

Sensitivity Analysis of the Two-Dimensional HEC-RAS Model to Governing Equations in Flood Hazard Mapping: A Case Study of Khorramabad River

Iraj Vayskarami¹, Ali Haghizadeh^{2*} , Aboalhasan Fathabadi³

1. Ph.D. student of Watershed Management Engineering, Department of Range and Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran
2. **Corresponding Author**, Associate Professor, Department of Range and Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran
Email: Haghizadeh.a@lu.ac.ir / ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0928-827X>
3. Associate Professor, Department of Range and Watershed Management Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Gonbad, Iran

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 09 December 2024 Revised: 15 May 2025 Accepted: 24 May 2025 Published: 22 December 2025 Keywords: HEC-RAS model, Model sensitivity, Uncertainty, Hydrodynamic equations.	Despite significant advances in hydraulic models, the incomplete understanding of flood processes and the spatial-temporal variations of model inputs (such as topography and surface roughness) has limited the accuracy of flood predictions. In this study, the impact of computational equations on the accuracy of the HEC-RAS model in mapping flood hazard zones was examined. To this end, water flow variables for discharges of 15, 34, and 1000 cubic meters per second were simulated over a 3-kilometre stretch of the downstream river of Khorramabad. The sensitivity analysis results indicated that this model is highly sensitive to factors such as Manning's roughness coefficient, the dimensions of the computational grid, and the method used to solve the governing flow equations. Among various hydraulic properties, water surface elevation exhibited the least sensitivity to the computational equations. The model's accuracy in simulating the discharge measured in March and November 2024 was significantly better when using the wave dispersion method. Conversely, for the flood event in March 2019, the dynamic wave method yielded more accurate results. The analyses were conducted by evaluating the measured parameters (depth, velocity, and flow width) and the simulation results of four observation sections, using statistical indicators RMSE and MAPE. The results indicated that in most sections, the flood extended to the banks, and at the bridge section (Section D), greater depth and velocity were observed due to lateral constraints. Overall, when the channel cross-section has a sufficiently high capacity for the inflow discharge, the wave dispersion method is the preferred choice. Conversely, for high-recurrence discharges and in situations where the flow extends into the floodplain, the dynamic wave equations would be the superior choice.
How to Cite: Vayskarami, I. , Haghizadeh, A. and Fathabadi, A. (2025). Sensitivity Analysis of the Two-Dimensional HEC-RAS Model to Governing Equations in Flood Hazard Mapping: A Case Study of Khorramabad River. <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 14(46), 125-146.	



EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

A better understanding of the phenomenon of flood risk and its potential consequences in society is an important criterion for developing flood control policies, risk reduction projects, and various other flood management strategies (Amrei and Beritta, 2022; Sherafati et al., 2013; Karimi et al., 2017). Flood risk is the result of the interplay between flood hazard (a combination of its probability and severity) and the vulnerability of people and their properties and assets (Yin et al., 2021). Flood hazard mapping is typically conducted using hydrological, hydraulic models and field surveys. The process of creating such maps, from data collection to modeling, involves a series of uncertainties. Common hydraulic-hydrodynamic modeling methods can yield incorrect results due to neglecting sources of uncertainty (Alfonso et al., 2016; Garcia et al., 2023; Lee et al., 2021; Smith and Johnson, 2022). Measuring and reducing uncertainty in flood modeling is an important topic for enhancing the accuracy of flood modeling and forecasting (Teng et al., 2017; Pornaby et al., 2021; Jamal et al., 2021). Therefore, the accuracy of modeling applications has significant implications for flood design and risk management performance (Merwade et al., 2008; Alian et al., 2019).

One of the most significant sources of uncertainty in the results of hydraulic models is the uncertainty associated with the model and its parameters. Determining the computational equation of the model is one of the most sensitive factors in this regard. This study focuses on the sensitivity analysis of the two-dimensional HEC-RAS model concerning the computational equations (diffusive wave and fully dynamic wave) and examines the impact of these equations on the accuracy of flood hazard predictions within a 3-kilometre stretch downstream of the city of Khorramabad.

DATA AND METHODS

In this study, the impact of computational equations on the accuracy of the HEC-RAS model in flood hazard mapping was examined by simulating flow variables for discharge rates of 15, 34, and 1000 cubic meters per second in a 3-kilometre stretch downstream of the city of Khorramabad. In the first step, to create a topographic map and a large-scale digital elevation model (DEM) for the study area, satellite images from Worldview 2024 obtained from Digital Globe were used in stereo, with a spatial resolution of 0.5 meters. Subsequently, the accuracy of this layer was validated using several control points collected through field surveying with a mapping camera (Figure 1). After entering the geometric data into the software environment and delineating the boundaries, the desired area was gridded using algebraic and computational methods. To assess the calibration and validation of the model results, measurements of flow parameters (velocity, depth, and width of flow extension) were taken at four sections of the surveyed area, with the primary emphasis placed on the consecutive bends of the river to examine the impact of secondary flows and centrifugal forces on the flow variables.

In this study, to determine the roughness coefficient, the study area was first homogenized based on the morphological conditions and land uses, following field visits to the river and observations of the variations in parameters affecting the determination of the roughness coefficient. Then, the roughness coefficient of the riverbanks for each reach was determined based on the photos and descriptions in Chow's reference, as well as other books and references such as the USGS reference. The values of the riverbed roughness coefficient were determined for different ranges according to all the components of the Kavan method.

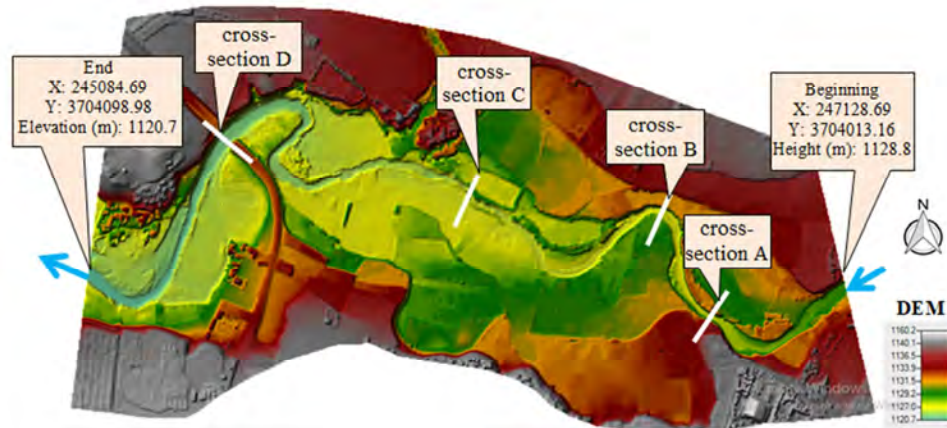


Figure 1: Topographic map/digital elevation model (DEM) of the studied spatial reach on a large scale.

RESULTS AND DISCUSSIONS

The results of the changes in flow depth for two discharge events are as follows: for a discharge of 34 m^3 (April 2024), the study area can accommodate this discharge. Due to the significant curvature in the bends of the study area, the maximum changes in flow (increase in velocity) occur in the second half of the bend. For a discharge of 1000 m^3 (the event of April 2019), the greatest flow depth at the location of the bridge (cross-section D) is 5 meters. The entire area of the studied reach cannot accommodate this flood, resulting in flooding at 95 percent of the banks and the spread into the floodplain.

The changes in speed values and vectors along the channel for the two studied events are such that, for a discharge of 34 m^3 , the highest water velocity occurs in the straight stretch following the second bend and in the middle of the channel due to the presence of a cross-sectional constraint and low roughness coefficient. For a discharge of 1000 m^3 per second, given that the flood has extensively spread to the banks, the pattern of water velocity is influenced by flow turbulence, slope, topography, and obstacles in the floodplain.

For a discharge of 34 m^3 , considering that the studied reach can accommodate this flow, the values of the flood hazard extent are below the threshold level. Therefore, the flood risk under these conditions is considered normal. Regarding the flood of April 2019 with a discharge of 1000 m^3 , the maximum flood risk is generally observed in the channel section of the studied reach. However, specifically, the highest numerical value of flood risk is at the location of the third bend/bridge area (cross-section D). On average, the cross-sectional extent of the flood hazard area, with values greater than 10, is approximately 160 meters.

CONCLUSION

As the conclusion of the research, it can be stated that the flow depth is less sensitive to the type of equation compared to the flow velocity. However, flow velocity patterns exhibit greater variations under curved conditions. In most cross-sections, the flood has spread to the banks, and at the bridge section (Section D), due to lateral constraints, higher flow depth and velocity have been recorded. When the channel cross-section has sufficient capacity for the inlet discharge, the dispersion wave method is a better choice. On the other hand, for high-return-period discharges and in conditions where the flow extends toward the floodplain, the dynamic wave equations are the better choice. These results emphasize the importance of carefully selecting the equations and considering topographical features and climatic conditions in hydraulic simulations.

REFERENCES

References (in Persian)

- Alian, N., Ahmadi, M.M., bakhtiari, B. (2019). Uncertainty Analysis of Expected Annual Flood Damage for Flood Risk Assessment (A Case Study: Zayande Roud Basin). WSS-Isfahan University of Technology, 23(4), pp 141-152. [In Persian]
- Jamal, A., Parvan, A., Valizadeh, D. (2019). Floodplain Hazard Mapping in the Iranshahr River by Using Two-Dimensional Numerical Modelling and GIS. WSS-Isfahan University of Technology, 23 (4), pp 71-83 [In Persian]
- karimil firoozjaei, M., abdolaho kakroodi, A., jolodar niyaraki, M. (2018). Preparing a flood risk map based on the flow energy by using a geographical information system. Case study: Nekaroud River. Quantitative Geomorphological Research, 5(4), pp 159-175. [In Persian]
- Pornaby Darzi, S., Vafakhah, M., Rajabi, M.R. (2021). Flood hazard zoning using HEC-RAS Hydraulic Model and ArcGIS (Case Study: CheshmehKileh River in Tonekabon County). Journal of Natural Environmental Hazards, 10(28), pp 15-28. doi: 10.22111/jneh.2021.28694.1603 [In Persian]
- Sherafati, A., Zahabioun, B. (2013). Uncertainty analysis and statistical generation of storm pattern in Seymareh catchment. Iranian Water Researches Journal, 7(2), pp 97-108. [In Persian]

References (in English)

- Alfonso, L., Mukolwe, M. M., Di Baldassarre, G. (2016). Probabilistic flood maps to support decision-making: Mapping the value of information. Water Resources Research, 52(2), pp 1026-1043. <https://doi.org/10.1002/2015WR017378>
- Amrei, D., Britta, S. (2020). Flood hazard analysis in small catchments: Comparison of hydrological and hydrodynamic approaches by the use of direct rainfall. Journal of Flood Risk Management, 13, 26. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.02.010>
- Garcia, M., Foster, K. (2023). Assessing Uncertainty in Flood Inundation Models: A Case Study. Environmental Modelling & Software, 166, 104871
- Lee, T., Kim, S. (2021). Quantifying Uncertainty in Hydraulic Models for Flood Risk Assessment. Water Resources Research, 57(11), e2021WR030852.
- Merwade, V., Olivera, F., Arabi, M., Edleman, S. (2008). Uncertainty in flood inundation mapping: Current issues and future directions. Journal of Hydrologic Engineering, 13(7), pp 608–620.
- Smith, J., & Johnson, R. (2022). Uncertainty in Flood Prediction: A Review of the Influence of Hydrological Models. Journal of Hydrology, 604, pp 127-134
- Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F., Dutta, D., Kim, S. J. E. M. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. Environmental modelling & software, 90, pp 201-216.
- Yin, J., Guo, S., Gentine, P., Sullivan, S. C., Gu, L., He, S., Chen, J., Liu, P. (2021). Does the hook structure constrain future flood intensification under anthropogenic climate warming? Water Resources Research, 57(2), pp 1–22.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۴، شماره ۴۶، شماره پیاپی ۰۴، دی ۱۴۰۴

تحلیل حساسیت مدل دوبعدی HEC-RAS نسبت به معادلات حاکم در پهنه‌بندی

خطر سیل: مطالعه موردی رودخانه خرم آباد

ایرج ویسکرمی^۱، علی حقی زاده^{۲*}، ابوالحسن فتح آبادی^۳

۱. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان

۲. دانشیار، گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان (نویسنده مسئول)

ایمیل: Haghizadeh.a@lu.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0928-827X>

۳. دانشیار گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۹ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۲/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱ واژه‌های کلیدی: مدل HEC-RAS، حساسیت مدل، عدم قطعیت، معادلات هیدرودینامیکی.	علی‌رغم پیشرفت‌های قابل توجه در مدل‌های هیدرولیکی، عدم درک کامل فرآیندهای سیلاب و تغییرات مکانی - زمانی ورودی‌های مدل (مانند توپوگرافی و زبری سطح)، دقت پیش‌بینی سیلاب را محدود کرده است. در این پژوهش، تأثیر معادلات محاسباتی بر دقت مدل HEC-RAS در تهیه نقشه خطر سیل بررسی شد. به همین منظور، متغیرهای جریان آب برای دبی‌های ۱۵، ۳۴ و ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه در یک بازه ۳ کیلومتری از رودخانه پایین‌دست شهر خرم‌آباد شبیه‌سازی شدند. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که این مدل به عواملی نظیر ضریب زبری مانینگ، ابعاد شبکه محاسباتی و روش حل معادلات حاکم بر جریان حساسیت بالایی دارد. در میان خصوصیت‌های هیدرولیکی مختلف، تراز سطح آب کمترین حساسیت را نسبت به معادلات محاسباتی نشان داد. عملکرد مدل در شبیه‌سازی جریان اندازه‌گیری‌شده در ماه فروردین و آبان ۱۴۰۳، با استفاده از روش حل موج پخشیده، به مراتب بهتر بود. در مقابل، برای سیلاب فروردین ۱۳۹۸، روش حل معادلات موج دینامیک نتایج بهتری را ارائه داد. تحلیل‌های انجام‌شده از طریق ارزیابی پارامترهای اندازه‌گیری‌شده (عمق، سرعت و عرض گسترش جریان) و نتایج شبیه‌سازی چهار مقطع مشاهداتی، با استفاده از شاخص‌های آماری RMSE و MAPE انجام گردید. نتایج نشان داد که در اکثر مقاطع، سیلاب به کرانه‌ها گسترش یافته و در مقطع پل (مقطع D) به دلیل محدودیت عرضی، عمق و سرعت بیشتری به ثبت رسیده است. به‌طورکلی، در شرایطی که کانال مقطع پر ظرفیت مناسبی برای دبی ورودی داشته باشد، روش حل موج پخشیده انتخاب بهتری است. در مقابل، برای دبی‌های با دوره بازگشت بالا و در شرایطی که جریان به سمت سیلاب‌دشت گسترش می‌یابد، انتخاب معادلات موج دینامیک برتر خواهد بود.

استناد: ویس کرمی، ایرج، حقی زاده، علی و فتح آبادی، ابوالحسن. (۱۴۰۴). تحلیل حساسیت مدل دوبعدی HEC-RAS نسبت به

معادلات حاکم در پهنه‌بندی خطر سیل: مطالعه موردی رودخانه خرم‌آباد. *مخاطرات محیط طبیعی*. ۱۴(۴۶)، ۱۲۵-۱۴۶.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

© نویسنده/ نویسندگان

DOI: 10.22111/jneh.2025.50364.2086



مقدمه

درک بهتر پدیده خطر سیل و پیامدهای بالقوه آن در جامعه، معیاری مهم برای توسعه سیاست‌های کنترل سیل، پروژه‌های کاهش ریسک و انواع دیگر استراتژی‌های مدیریت سیل محسوب می‌شود (آمری و بریتا^۱، ۲۰۲۲؛ شرافتی و همکاران، ۱۳۹۲؛ کریمی و همکاران، ۱۳۹۶). ریسک سیلاب نتیجه ارتباط متقابل بین خطر سیل (ترکیب احتمال و شدت آن) و آسیب‌پذیری انسان‌ها و اموال و دارایی‌های آن‌هاست. هم‌خطر و هم آسیب‌پذیری به نوع سیلاب و فرآیندهای تعیین‌کننده آن وابسته‌اند (ین^۲ و همکاران، ۲۰۲۱). نتایج ریسک سیلاب، پتانسیل پیامدهای ناگوار مرتبط با سیلاب در یک مکان را نشان می‌دهند و استفاده از این نقشه‌ها به همراه ارزیابی‌های اقتصادی به‌عنوان ابزارهای برنامه‌ریزی و حمایت از تصمیم‌گیری به‌کار می‌رود (داله دون و همکاران^۳، ۲۰۱۹). تهیه نقشه خطر سیلاب معمولاً با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و پیمایش میدانی انجام می‌شود. فرآیند تهیه چنین نقشه‌ای از جمع‌آوری اطلاعات تا مدل‌سازی، همراه با یک سری عدم قطعیت‌ها است. روش‌های متداول مدل‌سازی هیدرولیکی – هیدرودینامیکی می‌توانند به دلیل غفلت از منابع عدم قطعیت، منجر به نتایج نادرست شوند (آلفونزو^۴ و همکاران، ۲۰۱۶؛ گارسیا^۵ و همکاران، ۲۰۲۳؛ لی و کیم^۶، ۲۰۲۱؛ اسمیت و جانسون^۷، ۲۰۲۲). با وجود توسعه بسیاری از مدل‌های هیدرولیکی، عدم درک ما از فرآیندهای سیلاب و تغییرات مکانی و زمانی ورودی‌های اصلی مدل و همچنین متغیرهایی مانند توپوگرافی و زبری سطح، مانع از پیش‌بینی بهتر این پدیده‌ها می‌شود. اندازه‌گیری و کاهش عدم قطعیت در مدل‌سازی سیلاب، موضوعی مهم برای بهبود دقت مدل‌سازی و پیش‌بینی سیلاب است (تنگ^۸ و همکاران، ۲۰۱۷؛ پورنی و همکاران، ۱۴۰۰؛ جمال و همکاران، ۱۴۰۰). بنابراین، دقت برنامه‌های کاربردی مدل‌سازی پیامدهای قابل‌توجهی در عملکرد طراحی و مدیریت ریسک سیلاب دارد (مروید^۹ و همکاران، ۲۰۰۸؛ علیان و همکاران، ۱۳۹۸). همچنین، نمی‌توان از عدم قطعیت در استفاده از مدل‌های تحلیل سیلاب اجتناب کرد؛ زیرا مدل‌ها معمولاً تنها ایده‌آل‌های واقعیت را در بر می‌گیرند و ارزش ورودی‌های مدل با دقت مطلق قابل اندازه‌گیری نیست (یوگونگ^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۶). منابع مختلف مولد عدم قطعیت در مدل‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی شامل: عدم قطعیت طبیعی (ذاتی)، عدم قطعیت‌های مربوط به مدل و پارامترها و داده‌های ورودی آن و عدم قطعیت‌های عملکردی هستند (تنگ و همکاران، ۲۰۱۷؛ کو^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۰؛ بهروز و همکاران، ۱۳۹۲). عدم قطعیت‌های طبیعی، مربوط به فرآیندهای تصادفی طبیعی مانند بارش، جریان آشفته رودخانه و انتقال رسوبات است. درحالی‌که عدم قطعیت در مدل ناشی از ساختار ریاضی فرآیندها و ناتوانی معادله‌های مدل در توصیف دقیق سیستم‌های واقعی است. عدم قطعیت پارامترها به عدم دقت در تعیین مقادیر آن‌ها و همچنین عدم قطعیت‌های داده‌ها و اطلاعات ناشی

1 Amrei & Britta

2 Yin

3 Dalledonn

4 Alfonso

5 Garcia

6 Lee & Kim

7 Smith & Johnson

8 Teng

9 Merwade

10 Yeou-Koung

11 Koo

از خطاهای اندازه‌گیری، ناهمگنی داده‌ها و کمبود اطلاعات مرتبط است. در نهایت، عدم قطعیت‌های عملکردی به ساخت و توسعه مدل و همچنین عوامل انسانی مربوط می‌شوند (دیسار^۱ و همکاران، ۲۰۱۹).

تاکنون مطالعات زیادی در رابطه با ارزیابی حساسیت و عدم قطعیت در پهنه‌بندی سیل انجام شد است. در اینجا به برخی از آنها اشاره می‌شود. هیسپیس گارسیا^۲ و همکاران (۲۰۲۵)، در پژوهشی یک شبکه عصبی عمیق (DNN) آموزش دیده آزمایشگاهی را ارائه دادند که با استفاده از آزمایش‌های فلولم توسعه یافته است تا n مانینگ را بر اساس داده‌های ابر نقطه‌ای (PC) تخمین بزند. در این پژوهش DNN بر روی کامپیوترهای شخصی لیدار دنیای واقعی مستقر شد تا n مانینگ را تحت رویدادهای طوفانی منظم و شدید مستقیماً تخمین بزند و قابلیت‌های مدل‌سازی بهبودیافته را در هر دو مدل هیدرودینامیکی یک‌بعدی و دوبعدی نشان دهد. براساس نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که مقادیر لیدار n مانینگ، هم مدل‌های نظارتی و هم پیش‌بینی‌های مربوط به رویدادهای طوفان شدید را بهبود می‌بخشد، درحالی‌که هم‌زمان مسیری را برای استانداردسازی تخمین‌های FFF فراهم می‌کند. رامپینلی^۳ و همکاران (۲۰۲۴)، در مطالعه‌ای به ارائه یک چارچوب یکپارچه، برای بررسی مناطق سیل‌زده با استفاده از رویکرد بیزی پرداختند. این رویکرد شامل مراحل برای کالیبره کردن داده‌های SRTM و تعیین عمق‌سنجی رودخانه در زیر WSE بود. نتایج نشان‌دهنده مزایای استفاده از DEM‌های کالیبره‌شده SRTM برای نقشه‌برداری سیل را صرف‌نظر از اینکه آیا مناطق سیل‌زده مستقیماً از پیش‌بینی‌های WSE‌ها روی زمین یا بر اساس شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی استخراج شده‌اند، بودند. یل‌دیریم^۴ و همکاران (۲۰۲۲)، ارزیابی خطر سیل و تعیین کمیت در سطح جامعه را در ایالت آیووا آمریکا انجام داد. در این مطالعه، نقشه‌های دقیق سیل و مجموعه داده‌ها برای بسیاری از جوامع در آیووا جمع‌آوری شد تا ارزیابی خطر سیل در مقیاس بزرگ انجام شود. نتایج نشان داد که جوامع شرقی آیووا مستعد خطر بالای تلفات مستقیم سیل هستند. پنگ و ژانگ^۵ (۲۰۲۲) ارزیابی خطر سیل شهری بر اساس وزن ترکیبی نظریه بازی را در شهر ژنگزو انجام دادند. آن‌ها برای تسهیل تدوین استراتژی‌های بهتر پیشگیری از سیل و کاهش بلایا، یک مدل جدید ارزیابی خطر سیل شهری پیشنهاد شد که در آن شاخص ارزیابی خطر سیل و آسیب‌پذیری انتخاب شدند. این مدل بر اساس روش وزن‌دهی ترکیبی نظریه بازی و نقشه ریسک بر اساس پلتفرم GIS ایجاد شد. مدل با مقایسه نتیجه ارزیابی با اطلاعات رخدادهای قبل در شهر ژنگزو تأیید شد. نتایج نشان داد که وزن‌دهی ترکیبی تئوری بازی AHP-CRITIC نسبت به روش‌های وزن‌دهی AHP و AHP-EWM برای تعیین وزن معقول‌تر است. مناطق پرخطر و بسیار پرخطر بیشتر در منطقه جین‌شوئی با ارتفاع کمتر و بالاترین توسعه اقتصادی پراکنده شده‌اند. اسمیت و جانسون (۲۰۲۲)، به بررسی عدم قطعیت در پیش‌بینی سیلاب بر اساس مدل‌های هیدرولیکی و شناسایی منابع مختلف عدم قطعیت پرداختند. این پژوهش نشان داد که عدم قطعیت در پارامترهای ورودی، داده‌های تاریخی و روش‌های محاسبات هیدرولیکی نقش قابل‌توجهی در پیش‌بینی‌های سیلاب دارد. در این پژوهش توصیه شده است که برای بهبود دقت پیش‌بینی‌های سیلاب، توسعه و اعتبارسنجی مدل‌ها باید با توجه به عدم قطعیت‌های موجود انجام شود.

1 Dysarz

2 Haces-Garcia

3 Rampinelli

4 Yildirim

5 Peng and Zhang

مغربی و اسلامی تبار (۱۴۰۳) به شبیه سازی سیلاب ۲۵ ساله در حوضه کارده با استفاده از مدل HEC-RAS پرداختند. نتایج حاصل نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل در شبیه‌سازی سیلاب با استفاده از روش حل معادلات موج دینامیک نسبت به روش حل موج پخشیده بود. به‌طوری‌که درصد خطا، ضریب تعیین و ضریب نش‌ساتکلیف در روش موج دینامیک به‌ترتیب برابر با ۵، ۰/۹۵ و ۰/۹۳ و در روش موج پخش شونده به‌ترتیب برابر با ۳۴، ۰/۹۶ و ۰/۶۴ بود. علیان و همکاران (۱۳۹۸) به تحلیل عدم قطعیت در برآورد خسارت مورد انتظار سالیانه به‌منظور ارزیابی ریسک سیلاب (مطالعه موردی: دشت کوهپایه - سگری از حوضه آبخیز زاینده‌رود) پرداخته‌اند. در این پژوهش عدم قطعیت به روش مونت کارلو برآورد شده است. در مدل هیدرولوژیکی احتمال رخداد سیلاب با استفاده از داده‌های درازمدت دبی حداکثر محاسبه و مدل هیدرولیکی بازه مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و نیز بهره‌گیری از نرم‌افزار گوگل ارث بررسی شد. مقدار خسارت با توجه به کاربری اراضی محدوده مشخص و با توسعه یک کد کامپیوتری در محیط متلب و فراخوانی خروجی مدل‌های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و اقتصادی، با لحاظ کردن عدم قطعیت به روش مونت کارلو محاسبه و بررسی شد. بر اساس نتایج آنالیز عدم قطعیت، دبی جریان بیشترین تأثیر در بروز عدم قطعیت را نشان داد. موسوی حسینی و همکاران (۱۴۰۰) در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر توان تفکیک DEM و ضریب زبری مانینگ بر روی کارایی مدل HEC-RAS-WMS در تعیین پهنه‌های مخاطره سیلاب رودخانه کشکان پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که افزایش توان تفکیک مدل رقومی ارتفاعی در تعیین پهنه‌های آسیب‌پذیر سیلاب در دقت این مدل بسیار مؤثر بوده و برعکس کاهش آن نیز موجب کاهش دقت محدوده‌ها شده است، به‌طوری‌که با واقعیت محیطی منطبق نیست. علاوه بر این مدل HEC-RAS-WMS به تغییرات ضریب زبری مانینگ حساس بوده و بایستی برای تعیین پهنه‌های سیلاب در این مدل به تغییرات ضریب زبری و تعیین آن دقت شود. بهروز و همکاران (۱۳۹۳)، به تحلیل حساسیت عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و اقتصادی در طراحی سیستم‌های کنترل سیلاب، در محدوده‌ی شمال شیراز در مجاورت رودخانه خشک معالی‌آباد پرداختند. به این منظور طراحی گوره‌ها را با استفاده از یک مدل بهینه‌سازی غیرخطی بر اساس تحلیل ریسک در نرم‌افزار لینگو مورد بررسی قرار دادند. هر یک از این عدم قطعیت‌ها یک بار به‌طور جداگانه و بار دیگر با هم در مدل وارد شده‌اند. نتایج نشان داد که اعمال عدم قطعیت هیدرولوژیکی در طراحی مؤثرتر از هیدرولیکی و آن هم مهم‌تر و مؤثرتر از اقتصادی است و برای اطمینان و رضایت از عملکرد بهتر سیستم در زمان آینده، لازم است حداقل این عدم قطعیت در طراحی منظور گردد.

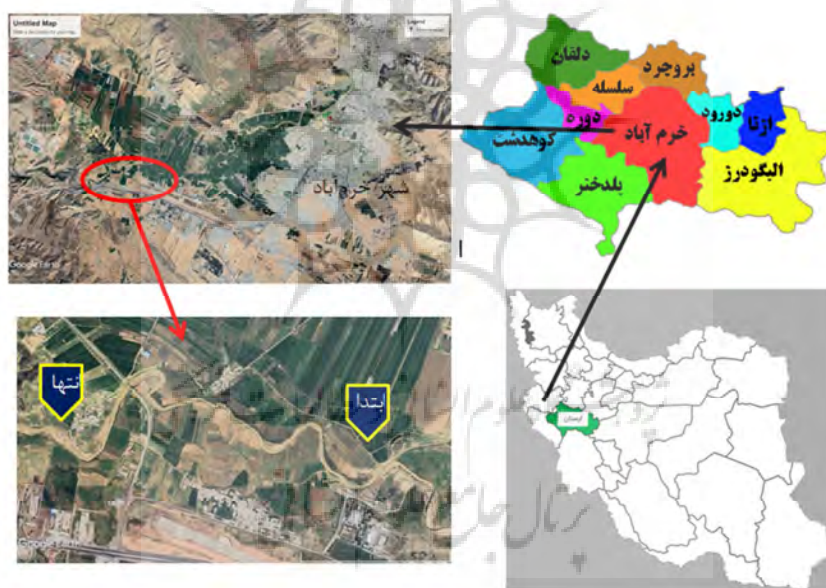
از مهم‌ترین منابع عدم قطعیت در نتایج مدل‌های هیدرولیکی، عدم قطعیت مرتبط با مدل و پارامترهاست. تعیین معادله محاسباتی مدل از حساس‌ترین عوامل در این بخش به‌شمار می‌آید. این پژوهش با تمرکز بر تحلیل حساسیت مدل دو بعدی HEC-RAS نسبت به معادلات محاسباتی (موج پخشیده و موج کاملاً دینامیک)، به بررسی تأثیر این معادلات بر دقت پیش‌بینی خطر سیل در بازه‌ای ۳ کیلومتری از رودخانه پایین‌دست شهر خرم‌آباد می‌پردازد. نوآوری اصلی این پژوهش در ارزیابی جامع عدم قطعیت‌های مرتبط با انتخاب معادلات محاسباتی و پارامترهای مدل (مانند ضریب زبری) است که کمتر در مطالعات داخلی مورد توجه قرار گرفته است. این پژوهش با شبیه‌سازی جریان‌های دبی‌های مختلف (از جمله دبی‌های پایین و بالا)، نشان می‌دهد که انتخاب معادله محاسباتی مناسب به شدت به شرایط جریان و مورفولوژی منطقه وابسته است. این یافته‌ها می‌تواند به بهبود دقت مدل‌های هیدرولیکی در

پیش‌بینی سیلاب و طراحی راهکارهای مدیریت ریسک کمک کند و به‌عنوان مرجعی برای مطالعات آتی در این حوضه مورد استفاده قرار گیرد.

داده‌ها و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

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



شکل ۱: موقعیت بازه مکانی مورد مطالعه

مدل عددی هیدرودینامیکی مورد استفاده در این پژوهش

مدل‌های دوبعدی نشان‌دهنده جریان سیلاب به‌صورت زمینه دوبعدی است، با فرض اینکه بعد سوم - عمق آب - در مقایسه با دو بعد دیگر، کم عمق است. مدل‌های هیدرودینامیک دو بعدی، کاربردی‌ترین مدل‌ها برای تهیه نقشه سیل و مطالعات برآورد خطر سیل می‌باشند (روبرتس و همکاران^۱، ۲۰۱۵). بنابراین، در این پژوهش از مدل دو بعدی HEC-RAS استفاده و مورد ارزیابی قرار گرفته است. مدل HEC-RAS 2D، با عنوان HEC-RAS 5.0.1 در فوریه سال ۲۰۱۶ توسعه داده شده است. این مدل، علاوه بر مدل‌سازی جریان‌های ماندگار، غیر ماندگار، شبه غیر ماندگار،

سازه‌های تقاطعی و جانبی به صورت یک‌بعدی، از توانایی لازم برای مدل‌سازی دوبعدی جریان به‌ویژه در سیلاب‌دشت‌ها نیز برخوردار می‌باشد (پوینز و تیم^۱، ۲۰۱۹ و کاستیل^۲ و همکاران، ۲۰۲۰). در مدل HEC-RAS از معادلات دوبعدی سنت و نانت (با اضافات اختیاری مومنوم برای اثرات آشفتگی و کوریولیس^۳) و معادلات موج پخشیدگی دوبعدی برای شبیه‌سازی جریان استفاده می‌کنند. به‌طور کلی معادلات موج پخشیدگی دوبعدی موجب اجرای مدل با سرعت بیشتری می‌شود و پایداری آن به مراتب بیشتر خواهد بود. معادلات دوبعدی سنت و نانت دوبعدی برای محدوده وسیعی از مسائل قابل کاربرد هستند. هر چند در بسیاری از مدل‌سازی‌ها، معادلات موج پخشیدگی در مقایسه با معادلات موج دیفیوژن نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌دهند. در مدل دوبعدی هک رس این امکان وجود دارد تا بتوان با داده‌های در دسترس و نوع پروژه موردنظر یکی از دو روش را انتخاب نمود (برونر^۴، ۲۰۱۶). معادلات آب‌های کم عمق^۵ در مدل HEC-RAS در زیر ارائه شده است:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = r \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) = - \frac{n^2 q g \sqrt{p^2 + q^2}}{h^2} - gh \frac{\partial H}{\partial y} + qf + \frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{yy}) \quad (3)$$

که در آن $H(x,y,t) = z(x,y) + h(x,y,t)$ ارتفاع سطح (m)، Z : ارتفاع سلول در مختصات کاترین x و y و h : عمق آب (m)، $p = hu$ and $q = hv$ جریان ویژه در جهت x و y ($m^2 s^{-1}$)، u و v به ترتیب سرعت‌ها در x و y : شبکه باران^۶ (m) ، g : شتاب ثقل (ms^{-2})، n : ضریب زبری مانینگ^۸ ($s m^{-1/3}$)، ρ چگالی آب^۹ ($kg m^{-3}$)، τ_{xx} ، τ_{xy} و τ_{yy} : اجزای فشار تانسور^{۱۰}، f : پارامتر کوریولیس^{۱۱} (s^{-1}). زمانی که موج دیفیوژن انتخاب شده است.

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

در گام نخست، به منظور تهیه نقشه توپوگرافی و لایه رقومی ارتفاعی (DEM) بزرگ مقیاس برای بازه مکانی مورد مطالعه، از تصاویر ماهواره‌ای Worldview سال ۲۰۲۴ دریافت‌شده از شرکت Digital Globe به صورت استریو با قدرت تفکیک مکانی نیم متر استفاده شد و در ادامه لایه یادشده با استفاده از تعدادی نقاط کنترلی با دوربین نقشه‌برداری میدانی، صحت‌سنجی نقشه یادشده انجام شد (شکل ۲). پس از ورود داده‌های هندسی به محیط نرم‌افزار و تعیین مرزها، محدوده موردنظر با استفاده از روش‌های جبری و محاسباتی شبکه‌بندی شد. ابعاد بهینه شبکه بر مبنای دقت لازم و زمان اختصاص‌یافته به منظور انجام محاسبات، انتخاب شده است (شکل ۳).

1 Pinos and Timbe

2 Costabile

3 Turbulence and Coriolis

4 Brunner

5 Shallow Water Equations

6 Cartesian coordinate

7 Net rain

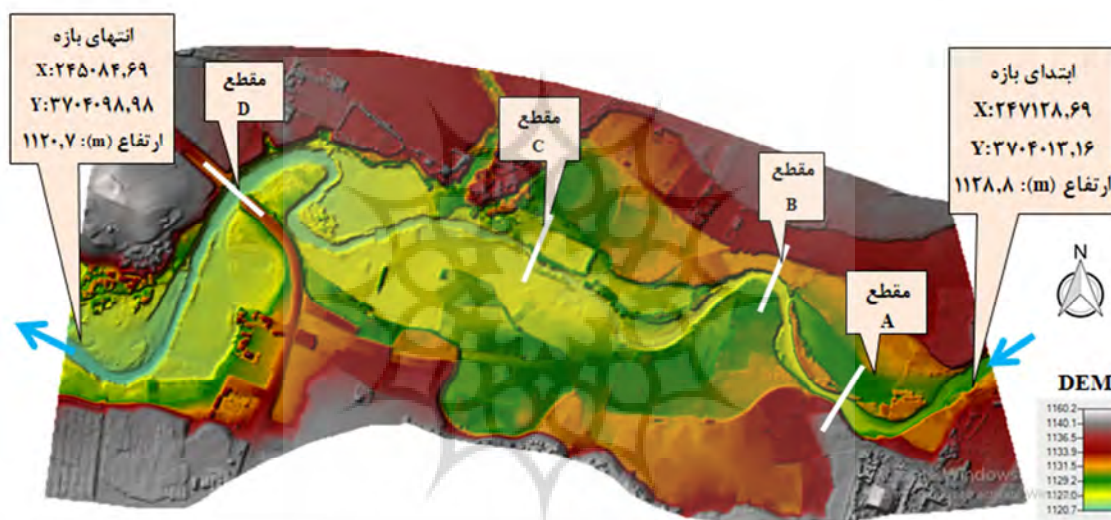
8 Manning's roughness coefficient

9 Water density

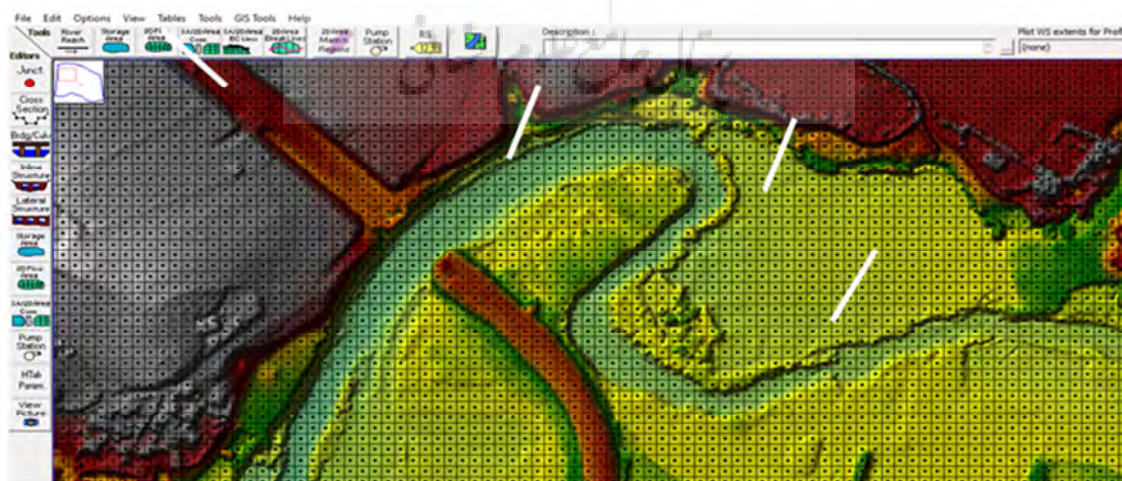
10 Stress tensor

11 Coriolis

به منظور ارزیابی واسنجی و صحت‌سنجی نتایج مدل در چهار مقطع از مقاطع نقشه‌برداری شده به اندازه‌گیری پارامترهای جریان (سرعت، عمق و عرض گسترش جریان) پرداخته شد و بیشترین تأکید بر روی قوس‌های متوالی رودخانه بود تا بتوان تأثیر جریان‌های ثانویه و نیروهای گریز از مرکز را بر متغیرهای جریان بررسی کرد. برای اندازه‌گیری سرعت جریان و عمق آب از دستگاه سرعت‌سنج مولینه و شاخص اندازه‌گیری استفاده شد. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، سرعت جریان با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج از ساحل سمت چپ تا راست و از سطح آب تا کف بستر به فواصل ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ از عمق، اندازه‌گیری شد (علیزاده، ۱۳۸۸). نظر به اینکه در جریان‌های سیلابی مقدار سرعت در نقاط مختلف عرض رودخانه و همچنین در اعماق آب متغیر و همراه با تلاطم است، سرعت متوسط در طول هر مقطع (با توجه به عرض هر مقطع) حداقل در شش نقطه و حداکثر ده نقطه با فواصل مساوی از عمق آب، اندازه‌گیری شد.



شکل ۲: نقشه توپوگرافی / لایه رقومی ارتفاعی (DEM) بزرگ مقیاس بازه مکانی مورد مطالعه



شکل ۳: شبکه محاسباتی مورد استفاده برای شبیه‌سازی دوبعدی توسط HEC-RAS 5.0.7



شکل ۴: نحوه اندازه‌گیری سرعت جریان در بازه مکانی مورد مطالعه

همان‌طور که در جدول ۱ و ۲ مشاهده می‌شود، برای دبی‌های اندازه‌گیری‌شده در ماه فروردین و آبان ۱۴۰۳ به ترتیب با دبی ۳۴ و ۱۵ مترمکعب بر ثانیه، پارامترهایی از قبیل سرعت، دبی و عمق جریان در مقاطع اندازه‌گیری‌شده ارائه شده است.

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

مقاطع اندازه‌گیری شده	سرعت در عمق ۰/۲ (m/s)	سرعت در عمق ۰/۴ (m/s)	سرعت در عمق ۰/۶ (m/s)	سرعت در عمق ۰/۸ (m/s)	سرعت متوسط (m/s)	عمق متوسط جریان (m)	دبی جریان (m ³ /s)
مقطع (A)	۲/۴	۱/۸	۱/۲	۰/۸۵	۱/۵	۰/۸۸	۳۴
مقطع (B)	۲/۱	۱/۶۸	۱/۱	۰/۷۳	۱/۲۵	۰/۹۲	۳۴
مقطع (C)	۲/۶۵	۲	۱/۲	۱	۱/۶۲	۱/۰۵	۳۴
مقطع (D)	۱/۸۷	۱/۱۶	۰/۹۸	۰/۶۳	۱/۱	۰/۸۵	۳۴

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

مقاطع اندازه‌گیری شده	سرعت در عمق ۰/۲ (m/s)	سرعت در عمق ۰/۴ (m/s)	سرعت در عمق ۰/۶ (m/s)	سرعت در عمق ۰/۸ (m/s)	سرعت متوسط (m/s)	عمق متوسط جریان (m)	دبی جریان (m ³ /s)
مقطع (A)	۱/۳۵	۰/۹۵	۰/۸	۰/۷۲	۰/۹۶	۰/۵	۱۵
مقطع (B)	۱/۲	۰/۹۲	۰/۷۴	۰/۶۸	۰/۹	۰/۶۲	۱۵
مقطع (C)	۱/۴	۱	۰/۷۷	۰/۷۴	۱/۰۵	۰/۷۴	۱۵
مقطع (D)	۱/۱	۰/۸۲	۰/۶۴	۰/۵۷	۰/۸	۰/۴۳	۱۵

تعیین ضریب زبری برای قلمرو بازه مکانی مورد مطالعه

در این پژوهش به منظور تعیین ضریب زبری، ابتدا بر اساس بازدیدهای صحرایی از رودخانه و مشاهده تغییرات پارامترهای مؤثر در تعیین ضریب زبری، محدوده مورد مطالعه بر اساس وضعیت مورفولوژیکی و کاربری‌ها همگن‌بندی شدند. سپس ضریب زبری کناره‌های هر بازه با توجه به عکس‌ها و توصیفات مندرج در مرجع چاو و همچنین سایر کتب و مراجع دیگر مثل مرجع USGS، تعیین شده‌اند. مقادیر ضریب زبری بستر رودخانه با توجه به

تمام مؤلفه‌های روش کاون، برای محدوده‌های مختلف تعیین گردید. روش معروف کاون (Cowen) نقش کلیه عوامل موثر در برآورد ضریب زبری را در محاسبات خود وارد می‌کند (آرسمنت و اشناپدر^۱، ۱۹۸۹). نحوه برآورد ضریب زبری مانینگ در این روش با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \times m \quad (4)$$

در این رابطه n : ضریب زبری مانینگ ترکیبی، n_b : ضریب زبری پایه با توجه به جنس بستر و دانه‌بندی مصالح کف رودخانه در حالت رودخانه صاف و مستقیم، n_1 : ضریب زبری مربوط به نامنظمی در سطح بستر رودخانه، n_2 : ضریب زبری مربوط به تغییرات سطح مقطع رودخانه، n_3 : ضریب زبری مربوط به وجود موانع در مسیر رودخانه، n_4 : ضریب زبری مربوط به وضعیت پوشش گیاهی و m : ضریب زبری مربوط به درجه پیچ و خم مسیر رودخانه است (ترین و همکاران^۲، ۲۰۲۱).

تعیین شرایط مرزی

شرایط مرزی شامل جریان‌های ورودی و خروجی بازه‌های مکانی می‌باشد. با توجه به ماندگاری یا غیرماندگاری جریان و اطلاعات در دسترس (هیدروگراف دبی، تراز سطح آب و رابطه دبی-تراز سطح آب) به‌عنوان شرایط مرزی جریان در نظر گرفته می‌شوند. در بازه مورد مطالعه، شرایط مرزی برای شبیه‌سازی جریان رودخانه در شرایط غیرماندگار از آمار رخدادهای مشاهداتی ایستگاه هیدرومتری چمانجیر برای سه واقعه در نظر گرفته شده است که شامل:

۱- واقعه سیل فروردین ۱۳۹۸

۲- دبی جریان آب مورخ ۱۴۰۳/۰۱/۲۴

۳- دبی جریان آب مورخ ۱۴۰۳/۰۸/۲۵

واسنجی مدل

در شبیه‌سازی جریان سیلابی، ضریب زبری مانینگ رودخانه حساس‌ترین پارامتر محسوب می‌شود. برای شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده مدل دو بعدی HEC-RAS در بازه مورد نظر، مقادیر یادشده رودخانه و دشت سیلابی لازم است با تنظیم مجموعه‌ای از پارامترها تابع هدف بهینه‌سازی شوند (ترین و همکاران^۲، ۲۰۲۱). همچنین، کمبود و عدم دسترسی به سوابق ثبت‌شده سیل، واسنجی مدل را با مشکل جدی مواجه می‌نماید، بنابراین، بر اساس داده‌های داغاب، عمق سیل و سطح بالای تراز سیل انجام می‌شود (پوینز و تیم، ۲۰۱۹). در این پژوهش واسنجی مدل با بهینه‌سازی مقادیر ضریب زبری مانینگ برای رخداد سیل فروردین سال ۱۳۹۸ (حداکثر پیک روزانه معادل ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه) بر اساس تراز داغاب و عرض گسترش سیل و همچنین، برای هیدروگراف جریان آب در فروردین و آبان ۱۴۰۳ بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی متغیرهای جریان شامل عمق و سرعت در چند مقطع از باز مکانی مورد مطالعه انجام شد.

1 Arcement and Schneider

2 Trinh

آنالیز حساسیت مدل HEC-RAS نسبت به معادلات محاسباتی

در این پژوهش علی‌رغم شبیه‌سازی و تحلیل نقشه خطر سیل، اما تمرکز اصلی روی آنالیز حساسیت مدل HEC-RAS نسبت به معادلات محاسباتی است. بنابراین در این پژوهش سعی می‌گردد تا ضمن بیان منابع عدم قطعیت، به ارزیابی حساسیت مدل دو بعدی HEC-RAS نسبت به معادلات محاسباتی پرداخته شود و معادله‌ای که انطباق بهتری با واقعیت داشته باشد انتخاب می‌گردد.

ارزیابی کارایی مدل

در ادامه، نتایج به‌دست‌آمده از مدل با داده‌های اندازه‌گیری‌شده در طبیعت (در حالت میان‌گیری‌شده از داده‌ها) مقایسه شد تا دقت مدل در شبیه‌سازی سرعت، عمق و عرض گسترش سیل آشکار گردد. برای این منظور از دو روش آماری برای ارزیابی دقت مدل استفاده شد. دو روش عبارتند از جذر میانگین مربع خطا (RMSE) و میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) که روابط آنها به شرح ذیل است:

$$R.M.S.E = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_o - Q_e)^2} \quad (5)$$

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

$$M.A.P.E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_t - \hat{y}}{y_t} \right| * 100 \quad (6)$$

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

یافته‌های پژوهش

در این بخش، ابتدا یافته‌های ارزیابی حساسیت مدل دو بعدی HEC-RAS نسبت به معادلات محاسباتی (موج کاملاً دینامیک و موج پخشیده) و همچنین ضریب زبری ارائه شده است و سپس، در بخش نتایج به بررسی بعضی از متغیرهای خروجی از مدل از جمله عمق جریان، سرعت جریان و نقشه خطر سیل برای دو رخداد ۱- سیل فروردین سال ۱۳۹۸ و ۲- جریان آب ثبت‌شده در فروردین سال ۱۴۰۳ در قلمرو بازه مکانی مورد مطالعه پرداخته شده است.

یافته‌های واسنجی و ارزیابی حساسیت مدل دو بعدی HEC-RAS نسبت به معادلات محاسباتی

نتایج شبیه‌سازی سرعت، عمق و عرض گسترش جریان برای دو معادله محاسباتی (موج پخشیده و موج کاملاً دینامیک) در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری‌شده در چهار مقطع مختلف (A, B, C و D) در جداول ۴ و ۵ ارائه شده است. بر اساس جدول ۴، برای دبی‌های اندازه‌گیری‌شده در فروردین و آبان ۱۴۰۳ (به ترتیب ۳۴ و ۱۵ مترمکعب بر ثانیه)، مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط معادله موج پخشیده (با ضریب زبری در دامنه ۰/۰۳۳ تا ۰/۰۶۳) بیشترین تطابق را با داده‌های مشاهداتی (شامل سرعت، عمق و عرض گسترش جریان) در هر چهار مقطع نشان می‌دهند. این نتایج حاکی از آن است که معادله موج پخشیده برای شرایط جریان با دبی پایین‌تر عملکرد بهتری دارد. چراکه با وجود اینکه هر دو مدل (پخشیده و دینامیک) توانایی خوبی در پیش‌بینی سرعت جریان دارند، ولی معادله موج پخشیده در

مواردی نزدیک‌تر به مقادیر اندازه‌گیری است. مدل‌های دینامیک، در چند مورد، سطوح سرعت پیش‌بینی بالاتر از مقدار اندازه‌گیری شده دارند که نشان‌دهنده حساسیت بیشتر به شرایط دینامیکی دقیق‌تر است.

در جدول ۵، مقایسه عمق جریان آب در چند مقطع مختلف برای سه حالت دبی متفاوت (۳۴، ۱۵ و ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه) و بر اساس مدل‌های مختلف (معادله موج پخشیده و کاملاً دینامیک) نشان داده شده است. برای واقعه سیلاب فروردین ۱۳۹۸ با دبی ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه، معادله موج کاملاً دینامیک (با همان دامنه ضریب زبری) نزدیک‌ترین مقادیر پیش‌بینی شده را برای متغیرهای عمق و عرض گسترش جریان در هر چهار مقطع ارائه می‌دهد. تاثیر ضریب زبری در نتایج قابل‌توجه است و باید به‌صورت مناسب تنظیم شود. این یافته نشان می‌دهد که برای دبی‌های بالا و شرایط جریان پیچیده، معادله موج کاملاً دینامیک از دقت بیشتری برخوردار است. علاوه بر این، تحلیل نتایج مدل نشان می‌دهد که تغییرات عمق جریان نسبت به سرعت جریان، حساسیت کمتری به نوع معادله محاسباتی دارد. این موضوع به دلیل ویژگی‌های مورفولوژیکی بازه مورد مطالعه (که دارای ساختار پیچانرودی است) قابل‌توجه است. نتایج حاصل از معادلات محاسباتی با نتایج مغربی و اسلامی تبار (۱۴۰۲) مبنی بر اینکه معادلات موج دینامیک پاسخ دقیق‌تری ارائه می‌دهند، مطابقت دارد. مغربی و اسلامی تبار (۱۴۰۲) با توجه به نتایجی که به‌دست آوردند، حل معادلات به روش موج دینامیک را مبنای محاسبات قرار دادند.

در مناطق قوس‌دار رودخانه، توزیع سرعت جریان تحت تأثیر نیروهای گریز از مرکز، نوسانات قابل‌توجهی در عرض و عمق مقطع نشان می‌دهد. این نوسانات باعث می‌شود که سرعت جریان نسبت به تغییرات معادلات محاسباتی حساس‌تر باشد، در حالی که عمق جریان از ثبات نسبی برخوردار است. در مجموع، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که انتخاب معادله محاسباتی مناسب به‌شدت به شرایط جریان (دبی و مورفولوژی منطقه) وابسته است. برای دبی‌های پایین، معادله موج پخشیده عملکرد بهتری دارد، درحالی‌که برای دبی‌های بالا و شرایط جریان پیچیده، معادله موج کاملاً دینامیک گزینه مناسب‌تری است. این یافته‌ها می‌تواند به بهبود دقت مدل‌های هیدرولیکی در پیش‌بینی سیلاب و مدیریت ریسک کمک کند.

جدول ۴: مقایسه پارامتر سرعت جریان (m/s) در حالت تغییر ضریب زبری و معادلات محاسباتی برای دبی ۳۴ و ۱۵ مترمکعب بر ثانیه

واقع و مقدار سیل	مقاطع اندازه‌گیری شده	پارامتر متوسط سرعت جریان اندازه‌گیری شده (m/s)	پارامتر سرعت جریان (V) پیش‌بینی شده توسط مدل (m/s)			
			معادله موج پخشیده		معادله موج کاملاً دینامیک	
			زبری (۰/۰۳۴-۰/۰۶۳)	زبری (۰/۰۳۳-۰/۰۵۲)	زبری (۰/۰۳۴-۰/۰۶۳)	زبری (۰/۰۵۲-۰/۰۳۳)
دبی ۳۴ مترمکعب بر ثانیه ثبت شده در فروردین سال ۱۴۰۳	A مقطع	۱/۵	۱/۵۵	۱/۶۲	۱/۳۳	۱/۳۵
	B مقطع	۱/۲۵	۱/۳	۱/۴۱	۱/۰۵	۱/۱۱
	C مقطع	۱/۶۲	۱/۷۶	۱/۸	۱/۴۵	۱/۵
	D مقطع	۱/۱	۱/۲	۱/۲۲	۰/۸۲	۰/۹۰
دبی ۱۵ مترمکعب بر ثانیه ثبت شده در آبان سال ۱۴۰۳	A مقطع	۰/۹۶	۱/۰۹	۱/۳۴	۰/۶۲	۰/۷۵
	B مقطع	۰/۹	۱/۰۴	۱/۲۵	۰/۵۸	۰/۶
	C مقطع	۱/۰۵	۱/۱۶	۱/۳۳	۰/۷۸	۰/۸۱
	D مقطع	۰/۸	۰/۷۵	۱/۰۵	۰/۵۶	۰/۶۸

جدول ۵: مقایسه پارامتر عمق جریان (m) در حالت تغییر ضریب زبری و معادلات محاسباتی

واقع و مقدار سیل	مقاطع اندازه‌گیری- شده	پارامتر متوسط عمق و عرض گسترش آب اندازه‌گیری- شده (m)		پارامتر عمق آب پیش‌بینی شده توسط مدل (m)			
				معادله موج پخشیده		معادله موج کاملاً دینامیک	
		عرض	عمق	زبری (-۰/۰۶۳) (۰/۰۳۴)	زبری (-۰/۰۵۲) (۰/۰۳۳)	زبری (-۰/۰۶۳) (۰/۰۳۴)	زبری (-۰/۰۵۲) (۰/۰۳۳)
دبی ۳۴ مترمکعب بر ثانیه (فروردین سال ۱۴۰۳)	A مقطع	۳۳	۰/۸۸	۰/۸۲	۰/۶۸	۱/۰۵	۱/۰۷
	B مقطع	۲۹	۰/۹۲	۱/۰۳	۰/۷۸	۱/۲۵	۱/۳۲
	C مقطع	۲۲	۱/۰۵	۰/۹۱	۰/۹۳	۱/۱۷	۱/۲۲
	D مقطع	۳۷	۰/۸۵	۰/۸۸	۰/۷۶	۱/۰۲	۱/۱۸
دبی ۱۵ مترمکعب بر ثانیه (آبان سال ۱۴۰۳)	A مقطع	۲۴	۰/۵	۰/۵۶	۰/۳۳	۰/۷۵	۰/۶۷
	B مقطع	۲۱	۰/۶۲	۰/۵۸	۰/۵۱	۰/۸۵	۰/۷۱
	C مقطع	۱۸	۰/۷۴	۰/۶۷	۰/۶۲	۰/۸۲	۰/۸
	D مقطع	۲۷	۰/۴۳	۰/۴۸	۰/۳۹	۰/۵۸	۰/۵۳
دبی ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه (فروردین سال ۱۳۹۸)	A مقطع	۲۵۷	۲/۷۴	۳/۴	۳/۵۵	۲/۹۵	۳/۱
	B مقطع	۴۳۷	۱/۹۵	۲/۳۳	۲/۴۲	۱/۸	۱/۹۲
	C مقطع	۵۹۸	۱/۳	۱/۶۲	۱/۷	۱/۱۵	۱/۲۲
	D مقطع	۵۸	۵/۰۶	۵/۸۵	۶	۴/۶۵	۵/۸

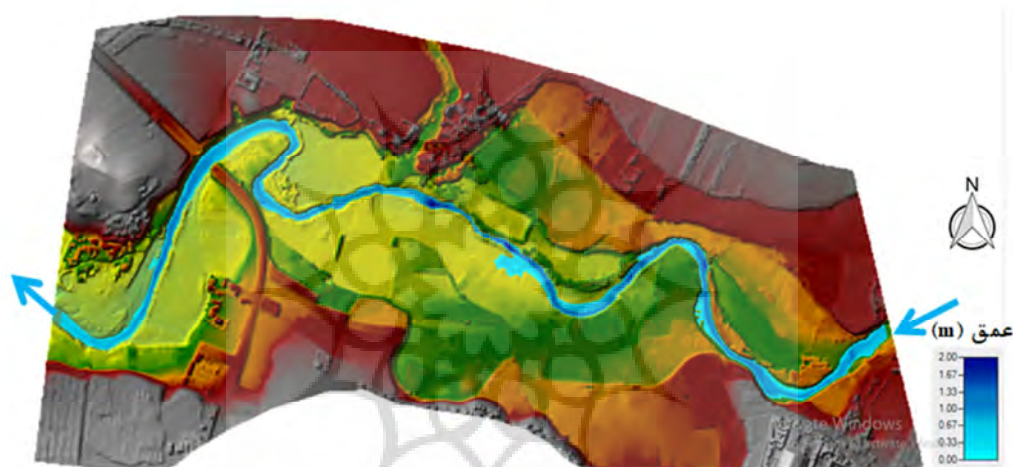
نتایج و بحث

نتایج الگوی متغیرهای جریان

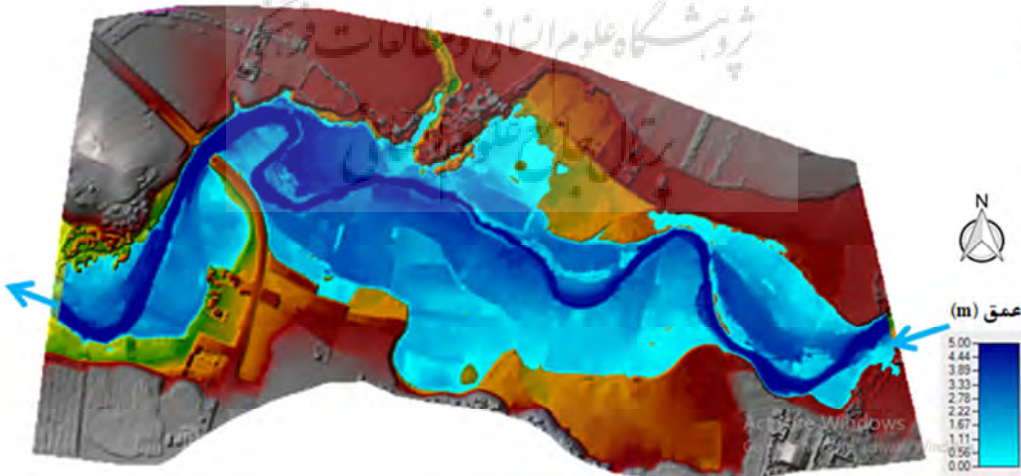
تحلیل نتایج متغیر عمق آب

در این بخش، نتایج تغییرات عمق جریان برای دو رویداد (دبی ۳۴ و ۱۰۰۰ متر مکعب بر ثانیه) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، برای دبی ۳۴ مترمکعب (فروردین ۱۴۰۳)، بازه مکانی مورد مطالعه ظرفیت عبور این دبی را دارد. بیشترین میزان عمق جریان به علت تنگ شدی کانال در چند مقطع و همچنین نیروی گریز از مرکز در قوس مقعر، معادل ۲ متر است. به دلیل وجود انحنای زیاد در قوس‌های بازه مورد مطالعه، حداکثر تغییرات جریان (افزایش سرعت)، در نیمه دوم قوس صورت می‌گیرد. در این محدوده نیروی گریز از مرکز بر جریان اثر نموده و باعث ایجاد شیب عرضی در سطح آب می‌گردد که در نتیجه شیب عرضی سطح آب در قوس خارجی بالا رفته و در قوس داخلی کاهش می‌یابد. همچنین، کاهش عرض در نیمه دوم قوس اول سبب افزایش عمق شده است و باعث بالا رفتن توان حمل رسوب و بارکف و در نهایت موجب آب‌شستگی زیاد در بستر می‌شود. به‌طور کلی از قوس دوم به سمت پایین دست ضریب زبری بازه مورد مطالعه کاهش یافته و سرعت جریان افزایش می‌یابد. در قوس سوم، کاهش ضریب زبری و افزایش انحنای قوس باعث می‌شود که در محل وقوع خم و کمی بعد از آن، مقدار حداکثر سرعت، متمایل به دیواره خارجی (مقعر) ایجاد شود که سبب افزایش ارتفاع در قوس مقعر می‌گردد.

همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، برای دبی ۱۰۰۰ مترمکعب (واقعه فروردین ۱۳۹۸)، بیشترین میزان عمق جریان در محل پل (مقطع D) معادل ۵ متر رخداد است. کل قلمرو بازه مورد مطالعه ظرفیت عبور این سیل را ندارد، به‌طوری‌که سیل در ۹۵ درصد کرانه‌ها لبریز و به دشت سیلابی گسترش پیدا کرده است. بیشترین عرض گسترش سیل به طول حدود ۶۰۰ متر در مقطع C اتفاق افتاده است و کمترین میزان گسترش سیل به علت وجود عامل محدودیت عرضی در محل پل (مقطع D) می‌باشد. در واقع گسترش سیلاب در این حالت عرض زیادی دارد (حدود ۶۰۰ متر) و محدودیت عرضی در محل پل، سبب کاهش گسترش سیلاب در آن محل می‌شود. این تحلیل نشان می‌دهد که جریان و رفتار سیلاب در اثر هندسه قوس‌ها، زبری، انحنای آنها و محدودیت‌های عرضی بسیار حساس است و در حجم‌های زیاد، تغییرات وسیع‌تر و قابل توجه‌تری در الگوهای جریان رخ می‌دهد.



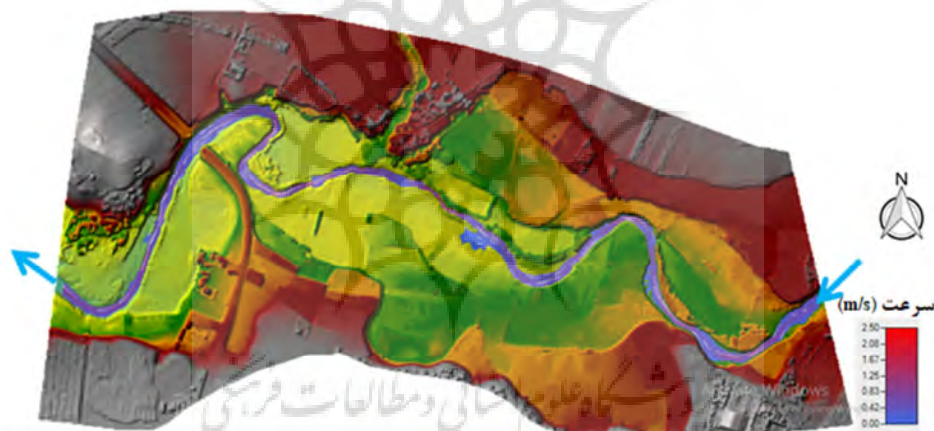
شکل ۵: تصویر توزیع متغیر عمق جریان برای دبی ۳۴ مترمکعب بر ثانیه (رخداد فروردین ۱۴۰۳)



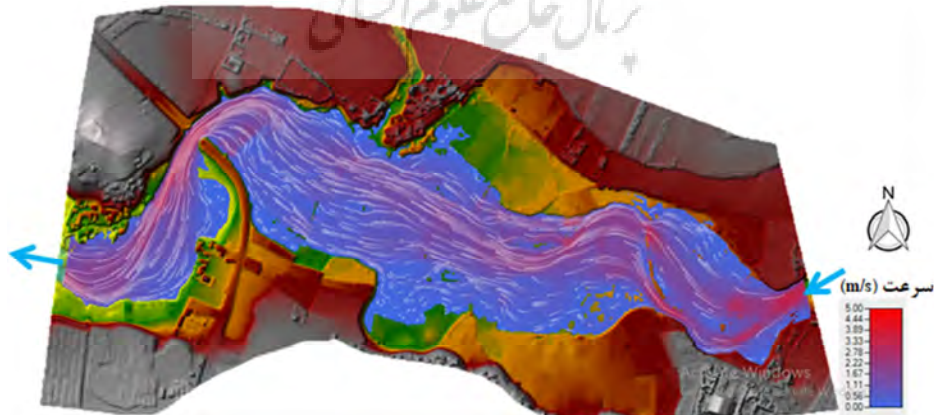
شکل ۶: تصویر توزیع متغیر عمق جریان برای دبی ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه (رخداد فروردین ۱۳۹۸)

تحلیل نتایج متغیر سرعت جریان آب

تغییرات مقادیر و بردارهای سرعت در طول کانال، برای دو واقعه مورد مطالعه، در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. برای دبی ۳۴ مترمکعب، بیشترین میزان سرعت آب در بازه مستقیم بعد از قوس دوم و وسط کانال به علت وجود عامل محدودیت عرضی و ضریب زبری کم اتفاق می‌افتد. همچنین، در محل قوس‌ها با افزایش انحنای قوس، حداکثر سرعت، متمایل به دیواره خارجی (مقعر) ایجاد شود که سبب افزایش سرعت و ارتفاع در قوس مقعر می‌گردد. این امر نشان‌دهنده تأثیر شکل هندسی قوس بر توزیع سرعت در کانال است. برای دبی ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه با توجه به اینکه سیل به صورت وسیع به کرانه‌ها گسترش یافته است، بنابراین الگوی سرعت آب تحت تأثیر آشفتگی جریان، گرایش، توپوگرافی و موانع در دشت سیلابی می‌باشد. برای این شرایط سرعت جریان آب در قلمرو بازه مورد مطالعه فاقد الگوی پایدار می‌باشد و با تغییرات میزان دبی، الگوی سرعت جریان در کل قلمرو بازه مکانی مورد مطالعه تغییر می‌کند. برای این رخداد بیشترین میزان سرعت جریان آب به دلیل عامل محدودیت عرضی در محل پل (مقطع D) می‌باشد. به طور کلی، رفتار سرعت آب در کانال تحت تأثیر عوامل هندسی و جریان‌های سیلابی است. در حالت کم‌دبی تمرکز بر شکل و هندسه ذاتی کانال است، در حالی که در حالت سیلابی، عوامل خارجی و آشفتگی‌ها تغییراتی در الگو ایجاد می‌کنند.



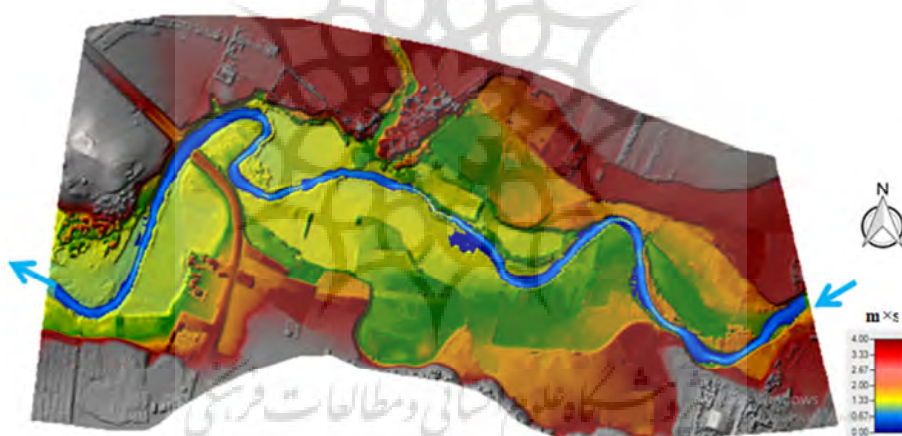
شکل ۷: توزیع متغیر سرعت جریان برای دبی ۳۴ مترمکعب بر ثانیه (رخداد فروردین ۱۴۰۳)



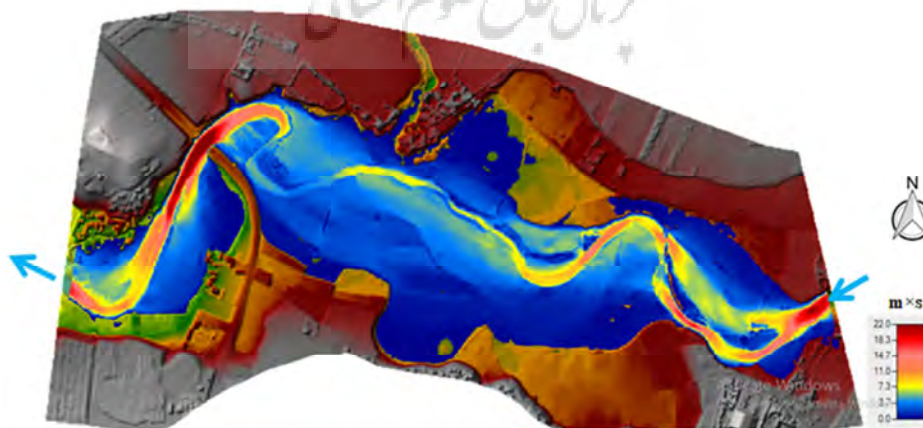
شکل ۸: توزیع متغیر سرعت جریان برای دبی ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه (رخداد فروردین ۱۳۹۸)

تحلیل نتایج متغیر خطر سیل

همان‌طور که در شکل ۹ و ۱۰ نشان داده شده است، برای دبی ۳۴ مترمکعب، با توجه به اینکه بازه مورد مطالعه ظرفیت عبور این جریان را دارد، مقادیر کمی پهنه خطر سیل کمتر از حد آستانه می‌باشد. بنابراین، میزان خطر سیل در این شرایط در حالت نرمال است. در خصوص سیل فروردین ۱۳۹۸ با دبی ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه، به‌طور کلی حداکثر میزان خطر سیل در کانال مقطع پر بازه مکانی مورد مطالعه می‌باشد. اما به‌طور خاص بیشتر میزان عددی خطر سیل در محل قوس سوم/محدوده پل (مقطع D) است. به‌طور متوسط دامنه عرضی گسترش پهنه خطر سیل با مقدار بیشتر از رقم ۱۰، حدود ۱۶۰ متر است. در قوس‌های بازه مورد مطالعه، حداکثر میزان خطر سیل در کناره خارجی اتفاق می‌افتد. شریفی نیک و مغربی (۱۳۹۹) پهنه‌بندی سیلاب حوضه کارده با استفاده از مدل دوبعدی HEC-RAS را انجام دادند. آنها نشان دادند که به‌طور طبیعی مساحت پهنه سیل، مقادیر عمق و سرعت جریان با افزایش دوره بازگشت افزایش می‌یابد. این نتیجه با نتایج این پژوهش مبنی بر اینکه در دبی‌های کمتر میزان خطر سیل در حالت نرمال است، مطابقت دارد. علاوه بر این، در پژوهش پورنبی درزی و همکاران (۱۴۰۰) نیز نشان داده شد که هر چه دوره بازگشت طولانی‌تر شود، سطح وسیع‌تری از اراضی تحت تأثیر سیل قرار می‌گیرد که این نتیجه با نتایج حاصل از این پژوهش تطابق دارد.



شکل ۹: توزیع متغیر خطر سیل (عمق × سرعت) برای دبی ۳۴ مترمکعب بر ثانیه (رخداد فروردین ۱۴۰۳)



شکل ۱۰: توزیع متغیر خطر سیل (عمق × سرعت) برای دبی ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه (رخداد فروردین ۱۳۹۸)

نتایج ارزیابی کارایی مدل

جدول ۶ میزان دقت و کارایی مدل در برآورد پارامترهای سرعت جریان و تراز عمق آب برای دو معادله هیدرودینامیکی بر اساس معیارهای آماری ارزیابی RMSE و MAPE را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود، برای واقعه فروردین ۱۴۰۳، کمترین میزان معیارهای ارزیابی برای مقادیر پیش‌بینی‌شده نسبت به اندازه‌گیری‌های مشاهداتی (متغیرهای سرعت و عمق) مربوط به معادله موج پخشیده است. خطای RMSE و MAPE در مدل‌هایی که از معادله موج کاملاً دینامیک استفاده می‌کنند، مقادیر بهتری دارند (برای مثال RMSE برابر با ۰/۱۱ برای عمق و ۰/۴۸ برای سرعت).

از طرف دیگر، برای واقعه فروردین ۱۳۹۸ با دبی ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه، کمترین میزان معیارهای ارزیابی برای مقادیر پیش‌بینی‌شده نسبت به اندازه‌گیری‌های مشاهداتی (متغیرهای سرعت و عمق) مربوط به معادله موج کاملاً دینامیک است. درواقع MAPE در این دبی برابر با ۰/۲۲ است.

جدول ۶: نتایج مقایسه سرعت جریان، عمق آب مشاهداتی و برآوردی با استفاده از معادلات محاسباتی و بر اساس دو معیار آماری MAPE و RMSE

واقع و مقدار سیل	نوع روش	پارامتر سرعت جریان آب		پارامتر عمق آب	
		معادله موج پخشیده	معادله موج کاملاً دینامیک	معادله موج پخشیده	معادله موج کاملاً دینامیک
دبی ۳۴ مترمکعب بر ثانیه (فروردین سال ۱۴۰۳)	RMSE MAPE	۰/۰۳۵	۰/۰۴۸	۰/۰۷۵	۰/۱۱
		۰/۰۲۷	۰/۰۳۳	۰/۰۳۷	۰/۰۵۲
دبی ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه (فروردین سال ۱۳۹۸)	RMSE MAPE	-	-	۰/۰۹۸	۰/۰۵۸
		-	-	۰/۰۶۴	۰/۰۲۲

نتیجه‌گیری

این مطالعه بر روی شبیه‌سازی سیلاب در پایین‌دست شهر خرم‌آباد با استفاده از مدل دو بعدی HEC-RAS، به بررسی تأثیر معادلات محاسباتی بر نتایج مدل‌های هیدرولیکی پرداخته است. عدم قطعیت در معادلات محاسباتی، به‌ویژه در شرایط خاص، می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر دقت شبیه‌سازی داشته باشد. درحالی‌که عمق جریان نسبت به سرعت جریان حساسیت کمتری به نوع معادله دارد، اما الگوهای سرعت جریان در شرایط پیچانرودی تغییرات بیشتری را نشان می‌دهد. اهمیت انتخاب مناسب معادله برای دبی‌های بالاتر از ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه تأیید شد، جایی که معادلات کاملاً دینامیک دقت بیشتری را در شبیه‌سازی الگوهای سیلاب ارائه می‌دهند. همچنین، نتایج نشان داد که در اکثر مقاطع، سیلاب به کرانه‌ها گسترش یافته و در مقطع پل (مقطع D) به دلیل محدودیت عرضی، عمق و سرعت بیشتری به ثبت رسیده است. به‌طورکلی، در شرایطی که کانال مقطع پر ظرفیت مناسبی برای دبی ورودی داشته باشد، روش حل موج پخشیده انتخاب بهتری است. در مقابل، برای دبی‌های با دوره بازگشت بالا و در شرایطی که جریان به سمت سیلاب‌دشت گسترش می‌یابد، انتخاب معادلات موج دینامیک برتر خواهد بود. این نتایج به تأکید بر نیاز به دقت در انتخاب معادلات و توجه به ویژگی‌های توپوگرافی و شرایط آب‌وهوایی در شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی منجر می‌شود.

از محدودیت‌های این پژوهش، می‌توان به محدودیت در تعمیم نتایج حاصل از مطالعه به سایر مناطق یا رودخانه‌های مشابه به خاطر تفاوت‌های معنادار در شرایط جغرافیایی و مورفولوژیکی ممکن است وجود داشته باشد. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های مشابه در مناطق دیگر با شرایط هیدرولوژیکی و هیدرولیکی متفاوت برای تعمیم‌پذیری نتایج انجام شود. همچنین، پیشنهاد می‌شود در مناطقی با ویژگی‌های پیچانرودی، ترکیب معادلات موج پخشیده و دینامیک برای بهبود دقت شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

- بهروز، معصومه؛ علی‌محمدی، سعید؛ عطاری، جلال. (۱۳۹۳). تحلیل حساسیت عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و اقتصادی در طراحی سیستم‌های کنترل سیلاب. تحقیقات منابع آب ایران، ۲(۱۰)، صص: ۸۱-۶۹.
- پورنبی درزی، سمیه؛ وفاخواه، مهدی؛ رجبی، محمدرسل. (۱۴۰۰). پهنه‌بندی خطر سیل با استفاده از مدل هیدرولیکی HEC-RAS و Arc GIS مطالعه موردی: حوزه آبخیز چشمه کیله شهرستان تنکابن. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۰(۲۸)، صص: ۱۵-۲۸. doi: 10.22111/jneh.2021.28694.1603
- جمال، عبدالرحیم؛ پروان، علی؛ والی‌زاده، داریوش. (۱۴۰۰). پهنه‌بندی خطر سیلاب در رودخانه ایرانشهر با استفاده از مدل‌سازی عددی دوبعدی و GIS. مجله علوم آب و خاک، ۲۳(۴)، صص: ۸۳-۷۱.
- حسینی، سید موسی؛ اشتري، نفیسه؛ شعبانی عراقی، عارفه. (۱۴۰۰). تاثیر 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، ۱۱(۴۱)، صص: ۹۵-۱۱۰. doi: 10.30488/gps.2020.230991.3247
- شرافتی، احمد؛ ذبیحون، باقر. (۱۳۹۲). تحلیل عدم قطعیت و تولید آماری الگوی رگبار حوضه سیمره. مجله پژوهش آب ایران، ۱۳(۷)، صص: ۹۷-۱۰۸.
- علیان، نرگس؛ احمدی، محمد مهدی؛ بختیاری، بهرام. (۱۳۹۸). تحلیل عدم قطعیت در برآورد خسارت مورد انتظار سالیانه به‌منظور ارزیابی ریسک سیلاب (مطالعه موردی: دشت کوهپایه - سگزی از حوضه آبریز زاینده‌رود). مجله علوم آب و خاک، ۲۳(۴)، صص: ۱۵۲-۱۴۱.
- علیزاده، امین. (۱۳۸۸). اصول هیدرولوژی کاربردی، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ویرایش نوزدهم.
- کریمی فیروزجایی، محمد؛ عبدالمهی، عطالله؛ جلوخانی نیارکی، محمدرضا. (۱۳۹۶). تهیه نقشه خطر سیل مبتنی بر انرژی جریان با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی، مطالعه موردی: رودخانه نکا. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۴(۵)، صص: ۱۷۵-۱۵۹.
- مغربی، محمود؛ اسلامی تبار، مهدیه. (۱۴۰۲). مدل‌سازی و تحلیل دو بعدی هیدرولیک رودخانه کارده با استفاده از HEC-RAS. هیدروفیزیک، ۱۹(۱)، صص: ۱۴۵-۱۳۱.
- نوروزی، امیر؛ غواصیه، احمدرضا. (۱۳۸۵). مروری بر مفاهیم کمی عدم قطعیت، قابلیت اعتماد و ریسک، کارگاه فنی همزیستی با سیلاب.
- Alfonso, L., Mukolwe, M. M., Di Baldassarre, G. (2016). Probabilistic flood maps to support decision-making: Mapping the value of information. *Water Resources Research*, 52(2), 1026-1043. <https://doi.org/10.1002/2015WR017378>
- Amrei, D., Britta, S. (2020). Flood hazard analysis in small catchments: Comparison of hydrological and hydrodynamic approaches by the use of direct rainfall. *Journal of Flood Risk Management*, 13, 26. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.02.010>
- Arcement, G. J., Schneider, V. R. (1989). Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains (U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2339). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/wsp2339>
- 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. <https://doi.org/10.3390/w12092326>
- Dalledonne, G., Kopmann, R., Brudy-Zippelius, T. (2019). Uncertainty analysis of floodplain friction in hydrodynamic models. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. <https://doi.org/10.5194/hess-2019-159>
- Garcia, M., Foster, K. (2023). Assessing Uncertainty in Flood Inundation Models: A Case Study. *Environmental Modelling & Software*, 166, 104871
- Haces-Garcia, F., Kotzamanis, V., Glennie, C. L., Rifai, H. S. (2025). Improving Manning's n in flood models using 3D point clouds, flume experiments, and deep learning. *Water Resources Research*, 61(3), e2024WR037665.

- Koo, H., Iwanaga, T., Croke, B. F., Jakeman, A. J., Yang, J., Wang, H. H., Chen, M. (2020). Position paper: Sensitivity analysis of spatially distributed environmental models—A pragmatic framework for the exploration of uncertainty sources. *Environmental Modelling & Software*, 104857.
- Lee, T., Kim, S. (2021). Quantifying Uncertainty in Hydraulic Models for Flood Risk Assessment. *Water Resources Research*, 57(11), e2021WR030852.
- Merwade, V., Olivera, F., Arabi, M., Edleman, S. (2008). Uncertainty in flood inundation mapping: Current issues and future directions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(7), pp 608–620.
- Peng, J., Zhang, J. (2022). Urban flooding risk assessment based on GIS-game theory combination weight: A case study of Zhengzhou City. *International journal of disaster risk reduction*, 77, 103080.
- Pinos, J., Timbe, L. (2019). Performance assessment of two-dimensional hydraulic models for a generation of flood inundation maps in mountain river basins. *Water Science and Engineering*, 12(1), pp11–18. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2019.03.001>
- Rampinelli, C. G., Smith, T. J., Araújo, P. V. (2024). Addressing Uncertainty in Flood Hazard Mapping under a Bayesian Approach. *Journal of Hydrologic Engineering*, 29(3), 04024004.
- Roberts, S., Nielsen, O., Gray, D., Sexton, J., Davies, G. (2015). ANUGA user manual. Commonwealth of Australia (Geoscience Australia) and the Australian National University.
- Smith, J., Johnson, R. (2022). Uncertainty in Flood Prediction: A Review of the Influence of Hydrological Models. *Journal of Hydrology*, 604, pp 127-134
- Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F., Dutta, D., Kim, S. J. E. M. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental modelling & software*, 90, pp 201-216.
- Trinh, M. X., Molkenthin, F. (2021). Flood hazard mapping for data-scarce and ungauged coastal river basins using advanced hydrodynamic models, high temporal-spatial resolution remote sensing precipitation data, and satellite imageries. *Natural Hazards*, 109, pp 441–469. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04843-1>
- Yeou-Koung, T., Chi-Leung, C. (2016). Sensitivity and uncertainty analysis of hydrologic/hydraulic model for Shenzhen River and Northern New Territory Basin in Hong Kong. 12th International Conference on Hydroinformatics, HIC 2016.
- Yildirim, E., Just, C., Demir, I. (2022). Flood risk assessment and quantification at the community and property level in the State of Iowa. *International journal of disaster risk reduction*, 77, 103106.
- Yin, J., Guo, S., Gentine, P., Sullivan, S. C., Gu, L., He, S., Chen, J., & Liu, P. (2021). Does the hook structure constrain future flood intensification under anthropogenic climate warming? *Water Resources Research*, 57(2), pp 1–22.