Journal of
Hydraulics and Water Science

Online ISSN: 3092-6114
Journal homepage: https://hws.tabrizu.ac.ir/

Original Article

Prediction and Interpretable Analysis of River Flood Critical Points through the Integration of HEC-RAS Hydraulic Modeling, GIS, and SHAP-Based Machine Learning: A Case Study of the Polrud River, Gilan Province

Saeid Mohammadalizadeh[1], Ebrahim Amiri[2]

1-Department of Civil Engineering, La.C., Islamic Azad University, Lahijan, Iran

2-Department of Water Engineering, La.C., Islamic Azad University, Lahijan, Iran

Received: 2026-04-05 Accepted: 2026-11-22
Revised: 2026-11-20 Publishedonline: 2026-09-21
* Corresponding author: saeid.mohammadalizadeh@iau.ir

ARTICLE INFO

***Keywords*:**
Flood,
Machine Learning,
Hydraulic Modeling,
HEC-RAS, SHAP

ABSTRACT

Introduction

The aim of this study was to identify and analyze flood-prone areas along a reach of the Polrud River in Gilan Province, Iran, by integrating hydraulic modeling, spatial data, and machine learning algorithms. A two-dimensional hydraulic model was developed in HEC-RAS to simulate flow behavior and flood inundation. The upstream boundary condition was defined as a flood hydrograph, while the downstream boundary condition was specified as a normal depth (normal slope). The inflow hydrograph, with a peak discharge of 901 m³/s, was generated using the Soil Conservation Service (SCS) method. Flow velocity analysis indicated that the highest velocities occurred in the upstream sections and near bridge crossings, gradually decreasing toward the downstream reaches. Water surface elevation analysis showed that the water level was strongly influenced by topography and flow depth and depended on the channel geometry. A flood susceptibility map was developed using the Random Forest algorithm. The model inputs included the Digital Elevation Model (DEM), slope, land use, horizontal distance from the river, and vertical distance from the river. Feature importance analysis revealed that elevation and slope were the most influential factors in determining flood-prone areas, and the model achieved an accuracy exceeding 0.90. The results further showed that lower elevations and steeper slopes increased flood susceptibility, whereas higher elevations and gentler slopes reduced flood risk. Likewise, shorter distances from the river increased the likelihood of inundation, while greater distances decreased it. The 24-hour flood simulation demonstrated that the maximum inundation occurred during the first 8 hours of the event. The flood risk map also indicated that the highest risk was concentrated in areas adjacent to the river, with risk gradually decreasing as the distance from the channel increased. These findings demonstrate that integrating HEC-RAS hydraulic modeling, spatial datasets, and explainable machine learning provides an effective framework for predicting flood-prone areas and offering detailed insights into the key factors controlling flood susceptibility. This integrated approach can support more informed flood risk management and mitigation strategies.

Materials and Methods

How to cite:
Ojaghlou, H. Ghorbanian, M. Babaakbar,M. (2026). *Analysis of Water Productivity in Potato Cultivation and Evaluation of Optimal Irrigation Management Scenarios in Zanjan Provinc*. Journal of Hydraulics and Water Science, 36 (2):45-62.
https://doi.org/10.22034/hws.2026.71640.1054

This is an open-access article under the CC BY NC license
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

The Polroud River basin, covering 1,634 km² and extending between 36°08′–37°36′ N and 49°30′–50°45′ E, was studied along its lower 6 km reach between Darzalat and Haratbar gauging stations. Two major bridges, the Old Kolachay Bridge and the Highway Bridge, were identified as key hydraulic structures affecting flow and flood behavior. Hydraulic simulations were conducted using HEC-RAS to compute water depth, flow velocity, and floodplain extents under steady and unsteady flow conditions, including the effects of bridges, Manning's roughness coefficients, and boundary flows. GIS was used to extract river cross-sections, banks, and terrain features from the DEM, and to prepare spatial layers for flood hazard analysis. Python processed HEC-RAS and GIS data to develop Random Forest models and spatial flood risk maps. Topographic, hydraulic, and land-use variables were integrated into the machine learning framework to classify flood hazard and identify critical sites. Train-test data splitting and evaluation metrics including IoU, Precision, Recall, and F1-score were used to assess model performance. This integrated HEC-RAS–GIS–ML approach enables a physics-based, data-driven assessment of flood risk, providing rapid, reproducible, and spatially detailed decision-support tools for effective flood management.

Results and Discussion

Maximum flow depths and velocities were observed near bridge structures and downstream sections, with velocities peaking in constricted areas and decreasing in wider, deeper sections (Figures 12–13). Water surface elevations varied with topography, showing negative values in low-lying areas, reflecting the influence of ground elevation on flood propagation (Figure 14). Flood extents were delineated using a 0.3 m depth threshold, isolating significant inundated areas (Figure 15). Random Forest modeling achieved the following performance metrics for the training and test datasets, respectively: IoU = 0.67, Accuracy = 0.96, Precision = 0.83, Recall = 0.78, and F1-score = 0.80 for training; and IoU = 0.58, Accuracy = 0.94, Precision = 0.76, Recall = 0.71, and F1-score = 0.74 for testing (Table 4), indicating strong predictive performance and robust generalization. Flood hazard maps showed the highest probabilities near the river channel, decreasing with increasing elevation and distance from the river (Figures 15 and 24–25).SHAP analysis identified the dominant factors controlling flood probability. Low elevation and steep slopes significantly increased risk, while greater horizontal and vertical distances from the channel reduced it (Figures 19–23). Land use variations influenced runoff patterns, with vegetated and built-up areas contributing differently to predicted flood extents. These patterns highlight the spatial distribution of high-risk zones and confirm that the model correctly captured the influence of key hydrological and geomorphological factors.Integration of hydraulic modeling outputs with spatial and environmental features enabled detailed, probabilistic flood mapping. High-risk areas coincided with deep flows, steep slopes, and proximity to channel constrictions, particularly near bridges. The combination of HEC-RAS simulations, GIS-based spatial features, and Random Forest modeling provided accurate, spatially detailed, and interpretable predictions, facilitating identification of critical flood-prone areas and supporting targeted risk mitigation strategies.

Conclusions

The findings of this study provide a basis for practical flood risk management and spatial planning in the study area. The generated flood probability maps support the prioritization of protective measures in downstream areas and locations adjacent to the river channel, where flood occurrence is more likely. They also provide useful information for controlling land-use development and construction activities in areas with high flood probabilities. Furthermore, the identified critical locations can be considered in the planning of flood protection structures, such as levees, riprap, and protective walls, to reduce the lateral expansion of floodwaters. The proposed framework can also be integrated into flood emergency management systems and water resources planning to support more informed decision-making during flood events.Despite its promising results, this study has some limitations, particularly the computational mesh resolution used in the HEC-RAS model and the limited availability of hydrometric data. These factors may affect the accuracy of hydraulic simulations and, consequently, the predictive performance of the machine learning model.

Keywords: Flood, Machine learning, Hydraulic modeling, HEC-RAS software, SHAP

نشریه
دانش آب و هیدرولیک
شاپا الکترونیکی: 3092-6114
درگاه نشریه: https://hws.tabrizu.ac.ir/

مقاله پژوهشی

پیش‌بینی و تحلیل تبیین‌پذیری نقاط بحرانی سیلاب رودخانه با تلفیق مدل هیدرولیکی HEC-RAS، GIS و یادگیری ماشین مبتنی بر SHAP: مطالعه موردی: رودخانه پلرود، استان گیلان

سعید محمدعلی زاده[1] و ابراهیم امیری[2]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۹
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۰ تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۵/۰۶/۳۰

۱- گروه مهندسی عمران، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران
۲- گروه مهندسی آب، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

چکیده

هدف این پژوهش، شناسایی و تحلیل نواحی مستعد سیلاب در یک بازه رودخانه پلرود واقع در استان گیلان با استفاده از ترکیب مدل‌سازی هیدرولیکی، داده‌های مکانی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین است. برای شبیه‌سازی رفتار جریان و تحلیل گسترش سیلاب، از مدل‌سازی دوبعدی در نرم‌افزار HEC-RAS استفاده شد. شرط مرزی بالادست به‌صورت هیدروگراف سیلاب و شرط مرزی پایین‌دست به‌صورت شیب نرمال تعریف گردید. هیدروگراف ورودی با دبی پیک ۹۰۱ مترمکعب بر ثانیه و روش SCS استخراج شد. تحلیل سرعت جریان نشان داد که بیشترین سرعت‌ها در بخش‌های بالادست و مجاورت پل‌ها رخ می‌دهد و با حرکت به سمت پایین‌دست کاهش می‌یابد. تحلیل تراز سطح آب نیز بیانگر تأثیر توپوگرافی و عمق جریان بر سطح آب بود. تحلیل اهمیت ویژگی‌ها نشان داد که ارتفاع و شیب زمین بیشترین نقش را در تعیین پهنه‌های سیلابی دارند و دقت مدل بیش از ۰/۹ برآورد شد.کاهش ارتفاع و افزایش شیب، احتمال آب‌گرفتگی را افزایش می‌دهد و افزایش ارتفاع و کاهش شیب، ریسک سیلاب را کاهش می‌دهد. کاهش فاصله از رودخانه نیز احتمال آب‌گرفتگی را افزایش می‌دهد. شبیه‌سازی سیلاب ۲۴ ساعته نشان داد که بیشینه آب‌گرفتگی در ۸ ساعت ابتدایی رخ می‌دهد. نقشه ریسک نیز بیانگر بیشترین ریسک در نواحی مجاور رودخانه و کاهش تدریجی ریسک با فاصله از آن بود. این نتایج نشان می‌دهند که ترکیب مدل‌سازی HEC-RAS، داده‌های مکانی و یادگیری ماشین تبیین‌پذیری، ابزار مؤثری برای پیش‌بینی و تخمین پهنه‌های مستعد سیلاب و ارائه بینش دقیق درباره عوامل مؤثر است که برای مدیریت و کاهش ریسک سیلاب ارزشمند می‌باشد.

کلمات کلیدی: سیلاب، یادگیری ماشین، مدل‌سازی هیدرولیکی، نرم‌افزار HEC-RAS، SHAP

This is an open-access article under the CC BY NC license
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)
OPEN ACCESS

۱- مقدمه

سیلاب به‌عنوان یکی از بلایای طبیعی بسیار مخرب کشور، مشابه زلزله، توانایی وارد کردن خسارات سنگین و جبران‌ناپذیر را دارد و می‌تواند باعث اختلالات اکولوژیکی، به‌ویژه در اثر جریان سیلاب آلوده شهری، شود ((Shahrasbi & Houshmand Aieni, 2018). خطر وقوع سیل هنگامی برای یک منطقه تهدیدآمیز است که هم احتمال آب‌گرفتگی آن وجود داشته باشد و هم منطقه نسبت به این واقعه آسیب‌پذیر باشد. عواملی نظیر بارش‌های سنگین پاییزه و بهاره، شیب تند حوضه آبریز، و توسعه بی‌رویه سکونتگاه‌ها در حریم رودخانه، باعث شده است که رودخانه پلرود در سال‌های اخیر به یکی از کانون‌های بحرانی سیلاب در استان گیلان تبدیل شود (Komasi and Abdoli Kolivand, 2026).

نمونه‌ای از این وضعیت،در اوایل فروردین‌ماه ۱۴۰۴ (اواخر مارس ۲۰۲۵)، بارش‌های شدید در استان گیلان موجب طغیان رودخانه پلرود در شهرستان رودسر شد. این سیلاب سبب تخریب کامل سردهنه‌های خاکی (سازه‌های آبگیر کشاورزی) در چند نقطه از مسیر رودخانه، از جمله نوده، خوانا پشتان، اشکلک و رحیم‌آباد، گردید که به دنبال آن، پروژه‌ای برای بازسازی و دائمی‌سازی این سازه‌ها اجرا شد. این رویداد نشان‌دهنده آسیب‌پذیری زیرساخت‌های آبی حوضه پلرود، به‌عنوان دومین رودخانه پرآب استان گیلان، در برابر سیلاب‌های ناگهانی است.

توسعه شهری و گستردگی سکونتگاه‌ها در حاشیه شهرها موجب تغییر شرایط طبیعی جریان رودخانه‌ها شده و نبود دبی پایه در بسیاری از مسیل‌ها، حوضه‌های کوچک با شیب تند، تغییرات بستر جریان ناشی از سازه‌ها و تمرکز سریع سیلاب‌ها، ارزیابی شدت و زمان وقوع سیلاب‌های دوره‌ای را دشوار کرده و این شرایط، ریسک خسارت و آسیب‌پذیری ساکنین را نیز افزایش داده است (Vahdani, 2024).

در این پژوهش، رفتار جریان و پهنه سیلاب رودخانه پلرود با استفاده از مدل هیدرولیکی HEC-RAS شبیه‌سازی شده و خروجی‌ها با کمک GIS تحلیل و بر روی نقشه‌های مکانی تلفیق می‌شوند تا نقاط بحرانی با دقت بیشتری تعیین گردند. علاوه بر آن، از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و روش SHAP به‌عنوان ابزارهای پشتیبان برای تحلیل الگوهای خطر و پیش‌بینی وقوع سیلاب استفاده می‌شود. ترکیب مدل‌سازی هیدرولیکی، تحلیل مکانی و یادگیری ماشین امکان ارائه راهکارهای عملیاتی، طراحی سناریوهای اصلاح هندسی و سازه‌ای و تقویت مدیریت نقاط پرخطر را فراهم می‌کند. این رویکرد یکپارچه و نوآورانه، فراتر از مدل‌سازی سنتی، امکان تولید نقشه‌های ریسک دقیق، افزایش دقت تصمیم‌گیری و ارائه راهکارهای کاربردی برای کاهش اثرات سیلاب در رودخانه پلرود را فراهم می‌سازد.

برای درک بهتر وضعیت پژوهش و جایگاه مطالعه حاضر، بررسی تحقیقات پیشین در زمینه مدل‌سازی هیدرولیکی، پهنه‌بندی سیلاب و تحلیل نقاط بحرانی رودخانه با استفاده از GIS و الگوریتم‌های یادگیری ماشین ضروری است. مطالعات مشابه انجام‌شده نشان می‌دهد که تلفیق داده‌های هیدرولیکی، مکانی و روش‌های آماری می‌تواند ابزار قدرتمندی برای تحلیل ریسک سیلاب و ارائه راهکارهای مدیریتی فراهم آورد. در ادامه، مروری بر پژوهش‌های مرتبط ارائه شده است تا دستاوردهای علمی، روش‌های به‌کاررفته و جایگاه تحقیق حاضر در این حوزه روشن شود.

Kim et al. 2020 پژوهشی را با هدف تهیه نقشه خطر سیلاب در پایین‌دست رودخانه مکونگ در کامبوج، با استفاده از تلفیق مدل HEC-RAS و GIS انجام دادند. داده‌های دبی حداکثر سیلاب برای دوره‌های بازگشت ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ ساله با استفاده از تحلیل‌های آماری و نرم‌افزار EasyFit بررسی شدند. توزیع Log-Pearson III به‌عنوان مناسب‌ترین توزیع برای مدل‌سازی انتخاب شد. نتایج نشان داد مدل HEC-RAS با داده‌های واقعی سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۳ همخوانی خوبی دارد و می‌تواند به‌طور مؤثر عمق و محدوده سیلاب را شبیه‌سازی کند. این مدل ابزاری مناسب برای مدیریت سیلاب و هشداردهی در مناطق پرخطر محسوب می‌شود.

Nareth & Plermkamon 2015 در مطالعه‌ای بر رودخانه نام فونگ در تایلند، مدل هیدرولیکی HEC-RAS با سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) تلفیق کردند تا سیلاب در بازه‌ای به طول ۱۴۸ کیلومتر شبیه‌سازی شود. نتایج نشان داد این رویکرد ترکیبی قادر است حدود و عمق سیلاب را برای دوره‌های بازگشت مختلف با دقت بالا پیش‌بینی کرده و مناطق بحرانی را شناسایی کند. این روش، ابزاری کارآمد در مدیریت سیلاب و برنامه‌ریزی کاهش خطرات ناشی از آن محسوب می‌شود.

Ebrahimi Moghaddam 2024در تحقیقی با ترکیب مدل هیدرولیکی و سامانه اطلاعات مکانی بررسی سیلابی انجام داد. با استفاده از داده‌های ارتفاعی و پارامترهای هیدرولیکی، مدلسازی برای دوره‌های بازگشت مختلف انجام شد. نتایج نشان‌دهنده افزایش تدریجی مساحت تحت تأثیر سیلاب با افزایش دوره بازگشت بود، به‌طوری‌که این مقدار از محدوده مشخصی در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت به محدوده وسیع‌تری در دوره‌های بلندمدت رسیده است. یافته‌ها حاکی از کارایی روش ترکیبی در برآورد دقیق مناطق سیل‌گیر می‌باشد.

(Mohammadi & Esmaeili 2022) با بهره گیری از مدل های پیشرفته،تاثیر مدل های بازگشت دوره های مختلف بر گسترش پهنه های سیل گیر را بررسی کردند.نتایج پژوهش آن ها نشان داد که با افزایش دوره بازگشت،وسعن مناطق تحت تاثیر سیلاب به طور قابل توجهی افزایش می یابد.این یافته ها بر اهمیت پیش بینی دقیق پهنه های سیل گیر در مدیریت بحران تاکید دارد.

(Farooq et al. 2019) در پژوهشی به ارزیابی خطر سیلاب در یک رودخانه مهم با استفاده از مدل‌سازی پیشرفته و تحلیل داده‌های مکانی پرداختند. نتایج نشان داد وسعت مناطق تحت تأثیر سیلاب به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد، به‌ویژه در اراضی کشاورزی که ضرورت مدیریت هدفمند سیلاب را برجسته می‌کند. صحت مدل با داده‌های سیلاب‌های گذشته تایید شده و یافته‌ها می‌تواند پایه‌ای برای برنامه‌ریزی‌های کاهش خسارات آینده باشد.

(Hicks & Peacock 2005) در یک مطالعه کاربردی، توانایی مدل HEC-RAS را در تحلیل جریان‌های ناپایدار برای پیش‌بینی سیلاب بررسی کردند. نتایج نشان داد که دقت پیش‌بینی‌های این مدل در رودخانه پیس واقع در آلبرتا، با مدل‌های هیدرولیکی پیشرفته‌تر قابل مقایسه است. بر اساس این یافته‌ها، استفاده از HEC-RAS می‌تواند فرآیند پیش‌بینی سیلاب را از حالت دو مرحله‌ای (هیدرولوژیکی–هیدرولیکی) به یک فرآیند ساده‌تر و یک‌مرحله‌ای تبدیل کند و بدون نیاز به نرم‌افزارهای پیچیده‌تر، دقت نتایج را بهبود بخشد.

(Ongdas et al. 2020) یک مطالعه کاربردی بر روی رودخانه یِسیل (ایشییم) انجام دادند که در آن از مدل هیدرولیکی دوبعدی HEC-RAS برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف سیلاب استفاده شد. نتایج نشان داد که تغییر اندازه شبکه محاسباتی (۲۵، ۵۰ و ۷۵ متر) تأثیر بیشتری بر زمان شبیه‌سازی دارد تا دقت نتایج. همچنین با اعمال کالیبراسیون دستی، دقت مدل تنها اندکی بهبود پیدا کرد. در ادامه، نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب برای دوره‌های بازگشت ۱۰، ۲۰ و ۱۰۰ سال تولید شد و مشخص گردید که مناطق مسکونی ژیبک ژولی و آرناسای در تمامی سناریوها در معرض سیلاب قرار دارند. علاوه بر این، مدل نشان داد که در رخداد سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله، تنظیم‌کننده متقابل دچار سرریز نخواهد شد.

(Hekmatifar et al. 2009) اثر سه طرح سازه‌ای شامل اصلاح مسیر، لایروبی و ترکیب آن‌ها بر کاهش خسارات سیلاب در اراضی کشاورزی رودخانه قره‌سو در کرمانشاه را بررسی کردند). با استفاده از مدل HEC-RAS و محیط ArcView، پهنه‌های سیل‌گیر شبیه‌سازی شدند. نتایج نشان داد که ترکیب اصلاح مسیر و لایروبی، برخلاف انتظار، کاهش خسارت قابل‌توجهی نسبت به لایروبی به‌تنهایی نداشت. این مطالعه بر اهمیت تحلیل هزینه-فایده و ارزیابی دقیق خسارات سیلاب در انتخاب گزینه‌های سازه‌ای کنترل سیلاب تأکید می‌کند.

(Rangari et al. 2019) افزایش سیلاب‌های شهری را ناشی از تغییرات کاربری زمین و توسعه کنترل‌نشده زیرساخت‌ها دانستند. در این مطالعه، با ترکیب GIS، مدل HEC-HMS و HEC-RAS، سیلاب‌های شهری حیدرآباد در هند شبیه‌سازی و نقشه‌های مناطق پرخطر تهیه شد. نتایج بر اهمیت به‌کارگیری مدل‌های دوبعدی برای مدیریت سیلاب و کاهش خسارات احتمالی در آینده تأکید می‌کند.

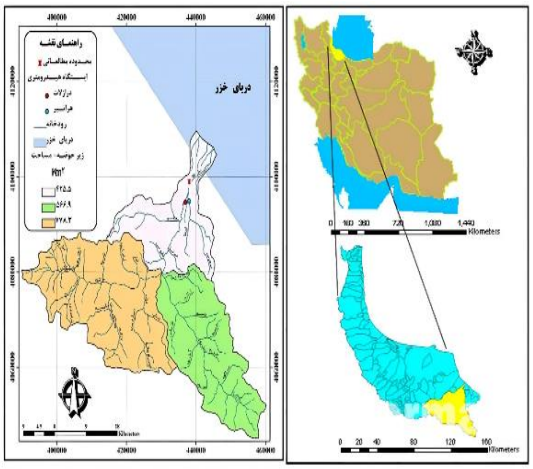
(Mohammad Razi et al. 2018) جریان رودخانه سمبرونگ را با استفاده از مدل هیدرولیکی HEC-RAS تحلیل کردند.نتایج نشان داد که در دبی حداکثر ۲۴ متر مکعب بر ثانیه،جریان رودخانه موجب وقوع سیلاب می شود.همچنین بیش از نیمی از ایستگاه ها ظرفیت عبور چنین جریانی را نداشتند که که این امر به وقوع سیلاب در مناطق مربوطه منجر شد.در این مطالعه،مدل HEC-RAS به عنوان ابزاری قابل اعتماد برای شناسایی مناطق آسیب پذیر،مدیریت سیلاب،برنامه ریزی توسعه رودخانه،کاهش خسارت و افزایش آگاهی عمومی معرفی شد.

نوآوری اصلی این پژوهش در ارائه چارچوبی ماژولار و ترکیبی برای پهنه‌بندی سیلاب است که بر تلفیق سه سه رویکرد مکمل استوار است.در این چارچوب، مدل هیدرولیکی HEC-RAS برای تولید متغیرهای فیزیکی شامل عمق،سرعت و تراز آب، سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)برای استخراج ویژگی‌های مکانی و محیطی، و الگوریتم یادگیری ماشین برای شناسایی و تعمیم الگوهای سیلاب،به مناطقی که شبیه سازی هیدرولیکی مستقیمی برای آن ها انجام نشده است،به کار گرفته شده اند.این ترکیب، محدودیت‌های ذاتی هر روش به‌تنهایی را (وابستگی HEC-RAS به سناریوهای مشخص، فقدان پشتوانه فیزیکی در GIS، و ریسک نتایج غیرواقعی در یادگیری ماشین بدون مبنای هیدرولیکی) پوشش می‌دهد.وجه تمایز مهم دیگر، به‌کارگیری ابزار تفسیرپذیری SHAP است که مدل را از حالت جعبه سیاه خارج کرده و امکان شناسایی سهم دقیق هر عامل مؤثر در احتمال وقوع سیلاب را در هر نقطه فراهم می‌کند. همچنین، برخلاف نقشه‌های سنتی دودویی یا خطوط سیلاب، خروجی این چارچوب نقشه‌های احتمال پیوسته و پیکسل‌محور است که عدم قطعیت را بهتر بازنمایی کرده و از تصمیم‌گیری مدیریتی پشتیبانی می‌کند. مزیت عملی این رویکرد، امکان تولید سریع نقشه‌های احتمال سیلاب پس از آموزش مدل بدون نیاز به اجرای مجدد شبیه‌سازی‌های زمان‌بر هیدرولیکی است.ویژگی‌ای که مدیریت پیشگیرانه سیلاب را جایگزین واکنش پس از بحران می‌کند و کاربرد چارچوب را به حوضه‌های دیگر و شرایط داده محدود نیز قابل تعمیم می‌سازد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی محدوده پژوهش

رودخانه پلرود در محدوده‌ای با مساحت حوضه آبریز ۱۶۳۴ کیلومترمربع واقع شده و بین طول‌های جغرافیایی ´۴۵ °۴۹ تا ´۵۰ °۳۰ شرقی و عرض‌های ´۳۷ °۳۶ تا ´۰۸ °۳۷ شمالی قرار دارد.



شکل ۱-اطلاعات محدوده مورد مطالعه

Fig. 1. Information of the study area

این حوضه یکی از مهم‌ترین حوضه‌های آبریز شرق استان گیلان است و رودخانه پلرود به‌عنوان پرآب‌ترین رودخانه این حوضه، در شهرستان رودسر و در منطقه‌ای با میانگین بارندگی حدود ۱۲۰۰ میلی‌متر جریان دارد. این رودخانه از میان اراضی با کاربری غالب کشاورزی عبور کرده و نقش مهمی در تأمین آب اراضی پایین‌دست ایفا می‌کند. همچنین، مطالعات هیدرولوژیکی نشان داده‌اند که پلرود از نظر رژیم جریان و فرایندهای رسوب‌گذاری دارای ویژگی‌های قابل‌توجهی است؛ ازاین‌رو، بررسی رفتار هیدرولوژیکی و سیلابی آن برای مدیریت منابع آب، کنترل سیلاب و برنامه‌ریزی بهره‌برداری از حوضه ضروری است (Shahabi et al., 2010)

در این پژوهش، بخش پایینی رودخانه به طول ۶ کیلومتر، بین دو ایستگاه هیدرومتری فعال درازلات و هراتبر مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.مساحت محدوده مورد مطالعه نیز ۴/۱ کیلومتر مربع می باشد.



شکل ۲-تصویر گوگل ارث از محدوده مورد مطالعه

Fig. 2. Google Earth image of the study area

بر اساس بازدیدهای میدانی انجام‌شده در محدوده مطالعه، دو پل شریانی اصلی بر روی رودخانه شناسایی شد که نقش مهمی در رفتار هیدرولیکی جریان و گسترش سیلاب دارند. پل نخست، پل قدیم کلاچای با قدمتی بیش از ۵۰ سال و سازه بنایی است و پل دوم، پل واقع در مسیر آزادراه با سازه فلزی–بتنی و ساخت جدیدتری دارد. این سازه‌ها به‌دلیل استقرار در بستر و مقطع رودخانه، در شرایط سیلابی بر الگوی جریان اثر گذاشته و می‌توانند موجب تمرکز موضعی جریان و افزایش سرعت در محدوده پل شوند .مشخصات هندسی، شامل طول دهانه‌ها، ارتفاع و سایر پارامترهای این پل‌ها، در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱-اطلاعات پل‌های موجود در مسیر مورد مطالعه

Table 1. Information of the existing bridges along the study route

	طول پل (m)	عرض پل (m)	ارتفاع پل از سطح آب (m)	ارتفاع دال (m)	ضخامت پایه پل (m)	اندازه دهانه‌های اول و دوم از ساحل چپ (m)
پل قدیم	۶۰	۸.۳	۴.۵۴	۱.۴۶	۲	۲۴.۵ و ۲۵.۵
پل آزاد راه	۱۵۱.۲	۲۵	۹.۸۵	۲.۳۵	۱.۵	۲۸-۲۸.۶-۲۸.۶-۲۸.۶

۲-۲- سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)

سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) نقش مهمی در آماده‌سازی داده‌های مکانی موردنیاز مدل‌های هیدرولیکی ایفا می‌کند. با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی، امکان استخراج اطلاعات هندسی رودخانه شامل خط مرکزی، کرانه‌ها، مسیرهای جریان و مقاطع عرضی فراهم شده و این اطلاعات به‌عنوان داده‌های ورودی برای توسعه مدل هیدرولیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. پس از اجرای شبیه‌سازی هیدرولیکی، خروجی‌های مدل شامل عمق جریان، سرعت جریان و محدوده آب‌گرفتگی با داده‌های توپوگرافی تلفیق شده و در محیط GIS پردازش و تحلیل می‌شوند تا نقشه‌های پهنه سیلاب، تحلیل‌های فضایی و ارزیابی خطر سیلاب با دقت بیشتری تهیه شوند. بدین‌ترتیب، GISبستری کارآمد برای یکپارچه‌سازی داده‌های توپوگرافی، هیدرولیکی و مکانی فراهم کرده و دقت تحلیل‌های مکانی و تصمیم‌گیری در مدیریت سیلاب را بهبود می‌بخشد(Arash & Yasi, (2023 . در این پژوهش از مدل رقومی ارتفاعی با دقت ۱۲.۵ متر از سنجنده ALOS PALSARاستفاده شده است.

۲-۳- مدل هیدرولیکی HEC-RAS

نرم‌افزار HEC-RAS یک ابزار جامع برای شبیه‌سازی جریان‌های سطحی و تحلیل هیدرولیکی رودخانه‌ها است که توسط مرکز مهندسی هیدرولوژی ایالات‌متحده توسعه یافته است. این مدل توانایی شبیه‌سازی جریان‌های ماندگار و غیرماندگار را به‌صورت عددی دارد و از طریق رابط گرافیکی کاربر، ارتباط میان داده‌های هندسی، شرایط مرزی و نتایج محاسبات را فراهم می‌کند.

HEC-RAS قابلیت تحلیل شب شبکه‌های تک‌رودخانه‌ای سامل یک مسیر اصلی یا چندین شاخه متصل به یکدیگر را دارد و امکان مدلسازی جریان های زیر بحرانی،فوق بحرانی و ترکیبی از هر دو رژیم جریان را فراهم می کند.این نرم‌افزار اثر سازه‌های هیدرولیکی نظیر پل‌ها، سرریزها و کالورت‌ها را در محاسبات لحاظ کرده و از روش عددی گام‌به‌گام استاندارد برای تعیین تراز سطح آب بین مقاطع متوالی استفاده می‌کند Brunner, (2016).

با توجه به ماهیت ناپایدار جریان سیلاب، در این پژوهش از تحلیل غیرماندگار (Unsteady Flow) در مدل HEC-RASاستفاده شده است.

۲-۴- اطلاعات مورد نیاز در مدل هیدرولیکی HEC-RAS

داده‌های هندسی مورد نیاز HEC-RAS شامل طرح شماتیک سیستم رودخانه، ضرایب زبری مانینگ و اطلاعات سازه‌های هیدرولیکی نظیر پل‌ها، کالورت‌ها، بندها و سرریزها است. وارد کردن داده‌های هندسی معمولاً با ترسیم شماتیک رودخانه از بالادست به پایین‌دست آغاز می‌شود که در صورت نبود مدل رقومی ارتفاعی کاربرد دارد، اما دقت آن کمتر از روش‌های مبتنی بر GIS است. روش دقیق‌تر، وارد کردن داده‌ها از GIS است که با استفاده از قابلیت RAS2GIS امکان انتقال مستقیم خطوط مقاطع عرضی، مسیر اصلی رودخانه، کرانه‌ها، مسیرهای جریان و ضرایب مانینگ به مدل فراهم می‌شود. این روش علاوه بر سادگی، دقت بالایی در شبیه‌سازی هیدرولیکی ارائه می‌دهد.

در HEC-RAS، سازه‌های هیدرولیکی نظیر پل‌ها، کالورت‌ها، بندها و سرریزها به‌عنوان اجزای مؤثر بر جریان رودخانه در مدل تعریف می‌شوند. کاربر می‌تواند مشخصات هندسی هر سازه شامل عرض، ارتفاع، طول دهانه، زبری و موقعیت دقیق در طول رودخانه را وارد کند. این اطلاعات در بخش داده‌های ژئومتری ثبت می‌شوند و نرم‌افزار اثر سازه‌ها را بر تراز سطح آب، سرعت جریان و پهنه سیلاب لحاظ می‌کند. وارد کردن دقیق سازه‌ها برای شبیه‌سازی واقعی جریان و تحلیل پهنه سیلاب ضروری است، زیرا این سازه‌ها می‌توانند موجب افزایش عمق آب در بالادست، تغییر مسیر جریان و ایجاد نقاط بحرانی شوند. پس از تعریف سازه‌ها، HEC-RAS به‌طور خودکار تأثیر آنها بر جریان و توزیع انرژی را در محاسبات مدل اعمال می‌کند Brunner, (2016).

ضریب زبری مانینگ بیانگر مجموع عوامل مؤثر بر مقاومت بستر رودخانه یا کانال در برابر جریان است و ازاین‌رو یکی از داده‌های پایه و بسیار مهم در فرایند طراحی و مدل‌سازی هیدرولیکی محسوب می‌شود. برآورد دقیق این ضریب باید با توجه به ویژگی‌های هندسی، فیزیکی و پوشش سطحی رودخانه انجام گیرد.

شناخت عناصر مؤثر بر ضریب زبری مانینگ، نقش تعیین‌کننده‌ای در دستیابی به یک تخمین معتبر دارد. مهم‌ترین این عوامل عبارت‌اند از:

- جنس و زبری بستر کانال
- نامنظمی‌های موجود در سطح مقطع
- نوع و میزان پوشش گیاهی (شامل تراکم و ارتفاع)

•پیچ‌وخم و شکل مسیر رودخانه

•وجود موانع در بستر و کناره‌ها

•عمق و دبی جریان که علاوه بر تأثیر بر افت انرژی طولی، می‌توانند بخشی از افت‌های موضعی ناشی از تغییر شکل جریان را نیز نشان دهند.

در این مطالعه، ضریب زبری مانینگ بر اساس لایه کاربری اراضی تعیین شد، زیرا ضریب زبری به نوع پوشش سطح و میزان مقاومت آن در برابر جریان وابسته است و هر کلاس کاربری دارای ویژگی‌های هیدرولیکی متفاوتی است. در مدلHEC-RAS ، لایه کاربری اراضی به‌عنوان مبنایی برای تخصیص مکانی ضرایب مانینگ به کلاس‌های مختلف پوشش زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد و این روش امکان نمایش واقع‌بینانه تغییرات مکانی زبری در سطح دشت سیلابی را فراهم می‌کند. استفاده از لایه کاربری اراضی به‌جای اختصاص یک مقدار ثابت برای کل منطقه، باعث در نظر گرفتن تفاوت زبری ناشی از پوشش‌های مختلف نظیر جنگل، اراضی کشاورزی، مناطق مسکونی و مراتع شده و در نتیجه دقت شبیه‌سازی هیدرولیکی و پهنه‌بندی سیلاب را افزایش می‌دهد. این رویکرد در مطالعاتی مانند (Kaya & Üneş 2025) به‌عنوان روشی مناسب برای تخصیص ضریب مانینگ بر اساس داده‌های کاربری اراضی به کار گرفته شده است.

مقادیر ضریب زبری مانینگ بر اساس لایه کاربری اراضی و با استناد به مقادیر استاندارد گزارش‌شده در منابع معتبر هیدرولیکی مانند (Chow 1959) تعیین و متناسب با شرایط محدوده مطالعاتی به کلاس‌های مختلف کاربری اراضی تعیین شد که برای درخت، محصولات کشاورزی و زاعی، مناطق مسکونی و مرتع به ترتیب برابر با ۰/۰۴۳، ۰/۰۴۳، ۰/۰۳۵ و ۰/۰۳۱ انتخاب شد.

به‌منظور تحلیل سیلاب در رودخانه پلرود، داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری درازلات و سموش مورد استفاده قرار گرفت. دبی‌های سیلابی متناظر با دوره‌های بازگشت مختلف بر اساس تحلیل فراوانی و برازش توزیع لوگ-پیرسون نوع III برای داده‌های این دو ایستگاه تعیین شد.استفاده از داده‌های چند ایستگاه هیدرومتری در محل تلاقی رودخانه‌ها به‌منظور تعیین هیدروگراف ورودی پایین‌دست، روشی متداول در مطالعات هیدرولوژیکی و هیدرولیکی است. برای نمونه، Langhammer et al. (2017)نیز در مدل‌سازی سیلاب در محل تلاقی دو رودخانه، هیدروگراف ورودی را بر اساس اطلاعات دو ایستگاه هیدرومتری تعیین کردند.

مقادیر دبی متناظر با دوره‌های بازگشت مختلف برای محدوده مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است:

جدول ۲-نتایج برآورد سیلاب رودخانه پلرود با دوره بازگشت‌های مختلف در محدوده مورد مطالعه

Table 2. Results of flood estimation for the Pelerood River with different return periods in the study area

دوره بازگشت	۲	۵	۱۰	۲۵	۵۰	۱۰۰	۲۰۰	۵۰۰
Q(m^3/s)	۱۸۳.۱	۳۳۸.۴	۴۷۶.۸	۶۹۸.۱	۹۰۱.۰	۱۱۴۰.۳	۱۴۲۱.۷	**۱۸۶۹.۸**

۲-۵- ابزار پایتون و روش یادگیری ماشین

زبان برنامه‌نویسی پایتون به دلیل سادگی، انعطاف‌پذیری و کتابخانه‌های قدرتمند برای پردازش داده‌های مکانی و هیدرولیکی، در سال‌های اخیر به یکی از ابزارهای اصلی در مطالعات مهندسی منابع آب و مدیریت سیلاب تبدیل شده است. پایتون امکان تحلیل داده‌های حجیم، استخراج الگوها و توسعه مدل‌های پیش‌بینی را به‌صورت سریع و قابل اطمینان فراهم می‌کند و می‌تواند با نرم‌افزارهایی مانند HEC-RAS و سامانه‌های اطلاعات مکانی (GIS) به‌صورت یکپارچه کار کند.

استفاده از پایتون در این تحقیق، علاوه بر افزایش دقت و سرعت تحلیل‌ها، امکان اجرای تحلیل‌های تکرارپذیر و خودکار را نیز فراهم می‌کند و به ارائه تصمیمات مدیریتی هدفمند و علمی در حوزه مدیریت ریسک سیلاب کمک می‌نماید.

با توجه به محدودیت‌های تحلیل دستی داده‌های حاصل از مدلHEC-RAS ، استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین در ارزیابی نقاط سیل‌خیز ضروری است. اگرچه مدل HEC-RASتوانایی شبیه‌سازی دقیق وضعیت هیدرولیکی رودخانه و پهنه‌بندی سیلاب را دارد، اما تحلیل و تفسیر حجم زیاد داده‌های خروجی آن، به‌ویژه در پروژه‌های بزرگ با مقاطع متعدد و شرایط هیدرولیکی پیچیده، زمان‌بر و با محدودیت‌هایی همراه است. در چنین شرایطی، استخراج الگوهای خطر، شناسایی نواحی با بیشترین احتمال خسارت، مقایسه کمی سناریوهای مختلف مدیریت و تقویت نقاط بحرانی و همچنین پیش‌بینی رفتار رودخانه تحت شرایط هیدرولوژیکی و هیدرولیکی متفاوت یا سناریوهای تغییر اقلیم، به روش‌های سنتی به‌سختی امکان‌پذیر است. ازاین‌رو، به‌کارگیری الگوریتم‌های یادگیری ماشین با قابلیت شناسایی الگوها، طبقه‌بندی مناطق پرخطر و پیش‌بینی شرایط آینده، دقت و سرعت تحلیل‌ها را افزایش داده و امکان تصمیم‌گیری دقیق‌تر و کارآمدتر در مدیریت ریسک سیلاب را فراهم می‌سازد.

۲-۶- چارچوب یکپارچه مدل‌سازی هیدرولیکی– یادگیری ماشین

در گام نخست، خروجی‌های مدل HEC-RAS شامل عمق جریان، سرعت و تراز سطح آب به‌صورت رستری یا جدولی استخراج و وارد محیط تحلیل شدند. در مرحله دوم، این متغیرهای هیدرولیکی با لایه‌های مکانی شامل شیب، فاصله از رودخانه و کاربری اراضی تلفیق شده و پس از پاک‌سازی داده‌ها، دیتاست نهایی تشکیل شد. در ادامه، داده‌ها به دو بخش آموزش و آزمون تقسیم شده، مدل یادگیری ماشین آموزش داده شد و دقت آن مورد ارزیابی قرار گرفت. در مرحله نهایی، مدل آموزش‌دیده برای کل بازه رودخانه اجرا و نقشه طبقه‌بندی خطر سیلاب تولید شد. خروجی‌های این بخش شامل نقشه خطر سیلاب مبتنی بر نتایج هیدرودینامیکی و همچنین استخراج مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع سیلاب است.

برای مدل‌سازی، الگوریتم Random Forest انتخاب شد، زیرا مسئله پهنه‌بندی سیلاب ماهیتی غیرخطی و چندمتغیره داشته و تحت تأثیر برهم‌کنش پیچیده بین پارامترهای هیدرولیکی، توپوگرافی و کاربری اراضی قرار دارد. این الگوریتم بدون نیاز به فرض خطی بودن روابط یا توزیع آماری خاص، قادر به مدل‌سازی روابط پیچیده میان متغیرهای ورودی است. همچنین، Random Forest با ارائه شاخص اهمیت متغیرها، امکان ارزیابی سهم نسبی هر یک از عوامل مؤثر در وقوع سیلاب را فراهم می‌کند که در تفسیر نتایج و شناسایی عوامل کلیدی مؤثر بر خطر سیلاب اهمیت دارد. علاوه بر این، در مقایسه با برخی الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند ANN و SVM، به تنظیم پارامترهای کمتری نیاز داشته و ضمن دستیابی به دقت مناسب، از قابلیت تفسیرپذیری بالاتری برخوردار است Probst et al., (2019). ازاین‌رو، به‌عنوان الگوریتم مناسب برای مدل‌سازی و ارزیابی نقاط سیل‌خیز در این پژوهش انتخاب شد.

در جدول ۴ مقدار معیارهای ارزیابی برای مدل‌سازی پهنه سیلاب توسط الگوریتم جنگل تصادفی آورده شده است. در یادگیری ماشین، داده‌ها معمولاً به دو مجموعه آموزش و آزمون تقسیم می‌شوند تا مدل بتواند هم یادگیری الگوهای موجود و هم توانایی تعمیم به داده‌های جدید را نشان دهد که به‌منظور آموزش و ارزیابی عملکرد مدل، مجموعه داده‌ها به‌صورت تصادفی به دو بخش شامل ۷۰ درصد برای آموزش و ۳۰ درصد برای آزمون تقسیم شدند تا توانایی تعمیم مدل بر روی داده‌های آموزش‌ندیده ارزیابی شود.

در جدول 3 مقدار معیارهای ارزیابی برای مدل‌سازی پهنه سیلاب توسط الگوریتم جنگل تصادفی آورده شده است. در یادگیری ماشین، داده‌ها معمولاً به دو مجموعه آموزش[1] و آزمون[2] تقسیم می‌شوند تا مدل بتواند هم یادگیری الگوهای موجود و هم توانایی تعمیم به داده‌های جدید را نشان دهد. داده‌های آموزش برای آموزش مدل و تنظیم پارامترهای داخلی آن استفاده می‌شوند و شامل نمونه‌هایی با برچسب مشخص هستند، مانند پیکسل‌های سیلابی و غیرسیلابی در پروژه پهنه‌بندی سیلاب. ارزیابی عملکرد مدل در این مرحله با معیارهایی مانند IoU، Accuracy، Precision، Recall و F1-score انجام می‌شود تا کیفیت یادگیری الگوها مشخص شود و از بیش‌برازش جلوگیری گردد. در این پژوهش، نتایج مرحله آموزش با توجه به جدول ۴ به این صورت بوده است: IoU = 0.67، Accuracy = 0.96، Precision = 0.83، Recall = 0.78 و F1 = 0.80.

مجموعه داده‌های تست شامل نمونه‌هایی است که در فرآیند آموزش به مدل نشان داده نشده‌اند و تنها برای ارزیابی توانایی تعمیم مدل به شرایط جدید کاربرد دارند. در پهنه‌بندی سیلاب، داده‌های تست می‌توانند از بخش‌های دیگر تصویر، تاریخ‌های متفاوت سیلاب یا نواحی مکانی مستقل انتخاب شوند تا مشخص شود مدل آیا می‌تواند نواحی سیلابی واقعی را در شرایط غیرآموزشی به‌درستی پیش‌بینی کند. نتایج مرحله آزمون نشان می‌دهد که دقت مدل در داده‌های دیده نشده همچنان مناسب است: IoU = 0.58، Accuracy = 0.94، Precision = 0.76، Recall = 0.71 و F1 = 0.74، این نتایج عملکرد مدل را در تعمیم به داده‌های جدید قابل قبول می‌کند.

مقایسه مقادیر معیارها بین آموزش و تست نیز بیانگر تعادل مناسب بین یادگیری و تعمیم است. کاهش نسبی IoU و Recall در داده‌های آزمون نشان‌دهنده چالش‌های ناشی از داده‌های دیده نشده است، اما اختلاف محدود این مقادیر نشان می‌دهد که مدل جنگل تصادفی از نظر پایداری عملکرد مناسب دارد و برای کاربردهای عملی پهنه‌بندی سیلاب قابل اعتماد است. انتخاب ترکیب معیارها به ویژه F1-score به‌عنوان شاخص کلی، امکان ارزیابی متوازن بین شناسایی کامل نواحی سیلابی و کاهش هشدارهای کاذب را فراهم می‌کند. مقدار IoU برابر با ۰.۵۸ در داده‌های تست نیز نشان‌دهنده همپوشانی ۵۸ درصدی بین نواحی سیلابی پیش‌بینی‌شده و واقعی است.

جدول ۳-مقدار معیارهای ارزیابی برای مدل‌سازی پهنه سیلاب توسط الگوریتم جنگل تصادفی

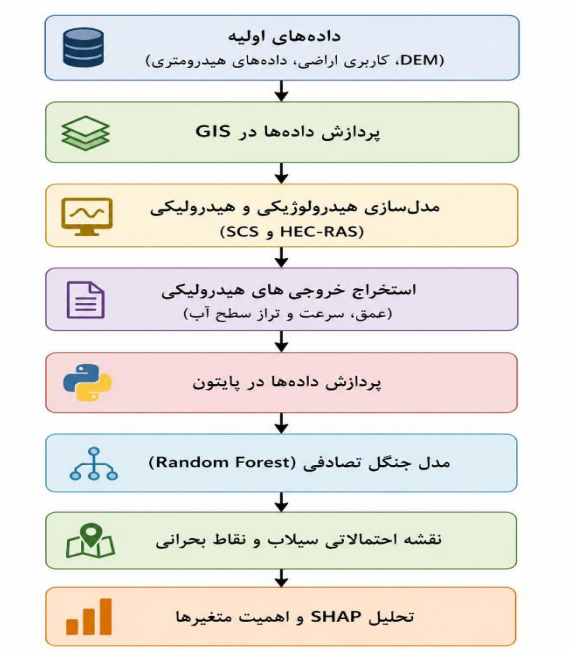
Table 3. Evaluation metrics for flood inundation modeling using the random forest algorithm

	F1	Recall	Precision	Accuracy	IoU
Train	۰/۸۰	۰/۷۸	۰/۸۳	۰/۹۶	۰/۶۷
Test	۰/۷۴	۰/۷۱	۰/۷۶	۰/۹۴	۰/۵۸

[1] Train
[2] Test

۲-۷- روند کلی پژوهش

شکل 4 روند کلی انجام پژوهش را نشان می‌دهد. در این پژوهش، ابتدا داده‌های هیدرولوژیکی، توپوگرافی و مکانی گردآوری و در محیط GIS پیش‌پردازش شدند. سپس با استفاده از تحلیل فراوانی و روشSCS ، هیدروگراف سیلاب تولید و به‌عنوان ورودی مدل HEC-RASمورد استفاده قرار گرفت. پس از اجرای مدل هیدرولیکی، خروجی‌هایی شامل عمق جریان، سرعت جریان و تراز سطح آب استخراج و در کنار لایه‌های مکانی تهیه‌شده در GIS در محیط Python تلفیق و آماده‌سازی شدند. در ادامه، مدل یادگیری ماشین Random Forest برای پهنه‌بندی احتمالاتی سیلاب توسعه یافت. در نهایت، به‌منظور تفسیر عملکرد مدل و بررسی میزان تأثیر هر یک از متغیرهای ورودی بر نتایج پیش‌بینی، تحلیل SHAP انجام شد و اهمیت و نقش عوامل مؤثر در وقوع سیلاب ارزیابی گردید. روند کلی پژوهش در شکل۳ نشان داده شده است:



شکل 3-روند کلی انجام پژوهش از آماده‌سازی داده‌ها تا مدل‌سازی سیلاب و تحلیلSHAP

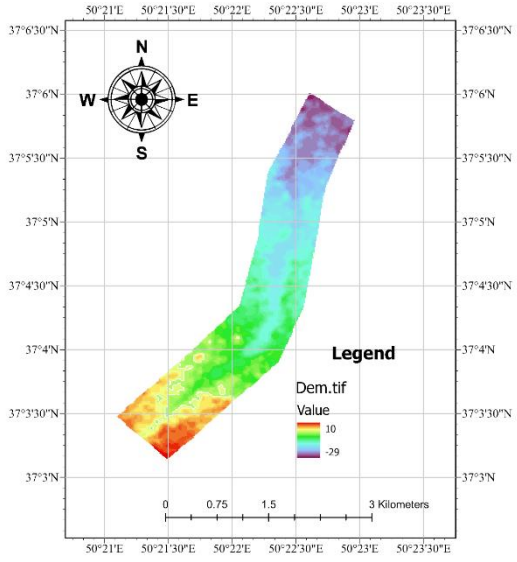
Fig. 3. Overall workflow of the proposed flood modeling and SHAP analysis

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج مربوط به نرم‌افزار GIS

نتایج پردازش داده‌های GIS در شکل ۴ نشان داده شده و شامل موارد زیر است:

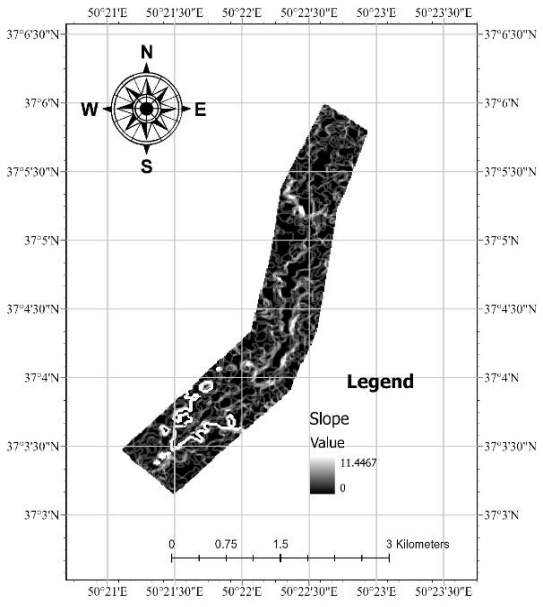
الف) لایه رقومی ارتفاعی محدوده مطالعاتی رودخانه پلرود ارائه شده است. بر اساسDEM ، ارتفاع سطح زمین در محدوده مطالعه بین -29تا ۱۰ متر نسبت به سطح متوسط دریا متغیر است بررسی DEM نشان می‌دهد که ارتفاع زمین در نواحی نزدیک به دریا کمتر بوده و به سمت بالادست رودخانه به‌تدریج افزایش می‌یابد. این تغییرات توپوگرافی مبنای استخراج پارامترهایی نظیر شیب است.



الف) لایه رقومی ارتفاعی

A) Digital Elevation Model

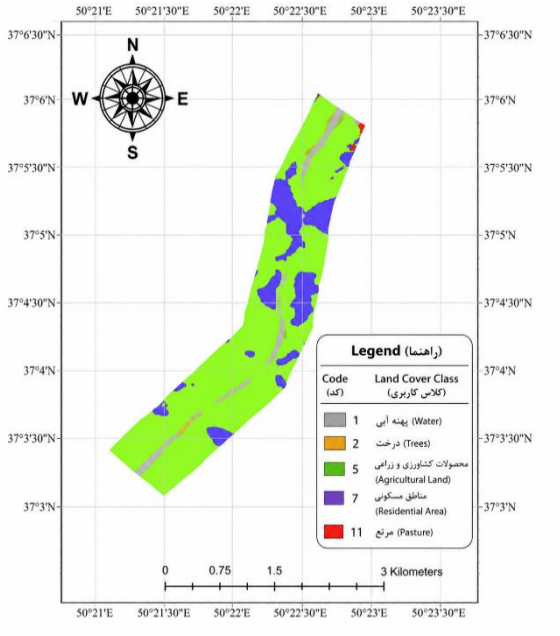
ب) لایه شیب محدوده مطالعاتی ارائه شده است. بر اساس این شکل، شیب منطقه بین 0تا ۱۱.۴۵ درصد متغیر است که بیانگر تنوع شرایط توپوگرافی در محدوده مطالعه است. این لایه به‌عنوان یکی از متغیرهای توپوگرافی، برای مدل‌سازی هیدرولیکی و تحلیل پهنه سیلاب مورد استفاده قرار گرفت.



ب) لایه شیب

B) Slope layer

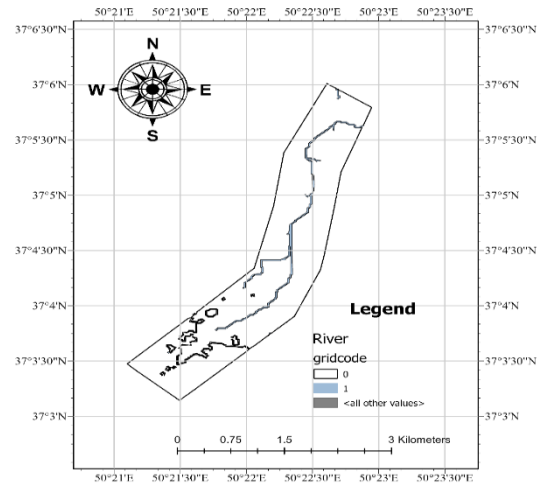
پ) لایه پوشش اراضی شامل ۵ گروه کاربری با کد های ۱، ۲، ۵، ۷ و ۱۱ که به‌ترتیب بیان‌گر پهنه آبی، درخت، محصولات کشاورزی و زراعی، مناطق مسکونی و مرتع می‌باشند.این لایه به‌منظور تخصیص مقادیر ضریب زبری مانینگ به کلاس‌های مختلف کاربری اراضی و اعمال تغییرات مکانی زبری در مدل HEC-RASمورد استفاده قرار گرفت. راهنمای کامل کلاس‌های کاربری نیز در شکل ارائه شده است.



پ) لایه پوشش اراضی

C) Land cover layer

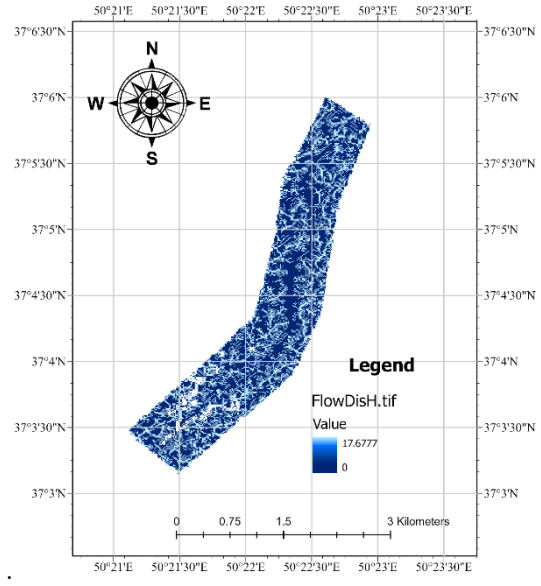
ت) لایه شبکه اصلی رودخانه در محدوده مطالعاتی پلرود نمایش داده شده است. این لایه مسیر جریان اصلی رودخانه محدوده مطالعه را نشان می‌دهد و به‌عنوان یکی از داده‌های پایه در مدل‌سازی هیدرولیکی مورد استفاده قرار گرفت.



ت) لایه شبکه جریان

D) Flow network layer

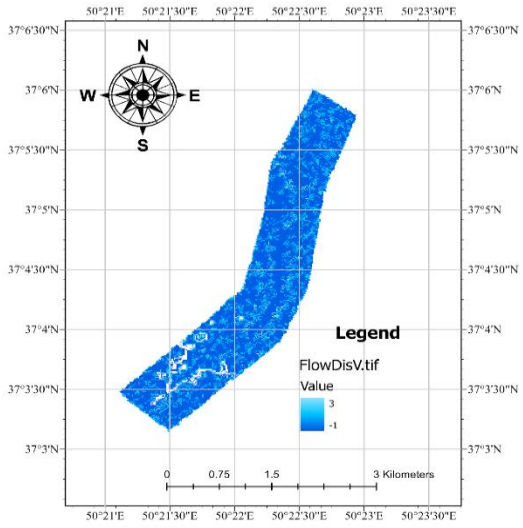
ث) این لایه فاصله هر نقطه از محور جریان اصلی رودخانه را نشان می‌دهد و به‌عنوان یکی از متغیرهای ورودی مدل یادگیری ماشین، با هدف بررسی ارتباط فاصله از رودخانه بر احتمال وقوع سیلاب،شناسایی و پهنه‌بندی مناطق سیل‌خیز مورد استفاده قرار گرفت.



ث) لایه فاصله افقی جریان

E) Horizontal flow distance layer

ج)لایه فاصله عمودی از رودخانه که اختلاف ارتفاع نسبت به سطح جریان اصلی را برای ارزیابی احتمال آب‌گرفتگی نشان می‌دهد. این لایه اختلاف ارتفاع هر نقطه نسبت به محور رودخانه اصلی و به‌عنوان یکی از متغیرهای توپوگرافی در مدل‌سازی و ارزیابی نقاط سیل‌خیز مورد استفاده قرار گرفت.



ج) لایه فاصله عمودی جریان

F) Vertical flow distance layer

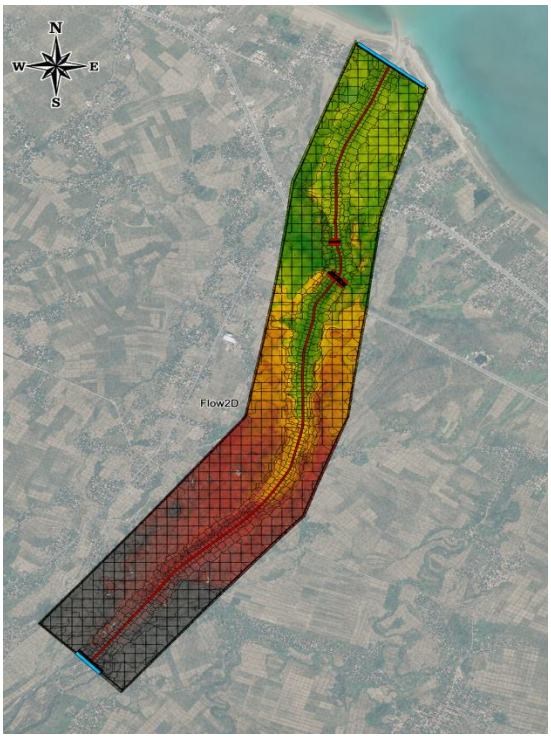
شکل ۴- نتایج نرم‌افزار GIS

Fig 4. GIS software Results

۲-۳- نتایج نرم‌افزار HEC-RAS

مراحل و خروجی های مدل سازی دو بعدی سیلاب با نرم افزار HEC-RAS در شکل ۵ نشان داده شده است:

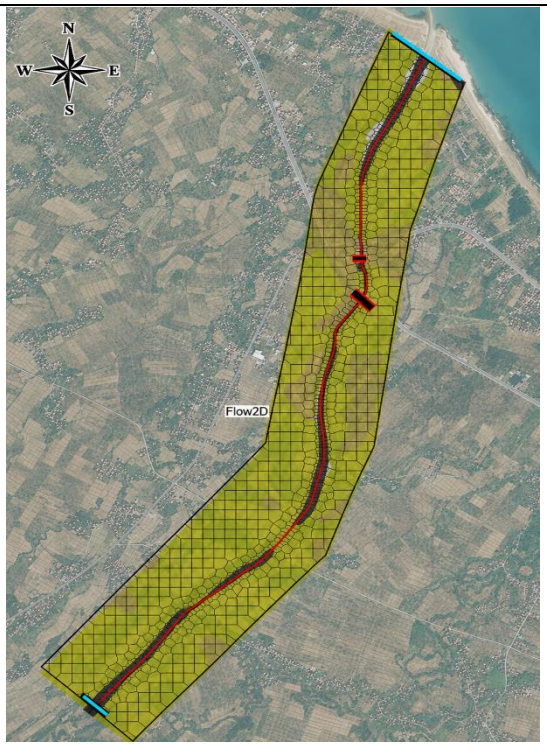
الف) مدل توسعه‌یافته جریان دوبعدی که در آن شرط مرزی بالادست به‌صورت هیدروگراف سیلاب و در پایین‌دست به‌صورت شیب نرمال تعریف شده است؛ شبکه محاسباتی از مش یکنواخت ۷۰ متری تشکیل شده و در مجاورت رودخانه به ۳۰ متر کاهش یافته است. همچنین دو پل موجود بر رودخانه در مدل لحاظ شده‌اند.



الف)مدل ایجاد شده

A) Generated model

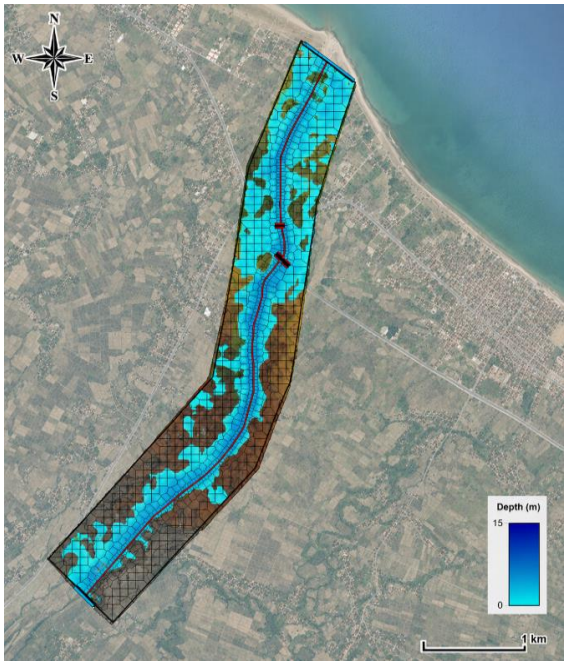
ب) توزیع مکانی ضریب زبری مانینگ (n) بر اساس نوع کاربر اراضی تعیین شد. مقادیر این ضریب برای اراضی برای درختی، کشاورزی–زراعی، مسکونی و مرتع به‌ترتیب برابر با 0.043، 0.043، 0.035 و 0.031 می‌باشد.



ب) لایه ضریب مانینگ

B) Manning’s roughness coefficient layer

پ) نقشه حداکثر عمق جریان حاصل از مدل‌سازی غیرماندگار طی بازه ۲۴ ساعته که نشان‌دهنده عمق بیشتر جریان در اطراف پل‌ها و بخش پایین‌دست رودخانه است.

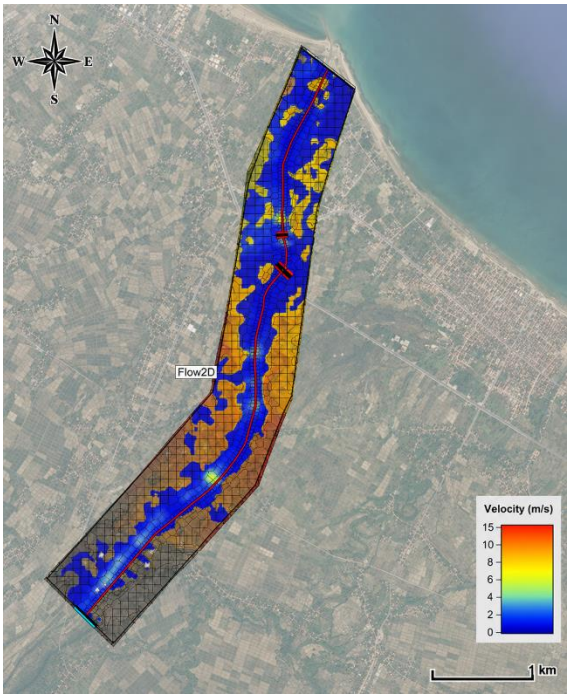


پ) لایه حداکثر عمق جریان

C) Maximum flow depth layer

ت) نتایج توزیع مکانی سرعت جریان را در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، بیشترین

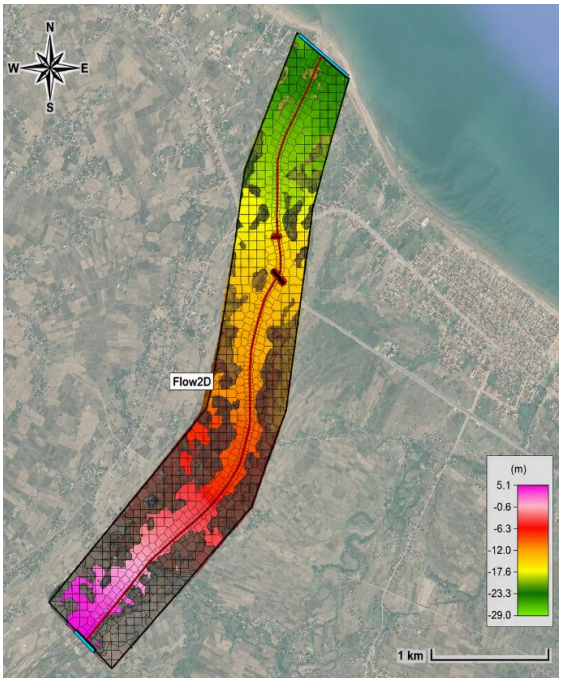
مقادیر سرعت جریان در بخش‌های بالادست رودخانه و در مجاورت پل‌ها رخ داده است؛ درحالی‌که سرعت جریان در بخش‌های پایین‌دست کاهش می‌یابد. تغییرات سرعت جریان در طول رودخانه تحت تأثیر عواملی نظیر عمق جریان، هندسه مقطع عرضی و ضریب زبری مانینگ قرار دارد. در بخش‌های پایین‌دست، با افزایش عمق جریان، سرعت متوسط جریان کاهش یافته است. همچنین، در محدوده پل‌ها، کاهش سطح مقطع مؤثر عبور جریان موجب افزایش سرعت شده است. بنابراین، تمرکز مقادیر بالاتر سرعت در مجاورت پل‌ها را می‌توان به محدودیت مقطع عبور جریان در این نواحی نسبت داد.



ت) لایه حداکثر سرعت جریان

D) Maximum flow velocity layer

ث) تحلیل دوبعدی سرعت جریان و تراز سطح آب در محدوده مدل، کاهش سرعت در بخش‌های پایین‌دست و افزایش آن در نواحی تنگ و مجاورت پل‌ها را نشان می‌دهد. همچنین، پایین بودن تراز زمین در نواحی ساحلی نسبت به تراز سطح آب، زمینه‌ساز گسترش پهنه‌های آب‌گرفته در این مناطق شده است.



ث) لایه حداکثر تراز آب

E) Maximum water level layer

شکل ۵-نتایج نرم‌افزار HEC-RAS

Fig. 5. HEC-RAS software results

به‌منظور به‌منظور تولید هیدروگراف سیلاب ورودی به مدل هیدرولیکی، از روش SCS استفاده شد. این روش به دلیل نیاز به تعداد محدودی از پارامترهای فیزیکی حوضه آبریز، قابلیت تولید هیدروگراف طراحی در حوضه‌های فاقد داده‌های کامل بارش–رواناب و کاربرد گسترده در مطالعات هیدرولوژیکی، یکی از روش‌های متداول تبدیل بارش مؤثر به رواناب محسوب می‌شود Shatnawi & Ibrahim (2022) ; Elfeki et al. (2022).

بر اساس محاسبات انجام‌شده، دبی اوج سیلاب با دوره بازگشت ۵۰ سال برابر با ۹۰۱ مترمکعب بر ثانیه برآورد شد. با توجه به اینکه مدل‌سازی جریان غیرماندگار در نرم‌افزار HEC-RAS مستلزم استفاده از هیدروگراف کامل جریان، شامل مراحل افزایش، اوج و کاهش دبی سیلاب است، هیدروگراف تولیدشده با روش SCSبه‌عنوان ورودی مدل هیدرولیکی مورد استفاده قرار گرفت.

هیدروگراف سیل بدست آمده در جدول ۴ ارائه شده است:

جدول ۴-هیدروگراف سیل با دبی پیک ۹۰۱ متر مکعب بر ثانیه

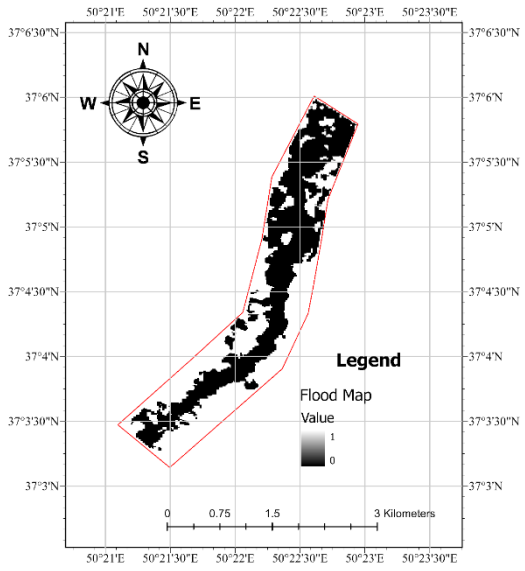
Table 4. Flood hydrograph with a peak discharge of 901 m³/s

مقدار دبی (مترمکعب بر ثانیه)	زمان (ساعت)
۰	۰۰:۰۰:۰۰
۱۸.۴۱۷	۰۰:۱۵:۰۰

۴۹.۹۰۵	۰۰:۳۰:۰۰
۹۳.۶۷۱	۰۰:۴۵:۰۰
۱۴۸.۹۲۲	۰۱:۰۰:۰۰
۲۱۵.۱۶۶	۰۱:۱۵:۰۰
۲۹۲.۰۰۸	۰۱:۳۰:۰۰
۳۹۰.۲۳۱	۰۱:۴۵:۰۰
۵۰۰.۶۳۸	۰۲:۰۰:۰۰
۶۱۳.۷۰۷	۰۲:۱۵:۰۰
۷۱۱.۹۳	۰۲:۳۰:۰۰
۷۸۷/۸۶۱	۰۲:۴۵:۰۰
۸۴۷/۴۵۳	۰۳:۰۰:۰۰
۸۸۴.۲۸۷	۰۳:۱۵:۰۰
۸۹۶.۸۴۵	۰۳:۳۰:۰۰
۸۸۷.۱۱۲	۰۳:۴۵:۰۰
۸۴۴.۱۳۹	۰۴:۰۰:۰۰
۷۹۵.۹۱۵	۰۴:۱۵:۰۰
۷۳۹.۶۶۱	۰۴:۳۰:۰۰
۶۷۲.۱۳۳	۰۴:۴۵:۰۰
۵۸۷.۶۵۸	۰۵:۰۰:۰۰
۵۰۴.۴۹۱	۰۵:۱۵:۰۰
۴۲۴.۶۸۵	۰۵:۳۰:۰۰
۳۴۴.۸۷۸	۰۵:۴۵:۰۰
۲۷۴.۵۹۶	۰۶:۰۰:۰۰
۲۱۳.۵۱	۰۶:۱۵:۰۰
۱۵۸.۲۵۹	۰۶:۳۰:۰۰
۱۱۰.۱۵۱	۰۶:۴۵:۰۰
۶۸.۵۷۹	۰۷:۰۰:۰۰
۳۷.۸۸۴	۰۷:۱۵:۰۰
۰	۰۷:۳۰:۰۰
۰	۰۷:۴۵:۰۰

با توجه به اطلاعات هیدرومتری موجود در جدول ۴، مقدار آب‌گرفتگی سیلاب در ۸ ساعت اول به اوج خود می‌رسد.

پهنه سیلاب بر اساس لایه عمق جریان در نرم‌افزار QGIS استخراج شد و نقشه آن در شکل ۶ ارائه شده است. در این پژوهش، نقاطی با عمق جریان بیش از 0.3متر به‌عنوان محدوده سیلابی در نظر گرفته شدند. این آستانه به‌منظور تفکیک نواحی سیلابی مؤثر از آب‌گرفتگی‌های کم‌عمق انتخاب شد، زیرا در مدل‌های دوبعدی مانند HEC-RAS، مقادیر عمق کمتر از این حد غالباً تحت تأثیر نوسانات عددی، پخش عددی و آب‌گرفتگی‌های موقتی قرار گرفته و معمولاً تأثیر قابل‌توجهی در تعیین پهنه سیلاب ندارند. ازاین‌رو، استفاده از آستانه ۰.۳ متر موجب شناسایی نواحی سیلابی معنی‌دار و جلوگیری از برآورد بیش‌ازحد پهنه سیلاب می‌شود. همچنین، به‌کارگیری این آستانه در مطالعاتی مانند Wang et al.) 20230)ارزیابی و پهنه‌بندی سیلاب نیز گزارش شده است و به‌عنوان یک معیار مناسب برای تفکیک نواحی با مخاطره بیشتر از آب‌گرفتگی‌های کم‌عمق مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۶-لایه پهنه سیلاب بر اساس نتایج HEC-RAS

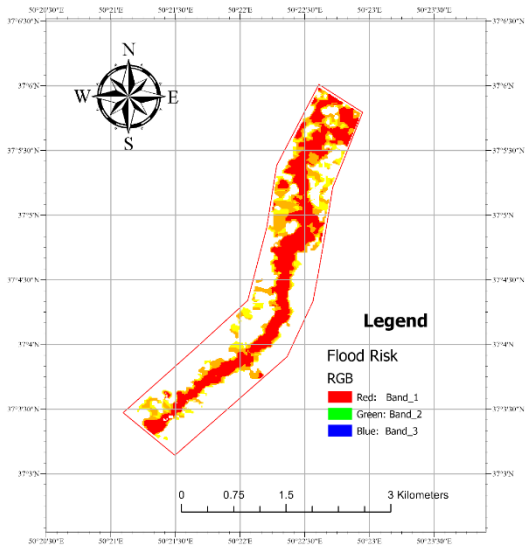
Fig. 6. Flood inundation layer based on HEC-RAS results

در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی جامع خطر سیلاب، نقشه عمق جریان سیلاب برای محدوده مطالعاتی به مساحت ۴/۱ کیلومتر مربع تهیه شد (شکل ۷). این نقشه بر اساس تحلیل خروجی‌های مدل هیدرولیکی HEC-RAS و با استفاده از نرم‌افزار QGIS تولید گردید. در این نقشه، شدت ریسک سیلاب در هر پیکسل بر اساس عمق جریان پیش‌بینی‌شده توسط مدل HEC-RAS طبقه‌بندی شده است:

- رنگ قرمز): مناطقی که عمق جریان سیلاب در آن‌ها کمتر از ۰.۵ متر است.
- رنگ سبز): نواحی که عمق جریان سیلاب در آن‌ها بین ۰.۵ متر تا ۱ متر قرار دارد.
- رنگ آبی): مناطقی که عمق جریان سیلاب در آن‌ها از ۱ متر بیشتر است.

نقشه عمق جریان سیلاب (شکل ۷) نشان می‌دهد که بیشترین شدت ریسک در نواحی مجاور رودخانه متمرکز است، در حالی که با

افزایش فاصله از محور رودخانه، شدت ریسک به‌تدریج کاهش می‌یابد. این الگوی مکانی ناشی از تمرکز جریان در کانال اصلی و پهنه‌های سیلابی مجاور آن است که با افزایش عمق جریان،احتمال وقوع سیلاب را در این نواحی بیشتر می کند.

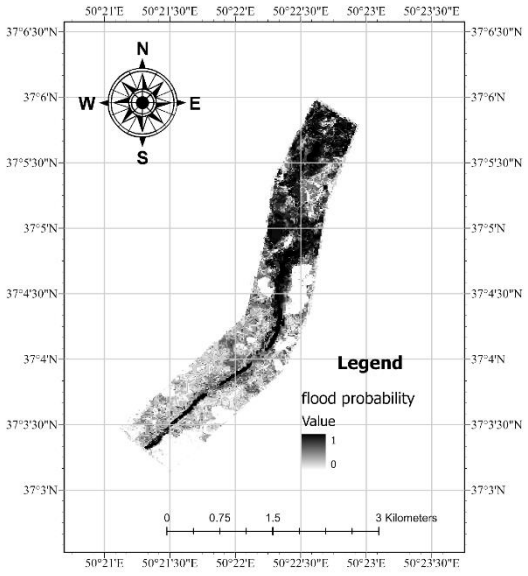


شکل ۷- نقشه عمق جریان سیلاب

Fig. 7 Flood Depth Map

۳-۳- نتایج الگوریتم یادگیری ماشین

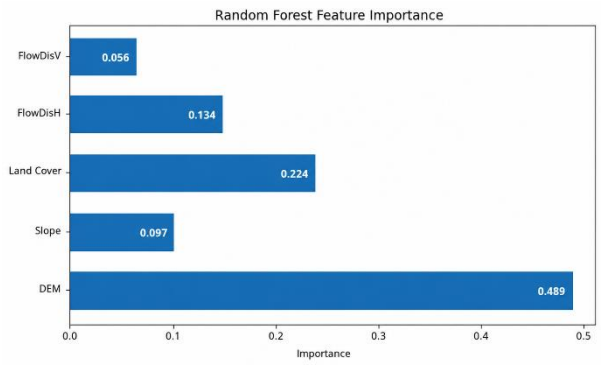
در شکل ۸، نقشه احتمال وقوع سیلاب حاصل از الگوریتم Random Forestبا استفاده از ورودی‌هایی شامل لایه رقومی ارتفاعی ، شیب، پوشش اراضی، فاصله افقی از جریان و فاصله عمودی از جریان ارائه شده است. مقدار احتمال وقوع سیلاب در هر پیکسل بین ۰ و ۱ متغیر است؛ به‌گونه‌ای که مقادیر نزدیک به ۰ بیانگر احتمال کمتر و مقادیر نزدیک به ۱ بیانگر احتمال بیشتر وقوع سیلاب هستند. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که در نواحی پایین‌دست و مناطق نزدیک‌تر به محور رودخانه، احتمال وقوع سیلاب و آب‌گرفتگی بیشتر است. این الگو بیانگر تأثیر مستقیم توپوگرافی، فاصله از جریان اصلی و سایر متغیرهای ورودی مدل بر پراکنش سیلاب و تشدید خطر در محدوده‌های مجاور رودخانه است.



شکل ۸-لایه نقشه احتمالاتی سیلاب بر اساس الگوریتم Random Forest

Fig. 8. Probabilistic flood map layer based on the Random Forest algorithm

در ادامه بر اساس الگوریتم جنگل تصادفی، اهمیت هر یک از متغیرها در مدل‌سازی سیلاب در شکل ۹ ارائه شده است. با توجه به این نمودار، لایه رقومی ارتفاعی و لایه کاربری اراضی بیشترین تأثیر را در تعیین نقشه پهنه‌بندی سیلاب دارند.

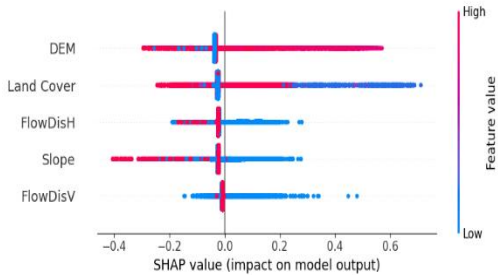


شکل ۹-نمودار Feature importance

Fig. 9. Feature importance plot

در ادامه نتایج تحلیل SHAP برای مدل‌سازی پهنه سیلاب ارائه شده است. SHAP این امکان را فراهم می‌کند که خروجی مدل جنگل تصادفی به سهم هر متغیر ورودی تجزیه شود و نقش واقعی هر عامل فیزیکی در وقوع یا شدت سیلاب مشخص گردد. به‌طورکلی تحلیل SHAP برای توجیه نتایج مدل یادگیری ماشین در مطالعات سیلاب بسیار ارزشمند است و فاصله بین مدل‌های داده محور و در مهندسی پدیده را کاهش می‌دهد. با توجه به این نتایج، مثبت شدن پارامترهایی مانند افزایش لایه رقومی ارتفاعی و منفی شدن لایه شیب، مقدار احتمال آب‌گرفتگی افزایش می‌یابد. همچنین، با کاهش

فاصله افقی و عمودی از رودخانه احتمال آب‌گرفتگی افزایش و با افزایش آنها کاهش می‌یابد.

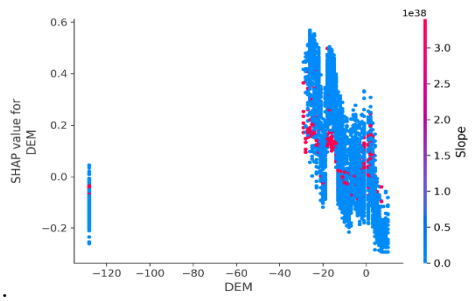


شکل ۱۰-آنالیز شپ برای متغیرهای تصمیم و مدل‌سازی پهنه‌بندی سیلاب با الگوریتم جنگل تصادفی

Fig. 10. SHAP analysis for decision variables and flood plain modeling with the Random Forest algorithm

شکل ۱۱ نتایج تحلیل SHAP را برای تبیین نقش لایه رقومی ارتفاعی و شیب در پیش‌بینی پتانسیل سیل‌گرفتگی توسط مدل Random Forestنشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بین مقادیر SHAP و این دو متغیر رابطه معناداری وجود دارد. با افزایش شیب، مقدار SHAP نیز افزایش می‌یابد که بیانگر نقش مؤثر این متغیر در افزایش پتانسیل سیل‌گرفتگی است. از دیدگاه هیدرولوژیکی، شیب یکی از عوامل کنترل‌کننده سرعت جریان، زمان تمرکز رواناب و انتقال جریان در سطح حوضه محسوب می‌شود (Jafarzadegan et al., 2023). همچنین، با کاهش ارتفاع، مقدار SHAP افزایش می‌یابد که نشان می‌دهد نواحی کم‌ارتفاع، به دلیل ظرفیت بیشتر برای تجمع و ماندگاری رواناب، استعداد بیشتری برای سیل‌گرفتگی دارن (Jafarzadegan et al., 2023).

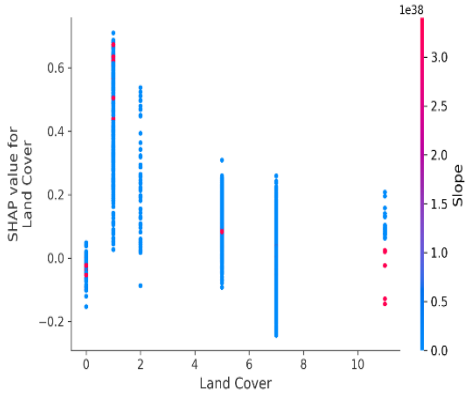
در مجموع، نتایج تحلیل SHAP نشان می‌دهد که مدل Random Forestتوانسته است نقش عوامل ژئومورفولوژیکی، به‌ویژه ارتفاع و شیب، را به‌درستی شناسایی و در پیش‌بینی پهنه‌های مستعد سیلاب منعکس کند؛ موضوعی که قابلیت تفسیرپذیری و اعتمادپذیری مدل را برای ارزیابی و مدیریت ریسک سیلاب افزایش می دهد.



شکل ۱۱-آنالیز شپ برای لایه رقومی ارتفاعی و شیب

Fig. 11. SHAP analysis for Digital Elevation Model and slope layers

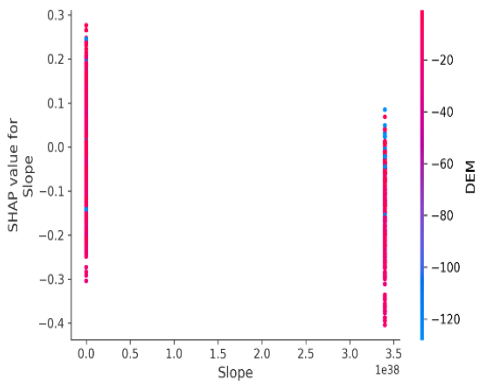
شکل ۱۲ نقش پوشش اراضی و شیب را در پیش‌بینی پتانسیل سیل‌گرفتگی نشان می‌دهد. نتایج SHAP بیانگر آن است که کلاس‌های مختلف پوشش اراضی تأثیر متفاوتی بر پیش‌بینی مدل دارند که ناشی از تفاوت آن‌ها در تولید رواناب است. همچنین، با افزایش شیب، مقدار SHAP نیز افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده نقش مستقیم شیب در افزایش پتانسیل سیل‌گرفتگی است. این نتایج نشان می‌دهد که مدل Random Forest علاوه بر عوامل توپوگرافی، تأثیر پوشش اراضی را نیز به‌خوبی در پیش‌بینی خطر سیلاب لحاظ کرده و از دقت و قابلیت اطمینان مناسبی برخوردار است.



شکل ۱۲-آنالیز شپ برای لایه پوشش اراضی و شیب

Fig. 12. SHAP analysis for land cover and slope layers

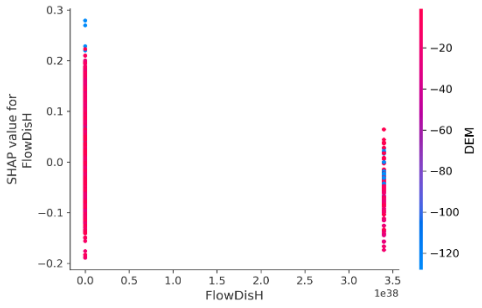
شکل ۱۳ نتایج تحلیل SHAP را برای دو پارامتر توپوگرافی، یعنی شیب و لایه رقومی ارتفاعی، در پیش‌بینی احتمال وقوع سیلاب توسط مدل Random Forest نشان می‌دهد.نتایج بیانگر آن است که با افزایش شیب، مقدار SHAP نیز افزایش یافته و سهم این متغیر در افزایش احتمال وقوع سیلاب بیشتر می‌شود. این موضوع با نقش شیب در کنترل سرعت رواناب، زمان تمرکز و انتقال جریان در سطح حوضه سازگار است (Jafarzadegan et al., 2023). همچنین، با کاهش ارتفاع، مقدار SHAP افزایش می‌یابد که نشان می‌دهد نواحی کم‌ارتفاع، به‌ویژه دشت‌های سیلابی و مناطق مجاور رودخانه، بیشترین احتمال وقوع سیلاب را دارند؛ زیرا این نواحی محل تجمع رواناب و ماندگاری آب هستند.



شکل ۱۳-آنالیز شپ برای شیب و لایه رقومی ارتفاعی

Fig. 13. SHAP analysis for Digital Elevation Model and slope layers

شکل ۱۴ نتایج تحلیل SHAP،تاثیر دو پارامتر مکانی شامل فاصله افقی از رودخانه و لایه رقومی ارتفاعی را در پیش‌بینی احتمال وقوع سیلاب نشان می‌دهد. نتایج بیانگر رابطه معکوس بین فاصله افقی از رودخانه و مقدار SHAP است؛ به‌گونه‌ای که با افزایش فاصله از بستر اصلی رودخانه، مقدار SHAP کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که نواحی مجاور رودخانه سهم بیشتری در افزایش احتمال وقوع سیلاب دارند که با رفتار طبیعی دشت‌های سیلابی و فرآیند طغیان رودخانه سازگار است. همچنین، کاهش ارتفاع با افزایش مقدار SHAP همراه است که بیانگر استعداد بیشتر نواحی کم‌ارتفاع برای تجمع رواناب و وقوع سیلاب است. در مجموع، نتایج تحلیل SHAP نشان می‌دهد که مدل Random Forest توانسته است نقش عوامل مکانی، به‌ویژه فاصله از رودخانه و ارتفاع، را به‌درستی در پیش‌بینی احتمال وقوع سیلاب منعکس کند. همخوانی این نتایج با اصول هیدرولوژی، بیانگر قابلیت تفسیرپذیری اعتمادپذیری مناسب مدل در ارزیابی خطر سیلاب است.

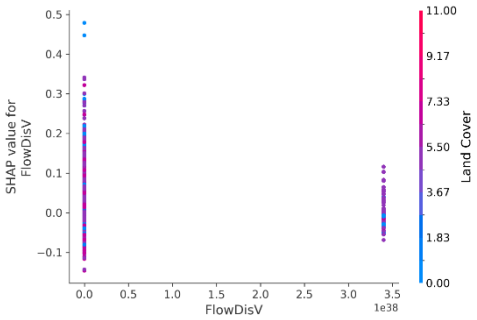


شکل ۱۴-آنالیز شپ برای لایه رقومی ارتفاعی و فاصله افقی جریان

Fig. 14. SHAP analysis for Digital Elevation Model and horizontal flow distance layers

شکل ۱۵ نتایج تحلیل SHAP را برای دو پارامتر کاربری اراضی و فاصله عمودی از رودخانه در پیش‌بینی احتمال وقوع سیلاب نشان می‌دهد. نتایج بیانگر رابطه معکوس بین فاصله عمودی از رودخانه و مقدار SHAP است؛ به‌طوری‌که با افزایش فاصله عمودی، مقدار SHAP کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که نواحی کم‌ارتفاع و نزدیک‌تر به تراز رودخانه، سهم بیشتری در افزایش احتمال وقوع سیلاب دارند که با ویژگی‌های هیدرولوژیکی دشت‌های سیلابی سازگار است.

همچنین،تفاوت SHAP در کلاس‌های مختلف کاربری اراضی نشان دهنده آن است که نوع پوشش سطح زمین، از طریق تأثیر بر تولید و انتقال رواناب، نقش مؤثری در پیش‌بینی احتمال وقوع سیلاب ایفا می کند. در مجموع، نتایج تحلیل SHAPبیانگر آن است که مدل Random Forest توانسته است اثر همزمان عوامل توپوگرافی و کاربری اراضی را در پیش‌بینی احتمال وقوع سیلاب به‌درستی منعکس کند و از قابلیت تفسیرپذیری مناسبی برخوردار است.



شکل ۱۵-آنالیز شپ برای کاربری اراضی و فاصله عمودی جریان

Fig. 15. SHAP analysis for land use and vertical flow distance layers

۴- نتیجه‌گیری نهایی

در این پژوهش، تلفیق مدل هیدرولیکیHEC-RAS ، سامانه اطلاعات جغرافیایی(GIS) ، الگوریتم Random Forest و تحلیل SHAP، چارچوبی کارآمد برای پهنه‌بندی احتمال وقوع سیلاب در رودخانه پلرود فراهم کرد. نتایج شبیه‌سازی هیدرولیکی نشان داد که بیشترین عمق جریان و شدت ریسک در پهنه‌های سیلابی در پایین‌دست و نواحی مجاور رودخانه متمرکز بوده است، در حالی که بیشترین سرعت جریان عمدتاً در بالادست و اطراف پل‌ها مشاهده شد. تحلیل زمانی نیز بیانگر آن بود که اوج آب‌گرفتگی در حدود ۸ ساعت نخست پس از وقوع سیلاب رخ می‌دهد که اهمیت مدیریت بحران در ساعات اولیه را نشان می‌دهد. نتایج مدل Random Forestبیانگر دقت پیش‌بینی بیش از ۰.۹۰ بوده و نشان داد که مدل رقومی ارتفاعی، کاربری اراضی، شیب و فاصله افقی و عمودی از رودخانه مهم‌ترین عوامل مؤثر در پیش‌بینی احتمال وقوع سیلاب هستند.

همچنین، نتایج تحلیل SHAP نشان داد که مهم‌ترین متغیرهای شناسایی‌شده توسط مدل Random Forest با فرآیندهای شناخته‌شده هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی حاکم بر وقوع سیلاب سازگاری کامل دارند. افزایش احتمال وقوع سیلاب در نواحی کم‌ارتفاع و نزدیک به رودخانه، نقش مؤثر شیب در کنترل سرعت جریان و انتقال رواناب، و تأثیر متفاوت کاربری اراضی بر تولید و هدایت رواناب، همگی با رفتار فیزیکی جریان در دشت‌های سیلابی مطابقت دارند. این همخوانی نشان می‌دهد که مدل یادگیری ماشین صرفاً بر مبنای روابط آماری آموزش ندیده، بلکه توانسته است روابط فیزیکی حاکم بر فرآیند سیلاب را نیز به‌درستی شناسایی و در

پیش‌بینی‌های خود منعکس کند. ازاین‌رو، نتایج حاصل از تحلیل SHAPعلاوه بر افزایش تفسیرپذیری مدل، به‌عنوان نوعی اعتبارسنجی فیزیکی برای عملکرد مدل Random Forest نیز قابل استناد بوده و اعتمادپذیری آن را برای کاربرد در پهنه‌بندی سیلاب و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی افزایش می‌دهد. تحلیل SHAP نشان داد که کاهش ارتفاع و فاصله از رودخانه و تغییرات شیب، بیشترین تأثیر را بر افزایش احتمال وقوع سیلاب داشته و نتایج حاصل با رفتار فیزیکی و هیدرولوژیکی حاکم بر محدوده مطالعاتی سازگار است.

بر اساس نتایج این پژوهش، پیشنهادهای زیر برای مدیریت خطر سیلاب ارائه می‌شود:

۱. اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی در مناطق پایین‌دست و مجاور رودخانه، با تمرکز بر نواحی دارای بیشترین احتمال وقوع سیلاب
۲. کنترل توسعه کاربری اراضی و محدودسازی ساخت‌وساز در پهنه‌های دارای احتمال بالای وقوع سیلاب، با استفاده از نقشه‌های احتمال تولیدشده
۳. اجرای سازه‌های حفاظتی نظیر سیل‌بند، ریپ‌رپ و دیواره‌های حفاظتی در نقاط بحرانی، به‌منظور کاهش گسترش جانبی پهنه سیلاب
۴. به‌کارگیری چارچوب پیشنهادی در سامانه‌های مدیریت بحران و برنامه‌ریزی منابع آب، با هدف ارتقای کیفیت تصمیم‌گیری در شرایط وقوع سیلاب

با وجود نتایج مطلوب این پژوهش، با محدودیت‌هایی نیز همراه است. از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به اندازه شبکه محاسباتی در مدل HEC-RAS و محدودیت های داده‌های هیدرومتری اشاره کرد. این عوامل می‌توانند بر دقت نتایج شبیه‌سازی هیدرولیکی و به تبع آن، عملکرد مدل یادگیری ماشین تأثیرگذار باشند.

برای توسعه پژوهش‌های آتی، پیشنهاد می‌شود:

- عملکرد الگوریتم‌های یادگیری عمیق و سایر روش‌های هوش مصنوعی با Random Forest مقایسه شود
- چارچوب پیشنهادی در سایر حوضه‌های آبریز استان گیلان و مناطق با شرایط هیدرولوژیکی متفاوت ارزیابی شود
- اثر سناریوهای تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی بر احتمال وقوع سیلاب بررسی گردد
- نتایج حاصل از HEC-RAS با سایر مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی مانند HEC-HMSو SWMM مقایسه شود

منابع

- Arash AM, and Yasi M, 2023. The assessment for selection and correction of RS-based DEMs and 1D and 2D HEC-RAS models for flood mapping in different river types. Journal of Flood Risk Management, 16(1): e12871, doi:10.1111/jfr3.12871.
- Brunner GW, 2016. HEC-RAS River analysis system user's manual (version 5.0). U.S. army crps of engineers.
- Chow VT, 1959. Open-channel hydraulics. McGraw-Hill book company, New york.
- Ebrahimi Moghaddam A, 2024. Determination of flood-prone zone using GIS and HEC-RAS hydraulic model: Case study of Goharrud River in Rasht city. Geography and Urban Planning Quarterly, 13(1), 23-46 (In Persian).
- Elfeki A, Alharbi A, Bahrawi JA, et al., 2022. Optimum parametrization of the Soil Conservation Service (SCS) method for simulating the hydrological response in arid basins. International Journal of River Basin Management. doi:10.1080/19475705.2022.2080005.
- Farooq M, Shafique M, and Khattak MS, 2019. Flood hazard assessment and mapping of River Swat using HEC-RAS 2D model and high resolution 12 m TanDEM-X DEM (WorldDEM). Natural Hazards, 97(2), 477-492, doi:10.1007/s11069-019-03638-9.
- Hekmatifar H, Nazariha M, and Givachchi S, 2009. Evaluation of agricultural damages caused by flood using HEC-RAS and ARCView modeling in the Qareh-Su River plain, Kermanshah. Environmental Science and Technology Quarterly, 11(4), 1-14 (In Persian).
- Hicks F, and Peacock D, 2005. Advanced Hydraulics Model for Flood Prediction: Application to the Peace River, Alberta.
- Hicks F, and Peacock T, 2005. Suitability of HEC-RAS for flood forecasting. Canadian Water Resources Journal, 30, 159-174, doi:10.4296/cwrj3002159.
- Jafarzadegan K, Moradkhani H, Pappenberger F, Moftakhari H, Bates PD, Abbaszadeh P, Marsooli R, Ferreira C, Cloke HL, Ogden F, and Duan Q, 2023. Recent advances and new frontiers in riverine and

doi:10.1002/widm.1301.

- Rangari V, Nanduri U, and Bhatt CM, 2019. Assessment of inundation risk in urban floods using HEC RAS 2D. Modeling Earth Systems and Environment, doi:10.1007/s40808-019-00641-8.
- Shahabi S, Hesami Kermani M, Daneshmand Sheikholeslami A, 2010. Flood frequency analysis using annual maximum data and fitting different statistical distributions by the method of moments: Case study of Polrud River, Rudsar. 3rd National Conference on Irrigation and Drainage Networks Management, Ahvaz (In Persian).
- Shahrasbi HR, and Houshmand Aieni A, 2018. Investigation of flood phenomenon and ecological effects of polluted urban flood flows. In Seventh National Conference on Sustainable Development in Geography and Urban Planning Sciences, Tehran, Iran (In Persian).
- Shatnawi A, and Ibrahim MM, 2022. Derivation of flood hydrographs using SCS synthetic unit hydrograph technique for Housha catchment area. Water Supply, 22(5), 4888–4901, doi:10.2166/ws.2022.169.
- Vahdani M, 2024. Flood modeling and determination of the seasonal river bed boundary using HEC-RAS software (Case study: upstream sub-basin of urban settlement). In Twenty-Sixth National Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Development (In Persian).
- Wang Y, Zhang C, Chen AS, Wang G, and Fu G, 2023. Exploring the relationship between urban flood risk and resilience at a high-resolution grid cell scale. Science of the Total Environment,893:164852. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.164852

coastal flood modeling. Reviews of Geophysics, 61(2), e2022RG000788, doi:10.1029/2022RG000788.

- Kaya Y, Üneş F, 2025. Comparison of three different satellite data on 2D flood modeling using HEC-RAS (5.0.7) software and investigating the improvement ability of the RAS Mapper tool. Journal of Flood Risk Management, doi:10.1111/jfr3.13046.
- Kim V, Tantanee S, and Suparta W, 2020. GIS-Based Flood Hazard Mapping Using HEC-RAS Model: A Case Study of Lower Mekong River, Cambodia. Geographia Technica,15(5),16-26, doi:10.21163/gt_2020.151.02.
- Komasi M, Abdoli Kolivand A, 2026. Application of MIDAS Model in Flood Forecasting (Case Study: Bahramjoo Basin, Lorestan Province). Journal of Hydraulics and Water Science, 35 (4): 27-43. doi: 10.22034/hws.2025.67753.1036

Langhammer J, Bernsteinová J, and Miřijovský J, 2017. Building a High-Precision 2D Hydrodynamic Flood Model Using UAV Photogrammetry and Sensor Network Monitoring. Water, 9(11), 861. doi:10.3390/w9110861.

- Mohammad Razi MA, Marimin NA, Ahmad MA, Adnan MS, and Rahmat SN, 2018. HEC- RAS hydraulic model for floodplain area in Sembrong River. International Journal of Integrated Engineering, 10(2) (In Persian).
- Mohammadi S, and Esmaeili R, 2022. Flood hazard zoning of Cheshmeh Kileh River. In Proceedings of the Ninth Iranian Geomorphology Association Conference (In Persian).
- Nareth S, and Plermkamon P, 2015. Flood hazard mapping using combined HEC-RAS and GIS: A case study on the Nam Pueng River, Thailand. Journal of Hydrology and Environment, 12(3), 45-56.
- Ongdas N, Akiyanova F, Karakulov Y, Muratbayeva A, and Zinabdin N, 2020. Application of HEC-RAS (2D) for flood hazard maps generation for Yesil (Ishim) river in Kazakhstan. Water, 12, 2672, doi:10.3390/w12102672.
- Probst P, Wright MN, and Boulesteix A-L, 2019. Hyperparameters and tuning strategies for random forest. Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery, 9(3), e1301,