



Flood Risk Assessment, Prediction and Zonation in the Kashafrud Basin Using Machine Learning Algorithms

Mohammad Ali Zangeneh Asadi ¹, Leila Goli Mokhtari ¹, Mahnaz Naemitabar ^{1*}

¹ Department of Geomorphology & Meteorology, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 06 November 2025

Revised: 28 January 2026

Accepted: 31 January 2026

Available Online:

17 February 2026

Keywords:

Flood Hazard Zonation

Machine Learning Algorithms

Logistic Model Tree (LMT)

Random Forest (RF)

GIS and Remote Sensing

Flood Susceptibility Mapping

ABSTRACT

Floods, as one of the most destructive natural hazards, cause irreparable damage to infrastructure and human communities on an annual basis. The present study aims to produce an accurate flood hazard zonation map for the Kashafrud basin by employing two advanced machine learning algorithms, namely Logistic Model Tree (LMT) and Random Forest (RF). In this research, thirteen influential parameters including elevation, curvature, precipitation, drainage density, aspect, soil and geological characteristics, slope, distance from streams, land use, normalized difference vegetation index (NDVI), topographic wetness index (TWI), and stream power index (SPI) were analyzed as input variables. Data corresponding to 145 recorded flood locations were identified and divided into training (70%) and validation (30%) datasets. Following the weighting of the thematic layers, flood susceptibility maps were generated and classified into five hazard classes using the natural breaks classification method. Model performance was evaluated using the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve, which indicated that the LMT model, with an AUC value of 0.897, exhibited higher predictive accuracy than the RF model, which achieved an AUC of 0.811. The flood hazard zonation results reveal that high-risk areas are predominantly concentrated in regions characterized by gentle slopes, impermeable formations, low elevations, and floodplains. Areas classified as very high and high risk are mainly located in the central and outlet sections of the basin. These findings not only confirm the effectiveness of machine learning algorithms in flood hazard zonation but also underscore the necessity of strategic management planning and targeted basin management practices in this flood-prone region.

* Corresponding author: Mahnaz Naemitabar

E-mail address: mahnaznaemi70@gmail.com

How to cite this article: Zangeneh Asadi, M. A., Goli Mokhtari, L., & Naemitabar, M. (2026). Flood Risk Assessment, Prediction and Zonation in the Kashafrud Basin Using Machine Learning Algorithms. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 15(2), 63-92. <https://doi.org/10.22067/geoh.2026.96351.1624>



©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Extended Abstract

Introduction

Floods are among the most significant and destructive natural hazards worldwide, annually affecting millions of people and causing severe damage to human life, critical infrastructure, agriculture, industry, and both urban and rural areas (Organization, 1999; Das, 2019; Daneshparvar, 2021). In recent years, climate change, rapid population growth, and accelerated urban expansion have contributed to increases in both the frequency and severity of flood events, underscoring the urgent need for effective flood risk management and mitigation strategies. The Kashafrud Basin, located in northeastern Iran, is particularly vulnerable to severe flooding due to its geomorphological characteristics, diverse geological structures, variable precipitation patterns, and intensive human activities. Effective flood risk management in this basin requires accurate identification of flood-prone areas, comprehensive analysis of influential factors, and the application of advanced modeling techniques. Accordingly, this study aims to identify and classify flood-prone areas within the Kashafrud Basin by applying machine learning algorithms specifically the Logistic Model Tree (LMT) and Random Forest (RF) to evaluate the relative contributions of both natural and anthropogenic factors within a data-driven scientific framework.

Material and Methods

In this study, 145 flood and non-flood locations were identified using data obtained from the Watershed Management Organization, complemented by satellite imagery interpretation. The dataset was randomly divided into two subsets, comprising 70% for model training and 30% for validation. Key explanatory variables, including land use, elevation classes, drainage density, lithology, slope, aspect, distance from waterways, rainfall, soil types, and vegetation and moisture indices (TWI, SPI, and NDVI), were derived from topographic maps, geological maps, and 2024 satellite imagery. All spatial datasets were processed and analyzed using ArcGIS 10.4 and ENVI 5.4 software, generating both quantitative and qualitative indicators for each variable.

To address potential multicollinearity among the independent variables, the Variance Inflation Factor (VIF) and Tolerance (TOL) indices were calculated. Variables exhibiting high interdependence were excluded to enhance model reliability and predictive performance. Flood susceptibility modeling was conducted using two advanced machine learning algorithms: the LMT model, which integrates decision tree structures with logistic regression, and the RF model, which employs an ensemble of decision trees. Model performance was evaluated using sensitivity, specificity, the Kappa coefficient, the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve, and the Area Under the Curve (AUC). Flood hazard zonation maps were produced using the natural breaks classification method, and the model outputs were converted into thematic flood risk maps.

Results and Discussion

Multicollinearity analysis confirmed that none of the selected variables exceeded the threshold values ($VIF > 10$ or $TOL < 0.1$), indicating a robust and stable modeling framework. The results identified thirteen key factors including slope, elevation, curvature, distance from rivers, drainage density, rainfall, soil type, land use, and vegetation and moisture indices as significant determinants of flood risk. Areas characterized by low to moderate slopes and elevations below 1000 m were found to exhibit increased surface runoff velocity, thereby intensifying flood risk and severity, particularly in the central and outlet sections of the basin. Terrain curvature and dense drainage networks significantly influenced runoff concentration and flow pathways, highlighting the critical role of topography and drainage structure in flood dynamics.

Resistant geological formations and impermeable clay-rich soils substantially reduced infiltration capacity, leading to increased surface runoff and the occurrence of sudden and hazardous flood events. In addition, weak vegetation cover and inappropriate land use changes particularly urban and industrial development indirectly exacerbated both runoff volume and flow velocity. Low NDVI values reflected degraded vegetation conditions and a heightened susceptibility to flooding.

Flood hazard zonation maps generated using the LMT model indicated that approximately 81.23% of the basin falls within moderate to very high flood risk classes. Similarly, the RF model estimated that 68.44% of the study area is exposed to comparable risk levels, with high-risk zones predominantly concentrated in the central and outlet regions of the basin. Statistical validation demonstrated that the LMT model achieved higher predictive accuracy ($AUC = 0.897$) compared to the RF model ($AUC = 0.811$), although both models exhibited satisfactory and reliable performance for flood susceptibility assessment. High sensitivity, specificity, and Kappa coefficient values further confirmed the robustness and operational applicability of both modeling approaches.

The findings indicate that geomorphological and hydrological factors such as slope, elevation, drainage density, soil characteristics, and impermeable geological formations play a more dominant role in flood occurrence than anthropogenic factors, including land use and human-induced disturbances. Nevertheless, the influence of human activities on flood intensity and spatial distribution remains significant, emphasizing the necessity for integrated and sustainable watershed management strategies. These results are consistent with recent international studies, which highlight the primary contribution of natural variables to flood risk while acknowledging the amplifying effects of human interventions.

Conclusion

By integrating remote sensing data, GIS-based spatial analysis, and advanced machine learning algorithms, this study presents a comprehensive and innovative framework for flood risk assessment, analysis, and spatial zonation in one of the most critical watersheds in northeastern Iran. The results demonstrate that the LMT model outperforms the RF model in accurately identifying flood-prone areas within the Kashafrud basin. The resulting flood hazard maps provide valuable decision-support tools for prioritizing crisis management actions, land use planning, and the development of resilient water infrastructure.

While accurate consideration of natural and geomorphological factors is fundamental to effective flood risk management, regulating human activities such as land use planning, construction of flood resilient infrastructure, restoration of vegetation cover, and implementation of early warning systems is equally essential for minimizing flood-related damages. Emphasizing data-driven and machine learning based approaches, this research contributes to bridging the gap between applied scientific research and practical flood management needs in Iranian catchments. Future studies incorporating advanced algorithms, uncertainty analysis, and higher-resolution satellite data are strongly recommended to further enhance the resilience of aquatic and urban ecosystems.



ارزیابی، پیش‌بینی و پهنه‌بندی خطر سیلاب در حوضه کشف‌رود با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین

محمد علی زنگنه اسدی^۱، لیلا گلی مختاری^۱، مهناز ناعمی تبار^{*}

^۱ گروه آب و هواشناسی و ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۱	سیلاب به عنوان یکی از مخرب‌ترین مخاطرات طبیعی، سالانه خسارات جبران‌ناپذیری به زیرساخت‌ها و جوامع انسانی وارد می‌کند. پژوهش حاضر با هدف پهنه‌بندی دقیق خطر سیلاب در حوضه آبخیز کشف‌رود، از دو الگوریتم پیشرفته یادگیری ماشین LMT و RF بهره برده است. در این مطالعه، ۱۳ پارامتر مؤثر شامل ارتفاع، انحنای بارش، تراکم زهکشی، جهت شیب، ویژگی‌های خاک و زمین‌شناسی، شیب، فاصله از آبراهه، کاربری اراضی، شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، رطوبت توپوگرافی (TWI) و توان آبراهه (SPI) به عنوان متغیرهای ورودی مورد تحلیل قرار گرفت. داده‌های مربوط به ۱۴۵ نقطه سیلابی شناسایی و به دو مجموعه آموزش (۷۰٪) و اعتبارسنجی (۳۰٪) تقسیم شد. پس از وزن‌دهی لایه‌ها، نقشه‌های پتانسیل وقوع سیل با روش شکست طبیعی به پنج طبقه خطر طبقه‌بندی گردید. ارزیابی دقت مدل‌ها با استفاده از منحنی ROC نشان داد که مدل LMT با مقدار AUC برابر ۰/۸۹۷، دقت بالاتری نسبت به مدل RF با AUC برابر ۰/۸۱۱ دارد. نتایج پهنه‌بندی حاکی از تمرکز مناطق پرخطر در نواحی با شیب کم، سازه‌های غیرقابل نفوذ، ارتفاعات پایین و دشت‌های سیلابی است. نواحی با خطر بسیار زیاد و زیاد عمدتاً در بخش‌های مرکزی و خروجی حوضه متمرکز شده‌اند. این یافته‌ها، علاوه بر تأیید کارایی الگوریتم‌های یادگیری ماشین در پهنه‌بندی خطر سیلاب، ضرورت برنامه‌ریزی مدیریتی و اقدامات آبخیزداری هدفمند را در این منطقه سیل‌خیز برجسته می‌سازد.
کلمات کلیدی: پهنه‌بندی خطر سیلاب الگوریتم‌های یادگیری ماشین درخت مدل لجستیک (LMT) جنگل تصادفی (RF) سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش‌ازدور نقشه‌برداری حساسیت سیلاب	

مقدمه

سیل به وضعیتی اطلاق می‌شود که جریان آب از حد ظرفیت طبیعی مجرای رودخانه فراتر رفته و از کناره‌های رودخانه خارج شده و زمین‌های اطراف را غرقاب می‌کند (OAS, 1991). این پدیده هیدرولوژیکی را می‌توان به عنوان حالتی تعریف کرد که در آن دبی آب در رودخانه از میزان قابل ذخیره‌سازی کانال بیشتر می‌شود و آب اضافی سرریز شده و بخشی از بستر رودخانه را پوشش

می‌دهد (Alcántara & Goudie, 2010). سیلاب از جمله مخاطرات طبیعی گسترده‌ای است که تهدیدی جدی برای جان انسان‌ها و اموال آن‌ها به شمار می‌رود. در سال‌های اخیر، تغییرات اقلیمی سبب تشدید و تکرار بیشتر رخداد‌های سیلابی شده و اهمیت شناسایی و تعیین پهنه‌های مستعد وقوع سیل را به منظور مدیریت و کاهش پیامدهای خسارت‌بار آن دوچندان کرده است (Zare, Azari & Rezaei Arefi, 2024).

مطالعات اخیر نشان می‌دهند که تغییرات در الگوهای بارش، تغییرات کاربری اراضی و رشد جمعیت شهری باعث افزایش خطر سیلاب در بسیاری از نواحی جهان شده‌اند و نیاز به تحلیل دقیق‌تر خطر و توسعه راهبردهای سازگاری را برجسته می‌سازند (Ullah, 2025). تغییرات آب و هوایی و افزایش بارش‌های شدید، همراه با گسترش کاربری‌های شهری و تغییرات کاربری اراضی، سبب افزایش احتمال وقوع و دامنه خسارات سیلاب شده است و نیاز به رویکردهای پیشرفته برای ارزیابی و مدیریت ریسک سیلاب را برجسته می‌سازد. مطالعات جدید نشان می‌دهند تدوین چارچوب‌های یکپارچه برای ارزیابی ریسک، که شامل ترکیب تحلیل خطر، آسیب‌پذیری و داده‌های فضایی باشد، می‌تواند نتایج قابل اعتمادتری برای برنامه‌ریزی‌های سازگاری با سیلاب فراهم کند (Ceresa et al., 2025).

بر اساس مطالعات متعدد، سیلاب‌ها سالانه زندگی حدود ۲۰۰ میلیون نفر را در سطح جهان تحت تأثیر قرار می‌دهند. با توجه به تغییرات اقلیمی، گسترش شهرنشینی، و تغییر کاربری اراضی، انتظار می‌رود که فراوانی و شدت سیلاب‌ها در آینده افزایش یابد. این پدیده، که امروزه به عنوان یکی از مخرب‌ترین و پرهزینه‌ترین بلایای طبیعی شناخته می‌شود، با رشد جمعیت و توسعه زیرساخت‌ها، تهدیدات بیشتری برای جوامع ایجاد می‌کند. در این شرایط، سرمایه‌گذاری در راهکارهای کاهش خطر و افزایش تاب‌آوری مناطق آسیب‌پذیر می‌تواند نقش مهمی در کاهش خسارات ناشی از سیلاب‌ها ایفا کند. اگر چه جلوگیری کامل از وقوع سیلاب‌ها امکان‌پذیر نیست، اما با ارزیابی دقیق آسیب‌پذیری و اجرای اقدامات پیشگیرانه، می‌توان تأثیرات منفی آن را به میزان قابل توجهی کاهش داد (Ghobadi, Khodashenas & Mosaedi, 2019).

خان و همکاران (Khan et al., 2025) در یک تحلیل جامع جغرافیایی، بررسی نمودند که تعیین پهنه‌های آسیب‌پذیری سیلاب با بهره‌گیری از عوامل توپوگرافی، بارش و کاربری اراضی، می‌تواند اطلاعات ارزشمندی برای طراحی استراتژی‌های کاهش ریسک و افزایش تاب‌آوری ارائه دهد، به طوری که مناطق با ریسک بالا به وضوح از سایر نواحی تفکیک شوند و برای سیاست‌گذاران قابل استفاده باشند. مدیریت یکپارچه ریسک سیلاب که تحلیل پهنه خطر، مدل‌سازی هیدرودینامیکی و ارزیابی اثرات اقتصادی را با هم ترکیب می‌کند، می‌تواند تاب‌آوری شهری و آبخیز را در مواجهه با سیلاب‌های شدید به طور مؤثری افزایش دهد (Azhar, Kane & Vahedifard, 2025). آسیب‌پذیری اجتماعی و ساختارهای اقتصادی در برابر سیلاب نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان خسارت به محصولات کشاورزی و ساختمان‌ها دارد و تأکید می‌کنند که تحلیل‌های آسیب‌پذیری باید شامل متغیرهای اجتماعی و اقتصادی باشد تا سیاست‌های تاب‌آوری جامع‌تر شکل گیرد (Asl, Rahman & Tate, 2025).

روش‌های متعددی جهت مقابله با خطرات سیلاب وجود دارد؛ یکی از اقداماتی که می‌تواند به بهبود مدیریت و حفاظت از حوضه‌های سیل‌خیز کمک نماید بررسی و تعیین پتانسیل سیل‌خیزی در یک حوضه می‌باشد (Esfandiary Darabad, Rahimi & Pourmortaza, 2019). محققان تاکنون روش‌های متنوعی را برای مدل‌سازی و تهیه نقشه‌های خطر سیلاب توسعه داده‌اند. این روش‌ها شامل تحلیل‌های چندمعیاره (MCDA)، مدل‌های هیدرولوژیکی، رویکردهای آماری، و همچنین الگوریتم‌های داده‌کاوی و یادگیری ماشین می‌شوند. کارایی مدل‌های داده‌کاوی و یادگیری ماشین به‌طور مستقیم تحت تأثیر کیفیت داده‌های آموزشی قرار دارد، به ویژه دقت اطلاعات مربوط به مناطق سیل‌زده و غیرسیل‌زده نقش تعیین‌کننده‌ای در نتایج نهایی ایفا می‌کند (Khosravi et al., 2019). در حوزه مدل‌سازی سیلاب، رویکردهای مبتنی بر فناوری‌های نوین و به ویژه الگوریتم‌های یادگیری ماشین تحقیقات زیادی انجام شده است.

بند و همکاران (Band et al., 2020) در مطالعه‌ای که در حوضه آبخیز کلوان استان مرکزی انجام شد، از پنج الگوریتم یادگیری ماشین برای شناسایی مناطق مستعد سیلاب بهره گرفتند و به بررسی پانزده شاخص آب و هوایی و محیطی پرداختند. نتایج نشان داده است که مدل ERT با مقدار زیرمنحنی AUC برابر با ۰/۸۲، بهترین عملکرد را داشته است. یافته‌ها تأکید می‌کنند که عوامل توپوگرافی و هیدرولوژیکی نظیر ارتفاع، شیب، میزان بارش و فاصله از رودخانه، از عوامل کلیدی در وقوع سیلاب محسوب می‌شوند. لو و همکاران (Luu et al., 2021) با به‌کارگیری مدل‌های تلفیقی، نقشه‌های ریسک سیلاب در استان کوانگ بین ویتنام را تهیه کردند. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که عوامل کاربری اراضی، خصوصیات زمین‌شناسی و شیب زمین بیش‌ترین تأثیر را در وقوع سیلاب‌های منطقه دارند. ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف نشان داد که تمامی مدل‌ها از دقت و قابلیت قبولی در پیش‌بینی خطر سیلاب برخوردار بودند.

رضائی و همکاران (Rezaei et al., 2022) با به‌کارگیری مدل‌های ماشین بردار رگرسیونی SVR، WOA و GWO در حوضه اردبیل، مدل ترکیبی FR-SVRWOA را معرفی کردند که حساسیت سیلاب را با دقت قابل قبولی ارزیابی می‌کند. این مطالعات نشان دهنده پتانسیل بالای مدل‌های هوش مصنوعی در بهبود مدیریت سیلاب و کاهش اثرات مخرب آن است.

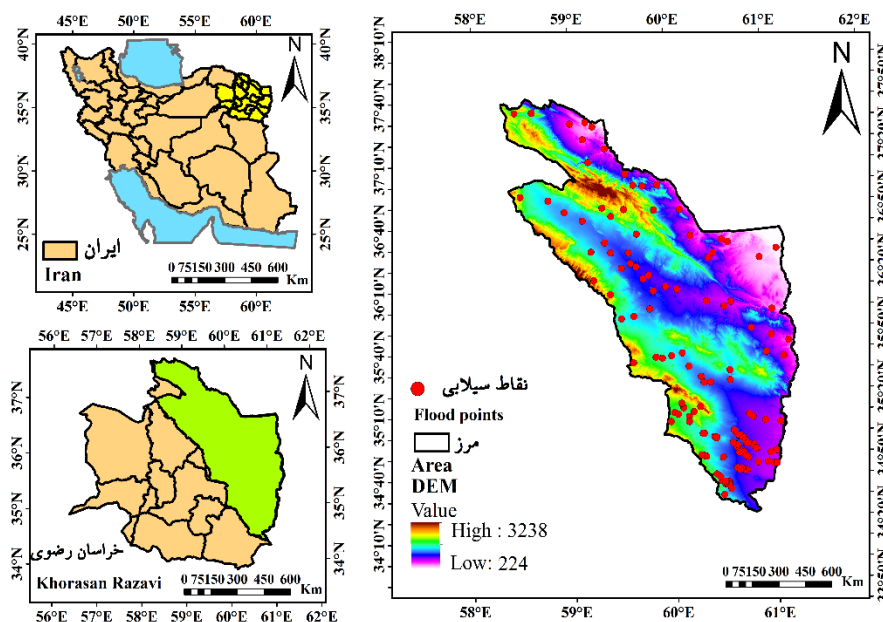
بختیاری و همکاران (Bakhtiari & Jahantab, 2022) در حوضه آبخیز کن از الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی در مدلسازی سیلاب استفاده نمودند. نتایج نشان داد که این الگوریتم می‌تواند به عنوان ابزاری قدرتمند در پیش‌بینی پتانسیل وقوع سیل مورد استفاده قرار گیرد. این تحقیق، کارایی بالای شبکه عصبی را در مدل‌سازی سیلاب و مدیریت حوادث مرتبط با آن در حوضه‌های آبخیز تأیید می‌کند. (Khosravi, Azhdary Moghaddam, Hashemi Monfared & Nazaripour, 2023). در مطالعه‌ای با هدف پهنه‌بندی مناطق حساس به سیلاب در حوضه آبریز رودخانه کهیر، از شاخص‌های سنجش از دور و روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره استفاده نمودند. نتایج حاکی از آن است که داده‌های ثبت‌شده از وقوع سیلاب که از تصاویر ماهواره سنتینل ۲ استخراج شده است تا حدی اعتبار نتایج روش فازی را تأیید می‌کند. الدیانسیه و وردانی (Aldiansyah & Wardani, 2023) در مطالعه‌ای به ارزیابی ریسک سیلاب بر پایه الگوریتم‌های یادگیری ماشین در شهر کندی در کشور اندونزی پرداختند. نتایج تحلیل‌ها نشان دادند که مدل جنگل تصادفی با عملکرد مناسب‌تر در تولید نقشه‌های خطر سیلاب نسبت به سایر مدل‌ها، بهترین کارایی را در این مطالعه از خود نشان داده است. رحیم‌پور و رضائی مقدم (Rahimpour & Rezaei Moghaddam, 2025) برای مدل‌سازی خطر وقوع سیلاب در حوضه آبریز آجی‌چای از الگوریتم‌های داده‌کاوی بهره گرفتند. بر اساس ارزیابی‌های صورت‌گرفته، با استفاده از منحنی ROC و مساحت زیر منحنی AUC، مشخص شد که مدل جنگل تصادفی^۱ با مقدار AUC برابر با ۰/۹۴ نسبت به سایر مدل‌های مورد آزمایش، عملکرد بهتری ارائه داده است. هیتوری و همکاران (Hitouri et al., 2024) با به‌کارگیری الگوریتم‌های یادگیری ماشین در راستای تولید نقشه‌های ریسک سیلاب در حوضه آبریز متلیلی در شمال شرق مراکش، اقدام نمودند. نتایج ارزیابی مدل‌ها نشان دهنده برتری مدل جنگل تصادفی از نظر دقت و صحت پیش‌بینی نسبت به سایر مدل‌های مورد آزمایش است. رضائی مقدم و همکاران (Rezaei Moghaddam, Haghighat, Rahimpour & Behboody, 2025) با بررسی اثر تغییرات کاربری اراضی بر سیلاب در حوضه آبریز مردقچای با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و مدل SWAT نشان دادند که افزایش اراضی مرتعی و ساخته شده طی یک دوره بیست ساله موجب افزایش رواناب سطحی شده و به دلیل شرایط توپوگرافی و شیب، نواحی جنوبی حوضه، از پتانسیل سیل‌خیزی بالاتری برخوردار هستند.

اهمیت و ضرورت انجام تحقیق در زمینه مدلسازی سیلاب در حوضه کشف‌رود با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین، از جنبه‌های مختلف قابل توجه است. موقعیت جغرافیایی و خصوصیات هیدرولوژیکی این حوضه، ضرورت پیش‌بینی و مدیریت سیلاب‌ها را به امری حیاتی تبدیل می‌کند.

حوضه کشف‌رود دارای ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی متنوعی است که شامل شکل زمین، بستر رودخانه، شیب، ساختار زمین‌شناسی و فرآیندهای فرسایشی می‌شود. این عوامل به طور قابل توجهی بر وقوع و شدت سیلاب‌ها تأثیرگذار هستند. تغییراتی که در ساختار سطح زمین به صورت طبیعی یا به دلیل فعالیت‌های انسانی رخ می‌دهد، الگوهای جریان آب و حجم سیلاب‌ها را دستخوش تغییر می‌کند و می‌تواند منجر به تغییرات قابل ملاحظه‌ای در بروز و شدت این پدیده‌ها شود. روش‌های سنتی مدل‌سازی سیلاب، مبتنی بر مدل‌های فیزیکی و آماری، گاهی با محدودیت‌هایی مواجه هستند. این محدودیت‌ها شامل نیاز به داده‌های گسترده، پیچیدگی محاسباتی و کاهش دقت در شرایط غیرخطی و متغیرهای پیچیده می‌باشد. در مقابل، مدل‌های یادگیری ماشین با توانایی یادگیری الگوهای پیچیده و غیرخطی، دقت پیش‌بینی‌ها را به طور چشمگیری بهبود می‌بخشند. در این میان، برخی از پژوهشگران بر کارایی مدل‌های مبتنی بر داده و یادگیری ماشین در پیش‌بینی سیلاب تأکید دارند، در حالی که گروهی دیگر بر لزوم تنظیم دقیق‌تر و ارزیابی جامع‌تر این مدل‌ها در مقیاس منطقه‌ای تأکید می‌کنند. این تفاوت دیدگاه‌ها، نشان دهنده وجود عدم قطعیت و نیاز به تحقیقات عمیق‌تر در این زمینه است. در سال‌های اخیر، مطالعات جامع و کاملی در مورد مدل‌سازی سیلاب با استفاده از یادگیری ماشین در حوضه کشف‌رود انجام نشده است. به ویژه، تأثیر عوامل اقلیمی، هیدرولوژیکی و انسانی به صورت یکپارچه در مدل‌سازی در نظر گرفته نشده است. همچنین، بررسی اثرات ابهامات داده‌ها و توسعه روش‌های کاهش خطا، از جنبه‌های مهمی است که نیاز به توجه بیشتری دارد. این تحقیق با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین یادگیری ماشین، به دنبال ارائه رویکردی نوآورانه در مدل‌سازی سیلاب در حوضه کشف‌رود است. ارزیابی ابهامات داده‌ها و توسعه روش‌هایی برای مقابله با خطاهای اطلاعاتی، می‌تواند به ایجاد مدل‌هایی قابل اعتماد و پایدار منجر شود.

منطقه مورد مطالعه

رودخانه کشف‌رود، به عنوان زهکش اصلی حوزه آبخیز کشف‌رود شناخته می‌شود که در جهت غرب‌شرقی امتداد یافته و در نهایت به رودخانه هریرود در مرز ایران و ترکمنستان منتهی می‌گردد. محدوده مورد مطالعه در طول جغرافیایی $20^{\circ}58'$ تا $30^{\circ}60'$ شرقی و عرض جغرافیایی $20^{\circ}36'$ تا 37° شمالی قرار گرفته است (Mousavi Harami et al., 1990). شاخه‌های متعددی از دامنه‌های کوه‌های بینالود و هزار مسجد به آن منشعب می‌شوند که جهت‌گیری آن‌ها سمت مرکز دشت مشهد است و منجر به شکل‌گیری رودخانه کشف‌رود می‌شود. بستر این رودخانه در امتداد دشت مشهد توسط کوه‌های مرتفع احاطه شده و شیب ملایمی دارد، در حالی که کف آن از رسوبات دانه‌ریز تشکیل شده است. اما در بخش‌های علیا و سفلی، بستر رودخانه عمدتاً از شن و قلوه‌سنگ ساخته شده است (Tarshizian, Aghabeigi & Barzakar, 2007). پس از دریافت شاخه‌های متعدد در شمال مشهد، رودخانه در جهت شرقی-غربی جریان یافته و پس از عبور از جاده مشهد - سرخس و ورود به دره‌ای تنگ در جنوب مزداوند، در محل پل خاتون با رودخانه هریرود تلاقی می‌نماید و تشکیل رودخانه تجن را می‌دهد. رودخانه کشف‌رود اغلب با جریان غالب طغیانی شناخته می‌شود، و بستر آن نسبت به مناطق اطراف عمیق‌تر و در حدود پنج تا ده متر پایین‌تر از سطح زمین‌های اطراف قرار دارد (شکل ۱). گزارش‌های هیدرولوژیکی منطقه‌ای و داده‌های موجود از مقاطع شاخص رودخانه نشان می‌دهد، عمق جریان در زمان وقوع رواناب و دوره‌های دارای جریان پایدار معمولاً در بازه‌ای بین $0/3$ تا 1 متر متغیر است که این دامنه بیانگر شرایط غالب جریان در مقاطع اصلی رودخانه می‌باشد. همچنین، طول رودخانه کشف‌رود بر اساس داده‌های رقومی شبکه زهکشی و منابع موجود، حدود 290 کیلومتر برآورد شده است (Tarshizian et al., 2007). شایان ذکر است که رودخانه کشف‌رود ماهیتی فصلی دارد و این مقادیر بیانگر شرایط جریان در زمان وقوع رواناب و رخدادهای سیلابی است، نه دوره‌های کاملاً خشک.



شکل ۱- موقعیت حوضه مورد مطالعه
Fig.1. Location of the study basin

مواد و روش‌ها

تعیین نقاط سیلابی در حوضه مورد مطالعه

در پژوهش حاضر، ۱۴۵ نقطه سیلابی از تصاویر ماهواره‌ای و سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری استان خراسان رضوی استخراج شد. نقاط سیلابی به پیکسل‌هایی اطلاق می‌شود که با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای SAR و اپتیکال و با مقایسه وضعیت قبل و بعد از وقوع سیلاب شناسایی شده‌اند. مبنای انتخاب این نقاط تغییرات بازتاب SAR بوده است. جهت افزایش دقت، داده‌های توپوگرافی (DEM) و اطلاعات تاریخی وقوع سیلاب نیز به کار گرفته شده‌اند تا نقاطی که احتمال اشتباه در طبقه‌بندی دارند حذف شوند. این روش مبتنی بر استانداردهای جهانی استخراج پهنه‌های سیلابی از سنجش از دور است و به عنوان رویکرد قابل اعتماد و دقیق برای تهیه نقشه‌های سیلاب به کار می‌رود. سپس این نقاط به دو گروه تقسیم شدند: ۷۰ درصد برای آموزش و اجرای مدل و ۳۰ درصد برای ارزیابی صحت‌سنجی. همچنین، مکان‌هایی که سیلاب رخ نداده بود، به صورت تصادفی انتخاب و به دو دسته مشابه تقسیم شدند. در این پژوهش مجموعاً ۱۴۵ نقطه شامل نقاط دارای سابقه سیلاب و نقاط بدون سیلاب مورد استفاده قرار گرفت. نقاط سیلابی بر اساس داده‌های تاریخی رخداد سیلاب، گزارش‌های سازمان‌های ذی‌ربط و تفسیر تصاویر سنجش از دور شناسایی شدند. در مقابل، نقاط بدون سیلاب به صورت تصادفی از مناطقی انتخاب گردیدند که هیچ‌گونه سابقه ثبت‌شده سیلاب نداشته و در فاصله‌ای ایمن از شبکه آبراهه‌ها قرار داشتند تا از هم‌پوشانی مکانی با نواحی سیلابی جلوگیری شود. فرآیند انتخاب تصادفی با استفاده از ابزار Random Point Generation در محیط GIS و با رعایت یکنواختی مکانی انجام شد. سپس کل داده‌ها به صورت تصادفی و با نسبت ۷۰ درصد برای آموزش و اجرای مدل و ۳۰ درصد برای ارزیابی به دو مجموعه مستقل تقسیم شدند، به گونه‌ای که توزیع نقاط سیلابی و غیرسیلابی در هر دو مجموعه حفظ گردد. این رویکرد به منظور کاهش سوگیری نمونه‌برداری و افزایش قابلیت تعمیم‌پذیری نتایج به کار گرفته شد.

در مرحله بعد، متغیرهای مرتبط با وقوع سیلاب مورد بررسی قرار گرفتند و با موقعیت پهنه‌های سیلابی مرتبط شدند. این متغیرها شامل عوامل مختلفی بودند که در پدیده سیلاب دخیل هستند. هدف از این فرایند، شناسایی عوامل مؤثر در وقوع سیلاب در حوضه مورد مطالعه است.

در پژوهش حاضر، جهت مدل‌سازی ریسک سیلاب از دو الگوریتم LMT و RF استفاده شد. انتخاب این دو الگوریتم بر اساس قابلیت‌های آن‌ها در شناسایی روابط غیرخطی و پیچیده بین متغیرهای محیطی و انسانی صورت گرفته است، در حالی که روش‌های پایه‌ای از جمله رگرسیون لجستیک محدود به روابط خطی هستند و در مواجهه با داده‌های چند بعدی و پیچیده دقت پایین‌تری ارائه می‌دهند. به همین دلیل مدل‌های LMT و RF برای ارائه پهنه‌بندی دقیق‌تر مناطق مستعد سیلاب ترجیح داده شدند.

مدل LMT ترکیبی از درخت تصمیم و رگرسیون لجستیک است که امکان شناسایی تعامل بین متغیرها و مدل‌سازی پیچیدگی‌های داده را فراهم می‌کند. همچنین، روش وزن‌دهی لایه‌ها که در ابتدا به صورت طبیعی است بر اساس وزن پیش‌فرض هر لایه و اهمیت نسبی نمونه‌ها محاسبه می‌شود، به گونه‌ای که سهم هر لایه در تصمیم نهایی مدل مشخص باشد.

در مدل RF، اهمیت متغیرها با شاخص‌های Mean Decrease Gini و Mean Decrease Accuracy تعیین شده است، در حالی که در مدل LMT، ضرایب رگرسیون لجستیک داخل هر نود به عنوان معیار اهمیت متغیرها مورد استفاده قرار گرفته است. جهت شفافیت بیشتر، مقادیر عددی اهمیت هر متغیر و همچنین بررسی معناداری آن‌ها با (p-value) بررسی می‌شود تا سهم کمی هر عامل در مدل به صورت دقیق مشخص گردد.

به این ترتیب، استفاده از مدل‌های LMT و RF مبتنی بر توانایی این مدل‌ها در مدل‌سازی تعامل‌ها و غیرخطی بودن داده‌ها، دقت بالاتر در پهنه‌بندی ریسک و انعطاف‌پذیری نسبت به داده‌های پیچیده محیطی است و ارائه جزئیات وزن‌دهی، اهمیت متغیرها و سهم کمی عوامل، قابلیت استنادپذیری و شفافیت روش را افزایش می‌دهد.

تهیه لایه‌های مؤثر بر وقوع سیلاب در حوضه مورد مطالعه

داده‌ها و متغیرهای مورد استفاده در تعیین مناطق آسیب‌پذیر شامل کاربری اراضی، طبقات ارتفاعی، تراکم زهکشی، لیتولوژی، شیب و جهت توپوگرافی، فاصله از آبراهه، میزان بارش، انواع خاک، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، شاخص توان آبراهه (SPI)، شاخص پوشش گیاهی (NDVI) و ویژگی‌های زمین‌شناسی می‌باشد که از نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰، نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و تصاویر ماهواره‌ای لندست مربوط به سال ۲۰۲۴ استخراج شده‌اند. لایه رقومی ارتفاع (DEM) حوضه آبخیز بر پایه نقشه‌های توپوگرافی تولید شده و سپس با بهره‌گیری از این لایه، لایه‌های شیب و جهت شیب به دست می‌آیند. تراکم زهکشی بر مبنای شبکه آبراهه‌ها استخراج شده و لایه‌های بارش منطقه بر اساس داده‌های مشاهده‌ای ۲۰ ساله (۱۴۰۲-۱۳۸۲) ایستگاه‌های هواشناسی منطقه ترسیم می‌شوند. لایه کاربری اراضی از داده‌های اداره کل منابع طبیعی استان خراسان رضوی تهیه شده است و لیتولوژی منطقه نیز از نقشه‌های زمین‌شناسی استخراج می‌گردد. فرایند تولید لایه رواناب بر اساس داده‌های بارش ۲۰ ساله، لایه کاربری اراضی، و لایه ارتفاع رقومی (DEM) در محیط نرم‌افزار Arc GIS 10.4 انجام شده است. همچنین، لایه خاک بر پایه واحدهای اراضی و اطلاعات خاک‌شناسی تهیه شده و لایه کاربری اراضی با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای لندست سال ۲۰۲۴ و پردازش در نرم‌افزار ENVI 5.4 استخراج می‌شود. برای تعیین کاربری‌های محدوده مورد مطالعه، از روش طبقه‌بندی نظارت‌شده بهره گرفته شده است. در نهایت، خروجی‌های مربوط به سیلاب با کاربرد مدل‌های ذکر شده تحلیل و تهیه می‌شود.

شاخص پوشش گیاهی^۱ (NDVI) بر پایه رابطه (۱) محاسبه می‌گردد:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (1)$$

1- Normalized Difference Vegetation Index

2- Topographic wetness index

NIR: باند مادون قرمز نزدیک

Red: باند قرمز

NDVI مثبت معرف پوشش گیاهی سبز و متراکم و NDVI منفی نشانگر متراکم نبودن پوشش گیاهی است (Jied, Wang, 2025).
(Zhang & Chen, 2025).

شاخص رطوبت توپوگرافی^۲ (TWI) از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$TWI: \ln \frac{As}{\tan \beta} \quad (2)$$

As مساحت حوضه آبخیز و β شیب زمین (بر حسب درجه) است.

شاخص رطوبت توپوگرافی یکی از شاخص‌های کاربرد در تحلیل‌های هیدرولوژیکی و مدلسازی خطر سیلاب است که میزان تجمع بالقوه رطوبت و اشباع خاک را در هر نقطه از یک حوضه آبریز بر اساس شکل و شیب زمین تخمین می‌زند (Wang, Yang, 2025a).
(Zhao & Wu, 2025a).
شاخص توان آبراهه^۲ (SPI) از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$SPI = Bs \times \tan \alpha \quad (3)$$

Bs مساحت حوضه آبخیز و $\tan \alpha$ گرادیان شیب بر حسب درجه است.

شاخص نام برده؛ یکی از شاخص‌های مهم در ژئومورفولوژی و مدل‌سازی هیدرولوژیکی است که قدرت جریان آب یا پتانسیل فرساینده‌گی رواناب سطحی را بر اساس شکل زمین و میزان تجمع جریان محاسبه می‌کند. این شاخص به‌ویژه در مطالعات خطر سیلاب، فرسایش خاک و اولویت‌بندی مناطق آسیب‌پذیر کاربرد فراوان دارد (Zhao, Wang, Jied & Chen, 2025).

مدل لجستیک درختی (LMT)

مدل لجستیک درختی، یکی از انواع الگوریتم‌های درخت تصمیم است که به صورت یک روش غیرپارامتری، فرآیند پیش‌بینی متغیرهای کمی یا طبقه‌بندی شده را بر اساس مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل کیفی و کمی انجام می‌دهد. درخت تصمیم، ساختاری سلسله‌مراتبی است که شامل ابزارهای تصمیم‌گیری بوده و به صورت بازگشتی، متغیرهای مستقل را به حالت‌های همگن تقسیم می‌کند. این ساختار، مجموعه‌ای از قوانین است که منجر به تعیین یک رده یا مقدار خاص می‌شوند. تفاوت اساسی بین روش‌های مختلف ساخت درخت تصمیم، در نحوه اندازه‌گیری فاصله و معیارهای تقسیم‌بندی است. درخت‌های تصمیمی که برای پیش‌بینی متغیرهای گسسته به کار می‌روند، با عنوان درخت‌های طبقه‌بندی شناخته می‌شوند؛ زیرا وظیفه تخصیص نمونه‌ها به دسته‌ها یا رده‌های مختلف را بر عهده دارند. در مقابل، درخت‌های تصمیمی که برای پیش‌بینی متغیرهای پیوسته استفاده می‌شوند، درخت‌های رگرسیونی نامیده می‌شوند (Debeljak, Dzeroski, Jopp, Reuter & Breckling, 2009). این مدل، تلفیقی از روش درخت تصمیم‌گیری و رگرسیون لجستیک است که با بهره‌گیری از اطلاعات نوع لجستیکی برای تفکیک کلاس‌ها و همچنین به‌کارگیری الگوریتم LogitBoost جهت ساخت مدل رگرسیون لجستیک در هر گره از درخت، توسعه یافته است. درخت تصمیم، با استفاده از الگوریتم CART، پس از فرآیند هرس، برای کاهش پیچیدگی ساختاری منضبط شده است. در الگوریتم LogitBoost، رگرسیون لجستیک افزایشی با حداقل مربعات، برای هر کلاس، (شامل حالت‌های سیلابی و عدم سیلابی) مدل‌سازی می‌شود (Debeljak et al., 2009).

مدل جنگل تصادفی (RF)

روش جنگل تصادفی، مجموعه‌ای از درختان تصمیم‌گیری است که برای انجام وظایف پیش‌بینی در حوزه‌های طبقه‌بندی و رگرسیون مورد استفاده قرار می‌گیرد و معرفی آن به عنوان الگوریتمی غالب در حوزه یادگیری گروهی توسط بریمن صورت گرفت (Rahman, Dhruva, Ghosh & Pal, 2019). این الگوریتم، به دو شاخه اصلی زیر مجموعه فضای فرعی تصادفی subspace و زیر

فضای تصادفی تقسیم می‌شود. شاخه subspace، یک فرایند یادگیری ماشین است که با بهره‌گیری از نمونه‌گیری و پیش‌بینی‌های دقیق، مجموعه‌های متعددی از نمونه‌ها را تولید نموده و سپس از طریق رأی‌گیری، نتایج نهایی را برای طبقه‌بندی تخمین می‌زند. در حوزه رگرسیون، برای ساخت جنگل‌های تصادفی از درختان ساده و توانمند در تولید مقادیر عددی پاسخ، بهره‌گیری می‌شود؛ به طور مشابه با الگوریتم‌های طبقه‌بندی، در این فرآیند، مجموعه‌ای تصادفی از نمونه‌ها با توزیع برابر برای تمامی درختان انتخاب می‌گردد (Lee, Kim, Jung, Lee & Lee, 2017). الگوریتم جنگل تصادفی (RF) رویکردی مبتنی بر مجموعه‌ای از درختان رگرسیون است که هر کدام با یک زیرمجموعه تصادفی از داده‌های ورودی آموزش داده می‌شوند. این روش، برخلاف استفاده از کل نمونه برای آموزش درختان تصمیم، به دلیل در نظر گرفتن اهمیت نمونه‌های محلی، مفیدتر است. در مطالعه موردی تحلیل آسیب‌پذیری سیلاب، مدل RF به عنوان مبنایی برای ارزیابی و مقایسه با یک مدل ترکیبی نوین مورد استفاده قرار می‌گیرد، که نشان‌دهنده کارایی آن در این زمینه است.

چند خطی بودن عوامل مؤثر در سیلاب

پیش از اجرای الگوریتم‌های مدل‌سازی، بررسی هم‌خطی متغیرهای مستقل جهت کاهش احتمال بروز خطاهای ناشی از حساسیت الگوریتم‌ها به سیلاب ضروری است. تحلیل چند خطی، که شامل ارزیابی وابستگی میان جفت‌های مختلف متغیرهای مستقل در قالب یک مدل رگرسیون چندگانه است انجام می‌شود و در صورت وجود هم‌خطی قابل توجه، متغیرهای با هم خطی بالا حذف می‌شوند. شاخص‌های واریانس تورم (VIF) و شاخص تحمل (TOL)، به عنوان ابزارهای معمول در تشخیص چند خطی بودن، مورد استفاده قرار می‌گیرند که VIF بزرگ‌تر از ۱۰ و TOL کمتر از ۰/۱، حد آستانه‌ای برای وجود هم‌خطی میان متغیرها محسوب می‌شوند (Dormann et al., 2013). در ادامه، پس از شناسایی و انتخاب عوامل مؤثر، آزمون تشخیصی هم‌خطی چندگانه (MCDT) جهت ارزیابی تداخل اثرات بین متغیرهای مختلف انجام می‌شود تا از وجود هم‌خطی و تأثیر آن بر صحت نتایج جلوگیری گردد (Panahi et al., 2021).

TOL و VIF با استفاده از رابطه (۴) و (۵) محاسبه می‌شوند:

$$TOL = 1 - R_j^2 \quad (۴)$$

$$VIF = \frac{1}{TOL} \quad (۵)$$

R_j^2 نمایانگر مقدار رگرسیون از بر سایر متغیرهای مختلف در یک مجموعه داده است (Roy, Kar & Das, 2020).

ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها

اعتبارسنجی الگوریتم‌ها با منحنی ROC-AUC

ارزیابی و اعتبارسنجی مدل‌های آسیب‌پذیری، گامی حیاتی در تضمین کیفیت و دقت نتایج است. بدون این مرحله مهم، خروجی مدل‌ها ممکن است فاقد اعتبار و کاربرد در دنیای واقعی باشد. در این پژوهش، ما از روش‌های آماری متنوعی برای ارزیابی دقت مدل استفاده کرده‌ایم. به طور خاص، حساسیت، دقت، تحلیل ROC-AUC و ضریب کاپا، ابزارهایی هستند که به کار گرفته شده‌اند (Bellu, Sanches Fernandes, Cortes & Pacheco, 2016). در اینجا، دقت مدل با تمرکز بر تشخیص پیکسل‌های مربوط به مناطق سیلابی و غیرسیلابی مورد ارزیابی قرار گرفت. شاخص‌های TP، TN، FP و FN، ابزارهایی بودند که برای این منظور به کار رفتند. منحنی ROC، ابزاری گرافیکی است که حساسیت و ویژگی مدل را به صورت بصری نمایش می‌دهد و AUC، عملکرد مدل را در بازه‌ای از صفر (عملکرد ضعیف) تا ۱ (عملکرد عالی) نشان می‌دهد (Wang, Zhang, Van Beek, Tian & Bogaard, 2020). ضریب کاپا نیز به

عنوان یک شاخص اعتبارسنجی، با مقادیری بین ۱- (غیرقابل اعتماد) و ۱+ (کاملاً قابل اعتماد)، به ارزیابی مدل‌ها کمک می‌کند (Nguyen, Mehrabi, Kalantar, Moayedi & Abdullahi, 2019).

در این مطالعه، شاخص‌های آماری متعددی شامل حساسیت^۱ (SST)، ویژگی^۲ (SPF)، دقت^۳ (ACC)، شاخص کاپا، مساحت زیر منحنی (AUC)، بررسی و ارزیابی شدند. میزان این شاخص‌ها بر اساس فرمول‌های تعریف‌شده در معادلات زیر محاسبه می‌شود. (Costache, Bui & Pham, 2020; Wu, Qiao, Chen, Huang & Hong, 2020)

$$SST = \frac{TP}{TP+FN} \quad (۶)$$

$$SPF = \frac{TN}{TN+FP} \quad (۷)$$

$$ACC = \frac{TP+TN}{TP+FN+TN+FP} \quad (۸)$$

$$Kappa = \frac{TP+TN-P_{obs}}{1-P_{exp}} \quad (۹)$$

$$AUC = \sum TP + \sum TN / P+N \quad (۱۰)$$

TP (مثبت واقعی) به تعداد سلول‌هایی اشاره دارد که به درستی به عنوان سیلاب شناسایی شده‌اند. TN (منفی واقعی) تعداد سلول‌هایی است که به درستی به عنوان نقاط غیر سیلاب طبقه‌بندی شده‌اند. در مقابل، FP (مثبت کاذب) و FN (منفی کاذب) به ترتیب، سلول‌هایی هستند که به اشتباه به عنوان سیلاب و نقاط غیر سیلاب دسته‌بندی شده‌اند. این طبقه‌بندی‌ها در شبکه‌های سلولی مورد استفاده قرار می‌گیرند تا دقت و صحت شناسایی سیلاب و نقاط غیر سیلاب را تضمین کنند (Peng et al., 2014). فرآیند انجام پژوهش در چند گام متوالی و با بهره‌گیری از نرم‌افزارها و ابزارهای تخصصی انجام شده است. جهت اعتبارسنجی از روش K-Fold Cross-Validation استفاده شده است و شاخص‌های عملکرد SST، SPF، ACC و AUC با کدنویسی در پایتون محاسبه گردید. روش K-Fold Cross-Validation به منظور ارزیابی پایداری و دقت مدل به کار می‌رود. در این روش داده‌ها به K زیرمجموعه (Fold) تقسیم می‌شوند و مدل در K مرحله به صورت چرخشی آموزش و آزمون می‌گردد. در هر تکرار، یک زیرمجموعه برای آزمون و بقیه برای آموزش استفاده می‌شود و در پایان میانگین نتایج تمام تکرارها به عنوان معیار نهایی عملکرد مدل گزارش می‌شود. این رویکرد، امکان استخراج دقیق داده‌های مکانی-هیدرولوژیکی و ارزیابی قابل اعتماد مدل‌ها را فراهم ساخت.

نتایج و بحث

در جدول ۱ نتایج آزمون هم‌خطی ارائه شده است. طبق جدول ۱ در آزمون هم‌خطی چندگانه عوامل، تمامی متغیرهای مربوط به سیلاب دارای مقادیر VIF زیر ۱۰ و Tol بالای ۰/۱ بودند، که این نتایج نشان می‌دهد که همپوشانی بین این عوامل وجود ندارد. در میان این فاکتورها، عامل NDVI بیشترین مقدار VIF معادل ۳/۲۳۱ را دارا می‌باشد و پایین‌ترین مقدار Tol نیز مربوط به همین عامل و برابر با ۰/۱۰۱ است. این موضوع به دلایل ماهیت و ویژگی‌های مخصوص این پارامتر و تفاوت آن با سایر عوامل مربوط می‌شود.

سپس در پژوهش حاضر ۱۳ عامل مؤثر بر وقوع سیلاب استفاده شده است. انتخاب این عوامل بر اساس مبانی نظری هیدرولوژی، مطالعات پیشین و کاربرد گسترده آن‌ها در پژوهش‌های مشابه انجام شده است، به گونه‌ای که نقش مؤثر متغیرهای توپوگرافی، هیدرولوژیکی، اقلیمی، زمین‌شناسی و پوشش سطح زمین در کنترل فرآیندهای تولید رواناب و تمرکز جریان به خوبی در ادبیات علمی تأیید شده است.

مطالعات متعددی نشان داده‌اند که ترکیب این شاخص‌ها در چارچوب سامانه اطلاعات جغرافیایی و مدل‌های یادگیری ماشین، دقت بالایی در پیش‌بینی مناطق مستعد سیلاب ایجاد می‌کند (Tehrany, Pradhan & Jebur, 2015; Rahmati, Zeinivand & Besharat, 2016; Costache et al., 2021; Chen, Li & Hong, 2021; Wang, Li, Jied & Zhang, 2025b) از این رو استفاده از این ۱۳ عامل در پژوهش حاضر از پشتوانه علمی برخوردار بوده و با استانداردهای مطالعات بین‌المللی همخوانی دارد.

جدول ۱- آزمون تشخیص هم خطی عوامل مؤثر

Table 1- Collinearity diagnostic test of the influencing factors

پارامترها Parameters	بررسی هم‌خطی Multilinear detection	
	Tol	VIF
کاربری اراضی Landuse	0.621	1.154
ارتفاع Elevation	0.566	1.471
لیتولوژی Lithology	0.755	1.695
شیب Slope	0.507	1.502
جهت شیب Aspect	0.202	2.144
فاصله از آبراهه Distance to river	0.478	1.398
بارش Rainfall	0.654	1.241
خاک Soil	0.501	1.135
انحنای Curvature	0.164	2.407
تراکم زهکشی Drainage density	0.359	1.372
TWI	0.156	2.708
SPI	0.203	2.514
NDVI	0.101	3.231

شیب تند منجر به افزایش سرعت جریان آب و رواناب سطحی می‌شود و در عین حال، میزان نفوذ آب را کاهش می‌دهد (Fernández & Lutz, 2010). در مقابل، شیب ملایم‌تر با عمق سیلاب بیشتر ارتباط دارد. این تفاوت در زاویه شیب، تأثیر قابل توجهی بر رفتار سیلاب در سطح زمین دارد. در شیب‌های صفر تا ۲۰ درجه در حوضه، تأثیر عامل شیب در سرعت رواناب مشهودتر است. سرعت و حرکت رواناب در این شیب سریع‌تر رخ می‌دهد و میزان رواناب سطحی به حدی افزایش می‌یابد که می‌تواند منجر به سیلاب‌های ناگهانی و تخریبی در مسیرهای طبیعی و کانال‌های هدایت فوری شود. ارتفاعات پایین‌تر، به ویژه در مناطقی که رواناب‌ها به سمت آن‌ها جریان دارند، مستعدتر به وقوع سیلاب هستند. این مناطق در مقایسه با ارتفاعات بالاتر، پتانسیل بیشتری جهت وقوع سیلاب‌ها دارند (Li, Wu, Dai & Xu, 2012). این امر به دلیل موقعیت جغرافیایی آن‌ها است که باعث می‌شود آب‌های روان به سمت این مناطق جاری شوند (Nedkov & Burkhard, 2012). در حوضه مطالعاتی، ارتفاع ۱۰۰۰ متر نقش مهمی در فرآیندهای هیدرولوژیکی و پدیده سیلاب در حوضه کشف‌رود ایفا می‌کند. در ارتفاعات نزدیک به ۱۰۰۰ متر، کاهش دما نسبت به مناطق پایین‌تر منجر به تغییر در نوع و توزیع بارش می‌گردد که غالباً به صورت برف، باران یا ترکیبی از هر دو ظاهر می‌شود. همچنین

ارتفاع بر ویژگی خاک و نفوذپذیری خاک منطقه تأثیر می‌گذارد. در ارتفاع ۱۰۰۰ متر، خاک‌ها به علت حضور رطوبت زیاد و فرآیندهای اقلیمی، اغلب نفوذپذیری پایین‌تری دارند یا به اصطلاح میزان آب نفوذ یافته به زمین کاهش یافته است. این وضعیت، میزان رواناب سطحی را افزایش می‌دهد و از آنجا که رواناب سریع‌تر و بیشتر می‌شود، پتانسیل وقوع سیلاب‌های ناگهانی در این مناطق ارتقا می‌یابد. تحقیقات اخیر در زمینه هیدرولوژی سیلاب بر اهمیت انحنا به عنوان یک عامل کلیدی در پویایی سیلاب تأکید کرده‌اند (Hong et al., 2018; Ahmadlou et al., 2019; Ngo et al., 2020). شیب‌های محدب به دلیل شکل منحنی خود، جریان آب سطحی را تسریع می‌کنند و این امر می‌تواند بر نفوذ آب در خاک و اشباع آن تأثیرگذار باشد. این ویژگی‌های هندسی در درک و مدل‌سازی سیلاب‌ها نقش مهمی ایفا می‌کنند (Cao et al., 2016). انحناهای مختلف زمین شامل انحناهای محدب، مقعر و مسطح نقش مهمی در فرآیندهای هیدرولوژیکی و پدیده سیلاب در حوضه کشف‌رود ایفا می‌کنند. در انحناهای محدب، سطح زمین رو به بالا است، که باعث می‌شود رواناب‌ها در این نوع سطح‌بندی، به سمت پایین منطقه هدایت شوند. این انحنا ممکن است منجر به تجمع آب در بخش‌هایی شود که در مسیر سیلاب‌ها قرار دارند و در صورت تداوم بارش‌های سنگین، باعث افزایش حجم رواناب و شدت سیلاب در حوضه شود.

در این پژوهش، شاخص‌های SPI، TWI، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی و بارش به‌عنوان مهم‌ترین متغیرهای اثرگذار بر فرآیندهای سیلاب در حوضه کشف‌رود شناسایی شدند. شاخص TWI، به‌عنوان یکی از شاخص‌های پایه در تحلیل‌های هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی، بیانگر الگوهای تجمع رطوبت و تمرکز جریان سطحی است؛ به‌گونه‌ای که مقادیر بالاتر آن با افزایش سرعت رواناب، کاهش زمان پاسخ حوضه و در نهایت تشدید خطر سیلاب همراه است (Wang, Zhao, Li & Zhang, 2025c). شاخص SPI نیز توان و ظرفیت آبراهه برای انتقال رواناب را توصیف می‌کند و مقادیر پایین آن نشان‌دهنده محدودیت ظرفیت کانال‌ها و افزایش احتمال انباشت آب و بروز سیلاب در بارش‌های شدید است (Zhao et al., 2025). افزون بر این، فاصله از رودخانه به عنوان یکی از عوامل تعیین‌کننده شدت سیلاب عمل می‌کند؛ به گونه‌ای که نواحی نزدیک‌تر به رودخانه به دلیل تمرکز سریع رواناب و کوتاه بودن مسیر انتقال، آسیب‌پذیری بیشتری دارند (Choubin et al., 2019; Malik et al., 2020). تراکم زهکشی نیز با تسهیل هدایت سریع رواناب، کاهش نفوذ و افزایش تمرکز جریان به ویژه در نواحی شیب‌دار، احتمال وقوع سیلاب‌های ناگهانی را تشدید می‌کند (Chapi et al., 2017).

شدت و مدت بارش باران عوامل کلیدی در ایجاد سیلاب هستند، که می‌تواند منجر به پیامدهای جدی شود (Kron, 2002) (Marchi, Borga, Preciso & Gaume, 2010). در حوضه مطالعاتی، محدوده بارش (۳۰۰-۱۰۰ میلی‌متر)، تجمع بارش و افزایش سطح اشباع خاک، سبب می‌شود که مقدار قابل توجهی رواناب سطحی ایجاد گردد. بنابراین، حجم رواناب و شدت پدیده سیلاب در مواردی که دیگر پارامترهای محیطی و هیدرولیکی هم‌سو باشند، به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. در این شرایط، احتمال توسعه شاخص‌های خطر سیلاب در مناطقی با شیب مناسب و سیستم زهکشی نامناسب افزایش می‌یابد. زمین‌شناسی می‌تواند با توجه به تفاوت‌هایی که در نفوذپذیری مواد سنگی و رسوبی وجود دارد در روند وقوع سیلاب نقش دارد (Khosravi et al., 2019). در حوضه کشف‌رود، نواحی شامل سنگ‌های نفوذپذیر مانند رسوبات آبرفتی و آهکی، فرآیند نفوذ و ذخیره آب در خاک و سازندهای سنگی در سطح حوضه بهبود یافته و این عوامل، توانایی مدیریت رواناب و کاهش تنش‌های سطحی و زیرسطحی را افزایش می‌دهند. به‌علاوه، این نوع زمین‌شناسی، با فراهم آوردن فضایی برای نفوذ آب، سهم قابل توجهی در کاهش میزان رواناب سطحی و در نتیجه، کاهش خطر وقوع سیلاب‌های ناگهانی دارد. بنابراین، سازندهای نفوذپذیر، در صورت عدم مدیریت مناسب، ممکن است در عین حال، سبب نفوذ زیاد و کاهش جریان رواناب سطحی در مناطق تحت پوشش خود شوند، اما در مقایسه با رسوب‌های مقاومت‌پذیر، نقش کمتری در تمرکز رواناب سطحی دارند. در مقابل، سنگ‌ها و سازندهای مقاوم و نفوذناپذیر، شامل سنگ‌های سخت و رسوبات غیرقابل نفوذ، غالباً منجر به تجمع رواناب، افزایش سطح آب زیرزمینی و افزایش حساسیت منطقه نسبت به سیلاب می‌شوند. این ساختارها، به خصوص در مناطق شیب‌دار و کم‌نفوذ، موجب کاهش هدایت آب و ایجاد مخازن طبیعی در سطح منطقه شده و در زمان بارش‌های

سنگین، میزان رواناب سطحی و پتانسیل توسعه سیلاب را افزایش می‌دهند. همچنین زمین‌شناسی به‌طور مستقیم بر ساختار شبکه زهکشی، میزان ذخیره آب در خاک و میزان رواناب سطحی تأثیر می‌گذارند.

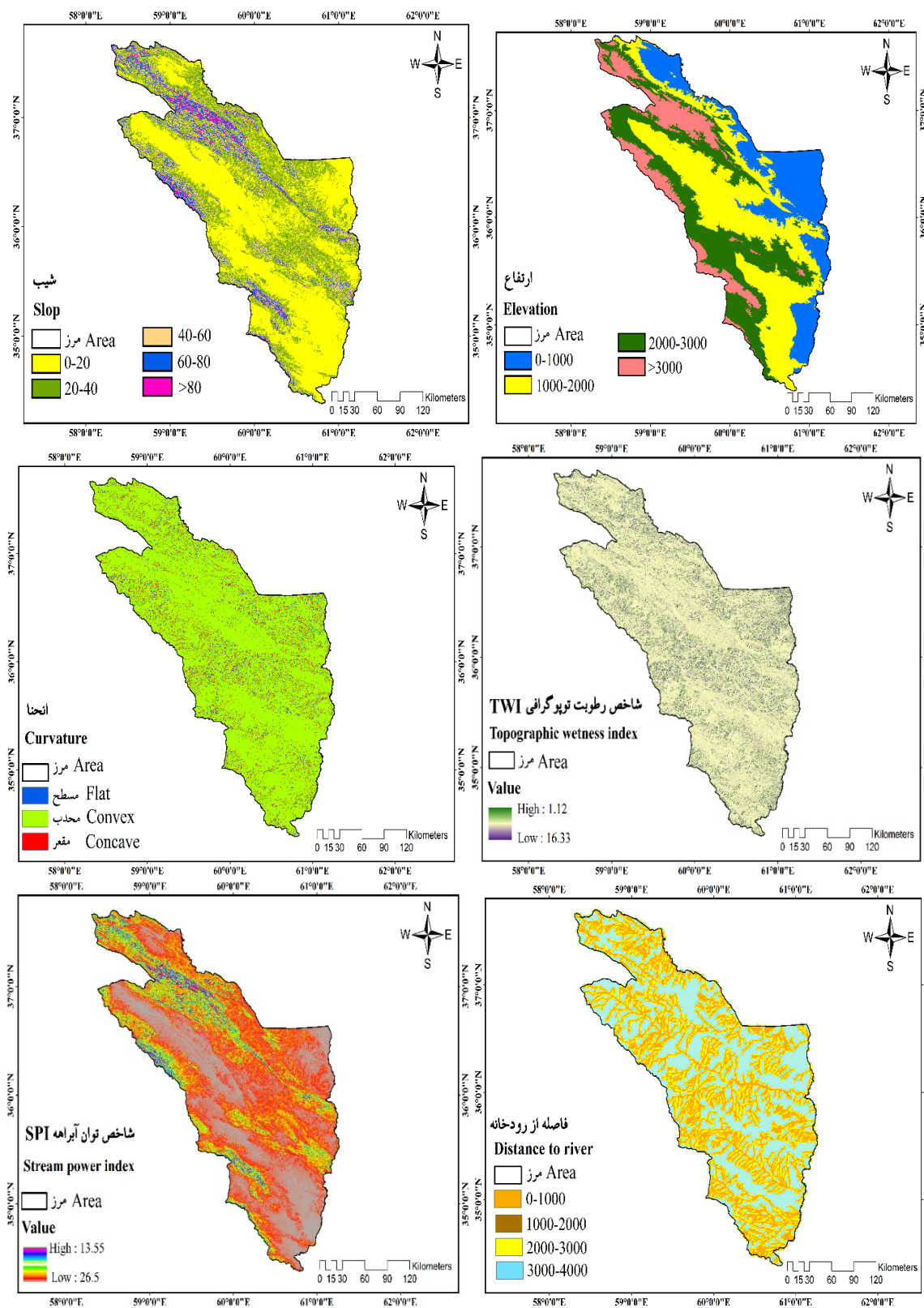
کاربری اراضی در یک منطقه، رواناب سطحی، میزان نفوذ آب و تعادل تبخیر و تعرق را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این عناصر به‌طور قابل توجهی بر الگوی استفاده از زمین و تنوع پوشش گیاهی در یک اکوسیستم خاص تأثیر می‌گذارند (Zhang et al., 2020). در حوضه مورد مطالعه در اراضی کشاورزی و مراتع، میزان نفوذپذیری خاک غالباً بالا است و این نوع کاربری به افزایش فرآیند نفوذ آب به خاک و کاهش رواناب سطحی منجر می‌شود. این فرآیند، با کاهش حجم رواناب و تغییر در زمان پاسخ سیستم، نقش مهمی در کاهش یا کنترل پدیده سیلابی ایفا می‌کند؛ البته در صورت وجود مداخلاتی همچون سدها یا کانال‌های کنترل نشده، ممکن است نتیجه برعکس باشد. در مقابل، توسعه شهرسازی، فعالیت‌های صنعتی و سایر کاربری‌های ساختمان‌سازی، معمولاً با تغییر کاربری اراضی طبیعی به سازه‌های مقاوم و سخت، سطح نفوذپذیری خاک را کاهش می‌دهد. این تغییر، با افزایش نرخ رواناب سطحی، کاهش فرآیند نفوذ و افزایش حجم رواناب، خطر بروز سیلاب‌های ناگهانی و شدید را در منطقه افزایش می‌دهد. کاربری اراضی شهری و ساخت‌وسازهای گسترده، همچنین به علت کاهش عوارض طبیعی، انعطاف‌پذیری سامانه‌های طبیعی در مقابل سیلاب را کاهش می‌دهند و در شرایط بارش‌های سنگین، سیستم‌های زهکشی ناکافی یا قدیمی، به شدت تحت فشار قرار می‌گیرند و پدیده رواناب سطحی و سیلاب، به سرعت بروز می‌یابد. علاوه بر این، تغییر کاربری اراضی می‌تواند در بلندمدت منجر به تغییرات اقلیم منطقه شده و رفتارهای هیدرولوژیکی را تغییر دهد که این تغییرات نقش بیشتری در وقوع سیلاب‌ها ایفا می‌کنند.

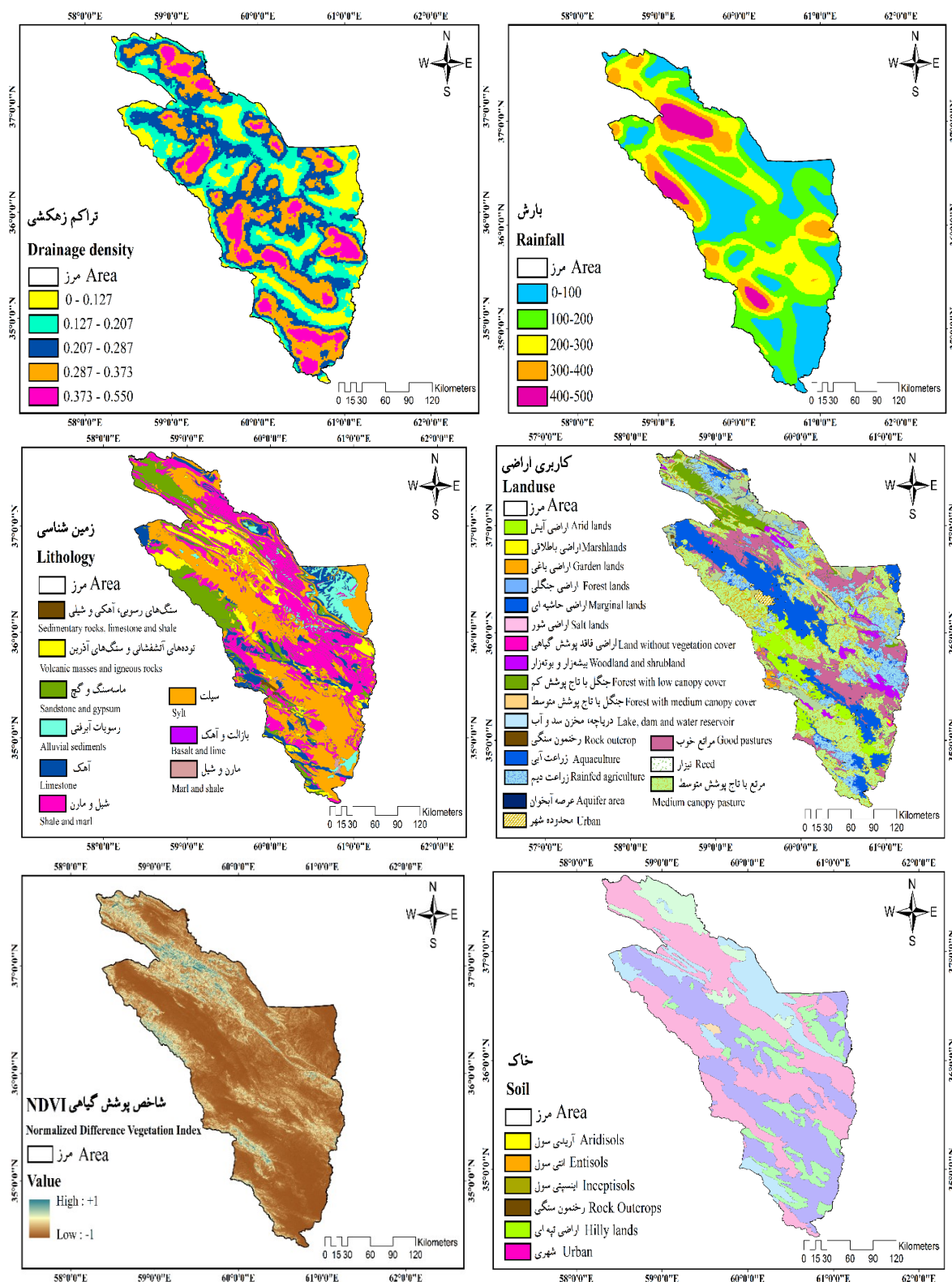
تأثیر مقادیر شاخص پوشش گیاهی NDVI در محدوده‌های +۱ و -۱ بر پدیده سیلاب در حوضه کشف‌رود، نشان‌دهنده تفاوت‌های اساسی در وضعیت پوشش گیاهی و فرآیندهای هیدرولوژیکی مرتبط با آن است. شاخص نام برده به عنوان شاخص کمی برای ارزیابی سلامت و تراکم پوشش گیاهی است. NDVI مثبت در حوضه، نشانگر پوشش گیاهی سالم، غنی و متراکم است. این وضعیت با افزایش توده گیاهی، استحکام خاک، تثبیت و ساختار ریشه‌ای مناسب، فرآیندهای نفوذ و جذب آب را بهبود می‌بخشد. در نتیجه، نفوذپذیری خاک افزایش یافته و میزان رواناب سطحی کاهش می‌یابد. این حالت منجر به کاهش شدت و سرعت پاسخ سیستم هیدرولوژیکی به بارش می‌شود، به طوری که فرآیندهای طبیعی کاهش سیلاب فعال‌تر می‌گردند و خطر وقوع سیلاب‌های ناگهانی و متمرکز کم می‌شود. در مقابل، NDVI منفی، نشانگر کاهش یا نبود پوشش گیاهی است. این وضعیت معمولاً در نتیجه تخریب بی‌رویه زیست‌محیطی، تغییر کاربری اراضی یا تخریب جنگل‌ها و مراتع دیده می‌شود. در این حالت، خاک‌ها، بدون حفاظت گیاهی، آسیب‌پذیرتر می‌گردند، نفوذپذیری کاهش یافته یا خاک در معرض فرسایش قرار می‌گیرد، و سطح خاک ناپایدار و غیرقابل کنترل می‌شود. نتیجه این وضعیت، تمرکز رواناب، افزایش حجم آن و بروز سیلاب‌های سریع و مخرب است، زیرا فرآیندهای طبیعی کاهش اوج سیلاب مختل می‌گردد. خاک، عنصری کلیدی در پدیده سیلاب است (Souissi et al., 2020). بافت خاک، عامل تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری الگوی رواناب سطحی، میزان نفوذ و گسترش سیلاب است. این ارتباط تنگاتنگ، بر اهمیت درک خصوصیات خاک در مدیریت و پیش‌بینی سیلاب‌ها تأکید دارد. مطالعات نشان می‌دهد که بافت خاک، تأثیر قابل توجهی بر رفتار آب در سطح زمین و زیر زمین دارد، و در نتیجه، درک آن برای مدیریت حوادث مرتبط با آب ضروری است (Zhang, Chen, Li & Zhao, 2019). خاک‌های آرییدی سول در حوضه، معمولاً در مناطق کویری و نیمه‌کویری مشاهده می‌شود و ویژگی اصلی آن پایین بودن نفوذپذیری است که ناشی از ساختار شنی و سنگین بودن آن است. در چنین خاک‌هایی، فرآیند نفوذ آب محدود است و رواناب‌ها به صورت رواناب سطحی حرکت می‌کند. این وضعیت، در اندازه‌گیری‌های هیدرولوژیکی منجر به افزایش حجم رواناب سطحی و احتمال تمرکز رواناب در مسیرهای محدود و بروز سیلاب‌های ناگهانی می‌شود، افزون بر اینکه، باعث تحریک فرسایش و افزایش رسوبات سطحی می‌شود. خاک‌های انتی سول غالباً در نواحی مرطوب‌تر و در نواحی کم‌ارتفاع‌تر، با ساختارهای رسی تشکیل می‌شوند. ویژگی کلیدی آن‌ها، محدود بودن نفوذپذیری و ظرفیت بالا برای نگهداری آب است که می‌تواند منجر به اشباع شدن خاک و کاهش نفوذپذیری در دوره‌های مکرر بارش شود.

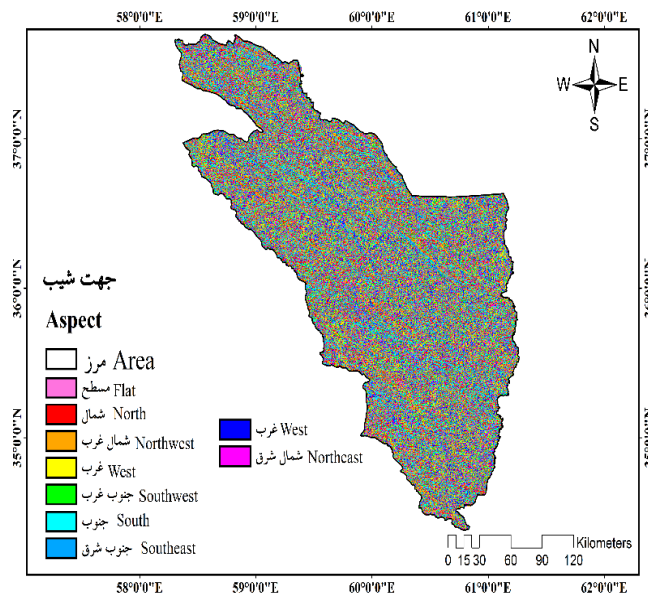
نتیجه این است که، پس از وقوع بارش‌های سنگین، رواناب سطحی به شدت افزایش یافته و پتانسیل توسعه سیلاب‌های شدید و تمرکز یافته بالا می‌رود. خاک‌های اینسپتی سول معمولاً در مناطق مرطوب و در بستر رودخانه‌ها و مجاورت آبگیرهای طبیعی حوضه قرار دارند و ساختاری متراکم دارند. نفوذپذیری پایین، میزان نگهداری آب بالا و تمایل به رسوب‌گذاری در این خاک‌ها، باعث افزایش رواناب سطحی و تمرکز رواناب می‌شود. در زمان بارش‌های سنگین، این نوع خاک‌ها توانایی انتقال و نفوذ آب را ندارند و سرعت تجمع رواناب در سطح منطقه را بالا می‌برند که میزان خطر وقوع سیلاب را افزایش می‌دهد. تأثیر جهت شیب در پدیده سیلاب در حوضه کشف‌رود به روابط بین جهت شیب سطح زمین، روند رواناب و فرآیندهای هیدرولیکی مرتبط با هدایت رواناب برمی‌گردد. جهت شیب شمالی در حوضه، معمولاً در مناطق معتدل و به سمت مناطق پایین‌دست، آب را به سمت مناطق مرتبط هدایت می‌کند و در برخی مناطق، باعث تمرکز رواناب در نواحی خاص می‌شود. این جهت، به خصوص در ترکیب با ساختار زمین، منجر به تجمع رواناب در بخش‌های محدودی از حوضه می‌شود و در نتیجه، توسعه سیلاب‌ها را تسهیل کند. همچنین، شمالی بودن شیب در نواحی مرتفع می‌تواند منجر به هدایت سریع آب از دامنه‌های مرتفع به سمت رودخانه‌های اصلی شود که در صورت بارش سنگین، سرعت و شدت سیلاب را افزایش می‌دهد. در جهت شیب شرقی، مسیر حرکت رواناب غالباً به سمت شرق است و با توجه به ساختار ژئومورفولوژیکی منطقه، ممکن است جریان آب به سمت حوضه‌های داخلی یا حومه‌ها هدایت شود. در جهت شیب غربی، وضعیت مشابه جهت شرقی است، اما در برخی موارد، با توجه به توزیع شیب و ساختار زمین، جریان آب به سمت غرب هدایت می‌شود و ممکن است باعث تمرکز رواناب در نواحی خاصی گردد. در مواردی، شیب غربی، در صورت تند و شدت، می‌تواند سرعت جریان آب را افزایش دهد و سیلاب‌هایی ناگهانی و شدید در مسیرهای محدود توسعه دهد (شکل ۲).

نقشه‌های پهنه بندی سیلاب

در این مطالعه، روش شکست طبیعی برای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب به کار گرفته شده است. این روش طبقه‌بندی، مقادیر را به گروه‌هایی با واریانس درون‌کلاسی حداقل تقسیم می‌کند. الگوریتم طبقه‌بندی، با بهینه‌سازی اختلافات درون و بین کلاس‌ها، مرزهای کلاس‌ها را مشخص می‌سازد (Choubin et al., 2019). جهت مدل‌سازی الگوریتم‌ها ابتدا تعداد نقاط سیلابی و غیرسیلابی (در مجموع ۱۴۵ نقطه) با کدهای ۰ و ۱ مشخص شدند. سپس، داده‌ها به صورت تصادفی به دو بخش تقسیم شدند: ۷۰ درصد برای آموزش و ۳۰ درصد برای آزمایش مدل. نتایج نشان می‌دهد که در مدل LMT (شکل ۳)، ۸۱/۲۳ درصد حوضه در پهنه‌های خطر متوسط تا خیلی زیاد قرار دارد. در مدل RF (شکل ۴)، این مقدار ۶۸/۴۴ درصد می‌باشد. پهنه‌های پرخطر عمدتاً در سازنده‌های مقاوم حوضه مشاهده می‌شوند. سنگ‌ها و سازنده‌های مقاوم از جمله سنگ‌های دگرگونی یا آذرین، معمولاً نفوذپذیری پایینی دارند و نقش موانع طبیعی برای نفوذ آب ایفا می‌کنند. در این شرایط، رواناب سطحی بیشتر و با سرعت بالا حرکت می‌کند که منجر به توسعه سیلاب‌های متمرکز و ناگهانی در مناطق شیب‌دار و یا در مسیرهای محدود حوضه می‌شود. عوامل متنوعی در ایجاد سیلاب‌ها در این حوضه نقش دارند. نوع کاربری زمین، به‌ویژه در بخش مرکزی حوضه، با پوشش مرتعی، رواناب را تشدید می‌کند. شیب ملایم حوضه، رواناب را با سرعت بیشتری هدایت می‌کند و حجم قابل توجهی از آب را از خروجی حوضه خارج می‌نماید. طول شیب‌های شمال غربی و جنوب شرقی، انرژی جنبشی رواناب را افزایش می‌دهد. شکل محدب حوضه نیز به عنوان عاملی در تشدید آبدوی و در نتیجه افزایش احتمال وقوع سیل عمل می‌کند. بارندگی، به‌ویژه بارش‌های شدید و کوتاه‌مدت بهاری، یکی از عوامل کلیدی سیلاب‌هاست. ویژگی‌های خاک و پوشش گیاهی نیز بر شدت رواناب تأثیرگذارند؛ خاک غیرقابل نفوذ و پوشش گیاهی ضعیف، سرعت رواناب را بیشتر می‌کنند. علاوه بر این، فعالیت‌های انسانی مانند چرای بی‌رویه دام، شخم‌زدن نامناسب در شیب‌ها و تخریب مراتع، به همراه سازنده‌های زمین‌شناسی غیرقابل نفوذ، در مجموع بر وقوع سیل در این حوضه تأثیرگذار هستند.

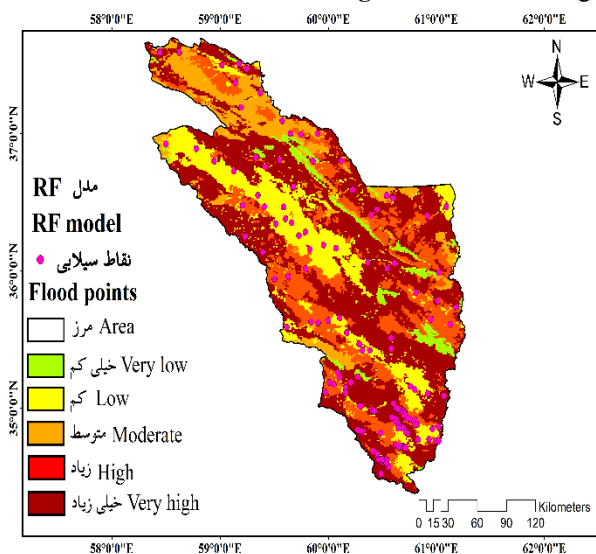






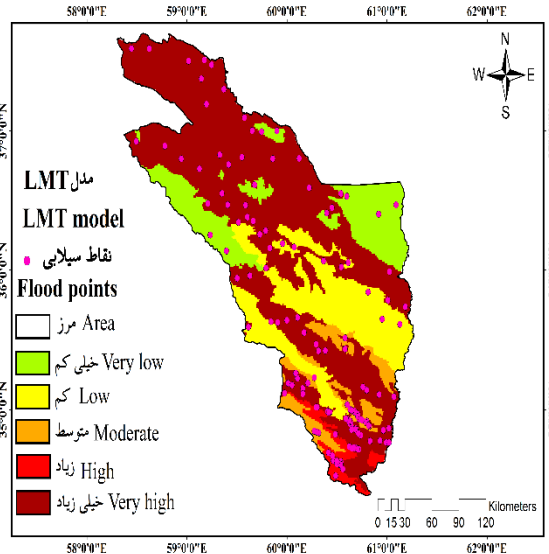
شکل ۲- عوامل مؤثر بر وقوع سیلاب

Fig. 2. Factors affecting the occurrence of floods



شکل ۴- نقشه پهنه‌بندی سیلاب با مدل RF

Fig. 4. Flood zoning map with RF model



شکل ۳- نقشه پهنه‌بندی سیلاب با مدل LMT

Fig. 3. Flood zoning map with LMT model

از نظر الگوی مکانی، هر دو مدل بیشترین پهنه‌های پرخطر را در نواحی دارای سازندهای زمین‌شناسی مقاوم و کم‌نفوذ نشان می‌دهند. این سازندها، به‌ویژه سنگ‌های آذرین و دگرگونی، به دلیل نفوذپذیری پایین، موجب افزایش رواناب سطحی و تمرکز جریان می‌شوند. با این حال، تفاوت اصلی دو مدل در نحوه تلفیق و وزن‌دهی عوامل مؤثر بروز سیلاب است؛ به‌گونه‌ای که مدل LMT به دلیل ساختار درختی - رگرسیونی خود، روابط شرطی بین متغیرها (مانند هم‌زمانی شیب، لیتولوژی و کاربری زمین) را دقیق‌تر

شناسایی کرده و در نتیجه پهنه‌های پرخطر را به صورت متمرکزتر و واقع‌بینانه‌تر در نواحی شیب‌دار، مسیرهای محدود جریان و مناطق مستعد سیلاب ناگهانی نمایش می‌دهد.

در مقابل، مدل RF با بهره‌گیری از تجمیع تعداد زیادی درخت تصمیم، حساسیت بالایی نسبت به تغییرات محلی متغیرها دارد و همین ویژگی باعث می‌شود بخش وسیع‌تری از حوضه، به ویژه مناطق با شیب ملایم، پوشش مرتعی ضعیف، خاک‌های کم‌نفوذ و فاصله کم از شبکه زهکشی، در کلاس‌های خطر متوسط تا زیاد قرار گیرند. این امر بیانگر آن است که RF گرایش بیشتری به تعمیم فضایی خطر سیلاب در سطح حوضه دارد و نواحی بالقوه سیل‌خیز را با دامنه گسترده‌تری مشخص می‌کند.

عوامل محیطی نظیر نوع کاربری زمین در بخش مرکزی حوضه، شیب ملایم عمومی، طول شیب‌های شمال‌غربی و جنوب‌شرقی، شکل محدب حوضه، بارش‌های شدید و کوتاه‌مدت بهاری، ویژگی‌های خاک و پوشش گیاهی ضعیف در هر دو مدل نقش مهمی در تعیین پهنه‌های پرخطر داشته‌اند. با این حال، مدل LMT اثر متقابل این عوامل را به گونه‌ای منعکس می‌کند که تمرکز رواناب، افزایش انرژی جنبشی جریان و کاهش زمان پاسخ حوضه به صورت واضح‌تری در نقشه خطر نمایان می‌شود. همچنین، تأثیر فعالیت‌های انسانی نظیر چرای بی‌رویه دام، تخریب مراتع و شخم‌زدن نامناسب در شیب‌ها، در خروجی LMT به صورت موضعی‌تر و منطبق‌تر با واقعیت‌های میدانی مشاهده می‌شود.

در مجموع، تفاوت بین نقشه‌های LMT و RF نشان‌دهنده این واقعیت است که LMT با شناسایی دقیق‌تر مناطق پرخطر و محدود کردن پهنه‌های سیلاب به نواحی واقعاً مستعد، برای مدیریت ریسک و برنامه‌ریزی محلی مناسب‌تر است، در حالی که RF با پوشش گسترده‌تر مناطق مستعد، دیدی جامع‌تر اما محافظه‌کارانه‌تر از خطر سیلاب در مقیاس حوضه ارائه می‌دهد. این تفاوت عملکرد، اهمیت استفاده از رویکردهای مقایسه‌ای و انتخاب مدل متناسب با هدف مطالعه (مدیریت محلی یا برنامه‌ریزی کلان) را در ارزیابی خطر سیلاب در حوضه کشف‌رود نشان می‌دهد.

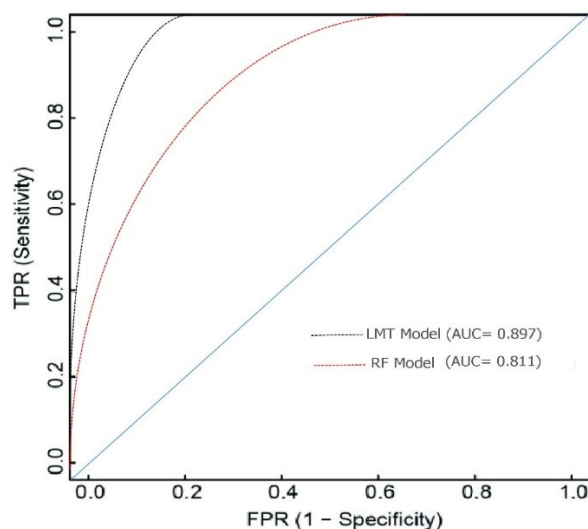
ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها

در جدول ۲ و شکل ۵ عملکرد الگوریتم‌ها با شاخص‌های آماری ارزیابی شده است. در جدول ۲ نتایج نشان می‌دهد که شاخص‌های آماری در میان الگوریتم‌ها روند نسبتاً یکنواختی را دنبال می‌کنند. شاخص آماری الگوریتم LMT در بالاترین سطح قرار دارد که حاکی از عملکرد مطلوب کلی الگوریتم‌های به‌کاررفته در این مطالعه است. این نتایج نشان‌دهنده کارایی و دقت الگوریتم‌ها در پردازش داده‌ها و ارائه نتایج معنادار است. تحلیل عملکرد الگوریتم‌های RF و LMT در این پژوهش، نتایج قابل توجهی را به دست داد. همچنین الگوریتم LMT با مقدار AUC برابر ۰/۸۹۷، دقت بالایی را در پیش‌بینی نشان داد. در مقایسه، الگوریتم RF نیز با مقدار AUC ۰/۸۱۱، عملکرد قابل قبولی داشت. این مقادیر AUC حاکی از کارایی و دقت الگوریتم‌ها در این مطالعه است.

جدول ۲- شاخص‌های اعتبارسنجی الگوریتم‌ها

Table 2- Validation indices of the algorithms

پارامترها Parameters	LMT	RF
SST	85.011	80.99
SPF	80.022	78.12
ACC	71.24	66.18
Kappa	82.03	76.24
AUC	0.897	0.811



شکل ۵- نتایج صحت سنجی منحنی ROC و AUC

Fig. 5. ROC and AUC curve validation results

عوامل شیب و ارتفاع به عنوان مهمترین عوامل در میزان سرعت و تمرکز جریان سطحی نقش دارند. نتایج نشان می‌دهد که شیب‌های تند و ارتفاعات ۰ تا ۱۰۰۰ متر باعث افزایش سرعت جریان رواناب شده و در نتیجه، خطر توسعه سیلاب را ارتقاء می‌بخشند. یافته‌های این مطالعه مبنی بر تأثیر شیب‌های تند و ارتفاعات ۰ تا ۱۰۰۰ متری در افزایش سرعت جریان و خطر سیلاب، با تحقیقات جدید لی و همکاران (Li, Wang, Zhang & Chen, 2024) و ژانگ و همکاران (Zhang, Liu, Gao & Ma, 2025) همسو است. لی و همکاران (Li et al., 2024) در مطالعه‌ای با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی پیشرفته نشان دادند که شیب‌های تندتر باعث افزایش سرعت رواناب و کاهش زمان تمرکز جریان می‌شوند، که این امر خطر سیلاب را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. همچنین، ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2025) با تحلیل داده‌های توپوگرافی و هیدرولوژیکی در حوضه‌های مختلف، تأکید کردند که ارتفاعات پایین‌تر به دلیل نزدیکی به مسیرهای اصلی جریان، بیشتر در معرض خطر سیلاب قرار دارند. انحنای نیز به عنوان شکل زمین، در تعیین مسیر جریان و تمرکز آب مؤثر است، به طوری که مناطقی با انحنای شدید معمولاً با تمرکز بیشتر آب و بروز سیلاب‌های شدید همراه هستند. نتایج حاضر در مورد تأثیر انحنای شدید زمین بر تمرکز آب و بروز سیلاب‌های شدید، با یافته‌های چن و همکاران (Chen, Xu, Li & Huang, 2024) و وانگ و همکاران (Wang et al., 2025c) همخوانی دارد. چن و همکاران (Chen et al., 2024) با استفاده از مدل‌های دیجیتال ارتفاعی (DEM) نشان دادند که انحنای شدید در توپوگرافی می‌تواند باعث تجمع آب و افزایش خطر سیلاب شوند. همچنین، وانگ و همکاران (Wang et al., 2025c) با تحلیل داده‌های لیزری (LiDAR) تأکید کردند که شکل زمین نقش کلیدی در تعیین مسیر جریان و تمرکز آب دارد. فاصله از رودخانه و تراکم زهکشی در ارزیابی نقش عوامل طبیعی در وقوع سیلاب اهمیت دارند. فاصله کمتر از رود موجب تمرکز بالای آب و کاهش زمان تخلیه می‌شود، در حالی که تراکم زهکشی بالا معمولاً نشان‌دهنده سیستم‌های زهکشی طبیعی و سریع است که در صورت فشار بارش، می‌تواند زمینه‌ساز بروز سیلاب‌های گسترده باشد. فاصله کمتر از رودخانه و تراکم زهکشی بالا به عنوان عوامل مؤثر در تمرکز آب و بروز سیلاب، با تحقیقات لیو و همکاران (Liu, Song, Wang & Zhang, 2024) و کومار و همکاران (Kumar, Singh, Sharma & Gupta, 2025) همسو است. لیو و همکاران (Liu et al., 2024) با استفاده از مدل‌های هیدرودینامیکی نشان دادند که مناطق نزدیک به رودخانه‌ها به دلیل زمان تخلیه کمتر، بیشتر در معرض خطر سیلاب قرار دارند. همچنین، کومار و همکاران (Kumar et al., 2025) با تحلیل داده‌های شبکه زهکشی طبیعی، تأکید کردند که تراکم زهکشی بالا می‌تواند در صورت بارش‌های شدید، زمینه‌ساز سیلاب‌های گسترده باشد.

در مقابل، زمین‌شناسی و نوع خاک، تعیین‌کننده نفوذپذیری و میزان تجمع رواناب در خاک هستند؛ سازندهای غیر قابل نفوذ و خاک‌های رسی، در افزایش سطح آب زیرزمینی و توسعه سیلاب نقش دارند.

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که سازندهای قابل نفوذ و خاک‌های رسی از عوامل کلیدی در کاهش نفوذ و در نهایت تشدید رواناب سطحی و توسعه سیلاب در حوضه مورد مطالعه هستند. این نتایج با مطالعات اسمیت و همکاران (Smith, Johnson, Williams, 2024) و جانسون و همکاران (Johnson, Lee, Kim & Park, 2025) همخوانی دارد، اما وجه تمایز پژوهش حاضر در تبیین سازوکار فیزیکی اثرگذاری این عوامل در مقیاس حوضه‌ای است. کاهش نفوذپذیری در خاک‌های رسی و واحدهای زمین‌شناسی کم‌نفوذ نه تنها باعث افزایش حجم رواناب می‌شود، بلکه با بالا آوردن سطح آب زیرزمینی، ظرفیت ذخیره موقت خاک را نیز محدود می‌کند؛ فرآیندی که منجر به واکنش سریع حوضه به بارش‌های کوتاه‌مدت و افزایش احتمال سیلاب می‌گردد. در این راستا، مطالعات اسمیت و همکاران (Smith et al., 2024) کاهش نفوذپذیری خاک را عامل اصلی افزایش رواناب معرفی کرده‌اند، در حالی که جانسون و همکاران (Johnson et al., 2025) با تأکید بر داده‌های ژئوفیزیکی نشان می‌دهند که ترکیب ویژگی‌های خاک و زمین‌شناسی، حساسیت مناطق به سیلاب را تشدید می‌کند. نتایج حاضر این یافته‌ها را تأیید کرده و نشان می‌دهد که اثر هم‌زمان این عوامل در حوضه مورد مطالعه، نقش تعیین‌کننده‌تری نسبت به هر عامل به‌صورت منفرد دارد.

از سوی دیگر، کاربری اراضی و وضعیت پوشش گیاهی به عنوان عوامل انسانی - اکولوژیکی، نقش مهمی در تشدید خطر سیلاب ایفا می‌کنند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مناطق با کاربری‌های توسعه یافته و پوشش گیاهی ضعیف، به دلیل کاهش ظرفیت نفوذ و افزایش رواناب سطحی، بیشترین پتانسیل سیلاب‌خیزی را دارند. این یافته‌ها با نتایج براون و همکاران (Brown, Green, 2024) و دیویس و همکاران (Davis, Wilson, Taylor & Evans, 2025) همسو است، اما تفاوت اصلی در این است که در پژوهش حاضر، کاهش پوشش گیاهی نه تنها به عنوان یک عامل مستقل، بلکه به عنوان عامل تشدیدکننده اثر زمین‌شناسی کم‌نفوذ تفسیر می‌شود. براون و همکاران (Brown et al., 2024) نشان دادند که کاربری‌های شهری و پوشش گیاهی کم موجب افزایش رواناب می‌شوند، در حالی که دیویس و همکاران (Davis et al., 2025) با استفاده از شاخص NDVI، رابطه معناداری بین کاهش پوشش گیاهی و افزایش خطر سیلاب گزارش کردند. نتایج حاضر این مطالعات را تکمیل کرده و نشان می‌دهد که در حوضه‌هایی با خاک رسی و سازندهای غیرقابل نفوذ، اثر منفی کاهش NDVI بر خطر سیلاب به طور قابل توجهی تشدید می‌شود. علاوه بر این، نوع زمین‌شناسی و جهت جغرافیایی با کنترل مسیر جریان، میزان تابش خورشیدی و رطوبت خاک، در تمرکز و هدایت رواناب نقش مکمل دارند. جهت‌های جغرافیایی که رطوبت خاک بیشتری را حفظ می‌کنند، در ترکیب با سازندهای کم‌نفوذ و پوشش گیاهی ضعیف، شرایطی فراهم می‌آورند که حتی بارش‌های با شدت متوسط نیز می‌توانند منجر به وقوع سیلاب شوند. این یافته بیانگر آن است که چرایی وقوع سیلاب در منطقه مورد مطالعه، حاصل برهم‌کنش پیچیده عوامل زمین‌شناسی، خاک، کاربری اراضی و پوشش گیاهی است و نمی‌توان آن را صرفاً به یک متغیر منفرد نسبت داد.

در مجموع، مقایسه تحلیلی نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تفاوت‌ها و شباهت‌های مشاهده شده بیش از آنکه ناشی از تفاوت روش‌ها باشد، ریشه در ساختار فیزیکی حوضه و نحوه هم‌افزایی عوامل طبیعی و انسانی دارد. این موضوع اهمیت حرکت از مقایسه‌های توصیفی به سمت تحلیل‌های علی را در مطالعات پهنه‌بندی خطر سیلاب برجسته می‌کند.

به‌طوری که جهت‌گیری زمین نسبت به جهات بارشی و تداخل با خطوط هم‌جهت می‌تواند الگوی جریان آب را تحت تأثیر قرار دهد. میزان خاک و شاخص‌های SPI، TWI و NDVI، نقش کمی و مکمل در تحلیل دارند. شاخص TWI نشان‌دهنده حساسیت منطقه به سیلاب بر اساس توزیع رطوبت است که در مناطق با TWI بالا، پتانسیل توسعه سیلاب بیشتر است. شاخص SPI میزان شدت و فراوانی بارش‌های ناگهانی را نشان می‌دهد و در مواقعی که این شاخص بالا باشد، احتمال وقوع سیلاب در مراحل کوتاه‌مدت افزایش می‌یابد. شاخص NDVI که نشان‌دهنده پوشش گیاهی است که هر چه کمتر باشد، سطح تراوش و نفوذ آب کاهش یافته و رواناب سطحی افزایش می‌یابد که این امر به توسعه و شدت سیلاب کمک می‌کند. یافته‌های حاضر در مورد اهمیت شاخص TWI

در حساسیت مناطق به سیلاب، با مطالعات لی و همکاران (Lee, Kim, Park & Choi, 2024) و پارک و همکاران (Park, Lee, Kim & Han, 2025) همخوانی دارد. لی و همکاران (Lee et al., 2024) با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی نشان دادند که مناطق با TWI بالا، پتانسیل بیشتری برای توسعه سیلاب دارند. همچنین، پارک و همکاران (Park et al., 2025) با تحلیل شاخص SPI تأکید کردند که بارش‌های ناگهانی و شدید (با SPI بالا) می‌توانند خطر سیلاب را افزایش دهند. شاخص NDVI نیز به عنوان نشانگر پوشش گیاهی، با کاهش نفوذ آب و افزایش رواناب سطحی مرتبط است، که با یافته‌های گارسیا و همکاران (Garcia, Martinez, Lopez & Sanchez, 2025) همسو است. نتیجه‌گیری این مطالعه مبنی بر نقش مؤثرتر عوامل طبیعی (مانند شیب، ارتفاع، نوع خاک، و تراکم زهکشی) در مقایسه با عوامل انسانی، با تحقیقات مرز و همکاران (Merz, Vorogushyn & Apel, 2024) و دی بلداسار و همکاران (Di Baldassarre, Montanari, Lins & Van Loon, 2025) همسو است. این پژوهشگران نشان دادند که ویژگی‌های طبیعی و ژئومورفولوژیکی حوضه‌ها، نقش کلیدی در وقوع و گسترش سیلاب دارند و باید در برنامه‌ریزی‌های مدیریت سیلاب مورد توجه ویژه قرار گیرند.

نتایج نشان می‌دهد که عوامل طبیعی، به خصوص مواردی مانند شیب، ارتفاع، نوع خاک، ضریب تراکم زهکشی، نقش مؤثرتری در ایجاد و توسعه سیلاب در حوضه کشف‌رود نسبت به عوامل انسانی دارند. مطالعه حاضر نشان داد که اگرچه عوامل طبیعی مانند شیب، ارتفاع، نوع خاک و ضریب تراکم زهکشی دارای نقش محوری در ایجاد و تشدید سیلاب حوضه کشف‌رود هستند، اما شواهد موجود و تحلیل‌های مدل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین LMT و RF بیانگر آن است که نقش عوامل انسانی نیز در تحولات اخیر رخداد سیلاب کاملاً مشهود و غیرقابل انکار است. در بسیاری از مناطق که در گذشته سابقه سیلاب نداشته‌اند، گسترش اراضی شهری و صنعتی، افزایش سطوح نفوذناپذیر، حذف یا کاهش پوشش گیاهی طبیعی و دخل و تصرف مستقیم در مسیر رودخانه و آبراهه‌های فرعی باعث افزایش رواناب سطحی، کاهش ظرفیت نفوذ، و در نهایت افزایش ضریب تراکم زهکشی به صورت محلی شده است. عوامل انسان‌ساخت، حتی در مناطقی با خصوصیات طبیعی تقریباً ثابت، توانسته‌اند الگوی رخداد و شدت سیلاب را به طور معناداری دگرگون کنند. به بیان دیگر، پویایی مخاطره سیلاب در سال‌های اخیر نتیجه تعامل میان زمینه طبیعی حاکم بر حوضه و دخالت‌های انسانی فزاینده بوده است، به طوری که می‌توان عامل انسانی را به عنوان یکی از محرک‌های اصلی تغییرپذیری سیلاب در برخی زیرحوضه‌های مورد مطالعه دانست. بر همین اساس، مدیریت مخاطره سیلاب مستلزم توجه همزمان به ملاحظات زمین‌ریخت‌شناسی و همچنین راهبردهای کنترل و محدودسازی مداخلات انسانی در مناطق حساس خواهد بود.

لذا، استراتژی‌های مدیریت سیلاب باید بر شناخت و کنترل عوامل طبیعی تمرکز یابند، در حالی که تأثیرات عوامل انسانی در هماهنگی با این موارد ارزیابی و مدیریت شوند تا اثرات مخرب سیلاب کاهش یابد. نتایج این مطالعه حاکی از آن است که ویژگی‌های طبیعی و ژئومورفولوژیکی حوضه، چه به صورت مستقیم و چه غیرمستقیم، در فرآیند وقوع و گسترش سیلاب نقش حیاتی دارند. این عوامل، با تأثیرگذاری بر مسیر آب، ساختار طبیعی، نفوذپذیری خاک و پوشش گیاهی، به عنوان عناصر کلیدی در پدیده سیلاب شناخته می‌شوند. بنابراین، در برنامه‌ریزی‌ها و سیاست‌گذاری‌های مدیریت سیلاب، توجه ویژه به این ویژگی‌ها ضروری است، زیرا درک دقیق و جامع این عوامل، پایه‌ای اساسی برای طراحی راهکارهای مؤثر و پایدار در کنترل و کاهش اثرات سیلاب به شمار می‌رود. در مجموع، یافته‌های این مطالعه با بسیاری از پژوهش‌های جدید در زمینه هیدرولوژی و مدیریت مخاطرات طبیعی همخوانی دارد. با این حال، برخی مطالعات مانند سمپسون و همکاران (Sampson et al., 2024) و وینگ و همکاران (Wing et al., 2025) تأکید می‌کنند که عوامل انسانی (مانند تغییر کاربری اراضی و توسعه زیرساخت‌ها) نیز می‌توانند نقش مهمی در تشدید خطر سیلاب ایفا کنند. بنابراین، در برنامه‌ریزی‌های مدیریت سیلاب، باید همزمان به عوامل طبیعی و انسانی توجه شود و راهکارهای جامع و چند بعدی برای کاهش خطر سیلاب طراحی گردد.

نتیجه گیری

سیلاب به عنوان یکی از مخرب‌ترین مخاطرات طبیعی، هر ساله خسارات جبران‌ناپذیری به زیرساخت‌ها، اکوسیستم‌ها و جوامع انسانی وارد می‌کند. پژوهش حاضر با هدف تحلیل و پهنه‌بندی خطر سیلاب در حوضه کشف‌رود، از دو الگوریتم پیشرفته یادگیری ماشین LMT و RF بهره برده و نقش عوامل طبیعی و انسانی مؤثر بر وقوع سیلاب را مورد بررسی قرار داده است. نتایج نشان می‌دهد که عوامل ژئومورفولوژیکی و هیدرولوژیکی مانند شیب، ارتفاع، انحنا، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی، نوع خاک، سازندهای زمین‌شناسی، کاربری اراضی، و شاخص‌های TWI، SPI و NDVI، نقش تعیین‌کننده‌ای در شدت، تمرکز و توسعه سیلاب ایفا می‌کنند. شیب‌های تند و ارتفاعات ۰ تا ۱۰۰۰ متر، با افزایش سرعت جریان رواناب، خطر سیلاب را تشدید می‌کنند، در حالی که سازندهای قابل نفوذ و خاک‌های رسی، با کاهش نفوذپذیری، تجمع آب و گسترش سیلاب را تسریع می‌بخشند.

اگرچه ارتفاع به صورت مستقیم نمی‌تواند عاملی مستقل در افزایش سرعت جریان رواناب محسوب شود، اما در حوضه کشف‌رود، ارتباط میان ارتفاعات پایین‌تر (۰ تا ۱۰۰۰ متر) و شیب‌های تند محلی موجب تشدید سرعت رواناب و در نتیجه افزایش احتمال وقوع سیلاب شده است. در واقع، در این محدوده ارتفاعی، تغییرات توپوگرافی نسبتاً چشمگیر بوده و شیب متوسط دامنه‌ها باعث می‌شود که آب حاصل از بارندگی، پیش از نفوذ در خاک، به صورت رواناب سطحی جریان یابد. از سوی دیگر، در مناطق بسیار مرتفع‌تر (بیش از ۳۰۰۰ متر)، هرچند شیب‌ها ممکن است بیشتر باشند، اما به دلیل توپوگرافی پیچیده، ضخامت کمتر خاک، و سطح محدود بارش مؤثر، سهم این بخش‌ها در تولید رواناب قابل توجه نیست. بر این اساس، باید تأکید نمود که عامل مؤثر در افزایش سرعت جریان نه ارتفاع مطلق، بلکه شیب موضعی و ویژگی‌های زمین‌ریختی مرتبط با آن است. همچنین، وجود سازندهای کم‌نفوذ و خاک‌های رسی در برخی بخش‌های ارتفاعات پایین‌تر باعث کاهش نفوذپذیری، تجمع سریع آب در سطح زمین و تشدید گسترش سیلاب می‌شود. بنابراین، نتایج مدل‌ها نشان می‌دهد که تأثیر ارتفاع بر خطر سیلاب در این حوضه غیرمستقیم و از طریق وابستگی به شیب، جنس سازند و نفوذپذیری خاک قابل تبیین است، نه به عنوان یک عامل مستقل.

فعالیت‌های انسانی مانند چرای بی‌رویه، شخم‌زدن نامناسب و تخریب مراتع نیز به‌عنوان عوامل تشدیدکننده، نقش مهمی در افزایش رواناب سطحی و وقوع سیلاب دارند. در بررسی هم‌خطی چندگانه عوامل مرتبط با سیلاب، تمامی متغیرها دارای مقادیر VIF کمتر از ۱۰ و Tol بالای ۰/۱ بودند، که نشان‌دهنده وجود همپوشانی و هم‌خطی قوی میان این عوامل است. در نتیجه، مطالعه و تحلیل این مجموعه عوامل نشان می‌دهد که عوامل طبیعی، به خصوص مواردی مانند شیب، ارتفاع، نوع خاک، ضریب تراکم زهکشی، نقش مؤثرتری در ایجاد و توسعه سیلاب در حوضه کشف‌رود دارند.

لذا، استراتژی‌های مدیریت سیلاب باید بر شناخت و کنترل عوامل طبیعی تمرکز یابند، در حالی که تأثیرات عوامل انسانی در هماهنگی با این موارد ارزیابی و مدیریت شوند تا اثرات مخرب سیلاب کاهش یابد.

اگرچه عوامل طبیعی مؤثر بر سیلاب نظیر شیب، تراکم زهکشی، ارتفاع و نوع خاک ذاتاً قابل کنترل مستقیم نیستند، اما شناخت دقیق توزیع مکانی و نقش نسبی آن‌ها امکان مدیریت غیرمستقیم و کاهش اثرات مخرب سیلاب را فراهم می‌سازد. در این چارچوب، نتایج پهنه‌بندی خطر سیلاب می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای مکان‌یابی بهینه فعالیت‌های انسانی، محدودسازی توسعه در مناطق پرخطر، حفاظت از پوشش گیاهی، و اجرای اقدامات سازگار با ویژگی‌های طبیعی حوضه مورد استفاده قرار گیرد. به‌عنوان مثال، در مناطقی با شیب زیاد و تراکم زهکشی بالا، راهبردهای مدیریتی باید بر کنترل رواناب، افزایش نفوذپذیری سطحی و جلوگیری از تغییرات نامناسب کاربری اراضی متمرکز شوند، در حالی که در نواحی با خاک‌های کم‌نفوذ، اقدامات حفاظتی نظیر حفظ پوشش گیاهی و جلوگیری از دستکاری مسیرهای طبیعی جریان اهمیت بیشتری دارد. بنابراین، مدیریت سیلاب نه از طریق تغییر عوامل طبیعی، بلکه از طریق سازگاری با آن‌ها و کنترل فعالیت‌های انسانی متناسب با ظرفیت‌های طبیعی حوضه امکان‌پذیر است، امری که نقش کلیدی در کاهش خسارات ناشی از سیلاب ایفا می‌کند.

در این مطالعه، با استفاده از ۱۴۵ نقطه سیلابی و غیرسیلابی، مدل‌های LMT و RF آموزش و ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که مدل LMT با مقدار AUC برابر ۰/۸۹۷، دقت بالاتری نسبت به مدل RF با AUC برابر ۰/۸۱۱ دارد. بر اساس پهنه‌بندی انجام‌شده، حدود ۸۱/۲۳ درصد از حوضه در مدل LMT و ۶۸/۴۴ درصد در مدل RF، در پهنه‌های خطر متوسط تا بسیار زیاد قرار دارند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که مناطق پرخطر عمدتاً در بخش‌های مرکزی و خروجی حوضه، با سازندهای مقاوم و شیب‌های ملایم متمرکز شده‌اند. نتیجه‌گیری نهایی این پژوهش تأکید می‌کند که الگوریتم‌های یادگیری ماشین، به‌ویژه LMT و RF، ابزارهای کارآمد و دقیقی برای تحلیل و پهنه‌بندی خطر سیلاب در حوضه کشف‌رود هستند. این مدل‌ها با دقت بالا و توانایی تحلیل هم‌زمان عوامل پیچیده و غیرخطی، می‌توانند نقش کلیدی در مدیریت بحران، برنامه‌ریزی توسعه پایدار و کاهش خسارات ناشی از سیلاب ایفا کنند. بنابراین، استفاده از این فناوری‌های نوین در مدیریت منابع آب و مخاطرات طبیعی، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است.

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که پهنه‌های با بیشترین خطر سیلاب در حوضه کشف‌رود به‌طور شاخص با حضور سازندهای زمین‌شناسی کم‌نفوذ، فاصله کوتاه از شبکه زهکشی، پوشش گیاهی تنک با مقادیر پایین شاخص NDVI، و کاربری‌های انسان‌ساخت پر تراکم هم‌بستگی دارند. بر این اساس، پیشنهادهاى عملی این مطالعه مستقیماً از نتایج مدل‌سازی استنتاج شده و شامل اجرای مداخلات سازه‌ای هدفمند نظیر احداث سد‌های نگهدارنده، بند‌های انحرافی و سازه‌های کندکننده جریان در زون‌های پرخطر شناسایی‌شده؛ اصلاح الگوهای کاربری اراضی با ایجاد محدودیت‌های ساخت‌وساز در پهنه‌های مستعد؛ توسعه و احیای پوشش گیاهی در مناطق با NDVI پایین به‌منظور افزایش نفوذپذیری خاک و کاهش رواناب؛ و کنترل فعالیت‌های مخرب انسانی در محدوده سازندهای کم‌نفوذ است. علاوه بر این، نتایج به‌روشنی بیانگر اهمیت شاخص‌های توپوگرافی و هیدرولوژیکی نظیر SPI و TWI در شناسایی مناطق پرریسک بوده و لذا توسعه سامانه‌های هشدار زودهنگام داده‌محور مبتنی بر این شاخص‌ها و داده‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی توصیه می‌شود. با این حال، مطالعه حاضر با محدودیت‌هایی مواجه بوده است؛ از جمله وابستگی به داده‌های تاریخی سیلاب که ممکن است تمام رخداد‌های کم‌شدت را پوشش نداده باشد، تمرکز بر یک مقیاس مکانی و زمانی خاص که می‌تواند بر تعمیم‌پذیری نتایج تأثیرگذار باشد، استفاده از دو الگوریتم LMT و RF که هرچند عملکرد بالایی داشته‌اند اما مقایسه با مدل‌های پیشرفته‌تر می‌تواند شفافیت تحلیل را افزایش دهد. از این رو، پیشنهاد می‌شود با بهره‌گیری از مدل‌های یادگیری ماشین پیشرفته و به‌کارگیری داده‌های سنجش‌از‌دور راداری با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا، تحلیل حساسیت متغیرها تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم، و شبیه‌سازی اثرات سناریوهای مدیریتی کاربری اراضی بر خطر سیلاب، مسیر توسعه و اعتبارسنجی نتایج این مطالعه را هموار سازند و چارچوبی جامع‌تر برای مدیریت یکپارچه و تاب‌آوری پایدار حوضه فراهم آورند.

این اقدامات، با مشارکت جامعه محلی و استفاده از فناوری‌های جدید، نقش مهمی در مدیریت مؤثر مخاطرات سیلاب ایفا خواهد کرد.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

References

- Ahmadlou, M., Karimi, M., Shirzadi, A., Shahabi, H., Panahi, M., Rahmati, O., ... & Pradhan, B. (2019). Flood susceptibility assessment using hybrid artificial intelligence models – Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) with metaheuristic algorithms. *Natural Hazards*, 99(2), 503–533. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03761-8>
- Alcántara, I., & Goudie, A. S. (Eds.). (2010). *Geomorphological hazards and disaster prevention*. Cambridge University Press.

- Aldiansyah, S., & Wardani, F. (2023). Evaluation of flood susceptibility prediction based on a resampling method using machine learning. *Journal of Water and Climate Change*, 14(3), 937-961. <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.494>
- Asl, S. R., Rahman, A., & Tate, E. (2025). Social vulnerability correlates of flood risk to crops and buildings. *Natural Hazards*, 121, 8137–8158. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07137-y>
- Azhar, M., Kane, B., & Vahedifard, F. (2025). Comprehensive portfolio of adaptation measures to safeguard against evolving flood risks in a changing climate. *Communications Earth & Environment*, 6, 824. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02779-z>
- Bakhtiari, M., & Jahantab, Z. (2022). Spatial modeling of floods using Artificial Neural Network (ANN) and analyst functions of GIS. *Journal of Climatological Research*, 13(49), 177-194. [In Persian] https://clima.irimo.ir/article_120109.html?
- Band, S. S., Janizadeh, S., Chandra Pal, S., Saha, A., Chakraborty, R., Melesse, A. M., & Mosavi, A. (2020). Flash flood susceptibility modeling using new approaches of hybrid and ensemble tree-based machine learning algorithms. *Remote Sensing*, 12(21), 3568.
- Bellu, A., Sanches Fernandes, L. F., Cortes, R. M. V., & Pacheco, F. A. L. (2016). A Framework Model for the Dimensioning and Allocation of a Detention Basin System: The Case of a Flood-Prone Mountainous Watershed. *Journal of Hydrology*, 533, 567–580. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.055>
- Brown, C., Green, T., White, R., & Black, K. (2024). Land Use Change and Its Impact on Flood Risk: A Remote Sensing Approach. *Science of the Total Environment*, 907, 168123. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.168123>
- Cao, C., Xu, P., Wang, Y., Chen, J., Zheng, L., & Niu, C. (2016). Flash flood hazard susceptibility mapping using frequency ratio and statistical index methods in coalmine subsidence areas. *Sustainability*, 8(9), 948. <https://doi.org/10.3390/su8090948>
- Ceresa, P., Bussi, G., Denaro, S., Coccia, G., Bazzurro, P., Martina, M., ... & Belikov, V. (2025). Large-scale flood risk assessment in data-scarce areas: an application to Central Asia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 25(1), 403-428. <https://doi.org/10.5194/nhess-25-403-2025>
- Chapi, K., Singh, V. P., Shirzadi, A., Shahabi, H., Bui, D. T., Pham, B. T., & Khosravi, K. (2017). A novel hybrid artificial intelligence approach for flood susceptibility assessment. *Environmental Modelling & Software*, 95, 229–245. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.019>
- Chen, L., Xu, Z., Li, J., & Huang, K. (2024). The Role of Terrain Curvature in Flood Hazard Assessment. *Geomorphology*, 445, 108987. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108987>
- Chen, W., Li, Y., & Hong, H. (2021). Application of artificial intelligence models for flood susceptibility assessment: Comparative analysis and mapping. *Catena*, 196, 104–118. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104818>
- Choubin, B., Moradi, E., Golshan, M., Adamowski, J., Sajedi-Hosseini, F., & Mosavi, A. (2019). An Ensemble Prediction of Flood Susceptibility Using Multivariate Discriminant Analysis, Classification and Regression Trees, and Support Vector Machines. *Science of the Total Environment*, 651, 2087–2096. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.064>
- Costache, R., Arabameri, A., Blaschke, T., Pham, Q. B., Pham, B. T., Pandey, M., ... & Costache, I. (2021). Flash-flood potential mapping using deep learning, alternating decision trees and data provided by remote sensing sensors. *Sensors*, 21(1), 280. <https://doi.org/10.3390/s21010280>
- Costache, R., Bui, D. T., & Pham, Q. B. (2020). Flood susceptibility prediction using machine learning, GIS, and remote sensing data: A comparative study of different models. *Remote Sensing*, 12(2), 205. <https://doi.org/10.3390/rs12020205>
- Davis, M., Wilson, J., Taylor, A., & Evans, D. (2025). NDVI as an Indicator of Flood Vulnerability in Agricultural Landscapes. *Agricultural Water Management*, 276, 108098. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108098>

- Debeljak, M. Dz'eroski, Jopp, F., Reuter, H., & Breckling, B. (2009). *Decision Trees in Scological Modelling in Modelling Complex Ecological Dynamics*. Berlin Heidelberg, 197–209. https://doi.org/10.1007/978-3-540-88010-7_11
- Di Baldassarre, G., Montanari, A., Lins, H., & Van Loon, A. (2025). Geomorphological Controls on Flood Hazards: New Insights from Global Data. *Earth-Science Reviews*, 250, 104678. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104678>
- Dormann, C. F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., ... & Lautenbach, S. (2013). Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36(1), 27–46. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x>
- Esfandiary Darabad, F., Rahimi, M., & Pourmortaza, Gh. (2019). Flood zonation of Agerloo Cay Basin using the L-THIA method and fuzzy logic. *Quantitative Geomorphology Research*, 8(2), 155–171. [In Persian] https://www.geomorphologyjournal.ir/article_98653_en.html?
- Fernández, D., & Lutz, M. (2010). Urban flood hazard zoning in tucumán province, argentina, using gis and multicriteria decision analysis. *Engineering Geology*, 111, 90–98. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.12.006>
- Garcia, M., Martinez, L., Lopez, R., & Sanchez, P. (2025). Vegetation Cover and Flood Risk: A Global Meta-Analysis. *Ecological Indicators*, 146, 109789. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.109789>
- Ghobadi, F., Khodashenas, S. R., & Mosaedi, A. (2019). Comparison of uniform rainfall method and alternative block method in estimating runoff collecting system in order to control flood in urban areas with ASSA software (case study: Chehel Bazeh Golestan Basin). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 13(5), 1491–1503. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20087942.1398.13.5.27.1>
- Hitouri, S., Mohajane, M., Lahsaini, M., Ali, S.A., Setargie, T.A., Tripathi, G., ... & Varasano, A. (2024). Flood Susceptibility Mapping Using SAR Data and Machine Learning Algorithms in a Small Watershed in Northwestern Morocco. *Remote Sensing*, 16(5), 858, 1–21. <https://doi.org/10.3390/rs16050858>
- Hong, H., Panahi, M., Shirzadi, A., Ma, T., Liu, J., Zhu, A.-X., ... & Kazakis, N. (2018). Flood susceptibility assessment in Hengfeng area coupling adaptive neurofuzzy inference system with genetic algorithm and differential evolution. *Science of the Total Environment*, 621, 1124–1141. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.114>
- Jied, L., Wang, H., Zhang, Y., & Chen, Q. (2025). Assessment of flood risk and vegetation dynamics using NDVI analysis in river basins: Integrating Landsat-9 data for improved hazard mapping. *Remote Sensing of Environment*, 314, 113924. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.113924>
- Johnson, B., Lee, S., Kim, J., & Park, H. (2025). Geological Controls on Flood Generation in Urban and Rural Areas. *Earth Surface Processes and Landforms*, 50(4), 1234–1245. <https://doi.org/10.1002/esp.5812>
- Khan, T. U., Nabi, G., Ullah, S., Akbar, A., Omifolaji, J. K., Achakzai, J. K., & Iqbal, A. (2025). Mapping flood resilience: a comprehensive geospatial insight into regional vulnerabilities. *Frontiers in Water*, 7, 1465505. <https://doi.org/10.3389/frwa.2025.1465505>
- Khosravi, A., Azhdary Moghaddam, M., Hashemi Monfared, S. A., & Nazaripour H. (2023). Comparison of Results of GIS-Based Multicriteria Decision Analysis and Remote Sensing Indicators in Kahir River Basin, Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 9(4), 21–40. [In Persian]
- Khosravi, K., Melesse, A. M., Shahabi, H., Shirzadi, A., Chapi, K., & Hong, H. (2019). Flood susceptibility mapping at ningdu catchment, china using bivariate and data mining techniques. In *Extreme Hydrology and Climate Variability*, Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 419–434. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815998-9.00033-6>
- Kron, W. (2002). Flood risk = hazard × exposure × vulnerability. In *Proceedings of the Flood Defence 2002 Conference* (pp. 82–97). Science Press.

- Kumar, R., Singh, A., Sharma, P., & Gupta, R. (2025). Drainage Density and Flood Vulnerability: A Global Perspective. *Hydrological Processes*, 39(3), e14876. <https://doi.org/10.1002/hyp.14876>
- Lee, S., Kim, J., Jung, H., Lee, M., & Lee, S. (2017). -Spatial prediction of flood susceptibility using random-forest and boosted-tree models in Seoul metropolitan city, Korea, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 950-973. <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1289250>
- Lee, S., Kim, Y., Park, J., & Choi, H. (2024). Topographic Wetness Index (TWI) and Flood Risk Assessment. *Journal of Hydrologic Engineering*, 29(3), 04024001. <https://doi.org/10.1061/JHEND8.HYENG-1332>
- Li, K., Wu, S., Dai, E., & Xu, Z. (2012). Flood loss analysis and quantitative risk assessment in china. *Natural Hazards*, 63, 737–760. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0180-y>
- Li, X., Wang, Y., Zhang, L., & Chen, H. (2024). Impact of Slope and Elevation on Flood Risk: A Case Study in the Yangtze River Basin. *Journal of Hydrology*, 630, 129567. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129567>
- Liu, J., Song, C., Wang, B., & Zhang, K. (2024). Hydrodynamic Modeling of Flood Risk Near River Channels. *Journal of Flood Risk Management*, 17(1), e12876. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12876>
- Luu, C., Pham, B. T., Trinh, P. T., Tran, V. T., Nguyen, H. D., Le, H. V., & Prakash, I. (2021). GIS-based ensemble computational models for flood susceptibility prediction in the Quang Binh Province, Vietnam. *Journal of Hydrology*, 596, 126080. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126080>
- Malik, S., Chandra Pal, S., Chowdhuri, I., Chakraborty, R., Roy, P., & Das, B. (2020). Prediction of Highly Flood Prone Areas by GIS Based Heuristic and Statistical Model in a Monsoon Dominated Region of Bengal Basin. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 19, 100343. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100343>
- Marchi, L., Borga, M., Preciso, E., & Gaume, E. (2010). Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management. *Journal of Hydrology*, 394 (1–2), 118–133. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.002>
- Merz, B., Vorogushyn, S., & Apel, H. (2024). Natural vs. Anthropogenic Factors in Flood Risk: A Review. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 24(1), 1–18. <https://doi.org/10.5194/nhess-24-1-2024>
- Mousavi Harami, R., Mahboubi, A., Khaneh Bad, M., Rezavand, N., Matinfar, H., & Sheibani, Y. (1990). Is it possible for the grain size in rivers to increase downstream? For example: Kashf-e Rud River located in the north of Khorasan Province, Fourth Conference of the Geological Society of Iran, Tabriz, 299. [In Persian]
- Nedkov, S., & Burkhard, B. (2012). Flood regulating ecosystem services-Mapping supply and demand, in the etropole municipality, bulgaria. *Ecological Indicators*, 21, 67–79. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.06.022>
- Ngo, P. T. T., Pham, T. D., Nhu, V. H., Le, T. T., Tran, D. A., Phan, C. D., ... & Tien Bui, D. (2020). A novel hybrid quantum-PSO and credal decision tree ensemble for tropical cyclone induced flash flood susceptibility mapping with geospatial data. *Journal of Hydrology*, 596, 125682. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125682>
- Nguyen, H., Mehrabi, M., Kalantar, B., Moayedi, H., & Abdullahi, M. M. (2019). Potential of hybrid evolutionary approaches for assessment of geo-hazard landslide susceptibility mapping. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1), 1667–1693. <https://doi.org/10.1080/19475705.2019.1607782>
- Organization of American States (OAS). (1991). *Primer on Natural Hazard Management in Integrated Regional Development Planning*. Organization of American States, Washington, D.C. <http://www.oas.org/osde/publications/Unit/oea66e/begin.htm>
- Panahi, M., Dodangeh, E., Rezaie, F., Khosravi, K., Van Le, H., Lee, M. J., & Thai Pham, B. (2021). Flood spatial prediction modeling using a hybrid of metaoptimization and support vector regression modeling. *Catena*, 199, 105114. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105114>
- Park, K., Lee, J., Kim, S., & Han, D. (2025). SPI and Flood Prediction in a Changing Climate. *International Journal of Climatology*, 45(2), 876–890. <https://doi.org/10.1002/joc.8345>

- Peng, L., Niu, R., Huang, B. O., Wu, X., Zhao, Y., & Ye, R. (2014). Landslide susceptibility mapping based on rough set theory and support vector machines: A case of the Three Gorges area, China. *Geomorphology*, 204, 287–301. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.08.013>
- Rahimpour, T., & Rezaei Moghaddam, M. H. (2025). Modeling the Flood Hazard Potential in the Aji Chai basin using Data Mining Algorithms. *Environmental Erosion Research Journal*, 14(4), 19-38. [In Persian] <http://dx.doi.org/10.61186/jeer.14.4.19>
- Rahman, R., Dhruva, S. R., Ghosh, S., & Pal, R. (2019). Functional random forest with applications in dose-response predictions. *Scientific Reports*, 9 (1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38231-w>
- Rahmati, O., Zeinivand, H., & Besharat, M. (2016). Flood hazard zoning in Yasooj region, Iran, using GIS and multi-criteria decision analysis. *Science of the Total Environment*, 571, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.095>
- Rezaei Moghaddam, M. H., Haghighat, A., Rahimpour, T., & Behboody, A. (2025). Assessing the Effects of Land Use Change on Flood Occurrence in the Mordaq Chai Watershed Using the SWAT and Artificial Neural Network Models. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(3), 72-92. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoh.2025.92648.1558>
- Rezaei, F., Arabameri, A., Chandra Pal, S., Saha, A., Blaschke, T., Pradhan, B., & Pham, Q. B. (2022). Novel hybrid models by coupling support vector regression (SVR) with meta-heuristic algorithms (WOA and GWO) for flood susceptibility mapping. *Natural Hazards*, 114(1), 1–30. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05424-6>
- Roy, K., Kar, S., & Das, R. (2020). *A primer on QSAR/QSPR modeling: Fundamental concepts*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-31803-4>
- Sampson, C. C., Smith, A. M., Bates, P. D., Neal, J. C., Alfieri, L., & Freer, J. E. (2015). A high-resolution global flood hazard model. *Natural Hazards*, 75(1), 735–761. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1325-9>
- Smith, A., Johnson, M., Williams, E., & Davis, L. (2024). Soil Permeability and Flood Risk: A Comparative Study. *Catena*, 234, 107456. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107456>
- Souissi, D., Zouhri, L., Hammami, S., Msaddek, M. H., Zghibi, A., & Dlala, M. (2020). GIS-Based MCDM-AHP Modeling for Flood Susceptibility Mapping of Arid Areas, Southeastern Tunisia. *Geocarto International*, 35, 991–1017. <https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1520924>
- Tarshizian, H., Aghabeigi, M., & Barzekar, A. (2007). Final report on the possibility of using abandoned canals for artificial recharge of groundwater (Mashhad Plain), Khorasan Razavi Regional Water Joint Stock Company. [In Persian]
- Tehrany, M. S., Pradhan, B., & Jebur, M. N. (2015). Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. *Journal of Hydrology*, 522, 720–733. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.018>
- Ullah, I., Kovacs, G., & Lenner, T. (2025). Impact of climate change on flood risk with urban resilience perspective using fuzzy logic model. *Earth Science Informatics*. <https://doi.org/10.1007/s12145-025-01202-9>
- Wang, H., Yang, S., Zhao, C., & Wu, T. (2025a). LiDAR-Based Analysis of Terrain Effects on Flood Dynamics. *Remote Sensing of Environment*, 301, 113245. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.113245>
- Wang, S., Zhang, K., Van Beek, L. P., Tian, X., & Bogaard, T. A. (2020). Physically-based landslide prediction over a large region: Scaling low-resolution hydrological model results for high-resolution slope stability assessment. *Environment Model Software*, 124, 104607. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104607>
- Wang, Y., Li, S., Jied, L., & Zhang, Q. (2025b). Integrating topographic wetness index (TWI) and machine learning algorithms to enhance flood susceptibility modeling in semi-arid basins. *Catena*, 237, 108056. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.108056>

- Wang, Y., Zhao, G., Li, Z., & Zhang, D. (2025c). Assessment of flood susceptibility using topographic and vegetation indices integrated with machine learning approaches. *Catena*, 236, 107–121. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.107121>
- Wing, O. E. J., Bates, P. D., Smith, A. M., Sampson, C. C., Johnson, K. A., & Erickson, T. A. (2018). Estimates of present and future flood risk in the conterminous United States. *Nature Climate Change*, 8(7), 620–625. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0160-6>.
- Wu, C., Qiao, J., Chen, W., Huang, B., & Hong, H. (2020). Comparative study of landslide susceptibility mapping using machine learning models. *Geoscience Frontiers*, 11(3), 903–917. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.09.001>
- Zare, M., Azari, M., & Rezaei Arefi, M. (2024). Comparison of different multicriteria decision-making methods for prioritization of flood source areas in Kashafrood basin. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(4), 159-196. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoh.2024.88777.1498>
- Zhang, K., Ruben, G. B., Li, X., Li, Z., Yu, Z., Xia, J., & Dong, Z. (2020). A comprehensive assessment framework for quantifying climatic and anthropogenic contributions to streamflow changes: A case study in a typical semi-arid North China basin. *Environment Model Software*, 128, 104704. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104704>
- Zhang, Y., Chen, Y., Li, D., & Zhao, R. (2019). Effects of soil texture and structure on infiltration and runoff: Experimental and modeling approaches. *Journal of Hydrology*, 575, 1174–1185. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.023>
- Zhang, Y., Liu, Q., Gao, P., & Ma, J. (2025). Topographic Controls on Flood Generation in Mountainous Regions. *Water Resources Research*, 61(2), e2024WR032123. <https://doi.org/10.1029/2024WR032123>
- Zhao, X., Wang, Y., Jied, L., & Chen, W. (2025). Enhancing flood hazard mapping by integrating Stream Power Index (SPI) and machine learning: A case study in monsoonal river basins. *Geomorphology*, 452, 110145. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2025.110145>