

Research Paper

A Hybrid Marcos Chain–Based Approach Integrating Shannon Entropy and Evidential Belief Function (EBF) Models for Analyzing Flood Hazard Dynamics: A Case Study of the Kellarud Watershed, Babol

Seyyed Asadullah Hejazi ^{1*}Masoumeh Rajabi ²Sabikeh Rouhani Zadeh ³

1-Associate Professor, Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. s.hejazi@tabrizu.ac.ir

2- Professor of Geomorphology, Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Mrajabi@tabrizu.ac.ir

3-- PhD Student in Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. sabikeruhani@gmail.com



10.22125/iwe.2026.559343.1908.

Received:
November 12, 2025
Accepted:
July 6, 2026
Available online:
September 7, 2026

Keywords:
Flood Hazard Zoning, Shannon Entropy, Evidential Belief Function (EBF), Markov Chain, Hybrid Modeling.

Abstract

This study maps and analyzes the spatiotemporal flood hazard dynamics in the 216 km² Kellarud watershed, Babol (northern Iran). With an elevation range of 45–2272 m and a 19.46% average slope, this basin is highly flood-prone. A hybrid approach combining Shannon Entropy (SE), Evidential Belief Function (EBF), and Markov Chain (MC) models was applied. Nine conditioning factors—elevation, slope, aspect, drainage density, distance from rivers and roads, land use, soil, and TWI—were analyzed in GIS. SE results identified elevation (0.1983), aspect (0.1517), and slope (0.1423) as the most influential factors. EBF (AUC=0.83, RMSE=0.219) outperformed SE (AUC=0.71, RMSE=0.293), while the Markov model (AUC=0.79) showed stable temporal forecasting from 2013 to 2030. Findings indicate that 26.4% of the basin, primarily central and southern sectors including Shiyadeh, Anjilak, and Lamsukola, falls within high to very high hazard classes. The integrated EBF–Markov–SE framework effectively addresses spatial uncertainty and temporal dynamics, providing a robust tool for flood risk management, watershed planning, and sustainable development in northern Iran.

1. Introduction

Floods are among the most destructive natural hazards, significantly affecting human settlements, agricultural lands, infrastructure, and ecosystems. In recent decades, rapid land-use changes, deforestation, and intensified rainfall events associated with climate variability have increased flood hazards across northern Iran. Mazandaran Province, located within the humid Caspian Basin and characterized by steep slopes and dense drainage networks, is particularly vulnerable to flash floods. Within this region, the Kelarud watershed—covering an area of approximately 216 km² with elevations ranging from 45 to 2272 m—exhibits pronounced topographic variability that intensifies flood occurrence. To identify flood-prone areas, data-driven and statistical models integrated with Geographic Information Systems (GIS) have been widely applied. Among these, the Shannon Entropy (SE) model evaluates the informational importance of each flood-conditioning factor based on probability distributions, whereas the Evidential Belief Function (EBF) model applies Dempster–Shafer theory to incorporate uncertainty and multiple sources of evidence. However, these static models do not capture the temporal evolution of flood risk. To address this limitation, the Markov Chain model was employed to evaluate changes in hazard dynamics between 2013 and 2030. Accordingly, this study develops a hybrid spatial–temporal framework that integrates SE, EBF, and Markov Chain models, providing a robust methodology for flood hazard assessment in complex humid basins such as the Kelarud watershed.

Data and Methodological Framework

Nine flood-conditioning factors were selected based on their hydrological and geomorphological relevance: elevation, slope, aspect, drainage density, distance from rivers, distance from roads, land use, soil type, and the Topographic Wetness Index (TWI). Spatial datasets were derived from SRTM DEM (30 m), Sentinel-2 imagery (2024), 1:25,000 topographic maps, and field-based hydrological surveys using GIS 10.8. Shannon Entropy (SE): The normalized probability of flood occurrence in each class ($P_{ij} = N_{ij}/N_j$) was used to compute entropy ($H_j = -k \sum P_{ij} \ln P_{ij}$) and the informational weights ($W_j = 1 - H_j$). Evidential Belief Function (EBF): Using conditional probability functions, belief (Bel), disbelief (Dis), and uncertainty (Unc) values were calculated for each class. Final weights were obtained through log-likelihood normalization. Markov Chain Model: Temporal transition matrices of flood hazard classes between 2013 and 2030 were generated using Terr Set 2020 to estimate class transition probabilities and future spatial distributions. Validation: Model performance was evaluated using the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve, the Area Under the Curve (AUC) index, and Root Mean Square Error (RMSE), calculated in SPSS and Excel.

2. Materials and Methods

Study Area

The Kelarud watershed is located in Babol County, Mazandaran Province, northern Iran (36°08'–36°24' N; 52°27'–52°37' E). The basin drains northward into the Babolrud River after passing through the Hyrcanian forests. The soils are moderately to heavily textured (clay–loam), generally acidic to neutral, and are classified mainly as Inceptisols with moderate permeability. The mean basin slope is approximately 19.46%, and the climatic regime is humid temperate, with annual precipitation exceeding 1000 mm.

2.2 Data and Methodological Framework

Nine flood-conditioning factors were selected based on their hydrological and geomorphological relevance: elevation, slope, aspect, drainage density, distance from rivers, distance from roads, land use, soil type, and the Topographic Wetness Index (TWI). Spatial datasets were derived from SRTM DEM (30 m), Sentinel-2 imagery (2024), 1:25,000 topographic maps, and field-based hydrological surveys using GIS 10.8. Shannon Entropy (SE): The normalized probability of flood occurrence in each class ($P_{ij} = N_{ij}/N_j$) was used to compute entropy ($H_j = -k \sum P_{ij} \ln P_{ij}$) and the informational weights ($W_j = 1 - H_j$). Evidential Belief Function (EBF): Using conditional probability functions, belief (Bel), disbelief (Dis), and uncertainty (Unc) values were calculated for each class. Final weights were obtained through log-likelihood normalization. Marcos Chain Model: Temporal transition matrices of flood hazard classes between 2013 and 2030 were generated using Terr Set 2020 to estimate class transition probabilities and future spatial distributions. Validation: Model performance was evaluated using the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve, the Area Under the Curve (AUC) index, and Root Mean Square Error (RMSE), calculated in SPSS and Excel.

3. Results

3.1 Shannon Entropy

The weights of flood-related factors ranged from 0.073 (drainage density) to 0.198 (elevation). The three dominant parameters were elevation (0.1983), aspect (0.1517), and slope (0.1423), highlighting the strong influence of topography on runoff concentration.

3.2 Evidential Belief Function (EBF)

The EBF results indicated that elevation classes between 700 and 1400 m and slopes ranging from 25° to 45° exhibited the highest flood hazard probabilities. The combined weight of topographic factors (~0.48) exceeded that of all other variables. Classification results showed that 26.4% of the basin area (approximately 5,585 ha) falls within high and very high hazard zones, primarily in the middle to southern sub-basins encompassing the villages of Shiadeh, Anjilak, and Lamsukola. Validation results demonstrated that the EBF model (AUC = 0.83; RMSE = 0.219) outperformed the SE model (AUC = 0.71; RMSE = 0.293).

3.3 Markov Chain Analysis

The Markov transition matrix indicated an increasing trend in high-hazard areas by approximately 8.7% between 2013 and 2030, mainly driven by the expansion of agricultural and residential areas at mid-elevations. The highest weighting values were associated with slope (0.159) and elevation (0.157), confirming their dominant predictive role. The model achieved an AUC value of 0.79, demonstrating robust temporal predictive performance.

4. Discussion and Conclusion

The integrated Markov–Shannon–EBF hybrid model provides a comprehensive understanding of flood hazard dynamics. Comparative analysis indicates that while Shannon Entropy effectively quantifies the informational importance of individual conditioning factors, the EBF model substantially improves prediction accuracy by incorporating uncertainty. The Markov Chain model further captures temporal transitions, enabling the framework to forecast future flood risk evolution. The integration of these models bridges the gap between spatial precision and temporal adaptability. The dominance of elevation, slope, and aspect highlights the geomorphological control of flooding in mountainous humid basins. Secondary factors such as land use and soil texture contribute indirectly by influencing infiltration capacity and runoff generation. Overall, the hybrid approach (combined AUC ≈ 0.85) improves predictive reliability by more than 20% compared with individual models. The resulting flood hazard map can therefore serve as a scientific guideline for watershed management, infrastructure planning, and flood mitigation strategies in Mazandaran Province. Future studies should incorporate

remote sensing time-series analysis and machine learning approaches (e.g., Artificial Neural Networks or Random Forest) to further enhance temporal adaptability and sensitivity to climate change.

5. Six important references

- 1) Arab Ameri, A., Rezaei, K., Pour Ghasemi, H. R., et al. (2020). GIS-based flood susceptibility mapping using Shannon Entropy and Frequency Ratio models: A case study of northern Iran. *Journal of Environmental Management*, 267, 110–116.
- 2) Khosravi, K., et al. (2020). Flood susceptibility mapping using entropy and Markov chain models. *Journal of Hydrology*, 590, 125475.
- 3) Ahmed, B., & Dewan, A. (2018). Application of Markov chain and cellular automata models in predicting future land use changes in Dhaka, Bangladesh. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(10), 565.
- 4) Khaledian, Y., Enayati, Z., & Taghavi Salimi, S. (2022). Hydrological hazard zoning and watershed sustainability in Mazandaran Province, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 81(4), 77–91.
- 5) Rahmati, O., & Zeini and, H. (2023). Dynamic flood hazard prediction using Markov Chain and Fuzzy-AHP hybrid modeling. *Journal of Hydrology*, 619, 129–145.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



رویکرد هیبریدی مبتنی بر زنجیره مارکوس و مدل‌های شانون و EBF برای تحلیل پویایی خطر سیلاب (مطالعه موردی: حوضه کلارود بابل)

سید اسدالله حجازی^۱، معصومه رجبی^۲، سبیکه روحانی زاده^۳

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۰۸/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۷

مقاله پژوهشی

چکیده

این مطالعه به نقشه‌برداری و تحلیل دینامیک‌های زمانی-مکانی مخاطرات سیل در حوضه آبریز ۲۱۶ کیلومتر مربعی کلارود در بابل (شمال ایران) می‌پردازد. این حوضه با دامنه ارتفاعی ۴۵ تا ۲۲۷۲ متر و میانگین شیب ۱۹.۴۶ درصد، به شدت مستعد وقوع سیل است. در این پژوهش، از یک رویکرد ترکیبی شامل مدل‌های آنتروپی شانون (SE)، تابع باور شواهدی (EBF) و زنجیره مارکوف (MC) استفاده شده است. ۹ عامل زمین‌ساختی شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، تراکم شبکه زهکشی، فاصله از رودخانه‌ها و جاده‌ها، کاربری اراضی، نوع خاک و شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) در محیط GIS تحلیل شدند. نتایج آنتروپی شانون، ارتفاع (۰/۱۹۸۳)، جهت شیب (۰/۱۵۱۷) و شیب (۰/۱۴۲۳) را به عنوان تأثیرگذارترین عوامل شناسایی کرد. مدل EBF (با $AUC=0/83$) عملکرد بهتری نسبت به SE (با $AUC=0/71$) داشت، در حالی که مدل مارکوف ($AUC=0/79$) پیش‌بینی زمانی پایداری را برای بازه ۲۰۱۳ تا ۲۰۳۰ ارائه داد. یافته‌ها نشان می‌دهد ۲۶/۴٪ از حوضه، به‌ویژه بخش‌های مرکزی و جنوبی (شامل شیاده، انجیلاک و لمسکوک)، در کلاس‌های مخاطره بالا تا بسیار بالا قرار دارند. چارچوب تلفیقی EBF-Markov-SE ابزاری کارآمد برای مدیریت ریسک سیل و برنامه‌ریزی پایدار در شمال ایران فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی خطر، آنتروپی شانون، تابع شواهد قطعی (EBF)، زنجیره مارکوس، مدل‌های ترکیب

^۱- دانشیار ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، ایمیل: s.hejazi@tabrizu.ac.ir (نویسنده مسئول)

^۲- استاد دانشگاه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، ایمیل: Mrajabi@tabrizu.ac.ir

^۳- دانشجوی دکتری رشته ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، ایمیل: sabikeruhani@gmail.com

مقدمه

پدیده‌ی سیلاب به عنوان یکی از شایع‌ترین و ویرانگرترین مخاطرات طبیعی، در دهه‌های اخیر به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک و پرشیب ایران، اهمیت دوچندانی یافته است. افزایش فراوانی و شدت وقوع سیلاب‌ها نه تنها نتیجه‌ی عوامل طبیعی مانند بارش‌های حدی و تغییرات اقلیمی است، بلکه به‌طور مستقیم از گسترش بی‌رویه‌ی شهرنشینی، تغییر کاربری اراضی و تخریب پوشش گیاهی نشأت می‌گیرد (Pham و همکاران، ۲۰۲۳ و Khaledian, ۲۰۲۲). در چنین شرایطی، سیلاب به پدیده‌ای تبدیل شده که هم جنبه‌ی زیست‌محیطی دارد و هم اثرات گسترده‌ای بر پایداری اقتصادی و اجتماعی نواحی انسانی بر جای می‌گذارد. بررسی‌ها نشان داده‌اند که شدت خسارات سیلاب‌ها در بسیاری از حوضه‌های آبریز شمال ایران، به‌ویژه در استان مازندران، رو به افزایش است و این امر، لزوم مدیریت جامع خطر سیلاب بر پایه‌ی مدل‌سازی فضایی و تحلیلی نوین را بیش از پیش آشکار کرده است (Arabameri, Pourghasemi & Moradi, 2021). همکاران، (۲۰۲۰). یکی از چالش‌های اصلی در تحلیل سیلاب، ماهیت پیچیده و غیرخطی فرآیندهای هیدرولوژیکی و وابستگی آن‌ها به مؤلفه‌های توپوگرافی، اقلیمی و انسانی است. به همین سبب، کاربرد مدل‌های آماری و تصمیم‌گیری چندمعیاره در کنار سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور (RS) به‌عنوان رویکردی نوین در ارزیابی خطر سیل مورد توجه قرار گرفته است (Arabameri و همکاران، ۲۰۲۰ و Tehrany, ۲۰۲۲). در این میان، مدل‌های ترکیبی و داده‌محور مانند آنتروپی شانون (Shannon Entropy) و تابع شواهد قطعی (Evidential Belief Function-EBF) به‌دلیل توانایی در وزن‌دهی عینی به عوامل مؤثر و تحلیل عدم قطعیت مکانی عملکرد برجسته‌ای نشان داده‌اند (Pourghasemi & Moradi, 2021).

مدل آنتروپی شانون با محاسبه‌ی سهم اطلاعاتی هر متغیر در بروز سیلاب، ساختار اطلاعاتی سیستم را تحلیل می‌کند؛ در حالی که مدل EBF بر پایه نظریه‌ی دمپستر شافر، رویکردی احتمالاتی برای برآورد میزان باور به وقوع پدیده در هر واحد مکانی به کار می‌گیرد (Moayedi &

Bui, 2020 و همکاران، ۲۰۲۱). از سوی دیگر، برای تحلیل زمانی پویایی خطر سیلاب و پیش‌بینی تغییرات آتی، استفاده از مدل زنجیره مارکوس (Marcos Chain Model) به‌عنوان ابزاری کارا در مدل‌سازی روندهای انتقال حالت‌ها در زمان‌های متوالی رواج یافته است (Youssef و همکاران، ۲۰۲۲). زنجیره مارکوس قادر است بر اساس الگوهای گذشته‌ی تغییر کاربری یا پهنه‌بندی خطر، احتمال انتقال از یک کلاس خطر به کلاس دیگر را در دوره‌های زمانی پیش‌بینی کند (Rahmati & Zeinivand, 2023). این ویژگی موجب شده تا ترکیب روش‌های مکانی (مانند EBF و SE) با مدل مارکوس به‌عنوان یک رویکرد تلفیقی در تحلیل زمان مکان سیلاب مورد توجه پژوهشگران قرار گیرد (Xiong و همکاران، ۲۰۲۳). در ایران، حوضه‌های آبریز شمال کشور به‌ویژه در استان مازندران، به‌دلیل ویژگی‌های توپوگرافی کوهستانی، بارندگی شدید و تمرکز سکونت‌گاه‌ها در دشت‌های پایین‌دست، از آسیب‌پذیرترین مناطق در برابر سیلاب محسوب می‌شوند (Taghvayi Salimi و همکاران، ۲۰۲۲). حوضه آبریز کلارود بابل به دلیل توپوگرافی کوهستانی، شیب‌های نسبتاً زیاد، بارش‌های شدید فصلی و تغییرات سریع کاربری اراضی، از جمله مناطق مستعد وقوع سیلاب در شمال ایران محسوب می‌شود. در سال‌های اخیر وقوع چندین رخداد سیلابی در این حوضه خسارات قابل توجهی به اراضی کشاورزی، زیرساخت‌های محلی و سکونتگاه‌های انسانی وارد کرده است. علاوه بر این، گسترش فعالیت‌های انسانی، تغییرات کاربری اراضی و افزایش فراوانی بارش‌های حدی در چارچوب تغییرات اقلیمی می‌تواند خطر وقوع سیلاب‌های مخرب را در این منطقه تشدید کند. از این رو، شناسایی نواحی مستعد سیلاب و تحلیل الگوهای مکانی و زمانی تغییرات خطر سیلاب برای برنامه‌ریزی کاربری اراضی، مدیریت ریسک و کاهش خسارات احتمالی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با وجود توسعه روش‌های مختلف برای پهنه‌بندی خطر سیلاب، بسیاری از مطالعات پیشین عمدتاً بر تحلیل‌های ایستا و صرفاً مکانی تمرکز داشته و کمتر به پویایی زمانی تغییرات خطر پرداخته‌اند. در این راستا، پژوهش حاضر با ارائه یک چارچوب مدل‌سازی ترکیبی مبتنی بر آنتروپی

سیلاب به کار می‌رود (Rahmati & Zeinivand, 2023). پژوهش Xiong و همکاران (۲۰۲۳) تلفیق مارکوس با مدل‌های EBF و SE را در چین بررسی کرد و نشان داد که مدل ترکیبی، قابلیت بالایی در تحلیل روند زمانی و کاهش خطای مکانی دارد.

در ایران، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه‌ی پهنه‌بندی خطر سیلاب با استفاده از مدل‌های آماری انجام شده است. عرب عامری و همکاران (۱۳۹۹) با به‌کارگیری مدل آنتروپی شانون و نسبت فراوانی در شمال ایران نشان دادند که دقت مدل آنتروپی در طبقه‌بندی نواحی خطر بالا قابل قبول است. رحمتی و همکاران (۱۴۰۱) در پژوهشی جامع، مدل‌های داده‌محور از جمله EBF، FR و AHP را در استان لرستان مقایسه کردند و مدل EBF را به دلیل توانایی در تحلیل عدم قطعیت، دقیق‌ترین مدل ارزیابی کردند. از سوی دیگر، کاظمی و بغدادی (۱۴۰۰) در پژوهشی با عنوان بررسی پویایی خطر سیلاب با استفاده از زنجیره مارکوس در حوضه طالقان نشان دادند که با استفاده از دوره‌های زمانی بارش و تغییر کاربری اراضی، می‌توان انتقال خطر از نواحی کم‌خطر به پرخطر را با دقت بالایی پیش‌بینی نمود. نتایج مشابهی توسط صالحی و عنایتی (۱۴۰۲) در حوضه نکا مازندران نیز گزارش شد که حاکی از تأثیر زیاد شیب و تراکم زهکشی در پهنه‌های بسیار پرخطر است. از منظر رویکرد ترکیبی، مطالعات اخیر مانند پژوهش Taghvayi Salimi و همکاران (۲۰۲۲) و Khaledian و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از مدل‌های SE–EBF–MaxEnt نشان داده‌اند که تلفیق مدل‌های مکانی و آماری نوین، بهترین کارایی را در تبیین نواحی بحرانی سیلابی دارد. در بیشتر این مطالعات، شاخص‌هایی نظیر ارتفاع، شیب، جهت شیب، تراکم شبکه زهکشی و کاربری اراضی از مهم‌ترین عوامل مؤثر شناخته شده‌اند. به طور کلی، بررسی پیشینه‌ها نشان می‌دهد که استفاده‌ی تلفیقی از مدل زنجیره مارکوس برای تحلیل زمانی و مدل‌های آنتروپی شانون و EBF برای تحلیل مکانی می‌تواند چارچوبی جامع برای تبیین خطر سیلاب در مقیاس حوضه‌ای فراهم سازد (Pontius, ۲۰۰۵). در این پژوهش نیز، با تمرکز بر حوضه آبریز کلارود بابل به‌عنوان یکی از مناطق پرریسک شمال کشور، تلاش شده است با

شانون (SE)، تابع شواهد قطعی (EBF) و زنجیره مارکوس، تلاش می‌کند ضمن تعیین وزن بهینه عوامل مؤثر بر وقوع سیلاب، الگوی توزیع فضایی خطر را مدل‌سازی کرده و تغییرات آن را در بازه‌های زمانی مختلف تحلیل و پیش‌بینی نماید. ترکیب رویکردهای وزن‌دهی مبتنی بر اطلاعات، مدل‌های احتمالاتی مکانی و تحلیل زنجیره‌ای زمانی، امکان درک دقیق‌تر از پویایی خطر سیلاب و شناسایی نواحی بحرانی را فراهم می‌سازد. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنایی علمی برای برنامه‌ریزی مدیریت سیلاب، توسعه کاربری اراضی و اجرای اقدامات مؤثر آبخیزداری در حوضه کلارود بابل مورد استفاده قرار گیرد.

پیشینه تحقیق

مطالعه و پیش‌بینی خطر سیلاب با استفاده از مدل‌های داده‌محور، آماری و مکانی در دو دهه اخیر جایگاه ویژه‌ای در تحقیقات هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی یافته است. در این راستا، پژوهشگران از مدل‌های کلاسیک تا رویکردهای ترکیبی بهره برده‌اند تا بتوانند الگوی مکانی و زمانی سیلاب‌ها را به دقت برآورد کنند. در پژوهش‌های بین‌المللی، مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و داده‌محور مانند Shannon Entropy، Evidential Belief Function (EBF) و Marcos Chain، با هدف افزایش دقت پیش‌بینی و تحلیل پویایی خطر، به کار گرفته شده‌اند. برای نمونه، پور قاسمی و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از مدل آنتروپی شانون و داده‌های GIS در شمال ایران نشان دادند که عوامل توپوگرافی مانند ارتفاع، شیب و کاربری اراضی بیشترین تأثیر را در بروز سیلاب دارند. همچنین Moayedی و Bui (۲۰۲۰) با تلفیق مدل‌های Shannon Entropy و EBF در جنوب شرق آسیا، افزایش معنی‌داری در دقت نقشه‌های آسیب‌پذیری نسبت به مدل‌های تک‌عاملی گزارش کردند. از دیدگاه تحلیل زمانی، مدل زنجیره مارکوس امکان بررسی پویایی تغییرات مکانی خطر سیلاب در دوره‌های زمانی مختلف را فراهم می‌کند (Youssef, 2022). این مدل بر پایه‌ی مفهوم احتمال انتقال از یک کلاس خطر به کلاس دیگر عمل کرده و در ترکیب با مدل‌های مکانی، برای پیش‌بینی تغییرات آینده در خطر



به کارگیری این سه مدل، ضمن تحلیل پویایی زمانی و الگوی مکانی خطر سیلاب، نواحی بحرانی به صورت دقیق شناسایی و طبقه بندی شوند.

مواد و روشها

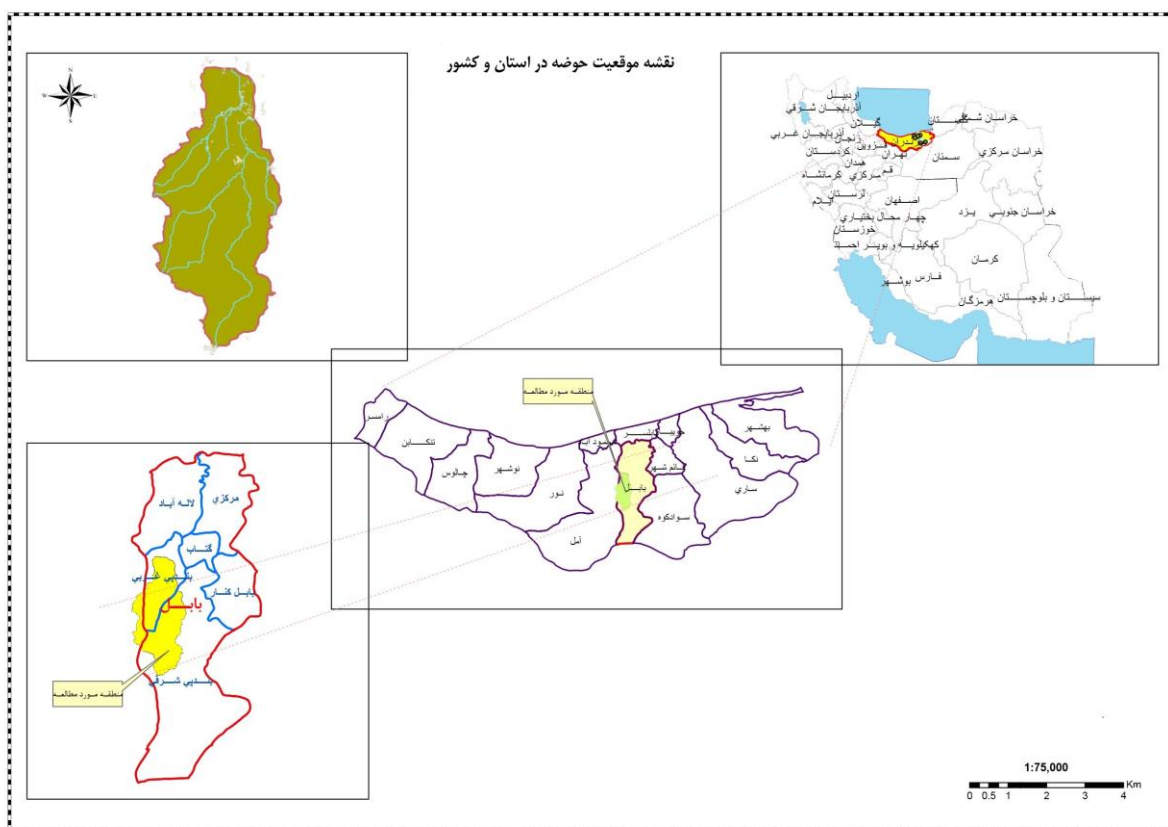
منطقه ی مورد مطالعه

حوضه آبریز کلارود به محدوده ای اطلاق می شود که رواناب های سطحی و زیرسطحی آن به رودخانه ی کلارود هدایت شده و در نهایت به رودخانه ی بابل رود تخلیه می گردد. این رودخانه از ارتفاعات البرز مرکزی در منطقه ی بندپی غربی شهرستان بابل سرچشمه گرفته و از دامنه های مرتفع ناحیه ی فیلبند سنگچال در ارتفاع تقریبی ۲۲۲۰ متر از سطح دریا منشاء می گیرد. رودخانه کلارود پس از طی حدود ۶۰ کیلومتر مسیر، از میان جنگل های باستانی هیرکانی عبور کرده و سرانجام در محدوده ی پایین دست به رودخانه بابل رود می پیوندد. از نظر موقعیت جغرافیایی، محدوده ی مورد مطالعه بین عرض های شمالی $36^{\circ}56'08''$ تا $36^{\circ}18'24''$ و طول های شرقی $52^{\circ}23'27''$ تا $52^{\circ}18'37''$ واقع شده است. وسعت کل حوضه حدود ۲۱۶ کیلومتر مربع برآورد می شود، در حالی که محیط حوضه $79/36$ کیلومتر بوده و ارتفاع آن از ۴۵ متر در نقاط پست تا حدود ۲۲۷۲ متر در نواحی مرتفع متغیر است. طول آبراهه ی اصلی رودخانه کلارود برابر با $30/7$ کیلومتر اندازه گیری شده است. بر اساس مطالعات انجام شده توسط سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور (۱۳۹۹)، تیپ های اصلی فیزیوگرافی حوضه شامل سه رده ی عمده ی کوهستانی، تپه ای و فلات ها و تراس های فوقانی می باشند که بیشترین گستره ی اراضی مربوط به تیپ تپه ای است. این توزیع فیزیوگرافی نقش قابل توجهی در شکل گیری الگوهای هیدرولوژیکی، تمرکز رواناب و نرخ فرسایش سطحی منطقه دارد. نتایج آنالیزهای فیزیکی و شیمیایی خاک حاصل از نمونه برداری های میدانی نشان می دهد که خاک های حوضه از لحاظ اسیدیته (pH) در دامنه ی اسیدی تا خنثی قرار دارند، از نظر شوری

و قلیائیت فاقد محدودیت محسوب می شوند و بافت خاک ها عمدتاً از نوع نیمه سنگین تا سنگین است. در برخی نواحی با تیپ Inceptisols، بافت خاک سبک تر بوده و گرایش آهکی مشاهده می شود. چنین ویژگی های خاک شناسی نشان دهنده ی تنوع بالای شرایط ژئومورفولوژیکی و تأثیر مستقیم آن بر فرآیندهای نفوذ، رواناب و پویایی سیلاب در منطقه است (شکل ۱). برای اجرای مدل های آماری مورد استفاده در این پژوهش، تهیه نقشه پراکنش رخداد های سیلاب (Flood Inventory Map) به عنوان یکی از داده های پایه ضروری بود. به منظور گردآوری داده های وقوع سیلاب، از یک رویکرد چندمنبعی استفاده شد تا دقت مکانی و زمانی نقاط سیلابی افزایش یابد. ابتدا اطلاعات مربوط به رخداد های سیلاب گذشته طی بازه زمانی ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۲ از گزارش های محلی، مستندات سازمان منابع طبیعی، و داده های ثبت شده توسط نهادهای مرتبط با مدیریت منابع آب و مدیریت بحران جمع آوری گردید. سپس برای تکمیل و صحت سنجی این اطلاعات، تصاویر ماهواره ای Sentinel-2 و Landsat و همچنین تصاویر Google Earth مورد بررسی دقیق قرار گرفت تا شواهدی از قبیل آبگرفتگی، رسوب گذاری و تغییرات پوشش سطح زمین مرتبط با وقوع سیلاب شناسایی شود. علاوه بر این، در برخی نقاط کلیدی حوضه، بازدیدهای میدانی جهت تأیید نهایی موقعیت مکانی نقاط سیلابی انجام گرفت. در مرحله بعد، تمامی نقاط شناسایی شده در محیط GIS رقومی سازی شده و پس از حذف موارد تکراری یا دارای عدم قطعیت، مجموعه نهایی نقاط وقوع سیلاب تهیه شد. در مجموع، تعداد ۷۰ نقطه سیلابی معتبر شناسایی و به عنوان نمونه های دارای رخداد ($Flood = 1$) در نظر گرفته شد. به منظور تعریف کلاس عدم وقوع سیلاب، تعداد ۱۰۵ نقطه غیرسیلابی ($Flood = 0$) به صورت تصادفی در بخش هایی از حوضه که سابقه ثبت سیلاب نداشتند تولید گردید. برای جلوگیری از سوگیری مکانی، انتخاب نقاط غیرسیلابی با رعایت فاصله مناسب از نقاط سیلابی و کنترل نهایی با استفاده از تصاویر ماهواره ای و داده های تاریخی انجام شد. در نهایت، داده های وقوع و عدم وقوع سیلاب برای توسعه مدل های آنتروپی شانون (SE) و تابع شواهد قطعی (EBF) استفاده



شد. برای افزایش قابلیت تعمیم‌پذیری مدل، کل داده‌ها (شامل نقاط سیلابی و غیرسیلابی) به صورت تصادفی به دو بخش تقسیم گردید: ۷۰ درصد داده‌ها به عنوان مجموعه آموزش (Training) و ۳۰ درصد به عنوان مجموعه اعتبارسنجی مستقل (Validation) مورد استفاده قرار گرفت. این ساختار داده‌ای امکان ارزیابی دقیق رابطه بین وقوع سیلاب و عوامل محیطی و همچنین سنجش عملکرد مدل‌ها را فراهم می‌سازد.



شکل (۱): نقشه موقعیت حوزه کلارود بابل در استان و کشور (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴)

جدول (۱): منابع داده و لایه‌های مورد استفاده در تحلیل خطر سیلاب در پژوهش حاضر

عامل موثر	منبع داده / تصویر
ارتفاع (DEM)	مدل رقومی ارتفاع SRTM به تفکیک ۳۰ متر
شیب و جهت شیب	استخراج از DEM در نرم‌افزار ArcGIS 10.8
فاصله از شبکه زهکشی	نقشه ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری
تراکم زهکشی	بر اساس روش هورتن (Horton, 1945)
بارش سالانه	ایستگاه‌های هواشناسی بابل، بندپی و سی‌سنگان ۱۴۰۲
کاربری اراضی و پوشش گیاهی	تصاویر Sentinel-2 سال ۲۰۲۴
زمین‌شناسی و نفوذپذیری	نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور

داده‌ها و لایه‌های پایه

به‌منظور شناسایی مناطق سیل‌خیز، از داده‌های مکانی و پارامتری زیر استفاده شد:



$$Unc_{ij} = 1 - (Bel_{ij} + Dis_{ij}) \quad (7)$$

که در آن Ns_{ij} تعداد پیکسل‌های سیلاب‌دار در کلاس i عامل j است. در نهایت، ترکیب وزنی نتایج با استفاده از قانون دمپستر انجام می‌گیرد.

مدل زنجیره مارکوس

مدل زنجیره مارکوس یکی از مدل‌های آماری-احتمالی برای تحلیل تغییرات زمانی سیستم‌های طبیعی است. در این مدل فرض می‌شود که وضعیت آینده یک پدیده فقط به وضعیت فعلی آن وابسته است، نه به تاریخچه گذشته آن (یزدانی و همکاران، ۱۳۹۸). این ویژگی به ویژگی مارکوسی معروف است. در این پژوهش، مدل مارکوس برای تحلیل زمانی تغییر پهنه‌های خطر سیلاب میان دو یا چند بازه‌ی زمانی استفاده می‌شود (مثلاً سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۲۴).

در واقع هدف این روش «پیش‌بینی توزیع مکانی خطر در آینده» بر اساس ماتریس انتقال احتمالات است. ماتریس همبستگی (Correlation Matrix) (معادله ۸)

$$r_{ij} = \frac{\sum (x_i - \bar{x}_i)(x_j - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x}_i)^2 \sum (x_j - \bar{x}_j)^2}}$$

ماتریس تضاد (Contrast Matrix)

بر اساس مدل مارکوس، تضاد هر معیار C_i به صورت میانگین اختلاف آن معیار با معیارهای دیگر بیان می‌شود

$$C_i = 1/n - 1 \sum_{i \neq j} |r_{ij}| \quad (9)$$

محاسبه مجموع تضاد و انحراف معیار

$$Total_Contrast = \sum C_i \quad (10)$$

$$SD_i = \sqrt{1/n \sum (C_i - C^-)^2} \quad (11)$$

وزن نهایی معیارها با روش مارکوس

وزن نهایی با نرمال‌سازی تضادها تعیین می‌شود

$$W_i = C_i / \sum C_i \quad (12)$$

مدل آنتروپی شانون (Shannon Entropy)

مدل آنتروپی شانون از نظریه اطلاعات برای محاسبه سهم اطلاعاتی هر فاکتور در وقوع سیلاب استفاده می‌کند. مراحل شامل سه گام است:

الف) نرمال‌سازی احتمال وقوع سیلاب بر اساس کلاس‌ها

$$P_{ij} = N_{ij} / N_j \quad (1)$$

که در آن، P_{ij} احتمال وقوع سیلاب در کلاس i از عامل j ، N_{ij} تعداد رخداد‌های سیلاب در آن کلاس، و N_j مجموع کل رخداد‌های آن عامل است.

ب) محاسبه آنتروپی هر عامل

$$H_j = -k \sum P_{ij} \ln (P_{ij}) \quad (2)$$

در این رابطه، m تعداد کلاس‌ها و $k = 1/\ln(m)$ ضریب نرمال‌سازی است.

ج) تعیین وزن اطلاعاتی هر عامل

$$W_j = 1 - H_j \quad (3)$$

قدرت اطلاعاتی عامل j بر اساس W_j مشخص می‌شود. در مرحله بعد، نقشه نهایی خطر سیلاب از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$Fse = \sum W_j * X_j \quad (4)$$

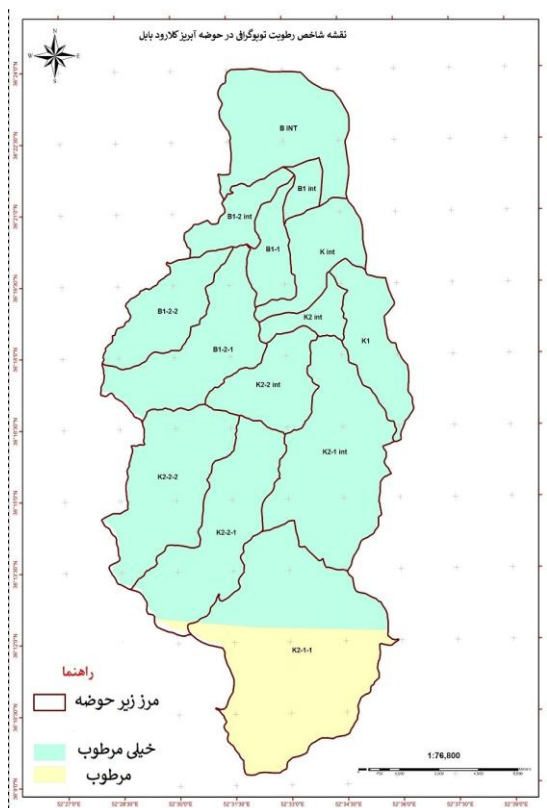
که X_j لایه نرمال‌شده هر فاکتور است.

مدل تابع شواهد قطعی (Evidential Belief Function – EBF)

مدل EBF یکی از مدل‌های احتمالاتی مبتنی بر نظریه دمپستر شافر است که بر پایه‌ی میزان باور (Belief) و میزان شک (Disbelief) کار می‌کند. ابتدا برای هر کلاس از متغیر j ، چهار شاخص محاسبه می‌شود:

$$Bel_{ij} = N_{sij} / N_j \quad (5)$$

$$Dis_{ij} = (N_j - N_{sij}) / N_j \quad (6)$$



شکل (۲): نقشه شاخص رطوبت توپوگرافی در حوضه مورد

نتایج و بحث

ارتفاع (Elevation)

بر اساس (شکل ۴)، میانگین وزنی ارتفاع حوضه حدود ۶۱۳ متر (دامنه‌ی ۴۵-۲۲۷۲ متر). مناطق پایین‌دست با ارتفاع کمتر از ۲۰۰ متر مستعد تمرکز رواناب هستند، در حالی که ارتفاعات بالاتر از ۱۵۰۰ متر در بالادست، منبع تولید رواناب اولیه‌اند (شکل ۳).

جهت شیب (Aspect)

در حوضه کلارود، بیشتر دامنه‌ها دارای جهت شمال‌شرقی تا جنوب‌غربی‌اند، به دلیل تابش کمتر و تراکم پوشش، مناطق شمال‌شرقی با رطوبت بالاتر و فرسایش شدیدتر، حساسیت بیشتری نسبت به سیلاب دارند (شکل ۴).

ترکیب نهایی مدل‌ها

برای ترکیب نتایج مدل‌های سه‌گانه، از رویکرد میانگین وزنی و تحلیل همپوشانی در محیط ArcGIS ۱۰.۸ و Idrisi TerrSet استفاده شد:

$$F_{final} = \alpha F_{SE} + \beta F_{EBF} + \gamma F_{Marcos} \quad (13)$$

که ضرایب α ، β و γ بر اساس دقت مدل‌ها در مرحله‌ی اعتبارسنجی تعیین شدند (Halmy, 2015). به منظور ترکیب نتایج مدل‌های SE، EBF و مارکوس، از یک رویکرد وزن‌دهی مبتنی بر عملکرد پیش‌بینی استفاده شد. بدین منظور، ابتدا دقت هر یک از مدل‌ها با استفاده از منحنی ROC و شاخص سطح زیر منحنی (AUC) ارزیابی گردید. ضرایب α ، β و γ در فرمول (۱۳) بر اساس نرمال‌سازی مقادیر AUC هر مدل محاسبه شدند، به گونه‌ای که مجموع ضرایب برابر با یک باشد. روابط محاسبه ضرایب به صورت زیر است:

$$1. \quad \alpha = \frac{AUC_{SE}}{AUC_{SE} + AUC_{EBF} + AUC_{Marcos}}$$

$$2. \quad \beta = \frac{AUC_{EBF}}{AUC_{SE} + AUC_{EBF} + AUC_{Marcos}}$$

$$3. \quad \gamma = \frac{AUC_{Marcos}}{AUC_{SE} + AUC_{EBF} + AUC_{Marcos}}$$

اعتبارسنجی مدل‌ها

برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها از منحنی مشخصه‌ی عملکرد نسبی (ROC) و شاخص (AUC) و نیز خطای RMSE استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 / n} \quad (15)$$

مقدار AUC نزدیک به ۱ بیانگر دقت بالای مدل است.

نرم افزارهای مورد استفاده

ArcGIS 10.8 (پهنه‌بندی و تحلیل مکانی)

ENVI 5.6 پیش پردازش تصاویر (Sentinel-2)

TerrSet 2020 (تحلیل زنجیره مارکوس)

Excel و SPSS (تحلیل آماری و ضرایب همبستگی)



رواناب و کاهش نفوذپذیری بیشترین خطر سیلاب را دارند (شکل ۷). طبقه‌بندی شیب: ۰-۲، ۲-۵، ۵-۸، ۸-۱۲، ۱۲-۲۰، ۲۰-۳۰، ۳۰-۶۰، ۶۰-۱۰۰ درصد.

ویژگی‌های خاک (Texture & Soil Type)

خاک‌های غالب حوضه نیمه‌سنگین تا سنگین با نفوذپذیری پایین و pH اسیدی تا خنثی هستند. این ترکیب به دلیل تأخیر در نفوذ آب و افزایش رواناب سطحی، یکی از عوامل کلیدی در وقوع سیلاب محسوب می‌شود.

شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)

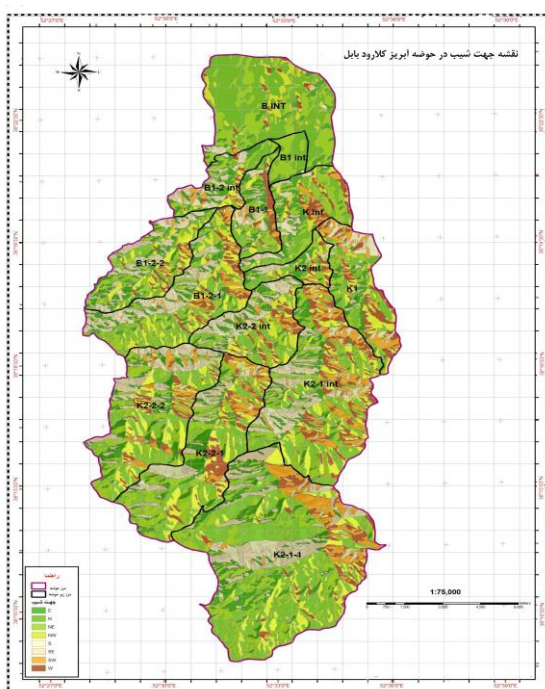
شاخص TWI از DEM محاسبه می‌شود و بیانگر تجمع پتانسیل رطوبت سطحی است. در نواحی تپه‌ای و دره‌های فشرده‌ی زیرحوضه‌های K2 و B1 مقدار TWI بالا بوده و وقوع سیلاب شدیدتر گزارش شده است (شکل ۲).

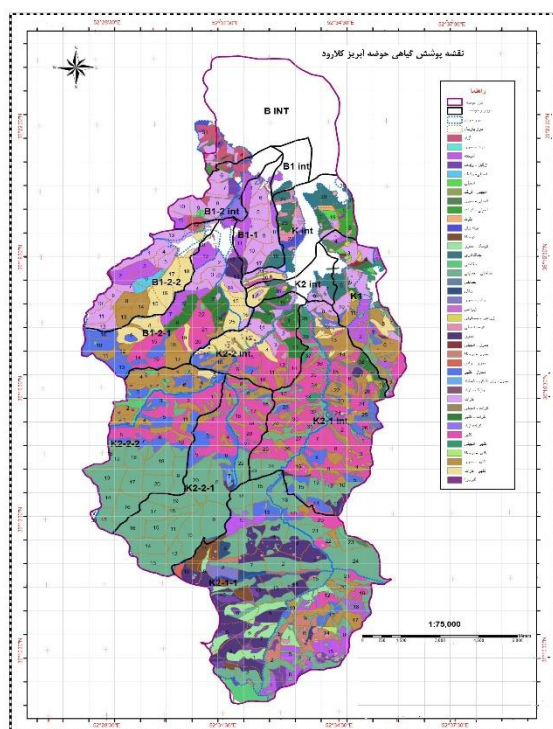
فاصله از جاده (Distance from Road)

وجود راه‌های خاکی و مسیل‌های انسانی در بخش‌های مرکزی و پایین‌دست (خصوصاً محدوده روستاهای بندپی و سنگچال) منجر به انباشت رواناب می‌شود. طبقات فاصله در GIS معمولاً به بازه‌های ۰-۱۰۰، ۱۰۰-۳۰۰، ۳۰۰-۶۰۰، ۶۰۰-۱۰۰۰ متر تقسیم می‌شوند (شکل ۵).

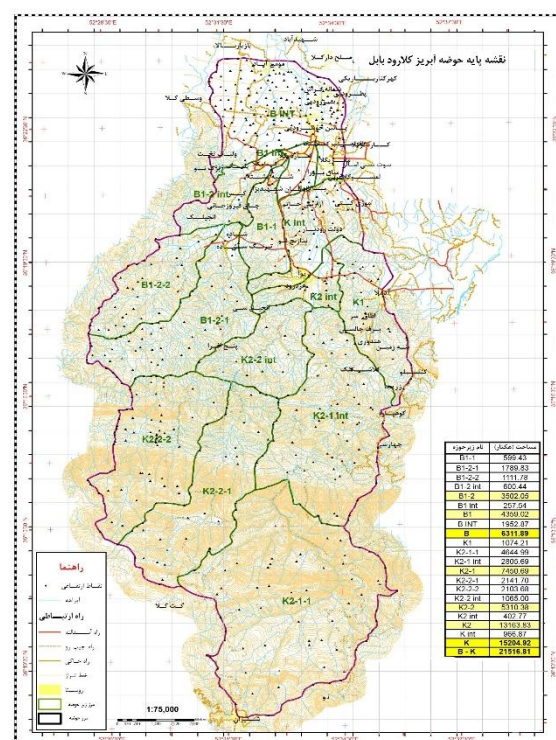
شیب (slope)

براساس داده‌های فیزیوگرافی، متوسط شیب وزنی کل حوضه حدود ۱۹.۴۶ درصد است (شکل ۶). مناطق با شیب بیش از ۳۰ درصد در شمال و شرق حوضه به دلیل افزایش

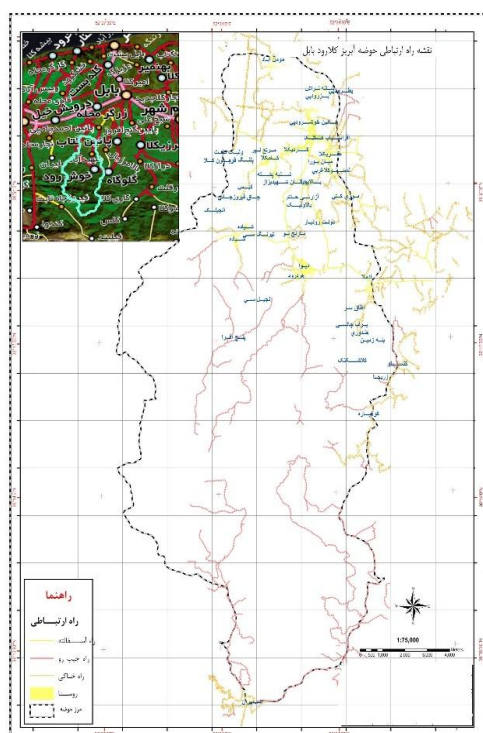




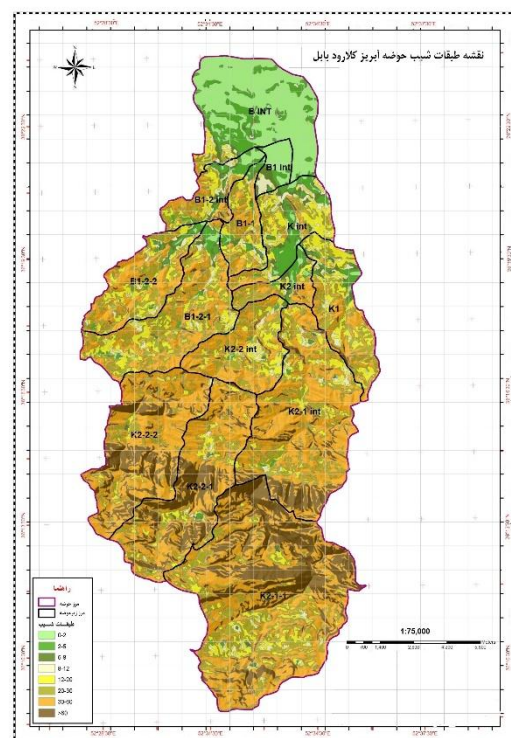
شکل (۷): نقشه پوشش گیاهی در حوضه مورد مطالعه



شکل (۶): نقشه پایه حوضه مورد مطالعه



شکل (۹): نقشه فاصله از جاده در حوضه مورد مطالعه



شکل (۸): نقشه طبقات شیب در حوضه مورد مطالعه

جدول (۲): داده‌های پایه و احتمال وقوع سیلاب (P_{ij}) (منبع: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۴)

کلاس (ارتفاع)	درصد مساحت	P_{ij}	$P_{ij} \ln P_{ij}$
۴۵-۳۰۰	۰/۰۳	۰/۰۳	-۰/۱۰۵
۳۰۰-۵۰۰	۰/۰۹	۰/۰۹	-۰/۲۱۶
۵۰۰-۷۰۰	۰/۱۵	۰/۱۵	-۰/۲۸۴
۷۰۰-۹۰۰	۰/۰۸	۰/۰۸	-۰/۲۰۳
۹۰۰-۱۱۰۰	۰/۰۷	۰/۰۷	-۰/۱۸۶
۱۱۰۰-۱۳۰۰	۰/۰۸	۰/۰۸	-۰/۲۰۳
۱۳۰۰-۱۵۰۰	۰/۱۰	۰/۱۰	-۰/۲۳۰
۱۵۰۰-۱۷۰۰	۰/۱۲	۰/۱۲	-۰/۲۵۵
۱۷۰۰-۱۹۰۰	۰/۰۹	۰/۰۹	-۰/۲۱۶
۱۹۰۰-۲۱۰۰	۰/۰۷	۰/۰۷	-۰/۱۸۶
۲۱۰۰-۲۲۲۷	۰/۰۲	۰/۰۲	-۰/۰۸۷
سایر کلاسها	مجموع = ۱	-	مجموع = ۲/۴۷

$$\text{Elevation} = -K \sum P_{ij} \ln P_{ij} = -(1/\ln 16) \times (-2/47)$$

$$\text{Elevation} = 2/383003$$

در مرحله نهایی تحلیل، بیشترین وزن اطلاعاتی به عوامل ارتفاع (۰/۱۹۸۳)، جهت شیب (۰/۱۵۱۷) و شیب (۰/۱۴۲۳) اختصاص یافته است که بیانگر نقش غالب پارامترهای توپوگرافی در شکل‌گیری و تشدید فرایندهای سیلابی در حوضه می‌باشد. این نتایج با ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی منطقه در دامنه‌های البرز مرکزی سازگار است، زیرا تغییرات قابل توجه ارتفاع و جهت شیب تأثیر مستقیمی بر تمرکز و سرعت رواناب‌های سطحی دارند (جدول ۳). در مقابل، تراکم زهکشی (۰/۰۷۳۸) و شاخص رطوبت توپوگرافی (۰/۰۷۷۶) کمترین وزن را به خود اختصاص داده‌اند که نشان‌دهنده نقش نسبتاً غیرمستقیم این عوامل در تمرکز رواناب و بروز سیلاب است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که ارتفاعات بالاتر از ۱۲۰۰ متر و شیب‌های بیش از ۳۵ درجه با افزایش تمرکز رواناب و وقوع سیلاب‌های ناگهانی ارتباط بیشتری دارند. به‌طور کلی، ناهمگنی توپوگرافی در البرز مرکزی و الگوی جریان غالب از جنوب به شمال سبب شده است تا عوامل

Distance from River (فاصله از رودخانه)

مناطق با فاصله کمتر از ۱۰۰ متر از شبکه زهکشی، بیشترین احتمال وقوع سیلاب را دارند (شکل ۷).

کاربری اراضی (Land Use/Cover)

پوشش تپه‌ای نیمه‌انبوه تا تنک در زیرحوضه‌های ۲ و ۳ بیشترین سطح را دارد (در مجموع $\approx 14/284$ هکتار نیمه‌انبوه). این کاهش پوشش گیاهی منجر به افزایش رواناب سطحی و خطر سیلاب می‌شود (شکل ۵ و شکل ۹).

تراکم زهکشی (Drainage Density)

بر اساس داده‌های فیزیوگرافی مربوط به حوضه آبریز کلارود و انجام محاسبات، تراکم زهکشی کل حوضه برابر $4/1 \text{ km/km}^2$ است که بیانگر شبکه‌ی متراکم جویبارهاست. زیرحوضه‌های B1-2-1 و K2-2-2 دارای بیشترین تراکم (حدود $6/5$ و $4/4$) هستند که احتمال تمرکز رواناب و بروز سیلاب را افزایش می‌دهد.

گام‌های محاسبه مدل شانون آنتروپی

مقادیر زیر براساس درصد مساحت مؤثر هر کلاس و داده‌های مطالعات این پژوهش تنظیم شده‌اند (نرمال‌شده تا جمع کل هر عامل = ۱).

عرب عامری و همکاران، ۱۳۹۹). در مدل EBF، شاخص عدم قطعیت (Unc) میزان اطمینان در رابطه بین رخداد سیلاب و کلاس‌های مختلف عوامل مؤثر را نشان می‌دهد. مقادیر بالاتر این شاخص بیانگر عدم قطعیت بیشتر در ارتباط میان یک عامل محیطی و وقوع سیلاب است. این عدم قطعیت می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی از جمله محدودیت‌های کیفیت و تفکیک مکانی داده‌های ورودی، احتمال خطا در داده‌های رخداد سیلاب، و همچنین پیچیدگی ذاتی و پویایی فرآیندهای هیدرولوژیکی مرتبط با سیلاب باشد.

علاوه بر این، تعاملات غیرخطی میان عوامل محیطی نیز می‌تواند بر میزان عدم قطعیت در نتایج مدل تأثیر بگذارد. با این حال، استفاده از مجموعه‌ای از عوامل مؤثر و انجام مرحله اعتبارسنجی مدل می‌تواند تا حد زیادی اثر این عدم قطعیت را در نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر سیلاب کاهش دهد (جدول ۳). با ترکیب نتایج همه‌ی عوامل (ارتفاع، شیب، فاصله از رودخانه، کاربری و...) نقشه نهایی EBF با مقیاس احتمال وقوع بین ۰ تا ۱ تولید گردید (شکل ۱۰). مهم‌ترین عوامل: ارتفاع، جهت شیب و شیب با مجموع وزن تقریباً ۰/۴۸ بیشترین نقش را در سیلاب‌خیزی حوضه دارند.

عوامل با اثر متوسط: کاربری اراضی، خاک، فاصله از جاده با مجموع وزن تقریباً ۰/۲۹
عوامل کم‌اثر: فاصله از رودخانه، TWI و تراکم زهکشی با مجموع تقریباً ۰/۲۳

توپوگرافی، به‌ویژه ارتفاع، شیب و جهت شیب، بیشترین تأثیر را در الگوی فضایی سیلاب داشته باشند. در کنار این عوامل طبیعی، متغیرهای انسانی نظیر کاربری اراضی و فاصله از جاده‌ها نیز نقش ثانویه اما قابل توجهی در تشدید یا تعدیل فرایندهای سیلابی ایفا می‌کنند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ساختار فیزیوگرافی منطقه، به‌ویژه دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه البرز در محدوده جنوب بابل، عامل اصلی تمرکز رواناب و افزایش شدت سیلاب‌ها در این حوضه است.

مبانی تئوریک مدل EBF

بدین منظور، ۹ عامل مؤثر در بروز سیلاب در حوضه آبریز کلارودبار، واقع در بابل استان مازندران، مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل شواهد باور از توزیع احتمال‌های باور و غیر باور برای ارزیابی رابطه میان طبقات هر عامل و وقوع سیلاب استفاده می‌کند. در نهایت، وزن نهایی هر لایه (Wj) با استفاده از لگاریتم باورها و عادی‌سازی محدوده شواهد بین همه عوامل به‌دست می‌آید. این رویکرد، برخلاف آنتروپی که وزن را بر پایه یک توزیع احتمال یکنواخت مفروض می‌سازد، تحلیل را بر پایه شواهد تجربی واقعی و استحکام متقابل داده‌ها انجام می‌دهد. به همین دلیل در زمین‌های جنگلی و با ساختار خاکی پیچیده‌ی شمال ایران، EBF معمولاً کارایی بالاتری از شانون نشان می‌دهد (Rahmati و همکاران، ۲۰۲۳، و

جدول (۳). وزن نهایی و شاخص‌های EBF برای عوامل مؤثر بر خطر سیلاب در حوضه آبریز کلارود بابل

تفسیر فیزیکی و فرآیندی	میزان	وزن	عدم	شاخص	شاخص	عامل مؤثر در سیلاب
تأثیر	نهایی	نهایی	قطعی	ناباوری	باور	
نهایی	Wj	Unc	Dis	Bel		
ارتفاعات بالا (700–1400 m) با بارش سنگین و تمرکز رواناب در دامنه‌ها بیشترین وقوع سیلاب را دارند	بسیار زیاد	۰/۱۸۳۷	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۷۳	ارتفاع
جهت‌های شمال‌رو و شمال‌غربی بیشترین احتمال اشباع خاک و رواناب را دارند	زیاد	۰/۱۵۱۲	۰/۱۴	۰/۱۷	۰/۶۹	جهت شیب
شیب‌های بین ۲۵°–۴۵° با سرعت رواناب بالا بیشترین خطر تمرکز سیلاب	زیاد	۰/۱۴۶۸	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۶۶	شیب
اراضی زراعی و بایر دارای نفوذ کم و پتانسیل بالای تمرکز رواناب هستند	متوسط	۰/۱۱۱۴	۰/۱۸	۰/۲۱	۰/۶۱	کاربری اراضی
فاصله کمتر از ۲۵۰ m با افزایش سطوح نفوذناپذیر و تمرکز رواناب	متوسط	۰/۰۸۵۱	۰/۲۰	۰/۲۶	۰/۵۴	فاصله از جاده
واحی نزدیک رودخانه‌ها (≤ 250 m) مستعد آب‌گرفتگی مستقیم	نسبتاً کم	۰/۰۷۹۷	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۵۲	فاصله از آبراهه
خاک‌های سنگین و نیمه‌سنگین نفوذپذیری کم‌تر دارند و خطر رواناب را افزایش می‌دهند	متوسط	۰/۰۹۱۶	۰/۲۰	۰/۲۳	۰/۵۷	خاک
در نواحی با $TWI > 13$ ، اشباع خاک زیاد اما به‌صورت موضعی	کم	۰/۰۷۷۵	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۴۹	شاخص رطوبت توگرافی
تراکم بالا هدایت رواناب را تسهیل می‌کند اما اثر مستقل اندک دارد	کم	۰/۰۷۳۰	۰/۳۱	۰/۳۱	۰/۴۷	تراکم زهکشی

جدول (۴): آریایی اهمیت نسبی عوامل مؤثر بر خطر سیلاب با استفاده از روش انتروپی شانون در حوضه آبریز کلارود (منبع: یافته های تحقیق ۱۴۰۴)

رتبه اهمیت	میزان تاثیر نهایی	تفسیر اثر بر وقوع سیلاب	نماد وزن اطلاعاتی (Wj)	Hj-1	نماد آنترپی	رابطه فیزیکی با سیلاب	محدوده یا کلاس بندی	تعداد کلاس	عامل مؤثر در سیلاب
(Hj)									
۱	بسیار زیاد	مؤثرترین عامل؛ اختلاف ارتفاع زیاد سبب اختلاف شدید در پتانسیل تمرکز رواناب می شود	۰/۱۹۸۳	-۱/۸۳۸	۲/۳۸۳۰۰۳	افزایش ارتفاع، کاهش دمای هوا، افزایش شدت بارش محلی و تمرکز رواناب پایین دست	m ۴۵-۲۲۷۲	۱۶	ارتفاع (Elevation)
۳	زیاد	ارتباط مستقیم با تمرکز و تند شدن حرکت رواناب؛ مهم در تعیین شدت فرسایش	۰/۱۴۲۳	-۰/۹۹۲	۱/۹۹۲۳۰۶	شیب بالا - افزایش سرعت جریان و رواناب سطحی	>۵°، ۱۰-۵°، ۱۵-۲۵°، ۲۵-۳۵°، ۴۵-۵۵°، <۵۵°	۸	شیب (Slope)
۲	زیاد	شیب های شمال رو سیلاب خیزتر؛ کنترل انرژی خورشیدی و تبخیر سطحی	۰/۱۵۱۷	-۱/۰۵۸	۲/۰۵۸۰۹۹	جهت های شمالی با تابش کمتر و رطوبت بیشتر، مستعد سیلاب	SE، E، NE، N، W، SW، S، NW	۸	جهت شیب (Aspect)
۸	کم	نقش تکمیلی در تغییر مسیر جریان، مؤثر ولی غیرمستقل	۰/۰۷۳۸	-۰/۵۱۵	۱/۵۱۴۸۵۶	افزایش تراکم آبراهه - افزایش هدایت رواناب	>۴، ۵-۴، ۶-۵، ۷-۶، <۷ km/km ²	۵	تراکم زهکشی (Drainage Density)
۷	کم	در خاک های با زهکشی ضعیف فعال؛ مهم در مدل های اشیاعی	۰/۰۷۷۶	-۰/۵۴۱۰	۱/۵۴۱۴۳۲	مقدار بیشتر TWI - احتمال بیشتر اشباع خاک و رواناب سطحی	>۷، ۹-۷، ۱۱-۹، ۱۳-۱۱، <۱۳	۵	شاخص رطوبتی خاک (TWI)
۶	نسبتاً کم	اثر مستقیم در مناطق حاشیه رودخانه ها و دشت های سیلابی	۰/۰۸۱۲	-۰/۵۶۶	۱/۵۶۶۰۱۴	مناطق نزدیک رودخانه - خطر بیشتر سیلاب به علت تجمع رواناب مستقیم	-۲۵۰، ۲۵۰-۰، ۵۰۰-۷۵۰، ۷۵۰-۱۰۰۰، <۱۰۰۰ m	۵	فاصله از رودخانه (Distance from River)
۵	متوسط	اثر غیرطبیعی ناشی از توسعه راه ها، افزایش آب سطحی اطراف زهکشی ها	۰/۰۸۴۱	-۰/۵۸۶	۱/۵۸۶۸۴۳	فاصله کمتر از جاده - تمرکز رواناب بالاتر به دلیل سطح نفوذناپذیر	-۲۵۰، ۲۵۰-۰، ۵۰۰-۷۵۰، ۷۵۰-۱۰۰۰، <۱۰۰۰ m	۵	فاصله از جاده (Distance from Road)

۴	متوسط	نوع کاربری زمین عامل انسانی اصلی در شدت رواناب است	۰/۱۰۵۴	-۰/۷۳۵	۱/۷۲۵۳۶۴	پوشش متراکم جنگل باعث کاهش وقوع سیلاب، مناطق زراعی یا بایر باعث تشدید آن	جنگل انبوه، نیمه‌انبوه، مرتع، زراعی، دیم، مسکونی، اراضی بایر	۷	کاربری اراضی (Land Use/Cover)
۵	متوسط	نفوذپذیری و بافت خاک در سرعت تمرکز رواناب نقش مهمی دارد.	۰/۰۸۵۵	-۰/۹۵۶	۱/۵۹۶۱۱۵	خاک‌های سنگین ظرفیت نفوذ کم، در نتیجه افزایش رواناب	Inceptisols، سنگین، نیمه‌سنگین، سبک، رس آهکی	۵	خاک (Soil Type)

جدول (۶): معیارهای مؤثر در خطر سیلاب در حوضه کلارود
بابل

نماد	معیار مکانی - فیزیکی	توضیح داده
X1	ارتفاع m	داده های فیزیوگرافی منطقه
X2	شیب %	مدل رقومی ارتفاع (DEM)
X3	فاصله از رودخانه m	داده مکانی GIS
X4	کاربری اراضی	داده های پوشش گیاهی منطقه
X5	تراکم زهکشی km/km ²	حاصل از نقشه هیدروگرافی
X6	ضریب رواناب	استخراج از گزارش هیدرولوژی منطقه تهیه شده توسط نگارندگان
X7	بارندگی سالیانه	استخراج از جدول هیدرولوژی منطقه برگرفته از تحقیقات نگارندگان

جدول (۵): طبقه‌بندی احتمال خطر سیلاب و سهم مساحتی
هر کلاس در حوضه آبریز کلارود

درصد از کل حوضه	مساحت (ha)	محدوده احتمال	کلاس خطر
۱۲/۴۱	۲۶۸۱	۰/۷۵ - ۱	خیلی زیاد
۱۳/۹۴	۳۰۱۲	۰/۶ - ۰/۷۵	زیاد
۲۱/۸۵	۴۷۲۰	۰/۴۵ - ۰/۶۰	متوسط
۲۸/۸۸	۶۲۳۸	۰/۳۰ - ۰/۴۵	کم
۲۲/۹۱	۴۹۴۹	۰ - ۰/۳۰	خیلی کم

مدل زنجیره مارکوس (Marcos Chain Model)

بر اساس داده‌های فیزیوگرافی و هیدرولوژیکی استخراج‌شده، متغیرهای (جدول ۶) به‌عنوان معیارهای مؤثر در خطر سیلاب در حوضه انتخاب می‌شوند.

ماتریس همبستگی

روابط آماری مدل مارکوس و فرمول‌های تضاد انحراف معیار طبق مطالعات Khosravi (2020) و همکاران (Eastman (2012) به‌کار گرفته شد. (جدول ۷).

جدول (۷): ماتریس همبستگی پیرسون بین هفت عامل مؤثر
بر خطر سیلاب در حوضه کلارود

معیار	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
X1	۱	۰/۸۶	۰/۷۸	۰/۵۲	۰/۶۳	۰/۷۱	۰/۶۸
X2	۰/۸۶	۱	۰/۸۱	۰/۴۸	۰/۶۹	۰/۷۵	۰/۶۵
X3	۰/۷۸	۰/۸۱	۱	۰/۵۸	۰/۶۱	۰/۶۴	۰/۵۵
X4	۰/۵۲	۰/۴۸	۰/۵۸	۱	۰/۴۴	۰/۳۹	۰/۳۵
X5	۰/۶۳	۰/۶۹	۰/۶۱	۰/۴۴	۱	۰/۴۴	۰/۳۵
X6	۰/۷۱	۰/۷۵	۰/۶۴	۰/۳۹	۰/۴۴	۱	۰/۳۵
X7	۰/۶۸	۰/۶۵	۰/۵۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۱

منفی بین فاصله از رودخانه و سایر متغیرها نیز از منظر ژئومورفولوژیک قابل تفسیر است. به طور معمول، نواحی نزدیک تر به رودخانه ها در دره ها و کف دره ها قرار دارند؛ این مناطق معمولاً دارای ارتفاع کمتر، شیب ملایم تر و دسترسی بیشتر برای فعالیت های انسانی و کشاورزی هستند. بنابراین، انتظار می رود که فاصله از رودخانه با برخی متغیرها، به ویژه کاربری اراضی و ویژگی های توپوگرافیک، رابطه معکوس داشته باشد. این الگو نشان می دهد که شبکه زهکشی و توپوگرافی حوضه به شدت بر توزیع مکانی کاربری های اراضی و در نتیجه بر حساسیت به سیلاب اثر می گذارند. در مجموع، ضرایب منفی (جدول ۷) بیانگر هم راستایی ساختار طبیعی حوضه با الگوی استقرار و بهره برداری انسانی هستند. این موضوع اهمیت دارد، زیرا نشان می دهد متغیرهای ورودی مدل مستقل از یکدیگر نیستند، بلکه بخشی از یک الگوی فضایی-ژئومورفولوژیک مشترک اند. از این رو، تفسیر نتایج باید بر پایه روابط مکانی میان ارتفاع، شیب، فاصله از رودخانه و کاربری اراضی انجام شود.

جدول (۸): محاسبه شاخص تضاد و انحراف معیار عوامل مؤثر

در حوضه مورد مطالعه

معیار	C_i	انحراف از میانگین	$(C_i - \bar{C})^2$
ارتفاع	۰/۷۰	+ ۰/۰۶	۰/۰۰۳۷
شیب	۰/۷۱	+ ۰/۰۷	۰/۰۰۴۹
فاصله از رودخانه	۰/۶۶	+ ۰/۰۲	۰/۰۰۰۴
کاربری اراضی	۰/۴۷	+ ۰/۱۷	۰/۰۲۸۹
تراکم زهکشی	۰/۶۶	+ ۰/۰۲	۰/۰۰۰۴
ضریب رواناب	۰/۶۵	+ ۰/۰۱	۰/۰۰۰۱
بارش	۰/۶۲	= ۰/۰۲	۰/۰۰۰۴

X5	۰/۶۳	۰/۶۹	- ۰/۶۱	۰/۴۴	۱	۰/۶۶	۰/۵۹
				-			
X6	۰/۷۱	۰/۷۵	۰/۶۴	۰/۳۹	۰/۶۶	۱	۰/۷۳
			-	-			
X7	۰/۶۸	۰/۶۵	۰/۵۵	۰/۳۵	۰/۵۹	۰/۷۳	۱
			-	-			

در تحلیل و تفسیر ماتریس تضاد و مقدار تضاد هر معیار در مدل مارکوس بزرگترین مقدار تضاد متعلق به شیب (۰/۷۱) است که نشان دهنده ی بیشترین تغییرپذیری و اهمیت در شرایط هیدرولوژیکی حوضه است (عابدی و همکاران، ۱۴۰۱). پس از آن، ارتفاع (۰/۷۰) اهمیت بالایی در تعیین میزان و شدت خطر سیلاب دارد. کمترین تضاد مربوط به کاربری اراضی (۰/۴۷) است که به دلیل همبستگی بالا با عوامل رواناب و بارش در رتبه ی آخر قرار گرفته است. در ماتریس همبستگی (جدول ۷)، مشاهده همبستگی منفی میان کاربری اراضی و متغیرهای توپوگرافیک مانند ارتفاع و شیب، نشان دهنده یک الگوی مکانی معنادار در حوضه است. این نتیجه احتمالاً بازتاب این واقعیت است که کاربری های انسانی و کشاورزی بیشتر در ارتفاعات پایین تر، دامنه های ملایم تر و مناطق نزدیک تر به شبکه زهکشی متمرکز شده اند؛ در حالی که ارتفاعات بالاتر و شیب های تندتر عمدتاً با پوشش طبیعی، به ویژه جنگل های متراکم تر، همراه هستند. بنابراین، ضریب منفی بین ارتفاع و کاربری اراضی ($r = - ۰/۵۲$) لزوماً به معنای یک رابطه علی مستقیم نیست، بلکه بیانگر تفکیک فضایی کاربری های انسانی از نواحی مرتفع و شیب دار است. به بیان دیگر، در حوضه های کوهستانی شمال ایران، افزایش ارتفاع معمولاً با کاهش دسترسی پذیری، محدودیت در توسعه اراضی کشاورزی و حفظ پوشش جنگلی یا مرتعی همراه است. در مقابل، اراضی کم ارتفاع تر که از نظر توپوگرافی مناسب تر هستند، بیشتر برای سکونت، کشاورزی و سایر کاربری های انسانی مورد استفاده قرار می گیرند. از این رو، همبستگی منفی میان ارتفاع و کاربری اراضی می تواند نشان دهنده تفاوت الگوی پوشش زمین در طبقات ارتفاعی مختلف باشد، نه این که ارتفاع مستقیماً نوع کاربری را تعیین کند. همچنین، همبستگی

انحراف معیار تضاد $SD = \sqrt{0/0388 / 7} = 0/0747$

وزن نهایی معیارها با روش مارکوس

وزن نهایی با نرمال سازی تضادها تعیین می شود (جدول ۹).

بیشترین اهمیت مربوط به شیب و ارتفاع است که با شرایط مورفولوژیکی منطقه سازگار است (Ahmed & Dewan, ۲۰۱۸). کاربری اراضی و بارش متوسط کمترین وزن را دارند که به دلیل همبستگی بالا با فاکتور رواناب ارزیابی شده است. این وزن ها قابل استفاده در مدل نهایی ترکیبی (Marcos-EBF-SE) برای وزن دهی مکانی هستند (جدول ۹).

نتایج پژوهش نشان داد که عوامل توپوگرافیک از جمله شیب، ارتفاع و شاخص های مشتق شده از مدل رقومی ارتفاعی نقش غالبی در پهنه بندی خطر سیلاب در حوضه کلارود بابل دارند. این یافته با بسیاری از مطالعات انجام شده در حوضه های کوهستانی شمال ایران (Arabameri و همکاران، ۲۰۱۹، Hajizadeh و همکاران، ۲۰۲۱) همخوانی دارد، اما این همخوانی صرفاً یک تطابق آماری نیست، بلکه ریشه در ویژگی های ژئومورفولوژیک و اقلیمی منطقه دارد. حوضه کلارود در دامنه های شمالی رشته کوه البرز واقع شده است؛ منطقه ای که به دلیل ساختار زمین شناسی جوان، تکتونیک فعال و شیب های نسبتاً تند، از پویایی ژئومورفیک بالایی برخوردار است. شیب های زیاد موجب کاهش زمان تمرکز (Time of Concentration) و افزایش سرعت رواناب سطحی می شوند، که در نتیجه آن حجم بالایی از آب در مدت زمان کوتاه به شبکه زهکشی وارد می شود. این شرایط، ظرفیت نفوذ را کاهش داده و احتمال وقوع سیلاب های ناگهانی را افزایش می دهد. از سوی دیگر، بارش های جبهه ای شدید و رگباری که تحت تأثیر توده های هوای مرطوب خزری و سامانه های مدیترانه ای در منطقه شکل می گیرند، باعث تمرکز مکانی-زمانی بارش در بازه های کوتاه مدت می شوند. ترکیب این الگوی بارشی با شیب های تند و لیتولوژی حساس به فرسایش در البرز شمالی، شرایطی را فراهم می کند که عوامل توپوگرافیک به عنوان

کنترل کننده های اصلی پاسخ هیدرولوژیکی حوضه عمل کنند. همچنین، با توجه به جوان بودن ناهمواری های البرز و توسعه دره های V شکل عمیق، ظرفیت ذخیره موقت رواناب در دامنه ها محدود بوده و جریان ها با سرعت بالا به سمت مناطق پایین دست هدایت می شوند. این مسئله سبب می شود شاخص هایی نظیر شیب، انحنای زمین و فاصله از آبراهه ها سهم بیشتری در مدل های آماری پهنه بندی خطر داشته باشند.

بنابراین، غالب بودن عوامل توپوگرافیک در این پژوهش نه تنها با مطالعات پیشین در حوضه های مشابه همخوان است، بلکه به طور مستقیم با شرایط زمین شناسی فعال، مورفولوژی کوهستانی و رژیم بارشی شدید شمال ایران

قابل تبیین است. این تحلیل نشان می دهد که در حوضه های کوهستانی البرز، ساختار فیزیکی زمین به عنوان عامل پایه ای، چارچوب اصلی پاسخ هیدرولوژیکی و شکل گیری مخاطرات سیلاب را تعیین می کند. علاوه بر نقش عوامل توپوگرافیک، نتایج نشان داد که تغییرات کاربری اراضی نیز در تشدید خطر سیلاب در حوضه کلارود نقش قابل توجهی دارد. کاهش پوشش جنگلی هیرکانی، گسترش اراضی کشاورزی و توسعه سکونتگاه های انسانی در سال های اخیر موجب کاهش ظرفیت نفوذپذیری خاک و افزایش رواناب سطحی شده است. در اکوسیستم های جنگلی طبیعی، لایه لاشبرگ، ساختار ریشه ای متراکم و تخلخل بالای خاک سبب افزایش ذخیره موقت آب و کاهش سرعت رواناب می شود. اما با تبدیل این اراضی به کاربری های انسانی، ضریب رواناب افزایش یافته و پاسخ هیدرولوژیکی حوضه سریع تر و شدیدتر می شود. در حوضه های کوهستانی شمال ایران، اثر تغییر کاربری اراضی زمانی بحرانی تر می شود که با شیب های تند و بارش های جبهه ای شدید ترکیب گردد. در چنین شرایطی، کاهش پوشش گیاهی نه تنها ظرفیت نفوذ را کاهش می دهد، بلکه پایداری دامنه ها را نیز تحت تأثیر قرار داده و احتمال انتقال سریع رسوبات و افزایش دبی اوج (Peak Discharge) را تقویت می کند. بنابراین، می توان گفت که عوامل توپوگرافیک چارچوب اصلی

جدول (۹): وزن نهایی معیارها در مدل مارکو س در حوضه

مورد مطالعه

رتبه	وزن نهایی w_i	معیار
۲	۰/۱۵۷	ارتفاع
۱	۰/۱۵۹	شیب
۳	۰/۱۴۸	فاصله از رودخانه
۷	۰/۱۰۵	کاربری اراضی
۴	۰/۱۴۷	تراکم زهکشی
۵	۰/۱۴۵	ضریب رواناب
۶	۰/۱۳۹	بارش متوسط

اعتبار سنجی (مدل برتر برای تفکیک نواحی بحرانی)

در مرحله اعتبارسنجی مدل‌ها به منظور تعیین کارآمدترین روش در تفکیک نواحی بحرانی سیلاب، عملکرد مدل‌های مختلف مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل EBF به دلیل تکیه بر روابط آماری میان رخداد سیلاب و عوامل مؤثر، توانایی بالاتری در شناسایی و تفکیک مناطق بحرانی موجود در شرایط فعلی حوضه دارد و از دقت مناسبی در بازنمایی الگوی مکانی خطر برخوردار است. در مقابل، مدل MARCOS که مبتنی بر رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره است، انعطاف‌پذیری بیشتری در تحلیل سناریوهای مختلف و بررسی تغییرات احتمالی خطر در آینده نشان می‌دهد و می‌تواند برای پیش‌بینی روندهای آتی و مدیریت برنامه‌ریزی کارآمدتر مورد استفاده قرار گیرد. بر این اساس، ترکیب دو مدل EBF-MARCOS موجب بهره‌گیری همزمان از توان تحلیلی روش‌های آماری و تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌شود و در نتیجه دقت و قابلیت اعتماد نتایج را افزایش می‌دهد. این رویکرد ترکیبی با در نظر گرفتن همزمان شدت اثر عوامل محیطی و وزن نسبی آن‌ها، امکان شناسایی دقیق‌تر نواحی با خطر بالا را فراهم کرده و می‌تواند به عنوان روشی مناسب برای پهنه‌بندی و مدیریت خطر سیلاب در حوضه آبریز کلارود مورد استفاده قرار گیرد. نتایج حاصل از این تحلیل در جدول (۱۰) ارائه شده است.

کنترل سیلاب را تعیین می‌کنند، اما تغییرات کاربری اراضی به عنوان یک عامل تشدیدکننده (Amplifying Factor) عمل کرده و شدت و فراوانی سیلاب‌های مخرب را افزایش می‌دهد. این تعامل بین ویژگی‌های ژئومورفولوژیک البرز شمالی و فشارهای انسانی اخیر، توضیح می‌دهد که چرا در مدل‌های آماری، هم عوامل توپوگرافیک و هم کاربری اراضی دارای وزن بالایی هستند. در واقع، ساختار فیزیکی حوضه بستر وقوع سیلاب را فراهم می‌کند و مداخلات انسانی آستانه بروز مخاطره را کاهش می‌دهد.

علاوه بر عوامل ژئومورفولوژیک و تغییرات کاربری اراضی، نتایج این پژوهش را می‌توان در چارچوب روندهای نوین تغییر اقلیم نیز تفسیر کرد. در دامنه‌های شمالی البرز، تمرکز رطوبت دریای خزر در برخورد با ناهمواری‌های کوهستانی باعث تقویت صعود اوروگرافیک و شکل‌گیری بارش‌های شدید کوتاه‌مدت می‌شود. در شرایط تغییر اقلیم، این سامانه‌ها می‌توانند شدت بیشتری یافته و موجب افزایش دبی اوج و کاهش زمان پاسخ حوضه شوند. ترکیب این روند اقلیمی با شیب‌های تند، خاک‌های کم‌عمق و کاهش پوشش گیاهی، آستانه بروز سیلاب‌های ناگهانی را کاهش داده و احتمال رخداد سیلاب‌های با دوره بازگشت کوتاه‌تر را افزایش می‌دهد. بنابراین، نتایج این پژوهش نه تنها بازتاب شرایط فعلی حوضه کلارود بابل است، بلکه می‌تواند به عنوان مبنایی برای تحلیل سناریوهای آینده در چارچوب تغییر اقلیم نیز مورد استفاده قرار گیرد. ادغام مدل‌های مکانی-زمانی در چارچوب SE-EBF-Marcos با داده‌های سناریوهای اقلیمی آتی، می‌تواند ابزار قدرتمندی برای پیش‌بینی الگوهای تغییر خطر سیلاب در دهه‌های آینده فراهم آورد.

جدول (۱۰): تحلیل دقت مدل‌ها با شاخص AUC

توان تشخیص نواحی بحرانی مناسب برای وزن‌دهی اولیه بالاترین دقت در تمایز مناطق بحرانی مناسب برای تحلیل روند خطر	شاخص AUC	نوع داده	مدل
۰/۷۱	مکانی	آنتروپی شانون (SE)	تابع شواهد قطعی (EBF)
۰/۸۳	مکانی فازی	-	تابع شواهد قطعی (EBF)
۰/۷۹	زمانی	زنجیره مارکوس	

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی جامع و پویای خطر سیلاب در حوضه آبریز کلارودبار بابل، با بهره‌گیری از یک چارچوب روش‌شناختی ترکیبی شامل مدل‌های آنتروپی شانون (SE)، تابع شواهد قطعی (EBF) و زنجیره مارکوس (Marcos Chain) انجام پذیرفت. این رویکرد یکپارچه، امکان تحلیل هم‌زمان اهمیت اطلاعاتی، شواهد تجربی و روابط متقابل بین عوامل مؤثر بر سیلاب را فراهم آورد و به درک عمیق‌تری از مکانیزم‌های هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی حاکم بر منطقه منجر شد.

تسلط بی‌چون و چرای عوامل توپوگرافیک:

مهم‌ترین و برجسته‌ترین یافته این تحقیق، همگرایی قوی هر سه مدل در شناسایی ارتفاع، شیب و جهت شیب به عنوان عوامل اصلی کنترل‌کننده سیلاب‌خیزی در حوضه کلارودبار است.

در مدل آنتروپی شانون، این سه عامل به ترتیب با وزن‌های اطلاعاتی ۰/۱۹۸۳، ۰/۱۴۲۳ و ۰/۱۵۱۷، بیشترین سهم را در عدم قطعیت سیستم داشتند.

در مدل EBF، این عوامل با مجموع وزن نهایی تقریبی ۰/۴۸، به‌وضوح به عنوان محرک‌های اصلی شناسایی شدند. تفسیر فیزیکی نشان داد که ارتفاعات ۷۰۰ تا

۱۴۰۰ متر به دلیل دریافت بارش سنگین و دامنه‌های با شیب ۲۵ تا ۴۵ درجه به علت سرعت بالای رواناب، کانون‌های اصلی تولید و تمرکز سیلاب هستند. مدل مارکوس نیز با تحلیل تضاد و همبستگی، بیشترین وزن (۰/۱۵۹ و ۰/۱۵۷) و بالاترین مقدار تضاد (۰/۷۱) و (۰/۷۰) را به ترتیب به شیب و ارتفاع اختصاص داد که نشان‌دهنده بیشترین تغییرپذیری و اهمیت این دو عامل در دینامیک هیدرولوژیکی حوضه است.

نقش عوامل ثانویه (متوسط و کم‌اثر): عواملی نظیر کاربری اراضی، نوع خاک و فاصله از جاده در رتبه بعدی اهمیت قرار گرفتند (مجموع وزن تقریبی ۰/۲۹ در مدل EBF). این عوامل، که عمدتاً تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی و ویژگی‌های زمین‌شناسی هستند، نقش تشدیدکننده دارند. اراضی زراعی و بایر به دلیل نفوذپذیری کم و خاک‌های سنگین و نیمه‌سنگین منطقه، پتانسیل رواناب سطحی را افزایش می‌دهند. عواملی مانند فاصله از آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) و تراکم زهکشی با وجود ارتباط مستقیم با فرآیند سیلاب، در این حوضه خاص تأثیر مستقل کمتری داشتند و بیشتر به عنوان عوامل تکمیلی عمل می‌کنند.

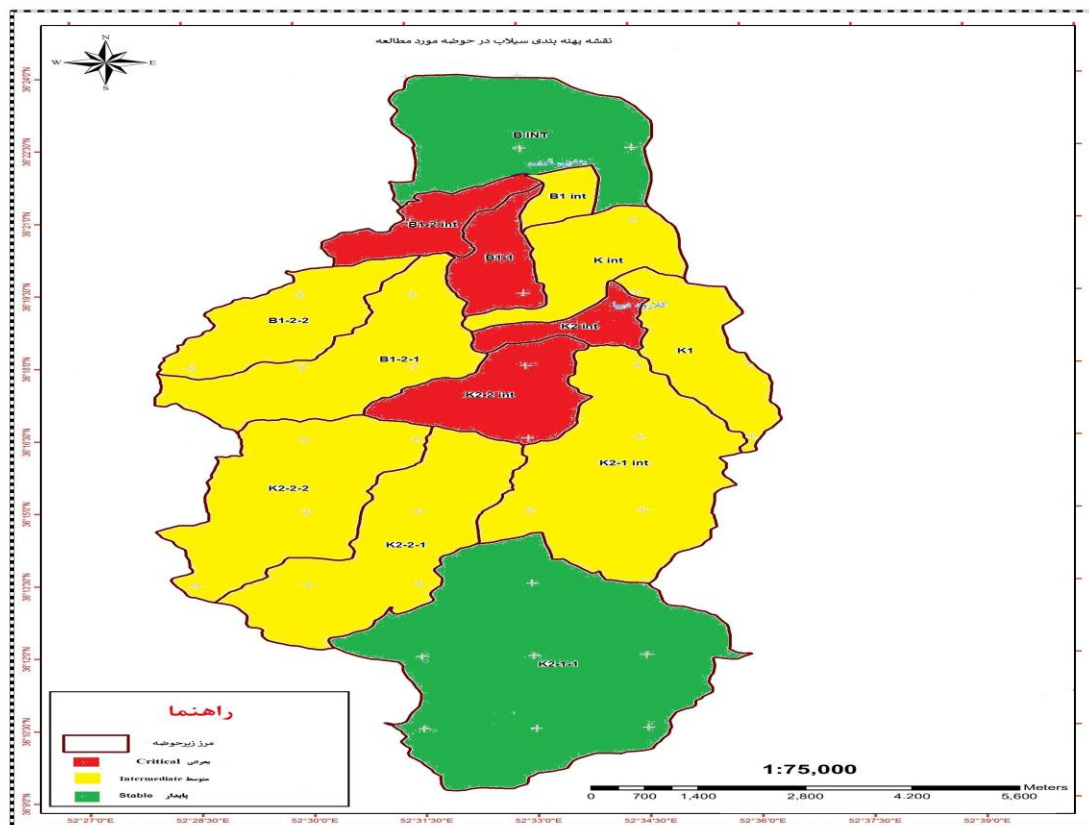
پهنه‌بندی نهایی خطر و پیامدهای فضایی:

نقشه نهایی خطر سیلاب که از تلفیق عوامل در مدل EBF حاصل شد، نشان داد که حدود ۲۶/۴٪ از مساحت کل حوضه (معادل ۵۵۸۵ هکتار) در پهنه‌های با خطر زیاد و خیلی زیاد قرار دارد. این مناطق عمدتاً بر دامنه‌های شمالی و شمال‌غربی، در ارتفاعات میانی و مناطق با شیب تند منطبق هستند که این موضوع اهمیت مدیریت کاربری اراضی و اجرای اقدامات حفاظتی در این نواحی را دوچندان می‌کند (شکل ۱۰).

نوآوری و اهمیت روش‌شناختی

ارزش اصلی این پژوهش در تلفیق سه مدل با مبانی تئوریک متفاوت است. در حالی که آنتروپی شانون وزن‌ها را بر اساس سهم اطلاعاتی و عدم قطعیت تعیین می‌کند، مدل EBF بر اساس شواهد آماری و تجربی عمل کرده و مدل مارکوس به تحلیل روابط درونی و پویایی

معیارها می‌پردازد. این رویکرد سه‌گانه باعث افزایش استحکام و قابلیت اطمینان نتایج شده و ارزیابی جامع‌تری را نسبت به مدل‌های تک‌بعدی ارائه می‌دهد. نتایج حاصل، که با مطالعات مشابه در شمال ایران همخوانی دارد، اعتبار این چارچوب ترکیبی را تأیید می‌کند.



شکل (۱۰): نقشه پهنه بندی سیلاب در حوضه مورد مطالعه

محدودیت های پژوهش

با وجود نتایج قابل قبول حاصل از این پژوهش، برخی محدودیت ها وجود دارد که می تواند بر دقت و قابلیت تعمیم نتایج تأثیرگذار باشد. نخست آنکه دقت نتایج تا حد زیادی به کیفیت و تفکیک مکانی داده های ورودی وابسته است؛ بنابراین هرگونه خطا یا عدم دقت در داده های مکانی، لایه های محیطی و یا داده های مربوط به رخداد سیلاب می تواند بر خروجی مدل ها اثر بگذارد. همچنین تعداد و پراکنش مکانی نقاط ثبت شده سیلاب ممکن است نتواند به طور کامل همه شرایط هیدرولوژیکی و محیطی حوضه را نمایندگی کند. از سوی دیگر، پدیده سیلاب حاصل تعاملات پیچیده و گاه غیرخطی عوامل طبیعی و انسانی است که ممکن است در مدل های آماری مورد استفاده به طور کامل بازنمایی نشود.

علاوه بر این، اگرچه مدل EBF از نظر مفهومی قابلیت در نظر گرفتن عدم قطعیت در روابط میان متغیرها را دارد، در این پژوهش تمرکز اصلی بر پهنه بندی خطر سیلاب و مقایسه عملکرد مدل ها بوده و به همین دلیل تحلیل های کمی عدم قطعیت، مانند شبیه سازی مونت کارلو یا تحلیل حساسیت انجام نشده است. بر این اساس، پیشنهاد می شود در مطالعات آینده با بهره گیری از داده های با دقت مکانی بالاتر، سری های زمانی طولانی تر و به کارگیری روش های پیشرفته تر مانند مدل های ترکیبی، تحلیل حساسیت و شبیه سازی مونت کارلو، میزان عدم قطعیت و پایداری نتایج با دقت بیشتری ارزیابی شود.

پیامدهای کاربردی و توصیه های مدیریتی

نتایج این پژوهش، با ارائه نقشه پهنه بندی خطر سیلاب مبتنی بر رویکرد ترکیبی SE-EBF-Marcos، یک ابزار علمی و کاربردی برای مدیران و برنامه ریزان منطقه فراهم می آورد. این نقشه می تواند به عنوان مبنای تصمیم گیری در سطوح مختلف مدیریت سرزمین و کاهش خطر بلایای طبیعی مورد استفاده قرار گیرد. در حوضه مدیریت کاربری اراضی، نتایج حاصل باید در طرح های جامع و تفصیلی شهری و روستایی به عنوان یکی از اسناد پشتیبان مورد توجه قرار گیرد. به ویژه در پهنه های با خطر

زیاد و بسیار زیاد، محدودیت در توسعه کالبدی، کنترل تغییر کاربری اراضی و اعمال ضوابط سخت گیرانه در صدور مجوزهای ساخت و ساز ضروری است تا از افزایش آسیب پذیری در برابر سیلاب جلوگیری شود. در زمینه اولویت بندی اقدامات آبخیزداری، یافته ها نشان می دهد که مناطق مرتفع و شیب دار نقش مهمی در تولید رواناب و تشدید سیلاب دارند. بنابراین، اجرای اقدامات مدیریتی در بالادست حوضه، از جمله احیای پوشش گیاهی، تثبیت خاک، احداث بانکت، ترانس بندی و سازه های کنترل رواناب (مانند سدهای کوتاه و سازه های سنگ ملاتی)، باید در اولویت برنامه های آبخیزداری قرار گیرد. همچنین در حوضه طراحی و مکان یابی زیرساخت های حیاتی نظیر جاده ها، پل ها، خطوط انتقال نیرو و سایر تأسیسات عمرانی، لازم است نتایج پهنه بندی خطر سیلاب لحاظ شود تا تاب آوری زیرساخت ها در برابر رخداد های حدی افزایش یابد. افزون بر این، شناسایی دقیق مناطق پرخطر می تواند مبنایی برای استقرار سیستم های هشدار زودهنگام سیلاب در نواحی پایین دست و کاهش خسارات انسانی و اقتصادی باشد. با وجود نتایج قابل قبول پژوهش، برخی محدودیت ها از جمله استفاده از DEM با تفکیک مکانی ۳۰ متر، محدودیت در دسترسی به داده های دقیق شدت و توزیع زمانی بارش، و مفروضات ذاتی مدل های آماری به کاررفته می تواند بر دقت نتایج تأثیرگذار باشد. بر این اساس، پیشنهاد می شود در مطالعات آینده از مدل های پیشرفته یادگیری ماشین مانند Random Forest، Gradient Boosting یا Support Vector Machine برای مقایسه و بهبود عملکرد پیش بینی استفاده شود. تحلیل سناریوهای تغییر اقلیم و تغییرات کاربری اراضی به منظور بررسی پویایی فضایی-زمانی خطر سیلاب در آینده انجام گیرد؛ از داده های با تفکیک مکانی و زمانی بالاتر (به ویژه بارش های حدی کوتاه مدت) بهره گرفته شود و رویکردهای ترکیبی شامل مدل های آماری، داده محور و هیدرودینامیکی برای کاهش عدم قطعیت و افزایش قابلیت اعتماد نتایج به کار گرفته شوند. در مجموع، این پژوهش نشان داد که استفاده از یک چارچوب ترکیبی و چندمدلی می تواند درک جامعی از عوامل



اراضی، کنترل توسعه شهری در مناطق پرخطر و اولویت‌بندی اقدامات آبخیزداری در بالادست حوضه نقش مؤثری داشته باشند. همچنین نتایج پژوهش می‌تواند در طراحی و مکان‌یابی زیرساخت‌های شهری و روستایی، برنامه‌ریزی اقدامات حفاظتی و کاهش خسارات ناشی از سیلاب مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، شناسایی دقیق مناطق پرخطر می‌تواند به نهادهای مسئول در برنامه‌ریزی سیستم‌های هشدار زودهنگام و مدیریت بحران کمک کند.

پیچیده مؤثر بر خطر سیلاب در حوضه‌های کوهستانی شمال ایران فراهم کند و در عین حال، زمینه‌ای مناسب برای توسعه مطالعات پیشرفته‌تر و تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد در مدیریت پایدار منابع آب و کاهش خطر بلایای طبیعی فراهم آورد.

نقشه پهنه‌بندی خطر سیلاب تهیه‌شده در این مطالعه می‌تواند به عنوان ابزاری حمایتی برای مدیران محلی، سازمان آب منطقه‌ای و برنامه‌ریزان شهری در فرآیند تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار گیرد. این نقشه‌ها می‌توانند در شناسایی مناطق با خطر زیاد و بسیار زیاد سیلاب و در نتیجه هدایت برنامه‌های مدیریت کاربری

منابع

- تقوایی سلیمی، س و باغی‌زاده، ا. (۱۴۰۲). ارزیابی خطر سیلاب با مدل‌های هیبریدی داده‌محور (EBF-SE-FR) در شمال ایران. مجله زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست ایران، ۱۲(۱)، ۵۴-۷۳.
- رحمتی، ا، زینی‌وند، ه و نادری، ن. (۱۴۰۱). مقایسه مدل‌های داده‌محور در پیش‌بینی پهنه‌های خطر سیلاب با استفاده از GIS. فصلنامه منابع آب ایران، ۱۸(۲)، ۱۴۲-۱۵۶.
- صالحی، م و عنایتی، ز. (۱۴۰۲). پهنه‌بندی خطرپذیری سیلاب با استفاده از مدل‌های آماری و GIS در حوضه نکا، مازندران. مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۱(۲)، ۹۱-۱۰۹.
- عابدی، ف، حسینی، ر، و رجبی، م. (۱۴۰۱). ارزیابی تغییرات زمانی خطر سیلاب با استفاده از مدل زنجیره مارکوس و منطق فازی، فصلنامه جغرافیای مخاطرات طبیعی، ۱۲(۳): ۴۵-۶۷.
- عرب‌عامری، ع ر، رضایی، ک، و پورقاسمی، ح ر. (۱۳۹۹). پهنه‌بندی خطر سیلاب با استفاده از مدل آنتروپی شانون و نسبت فراوانی در شمال ایران. مجله علوم زمین، ۲۹(۴)، ۲۳۵-۲۵۰.
- کاظمی، ع و بغدادی، ر. (۱۴۰۰). تحلیل پویایی خطر سیلاب با مدل زنجیره مارکوس در حوضه طالقان. مجله اکوهیدرولوژی، ۷(۳)، ۶۴-۷۸.
- کاظمی، س، شیرمحمدی، ع، جعفری، س. (۱۳۹۷). مدل‌سازی تغییرات زمانی پوشش اراضی با استفاده از زنجیره مارکوس و مدل آنتروپی شانون، مجله محیط‌شناسی ایران، ۴۱(۴): ۱۸۹-۲۰۴.
- یزدانی، م، احمدی، ح، و خلیلی، م. (۱۳۹۸). تحلیل تغییرات زمانی کاربری اراضی با استفاده از زنجیره مارکوس و مدل سلول خودکار (CA-Marcos) در محیط GIS، فصلنامه پژوهش‌های جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۳(۲): ۱۱۵-۱۳۴.

Ahmed, B., & Dewan, A. (2018). Application of Marcos chain and cellular automata models in predicting future land use changes in Dhaka, Bangladesh. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(10), 565.

Arabameri, A., Rezaei, K., Pourghasemi, H. R., et al. (2020). GIS-based flood susceptibility mapping using Shannon Entropy and Frequency Ratio models: A case study of northern Iran. *Journal of Environmental Management*, 267, 110-116.

Bui, D. T., Shirzadi, A., Shahabi, H., Chapi, K., Hoang, N. D., & Pham, B. T. (2021). A novel integrated approach using multivariate statistical models and machine learning for flood susceptibility

assessment. *Science of the Total Environment*, 765, 142760.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142760>.

Eastman, J. R. (2012). *IDRISI TerrSet manual: The Marcos and Cellular Automata Model of Land Cover Change Prediction*. Clark University, Worcester, MA.

Halmy, M. W. A., Gessler, P. E., Hicke, J. A., & Salem, B. B. (2015). Land use/cover change detection and prediction in the north-western coastal desert of Egypt using the Marcos-CA model. *Applied Geography*, 63, 101–112.

Hajizadeh, M., Pourghasemi, H. R., & Rahmati, O. (2021). Flood susceptibility mapping using a combination of Evidential Belief Function and fuzzy logic models in northern Iran. *Environmental Earth Sciences*, 78(5), 169–182.

Khaledian, Y., Enayati, Z., & Taghvayi Salimi, S. (2022). Hydrological hazard zoning and watershed sustainability in Mazandaran Province, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 81(4), 77–91.

Khosravi, K., et al. (2020). Flood susceptibility mapping using entropy and Marcos chain models. *Journal of Hydrology*, 590, 125475.

Moayedi, H., & Bui, D. T. (2020). Predicting flood hazard area by hybrid Shannon Entropy-EBF models. *Environmental Earth Sciences*, 79(11), 280–293.

Pontius, R. G., & Malanson, J. (2005). Comparison of the structure and accuracy of two land change models. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(2), 243–265.

Pourghasemi, H. R., & Moradi, E. (2021). Spatial modeling of flood susceptibility using data-driven ensemble models. *Natural Hazards*, 108(3), 2567–2590.

Pham, B. T., Tien Bui, D., & Pradhan, B. (2023). Hybrid decision models for spatial flood risk prediction under climate change. *Catena*, 224, 107–146.

Rahmati, O., & Zeinivand, H. (2023). Dynamic flood hazard prediction using Marcos Chain and Fuzzy-AHP hybrid modeling. *Journal of Hydrology*, 619, 129–145.

Taghvayi Salimi, S., Baghizadeh, A., & Pourghasemi, H. R. (2022). Flood susceptibility assessment in northern Iran using hybrid data-driven models. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(8), 557–572.

Tehrany, M. S., Jang, C., & Pham, B. T. (2022). Comparative flood susceptibility assessment using multicriteria decision analysis and ensemble learning. *Science of the Total Environment*, 805, 150–168.

Youssef, A. M., Pourghasemi, H. R., & Al-Katheeri, M. (2022). Flood hazard prediction using Marcos Chain integrated with data-driven models in arid basins. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 13(1), 700–722.

Xiong, L., Chen, W., & Li, H. (2023). Spatio-temporal transition of flood risk using Marcos Chain integration with spatial susceptibility models. *Hydrological Sciences Journal*, 68(2), 101–116