

## Research Paper

# Urban Flood Zoning Using an Integrated Hydrological-Hydraulic Modeling Approach: A Case Study of Districts 21 and 22 in Tehran, Iran



Ali Nasiri<sup>1,2</sup> , Esmail Salimi<sup>2</sup> , Morteza Delfan Azari<sup>2,\*</sup>, Jafar Yazdi<sup>3</sup> , Mohammad Shahsawandi<sup>3</sup> 

1. Department of Health in Disasters, School of Health, Baqiyatallah University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

2. Tehran Disaster Mitigation and Management Organization, Tehran, Iran.

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



**Citation** Nasiri A, Salimi E, Delfan Azari M, Yazdi J, Shahsawandi M. (2025). [Urban Flood Zoning Using an Integrated Hydrological-Hydraulic Modeling Approach: A Case Study of Districts 21 and 22 in Tehran, Iran (Persian)]. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 14(4):392-405. <https://doi.org/10.32598/DMKP.14.4.882.1>

 <https://doi.org/10.32598/DMKP.14.4.882.1>

## ABSTRACT

**Background and objective** Flood zoning has many applications in flood management and provides fundamental information for flood risk management. Flood zoning in urban areas is much more challenging than modeling in floodplain or river areas due to the two-dimensional nature of the flow and, on the other hand, the density of urban features such as buildings, streets, boulevards, and public pathways. In this novel study, flood zoning for districts 21 and 22 of Tehran (lacking a suitable surface water collection network) was conducted using a physically-based rainfall-runoff modeling and two-dimensional hydraulic flood routing.

**Method** In this study, the hydrologic modeling system (HEC-HMS) was used to estimate the runoff from the mountains, the MIKE21 model was used to estimate the flood zone of the runoff from the mountains, and the FLO-2D model was used to simulate urban rainfall-runoff. The equations used in hydraulic models included continuity and momentum equations. To investigate flood behavior and identify flood-prone areas, a triangular computational mesh with dimensions of 5 m<sup>2</sup> for rivers and canals and dimensions of 25 m<sup>2</sup> in other areas was used and equations were solved using numerical methods. The digital elevation model of the region was based on a combination of river and canal mapping data and GeoEye satellite images with a spatial resolution of 1 m<sup>2</sup>.

**Results** Modeling results showed that under 50-year rainfall conditions, 8% of Tehran's 21<sup>st</sup> and 22<sup>nd</sup> districts will be affected by flooding. In these areas, the maximum flood depth was estimated at 11.8 meters in Vardavard river, and the maximum flow speed was estimated at 4.5 meters per second at the beginning of Hashemzadeh Street (south of Kharrazi highway).

**Conclusion** In case of a 50-year rainfall event, a significant portion of the highways and main transportation arteries in districts 21 and 22 of Tehran will be flooded and disrupted. Moreover, various lands will fall within the flood zone. Due to the absence of a surface water collection network, waterlogging conditions throughout districts 21 and 22 are predicted. Therefore, the development of a surface water collection network is recommended for reducing flood risk in these areas.

**Keywords** Urban flood, Hydrological modeling, Physically-based modeling, Flood zoning

### Article Info:

Received: 18 Aug 2024

Accepted: 05 Nov 2024

Available Online: 01 Jan 2025

### \* 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 (739) 32403

**E-mail:** [j\\_yazdi@sbu.ac.ir](mailto:j_yazdi@sbu.ac.ir)



Copyright © 2025 The Author(s) by "authors retain the copyright and full publishing rights"

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.

## Extended Abstract

### Introduction

**P**opulous and developing cities in Iran, such as Tehran, face increasing flood risks. Climate change, increased intensity of sudden rainfall, urbanization and land use change, and lack of development of appropriate flood management infrastructure have led to an increase in the occurrence of flash floods. These floods can lead to widespread damage to urban infrastructure, disruption of transportation arteries, financial and human losses, environmental pollution and a reduction in the quality of life of citizens. Therefore, in order to effectively manage urban floods, it is essential to use appropriate methods and tools for flood hazard and risk analysis. In this regard, flood zoning is considered one of the important tools for analyzing flood risk and then planning to reduce it and increase urban resilience. This technique is more challenging in urban areas than in riverine areas or floodplains due to the density of buildings, streets, and other urban infrastructure. In this study, flood zoning was conducted for districts 21 and 22 of Tehran, which lack a suitable surface water collection network. As a novelty, we combined rainfall-runoff modeling with two-dimensional hydrologic modeling to analyze flood conditions in these districts.

### Methods

This study used numerical methods to simulate rainfall-runoff processes and flood zoning for districts 21 and 22 of Tehran. The study was conducted in three steps: 1) Hydrological modeling for simulating precipitation-runoff processes using the hydrologic modeling system (HEC-HMS), 2) Two-dimensional hydraulic modeling to investigate flood flow propagation in urban areas using MIKE21 and FLO-2D models, 3) Analyzing the results and assessing the effects of flooding on urban infrastructure and transportation arteries.

In the first step, the HEC-HMS model was used to estimate the amount of runoff entering the urban area from the northern mountains of Tehran. Design rainfall with a 50-year return period was determined and trended for mountainous and urban areas. In the next step, the MIKE21 model was used to simulate surface flows resulting from runoff entering the city and the FLO-2D model was used to examine the distribution of excess precipitation over urban surfaces. The reason for using the FLO-2D model was that the MIKE21 model alone was not able to convert excess precipitation on urban surfaces into a flood zone.

The equations used in hydraulic models include continuity and momentum equations. To investigate flood behavior and identify flood-prone areas, a triangular computational area with dimensions of 5 m<sup>2</sup> for rivers and canals and dimensions of 25 m<sup>2</sup> in other areas was discretized and solved using numerical methods. The digital elevation model of the region was based on a combination of river and canal mapping data and GeoEye satellite images with a spatial resolution of 1m<sup>2</sup>.

### Results

Modeling results showed that under 50-year rainfall conditions, 8% of Tehran's 21<sup>st</sup> and 22<sup>nd</sup> districts will be affected by flooding. In these areas, the maximum flood depth was estimated at 11.8 meters in the Vardavard River, and the maximum flow speed was estimated at 4.5 meters per second at the beginning of Hashemzadeh Street (south of Kharrazi Highway). Based on the model results, the following routes will be particularly affected by flooding:

Major highways: Kharrazi, Fahmideh, Lashkari, Hamedani, and Fath highways will face severe runoff at several points; Tehran-Karaj Subway: In some areas, especially south of Arash Kamangir Park, there is a risk of flooding and disruption to the operation of the subway; Main boulevards: Hashemzadeh, Jangalban, Jozani and Tabiat boulevards, which are located around the Chitgar Lake, are among the main flood routes; Commercial and service centers: Farhang Fruit and Vegetable Market, Imam Hussein Mosque, Sharif University Town, and Vardavard Boulevard are among the areas that are within the flood zone.

In addition to the above, flooding due to a 50-year rainfall event will lead to waterlogging conditions in districts 21 and 22. This indicates that, due to the absence of a water collection network, the likelihood of flooding and the resulting damage increases dramatically.

### Conclusion

To reduce the risk of flooding in districts 21 and 22 in Tehran, it is important to build a surface water collection system. The design of this system should be based on the topography, soil type and permeability of the area. By using high-precision data such as satellite images with high spatial resolution (e.g. world view satellite images), the accuracy of flood zones can be increased. Simulating flood conditions in case of implementing the surface water collection network and comparing it with the current situation can help to modify and optimize the proposed designs. Using the model prepared in the Tehran Flood



forecasting and warning system helps citizens and urban institutions be aware of flood hazards and reduce their risk. Given the flood zones, urban development policies should be adjusted in a way that prevents the increase of construction in flood-prone areas.

## Ethical Considerations

### Compliance with ethical guidelines

There were no ethical considerations to be considered in this research.

### Funding

This article was extracted from a research project funded by the Tehran Disaster Mitigation and Management Organization.

### Authors' contributions

Visualization and software: Jafar Yazdi and Mohammad Shahsavandi; Conceptualization, methodology, validation, formal analysis, investigation, resources, data collection, writing the original draft, review, editing and supervision: Jafar Yazdi; Project administration: Ali Nasiri, Esmail Salimi and Morteza Delfan Azari; Funding acquisition: Ali Nasiri, Esmail Salimi and Morteza Delfan Azari.

### Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.



## مقاله پژوهشی

پهنه‌بندی سیلاب شهری با رویکرد مدل‌سازی توأمان هیدرولوژیکی-هیدرولیکی حوضه  
آبریز: مطالعه موردی منطقه ۲۱ و ۲۲ شهر تهرانعلی نصیری<sup>۱\*</sup>، اسماعیل سلیمی<sup>۲</sup>، مرتضی دلفان آذری<sup>۲</sup>، جعفر یزدی<sup>۳</sup>، محمد شاه‌سوندی<sup>۳</sup>

۱. گروه سلامت در حوادث، بلایا و پدافند غیرعامل، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی بقیه الله (عج)، تهران، ایران.

۲. سازمان پیشگیری و مدیریت بحران شهر تهران، تهران، ایران.

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

Use your device to scan  
and read the article online

**Citation** Nasiri A, Salimi E, Azari M, Yazdi J, Shahsawandi M. (2025). [Urban Flood Zoning Using an Integrated Hydrological-Hydraulic Modeling Approach: A Case Study of Districts 21 and 22 in Tehran, Iran (Persian)]. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 14(4):392-405. <https://doi.org/10.32598/DMKP.14.4.882.1>

**doi** <https://doi.org/10.32598/DMKP.14.4.882.1>

## چکیده

**زمینه و هدف:** پهنه‌بندی سیلاب کاربرد وسیعی در مدیریت سیلاب دارد و یکی از اطلاعات اساسی و مهم در مدیریت ریسک سیلاب محسوب می‌شود. پهنه‌بندی سیلاب در مناطق شهری باتوجه به ماهیت دوبعدی جریان و از طرفی تراکم عوارض شهری، مانند ساختمان‌ها، خانه‌ها، بلوارها و معابر عمومی بسیار مشکل‌تر از مدل‌سازی در محدوده سیلاب، دشت و رودخانه‌هاست. در این پژوهش، پهنه‌بندی سیل برای مناطق ۲۱ و ۲۲ شهر تهران در حالت وضع موجود که تقریباً منطقه فاقد شبکه کانال‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی است با استفاده از مدل‌سازی بارش رواناب فیزیکی‌مبنا و روندی هیدرولوژیکی دوبعدی انجام شده است که این، نوآوری پژوهش محسوب می‌شود. هدف این تحقیق پهنه‌بندی مخاطره سیل در مناطق شهری با استفاده از مدل‌های ریاضی است.

**روش:** برای این منظور، از مدل HEC-HMS برای تخمین رواناب ورودی از کوهستان، از مدل MIKE21 برای تخمین پهنه سیلاب رواناب ورودی از کوهستان در منطقه شهری و از مدل Flo-2D برای شبیه‌سازی بارش - رواناب شهری استفاده شده است. معادلات مورد استفاده در مدل‌های هیدرولیک شامل معادلات پیوستگی و اندازه حرکت است. برای بررسی رفتار سیلاب و شناسایی مناطق سیل‌خیز، از یک شبکه محاسباتی مثلثی به ابعاد ۵ متر مربع برای رودخانه‌ها و کانال‌ها و ابعاد ۲۵ متر مربع در سایر مناطق استفاده شد و معادلات حل شد. مدل رقمی ارتفاعی این منطقه براساس ترکیبی از داده‌های نقشه‌برداری رودخانه و کانال و تصاویر ماهواره‌ای GeoEye با وضوح فضایی ۱ متر مربع تهیه شد.

**یافته‌ها:** براساس نتایج مدل‌سازی، محدوده‌های تحت سیلاب ۵۰ ساله با رویکرد مدل‌سازی تلفیقی در مناطق ۲۱ و ۲۲ احصا شده است که ۸ درصد از مساحت این مناطق را شامل می‌شود. در این پهنه‌ها حداکثر عمق سیل ۸/۱۱ متر در رودخانه وردآورد و بیشترین سرعت ۴/۵ متر بر ثانیه در ابتدای خیابان هاشم‌زاده (جنوب بزرگراه خرازی) به دست آمده است.

**نتیجه‌گیری:** نتایج نشان می‌دهد در صورت رخداد وقایع حدی نظیر بارش ۵۰ ساله، بخشی از بزرگراه‌ها و شریان‌های ارتباطی شهر تهران به سمت غرب دچار اختلال می‌شود و امکان تردد وجود نخواهد داشت. علاوه بر این، کاربری‌های مختلفی در پهنه سیل قرار می‌گیرد و به دلیل عدم وجود شبکه آب سطحی، شرایط ماندابی در سرتاسر مناطق ۲۱ و ۲۲ شهر تهران قابل پیش‌بینی است. بنابراین توسعه شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی از اولویت‌های اصلی کاهش ریسک سیل در این مناطق است.

**کلیدواژه‌ها:** سیلاب شهری، مدل‌سازی هیدرولوژیکی، مدل‌سازی فیزیکی‌مبنا، پهنه‌بندی سیل

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۲۸ مرداد ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۵ آبان ۱۴۰۳

تاریخ انتشار: ۱۲ دی ۱۴۰۳

## \* نویسنده مسئول:

دکتر جعفر یزدی

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

تلفن: ۳۳۴۰۳ (۷۳۹) +۹۸

پست الکترونیکی: j\_yazdi@sbu.ac.ir



Copyright © 2025 The Author(s) by "authors retain the copyright and full publishing rights"

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

المان‌های مختلف و کاربری‌های گسترده پیچیدگی‌های زیادی دارد. با توجه به اهمیت موضوع، تاکنون تحقیقات متعددی در زمینه مدل‌سازی و پهنه‌بندی سیل انجام شده و در حال حاضر نیز در سطح ملی و بین‌المللی ادامه دارد. در ادامه به‌عنوان نمونه، به برخی از این مطالعات اشاره می‌شود.

**کار و اسمیت (۲۰۰۷)** به بررسی پیوند مدل‌های هیدرولیکی دوبعدی جریان سطحی با مدل‌های یک‌بعدی زیرسطحی پرداختند. ایشان چنین رویکردی را برای انواع حوضه‌های آبریز کوچک و پیچیده شهری در استرالیا و نیوزیلند شرح دادند. **وینوویچ و توتولیک (۲۰۰۹)** تفاوت قابلیت‌های پیش‌بینی رویکردهای مدل‌سازی یک‌بعدی و یک‌بعدی-دوبعدی را به‌منظور تجزیه و تحلیل سیل شهری در زمین‌های نامنظم بررسی کردند. همان‌طور که انتظار می‌رفت، نشان داده شد درمورد زمین‌هایی که فقط برای مدل‌های یک‌بعدی مناسب هستند، پیش‌بینی متغیرهای جریان در امتداد آبراهه می‌تواند واقع‌بینانه باشد. اما هنگامی که صحبت از طرح بر روی یک نقشه دوبعدی می‌شود، نمایش توپوگرافی زمین همراه با تکنیک‌های نقشه‌برداری که استفاده می‌شود، عامل محدودکننده‌ای را در کاربرد موفق آن‌ها معرفی می‌کند.

**ووزیناکی و همکاران (۲۰۱۲)** جهت ارزی خسارات سیل در بخش کشاورزی از مدل دوبعدی MIKE FLOOD به‌منظور شبیه‌سازی هیدرولیک رودخانه استفاده کردند. آن‌ها از این مدل کوپل شده، برای شبیه‌سازی سیل در حوضه رودخانه کوپلاریس در کرت یونان استفاده کردند. **بیش و همکاران (۲۰۱۶)** جهت ارائه راه‌حلی برای مشکل مدیریت آب‌های سطحی در منطقه شهری، به شبیه‌سازی سیلاب شهری و شبکه زهکشی شهری با استفاده از مدل SWMM **(راسمن، ۲۰۱۰)** مدل MIKEURBAN پرداختند. در این تحقیق، آن‌ها از نتایج مربوط به بارش شدید جولای ۲۰۱۳ در منطقه آربانیا برای پهنه‌بندی استفاده کردند. ارنا و همکاران (۲۰۱۸) از مدل هیدرودینامیکی FLO-2D برای شناسایی روستاهای مستعد سیل استفاده کردند. **یانگ و همکاران (۲۰۲۰)** با استفاده از مدل SWMM و MIKE21 شبیه‌سازی سیلاب‌های شهری در شرایط بارندگی ثابت و نالیستا با دوره‌های بازگشت مختلف را مورد بررسی قرار دادند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد عمق بارندگی در حالت نالیستایی بیشتر از عمق بارندگی زمانی است که دوره بازگشت کمتر از ۱۰ سال بود، اما برای دوره بازگشت بیش از ۲۰ سال نتایج معکوس شد.

**ژانگ و همکاران (۲۰۲۰)** یک مدل هیدرولیکی پیوند دینامیکی 1D-2D در زمان واقعی، با هدف بررسی قابلیت کاربرد مدل در شبیه‌سازی سیلاب حوضه‌های کوهستانی ایجاد کردند. قابلیت مدل در برابر جاری شدن سیل در واقعه ۲۲ جولای ۲۰۱۰ و ۱۴ آگوست ۲۰۱۳ در منطقه مورد مطالعه تأیید شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد خروجی مدل سیل بسیار شبیه نتایج مشاهده‌شده در رویدادهای سیل تاریخی است.

مقابله با بحران‌های محیط شهری یکی از موضوعاتی است که همه جوامع شهری با آن مواجه‌اند. سیل می‌تواند اختلالات عمده‌ای در شهرها ایجاد کند و تأثیرات قابل‌توجهی بر شهروندان، زیرساخت‌ها، کاربری‌ها و دارایی‌ها و محیط زیست داشته باشد **(یزدی، ۲۰۱۸)**. این تأثیرات ممکن است با تغییرات آب‌وهوایی و شرایط اقتصادی-اجتماعی و گسترش شهرنشینی تشدید د. روندهای روبه‌رشد فراوانی و شدت وقوع بارش‌های ناگهانی احتمال وقوع سیلاب شهری را افزایش داده است. در نتیجه انتظار می‌رود در دهه‌های آینده اثرات سیل بر جوامع و دارایی‌ها تشدید شود. در کوتاه‌مدت، این موارد می‌تواند شامل خطر جانی، خسارت به اموال و دارایی‌ها و خرابی زیرساخت‌هایی مانند حمل‌ونقل و شبکه‌های برق باشد. در میان‌مدت، سیلاب‌های آلوده خطر سیل را افزایش داده و باعث گسترش بیماری می‌شود. در درازمدت، اختلال ناشی از سیل می‌تواند پیامدهای اقتصادی داشته باشد که فراتر از منطقه آسیب‌دیده است.

با توجه به اثرات و پیامدهای سیل، نیاز به برنامه‌ریزی برای کاهش اثرات سیل و پیش‌بینی سیل کاملاً محسوس و قابل‌درک است. به‌عبارت دیگر، مدیریت و کنترل سیل، نیازمند مدل‌سازی و پیش‌بینی مناطق سیل‌گیر قبل از وقوع آن است و این کار از طریق ابزار مدل‌سازی هیدرولژیکی و هیدرولیکی میسر است. مدل‌سازی و پهنه‌بندی سیلاب به‌عنوان یکی از ابزارهای کلیدی در مدیریت بحران‌های شهری، نقش مهمی در افزایش تاب‌آوری شهرها در برابر مخاطرات طبیعی ایفا می‌کند. در مطالعات متعددی، مانند پژوهش‌های انجام‌شده توسط **باتر و همکاران (۲۰۲۵)** و **سان و همکاران (۲۰۱۹)**، به کاربرد گسترده مدل‌های هیدرولژیکی و GIS در شناسایی و کاهش مناطق پرخطر سیل‌گیر اشاره شده است. این مدل‌ها به شهرها اجازه می‌دهند که با شبیه‌سازی الگوهای بارش و جریان‌های سیلابی، مناطق حساس به سیل را شناسایی کرده و برنامه‌های بهینه‌سازی و حفاظت شهری را به اجرا بگذارند. نمونه‌هایی از کاربردهای بین‌المللی شامل طرح‌های تاب‌آوری در برابر سیلاب در کشورهای، چون ژاپن و هلند است که در آن‌ها پهنه‌بندی سیلاب به شکل گسترده‌ای برای کاهش خطرات و محافظت از زیرساخت‌ها و ساکنین مورد استفاده قرار گرفته است.

شهرهای در حال توسعه، که اغلب با رشد سریع و نبود زیرساخت‌های مقاوم روبه‌رو هستند، نیاز مبرمی به مدل‌سازی و پهنه‌بندی سیلاب برای کاهش خطرات ناشی از بلایای طبیعی دارند. چنین مدل‌سازی‌هایی به این شهرها کمک می‌کند تا با شناخت دقیق‌تر مناطق پرخطر، برنامه‌های کارآمدتری برای کاهش آسیب‌پذیری اجرا کرده و از اثرات شدید بلایای طبیعی بکاهند. به‌طور کلی هدف از شبیه‌سازی و مدل‌سازی سیلاب آگاهی از مساحت منطقه درگیر با سیلاب، عمق آب و سرعت جریان است. از طرفی مدل‌سازی سیل شهری به واسطه وجود



## روش

شبیه‌سازی سیلاب بر مبنای معادلات فیزیک حاکم بر جریان از قبیل بقای جرم، پیوستگی، ممثوم و انرژی است، اما پیچیدگی و حجم بالای محاسبات در این روش‌ها و نیاز آن‌ها به داده‌های ورودی خاص، دامنه استفاده از این مدل‌ها را در بحث سیلاب شهری محدود می‌کند. برای مدل‌سازی و کاهش این پیچیدگی‌ها ۲ نوع مدل نیاز است: یک مدل هیدرولوژیکی که رواناب سطح را از بارش شبیه‌سازی می‌کند و یک مدل هیدرولیکی که جریان داخل کانال‌ها و مجاری و خان‌ها و سطوح را توصیف کند. بخشی از رواناب ورودی به مناطق ۲۱ و ۲۲ شهر تهران، از مناطق کوهستانی بالادست وارد محدوده می‌شود. رواناب ورودی از کوهستان با استفاده از روش مدل‌سازی هیدرولوژیکی مفهومی مطابق با مطالعات طرح جامع و فرمانطقه‌ای حوضه‌های آبریز اصلی شهر تهران برآورد و به‌عنوان ورودی به مدل هیدرولیکی مناطق ۱ و ۲ معرفی می‌شوند (سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران، ۱۳۹۰). مدل‌سازی بارش در سطح مناطق ۲۱ و ۲۲ بعد از کسر تلفات بارش به روش عدد منحنی SCS (چاو و همکاران ۱۹۸۸)، به‌صورت بارش خالص بر روی سطوح شهری در نظر گرفته شده و رواناب حاصله به همراه رواناب وارده از مناطق کوهستانی شهر با استفاده از حل معادلات آب‌های کم‌عمق، یعنی معادلات دوبعدی جریان (هادیان و زراتی، ۱۳۸۸) بر روی سطوح شهری شبیه‌سازی می‌شود و پهنه‌های سیلابی استخراج می‌شود.

### مدل‌های شبیه‌سازی

مدل‌سازی بارش رواناب زیرحوضه‌های کوهستانی مشرف به شهر: به‌منظور مدل‌سازی هیدرولوژیکی زیرحوضه‌های کوهستانی بالادست شهر از مدل‌سازی مفهومی به کمک نرم‌افزار HEC-HMS نسخه ۴/۱۲ بهره برده شده است. در حالت کلی، فرایند مدل‌سازی هیدرولوژیکی به‌صورت مفهومی شامل ۴ زیربخش اصلی است: ۱. منطقه‌ای کردن بارش، ۲. تخمین تلفات بارش، ۳. برآورد هیدروگراف رواناب، ۴. روندی هیدروگراف رواناب. برای منطقه‌ای کردن بارش، یعنی تعیین توزیع مکانی بارش، از روش پیشنهادی طرح جامع استفاده شده است و باتوجه به ارتفاع متوسط هر زیرحوضه، بارش طرح از طریق رابطه شدت - مدت - فراوانی (فرمول شماره ۱) تخمین زده می‌شود (سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران، ۱۳۹۰).

$$1. j = C_{Alt.Rp} \times D^{-0.645}$$

$i$  = شدت بارش (میلیمتر بر ساعت)،  $D$  = تداوم بارندگی (دقیقه)،  $C_{Alt.Rp}$  ضریب معادله که متناسب با دوره بازگشت بارش و ارتفاع متوسط حوضه انتخاب می‌شود.

**دونگ و همکاران (۲۰۲۲)** به‌منظور شبیه‌سازی سیل شهری و ارزی خطرات سیل برای افراد و وسایل نقلیه در سیلاب، یک مدل هیدرودینامیکی یکپارچه یک‌بعدی-دوبعدی رواناب با در نظر گرفتن مازول ارزی خطر سیل بر مردم و وسایل نقلیه ارائه کردند. آن‌ها یک سیلاب شهری واقعی که در گلاسکوی انگلستان رخ داده است را شبیه‌سازی کردند و تأثیر سیستم زهکشی رواناب بر فرایندهای طغیان سیل و توزیع درجه خطر افراد و وسایل نقلیه را به‌طور جامع بررسی کردند. ایشان گزارش کردند حدود ۸۸٪ درصد از کل حجم رواناب توسط شبکه جمع‌آوری رواناب تخلیه شد و سیستم زهکشی توانست (به‌جز در برخی مناطق محدود محلی با عمق و سرعت زیاد آب)، خطرات سیل بر مردم و وسایل نقلیه را به شدت کاهش دهد.

**زندسلیم و همکاران (۲۰۲۴)** دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی مختلف در سطح دنیا را بر روی نتایج مدل‌سازی پهنه‌بندی دوبعدی سیلاب شهری بررسی و ارزی کردند. در کار ایشان، منطقه سیل‌برگردان غرب تهران به‌عنوان مطالعه مورد انتخاب شد و با بررسی اثرات جایگزینی نقشه با وضوح بالا (یک نقشه با وضوح ۵ متری) با نقشه‌های با وضوح کمتر، تحلیل‌هایی بر روی میزان دقت و خطای منابع اطلاعاتی مختلف ارائه شد.

علی‌رغم تحقیقات گسترده مرتبط با پهنه‌بندی سیلاب شهری، شرایط، و حالات واقعی و نیازمند بررسی و مطالعه بیشتر در این زمینه همچنان وجود دارد. در اکثر تحقیقات مرتبط از جمله موارد مذکور، جریان‌های ورودی به کانال‌ها و مجاری به‌عنوان داده و شرایط مرزی معلوم به مدل‌ها داده می‌شود و سپس معادلات جریان بر روی مسیر آبراهه‌ها و کانال‌ها (به‌صورت یک‌بعدی) و در صورت سرریز شدن بر روی سطوح و معابر (به‌صورت دوبعدی) بر روی یک شبکه محاسباتی، گسسته و مدل‌سازی می‌شود. این شرایط ورودی معمولاً از مدل‌های هیدرولوژیکی مفهومی یا اندازه‌گیری‌های میدانی حاصل می‌شود.

در برخی شرایط واقعی ممکن است شبکه کانال یا آبراهه وجود نداشته باشد و از طرفی پهنه‌بندی سیل در این مناطق مدنظر باشد. این مسئله در منطقه ۲۱ و ۲۲ شهر تهران که هنوز شبکه جمع‌آوری و هدایت سیلاب آن توسعه پیدا نکرده است، به‌خوبی مصداق پیدا می‌کند. در این شرایط، پهنه‌بندی سیل نیازمند مدل‌سازی فیزیکی همزمان بارش و رواناب در سطح حوضه آبریز است. چنین رویکردی در تحقیقات بین‌المللی و به‌ویژه در سطح ملی بسیار کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در پژوهش حاضر، مدل‌سازی بارش رواناب فیزیک‌مبنا برای مناطق شهری به‌منظور استخراج پهنه سیلاب شهری برای اولین بار در کشور توسعه داده شده است و نوآوری پژوهش حاضر محسوب می‌شود. این روش برای استخراج پهنه‌های سیلاب مناطق ۲۱ و ۲۲ شهر تهران به کار گرفته شده است.



مختلف، به عنوان هیتوگراف بارش زیر حوضه‌ها به مدل بارش رواناب معرفی می‌شود.

#### مدل سازی بارش رواناب زیر حوضه‌های شهری

برای مدل سازی بارش رواناب زیر حوضه‌های شهری، در شرایط وضع موجود از روش عدد منحنی برای تخمین تلفات بارش استفاده شده است (روابط بخش قبل). سپس بارش خالص به روش هیدرولیکی با حل عددی معادلات جریان با استفاده مدل هیدرولیکی دوبعدی، بر روی سطوح شهری روندی شده و عمق و سرعت در هر پیکسل محاسباتی در محدوده آبراهه‌ها و رودخانه‌ها با ابعاد  $5m^2$  و بر روی سطوح با ابعاد  $25m$  در سطح محدوده به دست می‌آید. عدد منحنی زیر حوضه‌ها در مطالعات فرمانطقه‌ای حوضه‌های آبریز شهر تهران با توجه به نقشه‌های کاربری زمین برای زیر حوضه‌های مختلف محاسبه شده است و در این پژوهش، از اعداد منحنی مطالعات مذکور برای زیر حوضه‌ها استفاده شده است (سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران، ۱۳۹۰).

#### مدل سازی هیدرولیکی و پهنه‌بندی سیل

مدل سازی هیدرولیکی شامل حل عددی معادلات دیفرانسیلی حاکم بر جریان، شامل معادلات پیوستگی و منتمم به صورت دوبعدی بر روی سطوح معابر و خان‌هاست. این معادلات به صورت فرمول‌های شماره ۴، ۵ و ۶ نوشته می‌شوند و به معادلات آب‌های کم‌عمق معروفاند (موسسه هیدرولیک دانمارک، ۲۰۱۴):

معادله پیوستگی:

$$4. \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t}$$

معادله منتمم در جهت X:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{p \cdot q}{h} \right) + gh \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{ghvp^2 + q^2}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{pw} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h \cdot T_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h \cdot T_{xy}) \right] - \Omega q - fVV_x + \frac{h}{pw} + \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0$$

معادله منتمم در جهت Y:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{p \cdot q}{h} \right) + gh \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{ghvp^2 + q^2}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{pw} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h \cdot T_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (h \cdot T_{yy}) \right] - \Omega q - fVV_y + \frac{h}{pw} + \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0$$

در فرمول‌های شماره ۴، ۵ و ۶  $h(x,y,t) = \xi - d$  عمق (متر)،  $d(x,y,t)$  عمق آب متغیر با زمان (متر)،  $\xi(x,y,t)$  تراز سطح زمین (متر)،  $C(x,y)$  ضریب شزی  $\left( \frac{m^{0.5}}{Sec} \right)$ ، چگالی جریان در جهت X و Y بر حسب  $\frac{m^{0.5}}{Sec \cdot m}$ ،  $v, u(x,y,t)$  متوسط سرعت جریان

برای محاسبه تلفات بارش، از روش عدد منحنی<sup>۱</sup> استفاده می‌شود (چاو و همکاران ۱۹۸۸)

$$2. S = 25.4 \times \left( \frac{CN}{1000} - 10 \right)$$

در فرمول شماره ۲، CN عدد منحنی و S حداکثر پتانسیل نگهداشت آب در سطح حوضه (میلی‌متر) است. عدد منحنی باتوجه به کاربری زمین تعیین می‌شود و پس از محاسبه S از فرمول شماره ۲، مقدار بارش مؤثر  $P_e$  از فرمول شماره ۳ برآورد می‌شود (چاو و همکاران ۱۹۸۸)

$$3. pe = \left( \frac{P - 0.2S}{P + 0.2S} \right)^2$$

در فرمول شماره ۳، P مقدار کل بارش است. پس از محاسبه بارش خالص در گام‌های زمانی مختلف، نرم‌افزار از روش هیدروگراف واحد برای تبدیل بارش مازاد یا همان بارش خالص، به هیدروگراف رواناب استفاده می‌کند. در این پژوهش، برای محاسبه هیدروگراف سیل، از روش هیدروگراف واحد NRCS (SCS) استفاده شده است (مایز، ۲۰۰۵). با محاسبه هیدروگراف سیل ورودی به رودخانه‌ها، فرایند چهارم، یعنی روندی سیل در آبراهه انجام می‌شود. برای روندی سیل در رودخانه‌های کوهستانی مشرف به شهر، از روش روندی ماسکینگام استفاده شده است (مایز، ۲۰۰۵). در این روش، ضریب  $X = 0.2$  در نظر گرفته شده و ضریب K، به‌طور تقریبی از روی مدت زمان حرکت آب در آبراهه تخمین زده شده است.

#### باران طراحی

باران طراحی، مطابق توصیه طرح جامع آب‌های سطحی شهر تهران، باران با دوره بازگشت ۵۰ سال در نظر گرفته شده است. برای تعیین رواناب طرح از باران طرح، ابتدا باران طرح با استفاده از روابط شدت - مدت - فراوانی استخراج شده است. سپس با استفاده از مدل بارش رواناب، رواناب طرح تعیین می‌شود. شدت بارش طراحی با استفاده از فرمول شدت - مدت - فراوانی شهر تهران در فرمول شماره ۱ حاصل می‌شود. این رابطه با استفاده از مطالعات انجام‌شده برای ۹ ایستگاه باران‌سنجی واقع در حوضه‌های آبریز شهر تهران و تجمیع منحنی‌های شدت - مدت - فراوانی بارش آن‌ها حاصل شده است (سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران، الف، ۱۳۹۰).

در تحقیق حاضر، همچنین مطابق توصیه طرح جامع آب‌های سطحی شهر تهران، تداوم کل بارندگی ۶ ساعت در نظر گرفته شده است. پس از توزیع مقدار بارندگی، طرح حاصل از فرمول شماره ۱، در مدت ۶ ساعت با استفاده از روش بلوک‌های متناوب (Chow et al. ۱۹۸۸)، سری زمانی حاصل برای زیر حوضه‌های

1. Natural Resources Conservation Service (Soil Conservation Service)





از طرفی هدف، برآورد دقیق خسارت نبوده و تعیین پهنه‌های سیل‌گیر باتوجه‌به گودی‌ها و عوارض طبیعی زمین مد نظر است، توجیه‌پذیر است.

در مدل‌سازی وضع موجود، سری زمانی جریان‌های ورودی از مناطق کوهستانی بالادست مربوط به باران طرح که توسط مدل هیدرولوژیکی تخمین زده شد، به‌عنوان شرط مرزی داخلی و به‌صورت منبع به مدل معرفی می‌شوند. بارش‌های خالص بر روی سطوح شهری نیز که بعد از کسر تلفات به روش NRCS (SCS)، به دست آمدند باتوجه‌به معادلات پیوستگی و منتم و براساس مدل رقومی‌ارتفاعی منطقه، بر روی سطوح روندی می‌شود. در پژوهش حاضر، به‌منظور مدل‌سازی هیدرولیکی از یک مدل رقومی‌ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی  $1m^2$  حاصل از تصویر ماهواره‌ای GEOEYE استفاده شده است. نقشه ضریب مانینگ سطوح باتوجه‌به نوع کاربری زمین و انتخاب ضریب مناسب برای هر نوع کاربری از مراجع معتبر، در محیط GIS تهیه شد. آنالیز حساسیت بر روی ضریب مانینگ کاربری‌ها نیز در پایلوت سیل‌برگردان غرب قبلاً انجام شده است. بدین‌صورت که ضرایب مانینگ انتخابی تا ۲۵ درصد افزایش و کاهش داده شد و تغییرات مساحت پهنه سیل بررسی شد. مشخص شد درصد تغییرات مساحت پهنه سیل کمتر از ۵ درصد است؛ بنابراین از صحت و پایداری نتایج مدل‌سازی بر مبنای مقادیر انتخابی ضریب مانینگ اطمینان حاصل شد.

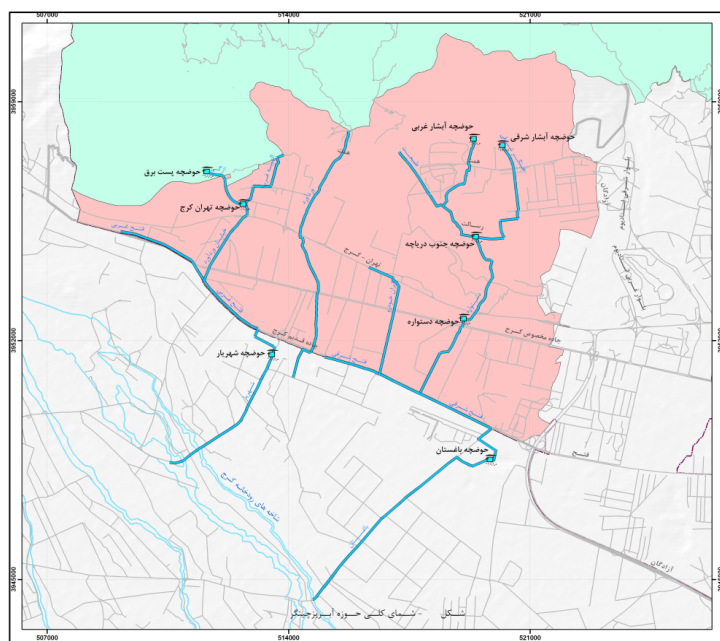
#### مطالعه موردی

محدوده مورد مطالعه زیرحوضه‌های کوهستانی مشرف به منطقه ۲۱ و ۲۲، به همراه مناطق ۲۱ و ۲۲ شهر تهران است (تصویر شماره ۱-الف). مناطق شهری غرب رودخانه کن مساحتی حدود ۸۶ کیلومترمربع داشته که رواناب آنها در حال حاضر به ۲ تخلیه‌گاه و پس از تکمیل شبکه آب سطحی مناطق ۲۱ و ۲۲ مطابق تصویر شماره ۱-ب به ۳ تخلیه‌گاه می‌پیوندند. با تکمیل اجرای شبکه آب سطحی، بخشی از رواناب بخش‌های شرقی از طریق لوله‌گذاری‌های دریاچه چیتگر به کانال دستواره منتهی می‌شود و بخشی از زیرحوضه‌های شهری نیز مستقیماً به رودخانه وردآورد تخلیه می‌شوند. در مطالعات شهرداری تهران، باتوجه‌به مقتضیات محدوده طرح در حوضه غرب کن، پس از تکمیل شبکه آب سطحی، ۳ سامانه جهت جمع‌آوری آب‌های سطحی تعریف شده است و دارای ۳ تخلیه‌گاه در مناطق ۲۱ و ۲۲ خواهند بود که عبارت‌اند از: ۱. حوضچه تعدیل سیلاب باغستان در جنوب بزرگراه آزادگان، ۲. رودخانه وردآورد، ۳. حوضچه تعدیل سیلاب شهریار در غرب مناطق ۲۱ و ۲۲ (سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران، ۱۳۹۰).

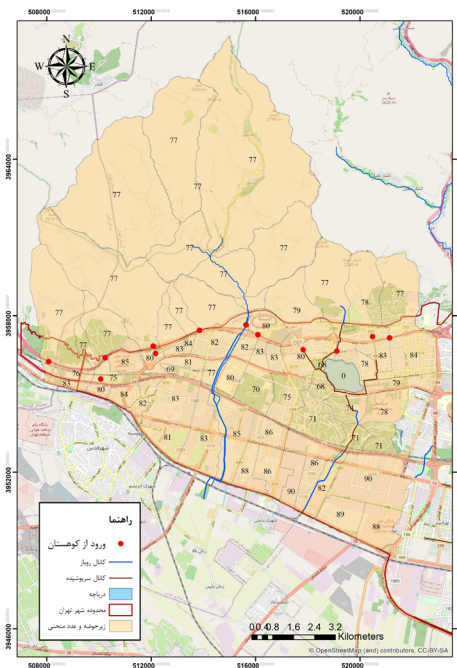
در عمق در جهت‌های  $x$  و  $y$  هستند.  $g$  شتاب جاذبه زمین،  $f(v)$  ضریب اصطکاک باد،  $v_x, v_y, v_z$  سرعت باد و مؤلفه‌های آن در جهت  $x$  و  $y$  بر حسب متر بر ثانیه،  $\Omega(x, y)$  ضریب کریولیس وابسته به طول جغرافیایی بر حسب  $Sec^{-1}$ ،  $pa(x, y, t)$  فشار اتمسفر ( $\frac{kg}{m^3}$ )،  $PW$  چگالی آب و  $T_{xx}, T_{xy}, T_{yy}$  مؤلفه‌های تنش برشی مؤثر هستند.

فرمول‌های شماره ۴، ۵ و ۶، حل تحلیلی نداشته و به‌صورت عددی حل می‌شوند. برای این منظور از مدل دوبعدی MIKE21 (موسسه هیدرولیک دانمارک، ۲۰۱۴) برای حل فرمول‌های مذکور و تعیین پهنه‌های سیلاب ناشی از رواناب جاری از منطقه کوهستانی به منطقه شهری و از مدل FLO-2D برای حل معادلات جریان و تعیین پهنه‌های سیلابی ناشی از بارش خالص بر روی سطح شهری استفاده شده است (فلو و دی، ۲۰۲۱). با حل عددی این معادلات، مقادیر متغیرهای عمق و سرعت جریان در ۲ جهت  $x$  و  $y$  به دست می‌آید. در صورت تمایل می‌توان برای آشنایی با این معادلات و الگوهای حل عددی آن‌ها به کتب مرجع هیدرولیک محاسباتی یا راهنمای نرم‌افزار مراجعه کرد (برای مثال: مقصودی و همکاران، ۱۴۰۳، هادیان و زراتی، ۱۳۸۸).

دلیل استفاده از ۲ مدل به‌جای یک مدل برای استخراج پهنه‌های سیل منطقه ۲۱ و ۲۲ این بوده است که مدل MIKE21 قادر به استخراج پهنه ناشی از بارش بر روی سطوح نبوده است، گرچه این مدل اثر بارش را بر روی پهنه سیلاب جاری بر روی سطوح (ناشی از هیدروگراف رودخانه‌ها یا منابع نقطه‌ای) می‌بیند. از طرفی، مدل FLO-2D دارای محدودیت تعداد مش بوده و ریزتر کردن مش محاسباتی از یک حد مشخص در نسخه FLO-2D در دسترس مؤلفین امکان‌پذیر نبود. درعین حال استخراج پهنه‌های سیلابی ناشی از رواناب‌های کوهستانی و نیز در محدوده رودخانه وردآورد با ابعاد مش ریزتر از طریق مدل MIKE21 امکان‌پذیر بود. بنابراین پهنه‌های به‌دست‌آمده از ۲ مدل با یکدیگر تلفیق شد. بدین‌صورت که درمورد پهنه‌های ناشی از منابع رواناب بالادستی کوهستان، از جمله رودخانه وردآورد، نتایج MIKE21 و برای پهنه‌های دیگر مناطق ناشی از بارش بر روی سطوح شهری، نتایج FLO-2D استفاده شد. ابعاد شبکه محاسباتی در مدل MIKE21 ۵ مترمربع و در مدل FLO-2D ۲۵ متر در نظر گرفته شده است. انتخاب ابعاد ۵m<sup>2</sup> در مدل MIKE21 براساس تحلیل حساسیت ابعاد مش در مطالعه پایلوت محدوده سیل‌برگردان غرب تهران بوده است (پژوهشکده مهندسی آب، ۱۴۰۰). در این مطالعه ابعاد مش، ۵۰، ۳۰، ۲۰، ۱۰، ۵ و ۱ متر در نظر گرفته شد و پس از آنالیز حساسیت مشخص شد در مدل‌سازی سیلاب شهری در شهر تهران، ابعاد مش ۵ متر دقت و کفایت لازم را در مدل‌سازی پهنه سیل با هدف برآورد خسارت‌های سیل برحسب واحدهای پولی دارد. ابعاد مش ۲۵ متر در مدل FLO-2D به دلیل محدودیت‌های این نرم‌افزار انتخاب شد. این ابعاد مش شاید برای مناطق متراکم شهری دقت لازم را نداشته باشد، اما برای مناطق ۲۱ و ۲۲ شهر تهران که تراکم ساختمان‌ها کم بوده و



(ب)



(الف)

تصویر ۱. الف- زیرحوضه‌های شهری و غیرشهری محدوده مطالعاتی، ب- شبکه طراحی شده برای مناطق ۱۲ و ۲۲ شهر تهران (مهندسین مشاور ری‌آب، ۱۳۹۵)

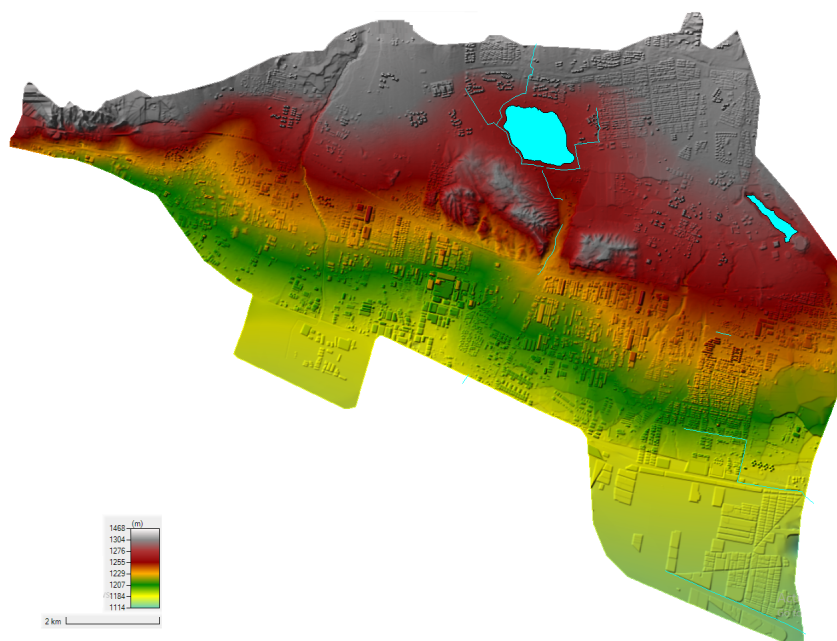
## بحث

بوده است که برای اهداف پهنه‌بندی سیل، سطح دقت نسبتاً بالایی محسوب می‌شود. در تحقیقات مرتبط با پهنه‌بندی سیل، سطح دقت مدل رقومی ارتفاعی در همین حدود سطح دقت یا با دقت پایین‌تر بوده است. برای مثال، عطیف و همکاران (۲۰۲۰) از مدل رقومی ارتفاعی STRM (دقت ۱۰ تا ۱۶ متر)، فرشته پور و همکاران (۲۰۲۴) از مدل رقومی ارتفاعی NED (دقت ۱ تا ۳ متر)، نوح و همکاران (۲۰۱۸) از مدل رقومی ارتفاعی حاصل از تصاویر LiDAR (با دقت زیر ۱ متر) و یان و همکاران (۲۰۱۳) از ترکیبی از مدل‌های مذکور برای پهنه‌بندی سیل استفاده کردند.

با اجرای مدل HEC-HMS برای زیرحوضه‌های کوهستانی مشرف به شهر، رواناب ورودی از بالادست به محدوده شهری برای بارش ۵۰ ساله تخمین زده شد. تصویر شماره ۳ هیدروگراف رواناب ورودی به محدوده شهری ناشی از بارش ۵۰ ساله را نشان می‌دهد. این هیدروگراف‌ها (J1 تا J12) در تصویر شماره ۱، مربوط به نقاط قرمز رنگ از راست به چپ هستند. هیتوگراف بارش ۵۰ ساله در زیرحوضه‌های کوهستانی باتوجه به ارتفاع متوسط زیرحوضه‌ها متغیر است به شکلی که هر چقدر ارتفاع متوسط زیرحوضه‌ای بیشتر باشد، بارش ۵۰ ساله آن زیرحوضه نیز مطابق ضریب رابطه شدت مدت از مقدار و شدت بیشتری برخوردار است. همان‌طور که از شکل هیدروگراف‌ها مشخص است، هیدروگراف رواناب ورودی به رودخانه وردآورد (J6) نسبت به رواناب دیگر زیرحوضه‌ها سهم بسیار قابل توجهی دارد که باتوجه به مجموع مساحت زیرحوضه‌های منتهی به رودخانه وردآورد در ورودی شهر، این مسئله منطقی و معقول است.

به منظور مدل‌سازی بارش رواناب عدد منحنی سطوح برای محاسبه تلفات لازم بود. عدد منحنی برای هر زیرحوضه، براساس نقشه‌های کاربری اراضی طرح تفصیلی شهر تهران و انتخاب عدد منحنی مناسب از جداول راهنما برای هر نوع کاربری (سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران، ۱۳۹۰) و در نهایت متوسط‌گیری وزنی براساس مساحت هر کاربری در آن زیرحوضه از محیط GIS استخراج شده است. مقادیر CN زیرحوضه‌ها در تصویر شماره ۱-الف نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود عدد منحنی مناطق جنگلی و پارک‌ها کوچک‌تر از مناطقی است که دارای پوشش نفوذناپذیر است و به محدوده‌های با تراکم ساختمانی بالا در مناطق ۲۱ و ۲۲ عدد منحنی بزرگ‌تری اختصاص داده شده است که با واقعیت تطابق دارد. مدل رقومی ارتفاعی منطقه ۲۱ و ۲۲ نیز در تصویر شماره ۲ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در منطقه شهری، اختلاف ارتفاع بلندترین و پست‌ترین نقطه حدود ۳۵۰ متر است. از روی مدل رقومی ارتفاعی ارائه‌شده، تغییرات ارتفاعی ناشی از ساختمان‌ها و عوارض شهری به خوبی قابل مشاهده است و اعداد منحنی بالا در تصویر شماره ۱-الف با محدوده ساختمان‌ها در این شکل همخوانی دارد.

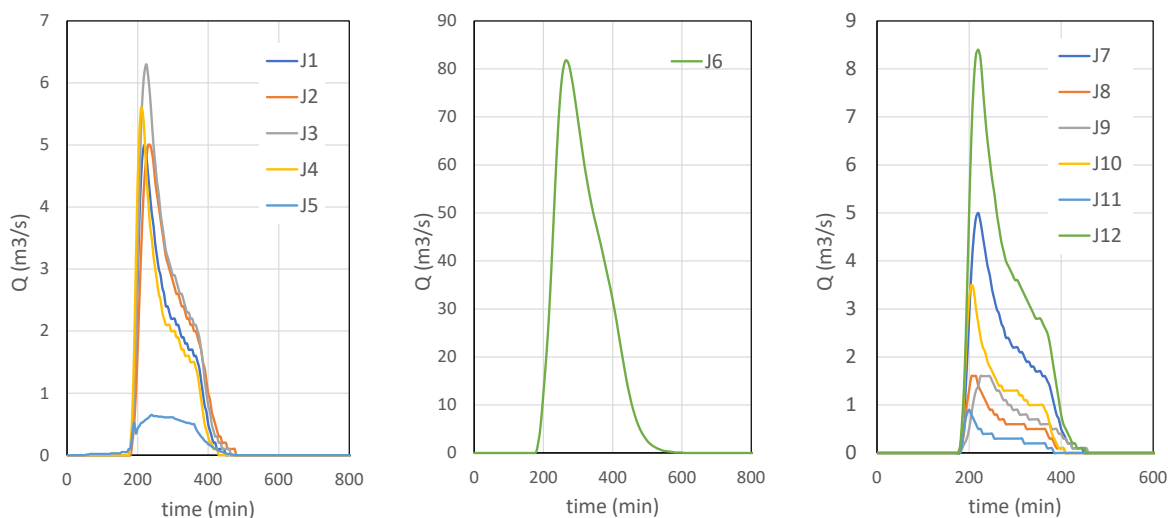
در پهنه‌بندی سیلاب شهری دقت مدل رقومی ارتفاعی از اهمیت بسیار بالایی در اعتمادپذیری نتایج برخوردار است. قدرت تفکیک مکانی مدل رقومی ارتفاعی مورد استفاده در این مطالعات 1m2



تصویر ۲. مدل رقومی ارتفاعی منطقه ۱۲ و ۲۲ شهر تهران، حاصل از تصویر ماهواره EYEOEG با قدرت تفکیک مکانی ۱m<sup>2</sup>

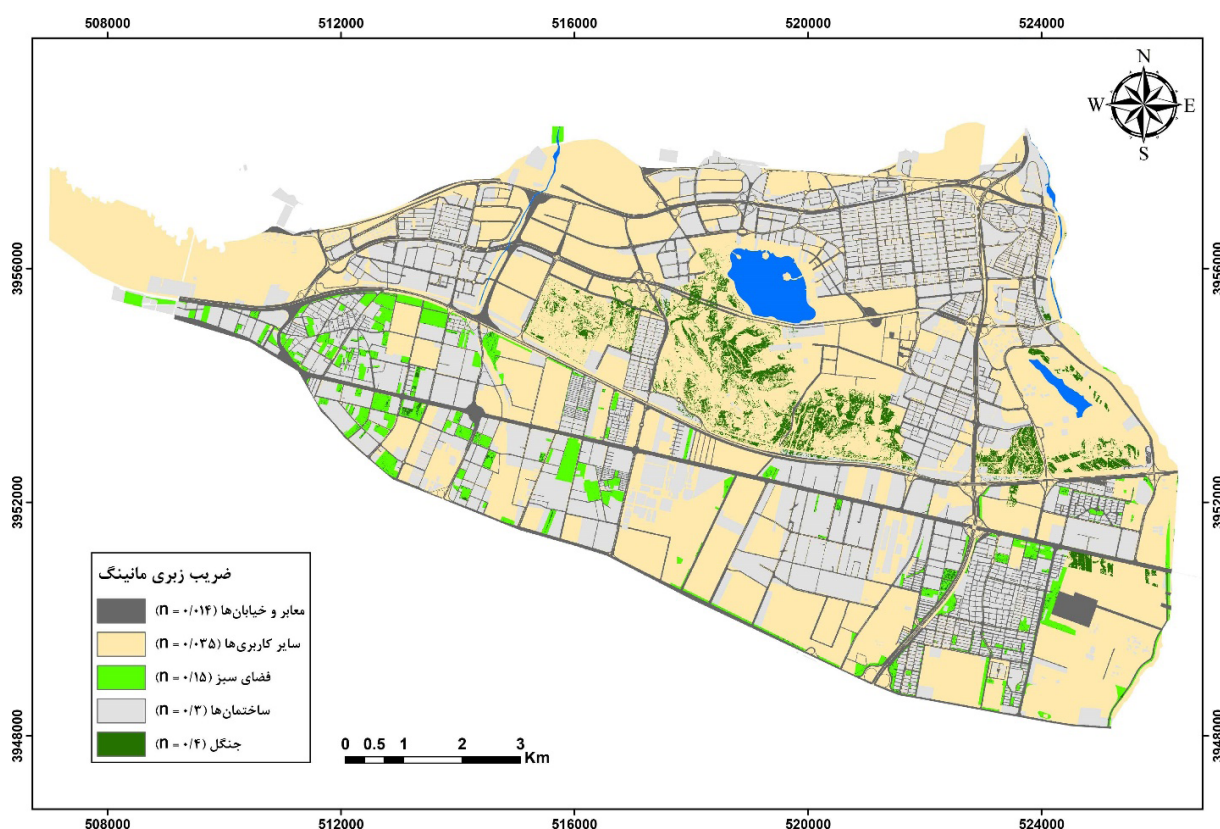
**تصویر شماره ۵** پهنه سیلاب ۵۰ ساله را در حالت وضع موجود نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیداست، از آنجاکه در وضع موجود، شبکه کانال‌های آب سطحی توسعه پیدا نکرده است، در سراسر مناطق ۲۱ و ۲۲ ماندابی برای عمق‌های بیش از ۵ سانتی‌متر، به‌صورت لکه‌های پراکنده قابل مشاهده است و این مسئله لزوم توسعه شبکه رواناب سطحی را برای این مناطق بیان می‌کند. همچنین براساس نتایج پهنه‌بندی هیدرولیکی، بزرگراه خرازی در محل تقاطع با مسیل‌های کوهستانی دچار آبگرفتگی می‌شود. بلوارهای هاشم‌زاده، جنگلبان، بلوار جوزانی و طبیعت مسیرهای سیلابی مهم اطراف دریاچه چیتگر را تشکیل می‌دهند.

به‌منظور مدل‌سازی هیدرولیکی، ابتدا نقشه توزیع ضریب مانینگ باتوجه به نوع کاربری‌های منطقه ۲۱ و ۲۲ تهیه شد (**تصویر شماره ۴**). سپس مدل هیدرولیکی آماده شد و در شرایط وضع موجود اجرا شد. باتوجه به ابعاد مش‌های محاسباتی، تعداد مش‌ها در مدل MIKE21 برابر ۴,۴۷۶,۶۶۱ و در مدل FLO-2D برابر ۱۸۳,۳۲۲ سلول در نظر گرفته شد. اجرای مدل بر روی یک سیستم با پردازنده Intel® core i7-7700K CPU @ 4.2 GHz و حافظه 32 GB و کارت گرافیک G-force RTX 3070 برای MIKE21 حدود ۷ ساعت و برای FLO-2D حدود نیم‌ساعت به طول انجامید.



تصویر ۳. هیدروگراف رواناب زیرحوضه‌های غیرشهری (کوهستانی) ورودی به مناطق ۱۲ و ۲۲ شهر تهران، ناشی از بارش ۵۰ ساله



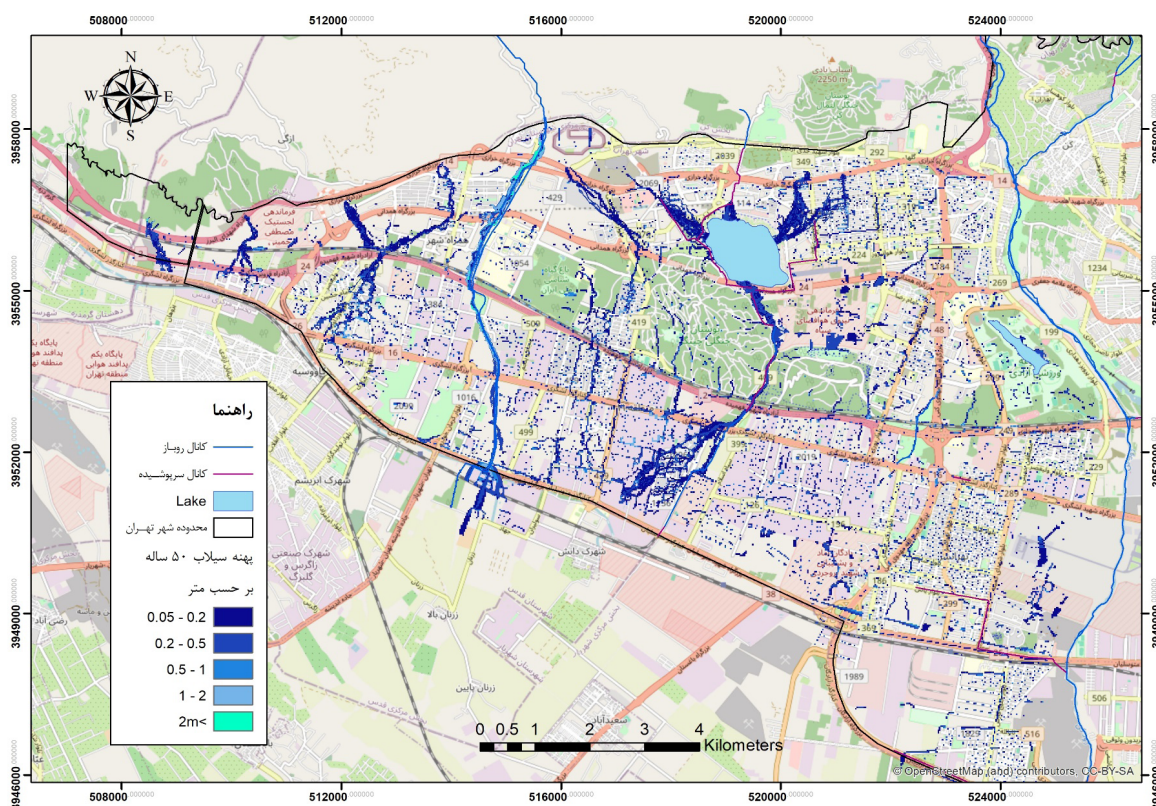


تصویر ۴. نقشه توزیع ضریب مانینگ سطوح شهری در مناطق ۱۲ و ۲۲ شهر تهران

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پهنه‌بندی سیلاب شهری در مناطق فاقد شبکه کانال‌های آب سطحی با استفاده از مدل‌سازی تلفیقی مفهومی و فیزیک پایه بارش‌رواناب در سطح حوضه آبریز انجام شد. مناطق ۲۱ و ۲۲ شهر تهران به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شدند. پهنه سیلاب از طریق کوپل مدل‌های هیدرولوژیکی-هیدرولیکی HEC-21 و HMS برای بارش ۵۰ ساله در حالت وضع موجود منطقه استخراج شد. براساس نتایج پهنه‌بندی، در بارش‌های حدی نظیر بارش ۵۰ ساله، جریان‌های ارتباطی مناطق ۲۱ و ۲۲ شهر تهران، شامل متروی تهران - کرج، بزرگراه‌های خرازی، همدانی، فهمیده، لشگری و فتح در برخی مقاطع دچار سیل گرفتگی‌های شدید می‌شوند و انتظار می‌رود در چنین شرایطی، عملاً مسیر ارتباطی غرب و شهر تهران به‌طور کامل مختل شود. کاربری‌های متعددی نیز در پهنه سیل قرار می‌گیرد و شرایط ماندابی به دلیل عدم وجود شبکه جمع‌آوری آب سطحی در سراسر مناطق ۲۱ و ۲۲، باتوجه به نتایج مدل‌سازی قابل پیش‌بینی است. از بعد کاربردی و عملیاتی، با عنایت به موارد مذکور و تاب‌آوری پایین این مناطق در برابر سیل، توسعه شبکه جمع‌آوری آب سطحی با رویکردهای نوین طراحی براساس تاب‌آوری پیشنهاد می‌شود. با عنایت به فراهم شدن ابزار پهنه‌بندی سیل در شهر تهران، پیشنهاد می‌شود پهنه‌بندی سیل ۵۰ ساله، در شرایط توسعه

متروی تهران - کرج در جنوب پارک آرش کمانگیر و نیز در ضلع جنوب غربی مجتمع فرماندهی لجستیک مصطفی خمینی خطر سیل‌گرفتگی دارد. بزرگراه همدانی در جنوب دریاچه چیتگر و در ۳ مقطع دیگر در تقاطع با مسیر جریان سیلاب قرار دارد. آزادراه شهید فهمیده و بزرگراه لشگری نیز در تقاطع با مسیر دستواره و خان دانشگاه قرار دارند و نیز در غرب رودخانه چیتگر با مسیرهای سیلابی تلاقی دارند. پل واقع بر بزرگراه فتح در محل تلاقی با رودخانه وردآورد نیز ظرفیت و کشش سیلاب ۵۰ ساله را نداشته و پهنه سیلابی قابل توجهی در این محدوده شکل می‌گیرد که کاربری‌های نظامی واقع در این بخش را درگیر سیل می‌کند. علاوه بر این موارد، بخش‌هایی از مناطق ۲۱ و ۲۲ در پهنه‌های سیلابی بارش ۵۰ ساله قرار می‌گیرند که به عنوان مثال می‌توان به شرایط ماندابی در حد فاصل بلوار دانشگاه و بوستان بانوان ریحانه چیتگر، سیل‌گرفتگی بخشی از مجتمع مسکونی چیتگر، شهرک شهید صیاد شیرازی، بلوار کرمان‌خودرو، مسجد امام حسین، بازار میوه و تره‌بار فرهنگ، بخشی از شهرک دانشگاه شریف (محدوده برج سپیدار)، بلوار وردآورد و مرکز بهداشت وردآورد و برخی صنایع و کاربری‌های تجاری و مسکونی اشاره کرد.



تصویر ۵. تصویری از پهنه سیلاب منطقه ۱۲ و ۲۲ شهر تهران، در وضع موجود تحت بارش با دوره بازگشت ۵۰ سال

### حامی مالی

این پژوهش با حمایت مادی و معنوی سازمان پیشگیری و مدیریت بحران شهر تهران انجام شده و از نتایج مطالعات طرح پژوهشی با عنوان «پهنه‌بندی خطر و تدوین برنامه اختصاصی سیل شهر تهران» بهره گرفته است.

### مشارکت نویسندگان

بصری سازی و نرم افزار: جعفر یزدی و محمد شاهسوندی؛ مفهوم سازی، روش شناسی، اعتبارسنجی، تحلیل رسمی، تحقیق، منابع، جمع آوری داده ها، نگارش پیش نویس اصلی، بررسی، ویرایش و نظارت: جعفر یزدی؛ مدیریت پروژه، علی نصیری، اسماعیل سلیمی و مرتضی دلفان آذری؛ جذب سرمایه؛ علی نصیری، اسماعیل سلیمی و مرتضی دلفان آذری.

### تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

شبکه (که مبنای ایمن سازی در برابر سیل ۵۰ ساله بوده است) نیز انجام شود و میزان عملکرد طرح پیشنهادی در عبور ایمن سیل ۵۰ ساله بررسی شود. در صورت وجود پهنه سیل در حالت توسعه طرح، این امکان فراهم می شود که طرح های آبی قبل از اجرا، بازنگری شده و اصلاحات لازم به منظور ایمن سازی کامل مناطق ۲۱ و ۲۲ در برابر سیل ۵۰ ساله انجام شود.

از بعد فنی و علمی، باتوجه به محدودیت های موجود در مدل سازی و کمبود داده، پیشنهاد می شود در پژوهش های آبی به منظور بالاتر بردن دقت نتایج، با جمع آوری اطلاعات فیزیوگرافی و هیدرولوژیکی از طریق تصاویر ماهواره ای به روز، مدل سازی هیدرولوژیکی به صورت کاملاً فیزیکی انجام شود. در همین راستا، استفاده از مدل های رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی بالاتر نظیر محصولات ماهواره World View به بهبود نتایج پهنه بندی و قابلیت اطمینان بالاتر نتایج منجر خواهد شد.

### ملاحظات اخلاقی

#### پیروی از اصول اخلاق پژوهش

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





## Reference

- Bisht, D. S., Chatterjee, C., Kalakoti, Sh., Upadhyay, P., Sahoo, M., & Panda, A. (2016). Modeling urban floods and drainage using SWMM and MIKE URBAN: A case study. *Natural Hazards*, 84, 749–776. [DOI:10.1007/s11069-016-2455-1]
- Carr, R. S., & Smith, G. P. (2007). Linking of 2D and Pipe hydraulic models at fine spatial scales. *Water Practice and Technology*, 2(2), wpt2007038. [DOI:10.2166/wpt.2007.038]
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L.W. (1988). *Applied hydrology*. New York: McGraw-Hill. [Link]
- 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]
- DHI. (2014). *MIKE21, Reference Manual*. Denmar; Danish Hydraulic Institute Inc. [Link]
- Dong, B., Xia, J., Zhou, M., Li, Q., Ahmadian, R., & Falconer, R. A. (2022). Integrated modeling of 2D urban surface and 1D sewer hydrodynamic processes and flood risk assessment of people and vehicles. *The Science of the Total Environment*, 827, 154098. [DOI:10.1016/j.scitotenv.2022.154098] [PMID]
- Sun, S. K., Song, J. F., Wang, F. F., Wu, P. T., & Wang, Y. B. (2019). Evaluating the impacts of socio-economic factors on regional grain virtual water flows in China using a structural equation modeling approach. *Journal of Hydrology*, 571, 132–141. [DOI:10.1016/j.jhydrol.2019.01.042]
- FLO-2D Software, Inc. (2021). *FLO-2D reference manual*. Arizona: FLO-2D Software, Inc. [Link]
- Atif, R. M., Siddiqui, M. H., & Almazroui, M. (2020). Near-real-time spatiotemporal analysis of convection and extreme rainfall leading to a flash flood using MSG-SEVIRI and TRMM data: A case study of a flash flood in Jeddah, Saudi Arabia on the November 25, 2009. *Journal of Flood Risk Management*, 13(3), e12611. [DOI:10.1111/jfr3.12611]
- Hadian, M. R., & Zarati, A. R. (2009). [Numerical models of shallow waters and their application in river and coastal engineering (Persian)]. Tehran: Amir Kabir University of Technology Press. [Link]
- Maghsoudi, N., & Kouchakzadeh, S. (2024). [Hydraulic of free surface flows (Persian)]. Tehran: University of Tehran Press. [Link]
- Mays, L. W. (2005). *Water resources engineering*. New Jersey: John Wiley & Sons. [Link]
- Yan, K., Di Baldassarre, G., & Solomatine, D. P. (2013). Exploring the potential of SRTM topographic data for flood inundation modeling under uncertainty. *Journal of Hydroinformatics*, 15(3), 849–861. [DOI:10.2166/hydro.2013.137]
- Rossman, L. A. (2010). *Storm water management model user's manual, version 5.0 Cincinnati*. Washington: United States Environmental Protection Agency. [Link]
- Noh, S. J., Lee, J. H., Lee, S., Kawaike, K., & Seo, D. J. (2018). Hyper-resolution 1D-2D urban flood modelling using LiDAR data and hybrid parallelization. *Environmental Modelling & Software*, 103, 131–145. [DOI:10.1016/j.envsoft.2018.02.008]
- Butters, O., Robson, C., McClean, F., Glenis, V., Virgo, J., & Ford, A., et al. (2025). An open framework for analysing future flood risk in urban areas. *Environmental Modelling & Software*, 185, 106302. [DOI:10.1016/j.envsoft.2024.1063027]
- Tehran Engineering & Technical Consulting Organization (TETCO). (2011). [Comprehensive plan for surface water management in Tehran: Volume 2, Part 2, "Urban hydrology report" (Persian)]. Tehran: Technical and Engineering Consulting Organization of Tehran.
- Vojinovic, Z., & Tutulic, D. (2009). On the use of 1D and coupled 1D-2D modelling approaches for assessment of flood damage in urban areas. *Urban Water Journal*, 6(3), 183–199. [DOI:10.1080/15730620802566877]
- Vozinaki, A. E. K., Kourgialas, N. N., & Karatzas, G. P. (2012). Estimation of agricultural flood loss in the Koiliaris river basin in Crete, Greece. *EuropeanWater*, 39, 53–63. [Link]
- Water Engineering Research Institute. (2021). [Flood risk zoning studies in Tehran city, Western flood diversion channel of Tehran, from Goftogoo Park to the connection with Kan River (Persian)]. Tehran: Tarbiat Modares University.
- Yang, L., Li, J., Kang, A., Li, Sh., & Feng, P. (2020). The effect of nonstationarity in rainfall on urban flooding based on coupling SWMM and MIKE21. *Water Resources Management*, 34, 1535–1551. [DOI:10.1007/s11269-020-02522-7]
- Yazdi, J. (2018). Improving urban drainage systems resiliency against unexpected Blockages: A probabilistic approach. *Water Resources Management*, 32, 4561–4573. [DOI:10.1007/s11269-018-2069-3]
- Zhang, W., Zhang, X., Liu, Y., Tang, W., Xu, J., & Fu, Z. (2020). Assessment of Flood Inundation by Coupled 1D/2D Hydrodynamic Modeling: A Case Study in Mountainous Watersheds along the Coast of Southeast China. *Water*, 12(3), 822. [DOI:10.3390/w12030822]
- Zandsalimi, Z., Feizabadi, S., Yazdi, J., & Salehi Neyshabouri, S.A.A. (2024). Evaluating the Impact of Digital Elevation Models on Urban Flood Modeling: A comprehensive analysis of flood inundation, hazard mapping, and damage estimation. *Water Resources Management*, 38, 4243–4268. [Link]

This Page Intentionally Left Blank