

Development of an Integrated Online System for Flood Forecasting and Warning by Integrating Numerical Weather, Hydrological, and Hydraulic Models: A Case Study of the Gorganrood Watershed

Z. Alizadeh¹, M. Shahsavandi¹, M. Masoudi-Moghaddam¹, S. Talebi², J. Yazdi^{1*}

1- Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

(*- Corresponding Author Email: j_yazdi@sbu.ac.ir)

2- GIS and Remote Sensing Department, Space Research Center, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

Received: 12 June 2025

Revised: 20 July 2025

Accepted: 29 July 2025

Available Online: 29 July 2025

How to cite this article:

Alizadeh, Z., Shahsavandi, M., Masoudi-Moghaddam, M., Talebi, S., & Yazdi, J. (2025). Development of an integrated online system for flood forecasting and warning by integrating numerical weather, hydrological, and hydraulic models: A case study of the Gorganrood watershed. *Journal of Water and Soil*, 39(3), 219-242. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2025.93995.1485>

Introduction

Floods rank among the most devastating natural disasters, causing significant loss of life and property each year. Floods are among the most destructive natural disasters, causing extensive loss of life and property annually. The Gorganrood watershed in northeastern Iran is particularly vulnerable to frequent and severe flooding due to its unique geographical and climatic characteristics. Factors contributing to this high flood risk include steep topographical gradients, impermeable soil, and degraded vegetation cover, which lead to rapid and devastating flash floods. The region has experienced a rise in both the frequency and intensity of floods in recent years, resulting in significant damages, such as the catastrophic flood of March 2019. Consequently, the development of effective flood forecasting and early warning systems (FFEWS) has become a critical priority for crisis management. Recent advancements in numerical modeling offer powerful tools for more accurate and timely flood prediction. Weather Research and Forecasting (WRF) models are widely used for their precision in simulating regional precipitation. Hydrological models like the Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) are essential for converting predicted rainfall into surface runoff, while hydraulic models such as HEC-RAS excel at simulating river flow and mapping inundation zones. This research aims to develop and evaluate a sophisticated, integrated online system specifically for the Gorganrood watershed. The primary innovation of this study is the creation of a unified online platform that couples the WRF, HEC-HMS, and a 2D HEC-RAS model to forecast flood inundation up to 48 hours in advance. A further novelty lies in its software architecture, which utilizes React for the front-end and a Python-based Django framework for the back-end, a combination not previously applied in similar research for real-time visualization of flood forecasts.

Materials and Methods

The research focused on the Gorganrood watershed, a major basin in northeastern Iran covering approximately 11,380 km². The system developed was an integrated Web-GIS software platform designed for end-to-end flood forecasting. The system's workflow began with the automated retrieval of meteorological data from the Global Forecast System (GFS). This data served as input for the regional WRF model to generate high-resolution precipitation forecasts. The rainfall predictions were then fed into a calibrated HEC-HMS model to simulate the rainfall-runoff process and generate flood hydrographs. In the final stage, a 2D HEC-RAS hydraulic model was executed for critical, populated river reaches to produce detailed flood inundation maps. The technological



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.93995.1485>

framework was built on modern software tools. The user interface (Front-End) was developed using React to create a dynamic user experience. The server-side logic (Back-End) was implemented in Python using the Django web framework. For data management, a PostgreSQL database with the PostGIS spatial extension was employed. GeoServer was used as the map server. The chosen models include:

- **WRF Model:** Selected for precipitation forecasting due to its open-source nature, flexibility, and widespread use.
- **HEC-HMS Model:** Chosen as the rainfall-runoff model for its suitability in a large basin with limited data. It was configured using the SCS-CN method for loss calculations, the SCS unit hydrograph method for runoff transformation, and the Muskingum method for channel routing.
- **HEC-RAS Model:** The 2D version was selected for hydraulic modeling due to its ability to simulate complex, two-dimensional flow dynamics when floods overtop riverbanks and its free availability.

Results and Discussion

The performance of each model component was rigorously evaluated. The WRF model was assessed using five historical storm events, comparing forecasts across five different lead times (6, 12, 18, 24, and 48 hours). Statistical analysis revealed that the 6-hour forecast horizon provided the optimal balance of accuracy and lead time, exhibiting the best performance metrics ($R^2=0.69$, $RMSE=12.25$, $NSE=0.0$). Thus, a 6-hour lead time was adopted for the operational system. The HEC-HMS model was calibrated and validated against observed data from several hydrometric stations (Nodeh, Arazkuseh, etc.). The results demonstrated a good agreement between the simulated and observed hydrographs, particularly in capturing the peak discharge and timing of floods. Observed discrepancies in total flood volume were attributed to uncertainties in spatial rainfall data and potential measurement errors. For the numerous sub-basins lacking gauging stations, model parameters were regionalized using a clustering technique based on physiographic similarity to the calibrated sub-basins. The integrated online system allows users to run the entire forecast chain through a web interface. To manage the significant computational requirements, the 2D HEC-RAS model was implemented for two high-priority areas: the region downstream of the Golestan Dam and the flood-prone city of Aq-Qala. A key challenge was the high computational demand of the models, which was addressed by leveraging the High-Performance Computing (HPC) cluster at Shahid Beheshti University. Another challenge is the potential for model instability and limitations imposed by data quality, which can be mitigated by more detailed calibration.

Conclusion

This research successfully developed a comprehensive, integrated online system for flood forecasting in the Gorganrood watershed by coupling the WRF, HEC-HMS, and HEC-RAS models. The evaluation showed that the WRF model provided acceptable precipitation forecasts, the HEC-HMS model accurately simulated rainfall-runoff processes, and the 2D HEC-RAS model produced valuable, high-resolution flood inundation maps. The system's robust software architecture, utilizing React, Python/Django, and PostgreSQL/PostGIS, provides an efficient, scalable, and user-friendly platform for operational flood management. This work demonstrates that the integration of advanced numerical models into a single, automated platform is a highly effective approach to mitigating flood risk. The resulting system offers a powerful tool for crisis managers and serves as a replicable model for developing similar advanced warning systems in other flood-prone basins.

Acknowledgement

The authors would like to acknowledge the use of the High-Performance Computing (HPC) system at Shahid Beheshti University for the execution of the numerical models in this research.

Keywords: Django, Flood forecasting, Gorganrood watershed, HEC-HMS, HEC-RAS (2D), Integrated system, React, WRF

توسعه سامانه برخط یکپارچه پیش‌بینی و هشدار سیل با تلفیق مدل‌های عددی آب و هوایی، هیدرولوژیکی و هیدرولیکی: مطالعه موردی حوضه آبریز گرگانرود

زهرا علیزاده^۱ - محمد شاه‌سوندی^۱ - محمدرضا مسعودی‌مقدم^۱ - سمیه طالبی^۲ - جعفر یزدی^{۳*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۷

چکیده

سیلاب به‌عنوان یکی از مخرب‌ترین بلایای طبیعی، هر ساله خسارات جانی و مالی فراوانی به جوامع وارد می‌کند. در این پژوهش، یک سامانه‌ی نرم‌افزاری یکپارچه Web-GIS برای پیش‌بینی و هشدار سیل طراحی و توسعه داده شده است. در این سامانه، از بستر نرم‌افزاری محبوب React برای توسعه رابط کاربری (GUI) بهره گرفته شده است. برنامه‌نویسی سمت سرور در زبان Python و کتابخانه تحت وب آن Django انجام شده و در همین بخش، پایگاه اطلاعاتی PostgreSQL و افزونه مکانی آن PostGIS برای ذخیره‌سازی اطلاعات استفاده شده است. سرویس‌دهنده نقشه نیز در این سامانه نرم‌افزار GeoServer انتخاب شده است. سامانه یکپارچه پیش‌بینی و هشدار سیل، با استفاده از تلفیق مدل پیش‌بینی بارش WRF، مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS و همچنین مدل هیدرولیکی HEC-RAS (2D)، به پیش‌بینی سیلاب و پهنه‌بندی آن می‌پردازد. این سامانه برای حوضه آبریز سیل‌خیز گرگانرود پیاده‌سازی شده است. حوضه آبریز گرگانرود، به دلیل ویژگی‌های جغرافیایی و اقلیمی خاص خود، در معرض سیلاب‌های مکرر و گسترده قرار دارد. مدل پیش‌بینی بارش WRF برای تخمین بارش با افق زمانی پیش‌بینی ۶ ساعت تا ۴۸ ساعت آینده آماده‌سازی شده است و به منظور بهبود دقت پیش‌بینی‌ها، پارامترهای نرم‌افزارها واسنجی و تحلیل حساسیت شده‌اند. این پژوهش با ترکیب مدل‌های پیشرفته، دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش داده و ابزار مؤثری برای مدیریت بهتر سیلاب‌ها فراهم می‌آورد. این سامانه با فراهم آوردن افق پیش‌بینی ۴۸ ساعته برای وقوع سیل و همچنین غلبه بر چالش‌های محاسباتی از طریق به‌کارگیری زیرساخت پردازش قوی (HPC) و مدل‌سازی متمرکز بر نواحی کلیدی، می‌تواند به‌عنوان ابزاری عملیاتی برای مدیریت بحران در مناطق سیل‌خیز عمل نماید.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی سیل، React، Django، WRF، HEC-HMS، HEC-RAS(2D)

مقدمه

و مناطق کوهستانی، سیلاب‌ها به‌دلیل ترکیب بارش‌های شدید و شیب‌های تند زمین، به سرعت به جریان‌های تند و مخرب تبدیل می‌شوند (Avand, Moradi, & Ramazanzadeh Lasboyee, 2021). با توجه به این واقعیت، توسعه سامانه‌های پیش‌بینی و هشدار سیل که بتوانند وقوع سیلاب را پیش‌بینی و هشدارهای لازم را به موقع ارائه دهند، به یکی از اولویت‌های مدیریت بحران در کشورهای سیل‌خیز تبدیل شده است.

سیلاب به‌عنوان یکی از شدیدترین و پرتکرارترین بلایای طبیعی، تأثیرات مخربی بر جوامع انسانی، زیرساخت‌ها و محیط زیست دارد. این پدیده طبیعی به‌دلیل تغییرات اقلیمی، افزایش وقوع بارش‌های شدید و فعالیت‌های انسانی نظیر تخریب پوشش گیاهی و توسعه غیراصولی مناطق شهری، بیش از پیش در بسیاری از نقاط جهان رایج شده است (Mishra et al., 2022). به‌ویژه در کشورهایی با توپوگرافی پیچیده

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

۲- بخش جی‌آی‌اس و سنجش از دور - مرکز تحقیقات فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

(*) - نویسنده مسئول: (Email: j_yazdi@sbu.ac.ir)

نشان دادند که ترکیب مدل‌های هیدرولوژیکی با داده‌های محلی می‌تواند دقت پیش‌بینی‌ها را بهبود بخشد و زمان واکنش به سیلاب‌ها را افزایش دهد.

جعفرزادگان و همکاران (Jafarzadegan et al., 2023) در پژوهش خود به بررسی تأثیر پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت بارش بر مدیریت سیلاب در شهرهای ساحلی پرداختند و بیان کردند که استفاده از مدل‌های پیشرفته نظیر SWMM و HEC-RAS می‌تواند به کاهش خسارات ناشی از سیلاب‌های شهری کمک شایانی کند. رن و همکاران (Ren & Cao, 2023) نیز در مطالعه‌ای مشابه، به بررسی قابلیت‌های مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب در مناطق سیل‌خیز پرداختند و دقت بالای این مدل را در پیش‌بینی رواناب سیلاب تأیید کردند.

از سوی دیگر، چیونگ و همکاران (Cheong et al., 2023) به بررسی چالش‌های عملیاتی سامانه‌های هشدار سیل در کره جنوبی پرداختند و تأکید کردند که استفاده از فناوری‌های نوین و داده‌های واقعی می‌تواند کارایی این سامانه‌ها را بهبود بخشد. در مطالعه‌ای دیگر، مرشد و همکاران (Morshed, Mushwani, Sahak, & Hairan, 2024) به تحلیل سامانه هشدار سیل در پاکستان پرداختند و نقش مدل‌های عددی پیش‌بینی هواشناسی در کاهش خسارات جانی و مالی ناشی از سیلاب‌ها را مورد بررسی قرار دادند.

مطالعه چن و همکاران (Chen et al., 2022) نیز نشان داد که استفاده از مدل‌های ترکیبی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی می‌تواند به بهبود دقت در پیش‌بینی مناطق سیل‌گیر کمک کند. این پژوهش تأکید دارد که مدل‌هایی مانند HEC-RAS که قابلیت شبیه‌سازی دو بعدی جریان را دارند، می‌توانند اطلاعات ارزشمندی درباره توزیع عمق و سرعت جریان در سیلاب‌های گسترده ارائه دهند.

مونزو و همکاران (Muñoz, Orellana-Alvear, Bendix, Feyen, & Céleri, 2021) در مطالعه خود به توسعه سامانه‌های هشدار سیل بر اساس داده‌های محلی و شرایط اقلیمی پرداختند و اهمیت به‌کارگیری داده‌های منطقه‌ای در افزایش دقت پیش‌بینی‌ها را برجسته کردند. ناندا و همکاران (Nanda et al., 2016) نیز در پژوهشی مشابه، به تحلیل سامانه‌های هشدار سیل در چین پرداختند و نشان دادند که استفاده از داده‌های محلی و تحلیل‌های حساسیت می‌تواند دقت مدل‌ها را بهبود بخشد.

همچنین، پاتل و همکاران (Patel et al., 2022) در مطالعه‌ای بر روی حوضه‌های آبریز هیمالیا، به بررسی دقت مدل‌های عددی پیش‌بینی بارش در مناطق کوهستانی پرداختند و کارایی بالای مدل WRF را در این مناطق تأیید کردند. زانگ و همکاران (Zang, Meng, Guan, Lv, & Yan, 2022) نیز به بررسی چالش‌های عملیاتی سامانه‌های هشدار سیل در مناطق شهری چین پرداختند و بر ضرورت توسعه سامانه‌های پیش‌بینی بر اساس داده‌های واقعی تأکید کردند.

در دهه اخیر، پیشرفت‌های قابل توجهی در مدل‌های عددی هواشناسی، هیدرولوژیکی و هیدرولیکی حاصل شده که امکان پیش‌بینی دقیق‌تر و سریع‌تر سیلاب‌ها را فراهم کرده است. مدل‌های پیش‌بینی هواشناسی مانند WRF (Weather Research and Forecasting)، به دلیل دقت بالا در شبیه‌سازی بارش‌های منطقه‌ای و جهانی، به یکی از پرکاربردترین ابزارها در زمینه پیش‌بینی سیلاب تبدیل شده‌اند (Liu, Wang, & Lei, 2021). این مدل‌ها با استفاده از داده‌های هواشناسی جهانی، توانایی پیش‌بینی بارش‌های شدید را تا ۴۸ ساعت قبل از وقوع فراهم می‌آورند که این ویژگی برای کاهش خسارات ناشی از سیلاب بسیار حیاتی است (Nanda, Sahoo, Beria, & Chatterjee, 2016).

مدل‌های هیدرولوژیکی مانند HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) و SWMM (Storm Water Management Model) نیز در شبیه‌سازی دقیق فرآیندهای بارش-رواناب و تبدیل بارش‌های پیش‌بینی شده به جریان‌های سطحی کاربرد فراوانی دارند (Kalimisetty, Singh, Korada Hari Venkata, & Mahamood, 2022). از سوی دیگر، مدل‌های هیدرولیکی مانند Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS) با قابلیت شبیه‌سازی جریان‌های رودخانه‌ای و پهنه‌بندی مناطق سیل‌گیر، نقش مهمی در تعیین نقاط پرخطر و طراحی سامانه‌های هشدار سریع ایفا می‌کنند (Shaikh et al., 2023).

حوضه آبریز گرگانرود به دلیل ویژگی‌های جغرافیایی خاص خود، یکی از مناطق سیل‌خیز کشور ایران محسوب می‌شود. این حوضه، با داشتن شیب‌های تند، زمین‌های نفوذناپذیر و پوشش گیاهی تخریب‌شده، در معرض سیلاب‌های ناگهانی و ویرانگر قرار دارد (Karami, Abedi Koupai, & Gohari, 2024). بر اساس آمار، این منطقه در سال‌های اخیر با افزایش فراوانی و شدت سیلاب‌ها مواجه بوده که خسارات مالی و جانی زیادی را به دنبال داشته است (Ghahraman, Nagy, & Nooshin Nokhandan, 2023). این‌رو، تحقیق حاضر بر آن است تا با استفاده از ترکیب مدل‌های عددی WRF، HEC-HMS، HEC-RAS و SWMM، سامانه‌ای یکپارچه برای پیش‌بینی و هشدار سیلاب در این منطقه طراحی و توسعه دهد. مطالعات بسیاری در زمینه توسعه و به‌کارگیری سامانه‌های هشدار سیل انجام شده است که نشان‌دهنده اهمیت و کارایی این سامانه‌ها در کاهش ریسک سیلاب‌ها است. برای مثال، در مطالعه‌ای که توسط مرینو و همکاران (Merino, García-Ortega, Navarro, Sánchez, & Tapiador, 2022) انجام شد، تأثیر مدل‌های WRF بر پیش‌بینی بارش‌های شدید در منطقه‌ای کوهستانی مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که این مدل‌ها توانایی بالایی در پیش‌بینی دقیق زمان و شدت بارش‌ها دارند. همچنین، باجرچاریا و همکاران (Bajracharya et al., 2021) با بررسی سامانه هشدار سیلاب در نپال

و تحلیل‌های زمانی هستند، می‌تواند به بهبود مدیریت بحران‌های سیلابی در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای منجر شود. این سامانه‌ها با ارائه هشدارهای زودهنگام و دقیق به مسئولان و ساکنان مناطق آسیب‌پذیر، نقش مهمی در کاهش خسارات ناشی از سیلاب‌ها و مدیریت بهتر منابع آب ایفا می‌کنند.

هدف اصلی این پژوهش توسعه و ارزیابی یک سامانه پیشرفته برای پیش‌بینی و هشدار سیل در حوضه آبریز گرگانود است. با توجه به شرایط خاص جغرافیایی، توپوگرافی کوهستانی و میزان بالای تخریب پوشش گیاهی در این منطقه، گرگانود به یکی از سیل‌خیزترین حوضه‌های کشور تبدیل شده است. سیلاب‌های مخرب در این حوضه، به دلیل ترکیبی از عوامل طبیعی و انسانی، خسارات جانی و مالی سنگینی را به همراه داشته‌اند.

با در نظر گرفتن این چالش‌ها، تحقیق حاضر بر آن است تا با تحلیل دقیق عوامل سیل‌خیزی و استفاده از مدل‌های پیشرفته هیدرولوژیکی و هیدرولیکی، سامانه‌ای را توسعه دهد که بتواند به‌طور دقیق و به‌موقع وقوع سیلاب‌ها را پیش‌بینی کند و هشدارهای لازم را به مسئولان و ساکنان منطقه ارائه دهد. این سامانه به نحوی طراحی شده است که قابلیت اجرا در شرایط خاص منطقه را داشته باشد و بتواند با سرعت و دقت بالا، داده‌های مورد نیاز را جمع‌آوری و پردازش کند.

نوآوری اصلی این پژوهش، طراحی و توسعه یک سامانه نرم‌افزاری یکپارچه آنلاین (Web-GIS) است که زنجیره کامل مدل‌های پیش‌بینی هواشناسی (WRF)، هیدرولوژی (HEC-HMS) و هیدرولیک دوبعدی (HEC-RAS) را به‌صورت خودکار به یکدیگر متصل می‌کند. توسعه نرم‌افزاری آنلاین که با تلفیق مدل پیش‌بینی بارش WRF، مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS و مدل هیدرولیکی دوبعدی HEC-RAS قادر است ۴۸ ساعت قبل از وقوع سیل، وضعیت رواناب و پهنه سیلاب را پیش‌بینی کند، از جمله دستاوردهای این تحقیق به شمار می‌رود و در سطح ملی سابقه نداشته است. همچنین، پیاده‌سازی سامانه هشدار سیل با استفاده از زبان برنامه‌نویسی React در بخش Front-End و Django در بخش Back-End، یکی دیگر از نوآوری‌های این پژوهش از جنبه برنامه‌نویسی است. تلفیق این دو زبان برای نمایش و اعلام زمان واقعی نتایج پیش‌بینی سیلاب، موضوعی است که تاکنون در پژوهش‌های مشابه مورد استفاده قرار نگرفته است. در همین بخش، پایگاه اطلاعاتی PostgreSQL و افزونه مکانی آن PostGIS برای ذخیره‌سازی اطلاعات به کار گرفته شده است. سرویس‌دهنده نقشه در این سامانه نیز نرم‌افزار GeoServer انتخاب شده است (GeoServer Project, 2024). این سامانه نه تنها از لحاظ تکنیکی پیشرفته است، بلکه با توجه به شرایط اقتصادی و زیرساختی منطقه مورد مطالعه، هزینه‌های اجرایی و نگهداری را به حداقل رسانده و با بهره‌گیری از تکنولوژی‌های نوین، عملکرد و کارایی بالایی ارائه می‌دهد. این پژوهش گامی مؤثر در بهبود مدیریت ریسک

یکی از سامانه‌های پیشرفته در این حوزه که توسط ناندا و همکاران (Nanda et al., 2016) توسعه یافته، به بررسی استفاده از مدل‌های دینامیکی و داده‌های ماهواره‌ای برای پیش‌بینی سیلاب در مناطق روستایی پرداخته است. در این سامانه، مدل WRF برای پیش‌بینی بارش و مدل‌های هیدرولوژیکی برای شبیه‌سازی رواناب به کار رفته‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در کنار داده‌های زمینی می‌تواند به بهبود دقت پیش‌بینی‌ها کمک شایانی کند.

لی و همکاران (Liu et al., 2021) در پژوهشی دیگر، یک سامانه پیش‌بینی سیلاب بر اساس داده‌های هواشناسی و داده‌های راداری توسعه داده‌اند. این سامانه از ترکیب مدل‌های پیش‌بینی بارش و مدل‌های هیدرولوژیکی برای ارائه هشدارهای سریع استفاده می‌کند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از داده‌های راداری و باران‌سنج‌های خودکار می‌تواند دقت و سرعت سامانه‌های هشدار سیلاب را افزایش دهد.

کالیمستی و همکاران (Kalimisetty et al., 2022) در مطالعه‌ای، به طراحی سامانه‌های هشدار سیلاب در مناطق شهری پرداخته است. این سامانه از مدل‌های هیدرولیکی دوبعدی و پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت بارش استفاده می‌کند تا وضعیت سطح آب در شبکه‌های جمع‌آوری سیلاب و رودخانه‌های شهری را در زمان واقعی شبیه‌سازی کند. این سامانه برای مناطق شهری که به دلیل توسعه زیرساخت‌های غیراصولی در معرض خطر سیلاب هستند، بسیار مفید بوده و به کاهش ریسک خسارات جانی و مالی کمک می‌کند.

در پژوهشی دیگر، فلک و همکاران (Falck, Tomasella, & Papa, 2021) به بررسی یک سامانه هشدار سیلاب در آمریکای جنوبی پرداخته است. این سامانه با استفاده از مدل‌های عددی منطقه‌ای و داده‌های محلی، قادر به پیش‌بینی دقیق وقوع سیلاب در مناطق آسیب‌پذیر و اعلام هشدارهای زودهنگام به ساکنان است. این پژوهش نشان می‌دهد که به کارگیری مدل‌های ترکیبی و تحلیل داده‌های بلندمدت محلی می‌تواند به بهبود دقت سامانه‌های پیش‌بینی کمک کند.

بیاروهانگا و همکاران (Byaruhanga, Kibirige, Gokool, & Mkhonta, 2024) نیز در بررسی سامانه‌های هشدار سیل در مناطق حاره‌ای، بر اهمیت دقت و سرعت در پردازش داده‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی تأکید کرده‌اند. این سامانه‌ها با استفاده از داده‌های دما و رطوبت نسبی، قادر به پیش‌بینی سیلاب‌های ناگهانی و ارائه هشدارهای ضروری هستند. به عقیده این پژوهشگران، ادغام داده‌های سطحی با داده‌های ارتفاعی و ترکیب آن‌ها با مدل‌های هیدرولیکی دو بعدی، می‌تواند نتایج دقیق‌تری را برای پیش‌بینی سیلاب فراهم کند. در مجموع، تحقیقات اخیر حاکی از آن است که توسعه سامانه‌های هشدار سیلاب که مبتنی بر مدل‌های پیشرفته عددی، داده‌های محلی

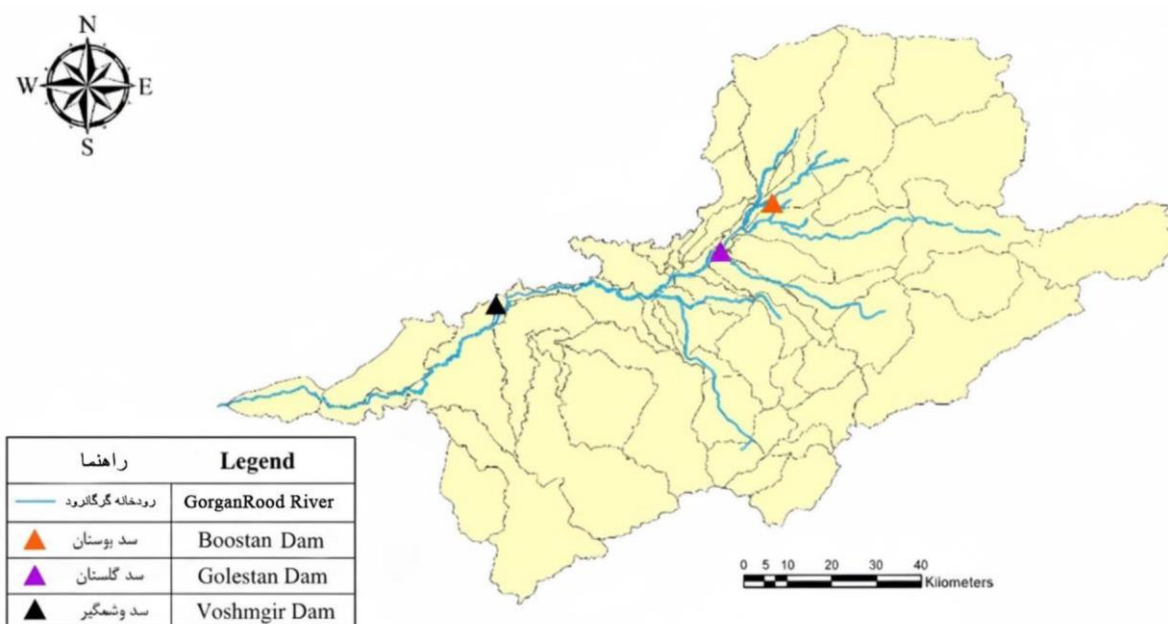
سیلاب و کاهش خسارات ناشی از آن در یکی از مناطق پرخطر کشور خواهد بود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز گرگانرود یکی از مهم‌ترین حوضه‌های آبریز ایران است که در شمال شرقی کشور واقع شده و مساحتی بالغ بر ۱۱۳۸۰ کیلومتر مربع دارد که معادل ۴۸ درصد سطح استان گلستان است. این حوضه در شرق از کوه‌های واقع در استان خراسان شمالی آغاز شده و در غرب در مجاورت حوضه آبریز رود قره‌سو به دریای خزر ختم می‌شود. سیلاب‌های این منطقه به‌ویژه در مناطق پایین‌دست، نظیر شهر آق‌قلا و گمیشان، خسارات زیادی به زیرساخت‌ها و ساکنان وارد می‌کنند. بعنوان نمونه می‌توان به خسارات سنگین سیلاب فروردین‌ماه ۱۳۹۸ اشاره کرد. به‌دلیل وقوع سیلاب‌های مکرر، مدیریت این پدیده در حوضه آبریز گرگانرود از اهمیت بالایی برخوردار است. استفاده از سامانه‌های پیش‌بینی و هشدار سیل می‌تواند نقشی حیاتی در کاهش خطرات و خسارات ناشی از سیلاب‌ها ایفا کند. در شکل ۱ محدوده جغرافیایی این حوضه آبریز به‌وضوح نمایش داده شده است.

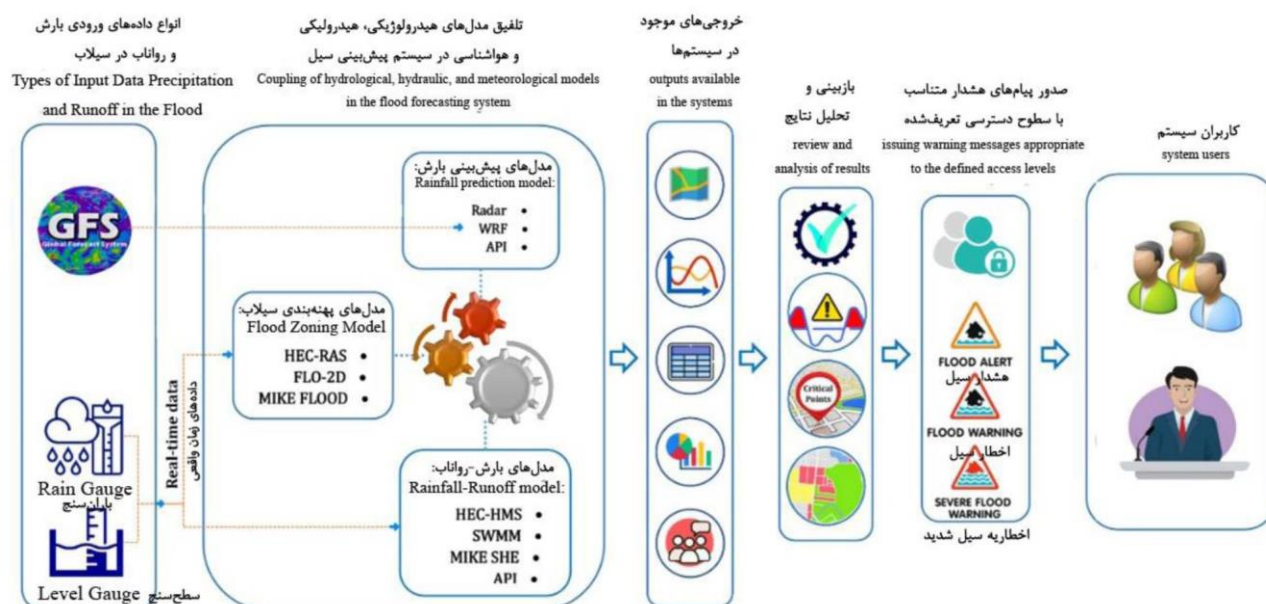
مدل مفهومی سامانه نرم‌افزاری پیش‌بینی و هشدار سیل حوضه



شکل ۱- نقشه حوضه آبریز گرگانرود به همراه شبکه آبراهه‌های اصلی و سدهای حوضه

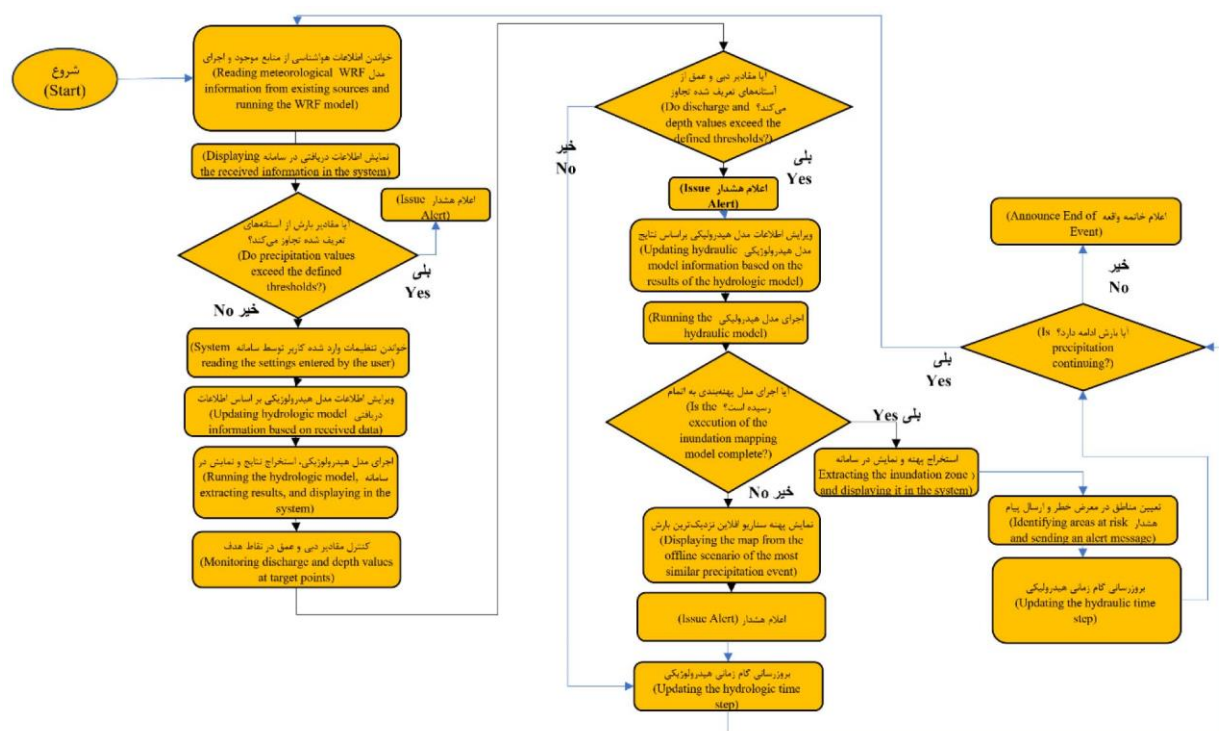
Figure 1- Map of the Gorganrود watershed, along with the main drainage network and the dams in the basin.

آبریز گرگانرود در شکل ۲ نشان داده شده است. روند کار سامانه به این صورت است که داده‌های متغیرهای هواشناسی از مدل جهانی GFS (Global Forecast System) از منابع آنلاین بصورت بهنگام و البته اتوماتیک دریافت شده (NCEP, 2020) و بر اساس آنها مدل منطقه‌ای پیش‌بینی بارش WRF اجرا می‌شود. در ادامه، داده‌های پیش‌بینی شده بارش بر روی مدل هیدرولوژیکی اعمال شده و هیدروگراف سیل ورودی به رودخانه‌های حوضه محاسبه می‌شود. پس از این مرحله، امکان اجرای مدل هیدرولوژیکی بر اساس نتایج مدل هیدرولوژیکی وجود دارد. با توجه به زمانبر بودن اجرای مدل هیدرولوژیکی برای کل حوضه و از طرفی، اهمیت هشدار سریع سیل در شرایط بحرانی، برای هر یک از بازه‌های رودخانه که در HEC-RAS مدل‌سازی شدند، شرایط مرزی لازم از خروجی‌های مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS استخراج گردید. به این ترتیب که هیدروگراف سیلاب محاسبه شده توسط HEC-HMS در ابتدای هر بازه به‌عنوان شرط مرزی بالادست (جریان ورودی) تعریف شد و برای شرط مرزی پایین‌دست نیز از فرض عمق نرمال بر اساس شیب بستر استفاده گردید. به‌طور خلاصه مراحل تشریح شده در فوق در فلوچارت شکل ۳ ارائه شده است. در ادامه توضیح اجزای این سامانه ارائه شده است.



شکل ۲- مدل مفهومی سامانه نرم‌افزاری پیش‌بینی و هشدار سیل حوضه آبریز گرگانرود

Figure 2- Conceptual model of the flood forecasting and warning software system for the Gorganroud watershed



شکل ۳- فلوچارت مراحل کار سامانه نرم‌افزاری پیش‌بینی و هشدار سیل حوضه آبریز گرگانرود

Figure 3- Process flowchart of the flood forecasting and warning software system for the Gorganroud watershed

مدل پیش‌بینی بارش

پیش‌بینی سیلاب در مراحل پایانی توسعه‌اش یعنی هنگامی که داده‌های بارش مشاهداتی بیشتری در دسترس قرار می‌گیرند، با دقت

بالاتری امکان‌پذیر است. اما از سوی دیگر، نزدیک شدن به مراحل پایانی شکل‌گیری سیلاب با کاهش زمان پیش‌هشدار همراه است و ممکن است زمان کافی برای عکس‌العمل در برابر سیل باقی نماند. به

منظور فراهم آوردن زمان پیش‌هشدار کافی، اغلب لازم است که افق پیش‌بینی‌ها را تا اندازه‌ای طولانی‌تر کرد که البته باعث کاهش دقت پیش‌بینی‌ها نیز خواهد شد. وجود زمان پیش‌هشدار کافی برای کارایی مطلوب سامانه هشدار سیل و عکس‌العمل در برابر سیل، بسیار حائز اهمیت است. در حال حاضر، تنها ابزاری که می‌تواند چنین مدت پیش‌هشدار را برای مدیران و مسئولان مدیریت بحران فراهم نماید، مدل‌های عددی آب و هوایی است. مدل‌های عددی آب و هوایی بسیاری در مراکز تحقیقاتی دنیا توسعه یافته‌اند که از مهمترین آنها می‌توان به مدل‌های GEM، ICON، ECMWF، GFS، MM5 و WRF اشاره کرد.

انتخاب مدل پیش‌بینی بارش در این پژوهش با یک رویکرد عملیاتی و با معیار اصلی هم‌راستایی با زیرساخت‌های ملی صورت گرفت. از آنجا که مدل WRF ابزار استاندارد و عملیاتی مورد استفاده در سازمان هواشناسی کشور است، این مدل به‌منظور اطمینان از قابلیت یکپارچه‌سازی سامانه حاضر با سیستم‌های ملی مدیریت بحران انتخاب شد. ویژگی‌های فنی مطلوب این مدل، مانند کدباز بودن و انعطاف‌پذیری بالا، از دیگر دلایل این انتخاب بود.

مدل بارش-رواناب

انتخاب مدل مناسب و برپایی مدل

با توجه به اهمیت پیش‌بینی محدوده مناطق سیل‌گیر، دبی و عمق آب برای مشخص نمودن مناطق اعلام هشدار و اعلام خطر به مناطق تحت تأثیر و با عنایت به تعدد رودخانه‌ها و (زیر)حوضه‌های مستقل حوضه‌های آبریز گرگانرود و از طرفی پراکنش کانون‌های جمعیتی و زیرساخت‌های در معرض آسیب، وجود مؤلفه مدل پیش‌بینی سیل برای این حوضه(ها) ضروری است. استفاده از مدل‌های رگرسیونی و داده‌مبنای گرچه روشی سریع برای این منظور است، اما سطح دقت لازم را با توجه به کیفیت سری داده‌های تاریخی موجود بخصوص برای حوضه‌ای مانند حوضه گرگانرودرود با ویژگی‌های فیزیوگرافی خاص دارا نیستند. همچنین مدل‌های رگرسیونی و داده‌مبنای پارامترهای فیزیکی مثل زبری بستر رودخانه‌ها را نیز توضیح نمی‌دهند. دامنه عملکرد مطلوب این روش‌ها محدود به بازه داده‌های تاریخی ثبت شده‌ای است که در حین آموزش این مدل‌ها و تنظیم پارامترهای آنها بدست آمده است و اگر سیلابی با ابعاد مکانی و زمانی متفاوت با آنچه در سری‌های تاریخی مورد استفاده در فرآیند آموزش این مدل‌ها در حوضه اتفاق بیفتد، از مطلوبیت دقت نتایج این روش‌ها کاسته می‌شود. بهمین دلیل در خیلی از سامانه‌های پیش‌بینی و هشدار سیل از این نوع مدل‌ها بعنوان مدل اصلی پیش‌بینی سیلاب استفاده نمی‌شود. لذا استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی-هیدرولیکی برای پیش‌بینی سیلاب گزینه مناسبتری

برای پیش‌بینی سیل است. از بین مدل‌های هیدرولوژیکی نیز مدل‌های توده‌ای (یکپارچه) با توجه به ساده‌سازی‌های زیاد، قابلیت شبیه‌سازی فرآیندهای بارش-رواناب را با جزئیات زمانی و مکانی لازم برای حوضه آبریز گسترده گرگانرود ندارند. مدل‌های توزیعی فیزیک‌پایه نیز از طرف دیگر نیازمند حجم زیادی از اطلاعات مانند توزیع مکانی بارش و رطوبت خاک و دیگر متغیرها هستند که با توجه به محدودیت این داده‌ها، استفاده و بکارگیری آنها جدای از بار محاسباتی سنگین آنها، عملیاتی نیست. با توجه به جمع این موارد و با عنایت به سطح اطلاعات موجود حوضه آبریز گرگانرود، به نظر می‌رسد مدل‌های بارش-رواناب^۲ مفهومی گزینه مناسبی برای تبدیل بارش‌های پیش‌بینی شده (توسط مدل پیش‌بینی بارش) به مقادیر متناظر رواناب سیلاب در سطح حوضه باشد.

با توجه به ویژگی‌های بررسی شده برای مدل‌های پرکاربرد سیل مشخص است که مدل HEC-HMS گزینه‌ای مناسب برای مدل‌سازی بارش-رواناب مربوط به وقایع سیلابی به شمار می‌رود و مدل علاوه بر محبوبیت و گستردگی کاربرد در مدل‌سازی سیلاب، کاربردوست بوده و دسترسی رایگان به این مدل نیز وجود دارد. لذا در این پژوهش، مدل HEC-HMS برای شبیه‌سازی بارش-رواناب حوضه آبریز گرگانرود انتخاب شده است (USACE-HEC, 2018).

مدلسازی بارش-رواناب در مدل هیدرولوژیکی-HEC-HMS

زیربخش‌های اصلی مدل‌سازی برای شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب حوضه آبریز بصورت زیر است:

الف- زیربخش منطقه‌ای کردن بارش

در این مرحله، بارش پیش‌بینی شده توسط مدل WRF که در سامانه پیش‌بینی و هشدار سیل بصورت خودکار به فرمت رستر تبدیل می‌شود، در سطح هر زیرحوضه میانگین‌گیری شده و به آن زیرحوضه تخصیص داده می‌شود. مساحت سلول‌های محاسباتی بارش در مدل WRF، حدود 9Km^2 است.

ب- زیربخش محاسبه تلفات بارش

در این بخش، محاسبه میزان بارش مؤثر که پس از تلفات اولیه به رواناب تبدیل می‌شود، انجام می‌گیرد. برای این منظور، از روش SCS-CN (منحنی شماره سازمان حفاظت خاک آمریکا) استفاده می‌شود. این روش به دلیل سادگی و دقت قابل قبول در محاسبه تلفات بارش در مقیاس حوضه‌های بزرگ و به‌ویژه در مناطقی با داده‌های محدود، انتخاب شده است.

در این بخش با توجه به نیازها، امکانات و محدودیت‌های موجود و قابلیت‌ها و نقاط ضعف مدل‌های مذکور در بند قبلی، مدل هیدرولیکی مناسب و منتخب برای شبیه‌سازی جریان در رودخانه‌های حوضه معرفی می‌شود.

با توجه به اینکه محدوده مدلسازی در این پروژه محدوده وسیعی از رودخانه‌های حوضه آبریز گرگانرود را پوشش می‌دهد، در بخش‌هایی از جریان عبوری از رودخانه‌ها در محدوده مورد بررسی (مثلاً زمانی که جریان از کانال اصلی خارج می‌شود) ماهیت جریان دوبعدی است. اکثر مدل‌های دوبعدی تجاری هستند و دسترسی رایگان به آنها وجود ندارد. از طرفی با توجه به قابلیت‌های مدل‌ها از جمله کاربرپسند بودن آنها، به نظر می‌رسد که مدل رایگان HEC-RAS که قابلیت شبیه‌سازی یک‌بعدی و دوبعدی سیلاب را نیز داراست، گزینه مناسبی بعنوان مدل هیدرولیک و پهنه‌بندی سیلاب در حوضه گرگانرود باشد (Brunner, 1995). مدل تجاری MIKEFLOOD نیز با توجه به اینکه دسترسی به آن در ایران وجود دارد می‌تواند مطرح باشد (DHI, 2017)؛ اما در این سامانه، مدل HEC-RAS بعنوان انتخاب اول مورد توجه قرار گرفته است.

مدل HEC-RAS

مدل HEC-RAS، توسعه‌یافته توسط ارتش مهندسی آمریکا، به عنوان یکی از جامع‌ترین و پرکاربردترین ابزارها در زمینه مدل‌سازی هیدرولیکی رودخانه‌ها و کانال‌ها شناخته می‌شود. این مدل با قابلیت شبیه‌سازی دقیق جریان‌های یک‌بعدی و دوبعدی، به‌صورت دائمی و غیردائمی، امکان تحلیل دقیق پدیده‌های هیدرولیکی مختلف از جمله سیلاب، فرسایش و رسوب‌گذاری را فراهم می‌آورد.

یکی از ویژگی‌های کلیدی مدل HEC-RAS انعطاف‌پذیری در تعریف شبکه است. مدل HEC-RAS محدودیتی در اندازه و شکل المان‌های شبکه ندارد و این امر باعث افزایش دقت و کاهش زمان محاسبات می‌شود. همچنین این مدل قادر است معادلات حاکم بر جریان را هم در حالت انتشار^۲ و هم در حالت موج دینامیکی کامل^۳ حل کند که این ویژگی آن را برای طیف گسترده‌ای از کاربردها مناسب می‌سازد. از طرفی وجود یک رابط کاربری گرافیکی ساده و شهودی، استفاده از این نرم‌افزار را برای کاربران با سطوح مختلف تخصص آسان و امکان ارتباط مستقیم با نرم‌افزارهای GIS مانند ArcGIS، فرآیند آماده‌سازی داده‌ها و نمایش نتایج را به شدت تسهیل کرده است. این مدل با بسط معادلات یک‌بعدی سنت و نانت به فضای دو بعدی، قادر به تحلیل دقیق‌تر رفتار هیدرولیکی جریان در محیط‌های پیچیده رودخانه‌ای است. در واقع، مدل HEC-RAS با حل عددی معادلات

در این روش، ابتدا تلفات اولیه (مانند تبخیر و جذب اولیه) محاسبه می‌شود و سپس بارش باقی‌مانده که به‌عنوان بارش مؤثر تلقی می‌شود، وارد فرآیند شبیه‌سازی رواناب می‌گردد. پارامتر مهم در این روش، عدد منحنی (CN) است که بر اساس نوع خاک، پوشش گیاهی و وضعیت رطوبت اولیه منطقه تعیین می‌شود. استفاده از روش SCS-CN به‌دلیل سازگاری با شرایط متنوع حوضه‌ها و امکان بکارگیری در شبیه‌سازی های مختلف بارش- رواناب رایج است (SCS, 1972; SCS, 1986).

ج- زیربخش محاسبه هیدروگراف رواناب زیرحوضه‌ها

در این بخش، رواناب سطحی تولید شده در هر زیرحوضه محاسبه و به‌صورت هیدروگراف رواناب نمایش داده می‌شود. برای این منظور از روش هیدروگراف واحد SCS استفاده می‌شود که یکی از روش‌های پرکاربرد و ساده برای تبدیل بارش به رواناب است. این روش به‌دلیل سادگی و پارامترهای محدود مورد استفاده قرار می‌گیرد و امکان شبیه‌سازی هیدروگراف‌های رواناب با دقت قابل قبول را فراهم می‌سازد. روش هیدروگراف واحد SCS به‌دلیل تطبیق‌پذیری با شرایط مختلف و قابلیت شبیه‌سازی رواناب در بازه‌های زمانی کوتاه، به‌ویژه در حوضه‌های با دبی بالا و شرایط پیچیده، انتخاب شده است. استفاده از این روش کمک می‌کند تا تغییرات دبی و زمان تأخیر رواناب به‌دقت مشخص شود (SCS, 1972; SCS, 1986).

د- زیربخش روندیابی در رودخانه‌ها

در این بخش، رواناب‌های تولیدشده از زیرحوضه‌ها در طول رودخانه‌های حوضه جاری می‌شوند و برای شبیه‌سازی این روند از مدل‌های روندیابی جریان استفاده می‌شود. در این پژوهش از روش ماسکینگام به‌عنوان یکی از روش‌های رایج روندیابی هیدرولوژیکی استفاده شده است.

روش ماسکینگام به‌دلیل سادگی و نیاز به داده‌های محدود، به‌ویژه در حوضه‌های آبریز بزرگ که دسترسی به داده‌های دقیق جریان محدود است، انتخاب می‌شود. دلیل این امر آن است که روش ماسکینگام به جای نیاز به داده‌های دقیق هندسی مقاطع عرضی رودخانه، تنها به دو پارامتر هیدرولوژیکی (X و K) وابسته است که رفتار کلی بازه رودخانه را شبیه‌سازی می‌کنند. این روش به شبیه‌سازی حرکت رواناب در طول رودخانه‌ها کمک می‌کند و با در نظر گرفتن تأخیر زمانی، جریان ورودی به نقاط مختلف رودخانه را محاسبه می‌کند.

مدل هیدرولیکی و پهنه‌بندی سیلاب

انتخاب مدل مناسب و برپایی مدل هیدرولیکی رودخانه‌ها

مونتهگومری و همکاران (Montgomery, Buffington, Smith,) (Schmidt, & Pess, 1995) بهره گرفته شد (شکل ۴). در این روش، شیب به عنوان یک شاخص کلیدی (پراکسی) برای تعیین مورفولوژی کانال و زبری هیدرولیکی متناسب با آن عمل می کند. در نهایت، این لایه های زبری تفکیک شده برای رودخانه ها و سیلاب دشت ها از طریق گزینه RAS Mapper به مدل دوبعدی معرفی شدند. شکل ۵ و شکل ۶ ضریب مانینگ در محدوده شهر آق قلا و بعد از سد گلستان را نشان می دهد.

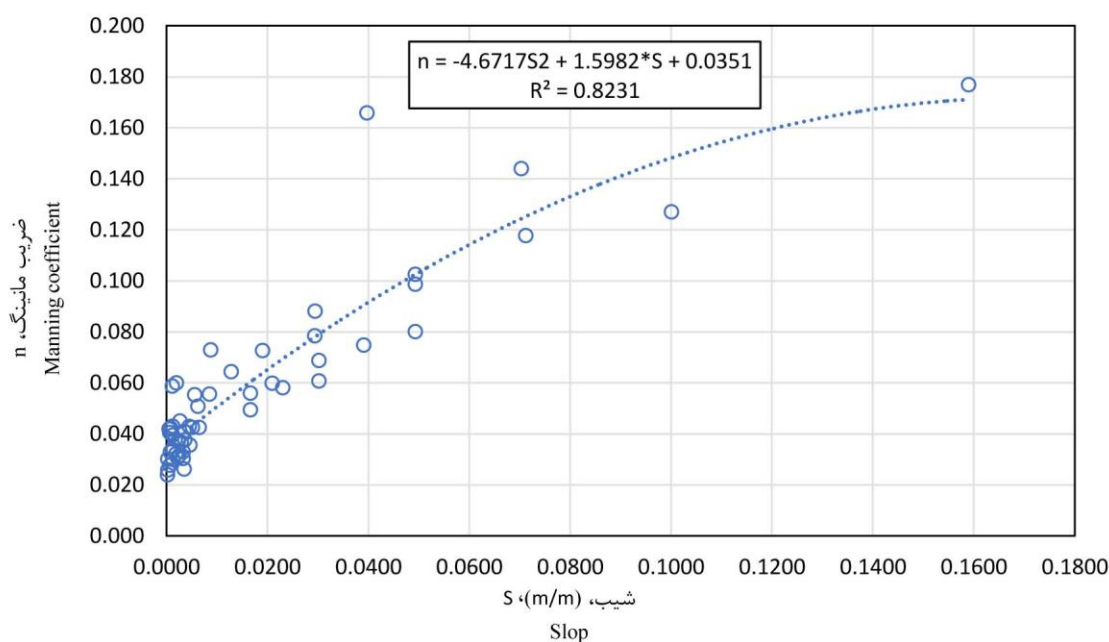
زبان برنامه نویسی

انتخاب زبان ها و نرم افزارهای مناسب برای توسعه سامانه در سمت کاربر و سمت سرور در عملکرد سامانه بسیار تأثیرگذار است. در ادامه توضیح ابزارهای مورد استفاده در قسمت های Front-End، Back-End و پایگاه داده ارائه شده است:

حاکم بر جریان در دو جهت فضایی، تغییرات سطح آب، سرعت جریان و سایر پارامترهای هیدرولیکی را در طول زمان و مکان پیش بینی می کند. با توجه به قابلیت های مدل در شبیه سازی جریان در محیط های دوبعدی، امکان در نظر گرفتن هندسه پیچیده رودخانه ها، تغییرات ناگهانی در عرض و عمق کانال، و همچنین تأثیر سازه های هیدرولیکی بر جریان به صورت دقیق تر فراهم می شود (Brunner, 1995). مراحل اصلی مدل سازی هیدرولیکی رودخانه ها با استفاده از نرم افزار HEC-RAS شامل وارد کردن داده های DEM، تعریف محدوده دوبعدی جریان، مش بندی محدوده، تعریف مرزهای ورودی و خروجی جریان، و تعیین شرایط مرزی مانند دبی، سطح آب یا شیب سطح آب است.

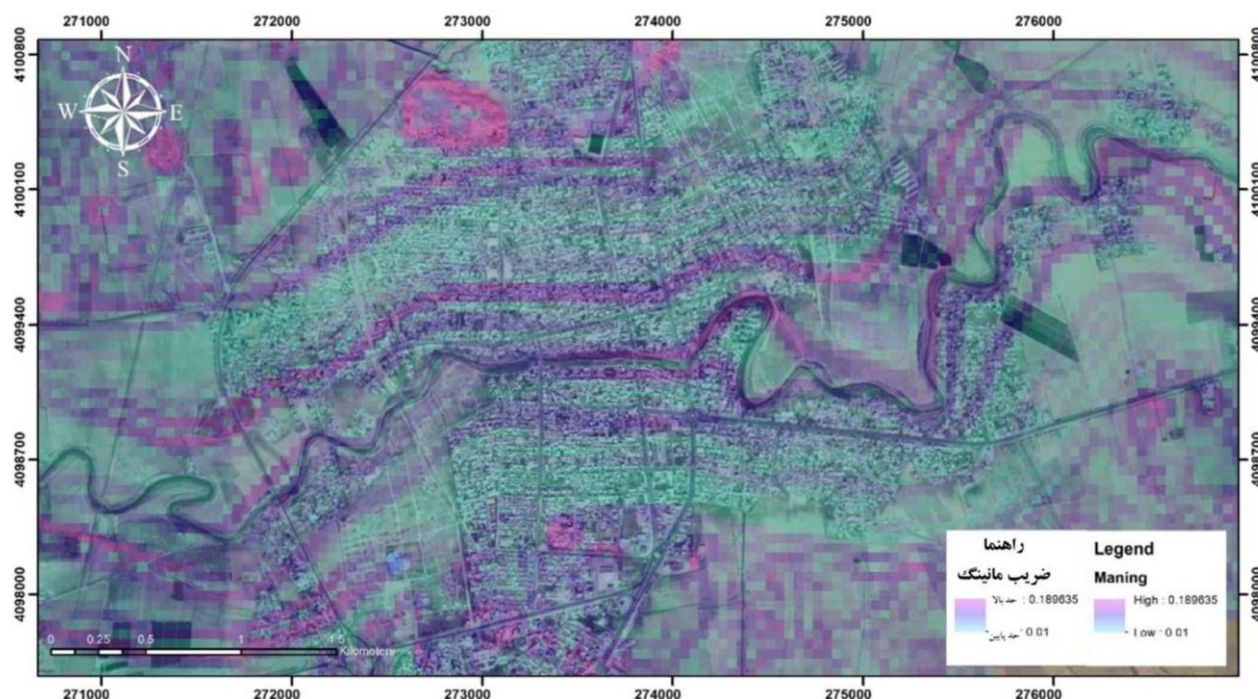
رویکرد تعیین ضریب زبری مانینگ به صورت تفکیک شده انتخاب گردید. برای مناطق شهری مانند آق قلا، با توجه به غلبه تأثیر کاربری اراضی، از یک نقشه زبری مجزا مبتنی بر نوع پوشش سطح استفاده شد (شکل ۵).

در مقابل، برای بازه های طبیعی رودخانه، از چارچوب معتبر

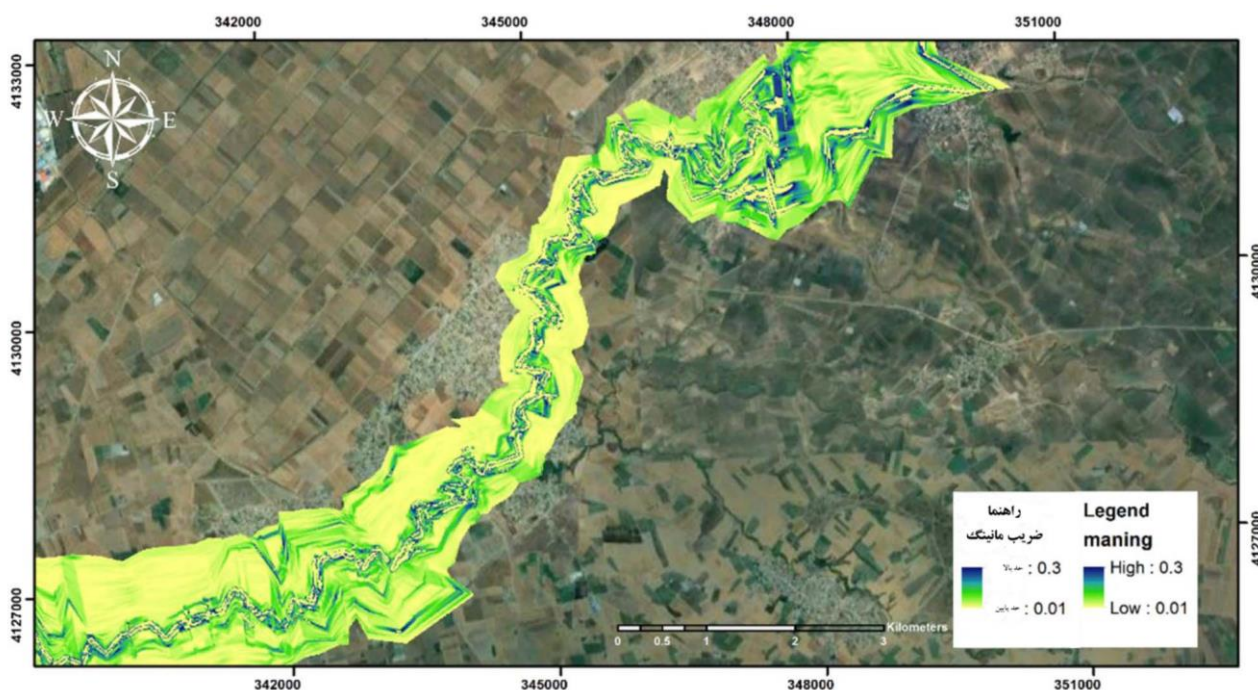


شکل ۴- رابطه شیب رودخانه با ضریب مانینگ آن (Montgomery et al., 1995)

Figure 4- The relationship between river slope and its Manning's coefficient (Montgomery et al., 1995)



شکل ۵- نقشه ضریب مانینگ سطوح شهری در محدوده شهر آق قلا
Figure 5- Map of Manning's coefficient for urban surfaces within the city of Aqqala



شکل ۶- نقشه ضریب مانینگ محدوده رودخانه بعد از سد گلستان
Figure 6- Map of Manning's coefficient for the river reach downstream of the Golestan Dam

کتابخانه به توسعه‌دهندگان امکان می‌دهد تا رابط‌های کاربری پویا و تعاملی ایجاد کنند که بتواند اطلاعات حساس مانند تغییرات سطح آب، پیش‌بینی‌ها و هشدارها را به سرعت به‌روزرسانی کند. با بهره‌گیری از

• **Front-End**
برای توسعه رابط کاربری سامانه، از کتابخانه React، یک کتابخانه محبوب جاوا اسکریپت (JavaScript library)، استفاده شده است. این

سازگاری با ابزارهای تحلیلی مختلف، به توسعه‌دهندگان این امکان را می‌دهد تا سامانه‌ای دقیق، کارآمد و قابل اعتماد ایجاد کنند که به سرعت به تغییرات محیطی واکنش نشان دهد (Obe & Hsu, 2015).
باتوجه به مطالب ذکر شده، به‌طور خلاصه دلایل انتخاب بسترهای مورد استفاده برای توسعه سامانه هشدار سیل در جدول ۱ نشان داده شده است.

نتایج و بحث

سامانه پیش‌بینی و هشدار سیل

سامانه هشدار سیل وظیفه پیش‌بینی بارش، سیل و ارائه پیام‌های هشدار را به کاربران سامانه بر عهده دارد. خروجی‌های این سامانه در قالب‌های گوناگون اعم از نمایش نقشه، جدول، نمودار، پیام متنی و غیره تهیه شده و متناسب با سطوح دسترسی تعریف شده در اختیار کاربران سامانه قرار می‌گیرد. لازمه دستیابی به این هدف، کوپل مدل‌های عددی آب و هوایی، مدل بارش-رواناب و مدل هیدرولیک و پهنه‌بندی سیل است که به‌طور یکپارچه برای محاسبه میزان و پهنه رواناب اجرا می‌شوند. پنجره مشاهده پهنه سیل در شکل ۷ و چند نمونه از اجزای سامانه در شکل ۸ نشان داده شده است.

در این سامانه، با انتخاب تاریخ و اجرای مدل توسط کاربر، سامانه به‌صورت خودکار داده‌های هواشناسی GFS را دانلود کرده و مدل WRF را اجرا می‌کند. پس از اجرای مدل WRF، سری زمانی بارش در مرکز هر زیرحوضه استخراج می‌شود. حجم داده‌های ورودی مدل برای منطقه مطالعاتی حدود ۱ گیگابایت و حجم داده‌های خروجی آن حدود ۱ مگابایت می‌باشد. برای بهینه‌سازی فضای ذخیره‌سازی، پس از اجرای مدل WRF، داده‌های ورودی حذف شده و تنها خروجی مدل که شامل سری زمانی بارش است نگهداری می‌شود. این سری زمانی سپس به مدل HEC-HMS وارد می‌شود تا رواناب در خروجی زیرحوضه‌ها محاسبه گردد. کاربر می‌تواند با اجرای این مدل، سری زمانی دبی خروجی را از طریق انتخاب ایستگاه‌ها در رابط کاربری مشاهده نماید. با توجه به وسعت زیاد منطقه مورد مطالعه، اجرای مدل پهنه‌بندی سیل برای کل منطقه نیازمند توان پردازشی و فضای ذخیره‌سازی بالایی است. به همین دلیل، مدل دوبعدی HEC-RAS تنها برای دو ناحیه بعد از سد گلستان و محدوده شهر آق قلا مشخص شده و در دسترس کاربر قرار دارد. کاربر با انتخاب هر ناحیه و اجرای مدل می‌تواند نقشه پهنه سیل را مشاهده کند. این رویکرد بهینه‌سازی منابع و دسترسی سریع به نتایج را برای کاربر فراهم می‌کند.

"Virtual DOM"، سامانه قادر است به شکل کارآمد تنها بخش‌هایی از رابط کاربری را که تغییر کرده‌اند به‌روزرسانی کند؛ این ویژگی در ارائه اطلاعات دقیق و لحظه‌ای در شرایط اضطراری بسیار اهمیت دارد. همچنین، استفاده از کامپوننت‌ها در React به توسعه‌دهندگان این امکان را می‌دهد تا بخش‌های مختلف سامانه، مانند نقشه‌های تعاملی، نمودارهای زمانی و نمایش هشدارها را به‌صورت ماژولار و مستقل طراحی کنند. این امر فرآیند توسعه را بهینه کرده و مدیریت سیستم را تسهیل می‌کند. این قابلیت‌ها برای سامانه‌های حساس و پیچیده‌ای مانند سامانه هشدار سیل که نیاز به واکنش سریع و دقیق دارند، ضروری بوده و موجب افزایش کارایی و اعتمادپذیری سیستم می‌شود.

• Back-End

در سامانه هشدار سیل که مبتنی بر WebGIS است، از Django به‌عنوان بستر نرم‌افزاری سمت سرور استفاده شده است. Django که بر پایه زبان Python توسعه یافته، به‌دلیل ساختار ماژولار، مقیاس‌پذیری بالا و امنیت پیش‌فرض، توسعه سریع و پایدار برنامه‌های وب پیچیده را امکان‌پذیر می‌کند. انتخاب Python برای این سامانه مزیت‌های زیادی دارد، از جمله سادگی و خوانایی بالای کد که باعث کاهش زمان توسعه و سهولت در نگهداری و به‌روزرسانی سامانه می‌شود. Python همچنین با PostgreSQL و ابزارهای تحلیلی مختلف به خوبی سازگار است و به توسعه‌دهندگان این امکان را می‌دهد تا داده‌های مکانی و زمانی را به سرعت پردازش کرده و ارتباطات پیچیده بین مدل‌های داده را به راحتی مدیریت کنند. این قابلیت‌ها در سامانه هشدار سیل، که نیاز به پردازش بلادرنگ و ارائه هشدارهای دقیق دارد، بسیار حیاتی است و موجب افزایش کارایی، سرعت توسعه و اعتمادپذیری سیستم می‌شود.

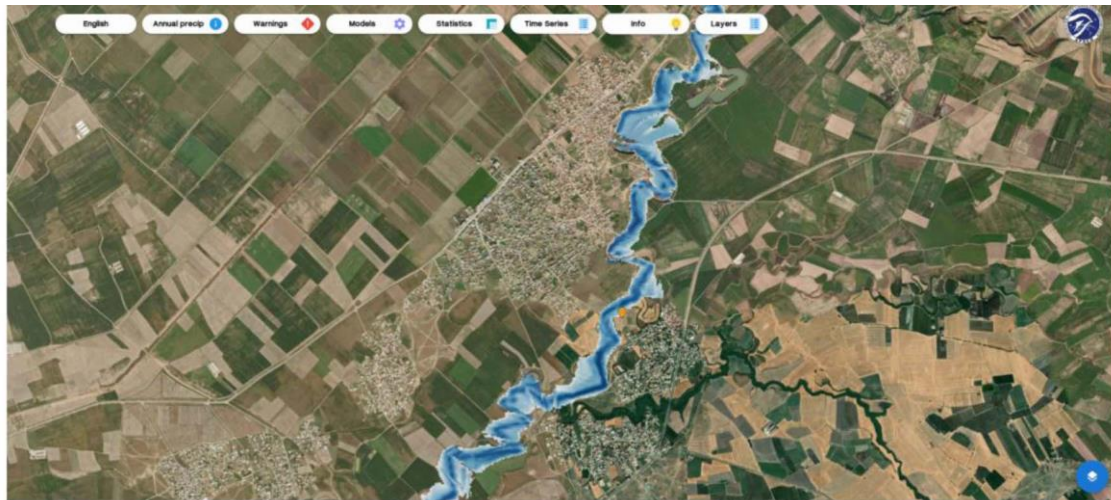
پایگاه داده

در سامانه هشدار سیل، از PostgreSQL به‌عنوان پایگاه داده مکانی استفاده شده است. این پایگاه داده، که یکی از محبوب‌ترین گزینه‌ها برای توسعه برنامه‌های وب است، به‌دلیل قابل اعتماد بودن، مقیاس‌پذیری بالا و توانایی مدیریت داده‌های حجیم انتخاب شده است. PostgreSQL با افزونه PostGIS، پشتیبانی کاملی از داده‌های مکانی ارائه می‌دهد و امکان پردازش و تحلیل دقیق و کارآمد داده‌های جغرافیایی را فراهم می‌کند. این ویژگی برای سامانه‌های هشدار سیل، که نیاز به مدیریت بلادرنگ و تحلیل سریع داده‌های مکانی دارند، بسیار حیاتی است. در مقایسه با سایر پایگاه‌های داده مانند MySQL و MongoDB، PostgreSQL با پشتیبانی بومی از داده‌های مکانی و

جدول ۱- خلاصه دلایل انتخابی اجزای نرم‌افزاری سامانه پیش‌بینی و هشدار سیل

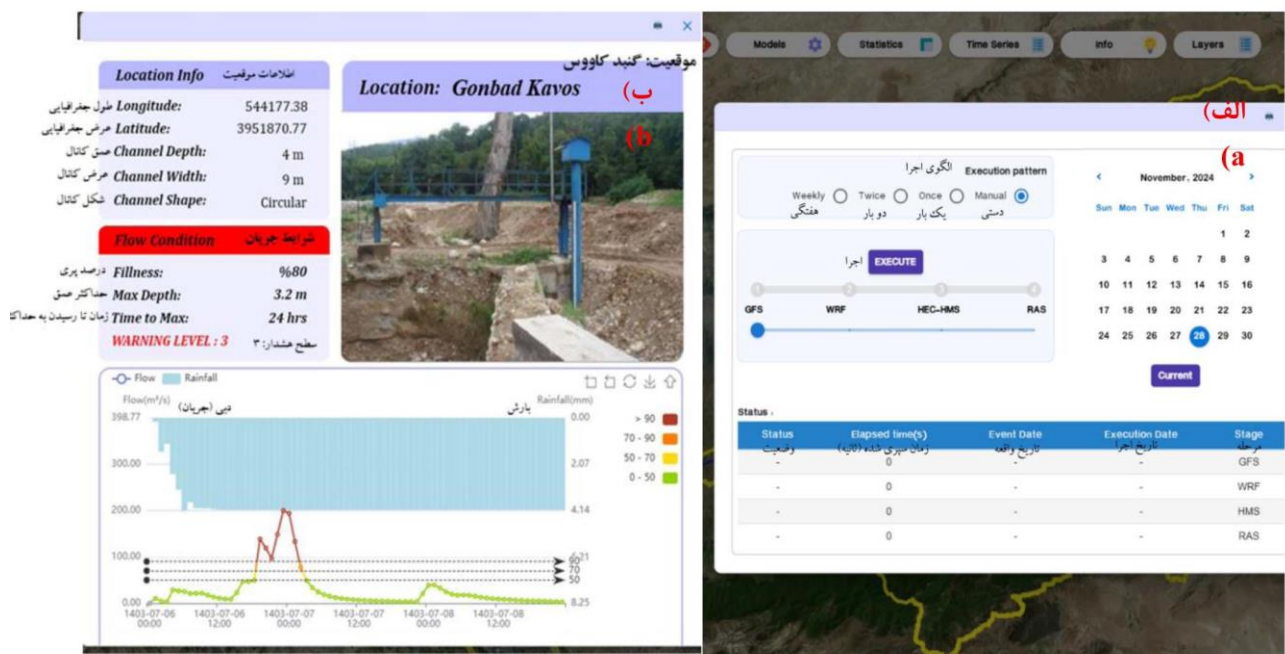
Table 1- Summary of the selection rationale for the software components of the flood forecasting and warning system

سمت پیاده‌سازی Implementation Side	انتخاب Selection	زیربخش Subsection	دلایل Reasons
سمت کاربر (Client-Side)	React	رابط گرافیکی Graphical Interface	متن‌باز (Open-source) مدیریت زمان واقعی DOM (نمایش زمان واقعی تغییرات در سایت) (Real-time DOM management) برنامه‌نویسی دستوری (Declarative programming) قابلیت استفاده مجدد از کامپوننت‌های طراحی شده (Reusability of designed components) امکان ادغام با کتابخانه‌های دیگر مانند GraphQL (Ability to integrate with other libraries like GraphQL) ارائه سرعت بالاتر در مقایسه با رقبای با بکارگیری VirtualDOM (Higher performance compared to competitors by using a Virtual DOM) امکان توسعه برای اپلیکیشن موبایل (Mobile application development capability) جامعه بزرگ و فعال (Large and active community)
			متن‌باز (Open-source) کار با تمامی مرورگرها (Cross-browser compatibility) تنوع کار با فرمت‌های مختلف داده‌های مکانی (Support for various spatial data formats) قابلیت توسعه (Extensibility) ارائه توابع آماده کامل‌تر در مقایسه با رقبای (More comprehensive built-in functions compared to competitors) مستندات کامل (Complete documentation) قابلیت نمایش سه‌بعدی (3D display capability) پشتیبانی از فرمت PBF (Support for PBF format)
سمت سرور (Server-Side)	Python / Django	زبان برنامه‌نویسی Programming Language	متن‌باز (Open-source) سینتکس ساده و خطاگیری آسان (Simple syntax and easy debugging) پشتیبانی گسترده از محاسبات علمی و ریاضی و محاسبات (Extensive support for scientific and mathematical computations) کار با پلتفرم‌های مختلف مانند ویندوز و لینوکس و Cross-platform support, e.g., Windows and Linux وجود کتابخانه‌های گسترده مکانی (Availability of extensive geospatial libraries) وجود کتابخانه‌های مختلف ارتباط با مدل‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی (Availability of various libraries for interfacing with hydraulic and hydrological models) استقبال گسترده عمومی (Wide adoption and large community)
			متن‌باز (Open-source) پایداری بالا (Reliability and Stability) قابلیت توسعه (Extensibility) مقیاس‌پذیر (Scalability) مطابقت با قاعده‌ی ACID مدیریت کارآمدتر داده‌های مکانی با افزونه PostGIS
سمت سرور (Server-Side)	PostgreSQL	پایگاه داده Database	متن‌باز (Open-source) کار با پلتفرم‌های مختلف مانند ویندوز و لینوکس و Cross-platform support, e.g., Windows and Linux قابلیت افزودن یا ساختن ماژول‌های جدید (Ability to add or create new modules) ارائه سرویس‌های متنوع نقشه بر اساس استانداردهای OGC (Provides various map services based on OGC standards) پشتیبانی از اکثر فرمت داده‌های مکانی (Support for most spatial data formats)
			متن‌باز (Open-source) سرویس‌دهنده نقشه Map Server



شکل ۷- نمایش پهنه سیل و مشاهده عمق در نقاط مختلف

Figure 7- Display of the flood inundation area and viewing depth at different points



شکل ۸- بخش‌های مختلف سامانه هشدار سیل: الف) پنجره اجرای مدل‌ها، ب) سری زمانی عمق نقاط مختلف و تصویر محل

Figure 8- Different sections of the flood warning system: a) Model execution window, b) Time series of depth at different points and an image of the location

اجرا و ارزیابی مدل پیش‌بینی بارش

با توجه به اینکه مدل WRF به‌عنوان یک مدل رایگان در دسترس، از محبوبیت جهانی برخوردار است و در حال حاضر، به‌عنوان مدل اصلی پیش‌بینی بارش توسط سازمان هواشناسی کشور مورد استفاده است، در

این پژوهش، از آن به‌عنوان مدل پیش‌بینی بارش‌های حوضه آبریز گرگانود استفاده شد. با بررسی و تحلیل داده‌های جمع‌آوری شده بارش، پنج واقعه برای مدلسازی WRF و بررسی عملکرد آن انتخاب شده‌اند. زمان رخداد هر واقعه و ایستگاه‌های باران‌سنجی آن در جدول ۲ مشخص شده است.

جدول ۲- وقایع بارش- رواناب منتخب حوضه آبریز گرگانرود برای مدلسازی WRF
Table 2- Selected Rainfall-Runoff events in the Gorganroud watershed for WRF modeling

واقعه Event	1392/01/29 2013/04/18	1390/07/27 2011/10/19	1395/03/23 2016/06/12	1395/01/03 2016/03/22	1394/10/19 2016/01/09
ایستگاه باران‌سنجی Rain Gauge Station	گلیداغ، تمر Golidagh, Tamar	گلیداغ، تمر Golidagh, Tamar	گلیداغ Golidagh	گلیداغ، دشت، دشت شاد Golidagh, Dasht, Dasht-e Shad	گلیداغ Golidagh

جدول ۳ ارائه شده است که در آن O_i مقدار مشاهداتی، P_i مقدار شبیه‌سازی شده و n تعداد کل داده‌ها است) شامل ضریب همبستگی، خطای جذر میانگین مربعات، ضریب نش-ساتکلیف، میانگین خطای مطلق، بیشترین خطای مطلق و درصد خطای نسبی^۱، می‌توان مناسب‌ترین افق زمانی پیش‌بینی را تعیین کرد. نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که با وجود نزدیکی شاخص‌های خطا در مدل‌های پیش‌بینی بارش مبتنی بر افق‌های زمانی مختلف، مدل پیش‌بینی با افق زمانی ۶ ساعته در مقایسه با سایر مدل‌ها، از دقت مطلوب‌تری برخوردار است.

به‌منظور بررسی تأثیر افق‌های زمانی پیش‌بینی مختلف در دقت مدلسازی، پس از تعیین مناسب‌ترین طرحواره‌های میکروفیزیک و همرفت، مدلسازی WRF با در نظر گرفتن افق‌های زمانی پیش‌بینی مختلف انجام می‌شود. مقادیر بارش مشاهداتی با در نظر گرفتن پنج افق زمانی ۶، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ساعت به‌عنوان زمان پیش‌بینی با استفاده از مدل WRF تخمین زده می‌شوند. با مقایسه وقایع مشاهداتی مندرج در جدول ۲ و مقادیر تخمین زده شده بارش توسط مدل WRF در افق‌های زمانی مختلف توسط آماره‌های ارزیابی (که روابط آن‌ها در

جدول ۳- آماره‌های ارزیابی خطا

Table 3- Error evaluation statistics

ضریب همبستگی (Coefficient of Determination)	$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2$
ریشه میانگین مربعات خطا (Root Mean Square Error, RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$
ضریب کارایی نش-ساتکلیف (Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE)	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}$
میانگین خطای مطلق (Mean Absolute Error, MAE)	$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n P_i - O_i }{n}$
بیشترین خطای مطلق (Absolute Maximum Error, AME)	$AME = \max_{i=1} P_i - O_i $

جدول ۴- مقایسه دقت افق‌های زمانی مدل WRF در پیش‌بینی بارش کوتاه مدت

Table 4- Accuracy comparison of the WRF model's time horizons in short-term precipitation forecasting

ردیف Row	افق زمانی پیش‌بینی Forecast Time Horizon	آماره‌های ارزیابی Evaluation Statistics					
		RE = $\left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \times 100 \right)$	AME	MAE	NSE	RMSE	R ²
1	6 ساعت 6 hours	0.73	20.15	10.64	0	12.25	0.69
2	12 ساعت 6 hours	0.76	23.16	10.99	0.05	12.92	0.62
3	18 ساعت 6 hours	0.76	23.11	11.74	-0.2	13.75	0.62
4	24 ساعت 6 hours	0.84	23.1	11.44	-0.15	13.49	0.67
5	48 ساعت 6 hours	0.79	24.15	11.41	-0.12	13.79	0.58

توسط باران‌سنج‌ها به هر دلیلی ثبت نشده باشند (کیفیت داده‌های بارش) یا ضعف خود مدل بارش-رواناب باشند. در مجموع اگرچه انطباق کامل در تمام بخش‌های هیدروگراف وجود ندارد (به‌ویژه برای ایستگاه‌های باغ‌سالیان و گالیکش که می‌تواند ناشی از عدم قطعیت‌های بالاتر داده یا پیچیدگی‌های محلی آن زیرحوضه‌ها باشد)، اما با توجه به موفقیت مدل در تخمین پارامتر کلیدی دبی اوج، روند و شکل هیدروگراف‌های بدست آمده با هیدروگراف‌های مشاهداتی هم‌خوانی دارد و لذا مقدار پارامترهای واسنجی یعنی درصد نفوذناپذیری و عدد منحنی در زیرحوضه‌های بالادست ایستگاه‌های هیدرومتری نوده (خرمالو)، ارازکوسه، باغ‌سالیان، تنگراه و گالیکش مناسب در نظر گرفته شده است.

نکته بسیار مهم در واسنجی مدل بارش-رواناب حوضه گرگانرود (و البته اکثر حوضه‌های سیل‌خیز ایران) این است که بدلیل نبود تعداد ایستگاه هیدرومتری کافی بخصوص بر روی مسیر اصلی رودخانه گرگانرود، زیرحوضه‌های مختلفی امکان کالیبراسیون مستقیم ندارند. لذا برای تنظیم پارامترهای این زیرحوضه‌ها از تشابه خصوصیات فیزیگرافی آنها با زیرحوضه‌های کالیبره شده با تکنیک خوشه‌بندی استفاده شده است. بعبارت دیگر، در این روش، از مقادیر واسنجی شده پارامترها در زیرحوضه‌های دارای ایستگاه هیدرومتری برای تخمین مقادیر پارامترهای واسنجی در زیرحوضه‌های مشابه اما فاقد ایستگاه هیدرومتری استفاده می‌شود (Alizadeh, 2022).

اجرای مدل هیدرولیکی و پهنه بندی سیل

نتایج مدل‌سازی شامل پهنه‌های عمق و سرعت جریان و هیدروگراف‌های سیلاب در نقاط مختلف رودخانه-سیلابدشت است. با توجه به حجم زیاد نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب بدست آمده از مدل، در ادامه بعنوان نمونه برخی از این نقشه‌ها و فقط برای سناریوی سیلاب سال ۹۸ (بزرگترین سیلاب مورد بررسی) ارائه شده است. بطور مشابه برای بقیه سناریوهای سیلاب نیز این نتایج براحتی از مدل قابل دستیابی است. در شکل ۱۳ نقشه‌ی حداکثر پهنه‌بندی عمق در واقعه ۵ فروردین سال ۹۸ در محدوده بعد از سد گلستان نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۴ نقشه‌ی حداکثر پهنه‌بندی سرعت سیلاب نشان داده است.

بحث

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مدل‌های به‌کاررفته برای شبیه‌سازی بارش-رواناب در حوضه آبریز گرگانرود، عملکرد قابل قبولی داشته‌اند. با این حال، همچون هر مدل‌سازی عددی دیگری، برخی

همچنین با توجه به تداوم زمانی وقایع مورد استفاده، با انتخاب افق زمانی شش ساعته برای پیش‌بینی و نیز بروزرسانی مقادیر بارش، تعداد گام‌های بروزرسانی بیشتر خواهد بود و نتایج حاصل از فرآیند بروزرسانی پیش‌بینی‌ها ملموس‌تر خواهد بود. بنابراین در این پژوهش، افق زمانی ۶ ساعته برای پیش‌بینی بارش انتخاب شده است. جزئیات پیکره‌بندی مدل WRF مبتنی بر زمان پیش‌بینی ۶ ساعت و نیز دامنه‌های تعریف شده در مدل‌سازی WRF محدوده مطالعاتی، به‌ترتیب در شکل ۹ و جدول ۵ ارائه شده است.

همچنین نقشه توزیع مکانی بارش‌های پیش‌بینی شده WRF در وقایع سیلابی ۱۳۹۸/۰۱/۳۰ و ۱۳۹۸/۰۱/۰۵ در چهار گام زمانی ترسیم شده و در شکل ۱۰ ارائه شده است.

اجرا و ارزیابی مدل بارش-رواناب

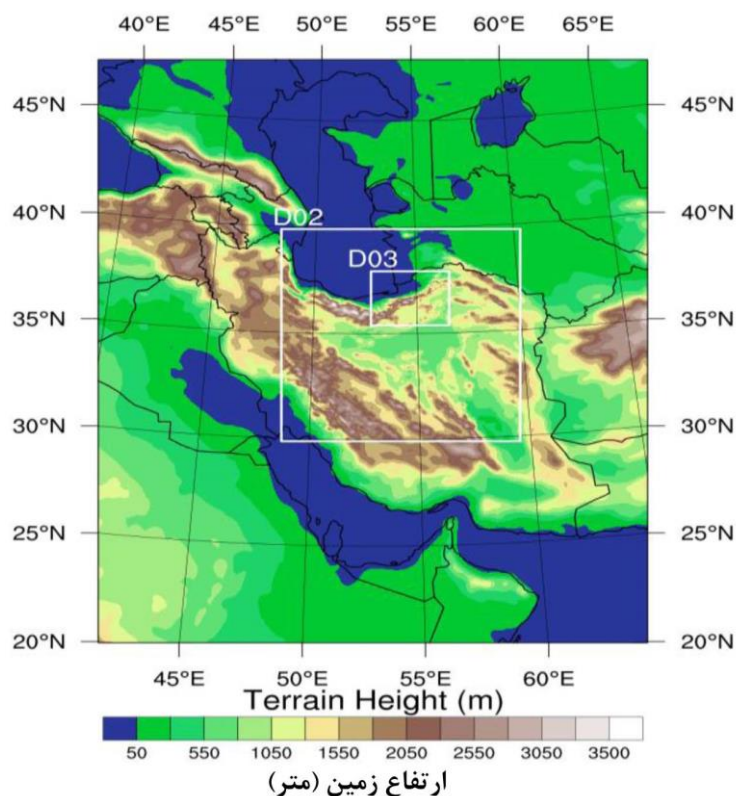
واسنجی و صحت‌سنجی مدل بارش-رواناب HEC-HMS

در این بخش از تحقیق به فرآیند شبیه‌سازی و کالیبراسیون مدل بارش-رواناب حوضه گرگانرود می‌پردازد. در طی فرآیند واسنجی ابتدا مقادیر پارامترهای مهم در زیرحوضه‌های دارای ایستگاه هیدرومتری با استفاده از مشاهدات ایستگاه‌های باران‌سنجی و هیدرومتری واقع در محدوده مطالعاتی تعیین می‌شود. ایستگاه‌های هیدرومتری نوده، ارازکوسه، باغ‌سالیان، تنگراه و گالیکش از جمله ایستگاه‌های واقع در سرشاخه‌های شبکه رودخانه‌های محدوده مطالعاتی هستند که برای واسنجی زیرحوضه‌های منتهی به این ایستگاه‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از بارش‌های ثبت شده در هر واقعه سیلابی برای تخمین بارش در مراکز زیرحوضه‌های مورد نظر برای واسنجی به روش IDW استفاده شده است. نتایج واسنجی و صحت‌سنجی زیرحوضه‌های دارای ایستگاه هیدرومتری در شکل ۱۱ و شکل ۱۲ ارائه شده است.

با توجه به شکل ۱۱ و شکل ۱۲، لازم به توضیح است که هدف اصلی فرآیند واسنجی برای یک سامانه هشدار سیل، شبیه‌سازی هر چه دقیق‌تر مقدار و زمان وقوع دبی اوج (Peak Discharge) است. همانطور که در اکثر نمودارها مشخص است، مدل در دستیابی به این هدف اولیه عملکرد موفقی داشته و هیدروگراف‌های سیل به خصوص برای دبی اوج به خوبی توسط مدل شبیه‌سازی شده‌اند. در خصوص حجم سیل اختلاف بیشتری مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی باشد. این عوامل می‌تواند خطاهای ناشی از عدم قطعیت توزیع مکانی بارش، خطاهای ناشی از روش اندازه‌گیری دبی و عملکرد ضعیف 'شفت‌انکودرها در جریان‌های سیلابی (کیفیت داده‌های هیدرومتری)، عدم لحاظ حجم رواناب‌های ناشی از بارش‌های ساعت‌های قبلی که

می‌تواند زمان زیادی را طلب کند. از سوی دیگر، اجرای مدل‌های پیچیده هیدرولوژیکی و هیدرولیکی همچون HEC-HMS یا HEC-RAS نیز به قدرت پردازش بالا نیاز دارد. این مسئله باعث می‌شود که در شرایط بحرانی که نیاز به واکنش سریع وجود دارد، کارایی مدل کاهش یابد.

چالش‌ها و محدودیت‌هایی وجود دارند که باید به آن‌ها توجه شود. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در اجرای این مدل‌ها، نیاز به سیستم‌های محاسباتی قدرتمند و زمان‌بر بودن ران‌های طولانی مدت مدل است. به‌خصوص در مورد مدل WRF که برای شبیه‌سازی بارش‌های منطقه‌ای استفاده شده، اجرای آن بر روی سیستم‌های ضعیف یا متوسط



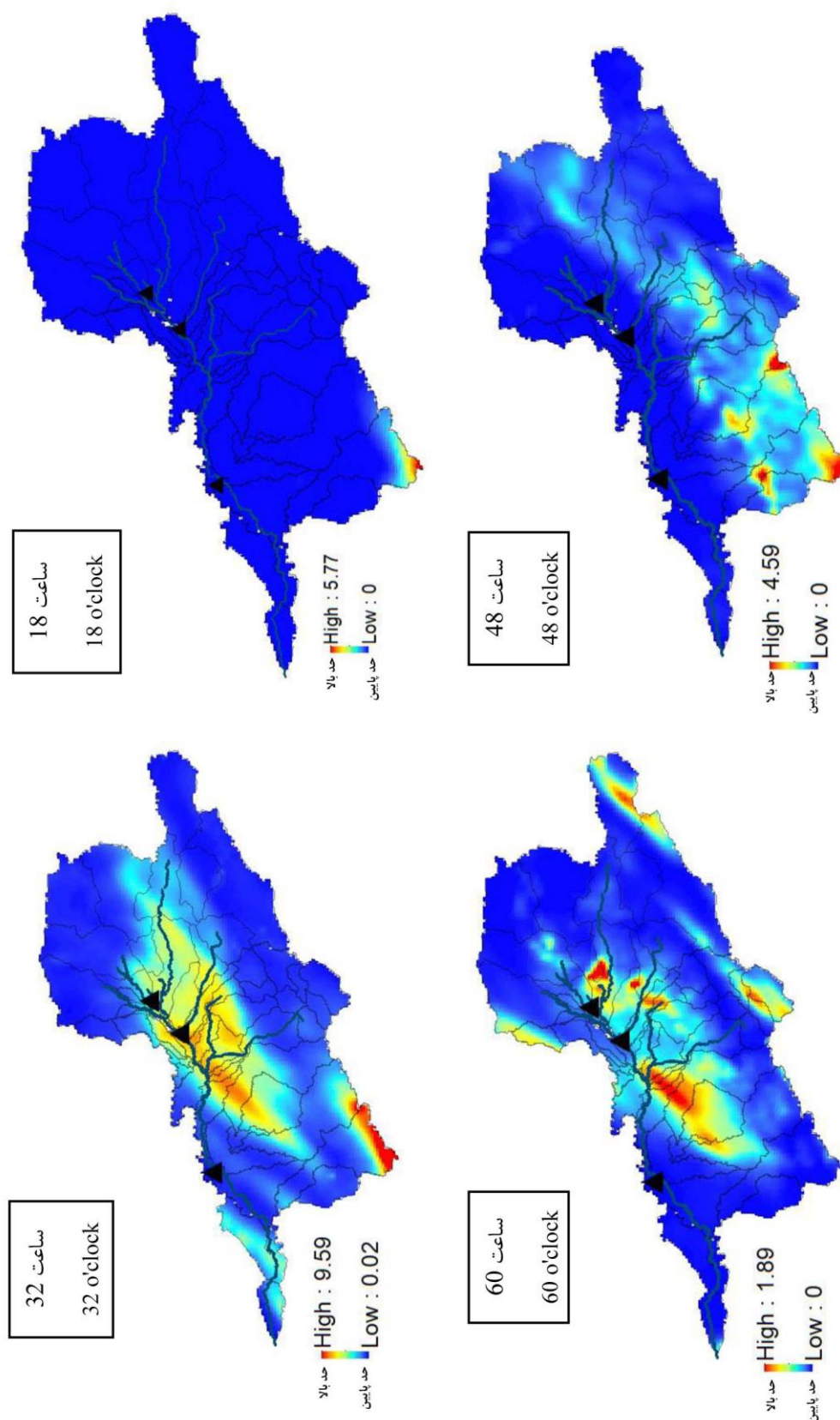
شکل ۹- محدوده دامنه‌های تعریف شده برای شبیه‌سازی جو در مدل WRF برای حوزه آبریز گرگانرود

Figure 9- The extent of the defined domains for atmospheric simulation in the WRF model for the Gorganroud watershed

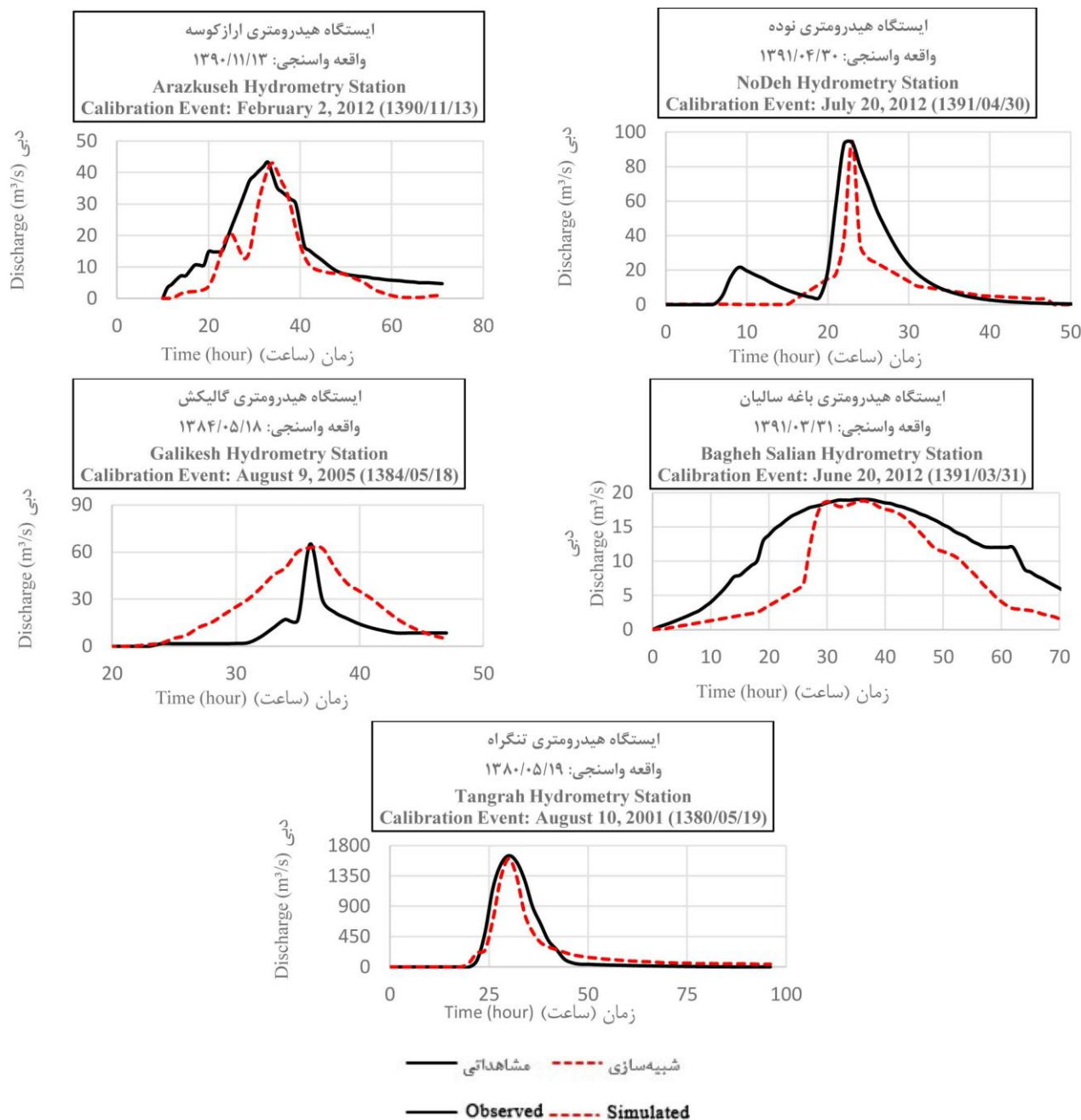
جدول ۵- جزئیات پیکره‌بندی مدل WRF برای حوزه آبریز گرگانرود

Table 5- Configuration details of the WRF model for the Gorganroud watershed

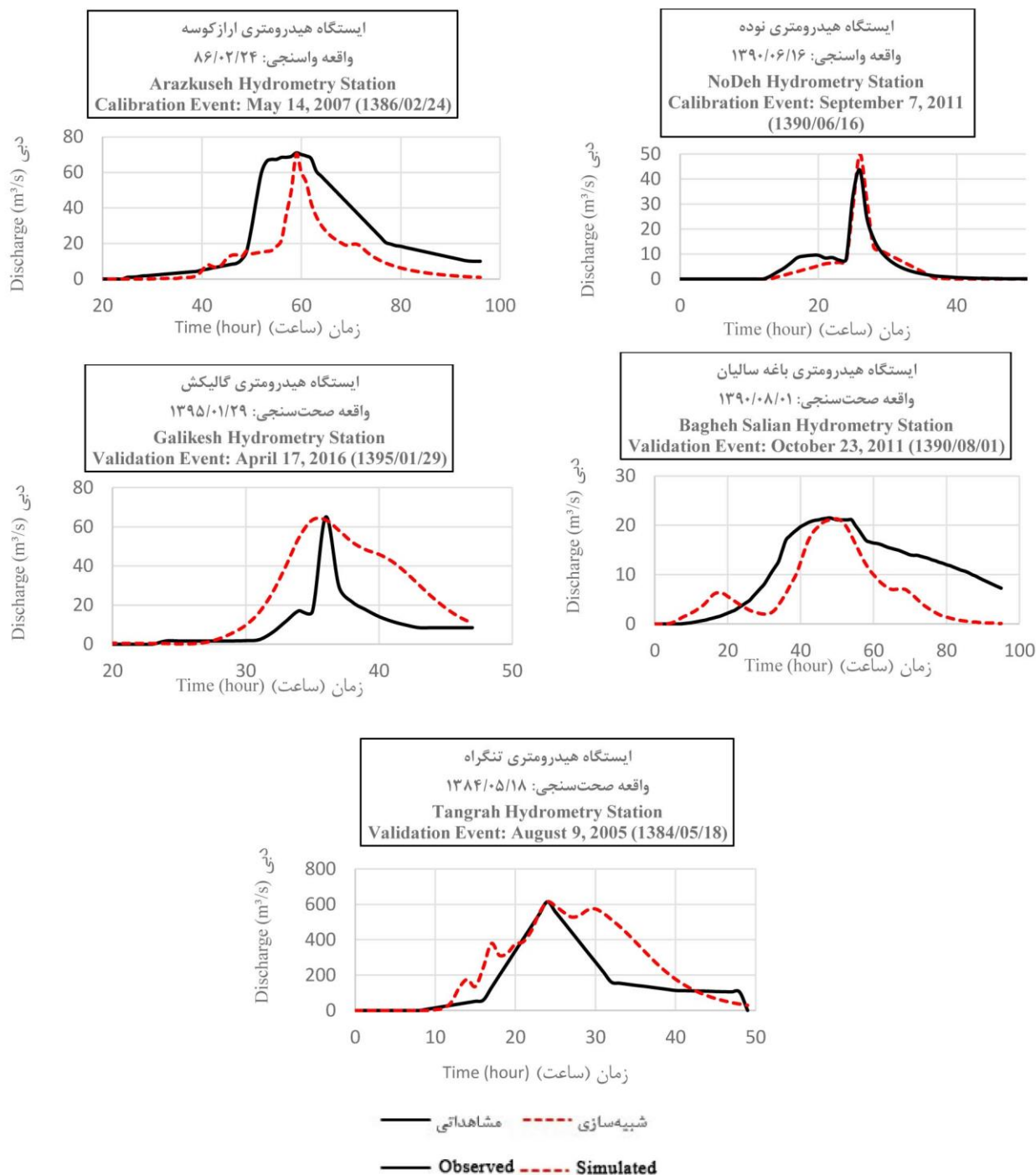
دینامیک	غیر هیدرواستاتیک
Dynamics	Non-hydrostatic
رزولوشن قائم	27 سطح
Vertical resolution	27 levels
رزولوشن افقی	دامنه 1: 18/7 کیلومتر، دامنه 2: 6/23 کیلومتر، دامنه 3: 2/07 کیلومتر (نسبت دامنه‌ها: 1 به 3)
Horizontal resolution	Domain 1: 18.7 km, Domain 2: 6.23 km, Domain 3: 2.07 km (Ratio: 1 to 3)
فرکانس زمانی خروجی‌ها	1 ساعت
Output time frequency	1 hour
طرحواره میکروفیزیک	Liu et al.
Microphysics scheme	
طرحواره همرفت	Grell 3D ensemble
Convection scheme	
طرحواره طول موج بلند	rrtm scheme
Longwave radiation scheme	
طرحواره طول موج کوتاه	Dudhia scheme
Shortwave radiation scheme	
طرحواره سطح زمین	Unified Noah land-surface model
Land surface scheme	
طرحواره لایه مرزی	YSU scheme
Boundary layer scheme	



شکل ۱۰- نقشه توزیع مکانی بارش‌های پیش‌بینی شده WRF در واقعه سیلابی ۱۳۹۸/۰۱/۰۵
Figure 10- Map of the spatial distribution of WRF-predicted precipitation during the flood event of March 25, 2019 (1398/01/05)



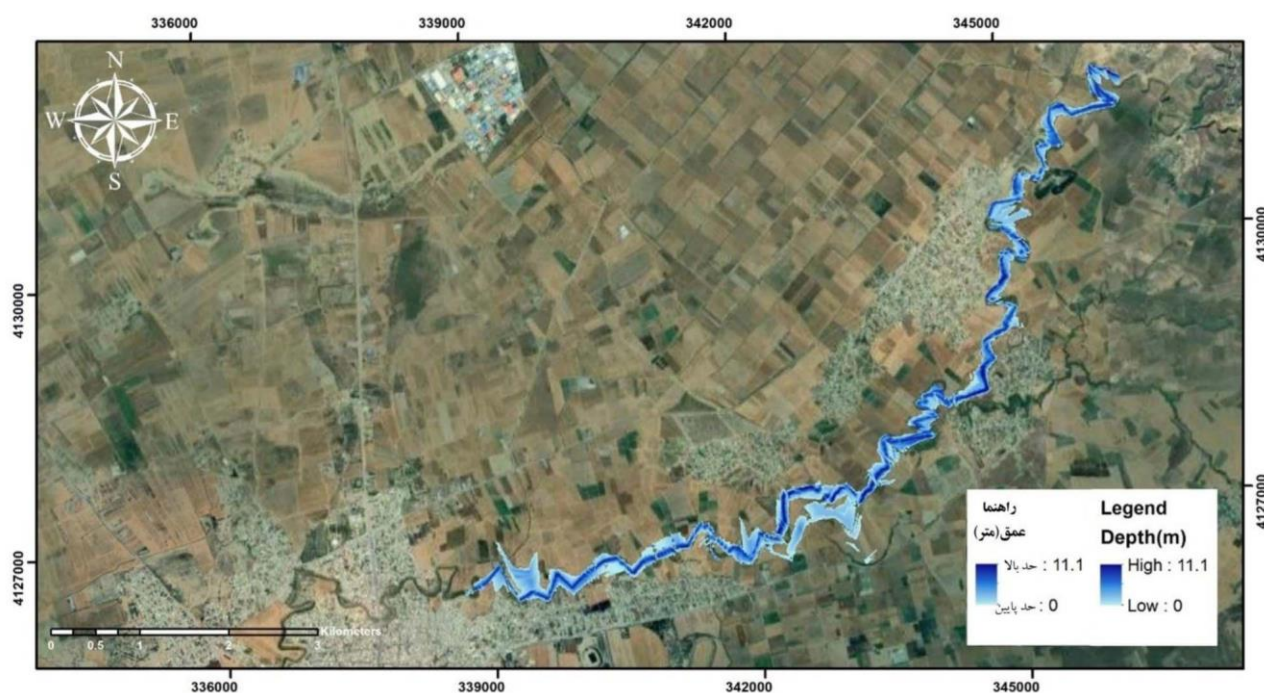
شکل ۱۱- هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی در واسنجی مدل بارش-رواناب HEC-HMS/ برای حوزه آبریز گرگانرود
Figure 11- Observed and simulated hydrographs in the calibration of the HEC-HMS rainfall-runoff model for the Gorganroud watershed



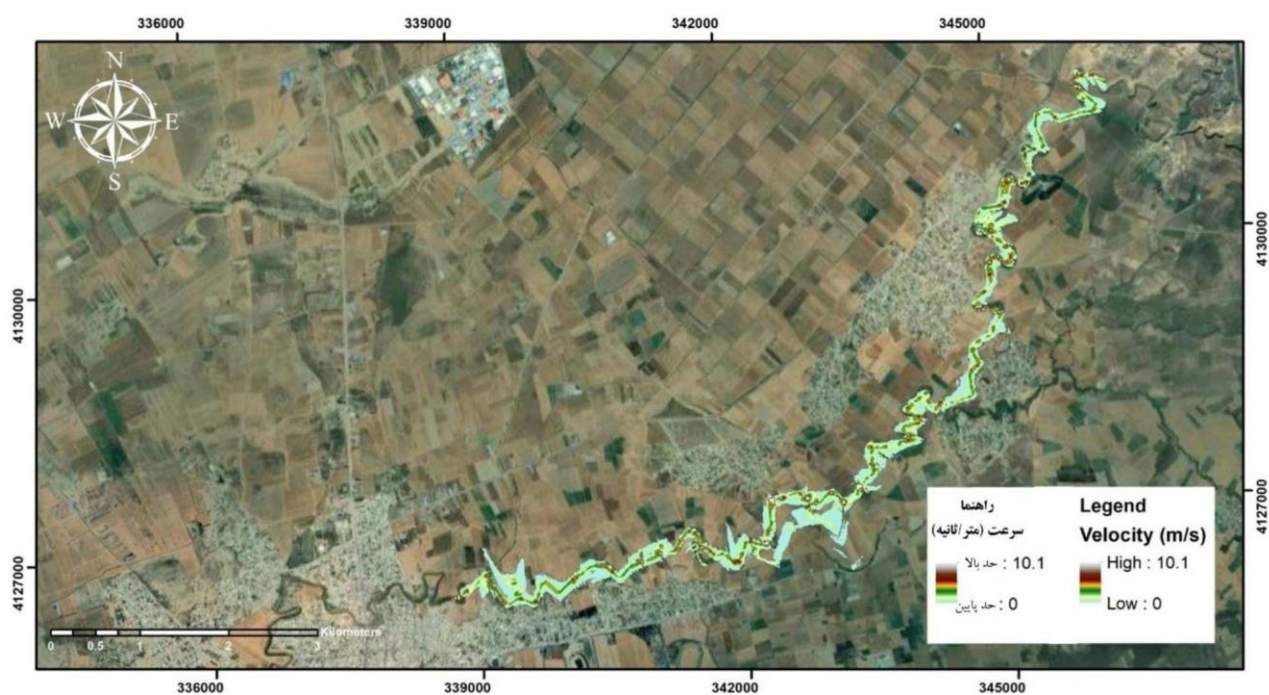
شکل ۱۲- هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی در صحت‌سنجی مدل بارش-رواناب HEC-HMS برای حوضه آبریز گرگانرود
 Figure 12- Observed and simulated hydrographs in the validation of the HEC-HMS rainfall-runoff model for the Gorganroud watershed

قابل توجهی کاهش دهد و همچنین ناپایداری‌هایی که ممکن است به دلیل ضعف سخت‌افزاری رخ دهند، برطرف گردد.

راهکار پیشنهادی برای رفع این مشکل، استفاده از رایانش ابری یا سیستم‌های موازی است. سیستم‌های ابری امروزه امکان اجرای مدل‌های پیچیده عددی را با ظرفیت محاسباتی بالا فراهم می‌کنند. استفاده از چنین زیرساخت‌هایی می‌تواند زمان اجرای مدل‌ها را به‌طور



شکل ۱۳- حداکثر پهنه عمق سیل در واقعه ۵ فروردین سال ۹۸ بعد از سد گلستان بر روی نقشه گوگل ارث
Figure 13- Maximum flood depth inundation area in the event of March 25, 2019 (Farvardin 5, 1398) downstream of the Golestan Dam on a Google Earth map



شکل ۱۴- حداکثر پهنه سرعت سیل در واقعه ۵ فروردین سال ۹۸ بعد از سد گلستان بر روی نقشه گوگل ارث
Figure 14- Maximum flood velocity inundation area in the event of March 25, 2019 (Farvardin 5, 1398) downstream of the Golestan Dam on a Google Earth map

این مطالعه، به منظور حفظ یکپارچگی روش‌شناسی در مقیاس بزرگ حوضه، از یک رابطه واحد مبتنی بر شیب استفاده شد. نویسندگان اذعان دارند که این رویکرد یک ساده‌سازی قابل توجه است، زیرا در محیط‌های شهری، کاربری اراضی و موانع انسان‌ساخت عامل اصلی کنترل‌کننده زبری هیدرولیکی هستند. با توجه به اینکه هدف اصلی، توسعه یک سامانه پیش‌بینی منطقه‌ای برای کل حوضه بود، تهیه نقشه دقیق زبری شهری خارج از محدوده این تحقیق تعریف گردید. با این حال، عملکرد قابل قبول کل سامانه در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهد که این ساده‌سازی، توانایی کلی مدل در شبیه‌سازی هیدروگراف سیل را به‌طور کامل از بین نبرده است. با این وجود، قویاً پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، با تهیه نقشه‌های زبری مبتنی بر کاربری اراضی، دقت مدل در پهنه‌بندی سیلاب در مقیاس محلی و شهری به شکل چشمگیری افزایش یابد.

در مجموع، با به‌کارگیری راهکارهایی مانند استفاده از سیستم‌های رایانش ابری برای کاهش زمان اجرا، بهبود واسنجی مدل‌ها با داده‌های بیشتر و متنوع‌تر، و ادغام مدل‌های مختلف برای بهبود پایداری، می‌توان نتایج بهتری در پیش‌بینی و مدیریت سیلاب‌ها به دست آورد. استفاده از زیرساخت‌های مدرن مانند AWS^۱ یا Google Cloud نه تنها زمان محاسبات را کاهش می‌دهد، بلکه به مدیریت بهتر و دقیق‌تر سیلاب‌ها کمک شایانی خواهد کرد. در این پژوهش نیز استفاده از سیستم HPC دانشگاه شهید بهشتی امکان اجرای سریع‌تر و دقیق‌تر مدل‌ها را فراهم کرده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدل‌سازی جامع و چندوجهی هواشناسی، هیدرولوژیکی و هیدرولیکی حوضه آبریز گرگانرود با بهره‌گیری از مدل‌های پیشرفته مانند مدل‌های WRF، HEC-HMS و HEC-RAS انجام شد. این فرآیند شامل پیش‌بینی بارش، شبیه‌سازی دقیق بارش-رواناب و پهنه‌بندی سیلاب است که به‌طور هم‌زمان از داده‌های برخط جهانی، اطلاعات هیدرومتری، هیدرولوژیکی و شرایط محیطی منطقه بهره برده شد.

مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی بارش-رواناب و ارزیابی پارامترهای هیدرولوژیکی، عملکرد خوبی از خود نشان دادند. نتایج این مدل، به‌ویژه در شبیه‌سازی هیدروگراف‌ها، تطابق مناسبی با داده‌های مشاهداتی داشت و توانایی آن در بازتولید سیلاب‌های واقعی منطقه اثبات شد. همچنین، مدل دو بعدی HEC-RAS با شبیه‌سازی سیلاب در دشت‌های سیلابی و مناطق شهری، اطلاعات ارزشمندی در مورد

به‌عنوان مثال، در این مطالعه، از مرکز پردازش‌های سریع (HPC) دانشگاه شهید بهشتی برای اجرای مدل‌ها استفاده شده است. این مرکز محاسباتی شامل دو فاز پردازشی با مجموع بیش از ۸۰۰ هسته از نوع Intel Xeon، بیش از ۶ ترابایت حافظه رم، و گره‌های مجهز به پردازنده‌های گرافیکی (GPU) از نوع NVIDIA Tesla K40m است که بر روی سیستم‌عامل CentOS و شبکه InfiniBand فعالیت می‌کند. این سیستم به‌دلیل توان محاسباتی بالای خود، قادر به اجرای مدل WRF و مدل‌های هیدرولوژیکی در زمان کوتاه‌تر و با دقت بالاتر بوده است.

چالش دوم که ممکن است در طول اجرای مدل‌ها با آن مواجه شویم، امکان ناپایداری مدل‌ها به‌ویژه در شرایط مرزی پیچیده یا در زمان شبیه‌سازی وقایع بارشی بسیار شدید است. مدل‌هایی مانند WRF و HEC-RAS به‌دلیل حساسیت به پارامترهای ورودی و شرایط اولیه ممکن است در برخی موارد ناپایداری‌هایی نشان دهند که می‌تواند به نتایج نادرست منجر شود. این ناپایداری می‌تواند ناشی از مشکلاتی نظیر داده‌های ناقص، شرایط مرزی نامطمئن یا تنظیمات نادرست مدل باشد. برای رفع این چالش، واسنجی دقیق‌تر مدل‌ها از طریق استفاده از داده‌های بیشتر و تحلیل حساسیت پارامترها ضروری است. در صورتی که امکان جمع‌آوری داده‌های محلی بیشتری فراهم شود، می‌توان واسنجی مدل را بهبود بخشید و پارامترهای حساس مانند عدد منحنی (CN)، زمان تأخیر (Lag-time)، و ضریب مانینگ را با دقت بالاتری تنظیم کرد. همچنین، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و داده‌های راداری برای بهبود دقت بارش‌های ورودی به مدل می‌تواند پایداری نتایج را تقویت کند.

علاوه بر این، استفاده از مدل‌های ترکیبی که بتوانند از نقاط قوت چند مدل مختلف بهره‌مند شوند نیز می‌تواند به کاهش ناپایداری کمک کند. برای مثال، مدل WRF می‌تواند برای پیش‌بینی بارش استفاده شود و سپس این داده‌ها در مدل‌های هیدرولوژیکی دقیق‌تری مانند HEC-HMS به‌کار گرفته شوند تا روندیابی سیلاب‌ها با دقت بیشتری انجام شود.

چالش سوم مربوط به کمیت و کیفیت داده‌های وقایع مورد استفاده برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل بارش-رواناب است. این محدودیت می‌تواند اعتمادپذیری نتایج مدل را در تحت تأثیر قرار دهد. هر چند استفاده از داده‌های مشاهداتی چند واقعه سیلابی در این مطالعه، تا حدی نیاز واسنجی را برطرف کرده، اما برای حصول نتایج دقیق‌تر، به داده‌های بیشتر و دقیق‌تری نیاز است.

یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های این پژوهش، روش تخمین ضریب زبری مانینگ، به‌ویژه در مناطق شهری مانند آق‌قلا است. در

برنامه‌نویسی Python و بستر توسعه تحت وب Django انتخاب شده‌اند که با ترکیب سرعت و انعطاف‌پذیری، امکان مدیریت بهینه پردازش‌ها را فراهم می‌کنند. همچنین، از پایگاه داده PostgreSQL به همراه افزونه مکانی PostGIS برای ذخیره‌سازی داده‌های مکانی و تحلیلی استفاده شده است، که عملکرد سامانه را در مدیریت داده‌های حجیم و پیچیده تضمین می‌کند. نقشه‌های سامانه نیز با استفاده از نرم‌افزار GeoServer به صورت آنی ارائه می‌شوند، که دقت بالایی در نمایش نتایج مکانی و پیش‌بینی سیلاب دارد. این زیرساخت قوی، سامانه‌ای پیشرفته، کارآمد و دقیق را برای مدیریت بحران سیلاب فراهم کرده است. این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های پیشرفته و ترکیب نتایج آنها، همراه با مدل WRF برای پیش‌بینی بارش‌ها، می‌تواند به کاهش خسارات ناشی از سیلاب‌ها و بهبود مدیریت منابع آب کمک کند. دستاوردهای این تحقیق می‌تواند به عنوان الگویی مؤثر برای سایر حوضه‌های آبریز مشابه در کشور و منطقه مورد استفاده قرار گیرد و راهکارهای نوین برای مدیریت منابع آب و کاهش ریسک سیلاب ارائه دهد.

عمق و سرعت جریان سیلاب‌ها ارائه کرد. این اطلاعات برای مدیریت بهینه سیلاب و برنامه‌ریزی‌های زیرساختی در مناطق پرخطر بسیار مفید واقع شد.

یکی از دستاوردهای مهم این تحقیق، موفقیت مدل WRF در پیش‌بینی قابل قبول بارش‌ها بود. مدل WRF با دقت قابل قبولی توانست مقادیر بارش پیش‌بینی شده را با داده‌های مشاهداتی مقایسه کند و نتایج خوبی ارائه دهد. این مدل به‌ویژه در شبیه‌سازی مقادیر بارش تجمعی و توزیع زمانی آن، نشان‌دهنده دقت و کارایی بالا بود. استفاده از پیش‌بینی‌های مدل WRF، که به‌طور مؤثری قادر به پیش‌بینی بارش‌ها در مقیاس زمانی و مکانی دقیق است، به تقویت فرآیند مدل‌سازی بارش - رواناب و بهبود پیش‌بینی‌های سیلاب کمک کرد.

به این ترتیب، مدل‌های WRF، HEC-HMS و HEC-RAS به‌صورت هماهنگ برای شبیه‌سازی بارش، فرآیند بارش - رواناب، و پهنه‌بندی دقیق سیلاب‌ها به کار گرفته شده‌اند. برای توسعه رابط کاربری (GUI)، از بستر نرم‌افزاری قدرتمند React استفاده شده که تجربه‌ای کاربرپسند و روان ارائه می‌دهد. در بخش سرور، زبان

References

- Alizadeh, Z. (2022). Real-time adaptive operation of dam reservoir systems under flood conditions. Ph.D. Dissertation, Supervised by Dr. Jafar Yazdi, Shahid Beheshti University.
- Avand, M., Moradi, H.R., & Ramazanzadeh Lasboyee, M. (2021). Spatial prediction of future flood risk: an approach to the effects of climate change. *Geosciences*. <https://doi.org/10.3390/geosciences11010025>
- Bajracharya, S.R., Khanal, N.R., Nepal, P., Rai, S.K., Ghimire, P.K., & Pradhan, N.S. (2021). Community assessment of flood risks and early warning system in ratu watershed, Koshi basin, Nepal. *Sustainability*, 13(6), 3577. <https://doi.org/10.3390/su13063577>
- Brunner, G.W. (1995). HEC-RAS river analysis system. Hydraulic reference manual. Version 1.0.
- Byaruhanga, N., Kibirige, D., Gokool, S., & Mkhonta, G. (2024). Evolution of flood prediction and forecasting models for flood early warning systems: A scoping review. *Water*, 16(13), 1763. <https://doi.org/10.3390/w16131763>
- Chen, W., Wu, H., Kimball, J.S., Alfieri, L., Nanding, N., Li, X., & Zhong, W. (2022). A coupled river basin urban hydrological model (DRIVE Urban) for real-time urban flood modeling. *Water Resources Research*, 58(11), e2021WR031709. <https://doi.org/10.1029/2021wr031709>
- Cheong, T.S., Choi, C., Ye, S.J., Shin, J., Kim, S., & Koo, K.M. (2023). Development of flood early warning frameworks for small streams in Korea. *Water*, 15(10), 1808. <https://doi.org/10.3390/w15101808>
- DHI. (2017). MIKE FLOOD: User Guide. DHI Water & Environment.
- Falck, A., Tomasella, J., & Papa, F. (2021). Assessing the potential of upcoming satellite altimeter missions in operational flood forecasting systems. *Remote Sensing*, 13(21), 4459. <https://doi.org/10.3390/rs13214459>
- GeoServer Project. (2024). GeoServer User Manual. Retrieved from <https://docs.geoserver.org>
- Ghahraman, K., Nagy, B., & Nooshin Nokhandan, F. (2023). Flood-prone zones of meandering rivers: Machine learning approach and considering the role of morphology (Kashkan River, Western Iran). *Geosciences*, 13(9), 267. <https://doi.org/10.3390/geosciences13090267>
- Jafarzadegan, K., Moradkhani, H., Pappenberger, F., Moftakhari, H., Bates, P., Abbaszadeh, P., & Duan, Q. (2023). Recent advances and new frontiers in riverine and coastal flood modeling. *Reviews of Geophysics*, 61(2), e2022RG000788. <https://doi.org/10.1029/2022rg000788>
- Kalimisetty, S., Singh, A., Korada Hari Venkata, D.R., & Mahmood, V. (2022). 1D and 2D model coupling approach for the development of operational spatial flood early warning system. *Geocarto International*, 37(15), 4390-4405. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1886335>
- Karami, M., Abedi Koupai, J., & Gohari, S.A. (2024). Integration of SWAT, SDSM, AHP, and TOPSIS to detect flood-prone areas. *Natural Hazards*, 120(7), 6307-6325. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06483-7>
- Liu, Y., Wang, H., & Lei, X. (2021). Real-time forecasting of river water level in urban based on radar rainfall: A

- case study in Fuzhou City. *Journal of Hydrology*, 603, 126820. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126820>
16. Merino, A., García-Ortega, E., Navarro, A., Sánchez, J.L., & Tapiador, F.J. (2022). WRF hourly evaluation for extreme precipitation events. *Atmospheric Research*, 274, 106215. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106215>
17. Mishra, A., Mukherjee, S., Merz, B., Singh, V.P., Wright, D.B., Villarini, G., & Stedinger, J.R. (2022). An overview of flood concepts, challenges, and future directions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 27(6), 03122001. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0002164](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0002164)
18. Montgomery, D.R., Buffington, J.M., Smith, R.D., Schmidt, K.M., & Pess, G. (1995). Pool spacing in forest channels. *Water Resources Research*, 31(4), 1097-1105.
19. Morshed, M.A., Mushwani, H., Sahak, K., & Hairan, M.H. (2024). The current state of early warning system in South Asia: A case study of Afghanistan. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 100, 104201. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.104201>
20. Muñoz, P., Orellana-Alvear, J., Bendix, J., Feyen, J., & Céleri, R. (2021). Flood early warning systems using machine learning techniques: The case of the Tomebamba Catchment at the southern Andes of Ecuador. *Hydrology*, 8(4), 183. <https://doi.org/10.20944/preprints202111.0510.v1>
21. Nanda, T., Sahoo, B., Beria, H., & Chatterjee, C. (2016). A wavelet-based non-linear autoregressive with exogenous inputs (WNARX) dynamic neural network model for real-time flood forecasting using satellite-based rainfall products. *Journal of Hydrology*, 539, 57-73. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.014>
22. NCEP. (2020). NCEP GFS: NOAA's Global Forecast System. National Centers for Environmental Prediction, National Oceanic and Atmospheric Administration.
23. Obe, R.O., & Hsu, L.S. (2015). *PostGIS in Action*, 2nd Edition. Manning Publications.
24. Patel, P., Thakur, P.K., Aggarwal, S.P., Garg, V., Dhote, P.R., Nikam, B.R., & Al-Ansari, N. (2022). Revisiting 2013 Uttarakhand flash floods through hydrological evaluation of precipitation data sources and morphometric prioritization. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 13(1), 646-666. <https://doi.org/10.1080/19475705.2022.2038696>
25. Ren, D.F., & Cao, A.H. (2023). Precipitation-runoff simulation in Xiushui river basin using HEC-HMS hydrological model. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(2), 2845-2856. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01679-x>
26. SCS. (1972). National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology. Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
27. SCS. (1986). Urban hydrology for small watersheds (TR-55). Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
28. Shaikh, A.A., Pathan, A.I., Waikhom, S.I., Agnihotri, P.G., Islam, M.N., & Singh, S.K. (2023). Application of latest HEC-RAS version 6 for 2D hydrodynamic modeling through GIS framework: a case study from coastal urban floodplain in India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(1), 1369-1385. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01567-4>
29. USACE-HEC. (2018). HEC-HMS Hydrologic Modeling System User's Manual, Version 4.3. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
30. Zang, Y., Meng, Y., Guan, X., Lv, H., & Yan, D. (2022). Study on urban flood early warning system considering flood loss. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 77, 103042. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103042>