ۱۷	۲/۱۵	۲۷۲/۹۴	۰/۵۵	۵/۵۱	۲۸۱/۱۵



جدول ۶. خسارات برآوردشده سیلاب ۰۰۱ ساله ناشی از افزایش ترافیک شهری در بزرگراه امام علی

روز هفته	زمان بازدید	میزان خسارت به رانندگان تاکسی (میلیارد تومان)	میزان خسارت به کارمندان (میلیارد تومان)	میزان خسارت به خودروهای کاری (میلیارد تومان)	میزان خسارت به خودروهای غیر کاری (میلیارد تومان)	کل خسارات (میلیارد تومان)
	۸ الی ۹	۳/۹۷	۹۲/۳۹	۰/۳۵	۳/۳۲	۱۰۰
یکشنبه	۱۲ الی ۱۳	۳/۶۲	۹۵/۸	۰/۳۲	۳/۵۱	۱۰۳/۲۵
	۱۶ الی ۱۷	۲/۹۶	۹۱/۱	۰/۲۶	۳/۴۱	۹۷/۳۳
	۸ الی ۹	۳/۵۶	۸۴	۰/۳۲	۳/۰۳	۹۰/۹۱
سهشنبه	۱۲ الی ۱۳	۳/۲۹	۸۷/۴۵	۰/۲۹	۳/۲۱	۹۴/۲۴
	۱۶ الی ۱۷	۲/۸۰	۸۴/۶۴	۰/۲۵	۳/۱۶	۹۰/۸۵
	۸ الی ۹	۲/۸۱	۷۳/۳۲	۰/۲۵	۲/۷	۷۹/۱
پنجشنبه	۱۲ الی ۱۳	۳/۲۸	۸۵/۸۰	۰/۲۱	۳/۲۸	۹۲/۵۷
	۱۶ الی ۱۷	۲/۱	۹۱/۵۳	۰/۱۹	۳/۵۵	۹۷/۳۷

دستمزد ۱ ساعت کاری برای رانندگان تاکسی: ۱۰۷۱۵۰۰ ریال (استعلام از رانندگان تاکسی)

دستمزد ۱ ساعت کاری برای کارمندان: ۱۱۹۰۵۰۰ ریال (استعلام از وزرات تعاون، کار و رفاه اجتماعی)

همچنین:

خسارت واحد واردشده به خودروهای کاری (تاکسی): ۹۵۸۳۰ ریال (استعلام از رانندگان تاکسی و تعمیر کاران)

خسارت واحد واردشده به خودروهای غیر کاری (شخصی): ۵۰۰۰ ریال (استعلام از رانندگان تاکسی و تعمیر کاران)

تعداد مسافران هر خودروی کاری، ۳ نفر فرض شده است.

همچنین در زمانی که عمق آب گرفتگی به ۰/۵ متر می‌رسد، فرض می‌شود اتومبیل توانایی عبور را ندارد و این بخش از تندر (بزرگراه) مسدود شده است و رانندگان به سراغ مسیر جایگزین می‌روند.

میزان برآوردی خسارت ناشی از سیلاب ۱۰ و ۱۰۰ ساله در بزرگراه امام علی (ع) برای روزهای یکشنبه، سه‌شنبه و پنجشنبه در **جدول شماره ۵ و ۶** ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود به‌طور سرانگشتی خسارت سیلاب ۱۰۰ ساله بیش از ۳۰۰ برابر خسارت سیلاب ۱۰ ساله تخمین زده شده است. در سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰ سال، مقاطعی از بزرگراه‌ها دچار آب گرفتگی با عمق‌های بیشتر از ۰/۵ متر می‌شوند و در بعضی مقاطع به حدوداً ۳ متر هم می‌رسند. در این عمق‌ها اساساً اتومبیل‌ها توانایی عبور از آب را ندارند؛ بنابراین می‌توان فرض کرد بزرگراه مسدود شده و رانندگان به سراغ مسیر جایگزین مثل بزرگراه صدر، بزرگراه صیاد شیرازی و خیابان‌های دیگر بروند. اما نتایج پهنه‌بندی سیل ۱۰۰ ساله نشان می‌دهد در این سیل در محدوده مورد بررسی، بخش بزرگی از خیابان‌ها و بزرگراه‌ها دچار

امام علی (ع) و حکیم، به ترتیب در بازه زمانی ۸ تا ۹ صبح، ۱۲ تا ۱۳ ظهر و ۱۶ تا ۱۷ عصر برآورد شد که نتایج آن در **جدول شماره ۳** ارائه شده است.

براساس مشاهداتی میدانی و بازدیدهای به‌عمل آمده و شرایط ترافیکی شهر تهران، این نتیجه حاصل شد که در روزهای عادی در بزرگراه‌های تهران با حداکثر سرعت مجاز نمی‌توان رانندگی کرد. در نتیجه سرعت متوسط در زمان‌هایی که تعداد وسایل نقلیه عبوری برآورد شده بود، با استفاده از سامانه نشان در روزهای مورد مطالعه برآورد شد و نتایج به شرح **جدول شماره ۴** حاصل شد. در برآورد سرعت در شرایط سیلابی (فرمول شماره ۴) نیز در صورتی که سرعت محاسبه‌شده در شرایط سیلابی بیش از سرعت متوسط ترافیک در شرایط عادی (**جدول شماره ۴**) باشد، کاهش سرعت ناشی از سیل برابر صفر در نظر گرفته شده است. همچنین، در شهر تهران، با در نظرگیری رسوب‌گیرهای برون‌شهری و درون‌شهری و اشغال‌گیری‌های نصب‌شده نیز فرض تحقیق بر جریان آب گل‌آلود سرریز شده از کانال‌ها بوده و فرض شده است اجسام سنگین معلق و زباله‌های همراه جریان در مسیر کانال‌ها باقی خواهند ماند و در سطح خیابان‌ها صرفاً رواناب جاری می‌شود. لذا از اثر واریزه‌های جریان در کاهش سرعت در سطح معابر و بزرگراه‌ها صرف‌نظر شده است.

براساس روش ارائه‌شده در بخش قبل، خسارات ناشی از افزایش ترافیک شهری بر اثر سیلاب در روزهای مختلف برآورد شده و در ادامه آمده است. اساس محاسبه خسارت، برآورد ساعات تأخیر ایجادشده ناشی از سیل و در نظرگیری یک دستمزد یا درآمد متوسط برای هر ساعت کاری براساس حقوق متوسط ماهانه سال ۱۴۰۲ بوده است.

دستمزد یا درآمد متوسط برآوردشده برای مسافران به شرح زیر بوده است:



واریزه جریان سیلابی در کاهش سرعت خودروها در بزرگراهها نیز از دیگر محدودیت‌های این تحقیق است که در مطالعات آتی می‌توان به آن‌ها پرداخت. بنابراین، پژوهش‌های آینده می‌توانند با بهره‌گیری از داده‌های واقعی تر و جامع‌تر، توسعه مدل‌های یکپارچه پیش‌بینی سیلاب که اثر تغییرات اقلیمی و توسعه شهری را لحاظ کنند، و بررسی سناریوهای مختلف مدیریت سیلاب، دقت و کارایی برآورد خسارات و راهکارهای کاهش آسیب‌پذیری شهری را افزایش دهند.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

در این مطالعه، تمام اصول اخلاق در پژوهش رعایت شد. از آنجایی که هیچ آزمایشی بر روی نمونه‌های حیوانی یا انسانی انجام نشد، هیچ کد اخلاقی اخذ نشد.

حامی مالی

این مقاله از پایان‌نامه محمدرضا معراجی، دانش‌موخته گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه شهید بهشتی استخراج شده است. این پژوهشی همچنین از حمایت مالی مرکز تحقیقات فضایی ایران بهره‌مند است.

مشارکت نویسندگان

بصری‌سازی و نرم‌افزار: محمدرضا معراجی، جعفر یزدی و محمد شاهسوندی؛ مفهوم‌سازی و روش‌شناسی: جعفر یزدی و محمد شاهسوندی؛ اعتبارسنجی، تحلیل رسمی، تحقیق، منابع و جمع‌آوری داده‌ها: محمدرضا معراجی و جعفر یزدی؛ نگارش پیش‌نویس اصلی، بررسی، ویرایش، نظارت و مدیریت پروژه: جعفر یزدی؛ جذب سرمایه: جمال آغایاری و امیرحسین عبدی.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.

آب‌گرفتگی شدید خواهند شد و باتوجه‌به اینکه شریان‌های اصلی بزرگراهی و خیابان‌های اطراف دچار آب‌گرفتگی می‌شود، عملاً در چنین شرایطی، روز کاری از دست‌رفته تلقی می‌شود. با این فرض، خسارت ترافیکی پهنه سیل ۱۰۰ ساله براساس از دست‌رفتن یک روز کاری کامل محاسبه شده است.

در مورد سیل ۱۰ ساله باتوجه‌به عمق محاسباتی آب‌گرفتگی بزرگراهها (در پهنه سیل) در آن‌ها امکان تردد خودروها وجود داشته است و لذا مبنای محاسبه خسارت، میزان ساعت‌های تأخیر ایجادشده بوده است. محاسبات فوق برای بزرگراه‌های همت و حکیم نیز محاسبه شده است که به دلیل محدودیت فضا، مجال پرداختن به آن نیست و خواننده محترم در صورت تمایل به اطلاعات بیشتر می‌تواند به مرجع معراجی (۱۴۰۰) رجوع نماید.

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با بهره‌گیری از مدل هیدرولیکی دوبعدی MIKE21 و داده‌های دقیق مکانی و توپوگرافی، توانست به شبیه‌سازی دقیق سیلاب در محدوده شرق تهران بپردازد و تأثیرات سیل‌گرفتگی بزرگراهها را از بعد اقتصادی تحلیل نماید. نتایج حاصل نشان می‌دهد افزایش دوره بازگشت سیلاب به‌طور چشمگیری باعث افزایش مساحت، عمق و سرعت جریان می‌شود، به‌طوری‌که سیلاب ۱۰۰ ساله نسبت به سیلاب ۱۰ ساله پهنه‌ای تقریباً ۴ برابر و عمقی بیش از ۲ برابر دارد. همچنین تحلیل خسارات اقتصادی نشان داد سیلاب‌ها بیشترین تأثیر را بر ترافیک بزرگراه‌های شمالی-جنوبی و به‌ویژه در ساعات اوج ترافیک دارند؛ این امر موجب افزایش چشمگیر خسارت‌های غیرمستقیم، به‌ویژه برای گروه‌هایی مانند رانندگان تاکسی و کارمندان می‌شود. در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد ناکارآمدی برخی از زیرساخت‌های شهری، از جمله پل‌ها و کانال‌های سیل‌برگردان، نقش مهمی در تشدید خسارات سیلاب دارد. لذا بازنگری در طراحی سازه‌های هیدرولیکی، توسعه سامانه‌های هشدار سریع و ارتقای حمل‌ونقل عمومی از جمله راهکارهای مؤثر برای کاهش آسیب‌پذیری شهری در برابر رخدادهای حادی محسوب می‌شوند.

باتوجه‌به وجود عدم قطعیت‌های متعدد در برآوردهای اقتصادی ناشی از افزایش تردد شهری، اعداد حاصل‌شده را نباید قطعی تلقی کرد، بلکه این برآوردها صرفاً نمایی کلی از حدود و مقیاس خسارات واردشده ارائه می‌دهند. بی‌تردید، در تحقیقات آتی با ارتقای سطح اطلاعات موجود—مانند داده‌های دقیق‌تری از تعداد خودروها، جمعیت متأثر و الگوهای ترافیکی—می‌توان به برآوردهای واقع‌گرایانه‌تر و قابل‌اعتمادتری دست یافت.

از جمله محدودیت‌های این تحقیق می‌توان به عدم قطعیت در داده‌های ترافیکی و اقتصادی که دقت برآورد خسارات را محدود می‌کند، همچنین پوشش محدود داده‌های مکانی و زمانی و استفاده از داده‌های فرضی در شبیه‌سازی‌ها که ممکن است نتایج را تحت تأثیر قرار دهد، اشاره کرد. صرف‌نظر از اثر مستقیم ترافیک و نیز بار

References

- Afsari, R., & Shahsourary, M. S. (2022). [Spatial analysis of resilience against natural hazards with emphasis on floods: A case study of District 1 of Tehran (Persian)]. *Journal of Urban Planning Geography Research*, 10(4), 119-133. [Link]
- Bickel, P., Friedrich, R., Burgess, A., Fagiani, P., Hunt, A., & De Jong, G., et al. (2006). *Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment*. Georgia: HEATCO. [Link]
- Brownstone, D., & Small, K. A. (2005). Valuing time and reliability: Assessing the evidence from road pricing demonstrations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 39(4), 279-293. [DOI:10.1016/j.tra.2004.11.001]
- Choo, K., Kang, D., & Kim, B. (2020). Impact Assessment of urban flood on traffic Disruption using Rainfall-Depth-Vehicle speed Relationship. *MDPI*, 12, 926. [DOI:10.3390/w12040926]
- Chang, H., Lafrenz, M., Jung, I., Figiliozzi, M., & Megolaza, R. (2011). *Future flooding Impacts on Transportation Infrastructure and traffic Patterns Resulting from Climate change*. Washington: The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. [Link]
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. Ohio: McGraw-Hill, Inc. [Link]
- Douglas, E. M., Vogel, R. M., & Kroll, C. N. (2000). Trends in floods and low flows in the United States: Impact of spatial correlation. *Journal of Hydrology*, 240(1-2), 90-105. [DOI:10.1016/S0022-1694(00)00336-X]
- Danish Hydraulic Institute (DHI). (2012). *MIKE 21 flow model FM*. Denmark: Danish Hydraulic Institute. [Link]
- Gallegos, H. A., Schubert, J. E., & Sanders, B. F. (2009). Two-dimensional, high-resolution modeling of urban dam-break flooding: A case study of Baldwin Hills, California. *Advances in Water Resources*, 32(8), 1323-1335. [DOI:10.1016/j.advwatres.2009.05.008]
- Department for Transport (DfT). (2000). *Transport 2010: The 10-Year Plan*. Retrieved from: [Link]
- He, S., Farda, A., & Lumbroso, D. (2021). Flood impacts on urban transit and accessibility: A case study of Kinshasa. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 96, 102889. [DOI:10.1016/j.trd.2021.102889]
- Kamvar, K. (2021). [Determination of Flood-Critical Locations and Thresholds in Urban Flood Conveyance Channels Using Hydrological/Hydraulic Simulation (Persian)] [MA thesis]. Tehran: Shahid Beheshti University.
- Kasmalkar, I. G., Serafin, K. A., Miao, Y., Bick, I. A., Ortolano, L., & Ouyang, D., et al. (2020). When floods hit the road: Resilience to flood-related traffic disruption in the San Francisco Bay Area and beyond. *Science advances*, 6(32), eaba2423. [DOI:10.1126/sciadv.aba2423] [PMID]
- Ghodss, M. (2011). [Comprehensive plan for surface water management in Tehran (Persian)]. Tehran: Municipality, Technical Consulting Organization of Tehran.
- Ghodss, M. (2011). *Comprehensive plan for surface water management in Tehran: Assessment of the existing main stormwater network*. Tehran: Surface Water Management Organization.
- Meraji, M. R. (2023). [Estimation of flood impacts on urban travel time (Persian)] [MA thesis]. Tehran: Shahid Beheshti University.
- Norouzi, H. (2013). Assessment of crisis management strategies in the Golestan network [MA thesis]. Shahroud: Islamic Azad University.
- Park, H. J., Song, S. M., Kim, D. H., & Lee, S. O. (2024). Socioeconomic impact on urban resilience against flood damage. *Applied Sciences*, 14(17), 7882. [DOI:10.3390/app14177882]
- Pregolato, M., Ford, A., Wikinson, S., & Dawson, R. (2017). The Impact of flooding on road transport: A depth-disruption function. *Transportation Research part D*, 67-81. [DOI:10.1016/j.trd.2017.06.020]
- Pyatkova, K. (2018). *Flood Impacts on Road Transportation* [PhD dissertation]. England: University of Exeter.
- Rajput, A. S., Hoteit, I., & Sharma, R. (2022). Anatomy of disrupted traffic networks: post-flood recovery and delays. *Sustainable Cities and Society*, 97, 104693. [DOI:10.1016/j.scs.2023.104693.]
- Rossman, L., & Huber, W. (2015). *Storm Water Management Model Reference Manual Volume I, Hydrology*. Washington: U.S. EPA Office of Research and Development.
- Vickerman, R. (2000). Evaluation methodologies for transport projects in the United Kingdom. *Transport Policy*, 7(1), 7-16. [Link]
- Zeng, L., Chen, T. D., Miller, J. S., Goodall, J. L., & Zahura, F. T. (2024). Assessing The Spatially Heterogeneous Transportation Impacts of Recurrent Flooding in The Hampton Roads Region: Part 1 Auto Accessibility. arXiv preprint. [DOI:10.1016/j.trip.2025.101722]
- Zeng, L., Chen, T. D., Miller, J. S., Zahura, F. T., & Goodall, J. L. (2024). The Shifting Impact of Recurrent Flooding on Transportation Accessibility: A Case Study of Affected Populations in The Hampton Roads Region. arXiv preprint. [Link]