



<https://gеп.ui.ac.ir/?lang=en>
Geography and Environmental Planning
E-ISSN: 2252- 0910
Document Type: Research Paper
Vol. 34, Issue 2, No.90, Summer 2023, pp. 1- 6
Received: 16/07/2022 Accepted: 18/12/2022

Estimating the Accuracy of the TanDEM-X Digital Elevation Model in the Simulation of Flood Hydraulic Characteristics (Case Study: Atrak River Basin)

Esmaeel Parizi¹, Seiyed Mossa Hosseini^{2*}

1- Post-doctoral Researcher, Department of Physical Geography, University of Tehran, Tehran, Iran
parizi555@ut.ac.ir

2- Associate Professor, Department of Physical Geography, University of Tehran, Tehran, Iran
smhosseini@ut.ac.ir

Abstract

Hydraulic modelling of floods plays an important role in flood management and the related risk reduction. The case study in this research was a 20-km reach of the Atrak River in the upstream of Maraveh Tappeh City, which is one of the most hazardous regions of Iran from flood viewpoint. The aim of this research was to estimate the accuracy of the TanDEM-X digital elevation model with a resolution of 12 meters in simulating flood hydraulic characteristics. To achieve this aim, the HEC-RAS 2D model was used in steady conditions to simulate floods with a return period of 5, 10, 25, 50, 100, and 200 years. The results indicated that the inundation area varied in the range of 4.40 km²(return period of 5 years) and 5.93 km² (return period of 200 years). In the return period of 200 years, the mean flow depth and velocity increased by 67.9 and 49.5% compared to the return period of 5 years, respectively. The sensitivity test also indicated that the maximum sensitivities of the inundation area, mean flow depth, and mean flow velocity to Manning's coefficient were 4.65, 4.84, and -12.23%, respectively. The validation results of the HEC-RAS 2D model by using the inundation area extracted from Landsat-8 OLI satellite images for a return period of 10 years showed that the fit percentage indicator was 86%. The results of this study indicated an initial effort for hydraulic modelling of flood characteristics with the TDX elevation digital model.

Keywords: HEC-RAS 2D model, Frequency analysis, Hydraulic modelling, Landsat-8 satellite images

*Corresponding Author

Parizi, E. & Hosseini, S. M. (2023). Estimation of Tandem-X Digital Elevation Model precision in Simulation of Flood Hydraulic Characteristics (Case Study: Atrak River Basin). *Geography and Environmental Planning*, 34 (2), 1 -6.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



10.22108/GEP.2022.134293.1533



20.1001.1.20085362.1402.34.2.5.2

1. Introduction

Floods are among the most common and destructive natural disasters worldwide, imposing various adverse effects in different countries (Bui et al., 2018). These include fatalities, damage to infrastructures, people displacement, and environmental damages (Rahmati et al., 2020). Over the last decade, floods have affected millions of people worldwide and caused a damage of more than US\$ 400 billion (Aerts, 2020). In Asia, more than 90% of human casualties resulting from natural disasters stem from flood events (Smith, 2003). Among several countries in Asia, Iran faces destructive floods each year due to its vast extent and heavy precipitations in most basins (Jahangir et al., 2019). Over the past 60 years, more than 3,700 flood events have been reported in Iran, while during the last decade, the damage caused by flooding has increased by 250% (Norouzi and Taslimi, 2012). Iran has recently experienced immense floods because of poor watershed management and climate change (Pouyan et al., 2021). In 2019, flooding events affected 25 out of 31 provinces, resulting in more than 77 human casualties and damage of US\$ 2.2 billion (Khosravi et al., 2018). Even though we do not have an accurate answer to how climate change may impact flooding events, such as the ones that occurred in 2019 (Sherpa and Shirzaei, 2021), a recent study has suggested that Iran will probably experience a higher frequency of floods in the future (Vaghefi et al., 2019). In addition, the growth of urbanization and increasing deforestation will make the condition worse (Arabameri et al., 2019).

2. Methodology

In the current study, the long-term (1977-2017) data of maximum discharge in the hydrometric station of Qazanqaya were used for the frequency analysis of Flood Peak Discharge (FPD). The stationarity in the time series of annual maximum peak discharge was checked before fitting the distribution. For computing FPD in the various return periods for the hydrometric station of Qazanqaya, the annual maximum discharge records were fitted via EasyFit software. Three goodness-of-fit criteria, including Anderson-Darling, Kolmogorov-Smirnov, and Chi-square, were adopted to select the best-fitted distribution. Finally, flood discharges with 5-, 10-, 25-, 50-, 100-, and 200-yr return periods were estimated for the hydrometric station based on the corresponding best-fitted distribution. This study simulated 2D steady flow in a return period of 5-200 years using HEC-RAS 5.0 software (U.S. Army Corps of Engineering, 2016). Due to the complex numerical schemes, 2D diffusive wave equations could provide greater stability and faster calculation times (Li et al., 2020) and were thus used in this study to simulate 2D steady flows in a return period of 5 to 200 years. The peak flow discharges in the return periods of 5-200 years estimated from frequency analysis in the hydrometric station of Qazanqaya were considered as the upstream boundary conditions in the hydraulic model. Furthermore, the downstream boundary conditions were considered as normal depth conditions obtained based on the energy slope. Manning's roughness coefficients of the main channel and floodplain were estimated based on the land cover map and USGS method (Arcement and Schneider, 1989). In the previous studies, modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) has been successfully done to map the flooding areas (Li et al., 2018). Hence, based on the date of the flood events, which were recorded in the hydrometric station of Qazanqaya, the flooded area was extracted from Landsat-8 OLI images. On the other hand, the fit percentage indicator proved to be useful for the validation of flood inundation models (Khojeh et al., 2022). A value of closer to 100% could denote a better agreement in flood extent modeling by TDX Digital Elevation Model.

3. Discussion

The results of hydraulic modelling indicated that the inundation area varied in the range of 4.40 square kilometers (return period of 5 years) and 5.93 square kilometers (return period of 200 years). On the other hand, in the return period of 200 years, the mean flow depth and velocity increased by 67.9 and 49.5% compared to the return period of 5 years, respectively. The validation results of the HEC-RAS 2D model by using the inundation area extracted from Landsat-8 OLI satellite images for a 10-yr return period indicated that the fit percentage indicator was 86%, indicating a high agreement of flood modeling results based on the TDX digital elevation model.

4. Conclusion

The results of the frequency analysis and estimation of flood peak discharges with a return period of 5 to 200 years in the Atrak River Basin showed that this basin with peak discharges between 487.8 m³/s (5-year flood) and 1605.6 m³/s (200-year flood) could be considered as one of the most dangerous basins in Iran, which could cause a lot of human and financial losses, especially for floods with a high return period. Although HEC-RAS 2D modeling based on the TDX digital elevation model with a resolution of 12 m indicated that this digital elevation model with an accuracy of 86% (14% error) was probably better than digital elevation models, such as SRTM, ASTER, and ALOS, with a resolution of 30 m, its validation for other flood-prone areas of Iran was necessary.

References

- Aerts, J. C. J. H. (2020). Integrating agent-based approaches with flood risk models: A review and perspective. *Water Security*, 11, 100076.
- Arabameri, A., Rezaei, K., Cerdà, A., Conoscenti, C., & Kalantari, Z. (2019). A comparison of statistical methods and multi-criteria decision-making to map flood hazard susceptibility in Northern Iran. *Science of the Total Environment*, 660, 443-458.
- Arcement, G. J., & Schneider, V. R. (1989). *Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains*. Available from the US Geological Survey, Books, and Open-File Reports Section, Box 25425, Federal Center, Denver, CO 80225-0425, Water-Supply Paper, 2339, 1989, p. 38, Fig. 22, Tab 4, Ref. 23.
- Bales, J. D., & Wagner, C. R. (2009). Sources of uncertainty in flood inundation maps. *Journal of Flood Risk Management*, 2(2), 139-147.
- Brunner, G.W. (2016). *HEC-RAS River Analysis System, 2D Modeling User's Manual, Version 5.0*. Davis, CA.
- Bui, D. T., Panahi, M., Shahabi, H., Singh, V. P., Shirzadi, A., Chapi, K., & Ahmad, B. B. (2018). Novel hybrid evolutionary algorithms for spatial prediction of floods. *Scientific Reports*, 8(1), 1-14.
- Costabile, P., Costanzo, C., Ferraro, D., Macchione, F., & Petaccia, G. (2020). Performances of the new HEC-RAS, Version 5 for 2-D hydrodynamic-based rainfall-runoff simulations at basin scale: Comparison with a state-of-the art model. *Water*, 12(9), 2326.
- Dong, Y., Zhao, J., Floricioiu, D., Krieger, L., Fritz, T., & Eineder, M. (2021). High-resolution topography of the Antarctic Peninsula combining the TanDEM-X DEM and Reference Elevation Model of Antarctica (REMA) mosaic. *The Cryosphere*, 15(9), 4421-4443.
- Falter, D., Vorogushyn, S., Lhomme, J., Apel, H., Gouldby, B., & Merz, B. (2013). Hydraulic model evaluation for large-scale flood risk assessments. *Hydrological Processes*, 27(9), 1331-1340.

- Golshan, M., Jahanshahi, A., & Afzali, A. (2016). Flood hazard zoning using HEC-RAS in GIS environment and impact of manning roughness coefficient changes on flood zones in Semi-arid climate. *Desert*, 21(1), 24-34.
- Grohmann, C. H. (2018). Evaluation of TanDEM-X DEMs on selected Brazilian sites: Comparison with SRTM, ASTER GDEM, and ALOS AW3D30. *Remote Sensing of Environment*, 212, 121-133.
- Gu, X., Zhang, Q., Singh, V. P., & Shi, P. (2017). Changes in magnitude and frequency of heavy precipitation across China and its potential links to summer temperature. *Journal of Hydrology*, 547, 718-731.
- Hamed, K. H. (2008). Trend detection in hydrologic data: The Mann–Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of hydrology*, 349(3-4), 350-363.
- Jahangir, M. H., Reineh, S. M. M., & Abolghasemi, M. (2019). Spatial predication of flood zonation mapping in Kan River Basin, Iran, using artificial neural network algorithm. *Weather and Climate Extremes*, 25, 100215.
- Janizadeh, S., Pal, S. C., Saha, A., Chowdhuri, I., Ahmadi, K., Mirzaei, S., & Tiefenbacher, J. P. (2021). Mapping the spatial and temporal variability of flood hazard affected by climate and land-use changes in the future. *Journal of Environmental Management*, 298, 113551.
- Karamouz, M., & Mahani, F. F. (2021). DEM uncertainty based coastal flood inundation modeling considering water quality impacts. *Water Resources Management*, 35(10), 3083-3103.
- Khojeh, S., Ataie-Ashtiani, B., & Hosseini, S. M. (2022). Effect of DEM resolution in flood modeling: A case study of Gorganrood River, Northeastern Iran. *Natural Hazards*, 1-21.
- Khosravi, K., Pham, B. T., Chapi, K., Shirzadi, A., Shahabi, H., Revhaug, I., & Bui, D. T. (2018). A comparative assessment of decision tree algorithms for flash flood susceptibility modeling at Haraz Watershed, northern Iran. *Science of the Total Environment*, 627, 744-755.
- Leitao, J. P., Boonya-Aroonnet, S., Prodanović, D., & Maksimović, Č. (2009). The influence of digital elevation model resolution on overland flow networks for modeling urban pluvial flooding. *Water Science and Technology*, 60(12), 3137-3149.
- Li, J., Yang, X., Maffei, C., Tooth, S., & Yao, G. (2018). Applying independent component analysis on Sentinel-2 imagery to characterize geomorphological responses to an extreme flood event near the non-vegetated Río Colorado terminus, Salar de Uyuni, Bolivia. *Remote Sensing*, 10(5), 725.
- Li, J., Zhao, Y., Bates, P., Neal, J., Tooth, S., Hawker, L., & Maffei, C. (2020). Digital Elevation Models for topographic characterization and flood flow modeling along low-gradient, terminal dryland rivers: A comparison of spaceborne datasets for the Río Colorado, Bolivia. *Journal of Hydrology*, 591, 125617.
- Modarres, R., Sarhadi, A., & Burn, D. H. (2016). Changes of extreme drought and flood events in Iran. *Global and Planetary Change*, 144, 67-81.
- Muench, R., Cherrington, E., Griffin, R., & Mamane, B. (2022). Assessment of Open Access Global Elevation Model Errors Impact on Flood Extents in Southern Niger. *Frontiers in Environmental Science*, 547.
- Muthusamy, M., Casado, M. R., Butler, D., & Leinster, P. (2021). Understanding the effects of Digital Elevation Model resolution in urban fluvial flood modeling. *Journal of Hydrology*, 596, 126088.
- Norouzi, G., & Taslimi, M. (2012). The impact of flood damages on the production of Iran's Agricultural Sector. *Middle East J Sci. Res.*, 12, 921-926.

- Papaioannou, G., Loukas, A., Vasiliades, L., & Aronica, G. T. (2016). Flood inundation mapping sensitivity to riverine spatial resolution and modeling approach. *Natural Hazards*, 83(1), 117-132.
- Phillips, J. D. (1988). Incorporating fluvial change in hydrologic simulations: A case study in coastal North Carolina. *Applied Geography*, 8(1), 25-36.
- Pinos, J., & Timbe, L. (2019). Performance assessment of two-dimensional hydraulic models for generation of flood inundation maps in mountain river basins. *Water Science and Engineering*, 12(1), 11-18.
- Pouyan, S., Pourghasemi, H. R., Bordbar, M., Rahmanian, S., & Clague, J. J. (2021). A multi-hazard map-based flooding, gully erosion, forest fires, and earthquakes in Iran. *Scientific Reports*, 11(1), 1-19.
- Rahmati, O., Darabi, H., Panahi, M., Kalantari, Z., Naghibi, S. A., Ferreira, C. S. S., & Haghghi, A. T. (2020). Development of novel hybridized models for urban flood susceptibility mapping. *Scientific Reports*, 10(1), 1-19.
- 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.
- Rizzoli, P., Martone, M., Gonzalez, C., Wecklich, C., Tridon, D. B., Bräutigam, B., & Moreira, A. (2017). Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 132, 119-139.
- Saksena, S., & Merwade, V. (2015). Incorporating the effect of DEM resolution and accuracy for improved flood inundation mapping. *Journal of Hydrology*, 530, 180-194.
- Sheikh, V. (2014). Analysis of hydroclimatic trends in the Atrak River Basin, North Khorasan, Iran (1975–2008). *Environmental Resources Research*, 2(1), 1-14.
- Sherpa, S. F., & Shirzaei, M. (2022). Country-wide flood exposure analysis using Sentinel-1 synthetic aperture radar data: Case study of 2019 Iran flood. *Journal of Flood Risk Management*, 15(1), e12770.
- Shi, X., Qin, T., Nie, H., Weng, B., & He, S. (2019). Changes in major global river discharges directed into the ocean. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(8), 1469.
- Smith, K. (2003). *Environmental hazards: Assessing risk and reducing disaster*. Routledge.
- Srinivas, V. V., Tripathi, S., Rao, A. R., & Govindaraju, R. S. (2008). Regional flood frequency analysis by combining self-organizing feature map and fuzzy clustering. *Journal of Hydrology*, 348(1-2), 148-166.
- Tamiru, H., & Wagari, M. (2022). Machine-learning and HEC-RAS integrated models for flood inundation mapping in Baro River Basin, Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(2), 2291-2303.
- Tayefi, V., Lane, S. N., Hardy, R. J., & Yu, D. (2007). A comparison of one- and two-dimensional approaches to modeling flood inundation over complex upland floodplains. *Hydrological Processes: An International Journal*, 21(23), 3190-3202.
- U.S. Army Corps of Engineering. (2016). *HEC-RAS 5.0 Hydraulic Reference Manual*. U.S. Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, USA, CPD-68.
- Utlu, M., & Özdemir, H. (2020). How much spatial resolution do we need to model a local flood event? Benchmark testing based on UAV data from Biga River (Turkey). *Arabian Journal of Geosciences*, 13(24), 1-14.

- Vaghefi, S. A., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H., & Abbaspour, K. C. (2019). The future of extreme climate in Iran. *Scientific Reports*, 9(1), 1-11.
- Wessel, B. (2016). *TanDEM-X Ground Segment-DEM Products Specification Document*. German Space Center.
- Wessel, B., Huber, M., Wohlfart, C., Marschalk, U., Kosmann, D., & Roth, A. (2018). Accuracy assessment of the global TanDEM-X Digital Elevation Model with GPS data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 139, 171-182.
- Xu, H. (2006). Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025-3033.
- Xu, K., Fang, J., Fang, Y., Sun, Q., Wu, C., & Liu, M. (2021). The Importance of Digital Elevation Model Selection in Flood Simulation and A Proposed Method to Reduce DEM Errors: A Case Study in Shanghai. *International Journal of Disaster Risk Science*, 12(6), 890-902.
- Zhang, K., Gann, D., Ross, M., Biswas, H., Li, Y., & Rhome, J. (2019a). Comparison of TanDEM-X DEM with LiDAR data for accuracy assessment in a coastal urban area. *Remote Sensing*, 11(7), 876.
- Zhang, K., Gann, D., Ross, M., Robertson, Q., Sarmiento, J., Santana, S., & Fritz, C. (2019b). Accuracy assessment of ASTER, SRTM, ALOS, and TDX DEMs for Hispaniola and implications for mapping vulnerability to coastal flooding. *Remote Sensing of Environment*, 225, 290-306.





جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی

سال ۳۴، پیاپی ۹۰، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، ص ۱۳۴-۱۱۳

وصول: ۱۴۰۱/۴/۲۵ پذیرش: ۱۴۰۱/۹/۲۷

مقاله پژوهشی

برآورد میزان دقت مدل رقومی ارتفاعی TanDEM-X در شبیه‌سازی مشخصات هیدرولیکی سیلاب (مطالعه موردی: حوضه رودخانه اترک)

اسماعیل پاریزی، پژوهشگر پسادکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران، تهران، ایران

parizi555@ut.ac.ir

سید موسی حسینی*، دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران، تهران، ایران

smhosseini@ut.ac.ir

چکیده

مدل‌سازی هیدرولیکی سیلاب، نقش مهمی در مدیریت بهینه سیل و کاهش خطرات مرتبط دارد. منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، بازه ۲۰ کیلومتری رودخانه اترک در بالادست شهر مراوه‌تپه است که یکی از مخاطره‌آمیزترین مناطق ایران از منظر سیلاب رودخانه‌ای می‌باشد. هدف از پژوهش حاضر، برآورد میزان دقت مدل رقومی ارتفاعی TanDEM-X با قدرت تفکیک ۱۲ متر در شبیه‌سازی مشخصات هیدرولیکی سیلاب است. برای رسیدن به این هدف، مدل دوبعدی HEC-RAS در شرایط پایدار برای شبیه‌سازی سیلاب با دوره بازگشت ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله استفاده شد؛ همچنین از تصاویر ماهواره‌ای Landsat-8 OLI برای استخراج پهنه سیلابی و اعتبارسنجی مدل هیدرولیکی بهره گرفته شد. نتایج مدل هیدرولیکی نشان‌دهنده آن است که وسعت پهنه سیلابی در محدوده ۴/۴۰ (دوره بازگشت ۵ سال) تا ۵/۹۳ (دوره بازگشت ۲۰۰ سال) متغیر است. از سوی دیگر، در دوره بازگشت ۲۰۰ سال، میانگین عمق ۶۷/۹ درصد و سرعت جریان ۴۹/۵ درصد در مقایسه با دوره بازگشت ۵ سال افزایش می‌یابد. تحلیل حساسیت ضریب مانینگ مؤید آن است که بیشترین حساسیت وسعت پهنه سیلابی، میانگین عمق و سرعت جریان نسبت به ضریب مانینگ ۴/۶۵، ۴/۸۴ و ۱۲/۲۳- درصد است. نتایج اعتبارسنجی مدل دوبعدی HEC-RAS با استفاده از پهنه سیلابی استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat-8 OLI برای دوره بازگشت ۱۰ سال نشان از آن دارد که شاخص درصد تناسب ۸۶ است. نتایج این پژوهش به‌عنوان نقطه عطفی برای مدل‌سازی هیدرولیکی مشخصات سیلاب با مدل رقومی ارتفاعی TDX در سایر مناطق ایران کمک می‌کند.

واژه‌های کلیدی: مدل دوبعدی HEC-RAS، تحلیل فراوانی، مدل‌سازی هیدرولیکی، تصاویر ماهواره‌ای Landsat-8

*نویسنده مسئول

پاریزی، اسماعیل، حسینی، سید موسی. (۱۴۰۱). برآورد میزان دقت مدل رقومی ارتفاعی TanDEM-X در شبیه‌سازی مشخصات هیدرولیکی سیلاب (مطالعه موردی: حوضه رودخانه اترک). جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۳۴ (۲)، ۱۳۴-۱۱۳.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



10.22108/GEP.2022.134293.1533



20.1001.1.20085362.1402.34.2.5.2

مقدمه

سیلاب، یکی از شایع‌ترین و مخرب‌ترین بلایای طبیعی در سراسر جهان است که اثرات نامطلوب متنوعی را در کشورهای مختلف تحمیل می‌کند (Bui et al., 2018). این موارد شامل تلفات، آسیب به زیرساخت‌ها، جابه‌جایی افراد و آسیب‌های زیست‌محیطی است (Rahmati et al., 2020). طی دهه گذشته، سیل میلیون‌ها نفر را در سراسر جهان تحت تأثیر قرار داده و بیش از ۴۰۰ میلیارد دلار خسارت وارد کرده است (Aerts, 2020). در آسیا، بیش از ۹۰ درصد از تلفات انسانی ایجادشده از بلایای طبیعی ناشی از حوادث سیل است (Smith, 2003). میان چندین کشور آسیایی، ایران به دلیل گستردگی وسیع حوضه‌ها و بارش سنگین، هر ساله با سیلاب‌های مخرب مواجه می‌شود (Jahangir et al., 2019). در طول ۶۰ سال گذشته، بیش از ۳۷۰۰ رویداد سیل در ایران گزارش شده است؛ در حالی که طی دهه گذشته، خسارات ناشی از سیل ۲۵۰ درصد افزایش یافته است (Norouzi & Taslimi, 2012). ایران به‌تازگی به دلیل تأثیر مدیریت ضعیف حوضه آبریز و تغییرات اقلیمی، سیل‌های عظیمی را تجربه کرده است (Pouyan et al., 2021). در سال 2019، حوادث سیل، ۲۵ استان را از ۳۱ استان تحت تأثیر قرار داد که به بیش از ۷۷ تلفات انسانی و خسارت ۲/۲ میلیارد دلاری منجر شد (Khosravi et al., 2018). اگرچه پاسخ دقیقی برای نحوه تأثیر تغییرات آب‌وهوایی روی رویدادهای سیل نیست؛ مانند آنچه در سال 2019 رخ داد (Sherpa & Shirzaei, 2021). مطالعه اخیر نشان داده است که ایران به احتمال فراوانی بیشتری را از سیل در آینده تجربه خواهد کرد (Vaghefi et al., 2019). علاوه بر این، رشد شهرنشینی و افزایش جنگل‌زدایی وضعیت را بدتر می‌کند (Arabameri et al., 2019).

سیل با چندین پارامتر محیطی ایجاد می‌شود. این پارامترها شامل هواشناسی، ژئومورفولوژی و هیدرولوژیکی است و می‌تواند با فعالیت‌های انسانی تشدید شود (Janizadeh et al., 2021). در این زمینه، مدل‌سازی دقیق سیل‌ها نقش مهمی در مدیریت بهتر و مناسب سیل و کاهش خطرات مرتبط دارد (Muthusamy et al., 2021). پیشرفت‌های اخیر در قدرت محاسباتی کارآمد، روش‌های جدید نقشه‌برداری توپوگرافی زمین و تکنیک‌های عددی قابل‌اعتمادتر، مدل‌سازی سیل را به‌طور چشمگیری افزایش داده است (Costabile et al., 2020). مدل‌های عددی زیادی در دسترس هستند که قابلیت‌های متفاوتی برای مدل‌سازی سیلاب دارند. یکی از محبوب‌ترین مدل‌ها، HEC-RAS است که با موفقیت برای مطالعات سیلاب استفاده شده است (Golshan et al., 2016)؛ با این حال یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های مدل HEC-RAS جریان یک بعدی بود (Tayefi et al., 2007). اگرچه مدل یک بعدی فرآیندهای درون کانال رودخانه را شبیه‌سازی می‌کند، محدودیت‌های متعددی را برای تجزیه و تحلیل سرریز^۱ ارائه می‌دهد (Falter et al., 2013). به‌منظور اجتناب از این محدودیت‌ها و نبود قطعیت‌ها، پژوهش‌های اخیر استفاده از مدل‌های دوبعدی را با سطوح زیادی از جزئیات پیشنهاد می‌کنند. در سال 2014 نسخه HEC-RAS 5 با قابلیت‌های دو بعدی معرفی و عرضه شد (Brunner, 2016). بسیاری از مطالعات قابلیت خوب HEC-RAS نسخه 5 را برای مدل‌سازی و مدیریت خطر سیل بیان کردند (Costabile et al., 2020).

نقشه‌های پهنه سیل اغلب برای شناسایی مناطق سیل‌خیز در سراسر جهان استفاده می‌شود (Karamouz & Mahani, 2021). اگرچه این نقشه‌ها مناطق مستعد سیل را براساس داده‌های فنی موجود شناسایی می‌کند، صرف‌نظر از نحوه ایجاد نقشه‌ها، سطوح مختلفی از نبود قطعیت دارد (Bales and Wagner, 2009). منابع این نبود قطعیت‌ها شامل داده‌های توپوگرافی، انتخاب مدل، پارامترهای مدل، مفروضات مدل و اندازه‌گیری‌های دبی رودخانه است (Saksena & Merwade, 2015). میان این منابع مختلف، داده‌های توپوگرافی یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر دقت نقشه‌های طغیان سیل است. آن‌ها در قالب مدل‌های رقومی ارتفاع (DEMs) اغلب برای ایجاد یک مدل هیدرولیکی و شبیه‌سازی سیلاب استفاده می‌شوند (Saksena & Merwade, 2015). دقت مدل هیدرولیکی برای ترسیم نقشه طغیان سیل اغلب به دقت DEM بستگی دارد که به‌طور معمول از تصاویر ماهواره‌ای استخراج می‌شود (Papaioannou et al., 2016). در واقع، DEM‌ها برای مدل‌سازی طغیان سیل بسیار مهم هستند؛ زیرا اطلاعات سطح زمین را نشان می‌دهند که آب را در طول یک رویداد سیل هدایت می‌کنند (Utlu & Özdemir, 2020). DEM‌های با وضوح زیاد به‌طور دقیق مسیر سیل، سرعت و عمق جریان را مدل می‌کنند (Leitão et al., 2009)؛ با این حال، DEM‌های با وضوح زیاد (به‌عنوان مثال، LiDAR) در برخی کشورها گران‌قیمت هستند یا در دسترس نیستند. در دسترس بودن DEM‌های با وضوح زیاد در کشورهای در حال توسعه بحرانی‌تر است که منابع مالی برای تولید داده‌های توپوگرافی محدود است (Pinos and Timbe, 2019).

DEM‌های جهانی در حال حاضر عبارت‌اند از SRTM، ASTER و ALOS؛ در حالی که SRTM براساس پردازش تداخل سنجی راداری ساخته شده است، ASTER و ALOS با استفاده از پردازش فتوگرامتری تصاویر ماهواره‌ای بصری ساخته شده‌اند؛ بنابراین به دلیل پوشش ابری در تصاویر اصلی حاوی فضاهای خالی و مصنوع هستند (Grohmann, 2018). این سه DEM برای پهنه‌بندی مناطق خطر سیل در مقیاس جهانی استفاده شده‌اند. با انتشار اخیر یک DEM جهانی (یعنی TDX)، داده‌های بیشتری برای مدل‌سازی و نقشه‌برداری طغیان سیل در دسترس است (Zhang et al., 2019b: 2). مشابه SRTM، TDX نیز با پردازش تداخل سنجی راداری تولید می‌شود و مأموریت آن در درجه اول ایجاد یک DEM جهانی بی‌سابقه با وضوح و سازگاری زیاد است (Rizzoli et al., 2017). مأموریت مدل رقومی ارتفاعی TDX از سال 2010 تا 2015 از سوی مرکز هوافضای آلمان با مشارکت Airbus Defense and Space تولید یک DEM جهانی بین عرض‌های جغرافیایی ۹۰ درجه شمالی و ۹۰ درجه جنوبی بود (Rizzoli et al., 2017). علاوه بر این، یک عامل اصلی، که به کامل‌بودن مدل رقومی ارتفاعی TDX کمک می‌کند، این است که تحت تأثیر پوشش ابر یا شرایط مختلف نور خورشید قرار نمی‌گیرد (Dong et al., 2021). قدرت تفکیک این مدل رقومی ارتفاعی در جهت عرض جغرافیایی ۱۲ متر است (Wessel, 2016).

پژوهش‌های متعددی در سطح جهان در زمینه تأثیر قدرت تفکیک DEM بر مدل‌سازی سیلاب و برآورد میزان دقت DEM‌های مختلف انجام شده است. برآورد میزان دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی SRTM، ASTER و ALOS و TDX برای مدل‌سازی سیلاب ساحلی با استفاده از داده‌های GPS و مدل رقومی ارتفاعی LiDAR با قدرت تفکیک ۱

متر در مناطق ساحلی جزیره هیسپانیولا^۱ مؤید آن بود که مدل‌های رقومی ارتفاعی ASTER و TDX به‌ترتیب دارای بدترین و بهترین دقت در زمینه مدل‌سازی سیلاب ساحلی بودند (Zhang et al., 2019b). مقایسه مدل‌سازی سیلاب با استفاده از مدل‌های رقومی ارتفاعی ASTER، MERIT، TDX، SRTM، NASADEM و ALOS با اندازه‌گیری‌های GPS در ریو کلرادو (کشور بولیوی) نشان داد که خطای جذر میانگین مربعات (RMSE^۲) مدل رقومی ارتفاعی TDX نسبت به مدل‌های رقومی دیگر بسیار کمتر است (Li et al., 2020). تحلیل میزان دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی SRTM، MERIT، CoastalDEM، GDEM، NASADEM و AW3D30 با استفاده از مدل هیدرودینامیکی LISFLOOD-FP در شانگهای چین نشان‌دهنده آن بود که با کاهش وضوح DEM، پهنه سیلابی و عمق جریان برای همه DEM‌ها افزایش می‌یابد. این نشان از آن دارد که استفاده از DEM‌های با وضوح کمتر به خطاهای بیشتری در مشخصات هیدرولیکی سیلاب منجر می‌شود (Xu et al., 2021). مدل‌سازی سیل رودخانه‌ای با استفاده از DEM با قدرت تفکیک ۲۵ سانتی‌متر در شمال غربی انگلستان نشان داد، زمانی که قدرت تفکیک DEM از ۱ متر به ۵۰ متر تغییر می‌کند، پهنه سیلابی و عمق جریان به‌ترتیب ۳۰ و ۱۵۰ درصد افزایش می‌یابد (Muthusamy et al., 2021). تحلیل دقت عمودی مطلق چهار DEM جهانی شامل SRTM، ASTER، ALOS و MERIT با توجه به مدل رقومی ارتفاعی LiDAR در جنوب کشور نیجر نشان‌دهنده آن بود که مدل رقومی ارتفاعی ALOS به شبیه‌سازی‌های انجام‌شده از سوی LiDAR نزدیک‌تر است؛ همچنین نتایج آن‌ها حاکی از آن بود که در سیلاب‌هایی، که عمق آب کمتر از ۳ متر است، پهنه سیلابی در DEM‌های با قدرت تفکیک مکانی بیشتر، کمتر از DEM‌های با قدرت تفکیک مکانی پایین‌تر است (Muench et al., 2022).

در کشور ایران نیز مطالعاتی در زمینه تعیین مدل رقومی ارتفاعی مناسب برای مدل‌سازی طی سال‌های اخیر انجام شده است؛ برای نمونه، مدل‌های رقومی ارتفاعی SRTM، ASTER و ALOS با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی برای مدل‌سازی سیلاب در دو رودخانه سرباز و سجاس ارزیابی شدند. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن بود که مدل رقومی ارتفاعی ALOS نسبت به SRTM و ASTER، قابلیت به‌مراتب بیشتری برای مدل‌سازی هیدرولیکی سیلاب دارد (عزیزیان، ۱۳۹۷). ارتباط بین عملکرد مدل‌های رقومی ارتفاعی با ویژگی‌های ریخت‌شناسی رودخانه برای انجام مدل‌سازی سیلاب در چهار استان زنجان، البرز، گلستان و سیستان و بلوچستان با ۳ مدل رقومی ارتفاعی ALOS، SRTM و ASTER با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر نشان‌دهنده دقت زیاد مدل ALOS در تعیین تراز سطح آب بود. از طرف دیگر، نتایج نشان از آن داشت که عملکرد مدل‌های رقومی ارتفاعی مورد مطالعه در پهنه‌بندی رودخانه‌های عریض و مستقیم بهتر از رودخانه‌های باریک و پیچان‌رودی است (آرش و همکاران، ۱۳۹۹). تأثیر قدرت تفکیک مدل رقومی ارتفاعی و ضریب زبری مانینگ بر کارایی مدل HEC-RAS-WMS در تعیین پهنه‌های مخاطره سیلاب در رودخانه کشکان مؤید آن بود که افزایش قدرت تفکیک مدل رقومی ارتفاعی در تعیین پهنه‌های آسیب‌پذیر سیلاب بسیار اثرگذار است؛ همچنین مدل HEC-RAS-WMS به تغییرات ضریب زبری مانینگ حساس بوده و باید برای تعیین پهنه‌های سیلاب در

1. Hispaniola
2. Root Mean Square Error

این مدل به تغییرات ضریب زبری و تعیین آن دقت لازم به عمل آید (حسینی و همکاران، ۱۴۰۰). تحلیل کارایی مدل‌های رقومی ارتفاعی SRTM و ASTER با توجه به داده‌های GPS دو فرکانسه به‌عنوان مبنا در استان‌های قزوین و مازندران حاکی از آن بود که مدل رقومی ارتفاعی SRTM نسبت به ASTER قابلیت به‌مراتب مناسب‌تری در تخمین رقوم ارتفاعی دارد؛ همچنین ارزیابی دقت ارتفاعی منابع مختلف در کاربری‌های گوناگون حاکی از عملکرد قابل قبول SRTM در بیشتر کاربری‌ها به غیر از نواحی کوهستانی و جنگلی است (کوهی و عزیزیان، ۱۴۰۰).

وقوع سیلاب‌های مخرب و تحمیل خسارات جانی و مالی در سطح کشور به‌خصوص استان‌های شمالی، این موضوع را در ذهن تداعی می‌کند که مدل‌سازی هیدرولیکی در مناطق مخاطره‌آمیز انجام نشده است یا دقت و کارایی لازم را ندارد. از طرف دیگر، به دلیل آنکه دقت مدل هیدرولیک برای تشخیص پهنه‌های سیلابی و تهیه نقشه ریسک سیلاب به دقت داده‌های هندسی رودخانه بستگی دارد که از مدل رقومی ارتفاعی استخراج می‌شود، نخستین گام در ارزیابی و مدیریت مخاطرات سیلاب، تهیه مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی زیاد است. از آنجایی که تهیه مدل‌های رقومی ارتفاعی مانند LiDAR با قدرت تفکیک مکانی ۱ متر برای ایران بسیار هزینه‌بر است، برآورد دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی مختلف برای انتخاب مناسب‌ترین مدل رقومی ارتفاعی در دسترس در کشورهای درحال توسعه مانند ایران اهمیت بسزایی دارد. اگرچه در مطالعات قبلی میزان دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی مانند SRTM، ASTER و ALOS برای مدل‌سازی سیلاب در مناطق مختلف ایران ارزیابی شده است، تاکنون هیچ پژوهشی در زمینه برآورد دقت مدل رقومی ارتفاعی TDx با قدرت تفکیک مکانی ۱۲ متر برای شبیه‌سازی هیدرولیک سیلاب در ایران انجام نشده است. در این پژوهش، مدل رقومی ارتفاعی TDx با قدرت تفکیک ۱۲ متر در محدوده مورد مطالعه از مرکز هوافضای آلمان تهیه شده است تا در صورت داشتن دقت مناسب از آن برای سایر مناطق ایران استفاده کرد. کاربرد آن در شبیه‌سازی مشخصات هیدرولیک سیلاب نظیر پهنه سیلاب، عمق و سرعت جریان در دوره بازگشت‌های مختلف در کاهش خسارات جانی و مالی سیلاب در منطقه مورد مطالعه تأثیر چشمگیری داشته است. کاربرد دیگر این پژوهش به‌عنوان نقطه عطفی برای مدل‌سازی هیدرولیکی مشخصات سیلاب با مدل رقومی ارتفاعی TDx در نظر گرفته می‌شود که به استفاده کردن یا نکردن از این مدل رقومی ارتفاعی در تحقیقات آینده در سایر مناطق ایران کمک شایانی می‌کند.

منطقه مورد مطالعه

حوضه رودخانه اترک در بالادست شهرستان مراوه‌تپه با مساحتی حدود ۱۷۰۰۰ کیلومترمربع و جمعیتی بالغ بر ۸۵۰۰۰۰ نفر (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵) در شمال شرق ایران واقع شده است (شکل ۱). ارتفاع حوضه از ۱۹۰ تا ۳۰۰۰ متر بالای سطح آب‌های آزاد تغییر می‌کند و ژئومورفولوژی حوضه با مجموعه‌ای از کوه‌ها و دره‌ها مشخص می‌شود که دارای جهت غالب شمال غربی - جنوب شرقی است. دشت‌ها و کوهستان‌ها به ترتیب ۱۰/۶ و ۸۹/۴ درصد از مساحت حوضه را تشکیل می‌دهند و میانگین شیب حوضه حدود ۲۰ درصد است. رودخانه اترک، مهم‌ترین رودخانه این حوضه است، از کوه‌های شمال شرقی ایران سرچشمه می‌گیرد و به دریای خزر ختم می‌شود (یزدانی و همکاران،

۱۳۹۵: ۵). آب‌وهوای حوضه اترک اغلب نیمه‌خشک است و میزان بارندگی در محدوده ۲۲۵ میلی‌متر در سال در بخش‌های جنوب شرقی تا ۳۶۰ میلی‌متر در سال در بخش‌های شمال غربی با میانگین ۲۷۶ میلی‌متر در سال است (سازمان هواشناسی کشور، ۲۰۲۰). الگوهای بارش با توجه به شرایط فیزیوگرافی متفاوت است. در دشت‌ها، بارندگی اغلب به‌جز در زمستان، که به‌صورت برف می‌بارد، به‌صورت باران است؛ در حالی که در کوه‌های مرتفع، برف اغلب در پاییز و زمستان می‌بارد (Sheikh, 2014: 3). این حوضه، یکی از حوضه‌های بزرگ و مهم ایران است که در سال‌های گذشته شاهد وقوع تعداد زیادی سیل ناگهانی بوده و به تلفات جانی و مالی منجر شده است؛ به‌عنوان مثال، به سیل‌های ۱۶ اردیبهشت و ۱۸ و ۱۹ مرداد ۱۳۸۰ یا ۲۱ مرداد ۱۳۸۱ اشاره می‌شود (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۱: ۱).



شکل (۱) موقعیت جغرافیایی حوضه رودخانه اترک و بازه مورد بررسی برای مدل‌سازی سیلاب با مدل رقومی ارتفاعی TDX (نویسندگان، ۱۴۰۱)

Figure (1) The geographical location of Atrak River Basin and the study reach for flood modeling with TDX DEM (Authors, 2022)

این حوضه به دلیل وجود رسوبات آلی با فرسایش‌پذیری زیاد، فقر پوشش گیاهی، نفوذپذیری کم و بارش‌های سنگین جزو مخاطره‌آمیزترین حوضه‌های ایران در زمینه سیلاب محسوب می‌شود (گزارش مدیریت سیلاب اداره منابع طبیعی گلستان، ۱۳۹۷). براساس گزارش‌ها و تحقیقات منتشرشده مخاطره‌آمیزترین منطقه حوضه اترک در محدوده بالادست شهر مراوه تپه است که در دهه‌های اخیر خسارت متعدد جانی و مالی متعددی به جا گذاشته است؛ به‌عنوان نمونه، در پی بارش‌های سیل‌آسای شهریور ۹۵، سه نفر از اعضای یک خانواده در روستای پالچقلی آغلر جان

خود را از دست دادند. در اسفند ۱۳۹۷ دو روستای قره قاشلی و شورجه در محاصره کامل آب رودخانه اترک قرار گرفته‌اند یا در اثر سیلاب فروردین ۱۳۹۹، ۲۹۶ میلیارد ریال به بخش‌ها و زیرساخت‌های مختلف برخی از روستاهای این شهرستان خسارت وارد شد (فرمانداری مراوه‌تپه، ۱۳۹۷ و ۱۳۹۹). در مجموع، وسعت زیاد حوضه اترک در بالادست شهر مراوه‌تپه، تنوع شرایط توپوگرافی، کمبود و تغییرات مکانی پوشش گیاهی و بارش‌های سنگین این منطقه را به منطقه‌ای بحرانی از نظر سیلاب تبدیل کرده است. با توجه به این شرایط، در این پژوهش به مدل‌سازی سیلاب در بازه ۲۰ کیلومتری بالادست شهر مراوه‌تپه براساس داده‌های بلندمدت دبی اوج لحظه‌ای ایستگاه قازانقایه توجه شده است (شکل ۱).

مواد و روش‌ها

تحلیل فراوانی

تخمین بزرگی سیلاب با دوره‌های بازگشت مختلف برای مدل‌سازی هیدرولیکی سیل ضروری است (Srinivas et al., 2008). در پژوهش حاضر، داده‌های بلندمدت (از سال ۱۳۵۶ تا ۱۳۹۶) دبی اوج لحظه‌ای سالانه در ایستگاه هیدرومتری قازانقایه (شکل ۱) برای تحلیل فراوانی دبی پیک سیل استفاده شدند. در این راستا، ابتدا ایستایی داده‌های اوج دبی لحظه‌ای سیلاب در طول زمان کنترل شد. بدین منظور طی سال‌های گذشته محققان روش‌های مختلف پارامتر و ناپارامتری را برای بررسی ایستایی یا نبود ایستایی ارائه دادند. در روش‌های پارامتری نیاز است که داده‌ها مستقل باشند و از توزیع نرمال پیروی کنند. در صورتی که در روش‌های غیرپارامتری نیاز نیست که داده‌ها از توزیع نرمال پیروی کنند و این روش‌ها حساسیت کمتری نسبت به داده‌های پرت و گم‌شده دارند. از بین آزمون‌های روند غیرپارامتری برای تشخیص روند سری‌های زمانی هیدرولوژیک، روش من کندال^۱ مناسب‌تر است. به‌خصوص برای داده‌های هیدرولوژی که نامتوازن‌اند و داده‌های پرت دارند (Hamed, 2008). این آزمون این‌گونه تعریف می‌شود:

$$Z = \begin{cases} \frac{(S-1)}{\sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{(S+1)}{\sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}}} & S < 0 \end{cases} \quad (1)$$

جایی که n طول توالی^۲ و S یک مقدار آماری است:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sgn}(X_i - X_j) \quad (2)$$

جایی که $\text{sgn}(X_i - X_j)$ برابر با ۱، صفر و -۱ است. زمانی که $(X_i - X_j)$ به ترتیب بزرگ‌تر، مساوی یا کمتر از

1. Mann Kendall method
2. Sequence length

صفر باشد (Shi et al., 2019: 5). در مرحله بعد، با استفاده از نرم‌افزار Easyfit بهترین توزیع برازشی به داده‌های اوج دبی لحظه‌ای داده شد. برای این منظور، سه معیار ارزیابی، از جمله اندرسون-دارلینگ^۱، کولموگروف-اسمیرنوف^۲ و کای اسکوتر^۳ در سطح اعتماد ۹۵ درصد ($\alpha=0.05$) برای انتخاب بهترین توزیع استفاده شدند. بعد از انتخاب بهترین توزیع برای داده‌های مدنظر، با بهره‌گیری از تابع توزیع تجمعی معکوس^۴ در نرم‌افزار Easyfit دبی‌های پیک سیلاب در دوره‌های بازگشت ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله برای ایستگاه هیدرومتری قازانقایه برآورد شدند. از آنجایی که بارش‌های سنگین نقش مهمی در وقوع دبی‌های پیک اوج لحظه‌ای و سیلاب‌های مخرب دارند، ارتباط بین بارش‌های سنگین و فراوانی وقوع سیلاب در حوضه مورد مطالعه کنار سایر تحلیل‌ها تعیین شد. در این زمینه براساس آمار درازمدت (سال‌های ۱۳۵۶ تا ۱۳۹۶) بارش روزانه در ایستگاه‌های سینوپتیک موجود در منطقه (قوچان، شیروان، بجنورد و مراوه‌تپه) و صدک ۹۵ به‌عنوان مرز بارش‌های سنگین (Gu et al., 2017)، مقدار بارش سنگین روزانه برای ماه‌های مختلف محاسبه شد تا میزان تأثیر بارش‌های سنگین بر فراوانی وقوع سیلاب مشخص شود.

مدل‌سازی هیدرولیکی

در این پژوهش جریان ثابت دوبعدی را در دوره بازگشت ۵ تا ۲۰۰ ساله با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS 5.0 شبیه‌سازی شد (شکل ۲). مدل HEC-RAS 2D که از سوی انجمن مهندسی ارتش آمریکا ساخته شده، برای شبیه‌سازی سیل مفید است (Brunner, 2016). HEC-RAS 5.0 به قابلیت‌هایی مانند کانال‌های دوبعدی دقیق و مدل‌سازی دشت سیلابی مجهز شده است (Rangari et al., 2019) و معادلات کامل دوبعدی سنت و نانت یا موج انتشار را حل می‌کند (U.S. Army Corps of Engineering, 2016):

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

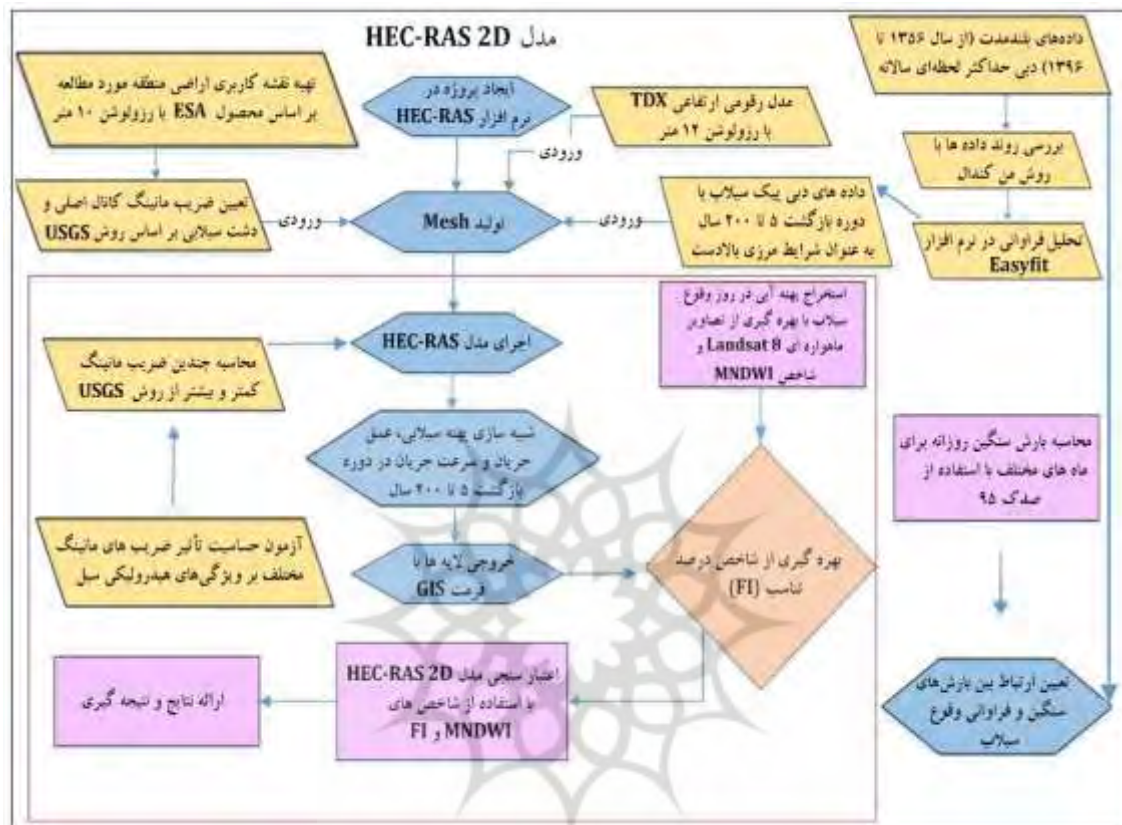
$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) = \frac{n^2 pg \sqrt{p^2 + q^2}}{h^2} - gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + pf + \frac{\partial}{\partial x} (ht_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (ht_{xy}) \quad (4)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) = \frac{n^2 qg \sqrt{p^2 + q^2}}{h^2} - gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + qf + \frac{\partial}{\partial y} (ht_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (ht_{xy}) \quad (5)$$

در این معادلات: h عمق آب (متر)، p و q جریان ویژه در جهت x و y ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)، g ارتفاع سطح (متر)، g شتاب جاذبه زمین (m s^{-2})، n ضریب زبری مانینگ، ρ چگالی آب (kg m^{-3})، t_{xx} ، t_{yy} و t_{xy} مؤلفه‌های تنش برشی و f نیروی کوریولیس است. در حالت موج انتشار، شرایط اینرسی معادلات ۴ و ۵ نادیده گرفته و معادلات حاصل معادلات موج انتشاری دوبعدی نامیده می‌شوند (Muthusamy et al., 2021). با توجه به طرح‌های پیچیده عددی، معادلات موج

1. Anderson-Darling
2. Kolmogorov-Smirnov
3. Chi-square
4. Inverse Cumulative Distribution Function

انتشاری دوبعدی پایداری بیشتر و زمان‌های محاسباتی سریع‌تری دارند (Li et al., 2020)؛ بنابراین در این پژوهش برای شبیه‌سازی جریان ثابت دوبعدی در دوره بازگشت ۵ تا ۲۰۰ سال استفاده شدند. دبی پیک سیلاب در دوره‌های بازگشت ۵ تا ۲۰۰ ساله برآورد شده از تحلیل فراوانی در ایستگاه هیدرومتری قازانقایه به‌عنوان شرایط مرزی بالادست در مدل هیدرولیک در نظر گرفته شد (شکل ۲).



شکل (۲) روند جریان پژوهش (نویسندگان، ۱۴۰۱)

Figure (2) Research flow process (Authors, 2022)

علاوه بر این، شرایط مرزی پایین دست به‌عنوان شرایط عمق نرمال به‌دست آمده براساس شیب انرژی در نظر گرفته شد. ضریب مانینگ کانال اصلی و دشت سیلابی براساس نقشه کاربری اراضی و روش USGS (Arcement and Schneider, 1989) برآورد شد. در این زمینه، ابتدا براساس محصول کاربری اراضی ^۱ESA، که از سوی آژانس فضایی اروپا با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر برای کل جهان تهیه شده است، نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه استخراج شد. از آنجایی که کانال اصلی رودخانه مئاندری و زمین‌های زراعی حدود ۹۷ درصد از دشت سیلابی را پوشش می‌دهند، براساس روش USGS (Arcement & Schneider, 1989)، میانگین ضریب مانینگ برای کانال اصلی و دشت سیلابی تعیین شد. شایان ذکر است که حساسیت مدل HEC-RAS 2D به ضرایب مختلف مانینگ آزمایش شد. این آزمون به‌منظور شناسایی تأثیر ضرایب مختلف مانینگ بر وسعت پهنه سیلابی، میانگین عمق و سرعت جریان انجام شد (شکل ۲).

اعتبارسنجی مدل هیدرولیکی

در پژوهش‌های قبلی، شاخص $MNDWI^1$ (معادله ۶) با موفقیت برای شناسایی پهنه سیل‌گیر استفاده شده است (Li et al., 2018: 2). در این روش، پهنه آبی، که کانال اصلی و دشت سیلابی را در زمان وقوع سیلاب اشغال کرده است، براساس تصاویر ماهواره‌ای استخراج و سپس مدل هیدرولیکی HEC-RAS طبق آن اعتبارسنجی می‌شود (Tamiru & Wagari, 2022). در این پژوهش، بر پایه تاریخ رویدادهای سیل، که در ایستگاه هیدرومتری قازانقایه ثبت شده است، پهنه سیلابی از تصاویر ماهواره‌ای Landsat-8 OLI با استفاده از نرم‌افزار ENVI و معادله ۶ استخراج شد.

$$MNDWI = \frac{Green - SWIR}{Green + SWIR} \quad (6)$$

جایی که $Green$ و $SWIR$ به ترتیب مقادیر بازتاب باندهای ۳ و ۶ را در Landsat 8 نشان می‌دهند (Xu, 2006: 3). از طرف دیگر، شاخص درصد تناسب (FI^2)، یعنی معادله ۷ برای اعتبارسنجی مدل‌های پهنه‌بندی سیل مفید ثابت شده است (Khojeh et al., 2022):

$$FI = \frac{B}{B + C + D} \times 100 \quad (7)$$

جایی که B نشان‌دهنده تعداد پیکسل‌های سیلابی هم در تصاویر Landsat-8 OLI و هم در مدل HEC-RAS 2D، C تعداد پیکسل‌های سیلابی در تصاویر Landsat-8 OLI در عین حال، خشک در مدل HEC-RAS 2D و D تعداد پیکسل‌های سیلابی در مدل HEC-RAS 2D در عین حال، خشک در تصاویر Landsat-8 OLI است. مقدار نزدیک‌تر به ۱۰۰ درصد نشان‌دهنده دقت زیاد مدل رقومی ارتفاعی TDx در استخراج پهنه سیلابی است.

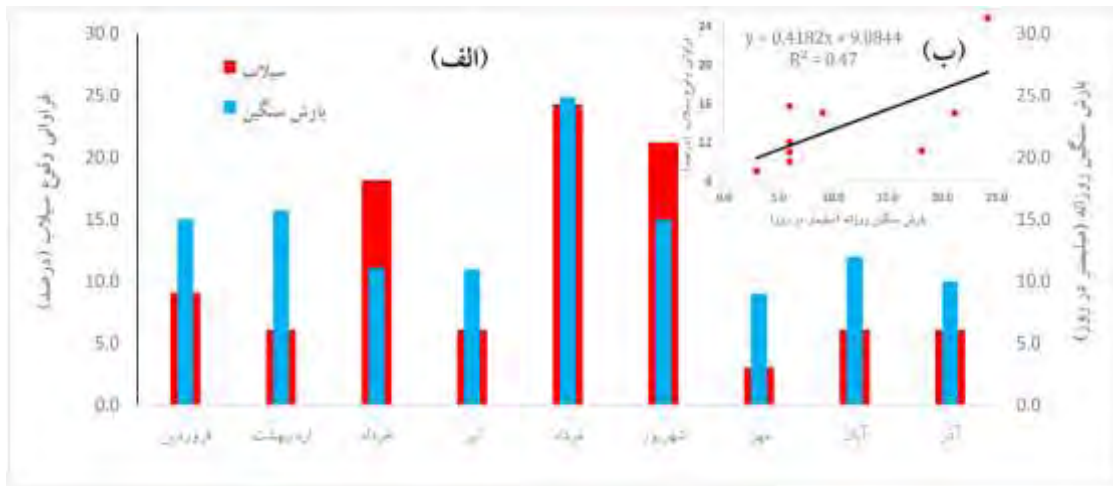
نتایج

تحلیل داده‌های دبی اوج لحظه‌ای

براساس داده‌های دبی ایستگاه هیدرومتری قازانقایه، میانگین دبی پیک سالانه درازمدت (سال‌های ۱۳۵۶ تا ۱۳۹۶) ۳۰۳ مترمکعب بر ثانیه و حداکثر دبی ۱۴۷۰ مترمکعب بر ثانیه در سال ۱۳۶۱ مشاهده شد. بررسی تاریخ وقوع دبی‌های پیک سیلاب در ایستگاه مورد مطالعه مؤید آن است که در دوره مطالعاتی (۱۳۵۶-۱۳۹۶) دبی پیک سیلاب در هیچ سالی در فصل زمستان رخ نداده است. از سوی دیگر، اگرچه دبی پیک سالانه از فروردین تا آذر اتفاق می‌افتد، حدود ۴۷ درصد از دبی‌های پیک سالانه در این حوضه در ماه‌های مرداد و شهریور رخ می‌دهند. نتایج حاکی از آن است که بین ماه‌های مذکور (فروردین تا آذر)، مهرماه با ۳/۰۳ درصد کمترین مقدار وقوع دبی پیک سیلاب را دارد (شکل ۳ الف). بررسی‌های مختلف نشان‌دهنده آن بود که عامل مهمی، که نقش چشمگیری در تولید دبی پیک سیلاب در فصل‌های گرم سال به‌ویژه ماه‌های مرداد و شهریور دارد، بارش سنگین روزانه است؛ برای مثال، مقدار بلندمدت بارش سنگین روزانه در مردادماه به ۲۴/۸۴ میلی‌متر در روز می‌رسد (شکل ۳ الف).

1. Modified normalized difference water index

2. Fit percentage indicator



شکل (۳) الف: فراوانی وقوع سیلاب به همراه بارش سنگین روزانه در ماه‌های مختلف؛ ب: تحلیل رگرسیون بین بارش سنگین و فراوانی وقوع سیلاب (نویسندگان، ۱۴۰۱)

Figure (3) A: the frequency of floods event in conjunction with daily heavy rainfall in different months and b: the regression analysis between heavy rainfall and the frequency of floods event (Authors, 2022)

تحلیل رگرسیون بین بارش سنگین و فراوانی سیلاب در شکل (۳.ب) نشان داده شده است. یافته‌ها حاکی از آن است که بارش سنگین با رابطه مستقیم و $R^2 = 0.47$ نقش مهمی در شکل‌گیری دبی‌های پیک سیلاب به‌ویژه در فصل تابستان دارد. دبی پیک سیلاب براساس توزیع احتمالاتی نمایی (بهترین توزیع برازش داده‌شده به داده‌های حداکثر دبی لحظه‌ای سیلاب طبق سه معیار: اندرسون-دارلینگ، کولموگروف-اسمیرنوف و کای اسکوئر. بخش ۳-۱) برای دوره‌های بازگشت ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله برآورد و در جدول (۱) ذکر شده است. نتایج نشان‌دهنده آن است که دبی پیک سیل از $487/8$ (سیل ۵ ساله) تا $1605/6$ مترمکعب بر ثانیه (سیل ۲۰۰ ساله) متغیر است.

جدول (۱) دبی‌های پیک سیلاب در ایستگاه هیدرومتری قازانقابه (نویسندگان، ۱۴۰۱)

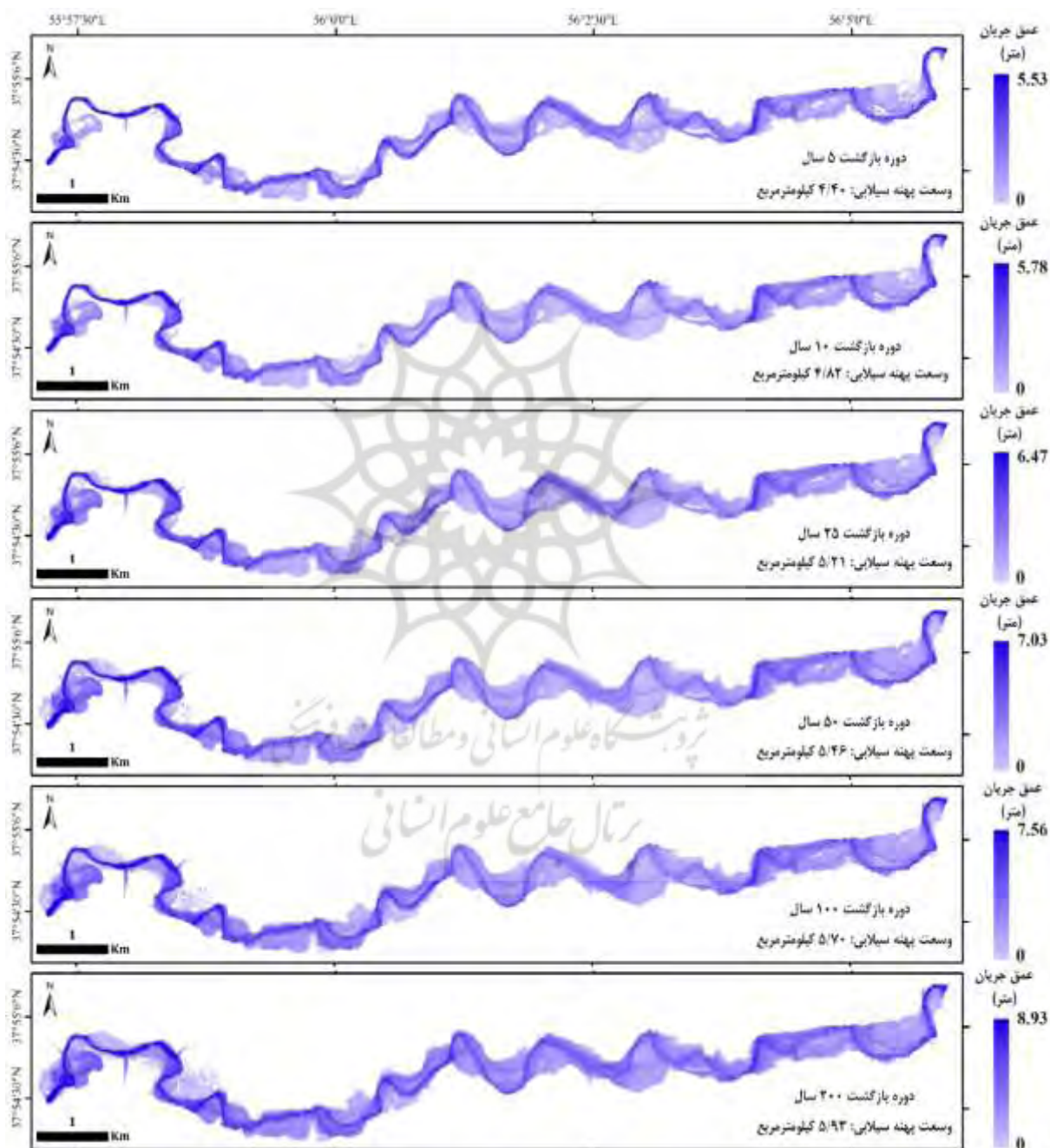
Table (1) Flood peak discharges in the Qazanqaya hydrometric station (Authors, 2022)

| دبی پیک سیلاب (مترمکعب بر ثانیه) | دوره بازگشت سیلاب |
|----------------------------------|-------------------|
| ۴۸۷/۸ | ۵ سال |
| ۶۹۷/۷ | ۱۰ سال |
| ۹۷۵/۴ | ۲۵ سال |
| ۱۱۸۵/۵ | ۵۰ سال |
| ۱۳۹۵/۵ | ۱۰۰ سال |
| ۱۶۰۵/۶ | ۲۰۰ سال |

مدل‌سازی هیدرولیک سیلاب

نقشه‌های وسعت پهنه سیلابی، عمق و سرعت جریان سیلاب براساس مدل رقومی ارتفاعی TDX با قدرت تفکیک ۱۲ متر در دوره بازگشت ۵ تا ۲۰۰ ساله در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ ارائه شده‌اند. مقادیر وسعت پهنه سیلابی

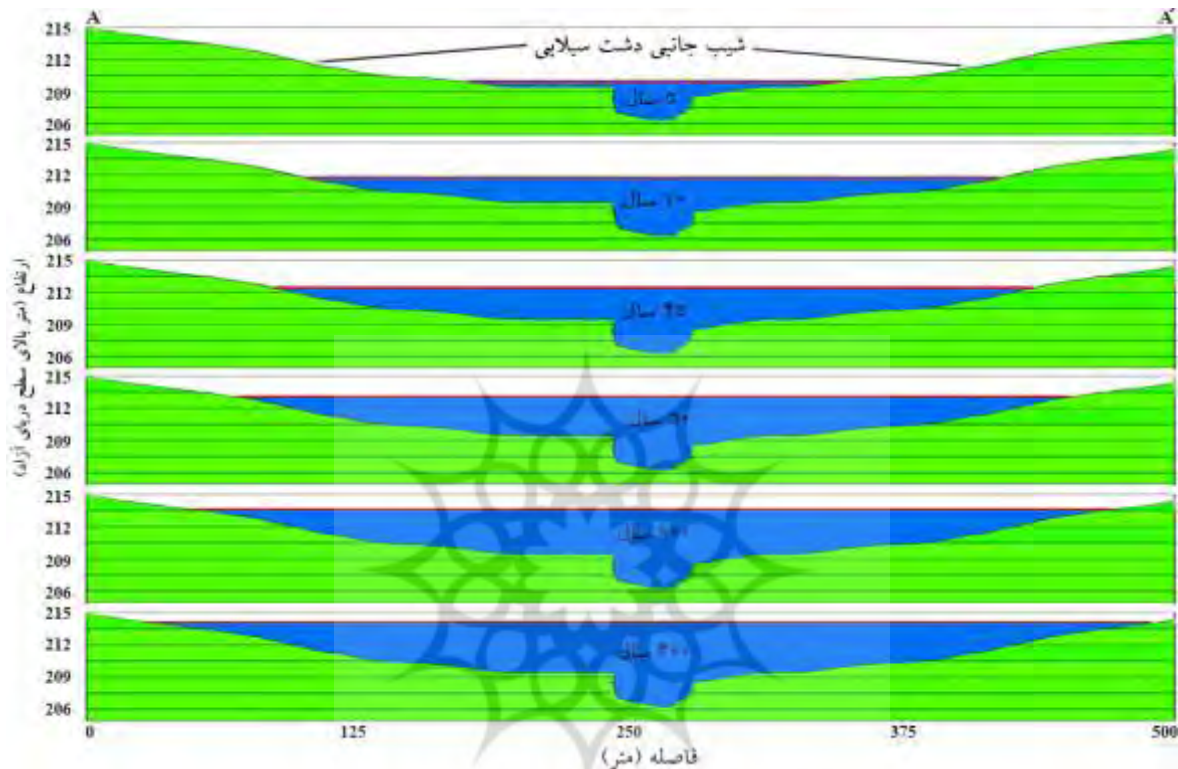
نشان‌دهنده گسترش مناطق سیلابی برای منطقه مورد مطالعه در محدوده ۴/۴۰ کیلومترمربع (دوره بازگشت ۵ سال) تا ۵/۹۳ کیلومترمربع (دوره بازگشت ۲۰۰ سال) بود (شکل ۴). نتایج نشان‌دهنده آن بود که کانال اصلی رودخانه و بخشی از دشت سیلابی، که با مزارع کشاورزی و شهرستان مراوه‌تپه پوشش داده شده است، در دوره بازگشت ۵ ساله دچار آب‌گرفتگی شد. در دوره بازگشت ۱۰ ساله، مساحت پهنه سیلابی ۹/۵۵ درصد (۴/۸۲ کیلومترمربع) نسبت به دوره بازگشت ۵ ساله افزایش یافت و بخش‌های بیشتری از زمین‌های زراعی و مناطق شهری با سیل دچار آب‌گرفتگی شد.



شکل (۴) وسعت و عمق سیلاب در دوره بازگشت ۵ تا ۲۰۰ سال (نویسندگان، ۱۴۰۱)

Figure (4) Inundation area and flow depth of flood in 5- to 200-yr return period (Authors, 2022)

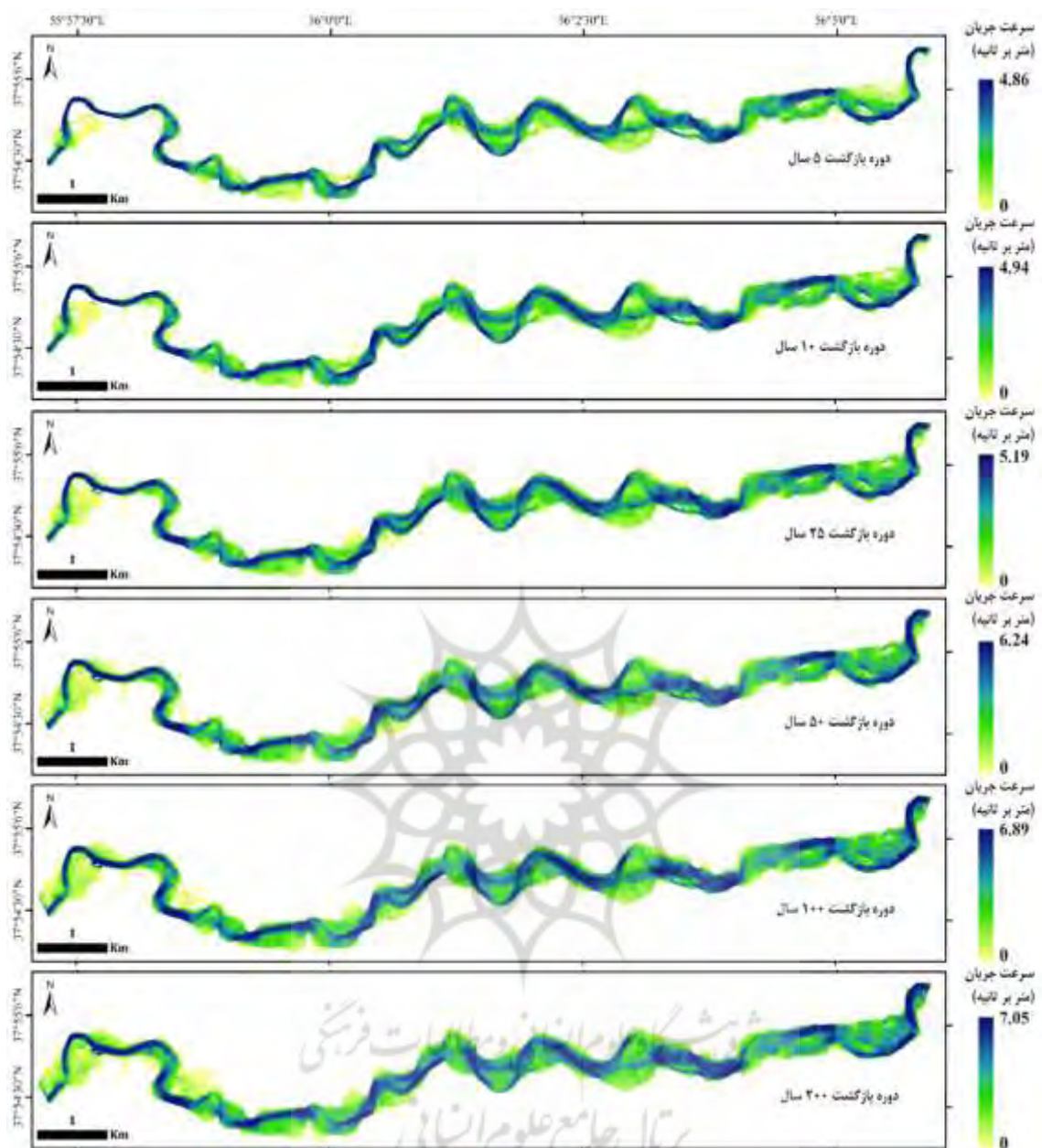
با این حال، با افزایش شیب جانبی دشت سیلابی، وسعت پهنه سیلاب در دوره‌های بعدی کمتر افزایش یافت (شکل‌های ۴ و ۵). به عبارت دیگر، اختلاف پهنه سیلابی در دوره بازگشت ۲۵ ساله نسبت به ۱۰ ساله ۸/۰۹ درصد، ۵۰ ساله نسبت به ۲۵ ساله ۴/۸۰ درصد، ۱۰۰ ساله نسبت به ۵۰ ساله ۴/۴۰ درصد و ۲۰۰ ساله نسبت به ۱۰۰ ساله ۴/۰۴ درصد بود. این موضوع، نشان‌دهنده تأثیر چشمگیر ژئومورفولوژی دشت سیلابی (در اینجا، شیب جانبی دشت سیلابی) بر وسعت پهنه سیلاب در دوره‌های بازگشت است (شکل ۵).



شکل (۵) اثر شیب جانبی دشت سیلابی بر پهنه سیلابی در امتداد پروفیل A-A' (موقعیت پروفیل A-A' در شکل (۱) نشان داده شده است) (نویسندگان، ۱۴۰۱)

Figure (5) The effect of lateral slope of floodplain on inundation area along the profile A-A' (profile location of A-A' is shown in Figure 1) (Authors, 2022)

تغییرات عمق جریان در کانال اصلی و دشت سیلابی در شکل (۴) نشان داده شده است. نتایج نشان‌دهنده آن بود که بیشترین عمق جریان از ۵/۵۳ متر (دوره بازگشت ۵ سال) تا ۸/۹۳ متر (دوره بازگشت ۲۰۰ سال) متغیر بود. از سوی دیگر، میانگین عمق جریان حدود ۱۷/۵ درصد (دوره بازگشت ۱۰ سال)، ۳۷/۴ درصد (۲۵ سال)، ۴۹/۶ درصد (۵۰ سال)، ۵۹/۴ درصد (۱۰۰ سال) و ۶۷/۹ درصد (۲۰۰ سال) در مقایسه با دوره بازگشت ۵ سال افزایش یافت. تغییرات سرعت جریان در کانال اصلی و دشت سیلابی در شکل (۶) نشان داده شده است. نتایج نشان‌دهنده آن بود که بیشترین سرعت جریان از ۴/۸۶ (دوره بازگشت ۵ سال) تا ۷/۰۵ متر بر ثانیه (دوره بازگشت ۲۰۰ سال) متغیر بود. یافته‌ها مؤید آن است که میانگین سرعت جریان حدود ۱۴/۱ درصد (دوره بازگشت ۱۰ سال)، ۲۸/۳ درصد (۲۵ سال)، ۳۶/۲ درصد (۵۰ سال)، ۴۳/۳ درصد (۱۰۰ سال) و ۴۹/۵ درصد (۲۰۰ سال) در مقایسه با دوره بازگشت ۵ سال افزایش یافت.

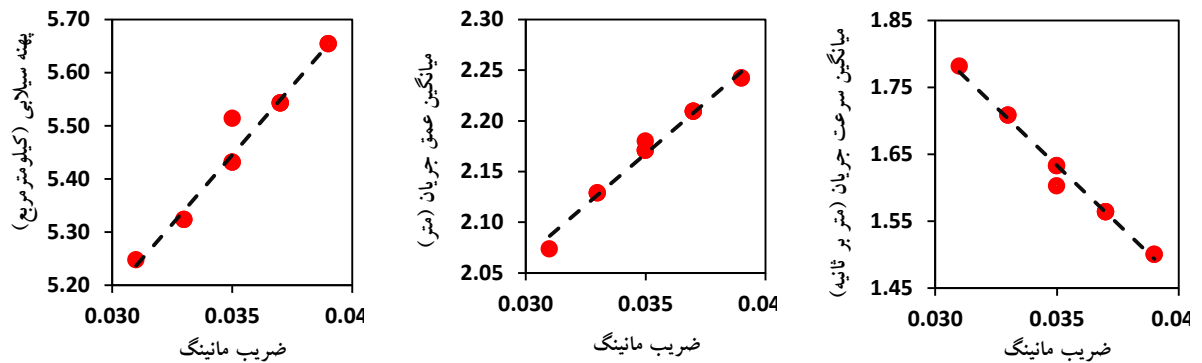


شکل (۶) سرعت جریان سیلاب در دوره بازگشت ۵ تا ۲۰۰ سال (نویسندگان، ۱۴۰۱)

Figure (6) Flood flow velocity in 5- to 200-yr return period (Authors, 2022)

تأثیر ضریب مانینگ بر ویژگی‌های هیدرولیکی سیل

برای بررسی اثر تغییرات ضریب مانینگ بر تغییرات وسعت پهنه سیلابی، میانگین عمق و سرعت جریان، یک آزمون حساسیت برای سیلاب ۱۰۰ ساله انجام شد. استفاده از سیل ۱۰۰ ساله موجه است؛ زیرا هنگام چنین رخدادی با جریان زیاد، هم کانال اصلی و هم دشت سیلابی به‌طور کامل غرقاب می‌شوند، هیچ منطقه ذخیره‌سازی در دشت سیلابی وجود ندارد و کل دشت سیلابی به‌عنوان یک کانال واحد عمل می‌کند (Saksena & Merwade, 2015). نتایج آزمون حساسیت ضریب مانینگ برای یک سیل ۱۰۰ ساله در شکل (۷) و جدول (۲) نشان داده شده است.



شکل (۷) ارتباط ضرایب مختلف مانینگ با وسعت پهنه سیلابی، میانگین عمق جریان و میانگین سرعت جریان برای سیلاب ۱۰۰ ساله (نویسندگان، ۱۴۰۱)

Figure (7) Relationship of the different Manning's coefficients with the inundation area, mean flow depth and mean flow velocity for 100-yr flood (Authors, 2022)

یافته‌ها نشان‌دهنده آن است که با افزایش ضریب مانینگ، وسعت پهنه سیلابی و میانگین عمق جریان به صورت خطی افزایش می‌یابد. در مقابل، میانگین سرعت جریان به صورت خطی با افزایش ضریب مانینگ کاهش می‌یابد (شکل ۷). به عبارت دیگر، با افزایش ضریب مانینگ (برای مثال، به دلیل افزایش درختان و درختچه‌ها) مقاومت کانال اصلی رودخانه و دشت سیلابی در مقابل جریان سیلاب افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه، پهنه سیلابی در امتداد کانال اصلی رودخانه بیشتر پخش می‌شود. در این حالت پهنه سیلاب و میانگین عمق جریان افزایش و بالعکس میانگین سرعت جریان کاهش می‌یابد. تحلیل حساسیت همچنین نشان‌دهنده آن بود که بیشترین حساسیت وسعت پهنه سیلابی، میانگین عمق و سرعت جریان نسبت به ضریب مانینگ ۴/۶۵ درصد، ۴/۸۴ درصد و ۱۲/۲۳ درصد است (جدول ۲).

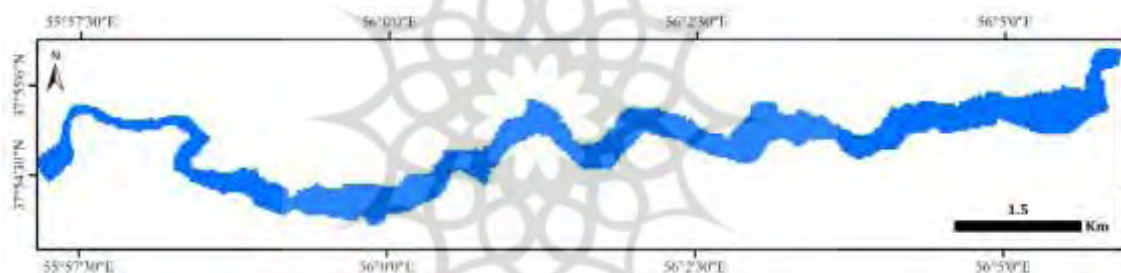
جدول (۲) تغییر ویژگی‌های سیل در ضرایب مختلف مانینگ در مقایسه با ضریب مانینگ اصلی ۰/۰۴۰ و ۰/۰۳۵ به ترتیب برای کانال اصلی و دشت سیلابی (نویسندگان، ۱۴۰۱)

Table (2) Change of flood characteristics in the different Manning's coefficients compared with Manning's coefficient of 0.040 and 0.035 for main channel and floodplain, respectively (Authors, 2022)

| میانگین سرعت جریان (درصد) | میانگین عمق جریان (درصد) | وسعت پهنه سیلابی (درصد) | ضریب مانینگ | |
|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------|------------|
| | | | دشت سیلابی | کانال اصلی |
| -۷/۶۸ | ۲/۳ | ۳/۲۷ | ۰/۰۳۳ | ۰/۰۳۸ |
| -۲/۹۴ | ۰/۳۸ | ۱/۳۱ | ۰/۰۳۵ | ۰/۰۳۸ |
| ۱/۳۷ | -۱/۳۹ | -۰/۷۱ | ۰/۰۳۷ | ۰/۰۳۸ |
| -۱۲/۲۳ | ۴/۸۴ | ۴/۶۵ | ۰/۰۳۱ | ۰/۰۴۰ |
| ۵/۳۵ | -۲/۹۰ | -۲/۷۳ | ۰/۰۳۹ | ۰/۰۴۰ |
| -۷/۶۸ | -۰/۰۵ | ۳/۲۷ | ۰/۰۳۳ | ۰/۰۴۰ |
| ۱/۳۷ | ۲/۳۰ | -۰/۷۱ | ۰/۰۳۷ | ۰/۰۴۰ |
| -۲/۹۴ | -۱/۳۹ | ۱/۳۱ | ۰/۰۳۵ | ۰/۰۴۲ |
| ۱/۳۷ | ۰/۳۸ | -۰/۷۱ | ۰/۰۳۷ | ۰/۰۴۲ |
| ۵/۳۵ | -۱/۳۹ | -۲/۷۳ | ۰/۰۳۹ | ۰/۰۴۲ |

اعتبارسنجی مدل هیدرولیکی

نتایج مدل‌سازی هیدرولیکی پهنه سیلابی مستخرج از مدل دوبعدی HEC-RAS با تصاویر ماهواره‌ای Landsat-8 OLI، شاخص MNDWI (معادله ۶) و شاخص درصد تناسب (معادله ۷) برای سیل ۱ شهریور سال ۱۳۹۴ در محدوده مورد مطالعه اعتبارسنجی شد (شکل ۸). از آنجایی که سیل ۱ شهریور سال ۱۳۹۴ تنها رویداد سیلی بود که با تصاویر Landsat ثبت شده بود، این رویداد برای اعتبارسنجی انتخاب شد. سیلاب ۱ شهریور ۱۳۹۴ با دبی پیک ۶۸۴/۳ مترمکعب بر ثانیه (ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری قازانقایه) با دبی پیک برآورد شده در دوره بازگشت ۱۰ ساله انطباق زیادی دارد (جدول ۱). در این زمینه، تصویر ماهواره‌ای Landsat-8 OLI در تاریخ ۲۰۱۵/۰۸/۲۳ (معادل ۱ شهریور ۱۳۹۴) دانلود شد و سپس با استفاده از معادله ۶، پهنه آبی که کانال اصلی رودخانه و دشت سیلابی را اشغال کرده بود، در نرم‌افزار ENVI استخراج شد (شکل ۸). در مرحله بعد، پهنه سیلابی شبیه‌سازی شده ۱۰ سال با استفاده از مدل رقومی ۱۲ متر (شکل ۴) و پهنه سیلابی استخراج شده از تصویر ماهواره‌ای Landsat-8 OLI با شاخص درصد تناسب (معادله ۷) مقایسه شدند. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده آن بود که پهنه سیلابی شبیه‌سازی شده از مدل هیدرولیکی HEC-RAS با تصویر ماهواره‌ای ۸۶ درصد تناسب دارد. این نشان‌دهنده آن است که HEC-RAS 2D همراه با مدل رقومی ارتفاعی TDX با ۱۲ متر قدرت تفکیک می‌تواند سیل را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کند.



شکل (۸) نقشه پهنه سیلاب با دوره بازگشت ۱۰ ساله به دست آمده با تصاویر Landsat-8 OLI و شاخص MNDWI در

تاریخ ۱ شهریور ۱۳۹۴ (نویسندگان، ۱۴۰۱)

Figure (8) Map of inundation area with 10-yr return period acquired by Landsat-8 OLI imagery and the MNDWI on 23 August 2015 (Authors, 2022)

بحث

این پژوهش نشان‌دهنده آن بود که بارش‌های سنگین نقش مهمی در شکل‌گیری دبی‌های پیک سیلاب در فصل گرم به‌ویژه در مردادماه در حوضه رودخانه اترک دارند. در این زمینه Modarres و همکاران (2016) بیان داشتند که یکی از عوامل اصلی رخداد سیل ۲۰ مرداد ۱۳۸۰ در استان گلستان بارش‌های سنگین بود. یافته‌های پژوهش حاضر مؤید آن بود که با افزایش ضریب مانینگ، وسعت پهنه سیلابی و عمق متوسط جریان افزایش می‌یابد. در صورتی که میانگین سرعت جریان کاهش می‌یابد. این موضوع با پژوهش‌های قبلی سازگار است؛ برای مثال، Phillips (1998) و حسینی و همکاران (۱۴۰۰) گزارش دادند که با افزایش ضریب مانینگ، وسعت پهنه سیلابی افزایش می‌یابد. علت این پدیده، افزایش مقاومت کانال اصلی رودخانه و دشت سیلابی در مقابل جریان سیلاب به دلیل زبری بیشتری سطح (اغلب به دلیل حضور درختان، بوته‌ها و درختچه‌ها) است.

نتایج این پژوهش حاکی از آن بود که مدل HEC-RAS 2D همراه با مدل رقومی ارتفاعی TDX با قدرت تفکیک ۱۲ متر پهنه سیلاب را با دقت قابل قبولی (بیش از ۸۵ درصد) شبیه‌سازی می‌کند. دقت زیاد مدل رقومی ارتفاعی TDX برای مدل‌سازی سیلاب با مطالعات قبلی سازگار است؛ برای مثال، Wessel و همکاران (2018) مدل رقومی ارتفاعی TDX را با استفاده از داده‌های GPS در سرتاسر جهان ارزیابی کردند و نشان دادند که مقدار خطای جذر میانگین مربعات ($RMSE^1$) و مطلق در صدک ۹۰ ($LE90^2$) مدل رقومی ارتفاعی TDX در مناطق کشاورزی برابر با ۰/۹۵ متر و ۱/۲۷ متر است (جدول ۴ در Wessel et al., 2018). از آنجایی که ۹۷ درصد از دشت سیلابی مورد مطالعه با مناطق زراعی پوشانده شده است، نتایج با دقت مدل رقومی ارتفاعی TDX در مناطق زمین زراعی جهانی مقایسه شدند که با Wessel و همکاران (2018) بررسی شده است. در پژوهش دیگری، Zhang و همکاران (2019a) مدل رقومی ارتفاعی TDX را با داده‌های LiDAR در یک محیط شهری ساحلی در شهر Miami-Dade، ایالات متحده مقایسه کردند. آن‌ها گفتند که مقدار $RMSE$ و $LE90$ مدل رقومی ارتفاعی TDX در مقایسه با داده‌های LiDAR به ترتیب ۰/۴۹ متر و ۰/۷۹ متر بود. سپس نتیجه گرفتند که دقت زیاد TDX ۱۲ متری توانایی زیاد این مدل رقومی ارتفاعی را در ترسیم‌کردن ویژگی‌های ژئومورفیک و هیدرولوژی آشکار می‌کند.

زنگ و همکاران (2019b) دقت چهار مدل رقومی ارتفاعی ASTER, SRTM, ALOS و TDX را در زمینه آسیب‌پذیری سواحل جزیره Hispaniola به سیلاب ساحلی براساس داده‌های GPS و LiDAR بررسی کردند. آن‌ها چنین استنباط کردند که مدل‌های رقومی ارتفاعی TDX و ASTER به ترتیب بهترین و کمترین دقت را دارند؛ در حالی که مدل‌های رقومی ارتفاعی SRTM و ALOS دقت متوسط داشتند. از طرف دیگر، لی و همکاران (2020) دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی مختلف را در مدل‌سازی سیلاب در ریوکلرادو، بولیوی با استفاده از داده‌های GPS بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل رقومی ارتفاعی TDX با مقدار $RMSE$ برابر با ۰/۴۷ متر خطای بسیار کمی نسبت به مدل‌های رقومی ارتفاعی دیگر مانند SRTM, ASTER, NASADEM, MERIT و ALOS دارد.

نتیجه‌گیری

سیل، از جمله مهم‌ترین مخاطرات طبیعی محسوب می‌شود که هر ساله خسارات سنگینی را در اقصی نقاط ایران به بار می‌آورد. این پدیده تحت تأثیر پارامترهای مختلفی از جمله هواشناسی، ژئومورفولوژی و هیدرولوژیکی است و با فعالیت‌های انسانی تشدید می‌شود. نتایج تحلیل فراوانی و برآورد دبی پیک سیلاب با دوره بازگشت ۵ تا ۲۰۰ سال در حوضه رودخانه اترک نشان داد که این حوضه با دبی‌های پیک بین ۴۸۷/۸ (سیل ۵ ساله) تا ۱۶۰۵/۶ مترمکعب بر ثانیه (سیل ۲۰۰ ساله) جزو مخاطره‌آمیزترین حوضه‌های ایران محسوب می‌شود که خسارات جانی و مالی زیادی به‌خصوص برای سیلاب‌هایی با دوره بازگشت زیاد ایجاد می‌کند. با توجه به اینکه بارش سنگین نقش مهمی در رخداد سیلاب در این حوضه دارد و از طرف دیگر، با در نظر گرفتن سناریوهای افزایش سیلاب‌های مخرب

1. Root Mean Square Error
2. Absolute error at the 90% quantile

تحت تأثیر تغییرات آب هوایی، پیش‌بینی می‌شود که روند افزایش سیلاب‌های مخرب در این حوضه، که به‌طور زیادی تحت تأثیر بارش سنگین است، نسبت به بیشتر حوضه‌های ایران چشمگیر باشد.

با وجود اینکه مدل‌سازی دوبعدی HEC-RAS با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی TDx با قدرت تفکیک مکانی ۱۲ متر نشان‌دهنده این نکته بود که این مدل رقومی ارتفاعی با دقت ۸۶ درصد (خطای ۱۴ درصد) به‌احتمال نسبت به مدل‌های رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک ۳۰ متر نظیر SRTM، ASTER و ALOS برتری بیشتری دارد؛ اما برای اطمینان استفاده از این مدل رقومی ارتفاعی، اعتبارسنجی آن برای سایر مناطق سیل‌خیز ایران لازم و ضروری است. در این زمینه پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آینده کنار استفاده از شاخص MNDWI، ابتدا مدل‌سازی هیدرولیک براساس مدل‌های رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک زیاد (مدل‌های رقومی ارتفاعی که از سوی نقشه‌برداری زمینی یا پهپاد تولید می‌شوند) انجام و سپس نتایج آن با مدل‌سازی حاصل از مدل رقومی ارتفاعی TDx مقایسه شود. شایان ذکر است که یکی از محدودیت‌های این پژوهش، نبود مدل رقومی ارتفاعی برای قبل و بعد از رخداد سیلاب بود. وجود چنین داده‌های ارتفاعی این امکان را فراهم می‌کند که در کنار شاخص MNDWI، براساس تغییرات مقاطع عرضی کانال اصلی و دشت سیلابی، به اعتبارسنجی مدل رقومی ارتفاعی TDx توجه شود.

تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) با شماره ۹۹۰۲۶۸۷۰ انجام شده است. نویسندگان لازم می‌دانند، از سازمان مدیریت منابع آب به دلیل در اختیار گذاشتن داده‌های دبی اوج لحظه‌ای سالانه ایستگاه هیدرومتری قازانقایه قدردانی کنند. مدل رقومی ارتفاعی TDx با قدرت تفکیک ۱۲ متر از سوی مرکز هوافضای آلمان از طریق پروژه «بررسی قدرت تفکیک مدل رقومی ارتفاعی بر مدل‌سازی سیلاب» (Proposal ID: DEM_HYDR3462) فراهم شد. با تشکر از داوران محترم که با نظرات ارزشمندشان سبب ارتقای کیفیت مقاله شدند.

منابع

- آرش، امیرمحمد، مهدی، یاسی، عزیزیان، اصغر (۱۳۹۹)، تعیین میزان دقت منابع ارتفاعی مختلف جهت برآورد پهنه سیلاب در رودخانه‌های با شرایط ریخت‌شناسی متفاوت، نشریه هیدرولیک، دوره ۱۵، شماره ۳، صص ۳۱-۱۵.
- حسینی، سید موسی، اشتری، نفیسه، شعبانی عراقی، عارفه (۱۴۰۰)، تأثیر توان تفکیک DEM و ضریب زبری مانینگ بر کارایی مدل HEC-RAS-WMS در تعیین پهنه‌های مخاطره سیلاب مطالعه موردی رودخانه کشکان، استان لرستان، ایران، مجله آمایش جغرافیایی فضا، دوره ۱۱، شماره ۴۱، صص ۹۵-۱۱۰.
- سازمان هواشناسی کشور، داده‌های بارش حوضه آبریز اترک.
- عزیزیان، اصغر (۱۳۹۷)، ارزیابی مدل‌های رقومی ارتفاعی مبتنی بر سنجش‌ازدور جهت کاربرد در مدل‌سازی هیدرولیکی سیلاب، تحقیقات منابع آب ایران، دوره ۱۴، شماره ۲، صص ۲۲۳-۲۱۲.

علیزاده، امین، کمالی، غلامعلی، اکبری، ابوالقاسم (۱۳۸۱) پهنه‌بندی پتانسیل سیل خیزی در حوضه اترک، اولین همایش علمی تحقیقی مدیریت امداد و نجات، تهران.

فرمانداری مراوه‌تپه، گزارش سیلاب‌های (۱۳۹۷) و (۱۳۹۹).

کوهی، سکینه، عزیزیان، اصغر، (۱۴۰۰)، بررسی دقت ارتفاعی مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEMs) مبتنی بر سنجش از دور در کاربری‌های مختلف، فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، دوره ۳۰، شماره ۱۱۸، صص ۲۴-۷.

گزارش مدیریت سیلاب اداره منابع طبیعی گلستان، (۱۳۹۷).

یزدانی، وحید، نظر جانی، محمد، علی میرزایی، حسین، (۱۳۹۵)، شبیه‌سازی هیدرولیک سیلاب جهت تعیین حریم بستر و نقاط حساس رودخانه اترک، علوم و مهندسی آب، دوره ۶، شماره ۱۴، صص ۷۶-۵۷.

- Aerts, J. C. J. H. (2020). **Integrating agent-based approaches with flood risk models: A review and perspective**. *Water Security*, 11, 100076.
- Arabameri, A., Rezaei, K., Cerdà, A., Conoscenti, C., & Kalantari, Z. (2019). **A comparison of statistical methods and multi-criteria decision making to map flood hazard susceptibility in Northern Iran**. *Science of the Total Environment*, 660, 443-458.
- Arcement, G. J., & Schneider, V. R. (1989). **Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains**.
- Bales, J. D., & Wagner, C. R. (2009). **Sources of uncertainty in flood inundation maps**. *Journal of Flood Risk Management*, 2(2), 139-147.
- Brunner, G.W., (2016). **HEC-RAS River Analysis System, 2D Modeling User's Manual Version 5.0**. Davis, CA.
- Bui, D. T., Panahi, M., Shahabi, H., Singh, V. P., Shirzadi, A., Chapi, K., & Ahmad, B. B. (2018). **Novel hybrid evolutionary algorithms for spatial prediction of floods**. *Scientific reports*, 8(1), 1-14.
- Costabile, P., Costanzo, C., Ferraro, D., Macchione, F., & Petaccia, G. (2020). **Performances of the new HEC-RAS version 5 for 2-D hydrodynamic-based rainfall-runoff simulations at basin scale: comparison with a state-of-the art model**. *Water*, 12(9), 2326.
- Dong, Y., Zhao, J., Floricioiu, D., Krieger, L., Fritz, T., & Eineder, M. (2021). **High-resolution topography of the Antarctic Peninsula combining the TanDEM-X DEM and Reference Elevation Model of Antarctica (REMA) mosaic**. *The Cryosphere*, 15(9), 4421-4443.
- Falter, D., Vorogushyn, S., Lhomme, J., Apel, H., Gouldby, B., & Merz, B. (2013). **Hydraulic model evaluation for large-scale flood risk assessments**. *Hydrological Processes*, 27(9), 1331-1340.
- Golshan, M., Jahanshahi, A., & Afzali, A. (2016). **Flood hazard zoning using HEC-RAS in GIS environment and impact of manning roughness coefficient changes on flood zones in Semi-arid climate**. *Desert*, 21(1), 24-34.
- Grohmann, C. H. (2018). **Evaluation of TanDEM-X DEMs on selected Brazilian sites: Comparison with SRTM, ASTER GDEM and ALOS AW3D30**. *Remote Sensing of Environment*, 212, 121-133.
- Gu, X., Zhang, Q., Singh, V. P., & Shi, P. (2017). **Changes in magnitude and frequency of heavy precipitation across China and its potential links to summer temperature**. *Journal of Hydrology*, 547, 718-731.

- Hamed, K. H. (2008). **Trend detection in hydrologic data: the Mann–Kendall trend test under the scaling hypothesis**. *Journal of hydrology*, 349(3-4), 350-363.
- Jahangir, M. H., Reineh, S. M. M., & Abolghasemi, M. (2019). **Spatial predication of flood zonation mapping in Kan River Basin, Iran, using artificial neural network algorithm**. *Weather and Climate Extremes*, 25, 100215.
- Janizadeh, S., Pal, S. C., Saha, A., Chowdhuri, I., Ahmadi, K., Mirzaei, S., & Tiefenbacher, J. P. (2021). **Mapping the spatial and temporal variability of flood hazard affected by climate and land-use changes in the future**. *Journal of Environmental Management*, 298, 113551.
- Karamouz, M., & Mahani, F. F. (2021). **DEM uncertainty based coastal flood inundation modeling considering water quality impacts**. *Water Resources Management*, 35(10), 3083-3103.
- Khojeh, S., Ataie-Ashtiani, B., & Hosseini, S. M. (2022). **Effect of DEM resolution in flood modeling: a case study of Gorganrood River, Northeastern Iran**. *Natural Hazards*, 1-21.
- Khosravi, K., Pham, B. T., Chapi, K., Shirzadi, A., Shahabi, H., Revhaug, I., & Bui, D. T. (2018). **A comparative assessment of decision trees algorithms for flash flood susceptibility modeling at Haraz watershed, northern Iran**. *Science of the Total Environment*, 627, 744-755.
- Leitao, J. P., Boonya-Aroonnet, S., Prodanović, D., & Maksimović, Č. (2009). **The influence of digital elevation model resolution on overland flow networks for modelling urban pluvial flooding**. *Water Science and Technology*, 60(12), 3137-3149.
- Li, J., Yang, X., Maffei, C., Tooth, S., & Yao, G. (2018). **Applying independent component analysis on Sentinel-2 imagery to characterize geomorphological responses to an extreme flood event near the non-vegetated Río Colorado terminus, Salar de Uyuni, Bolivia**. *Remote Sensing*, 10(5), 725.
- Li, J., Zhao, Y., Bates, P., Neal, J., Tooth, S., Hawker, L., & Maffei, C. (2020). **Digital Elevation Models for topographic characterisation and flood flow modelling along low-gradient, terminal dryland rivers: A comparison of spaceborne datasets for the Río Colorado, Bolivia**. *Journal of Hydrology*, 591, 125617.
- Modarres, R., Sarhadi, A., & Burn, D. H. (2016). **Changes of extreme drought and flood events in Iran**. *Global and Planetary Change*, 144, 67-81.
- Muench, R., Cherrington, E., Griffin, R., & Mamane, B. (2022). **Assessment of Open Access Global Elevation Model Errors Impact on Flood Extents in Southern Niger**. *Frontiers in Environmental Science*, 547.
- Muthusamy, M., Casado, M. R., Butler, D., & Leinster, P. (2021). **Understanding the effects of Digital Elevation Model resolution in urban fluvial flood modelling**. *Journal of Hydrology*, 596, 126088.
- Norouzi, G., & Taslimi, M. (2012). **The impact of flood damages on production of Iran's Agricultural Sector**. *Middle East J Sci Res*, 12, 921-926.
- Papaioannou, G., Loukas, A., Vasiliades, L., & Aronica, G. T. (2016). **Flood inundation mapping sensitivity to riverine spatial resolution and modelling approach**. *Natural Hazards*, 83(1), 117-132.
- Phillips, J. D. (1988). **Incorporating fluvial change in hydrologic simulations: a case study in coastal North Carolina**. *Applied Geography*, 8(1), 25-36.

- Pinos, J., & Timbe, L. (2019). **Performance assessment of two-dimensional hydraulic models for generation of flood inundation maps in mountain river basins.** *Water science and engineering*, 12(1), 11-18.
- Pouyan, S., Pourghasemi, H. R., Bordbar, M., Rahmanian, S., & Clague, J. J. (2021). **A multi-hazard map-based flooding, gully erosion, forest fires, and earthquakes in Iran.** *Scientific Reports*, 11(1), 1-19.
- Rahmati, O., Darabi, H., Panahi, M., Kalantari, Z., Naghibi, S. A., Ferreira, C. S. S., & Haghighi, A. T. (2020). **Development of novel hybridized models for urban flood susceptibility mapping.** *Scientific reports*, 10(1), 1-19.
- 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.
- Rizzoli, P., Martone, M., Gonzalez, C., Wecklich, C., Tridon, D. B., Bräutigam, B., & Moreira, A. (2017). **Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model.** *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 132, 119-139.
- Saksena, S., & Merwade, V. (2015). **Incorporating the effect of DEM resolution and accuracy for improved flood inundation mapping.** *Journal of Hydrology*, 530, 180-194.
- Sheikh, V. (2014). **Analysis of hydroclimatic trends in the Atrak River basin, North Khorasan, Iran (1975–2008).** *Environmental Resources Research*, 2(1), 1-14.
- Sherpa, S. F., & Shirzaei, M. (2022). **Country-wide flood exposure analysis using Sentinel-1 synthetic aperture radar data: Case study of 2019 Iran flood.** *Journal of Flood Risk Management*, 15(1), e12770.
- Shi, X., Qin, T., Nie, H., Weng, B., & He, S. (2019). **Changes in major global river discharges directed into the ocean.** *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(8), 1469.
- Smith, K., (2003). **Environmental hazards: assessing risk and reducing disaster.** Routledge.
- Srinivas, V. V., Tripathi, S., Rao, A. R., & Govindaraju, R. S. (2008). **Regional flood frequency analysis by combining self-organizing feature map and fuzzy clustering.** *Journal of Hydrology*, 348(1-2), 148-166.
- Tamiru, H., & Wagari, M. (2022). **Machine-learning and HEC-RAS integrated models for flood inundation mapping in Baro River Basin, Ethiopia.** *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(2), 2291-2303.
- Tayefi, V., Lane, S. N., Hardy, R. J., & Yu, D. (2007). **A comparison of one-and two-dimensional approaches to modelling flood inundation over complex upland floodplains.** *Hydrological Processes: An International Journal*, 21(23), 3190-3202.
- U.S. Army Corps of Engineering. (2016). **HEC-RAS 5.0 Hydraulic Reference Manual.** U.S. Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, USA. CPD-68.
- Utlu, M., & Özdemir, H. (2020). **How much spatial resolution do we need to model a local flood event? Benchmark testing based on UAV data from Biga River (Turkey).** *Arabian Journal of Geosciences*, 13(24), 1-14.
- Vaghefi, S. A., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H., & Abbaspour, K. C. (2019). **The future of extreme climate in Iran.** *Scientific reports*, 9(1), 1-11.

- Wessel, B. (2016). **TanDEM-X Ground Segment-DEM Products Specification Document**. German Space Center.
- Wessel, B., Huber, M., Wohlfart, C., Marschalk, U., Kosmann, D., & Roth, A. (2018). **Accuracy assessment of the global TanDEM-X Digital Elevation Model with GPS data**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 139, 171-182.
- Xu, H. (2006). **Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery**. International journal of remote sensing, 27(14), 3025-3033.
- Xu, K., Fang, J., Fang, Y., Sun, Q., Wu, C., & Liu, M. (2021). **The Importance of Digital Elevation Model Selection in Flood Simulation and a Proposed Method to Reduce DEM Errors: A Case Study in Shanghai**. International Journal of Disaster Risk Science, 12(6), 890-902.
- Zhang, K., Gann, D., Ross, M., Biswas, H., Li, Y., & Rhone, J. (2019a). **Comparison of TanDEM-X DEM with LiDAR data for accuracy assessment in a coastal urban area**. Remote Sensing, 11(7), 876.
- Zhang, K., Gann, D., Ross, M., Robertson, Q., Sarmiento, J., Santana, S., & Fritz, C. (2019b). **Accuracy assessment of ASTER, SRTM, ALOS, and TDX DEMs for Hispaniola and implications for mapping vulnerability to coastal flooding**. Remote Sensing of Environment, 225, 290-306.

