



Flood Hazard Assessment and Floodplain Mapping in the Kan River Basin Using a Hydrological–Hydraulic Modeling Approach

Morteza Shokri 

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail:

M.Shokri@basu.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	The Kan River watershed is considered one of the flood-prone basins due to its mountainous topography and its passage through densely populated urban areas of Tehran. The aim of this study is to assess flood hazard in this basin using an integrated hydrological and two-dimensional hydraulic modeling approach (HEC-HMS and HEC-RAS 2D) and to investigate the influence of key parameters affecting flood behavior. Long-term rainfall and discharge data from the Solaghan and Sangan hydrometric stations for the period 1969–2025 were used in this research. First, design flood discharges were estimated through flood frequency analysis using the Log-Pearson Type III distribution. Subsequently, the hydrological model was calibrated and validated using the SCS-CN method and Clark Unit Hydrograph. The generated hydrographs were then transferred to a two-dimensional hydraulic model to simulate flood depth, flow velocity, and floodplain extent based on a digital elevation model (DEM) with a spatial resolution of 30 m. The results indicate that the peak discharge of the 100-year return period flood ranges between 140 and 160 m³/s, which is consistent with historical flood events, including the 2014 flood event. Evaluation of the hydrological model performance demonstrated good simulation accuracy, with NSE values ranging from 0.78 to 0.89 and R² values between 0.82 and 0.92. Hydraulic simulations showed that during the 100-year flood scenario, flow depth in downstream areas exceeds 2.5 m and flow velocity reaches approximately 5 m/s. The estimated flood-inundated area in this scenario is about 25–29 km², affecting significant parts of districts 21 and 22 of Tehran. Sensitivity analysis further indicated that the Manning roughness coefficient and increased rainfall intensity are the most influential factors in intensifying flood depth and floodplain extent. The findings of this study can support urban planning, river corridor management, and the development of flood management and early warning systems in the Kan River basin and other similar urban watersheds.
Article history:	
Received: May. 20, 2026	
Revised: June. 23, 2026	
Accepted: July. 8, 2026	
Published online: Aug. 2026	
Keywords:	
Flood;	
Floodplain mapping;	
HEC-HMS model;	
HEC-RAS 2D model;	
Hydrological modeling;	
Urban flood hazard;	
Kan River basin	

Cite this article: Lor Mohammad Hasani, M. Talebnejad, R., Noshadi, M., (2026) Evaluation of Economic Water Productivity in Quinoa Cultivation Using Saline Water and Deficit Irrigation in a Tape Drip Irrigation System in Fars Province, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (6), 1359-1379. <http://doi://10.22059/ijswr.2026.414839.670145>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi://10.22059/ijswr.2026.414839.670145>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The Kan River Basin, located in the northwest of Tehran, Iran, is one of the most flood-prone sub-catchments draining from the Alborz mountains into an increasingly urbanized metropolitan area. In recent decades, accelerated land-use change, unregulated urban sprawl, and channelization of the main river corridor have significantly altered the hydrological equilibrium of the basin. These transformations have increased the peak discharges and reduced natural storage and infiltration capacities, thereby intensifying flood risk in the densely populated downstream zones—particularly within Tehran's Districts 21 and 22.

Urban floods in Tehran have repeatedly caused severe socioeconomic damage. The destructive flood events of March 2014 and April 2019 in the Kan basin not only inflicted infrastructural losses but also revealed the absence of a reliable flood-hazard zoning plan supported by integrated modeling and GIS-based risk assessment. Consequently, the present study was designed to address these limitations by employing a combined hydrological–hydraulic modeling framework capable of simulating flood hydrographs, spatial inundation patterns, and flow dynamics for a range of design flood scenarios.

The main objectives of this study are summarized as follows:

- o estimate design floods for various return periods using long-term hydrometric and rainfall records from the Kan watershed (1969–2025).

- To calibrate and validate a rainfall-runoff model (HEC-HMS) capable of reproducing historic flood hydrographs with high accuracy.

- To couple the resulting hydrographs with a two-dimensional hydraulic model (HEC-RAS 2D) for detailed floodplain mapping.

- To perform sensitivity analysis on the Manning roughness coefficient and rainfall intensity to evaluate modeling uncertainty.

- To provide management-oriented recommendations for flood risk mitigation and urban planning.

Given the basin's mountainous–urban dual character, this integrated modeling approach offers a suitable basis for both quantitative flood prediction and qualitative spatial zoning of flood-prone areas.

Materials and Methods

Study Area

The Kan basin covers approximately 230 km² and extends from the high-elevation headwaters (~3800 m a.s.l.) near Tochal peak to the low-elevation urban plains (~1200 m a.s.l.) entering Tehran's western districts. The dominant land cover types include mountainous rangeland in the upper catchment, agricultural terraces in mid-sections, and dense urban development downstream. Average annual rainfall ranges from 500 to 800 mm in the upstream part, decreasing to about 300 mm in the metropolitan zone. The river's main tributaries include Solqan and Sangan branches, both monitored by hydrometric stations whose daily discharge data served as the foundation for the present analysis.

Data and Software

The study used rainfall, discharge, and temperature data from Iran's Ministry of Energy (Regional Water Authority of Tehran) for the period 1969–2025. Additional spatial layers included a 30 m Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) DEM, land use/land cover maps (2024), and soil hydrologic groups from the Iranian Soil and Water Research Institute. The modeling environment comprised HEC-HMS 4.11 for hydrological simulation and HEC-RAS 6.4 for hydraulic computations, both integrated within ArcGIS 10.8 for pre- and post-processing tasks.

Hydrological Modelling (HEC-HMS)

Rainfall–runoff transformation was modeled using the SCS-Curve Number (CN) method for rainfall loss estimation and the Clark Unit Hydrograph for runoff routing. Parameter calibration was based on historical flood events (particularly the 2014 flood), considering observed hydrographs at the Solqan station. Model efficiency was evaluated using Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE), coefficient of determination (R²), and Percent Bias (PBIAS).

After calibration, synthetic design storms were generated for 25-, 50-, and 100-year return periods using the Log-Pearson Type III distribution. These input storms produced discharge hydrographs serving as boundary conditions for the hydraulic model.

Hydraulic Modelling (HEC-RAS 2D)

Flood routing and flow fields were simulated in two dimensions using the finite-volume scheme of HEC-RAS 2D, which solves the shallow water equations (Saint-Venant) on an unstructured computational mesh with cells ranging from 10 to 30 m. The model incorporated river bathymetry, DEM-derived terrain, and roughness coefficients representing both natural and urban surfaces. The roughness coefficient (Manning's n) varied spatially from 0.025 (concrete channels) to 0.045 (vegetated flood plains).

Model boundary conditions were defined based on the outflow hydrographs derived from HEC-HMS, while the downstream boundary adopted normal depth estimates. Simulation outputs included water-surface elevations, depth rasters, velocity maps, and flood extent polygons for each design discharge scenario.

Sensitivity and Uncertainty Analysis

Sensitivity tests were conducted to quantify the influence of:

Manning's coefficient ($\pm 20\%$)

Rainfall intensity ($\pm 20\%$), representing potential climate change scenarios

Digital Elevation Model (DEM) resolution (10 m vs. 30 m)

Each modification was implemented individually to evaluate the response in maximum flow depth, flood extent, and average velocity.

Results and Discussion

Design Flood Estimation

Flood frequency analysis indicated design discharges of approximately 100 m³/s, 130 m³/s, and 150 m³/s for the 25-, 50-, and 100-year return periods, respectively, at the Solqan outlet. The results show a clear increase in flood magnitude with increasing return period, reflecting the expected hydrological behavior of the basin. The recorded peak discharge of 139.3 m³/s during the 2014 flood is comparable to the estimated 100-year design discharge, suggesting reasonable consistency between the observed extreme event and the statistically derived flood frequency estimates.

Hydrological Model Performance

Validation against observed hydrographs produced average NSE = 0.84, $R^2 = 0.88$, and PBIAS = $\pm 10\%$, indicating overall "good-to-excellent" performance. Timing of the simulated peak closely matched observations, differing by less than one hour. This level of agreement confirms that the combination of SCS-CN and Clark UH methods effectively captures the basin's rainfall-runoff response, even under rapid runoff conditions typical of mountainous catchments with limited infiltration.

Hydraulic Simulation and Floodplain Zoning

The 2D hydraulic model successfully reproduced known flood extents and provided detailed maps of depth and velocity distributions. The results demonstrated pronounced expansions of flood inundation with increasing return period:

Return Period	Mean Flow Depth (m)	Max Flow Velocity (m/s)	Flood Extent (km ²)
25-year	0.8–1.5	1.5–3.0	15–18
50-year	1.2–2.2	2.0–4.0	20–23
100-year	1.8–3.0	3.0–5.0	25–29

These results clearly identify Tehran's Districts 21 and 22 as high-risk areas, where the lower gradient and urban encroachment have reduced the effective flow conveyance capacity. Peak velocities surpassing 4 m/s, combined with depths above 2 meters, suggest substantial potential for structural damage and erosion.

Comparative evaluation with previous studies (Hosseini & Sadeghi, 2025; Nasiri et al., 2025) revealed strong agreement in the order of magnitude and spatial distribution of flood hazards, though the present model, covering the entire watershed, reported slightly larger inundation areas—attributable to the inclusion of upstream contributing zones.

Sensitivity Analysis

Sensitivity simulations revealed the Manning coefficient as the dominant factor influencing flood behavior. Increasing n by 20% increased water depth by $\approx 22\%$ and flood area by $\approx 13\%$, while reducing flow velocity by $\approx 20\text{--}25\%$. Conversely, a 20% reduction in n caused faster, shallower flows with a 25–30% increase in average velocity.

Rainfall intensity also exerted a strong effect: a 20% increase in rainfall led to 25–40% deeper inundation and up to 35% wider flood extent. DEM resolution improvement (30 m $\rightarrow$ 10 m) produced moderate changes

(10–18% variation in depth), implying that hydraulic roughness and rainfall uncertainty dominate over terrain discretization within this configuration.

These findings are consistent with international research indicating that uncertainty in roughness and hydrological forcing contributes the largest share of variance in flood modeling outputs.

Conclusions and Implications

The integrated modeling framework implemented in this study proved robust and efficient for flood hazard assessment in the Kan basin. Major conclusions were summarized as follows:

Reliable Reproduction of Historical Events:

The coupled HEC-HMS / HEC-RAS 2D models achieved high accuracy in simulating observed flood events, reinforcing their suitability for use in both data-scarce and urbanized mountainous basins.

High Flood Hazard for Urban Downstream Zones:

The 100-year flood scenario demonstrated that downstream areas—especially within the lower 10 km reach of the Kan river—are subjected to flow depths >2.5 m and velocities >4 m/s. These conditions can cause severe damage to infrastructure and pose significant risk to human life.

Critical Influence of Roughness and Climate Factors:

The hydrodynamic response of the system is most sensitive to Manning's n and rainfall intensity. Anticipated increases in rainfall extremes due to climate change could markedly expand flood hazards, potentially doubling the current inundation area within upcoming decades.

Management Priorities:

Revision of Floodplain Boundaries: Updating legal river margins using new two-dimensional maps to restrict future urban development in high-risk areas.

Structural Measures: Upgrading bridge openings, river channels, and culverts to accommodate design discharges of $150 \text{ m}^3/\text{s}$.

Non-Structural Measures: Enhancing flood warning systems, public awareness, and emergency response protocols within Tehran's western districts.

Upstream Retention and Land Management: Implementing check dams, detention basins, and reforestation initiatives to reduce peak flow generation in the mountainous headwaters.

Data and Monitoring Improvement: Establishing high-resolution rainfall and flow monitoring networks, as well as LiDAR-based topographic surveys to reduce model uncertainty.

Future Research Directions:

Future work should integrate climate model projections and socio-hydrological datasets to simulate flood risk under compound hazard scenarios (rainfall–landuse–urbanization dynamics). The inclusion of sediment transport and debris flow modules could further refine hazard assessments in steep tributaries.

In conclusion, the study underscores the necessity of adopting integrated, process-based flood modeling frameworks for hazard zoning in urbanized mountain basins. The results provide scientific evidence to guide floodplain management, land-use planning, and climate-resilient infrastructure design in Tehran and similar cities facing rapid expansion along natural drainage corridors.

Funding

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

Authorship contribution

Conceptualization, methodology, software, validation, formal analysis, investigation, resources, data curation, writing—original draft preparation, writing—review and editing, visualization, supervision, project administration: Morteza Shokri. The author has read and agreed to the published version of the manuscript.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

During the preparation of this work, the author used ChatGPT (OpenAI) in order to improve the English writing and language clarity of the manuscript. After using this tool, the author reviewed and edited the content as needed and takes full responsibility for the content of the publication.

Data availability statement

Hydrological and rainfall data used in this study were obtained from the Tehran Regional Water Authority and are subject to institutional access restrictions. Processed modeling outputs and derived datasets are available from the corresponding author upon reasonable request.

Acknowledgements

The authors acknowledge the Tehran Regional Water Authority for providing hydrological data and technical support. Appreciation is also extended to colleagues who contributed to GIS processing and model validation.

Ethical considerations

This study does not involve human participants or animal subjects. All data were obtained from authorized institutional sources. The authors declare no conflict of interest and confirm that the research was conducted in accordance with ethical standards for scientific publication.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

ارزیابی خطر سیلاب و پهنه‌بندی سیلاب در حوضه آبریز رودخانه کن با رویکرد مدل‌سازی هیدرولوژیکی-هیدرولیکی

مرتضی شکری^۱✉^۱. نویسنده مسئول، گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: M.Shokri@basu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۲/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۴/۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۴/۱۷

تاریخ انتشار: شهریور ۱۴۰۵

واژه‌های کلیدی:

سیلاب؛

پهنه‌بندی سیلاب؛

مدل *HEC-HMS*؛مدل *HEC-RAS* دوبعدی؛

مدل‌سازی هیدرولوژیکی؛

خطر سیلاب شهری؛

حوضه رودخانه کن

حوضه آبریز رودخانه کن به دلیل شرایط کوهستانی و عبور از مناطق شهری متراکم تهران، از جمله حوضه‌های با خطر سیلاب بالا به شمار می‌رود. هدف این پژوهش، ارزیابی خطر سیلاب در این حوضه با استفاده از رویکرد تلفیقی مدل‌سازی هیدرولوژیکی (*HEC-HMS*) و هیدرولیکی دوبعدی (*HEC-RAS 2D*) و بررسی اثر پارامترهای مؤثر بر رفتار سیلاب است. در این مطالعه از داده‌های بلندمدت بارندگی و دبی ایستگاه‌های سولقان و سنگان طی دوره ۱۳۴۸ تا ۱۴۰۴ استفاده شد. ابتدا با تحلیل فراوانی سیلاب و به‌کارگیری توزیع *Log-Pearson Type III*، دبی‌های طراحی استخراج گردید. سپس مدل هیدرولوژیکی با استفاده از روش‌های *SCS-CN* و *Clark Unit Hydrograph* کالیبره و اعتبارسنجی شد و هیدروگراف‌های حاصل به مدل هیدرولیکی دوبعدی منتقل گردید تا عمق، سرعت و گستره پهنه سیلاب بر پایه مدل رقومی ارتفاع با تفکیک ۳۰ متر شبیه‌سازی شود. نتایج نشان داد که دبی اوج سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله در بازه ۱۴۰ تا ۱۶۰ مترمکعب بر ثانیه قرار دارد که با رخداد‌های تاریخی از جمله سیلاب سال ۱۳۹۳ همخوانی دارد. ارزیابی عملکرد مدل هیدرولوژیکی نشان‌دهنده دقت مناسب شبیه‌سازی با مقادیر *NSE* بین ۰/۷۸ تا ۰/۸۹ و ضریب تعیین *R²* بین ۰/۸۲ تا ۰/۹۲ بود. شبیه‌سازی هیدرولیکی نشان داد که در سناریوی سیلاب ۱۰۰ ساله، عمق جریان در بخش‌های پایین‌دست به بیش از ۲/۵ متر و سرعت جریان به حدود ۵ متر بر ثانیه می‌رسد و مساحت پهنه سیل گیر حدود ۲۵ تا ۲۹ کیلومتر مربع برآورد می‌شود که بخش‌هایی از مناطق ۲۱ و ۲۲ تهران را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. تحلیل حساسیت نیز نشان داد که ضریب زبری *Manning* و افزایش شدت بارش از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تشدید عمق و گستره سیلاب هستند. نتایج این پژوهش می‌تواند در برنامه‌ریزی شهری، تعیین حریم رودخانه و توسعه سامانه‌های مدیریت و هشدار سیلاب در حوضه رودخانه کن و سایر حوضه‌های شهری مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

استناد: شکری، مرتضی، (۱۴۰۵) ارزیابی خطر سیلاب و پهنه‌بندی سیلاب در حوضه آبریز رودخانه کن با رویکرد مدل‌سازی هیدرولوژیکی-هیدرولیکی، مجله تحقیقات

آب و خاک ایران، ۵۷ (۶)، ۱۳۷۹-۱۳۵۹. <http://doi://10.22059/ijswr.2026.414839.670145>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi://10.22059/ijswr.2026.414839.670145>

مقدمه

سیلاب یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی در حوضه‌های آبریز جهان است که به‌واسطه بارش‌های حدی، تغییر کاربری اراضی و توسعه شهرنشینی تشدید می‌شود (Kourgialas et al., 2023). گسترش شهرنشینی، علاوه بر افزایش ضریب رواناب، پایداری اکوسیستم‌های آب‌و‌خاک را با چالش‌های جدی مواجه کرده است (Sharafi et al., 2021). در این میان، مدیریت جامع حوضه آبریز بر پایه شبیه‌سازی دقیق هیدرولوژیکی و هیدرولیکی، به ابزاری اساسی برای کاهش مخاطرات شهری تبدیل شده است (Razavi et al., 2022).

رودخانه کن که در دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه البرز و در شمال غرب کلان‌شهر تهران قرار دارد، به دلیل شیب زیاد حوضه، توسعه سریع شهری در پایین‌دست و تغییرات سریع در کاربری اراضی، همواره در معرض وقوع سیلاب‌های ناگهانی قرار داشته است.

مطالعات پیشین نشان می‌دهند که مداخلات انسانی در بستر رودخانه و افزایش سطوح نفوذناپذیر، الگوهای جریان و پاسخ هیدرولوژیکی حوضه را به‌طور قابل‌توجهی تغییر داده است (Baghban et al., 2024).

علاوه بر این، وقوع سیلاب‌های مخرب در سال‌های اخیر، از جمله رخدادهای اسفند ۱۳۹۲ (March 2014) و فروردین ۱۳۹۸ (April 2019)، نشان داد که مناطق شهری پایین‌دست حوضه، به‌ویژه مناطق ۲۱ و ۲۲ تهران، در معرض خطر جدی سیلاب قرار دارند و نیازمند ارزیابی دقیق‌تر خطر و برنامه‌ریزی مدیریتی هستند.

برای تحلیل رفتار جریان در این حوضه، استفاده از مدل‌های توزیعی که قادر به شبیه‌سازی تعاملات فرآیندهای هیدرولوژیکی و هیدرولیکی باشند، ضروری است (Mazzoleni et al., 2021). در سال‌های اخیر، استفاده از رویکردهای مدل‌سازی یکپارچه به‌عنوان یکی از مؤثرترین ابزارها برای تحلیل خطر سیلاب در حوضه‌های شهری مطرح شده است. در این میان، مدل HEC-HMS برای شبیه‌سازی فرآیندهای بارش-رواناب در سطح حوضه و مدل HEC-RAS 2D برای شبیه‌سازی دوبعدی جریان در دشت سیلابی، به‌طور گسترده در مطالعات هیدرولوژیکی و هیدرولیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Scharffenberg, 2023; Tingsanchali, 2023).

دقت نتایج در این مدل‌ها به‌شدت به کیفیت داده‌های ورودی، کالیبراسیون پارامترهای هیدرولیکی مانند ضریب زبری مانینگ و اعتبارسنجی با داده‌های مشاهداتی وابسته است (Papaioannou et al., 2022). طبق نتایج مطالعات اخیر، عدم توجه به جزئیات توپوگرافی و ساختار هیدرولیکی بستر رودخانه می‌تواند منجر به خطاهای قابل‌توجه در پهنه‌بندی خطر سیلاب شود (Afzalimehr et al., 2023). بنابراین، ارائه نتایجی که با استانداردهای مدیریت منابع آب‌و‌خاک هم‌خوانی داشته باشد، برای تصمیم‌گیری در حوزه مدیریت سیلاب و افزایش تاب‌آوری شهری ضروری است (Alizadeh et al., 2022).

باوجود انجام مطالعات متعدد در حوضه رودخانه کن، تغییرات اقلیمی سال‌های اخیر، افزایش فراوانی بارش‌های حدی و توسعه کالبدی سریع در مناطق شهری پایین‌دست، به‌ویژه مناطق ۲۱ و ۲۲ تهران، ضرورت بازنگری در ارزیابی خطر سیلاب این حوضه را دوچندان کرده است. این تغییرات نه‌تنها الگوی تولید رواناب و شدت سیلاب را تحت‌تأثیر قرار داده‌اند، بلکه نفوذپذیری خاک، ویژگی‌های هیدرولوژیکی حوضه و هندسه هیدرولیکی مسیر رودخانه را نیز دستخوش دگرگونی کرده‌اند. از این‌رو، استفاده از رویکردهای مدل‌سازی یکپارچه و مبتنی بر داده‌های به‌روز، برای بازنمایی دقیق رفتار جریان در شرایط فعلی حوضه ضروری است.

نوآوری این پژوهش در ارائه یک چارچوب یکپارچه و با دقت بالا برای شبیه‌سازی سیلاب در حوضه رودخانه کن است که با بهره‌گیری از مدل‌سازی دوبعدی (2D) و داده‌های توپوگرافی با تفکیک‌پذیری بالا (High-Resolution DEM)، توانسته است برخلاف مطالعات گذشته، برهم‌کنش پیچیده جریان در محدوده گذار از کوهستان به دشت و تأثیر تغییرات فیزیکی بستر بر پهنه‌بندی خطر را با جزئیات دقیق‌تری بررسی کند. بر این اساس، هدف اصلی این مطالعه، ارزیابی خطر سیلاب در مناطق شهری پایین‌دست تهران (مناطق ۲۱ و ۲۲) با استفاده از مدل‌های HEC-HMS و HEC-RAS 2D است. در این راستا، ابتدا با استفاده از داده‌های بلندمدت هیدرومتری و بارش، سیلاب‌های طراحی برای دوره‌های بازگشت مختلف برآورد شد. سپس با اعمال شرایط مرزی دقیق و ضرایب زبری متناسب با تغییرات کاربری اراضی، هیدروگراف‌های حاصل به‌عنوان ورودی مدل هیدرولیکی دوبعدی جهت استخراج نقشه‌های توزیع عمق و سرعت سیلاب مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج این پژوهش نه‌تنها دیدگاه جدیدی از نقاط بحرانی و آسیب‌پذیر حوضه کن ارائه می‌دهد، بلکه می‌تواند مبنای علمی و عملیاتی دقیق‌تری برای مدیریت ریسک سیلاب، برنامه‌ریزی کاربری اراضی و افزایش تاب‌آوری کلان‌شهر تهران فراهم آورد.

پیشینه پژوهش

سیلاب یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی در حوضه‌های شهری و نیمه‌خشک است که شدت و گستره آن تحت تأثیر هم‌زمان عوامل اقلیمی، ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه، کاربری اراضی و مداخلات انسانی قرار دارد. در دهه‌های اخیر، افزایش رخداد‌های حدی بارش و گسترش ساخت‌وساز در حرم رودخانه‌ها، خطر آب‌گرفتگی را تشدید کرده است (IPCC, 2021). در این چارچوب، استفاده از مدل‌های تلفیقی برای ارزیابی دقیق خطر سیلاب ضروری است. مدل HEC-HMS به‌عنوان یکی از ابزارهای متداول برای شبیه‌سازی فرآیند تبدیل بارش به رواناب در مقیاس حوضه آبریز به کار می‌رود، درحالی‌که مدل HEC-RAS برای شبیه‌سازی انتقال جریان در کانال‌ها و دشت‌های سیلابی استفاده می‌شود. نسخه‌های دوبعدی این مدل (HEC-RAS 2D) به دلیل توانایی بالاتر در بازنمایی توزیع مکانی عمق و سرعت جریان، در سال‌های اخیر به طور گسترده در مطالعات پهنه‌بندی خطر سیلاب مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Brunner, 2016).

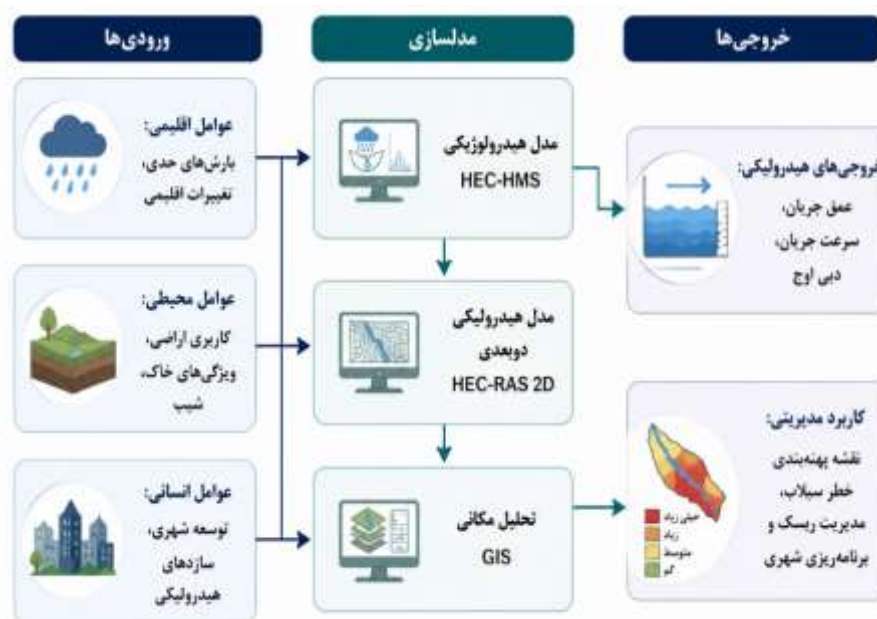
مطالعات تجربی نشان داده‌اند که استفاده از مدل‌های تلفیقی هیدرولوژیکی-هیدرولیکی می‌تواند دقت پیش‌بینی و پهنه‌بندی خطر سیلاب را به طور قابل‌توجهی افزایش دهد (Teng et al., 2017). در مقیاس بین‌المللی، Namara et al. (2022) و Rangari et al. (2020) با ترکیب مدل‌های GIS، HEC-HMS و HEC-RAS توانسته‌اند بازنمایی واقع‌بینانه‌ای از رخداد‌های سیلاب در حوضه‌های شهری ارائه دهند. در ایران نیز پژوهش‌های متعددی از این رویکرد استفاده کرده‌اند؛ از جمله Parizi و Hosseini (2023) که برای تحلیل دشت سیلابی حوضه رودخانه اترک، از داده‌های دقیق ماهواره‌ای TanDEM-X و مدل HEC-RAS 2D بهره بردند. همچنین پژوهش‌هایی در حوضه‌های مختلف ایران، از جمله رودخانه دورود (Ghasemieh & Naserian Asl, 2025) و رودخانه کارون (Tahmasbinejad et al., 2012)، کارایی مدل‌های تلفیقی هیدرولوژیکی-هیدرولیکی را در تحلیل و مدیریت مخاطرات سیلاب نشان داده‌اند.

در مورد حوضه رودخانه کن، مطالعات پیشین بیشتر بر جنبه‌های هیدرولوژیکی تمرکز داشته‌اند. برای نمونه، Saleh et al. (2011) کارایی مدل HEC-HMS را در شبیه‌سازی رواناب این حوضه بررسی کرده‌اند. همچنین در پژوهشی دیگر، مدل‌سازی فرآیندهای برف و ذوب برف با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور و مدل HEC-HMS در حوضه کن انجام شده است (Roohi et al., 2023). در زمینه پهنه‌بندی سیلاب، حسینی و صادقی (۱۴۰۴) با استفاده از مدل HEC-GeoRAS به شبیه‌سازی پهنه‌های سیلابی رودخانه کن برای دوره‌های بازگشت مختلف پرداخته‌اند. با این حال، استفاده از روش‌های مبتنی بر مدل‌های یک‌بعدی یا ابزارهای قدیمی تر GIS ممکن است در بازنمایی دقیق توزیع سرعت جریان و پیچیدگی‌های هیدرولیکی دشت سیلابی محدودیت‌هایی داشته باشد، به‌ویژه در مناطق شهری که سازه‌های هیدرولیکی، پل‌ها و تغییرات مورفولوژیکی بستر نقش مهمی در رفتار جریان ایفا می‌کنند.

باتوجه به توسعه سریع مناطق ۲۱ و ۲۲ تهران و افزایش سطوح نفوذناپذیر در پایین‌دست حوضه رودخانه کن، ضرورت استفاده از مدل‌های هیدرولیکی دوبعدی برای تحلیل دقیق‌تر رفتار جریان و ارزیابی خطر سیلاب بیش‌ازپیش احساس می‌شود (Darijani et al., 2025). علاوه بر این، پژوهش Movahedinia et al. (2019) نیز بر اهمیت به‌کارگیری ابزارهای پیشرفته مدل‌سازی هیدرولیکی برای مدیریت خطر سیلاب در مناطق شهری تهران تأکید کرده است.

بنابراین، پژوهش حاضر باهدف رفع خلأهای موجود در مطالعات پیشین و با تمرکز بر تلفیق مدل‌های HEC-HMS و HEC-RAS 2D، می‌کوشد تصویری به‌روز و دقیق از رفتار سیلاب در حوضه رودخانه کن ارائه دهد. در این چارچوب، ابتدا فرآیندهای بارش-رواناب در مقیاس حوضه با استفاده از مدل HEC-HMS شبیه‌سازی شده و سپس هیدروگراف‌های حاصل به‌عنوان ورودی مدل هیدرولیکی دوبعدی HEC-RAS برای پهنه‌بندی سیلاب در مناطق پایین‌دست مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

مدل مفهومی پژوهش حاضر بر این فرض استوار است که خطر سیلاب حاصل تعامل میان عوامل اقلیمی، ویژگی‌های فیزیکی حوضه و مداخلات انسانی در بستر رودخانه است. چارچوب کلی مراحل پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است. این مدل مفهومی ارتباط بین داده‌های ورودی (بارش، دبی، توپوگرافی و کاربری اراضی)، فرآیند مدل‌سازی هیدرولوژیکی-هیدرولیکی و خروجی‌های مدیریتی شامل عمق سیلاب، سرعت جریان و پهنه خطر را تبیین می‌کند.



شکل ۱. مدل مفهومی پژوهش جهت شبیه‌سازی و پهنه‌بندی خطر سیلاب در حوضه رودخانه کن

بر اساس چارچوب مفهومی ارائه شده، در بخش بعدی منطقه مورد مطالعه، داده‌های مورد استفاده و روش‌های مدل‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولوژیکی تشریح می‌گردد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مطالعه

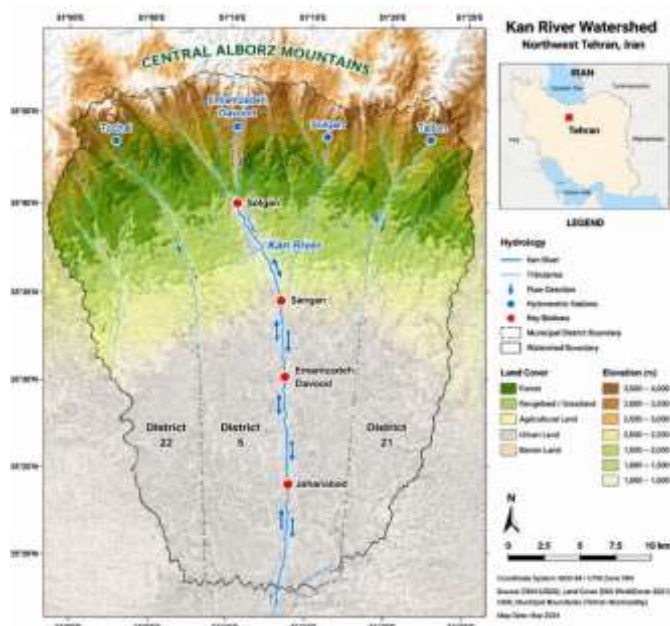
حوضه آبریز رودخانه کن در شمال غرب تهران واقع شده و از ارتفاعات البرز مرکزی شامل توچال، امامزاده داود، سولقان و تالون سرچشمه می‌گیرد. طول رودخانه در حدود ۳۳ کیلومتر بوده و مساحت حوضه آبریز در بالادست تا ایستگاه سولقان ۲۰۰ کیلومتر مربع برآورد شده است (حسینی و صادقی، ۱۴۰۴). رودخانه پس از عبور از مناطق ۵، ۲۱ و ۲۲ شهرداری تهران، در بخش‌های پایین‌دست (نزدیک جهان‌آباد و کهریزک) به شبکه زهکشی شهری متصل می‌شود. توپوگرافی حوضه دارای وضعیت کوهستانی-تپه‌ای در بالادست با شیب متوسط ۵-۱۵ درصد بوده و در نواحی شهری پایین‌دست به دلیل کانالیزه‌شدن بستر، کاهش قابل توجه شیب مشاهده می‌شود. پوشش گیاهی شامل مراتع و رویشگاه‌های نیمه جنگلی در بخش‌های بالادست و توسعه شهری در پایین‌دست است. این حوضه به دلیل بارش‌های شدید فصلی و گسترش سطوح نفوذناپذیر شهری، سابقه وقوع سیلاب‌های مخرب متعددی را دارد؛ از جمله رخداد‌های شاخص سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۸ (Ghorbani M., 2024).

شکل ۲ موقعیت جغرافیایی حوضه، مرز آبریز، ارتفاعات منبع، ایستگاه‌های هیدرومتری، مناطق شهری مجاور، الگوی کاربری اراضی و توپوگرافی را نمایش می‌دهد و مبنایی برای تنظیم مدل هیدرولوژیکی و هیدرولوژیکی فراهم می‌کند.

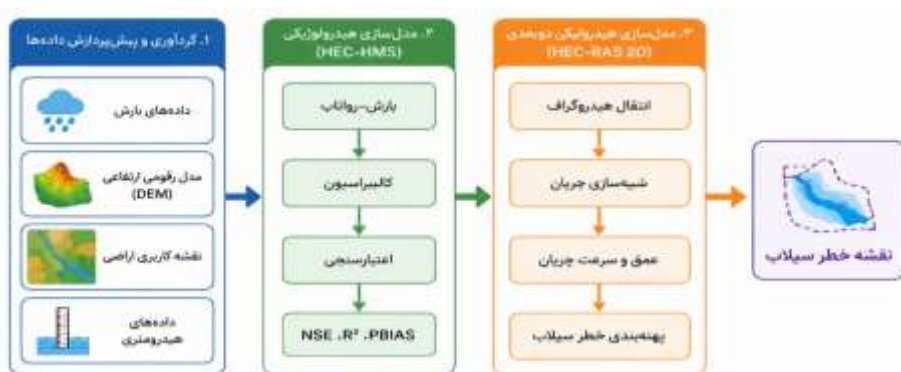
همچنین شکل ۳ مدل مفهومی فرآیند شبیه‌سازی سیلاب در حوضه کن را نشان می‌دهد که شامل ورودی‌های داده‌ای، مدل HEC-HMS، مدل HEC-RAS 2D و خروجی‌های مدیریت خطر سیلاب است.

داده‌ها

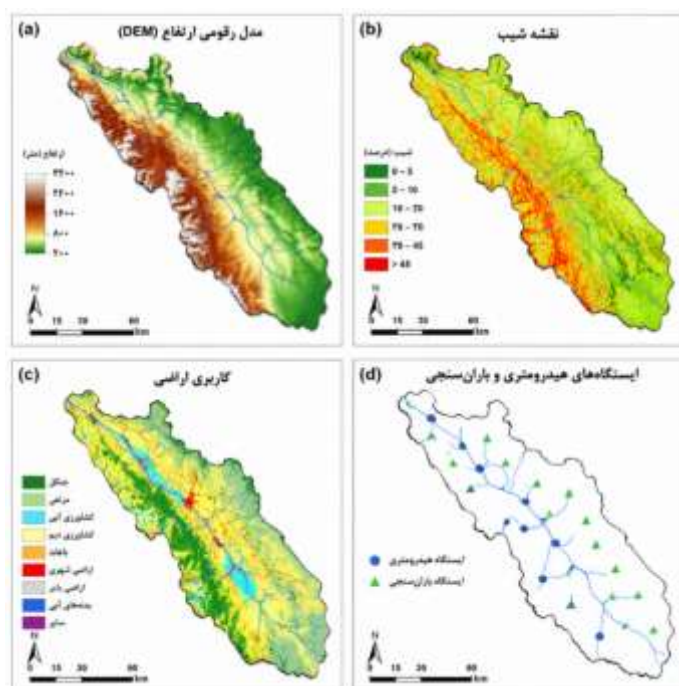
داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل مجموعه‌ای از داده‌های بارش، دبی، مدل رقومی ارتفاع (DEM) و اطلاعات کاربری اراضی است. در این پژوهش برای استخراج پارامترهای فیزیوگرافی حوضه و تهیه ورودی‌های مدل هیدرولوژیکی، از لایه‌های مکانی شامل مدل رقومی ارتفاع (DEM)، نقشه شیب، نقشه کاربری/پوشش اراضی و موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری و باران‌سنجی استفاده شد که نمای کلی آن‌ها در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی حوزه آبریز رودخانه کن و اجزای اصلی منطقه مورد مطالعه



شکل ۳. مدل مفهومی فرآیند شبیه‌سازی و پهنه‌بندی خطر سیلاب در حوزه آبریز کن



شکل ۴. نقشه‌های پایه و لایه‌های مکانی مورد استفاده در مدل‌سازی سیلاب در حوزه آبریز رودخانه کن

داده‌های بارش از ایستگاه‌های باران‌سنجی فعال در حوضه و داده‌های دبی از ایستگاه هیدرومتری اصلی رودخانه کن اخذ شد. برای تحلیل و کالیبراسیون مدل، رویدادهای شاخص سیلابی—به‌ویژه سیلاب فروردین ۱۳۹۳—به‌عنوان رخداد مرجع انتخاب شدند. مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی مورد استفاده در این پژوهش شامل مختصات جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا و دوره آماری داده‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری و باران‌سنجی حوضه رودخانه کن

ردیف	نام ایستگاه	کد ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی (E)	عرض جغرافیایی (N)	ارتفاع (m)	دوره آماری موجود
۱	سولقان	۴۱-۱۰۹	هیدرومتری	۵۱° ۱۵'	۳۵° ۵۰'	۱۶۶۰	۱۳۴۸ - ۱۳۹۸
۲	سنگان	۴۱-۱۳۵	باران‌سنجی	۵۱° ۱۳'	۳۵° ۵۳'	۲۱۰۰	۱۳۷۹ - ۱۳۹۸
۳	رندان	۴۱-۵۷۳	هواشناسی	۵۱° ۱۷'	۳۵° ۵۴'	۲۲۸۰	۱۳۸۵ - ۱۳۹۸
۴	کشار	۴۱-۵۷۵	تبخیرسنجی	۵۱° ۱۱'	۳۵° ۴۸'	۱۵۸۰	۱۳۸۵ - ۱۳۹۸
۵	کیگا	۴۱-۵۷۱	باران‌سنجی	۵۱° ۱۸'	۳۵° ۵۳'	۲۴۵۰	۱۳۸۵ - ۱۳۹۸

برای نمایش توپوگرافی، از مدل رقومی ارتفاع با تفکیک‌پذیری ۳۰ متر استفاده شد و عملیات استخراج شیب، مقاطع عرضی، شبکه جریان و مرزهای هیدرولوژیکی در محیط GIS انجام گرفت. داده‌های کاربری اراضی جهت برآورد پارامترهای رواناب، ضریب نفوذناپذیری و تعیین مقدار اولیه CN در مدل هیدرولوژیکی مورد بهره‌برداری قرار گرفتند.

مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS

برای شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب از مدل HEC-HMS استفاده شد. ابتدا حوضه به زیرحوضه‌های هیدرولوژیکی تقسیم گردید و ویژگی‌های فیزیوگرافی شامل مساحت، طول آبراهه اصلی، شیب و کاربری اراضی هر زیرحوضه استخراج شد. پارامترهای اصلی مدل شامل زمان تمرکز، ضریب منحنی SCS-CN و تلفات اولیه بر اساس کاربری اراضی، گروه هیدرولوژیکی خاک و خصوصیات سطحی تعیین شدند. در روش SCS-CN، رواناب مستقیم از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S}, \quad P > I_a \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن:

Q عمق رواناب مستقیم (mm)

P بارش کل (mm)

I_a تلفات اولیه (mm)

S ظرفیت نگهداشت بالقوه حوضه (mm)

رابطه بین پارامتر S و شماره منحنی (CN) به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{رابطه (۲)}$$

و معمولاً مقدار تلفات اولیه برابر با $I_a = 0.2S$ در نظر گرفته می‌شود.

برای تولید هیدروگراف سیلاب، رویدادهای واقعی (۱۳۹۳ و ۱۳۹۸) و سیلاب‌های طراحی وارد مدل شده و خروجی‌ها با داده‌های مشاهده‌شده ایستگاه هیدرومتری مقایسه شدند.

روش تبدیل بارش به رواناب بر اساس هیدروگراف واحد کلارک (Clark Unit Hydrograph) تعریف شد که ترکیبی از فرآیند انتقال و ذخیره در حوضه است. در این روش، پارامترهای اصلی شامل زمان تمرکز (T_c) و ضریب ذخیره R هستند که نقش مهمی در شکل هیدروگراف خروجی دارند.

برای مسیریابی جریان در آبراهه‌های اصلی از روش Muskingum-Cunge استفاده شد که بر اساس رابطه (۳) بیان می‌شود:

$$O_{t+1} = C_1 I_{t+1} + C_2 I_t + C_3 O_t \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن:

I دبی ورودی

O دبی خروجی



C_3, C_2, C_1 ضرایب مسیریابی وابسته به خصوصیات هیدرولیکی کانال هستند. پس از تنظیم پارامترها، مدل با استفاده از رویدادهای تاریخی کالیبره و اعتبارسنجی شد و عملکرد آن با استفاده از شاخص‌هایی نظیر Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)، ضریب تعیین (R^2) و Percent Bias (PBIAS) ارزیابی گردید.

مدل هیدرولیکی HEC-RAS 2D

خروجی مدل HEC-HMS شامل هیدروگراف سیلاب، به عنوان مرز بالادست وارد مدل HEC-RAS نسخه ۶/۴ در حالت دوبعدی شد. شبکه محاسباتی مدل بر اساس مدل رقمی ارتفاع (DEM) و با اندازه سلول ۱۰-۳۰ متر تنظیم گردید تا تغییرات مکانی عمق و سرعت جریان به درستی نمایش داده شود.

مدل HEC-RAS 2D برای شبیه‌سازی جریان از معادلات آب کم‌عمق (Saint-Venant) استفاده می‌کند که شامل معادلات پیوستگی و مومنتوم هستند. معادله پیوستگی به صورت رابطه (۴) بیان می‌شود:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = q \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن:

h عمق جریان (m)

u, v مؤلفه‌های سرعت جریان در راستای x و y

q دبی جانبی ورودی به واحد سطح

معادلات مومنتوم نیز انتقال تکانه در راستاهای افقی را توصیف می‌کنند و مبنای محاسبه سرعت و تراز سطح آب در شبکه دوبعدی هستند.

برای تعریف شرایط مرزی پایین‌دست، بسته به شرایط هیدرولیکی منطقه، از شرط Normal Depth یا Stage Hydrograph استفاده شد. سازه‌های هیدرولیکی مهم از جمله پل‌ها، گلوگاه‌ها و نقاط انسداد جریان در مدل لحاظ شدند تا بازنمایی دقیق‌تری از شرایط واقعی رودخانه حاصل شود.

ضریب زبری Manning با استفاده از تصاویر هوایی، نقشه‌های پوشش سطح و بازدید میدانی تعیین و سپس در فرایند کالیبراسیون اصلاح شد. سرعت متوسط جریان در کانال‌ها بر اساس رابطه Manning به صورت رابطه (۵) بیان می‌شود:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در آن:

V سرعت جریان (m/s)

n ضریب زبری مانینگ

R شعاع هیدرولیکی (m)

S شیب خط انرژی

مقادیر ضریب مانینگ در محدوده ۰/۰۲۵ برای کانال‌های نسبتاً صاف تا حدود ۰/۰۴۵ برای بسترهای پوشیده از پوشش گیاهی و دشت سیلابی در نظر گرفته شد و در طی فرایند کالیبراسیون تنظیم گردید.

کالیبراسیون و صحت‌سنجی

برای بررسی رفتار سیلابی حوضه و انتخاب رخدادهای مناسب جهت کالیبراسیون و ارزیابی مدل، چند رخداد شاخص سیلابی در ایستگاه هیدرومتری سولقان مورد بررسی قرار گرفت که خلاصه مشخصات آنها در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. تحلیل رخدادهای سیلاب شاخص در ایستگاه سولقان (خروجی حوضه)

ردیف	تاریخ وقوع (شمسی)	سال آبی	حداکثر دبی روزانه (m^3/s)	بارش متناظر (mm)	وضعیت رخداد
۱	۱۳۹۸/۰۱/۱۲	۹۸-۱۳۹۷	۳۸/۵۰	۶۲/۵	سیلاب فروردین ۹۸ (کشوری)
۲	۱۳۹۳/۰۲/۰۳	۹۳-۱۳۹۲	۱۸/۲۰	۲۸/۰	سیلاب بهاره (موضعی)
۳	۱۳۶۶/۰۵/۰۴	۶۶-۱۳۶۵	۸۴/۰۰	۴۵/۰	سیلاب تاریخی (بیشینه کل)

فرآیند کالیبراسیون مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی بر اساس سیلاب تاریخی فروردین ۱۳۹۳ انجام شد. برای ارزیابی عملکرد مدل، شاخص‌های آماری R^2 ، NSE و PBIAS محاسبه گردیدند (جدول ۳). خطای دبی اوج و تفاوت زمان وقوع پیک بین داده‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده نیز بررسی شد. نتایج نشان داد که مدل در بازتولید رفتار هیدروگراف، دامنه نوسانات و دبی اوج عملکرد قابل‌قبولی داشته است.

جدول ۳. شاخص‌های دقت کالیبراسیون و صحت‌سنجی

شاخص	مقدار/نتیجه	رویداد مرجع	توضیحات
کالیبراسیون HEC-HMS			
NSE	0.78-0.89	سیلاب‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۸	دقت مناسب
R^2	0.82-0.92	سیلاب‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۸	همبستگی بالا
PBIAS	کمتر از ۱۲٪	سیلاب‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۸	خطای حجمی کم
دبی اوج مشاهده‌شده	19.0 m ³ /s	سیلاب فروردین ۱۳۹۳	ایستگاه سولقان
دبی اوج شبیه‌سازی‌شده	19.5 m ³ /s	سیلاب فروردین ۱۳۹۳	خطای کمتر از ۵٪
خطای دبی اوج	کمتر از ۵٪	سیلاب فروردین ۱۳۹۳	تطابق خوب
صحت‌سنجی کلی			
شاخص استاندارد	85-90%	کل مدل	گزارش‌شده در متن
تطابق هیدروگراف	خوب	سیلاب ۱۳۹۳	بازتولید مناسب شکل موج
تطابق پهنه سیلاب	قابل قبول	شواهد تاریخی / تصاویر ماهواره‌ای	مناسب برای نقشه خطر

به منظور ارزیابی عملکرد مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی رخداد‌های سیلابی، از سه شاخص آماری متداول شامل ضریب نش-ساتکلیف (NSE)، ضریب تعیین (R^2) و درصد خطای اریبی (PBIAS) استفاده شد. مقادیر این شاخص‌ها برای رخداد‌های منتخب در دوره‌های کالیبراسیون و اعتبارسنجی در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس معیارهای پیشنهادی (Moriasi et al., 2007)، مقادیر به‌دست‌آمده بیانگر عملکرد «خوب» تا «بسیار خوب» مدل در شبیه‌سازی دبی اوج و شکل هیدروگراف سیلاب در حوضه آبریز رودخانه کن می‌باشد.

جدول ۴. شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل HEC-HMS در دوره‌های کالیبراسیون و اعتبارسنجی

دوره	تاریخ رخداد	NSE	R^2	PBIAS (%)
کالیبراسیون	۱۳۹۱/۰۲/۲۶	۰/۸۲	۰/۸۵	۸/۲
	۱۳۹۴/۰۱/۲۱	۰/۷۹	۰/۸۳	۱۰/۵
اعتبارسنجی	۱۳۹۶/۱۲/۲۹	۰/۷۵	۰/۸۰	۱۲/۱
	۱۳۹۹/۰۲/۱۶	۰/۷۲	۰/۷۸	۱۴/۸

پهنه‌بندی خطر سیلاب

پس از اجرای مدل HEC-RAS 2D، لایه‌های مکانی عمق جریان، سرعت و پهنه گسترش سیلاب استخراج شد. سپس با استفاده از ترکیب عمق و سرعت جریان، پهنه‌های خطر در سه سطح کم، متوسط و زیاد طبقه‌بندی شدند و در محیط GIS نقشه نهایی خطر سیلاب تهیه شد.

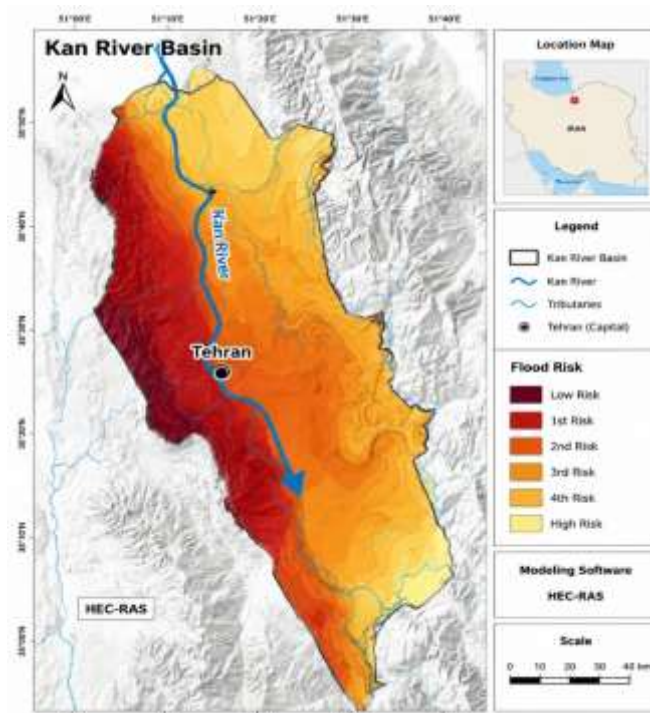
بر اساس نتایج مدل هیدرولیکی، شاخص خطر سیلاب با ترکیب عمق و سرعت جریان محاسبه شد. این شاخص که به‌عنوان Flood Hazard Index (FH) شناخته می‌شود از رابطه (۶) به دست می‌آید:

$$FH = d \times v$$

رابطه (۶)

که در آن d عمق جریان (m) و v سرعت جریان (m/s) است. بر اساس مقدار این شاخص، مناطق سیلابی به سه طبقه خطر کم، متوسط و زیاد تقسیم شدند. این شاخص امکان ارزیابی شدت خطر برای مناطق شهری و زیرساخت‌های حساس را فراهم می‌کند.

بدین ترتیب، نتایج شبیه‌سازی هیدرولیکی در شکل ۵ نمایش داده شده است. این نقشه ضمن نمایش گستره و عمق سیلاب، مسیر و جهت حرکت جریان را از ارتفاعات کوهستانی به مناطق شهری پایین‌دست مشخص می‌کند و می‌تواند مبنایی برای تعیین حریم ایمن رودخانه، برنامه‌ریزی مدیریت بحران و طراحی سازه‌های حفاظتی باشد.



شکل ۵. نقشه پهنه‌بندی ریسک سیلاب حوضه آبریز رودخانه کن با استفاده از مدل هیدرولیکی دوبعدی HEC-RAS

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، مناطق پرخطر (رنگ‌های روشن‌تر) عمدتاً در پایین‌دست رودخانه (نزدیک جهان‌آباد و مناطق ۲۱-۲۲ تهران) قرار دارند، جایی که عمق سیلاب می‌تواند به بیش از ۲ متر و سرعت جریان به بیش از ۳ متر بر ثانیه برسد. جهت جریان (فلش آبی) نیز تأیید می‌کند که سیلاب از ارتفاعات البرز به سمت جنوب و نواحی مسکونی و زیرساختی حرکت می‌کند. این نقشه می‌تواند مبنای مناسبی برای تعیین حریم رودخانه، برنامه‌ریزی تخلیه اضطراری و احداث سازه‌های حفاظتی باشد. پارامترها و تنظیمات اصلی مورداستفاده در مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵. پارامترهای اصلی مدل

بخش	پارامتر	مقدار/روش	توضیح
داده‌های مکانی	DEM	۳۰ متر SRTM	پیش‌پردازش با ArcGIS Pro 3.2
هیدرولوژی	مدل	HEC-HMS v4.11	شبیه‌سازی بارش-رواناب
هیدرولوژی	روش تلفات	SCS Curve Number (CN)	CN حدود ۷۰-۸۵، بر پایه کاربری اراضی و خاک
هیدرولوژی	روش تبدیل بارش	Clark Unit Hydrograph / SCS Unit Hydrograph	بسته به زیرحوضه
هیدرولوژی	روش انتقال جریان	Muskingum-Cunge	برای مسیرهای اصلی
هیدرولوژی	معیار کالیبراسیون	NSE, R ² , PBIAS	NSE: 0.78-0.89, R ² : 0.82-0.92, PBIAS < 12%
هیدرولیک	مدل	HEC-RAS v6.4 (2D)	شبیه‌سازی جریان دوبعدی
هیدرولیک	معادله حل	Shallow Water / Diffusion Wave	بر اساس تنظیمات مدل
هیدرولیک	زبری سطح	Manning Coefficient	کالیبره شده
شبکه	اندازه سلول	۱۰-۳۰ متر	بر اساس DEM 30 متر
مرزها	بالادست	هیدروگراف خروجی HEC-HMS	ورودی مدل D۲
مرزها	پایین‌دست	Normal Depth / Stage Hydrograph	شرایط خروجی
سناریوها	دوره بازگشت	۲۵، ۵۰، ۱۰۰ ساله	برای پهنه‌بندی خطر

نتایج و بحث

نتایج حاصل از مدل‌سازی هیدرولوژیکی-هیدرولیکی سیلاب در حوضه آبریز رودخانه کن، بر اساس داده‌های واقعی بارندگی و دبی ثبت‌شده

در ایستگاه‌های سولقان، سنگان و سایر ایستگاه‌های موجود طی دوره بلندمدت ۱۳۴۸-۱۴۰۴ ارائه می‌شود. در این پژوهش، مدل HEC-HMS برای تولید هیدروگراف‌های سیلاب و مدل HEC-RAS 6.4 در حالت دوبعدی برای شبیه‌سازی پهنه سیلاب، عمق و سرعت جریان و تهیه نقشه‌های خطر به کار گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد که تلفیق مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی علاوه بر بازتولید مناسب رخدادهای تاریخی، توانایی قابل قبولی در برآورد سناریوهای طراحی و ارزیابی ریسک سیلاب در بخش‌های شهری پایین دست رودخانه کن دارد.

برآورد دبی سیلاب طراحی

برای تعیین دبی‌های سیلاب طراحی، توزیع آماری Log-Pearson Type III بر سری دبی حداکثر لحظه‌ای ایستگاه سولقان اعمال شد (جدول ۶). نتایج بیانگر افزایش قابل توجه دبی اوج با افزایش دوره بازگشت است؛ به‌طوری که دبی اوج برای دوره‌های بازگشت ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله به ترتیب در بازه‌های ۹۵-۱۱۰، ۱۲۰-۱۳۵ و ۱۴۰-۱۶۰ مترمکعب بر ثانیه برآورد شد. همچنین حجم تقریبی سیلاب‌ها در بازه ۸۵۰-۱۱۰۰، ۱۲۰۰-۱۵۰۰ و ۱۶۰۰-۲۰۰۰ هزار مترمکعب محاسبه گردید که بیانگر افزایش قابل توجه پتانسیل تخریب در رخدادهای نادرتر، به‌ویژه در بخش‌های شهری کانالیزه‌شده پایین دست است.

جدول ۶. دبی سیلاب طراحی برای دوره‌های بازگشت مختلف (ایستگاه سولقان)

دوره بازگشت (سال)	دبی اوج (m^3/s)	حجم تقریبی سیلاب (هزار m^3)	توضیحات
۲۵	۹۵-۱۱۰	۸۵۰-۱۱۰۰	سیلاب متوسط؛ عمدتاً در بالادست تأثیرگذار
۵۰	۱۲۰-۱۳۵	۱۲۰۰-۱۵۰۰	سیلاب شدید؛ تأثیر بر مناطق شهری کانالیزه
۱۰۰	۱۴۰-۱۶۰	۱۶۰۰-۲۰۰۰	سیلاب بسیار شدید؛ مشابه پیک تاریخی $139/3 m^3/s$ در ۱۳۹۳

از منظر مقایسه با شواهد میدانی و رخدادهای تاریخی، محدوده دبی ۱۰۰ ساله ($140-160 m^3/s$) با پیک تاریخی $139/3 m^3/s$ ثبت‌شده در رخداد سال ۱۳۹۳ همخوانی دارد. این تطابق نشان می‌دهد که رخدادهای اخیر می‌توانند به مقادیر نزدیک به سیلاب طراحی ۱۰۰ ساله برسند که بیانگر افزایش بالقوه ریسک سیلاب در سال‌های اخیر است.

علاوه بر این، نتایج حاصل با مطالعات انجام‌شده در محدوده تهران نیز همخوانی دارد؛ به‌گونه‌ای که Nasiri et al. (2025) دبی ۱۰۰ ساله را حدود $140-150 m^3/s$ گزارش کرده‌اند و حسینی و صادقی (۱۴۰۴) نیز مقادیر مشابهی را برای پهنه‌بندی سیلاب مناطق شهری کن ارائه داده‌اند.

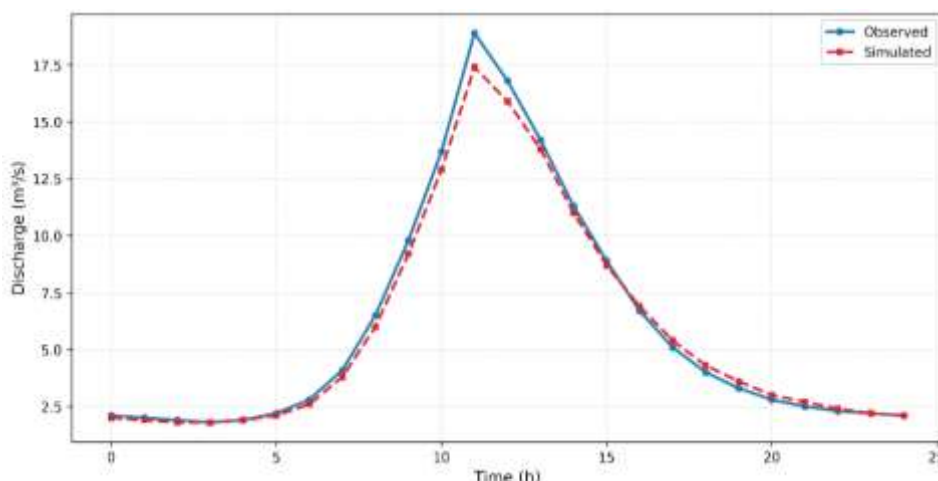
نتایج مدل هیدرولوژیکی (HEC-HMS)

ملکرد مدل هیدرولوژیکی با مقایسه هیدروگراف‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده برای رخدادهای شاخص، به‌ویژه سیلاب‌های سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۸، ارزیابی شد. نتایج شاخص‌های آماری نشان داد که مدل از دقت قابل قبولی برخوردار است؛ به‌طوری که مقدار NSE در بازه ۰/۷۸ تا ۰/۸۹، مقدار R^2 در بازه ۰/۸۲ تا ۰/۹۲ و مقدار PBIAS کمتر از ۱۲٪ به‌دست آمد. این مقادیر مطابق معیارهای رایج ارزیابی مدل‌های بارش-رواناب، نشان‌دهنده عملکرد «خوب تا بسیار خوب» مدل است.

برای رخداد شاخص فروردین ۱۳۹۳، مدل HEC-HMS توانست دبی اوج و زمان وقوع پیک را با دقت مناسبی بازتولید کند. اختلاف بین دبی اوج مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده کمتر از ۱۰٪ بوده و زمان وقوع پیک نیز تطابق قابل قبولی را نشان داد. مقایسه هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده در ایستگاه هیدرومتری سولقان نشان می‌دهد که مدل قادر است روند تغییرات دبی و شکل کلی هیدروگراف سیلاب را با دقت مناسبی بازتولید کند (شکل ۶).

جدول ۶ مقایسه هیدروگراف دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده در ایستگاه هیدرومتری سولقان برای یکی از رخدادهای سیلابی منتخب. تطابق مناسب روند تغییرات دبی و زمان وقوع پیک نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول مدل HEC-HMS در بازتولید پاسخ هیدرولوژیکی حوضه است.

این نتایج نشان می‌دهد که ترکیب روش‌های به‌کاررفته در مدل، شامل روش تلفات SCS-CN و هیدروگراف واحد Clark، برای ویژگی‌های فیزیوگرافی کوهستانی-شهری حوضه کن مناسب بوده است. در نتیجه، می‌توان اطمینان داشت که هیدروگراف‌های تولیدشده توسط مدل هیدرولوژیکی از دقت کافی برای استفاده به‌عنوان ورودی مدل هیدرولیکی برخوردار هستند.



شکل ۶. هیدروگراف مقایسه‌ای نمونه بین دبی مشاهده‌ای و دبی شبیه‌سازی شده در ایستگاه هیدرومتری سولقان

نتایج مدل هیدرولیکی دوبعدی (HEC-RAS 2D) و پهنه‌بندی سیلاب

شبیه‌سازی‌های دوبعدی HEC-RAS برای دبی‌های سیلاب طراحی اجرا شد. شبکه محاسباتی مدل با اندازه سلول ۱۰ تا ۳۰ متر و بر اساس DEM با تفکیک ۳۰ متر ایجاد شد و نقشه‌های عمق و سرعت جریان در محیط RAS Mapper استخراج گردید.

نتایج نشان داد که با افزایش دوره بازگشت سیلاب، عمق جریان، سرعت جریان و گستره پهنه سیلاب افزایش می‌یابد. بیشترین توسعه پهنه سیلاب در بخش‌های پایین‌دست و مناطق شهری مشاهده شد.

از نظر مشخصه‌های هیدرولیکی، برای دوره بازگشت ۲۵ ساله عمق متوسط سیلاب حدود ۰٫۸ تا ۱٫۵ متر و سرعت جریان حدود ۱٫۵ تا ۳ متر بر ثانیه برآورد شد. در دوره بازگشت ۵۰ ساله، عمق متوسط به ۱٫۲ تا ۲٫۲ متر و سرعت جریان به حدود ۲ تا ۴ متر بر ثانیه افزایش یافت. در سناریوی سیلاب ۱۰۰ ساله، عمق متوسط به حدود ۱/۸ تا ۳ متر و سرعت جریان به حدود ۳ تا ۵ متر بر ثانیه رسید که بیشترین مقادیر آن در بخش‌های پایین‌دست و محدوده‌های نزدیک جهان‌آباد و مناطق ۲۱ و ۲۲ تهران مشاهده شد.

از نظر گستره پهنه سیلاب، مساحت تقریبی مناطق سیل‌گیر در کل محدوده مدل به‌ترتیب حدود ۱۵-۱۸ km² برای سیلاب ۲۵ ساله، ۲۰-۲۳ km² برای سیلاب ۵۰ ساله و ۲۵-۲۹ km² برای سیلاب ۱۰۰ ساله برآورد شد.

مقایسه این نتایج با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که مقادیر به‌دست‌آمده از نظر مقیاس فضایی و شدت سیلاب با نتایج سایر پژوهش‌ها در محدوده شهری تهران سازگار است؛ برای نمونه، حسینی و صادقی (۱۴۰۴) برای بخش شهری کن، پهنه سیلابی در حدود ۲۹۲ هکتار ($\approx 2/92 \text{ km}^2$) گزارش کرده‌اند که باتوجه به تفاوت «دامنه مکانی مطالعه» (فقط بخش شهری در برابر کل حوضه تا خروجی شهری) تفاوت عددی قابل‌انتظار است. همچنین در مطالعات مربوط به مناطق ۲۱ و ۲۲، بیشترین تأثیر سیلاب برای زیرساخت‌ها و کاربری‌های شهری گزارش شده و برآوردهای این پژوهش نیز نشان می‌دهد که در سناریوی ۵۰ ساله، حدود ۸-۱۰٪ از محدوده‌های حساس (از جمله بزرگراه‌ها، فضاهای سبز و بافت مسکونی) می‌تواند در معرض سیلاب قرار گیرد (Nasiri et al., 2025).

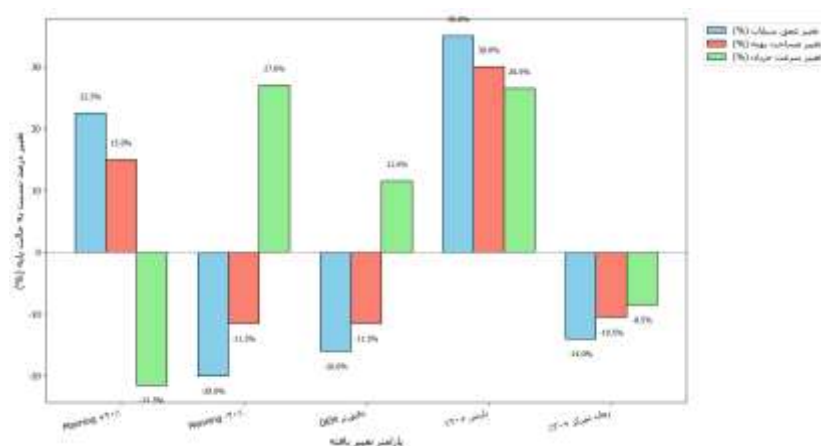
از دیدگاه خطر، ترکیب عمق زیاد (> 2 متر) و سرعت بالا (> 3 متر بر ثانیه) در بخش‌های باریک و کانالیزه رودخانه، خطر فرسایش بستر و کناره‌ها و آسیب به سازه‌های مجاور را تشدید می‌کند؛ بنابراین، صرف‌گسترش پهنه سیلاب برای مدیریت ریسک کافی نیست و لازم است نقشه‌های خطر مبتنی بر «عمق-سرعت» به‌عنوان مبنای اولویت‌بندی اقدامات سازه‌ای و غیرسازه‌ای استفاده شوند. نتایج همچنین نشان می‌دهد که افزایش پهنه‌های پرخطر در سال‌های اخیر می‌تواند حاصل هم‌افزایی افزایش سطوح نفوذناپذیر شهری، کاهش ظرفیت طبیعی سیلاب‌دشت و مداخلات انسانی در بستر رودخانه باشد.

تحلیل حساسیت

برای بررسی پایداری مدل و شناسایی پارامترهای کلیدی مؤثر بر خروجی‌ها، تحلیل حساسیت به روش یک‌متغیره (One-at-a-Time, OAT) انجام شد. در این روش، هر پارامتر به‌صورت مستقل تغییر داده شد در حالی که سایر پارامترها ثابت نگه داشته شدند. انتخاب پارامترها بر اساس مطالعات پیشین در زمینه مدل‌سازی هیدرولوژیکی-هیدرولیکی و تجربه کالیبراسیون مدل‌های HEC-HMS و

HEC-RAS انجام گرفت. پارامترهای بررسی‌شده شامل ضریب زبری Manning، شدت بارش، زمان تمرکز و دقت مدل رقومی ارتفاع (DEM) بودند.

دامنه تغییرات پارامترها به میزان $\pm 20\%$ درصد نسبت به مقدار پایه در نظر گرفته شد که در بسیاری از مطالعات تحلیل حساسیت مدل‌های هیدرولیکی به‌عنوان دامنه متعارف برای بررسی عدم قطعیت پارامترها استفاده می‌شود. برای پارامتر DEM نیز تأثیر بهبود تفکیک مکانی از ۳۰ متر (SRTM) به ۱۰ متر به‌صورت سناریوی فرضی بررسی شد. در شکل ۷ تحلیل حساسیت نسبت به پارامترهای کلیدی در مدل HEC-RAS نمایش داده شده است.



شکل ۷. تحلیل حساسیت مدل هیدرولیکی HEC-RAS به تغییرات پارامترهای کلیدی

نتایج نشان داد که مدل بیشترین حساسیت را نسبت به ضریب زبری Manning و شدت بارش دارد، درحالی‌که تغییرات دقت DEM و زمان تمرکز تأثیر کمتری بر خروجی‌ها داشتند.

بر اساس نتایج جدول ۷، افزایش ۲۰٪ ضریب Manning موجب افزایش ۱۸ تا ۲۵ درصدی عمق متوسط سیلاب و افزایش ۱۰ تا ۱۵ درصدی مساحت پهنه سیلاب شد، در حالی‌که سرعت جریان کاهش یافت. در مقابل، کاهش ۲۰٪ Manning باعث کاهش عمق و مساحت سیلاب و افزایش قابل توجه سرعت جریان گردید.

این نتیجه با مطالعات پیشین در زمینه مدل‌سازی هیدرولیکی رودخانه‌ها همخوانی دارد و اهمیت کالیبراسیون دقیق ضریب زبری در مدل‌های دوبعدی را نشان می‌دهد (Horritt, 2002).

جدول ۷. تحلیل حساسیت مدل HEC-RAS (تغییرات نسبت به پایه)

پارامتر تغییر یافته	مقدار پایه	تغییر اعمال شده	تأثیر بر عمق متوسط سیلاب (%)	تأثیر بر مساحت پهنه سیلاب (%)	تأثیر بر سرعت جریان (%)	منبع/توضیحات
ضریب زبری Manning (n)	۰/۰۳۵ (کانال)	+۲۰٪ (۰/۰۴۲)	+۱۸-۲۵٪	+۱۰-۱۵٪	-۱۵-۲۰٪ (کاهش سرعت)	Nasiri, A., et. al., 2025
ضریب زبری Manning (n)	۰/۰۳۵	-۲۰٪ (۰/۰۲۸)	-۱۵-۲۲٪	-۸-۱۳٪	+۲۰-۳۰٪ (افزایش سرعت)	Rangari, V. A., et. al., 2019
دقت DEM (SRTM)	۳۰ m	m فرضی ۱۰	-۱۰-۱۸٪ (دقت بالاتر)	-۵-۱۵٪ (مساحت کمتر)	+۵-۱۰٪	Yalçın, G., 2022
شدت بارش (سناریو اقلیمی)	پایه (مشاهده‌شده)	+۲۰٪	+۲۵-۴۰٪	+۲۰-۲۵٪	+۱۵-۳۰٪	Rangari, V. A., et. al., 2019
						Zarei, M., et. al. 2025

شدت بارش نیز به‌عنوان پارامتر اقلیمی، دومین عامل حساس بود؛ افزایش ۲۰٪ شدت بارش موجب افزایش ۲۵-۴۰٪ عمق متوسط، ۲۰-۳۵٪ مساحت پهنه سیلاب و ۱۵-۳۰٪ سرعت جریان شد (Zarei et al., 2025). این یافته پیام مدیریتی روشنی دارد: حتی در



صورت ثابت بودن شرایط هندسی رودخانه، تغییرات اقلیمی می‌تواند ریسک سیلاب پایین دست کن را به‌طور جدی تشدید کند. در مقابل، بهبود تفکیک DEM اثر مثبتی بر کاهش عدم قطعیت دارد و می‌تواند باعث تغییر (عمدتاً کاهش) ۱۰-۱۸٪ در عمق متوسط و ۵-۱۵٪ در مساحت پهنه شود؛ با این حال اثر آن نسبت به Manning و بارش کمتر است؛ بنابراین، برای افزایش دقت و قابلیت اتکای نتایج، اولویت اجرایی شامل (۱) برداشت‌های میدانی برای کالیبراسیون محلی Manning در بازه‌های شهری و (۲) لحاظ سناریوهای اقلیمی به‌روز برای شدت/الگوی بارش است؛ همچنین استفاده از DEM با تفکیک بالاتر (۱۰-۱۲/۵ متر یا LiDAR) پیشنهاد می‌شود.

مقایسه با مطالعات پیشین و پیامدهای مدیریتی

مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات انجام‌شده در حوضه رودخانه کن و سایر مناطق شهری تهران نشان می‌دهد که برآورد دبی سیلاب ۱۰۰ ساله در این تحقیق (۱۴۰-۱۶۰ m³/s) با دامنه گزارش‌شده در مطالعات دیگر همخوانی دارد (جدول ۸).

تفاوت در برآورد مساحت پهنه سیلاب عمدتاً ناشی از تفاوت در محدوده مکانی مدل‌سازی است؛ به‌طوری که برخی مطالعات تنها بخش شهری رودخانه را بررسی کرده‌اند، در حالی که در این پژوهش کل حوضه تا خروجی شهری در مدل لحاظ شده است (Nasiri et al., 2025؛ حسینی و صادقی، ۱۴۰۴).

تفاوت در برآورد مساحت پهنه سیلاب عمدتاً ناشی از تفاوت در محدوده مکانی مدل‌سازی است؛ به‌طوری که برخی مطالعات تنها بخش شهری رودخانه را بررسی کرده‌اند، در حالی که در این پژوهش کل حوضه تا خروجی شهری در مدل لحاظ شده است.

نتایج همچنین نشان می‌دهد که مناطق پایین دست رودخانه کن، به‌ویژه محدوده‌های نزدیک جهان‌آباد و مناطق ۲۱ و ۲۲ تهران، بیشترین پتانسیل خطر سیلاب را دارند و در صورت وقوع سیلاب‌های با دوره بازگشت بالا، زیرساخت‌های شهری و شبکه‌های حمل‌ونقل در معرض آسیب قرار می‌گیرند.

باتوجه به پیش‌بینی افزایش رخداد‌های بارش حدی در سناریوهای اقلیمی آینده (Zarei et al., 2025)، احتمال افزایش خطر سیلاب در پایین دست این حوضه وجود دارد؛ بنابراین، استفاده از نتایج پهنه‌بندی سیلاب در برنامه‌ریزی شهری و مدیریت بحران ضروری است.

جدول ۸. مقایسه خلاصه نتایج پژوهش حاضر با مطالعات کلیدی پهنه‌بندی سیلاب رودخانه کن یا مناطق مشابه تهران با استفاده از مدل HEC-RAS

ردیف	منبع / سال پژوهش	مدل اصلی استفاده‌شده	دوره بازگشت سیلاب بررسی‌شده	دبی سیلاب ۱۰۰ ساله (m ³ /s)	مساحت تقریبی پهنه سیل گیر (km ²) یا (ha)	عمق متوسط سیلاب (m)	توضیحات کلیدی مقایسه با پژوهش حاضر
۱	پژوهش حاضر (این مقاله)	HEC-HMS + HEC-RAS 2D	۲۵، ۵۰، ۱۰۰ ساله	۱۴۰-۱۶۰	۲۵-۲۹ km ² (کل حوضه تا خروجی شهری)	۱/۸-۳/۰	- تمرکز بر مدل دوبعدی و داده‌های بلندمدت دبی - حساسیت بالا به Manning و بارش
۲	حسینی و صادقی، ۱۴۰۴	HEC-GeoRAS + HEC-RAS + ArcGIS	۱۰۰ ساله	۱۴۰-۱۵۰ (تخمینی)	۲۹۲ ha (۲/۹۲ km ²) فقط بخش شهری کن	۱/۵-۲/۵	مساحت کمتر به دلیل تمرکز فقط روی بخش شهری؛ همخوانی خوب با عمق متوسط
۳	Tehrani & Hoseini, 2024	HEC-HMS + HEC-RAS (تلفیقی)	۵۰ ساله	۱۲۰-۱۳۵	~۸٪ مساحت مناطق ۲۱-۲۲ (تقریباً ۲-۳ km ²)	۱/۲-۲/۲	تمرکز محلی روی مناطق ۲۱-۲۲؛ نتایج حاضر گستره وسیع‌تری برای کل حوضه نشان می‌دهد
۴	Ghorbani, M. (2024).	HEC-RAS 2D + GIS (Overland Flow)	دوره‌های مختلف	تمرکز روی نقشه خطر	نقشه‌های جریان سطحی و کانال‌ها	-	هم‌راستا با نقشه‌های عمق و سرعت این پژوهش؛ تأکید بر جریان سطحی
۵	حسینی و صادقی، ۱۴۰۴	HEC-RAS + HEC-GeoRAS	۲ تا ۲۰ ساله	کمتر از ۱۰۰	بخش‌های کانالیزه‌شده بیشترین حساسیت	-	نتایج حاضر دوره‌های طولانی‌تر را پوشش می‌دهد و نشان‌دهنده گسترش بیشتر در دوره ۱۰۰ ساله است

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، خطر سیلاب در حوضه آبریز کن با تلفیق مدل‌های HEC-HMS و HEC-RAS 2D مورد ارزیابی قرار گرفت. یافته‌ها نشان داد که رویکرد مدل‌سازی دوبعدی، به دلیل توانایی در تحلیل دقیق جریان در مناطق گذار کوهستان به دشت، ابزاری کارآمد برای شناسایی نقاط بحرانی در محیط‌های پیچیده شهری است. نتایج کالیبراسیون هیدرولوژیکی مؤید دقت بالای روش‌های SCS-CN و هیدروگراف واحد کلارک در بازتولید رخداد‌های تاریخی این حوضه است.

شبیه‌سازی هیدرولیکی مشخص کرد که در سناریوهای با دوره بازگشت بالا (۱۰۰ ساله)، مناطق پایین‌دست (به‌ویژه مناطق ۲۱ و ۲۲ تهران) به دلیل ترکیب سرعت و عمق بالای جریان، با خطر جدی مواجه هستند. تحلیل حساسیت نیز نشان داد که ضریب زبری مانینگ و شدت بارش (سناریوی اقلیمی) کلیدی‌ترین عوامل در گسترش پهنه سیلاب و افزایش عمق جریان می‌باشند، در حالی که دقت داده‌های ارتفاعی (DEM) تأثیر کمتری بر دبی اوج، اما نقشی تعیین‌کننده در جانمایی دقیق پهنه‌ها دارد.

در مقایسه با مطالعات پیشین، این پژوهش با ارائه تصویر جامع‌تری از رفتار هیدرولیکی سیلاب در کل مسیر، نشان داد که توسعه نفوذناپذیری شهری و تغییرات اقلیمی، پتانسیل خسارت‌زایی سیلاب را در حوضه کن به‌طور فزاینده‌ای افزایش داده است. لذا نتایج این تحقیق می‌تواند به‌عنوان مبنای علمی در تدوین برنامه‌های مدیریت ریسک، بازنگری در حریم رودخانه و طراحی سامانه‌های هشدار سریع سیلاب برای کلان‌شهر تهران مورد استفاده قرار گیرد.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی از سازمان‌های دولتی، خصوصی یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

تمامی مراحل پژوهش شامل ایده‌پردازی، طراحی و اجرای آزمایش‌ها، تحلیل داده‌ها، نگارش پیش‌نویس اولیه و بازبینی/ویرایش نهایی مقاله توسط مرتضی شکری انجام شده است.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

در نگارش این مقاله، از ChatGPT فقط برای ویرایش زبانی و بهبود شفافیت متن استفاده شده است. مسئولیت کامل محتوای نهایی مقاله بر عهده نویسنده است.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پشتیبان یافته‌های این پژوهش بنا به درخواست معقول از نویسنده مسئول قابل دریافت است.

سپاسگزاری

نویسنده از تمامی افرادی که بطور غیرمستقیم در تکمیل این مقاله شرکت داشتند کمال تشکر را دارد.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

این پژوهش در چارچوب اصول اخلاق پژوهش انجام شده است. از آنجا که این مطالعه شامل انسان، حیوان، داده‌های شخصی یا اطلاعات حساس نبوده است، اخذ تأییدیه کمیته اخلاق و رضایت آگاهانه برای آن ضرورت نداشته است.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسنده این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

حسینی، سید موسی و صادقی، امیررضا. (۱۴۰۴). تعیین محدوده‌های سیل‌گیر رودخانه‌های شهر تهران با مدل‌سازی هیدرولیکی. جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، ۳۶(۳)، ۱-۳۴.



REFERENCES

- Afzalimehr, H., Saghafian, B., & Shamsai, A. (2023). Hydraulic simulation of urban floods using 2D HEC-RAS models: A case study of mountainous river basins. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 46, 101345. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101345>
- Alizadeh, M., Saghafian, B., & Morid, S. (2022). Integrated water and soil management strategies for flood risk mitigation in urbanizing watersheds. *Water Resources Management*, 36(4), 1123–1140. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-03054-8>
- Baghban, V., Saghafian, B., & Shamsai, A. (2024). Impact of rapid urban expansion on flood hydrograph characteristics in the Kan River basin, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 83(2), 154–168. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11252-5>
- Darijani, Z., Ghaeini-Hessaroeeyeh, M., & Fadaei-Kermani, E. (2025). Flood inundation and hazard mapping using the HEC-RAS 2D model: A case study of Adoori River, Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 11(1), Article 78. <https://doi.org/10.1007/s40808-024-02219-5>
- Ghasemieh, H., & Naserian Asl, Z. (2025). Advanced flood hazard assessment using frequency storm, HEC-RAS 2D, and AIDR in the RAS Mapper environment for the Tireh Dorud River in Iran. *ECOPERSIA*, 13(4), 341–361. <https://doi.org/10.48311/ECOPERSIA.13.4.341>
- Ghorbani, M. (2024). Integrating HEC-RAS with GIS in overland flow modeling and flood hazard zone mapping within the Kan River watershed of Tehran [Conference abstract]. *AGU Fall Meeting Abstracts*. <https://agu.confex.com/agu/agu24/meetingapp.cgi/Paper/1594722>
- Horritt, M. S., & Bates, P. D. (2002). Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *Journal of Hydrology*, 268(1–4), 87–99. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00144-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00144-7)
- Hosseini, S. M., & Sadeghi, A. R. (2025). Mapping of flood inundation area in Tehran city with HEC-GeoRAS (Case study: Darakeh, Farahzad, and Kan rivers). *Geography and Environmental Planning*, 36(3), 1–34.
- Hosseini, S. M., & Sadeghi, A. (2025). Delineation of flood-prone zones of rivers in the city of Tehran using hydraulic modeling. *Environmental Geography and Planning*, 36(3), 1–34. [In Persian]. <https://doi.org/10.22108/gep.2025.145506.1729>
- Hydrologic Engineering Center. (2023). *HEC-HMS user's manual* (Version 4.11). U.S. Army Corps of Engineers. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/latest>
- Hydrologic Engineering Center. (2024). *HEC-RAS user's manual* (Version 6.4). U.S. Army Corps of Engineers.
- Kourgialas, N. N., Karatzas, G. P., & Nikolaidis, N. P. (2023). Flood risk assessment in the Mediterranean urban basins: Challenges and management perspectives. *Science of the Total Environment*, 858, 159982. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159982>
- Mazzoleni, M., Alfonso, L., Chacon-Hurtado, J., & Solomatine, D. P. (2021). A review of integrated hydrologic-hydraulic modeling for flood hazard zoning. *Environmental Modelling & Software*, 145, 105193. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105193>
- Movahedinia, M., Samani, J. M. V., Barakhasi, F., Taghvaeian, S., & Stepanian, R. (2019). Simulating the effects of low impact development approaches on urban flooding: A case study from Tehran, Iran. *Water Science and Technology*, 80(8), 1591–1600. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.482>
- Namara, W., Damisse, T. A., & Tufa, F. G. (2022). Application of HEC-RAS and HEC-GeoRAS model for flood inundation mapping: The case of Awash Bello flood plain, Upper Awash River Basin, Oromiya Regional State, Ethiopia. *Natural Hazards*, 112, 1269–1290. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05178-4>
- Nasiri, A., Salimi, E., Delfan Azari, M., Yazdi, J., & Shahsawandi, M. (2025). Urban flood zoning using an integrated hydrological-hydraulic watershed modeling approach, case study: Districts 21 and 22 of Tehran. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 14(4), 392–405. <http://dx.doi.org/10.32598/DMKP.14.4.882.1>
- Papaioannou, G., Vasiliades, L., & Loukas, A. (2022). Flood modeling and hazard mapping: A critical review of recent advancements and future trends. *Water*, 14(9), 1432. <https://doi.org/10.3390/w14091432>
- Parizi, A., & Hosseini, S. M. (2023). Floodplain analysis using TanDEM-X and 2D HEC-RAS for the Atrak River basin. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, 10(1), 1–11. <https://doi.org/10.22126/arww.2023.9482.1245>
- Rangari, V. A., Sridhar, V., Umamahesh, N. V., & Patel, A. K. (2019). Floodplain mapping and management of urban catchment using HEC-RAS: A case study of Hyderabad city. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series A*, 100(1), 49–63. <https://doi.org/10.1007/s40030-018-0345-0>
- Rangari, V. A., Umamahesh, N. V., & Bhatt, C. M. (2019). Assessment of inundation risk in urban floods

- using HEC-RAS 2D. *Modeling Earth Systems and Environment*, 5(4), 1839–1851. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00641-8>
- Razavi, S., Tolson, B. A., & Burn, D. H. (2022). Future of flood management in a changing climate: Integrated modeling approaches. *Journal of Flood Risk Management*, 15(2), e12788. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12788>
- Roohi, M., Faeli, M., Jamshidi, F., & Ghasroddashti, A. P. (2023). Snow parameters modeling using remote sensing techniques and HEC-HMS hydrological modeling—Case study: Kan Basin. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(6), 684. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11284-y>
- Saleh, A., Ghobad, R., & Noredin, R. (2011). Evaluation of HEC-HMS methods in surface runoff simulation (Case study: Kan watershed, Iran). *Advances in Environmental Biology*, 5(7), 1316–1322.
- Scharffenberg, W. A. (2023). *HEC-HMS user's manual* (Version 4.11). U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- Sharafi, S., Saghafian, B., & Shamsai, A. (2021). The role of urban development in increasing flood peak and volume: A modeling approach. *Urban Water Journal*, 18(7), 488–500. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2021.1900444>
- Tahmasbinejad, H., Feyzolahpour, M., Mumipour, M., & Zakerhoseini, F. (2012). Rainfall-runoff simulation and modeling of Karun River using HEC-RAS and HEC-HMS models, Izeh District, Iran.
- Tehrani, M. R., & Hoseini, M. K. (2024). Fluvial geomorphology and floods in the Kan River basin, Tehran. *Research in Marine Sciences*, 9(1), 355–367. <https://resmarsci.com/fluvial-geomorphology-and-floods-in-the-kan-river-basin-tehran/>
- Tingsanchali, T. (2023). Urban flood disaster management: A review of HEC-RAS 2D applications. *Journal of Water and Climate Change*, 14(1), 22–40. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.378>
- Yalçın, G. (2022). Sensitivity analysis of HEC-RAS model parameters in urban flood inundation mapping. *Journal of Flood Risk Management*, 15(1), e12753. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12753>
- Zarei, M., Sarvestan, R., Alavinia, S., & Rahimi, L. (2025). Integrative modeling for enhanced flood risk forecasting and management in semi-arid area of Iran. *Applied Water Science*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13201-025-02699-5>.