






Flood Hazard Spatial Zoning and Critical Area Assessment for Sustainable Management and Development (Case Study: Kellarud Babol Watershed, Mazandaran Province)

Seyyed Asadollah Hejazi,^{1*}  Masoumeh Rajabi,² 

Sabikeh Rouhani Zadeh,³ 

1. Assistant of Professor, Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz. Iran. E-mail: s.hejazi@tabrizu.ac.ir
2. Professor of Geomorphology, Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz .Iran. E-mail: Mrajabi@tabrizu.ac.ir
3. PhD Student in Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz. Iran. E-mail: sabikeruhani@gmail.com

Article Info	ABSTRACT
<p>Article type: Research Article</p> <p>Article history: Received 30 September 2025 Revised 13 November 2025 Accepted 18 December 2025 Available online 22 December 2025</p> <p>Keywords: Statistical model, EBF, Kellarud, Flooding, TWI.</p>	<p>Research Topic: Flood hazard assessment is essential for mitigating the increasing impacts of floods intensified by climate change and land-use alterations. The Kellarud –Babol watershed in northern Iran is highly vulnerable due to its geomorphological and climatic characteristics.</p> <p>Objective: This study aims to evaluate spatial flood hazard susceptibility and identify the most influential conditioning factors using the Evidential Belief Function (EBF) model within a GIS environment.</p> <p>Method: Historical flood occurrence data from 2024–2025 were used as training samples. Conditioning factors including elevation, slope, aspect, distance from river, drainage density, and Topographic Wetness Index (TWI) were derived from a digital elevation model. The EBF model, based on Dempster–Shafer evidence theory, was applied to assess the contribution of each factor. Model performance was validated using the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve and the Area Under the Curve (AUC).</p> <p>Results: The results indicated that distance from river, slope, and elevation were the most significant factors influencing flood occurrence. The flood susceptibility map showed a strong spatial agreement with observed flood events. The EBF model achieved a high predictive accuracy with an AUC value of 94/0.</p> <p>Conclusions: The findings confirm that the EBF model is a reliable and efficient tool for flood hazard zonation and can support flood risk management and spatial planning in flood-prone watersheds.</p>
<p>Cite this article: Hejazi, S., Rajabi, M., Rouhani Zadeh, S. (2026). Flood Hazard Spatial Zoning and Critical Area Assessment for Sustainable Management and Development (Case Study: Kellarud Babol Watershed, Mazandaran Province). <i>Journal of ECOHYDROLOGY</i>, 12(4), 1025-1049 http://doi.org/10.22059/ije.2026.405335.1893</p>	
<p> © Seyyed Asadollah Hejazi, Masoumeh Rajabi, Sabikeh Rouhani Zadeh. Publisher: University of Tehran Press. DOI: http://doi.org/10.22059/ije.2026.405335.1893</p>	

Introduction

Floods are among the most destructive natural hazards, exerting wide-ranging environmental, economic, and social impacts. Owing to climate change and land-use alterations, their frequency and severity have increased in recent decades. The Kelarud –Babol watershed in Mazandaran Province is particularly prone to flooding due to its specific topographic and climatic conditions.

The aim of this study is to perform spatial flood hazard zonation and to analyze the factors influencing flood susceptibility using the Evidential Belief Function (EBF) model within a GIS environment. In this research, spatial, topographic, and hydrological data related to flood events during the years 2024 and 2025 were collected. Historical flood occurrence points were used as training data, and conditioning factors including elevation, slope, aspect, distance from river, drainage density, and the Topographic Wetness Index (TWI) were derived from the digital elevation model. Data processing and modeling were conducted in ArcGIS, and the predictive performance of the model was evaluated using the ROC curve and the Area Under the Curve (AUC) index.

Methodology

The research methodology of this study consisted of several main stages. First, spatial, topographic, and hydrological data were collected. Subsequently, conditioning factors including slope, elevation, aspect, distance from river, drainage density, and the Topographic Wetness Index (TWI) were derived from the digital elevation model (DEM). These variables were used as input layers for the Evidential Belief Function (EBF) model. The EBF model is based on Dempster–Shafer evidence theory and calculates the degree of belief (Belief) and disbelief (Disbelief) of each class of the conditioning factors with respect to flood occurrence. The difference between these two parameters ($EBF = \text{Belief} - \text{Disbelief}$) is considered as an indicator of the relative influence of each variable on flood occurrence. Data processing and modeling were performed in the ArcGIS environment, and the predictive accuracy of the model was evaluated using the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve and the Area Under the Curve (AUC) index.

Findings

The results indicated that the distance from river, slope, and elevation were the most influential variables controlling flood occurrence. Areas characterized by steep slopes and low elevations in close proximity to river channels exhibited the highest flood hazard. As shown in Table 3, the distance from river had the highest normalized weight (36/0), followed by slope (28/0), elevation (15/0), drainage density (20/0), aspect (11/0), and the Topographic Wetness Index (TWI) (0.09). These weights were derived based on the mean EBF values and the ranked influence of each conditioning factor. In addition, the ROC curve and the flood hazard zonation maps are illustrated in Figures 7 and 8, respectively. Model validation was performed using the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve, which is a statistical tool widely used to evaluate the predictive accuracy of flood susceptibility models. In such models, a probability or susceptibility value is calculated for each sub-watershed or pixel. The results demonstrated that the EBF model achieved an AUC value of 0.94, indicating excellent performance in predicting flood-prone areas. This finding confirms that the EBF model successfully discriminates among the three susceptibility classes of Stable, Intermediate, and Critical, and shows a high degree of spatial agreement with observed flood occurrences.

Conclusion

The conclusions of this study indicate that the Evidential Belief Function (EBF) model is an efficient and reliable tool for identifying and managing flood hazard in the Kelarud watershed. The integration of this model with artificial intelligence and fuzzy-based approaches can further enhance prediction accuracy and improve the effectiveness of risk management planning in the northern regions of the country. The EBF model can play a significant role in urban planning, water and soil resource management, and in improving the safety and resilience of human communities against flood hazards.

Author Contributions

“Conceptualization, A.H. and S.R.; methodology, M.R.; experiments, S.R.; validation, S.R.; formal analysis, A.H and M.R.; investigation, S.R.; resources, S.R.; data curation, A.H. and M.R. and S.R.; writing—original draft preparation, S.R.; writing—review and editing, A.H and S.R.; supervision, A.H and M.R.; All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.”

Data Availability Statement

Not applicable

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants of the present study.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

The authors did not receive support from any organization for the submitted work.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

پهنه‌بندی مکانی خطر سیلاب و ارزیابی مناطق بحرانی در راستای مدیریت و توسعه پایدار (مطالعه موردی: حوضه آبریز کلارود بابل، استان مازندران)

سید اسدالله حجازی^۱، معصومه رجیبی^۲، سبیکه روحانی‌زاده^۳

۱. استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: s.hejazi@tabrizu.ac.ir

۲. استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: Mrajabi@tabrizu.ac.ir

۳. دانشجوی دکتری رشته ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، رایانامه: sabikeruhani@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	موضوع: پهنه‌بندی خطر سیلاب و شناسایی مناطق بحرانی با استفاده از مدل تابع شواهد قطعی (EBF) در محیط GIS (حوضه آبریز کلارود بابل)
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۸	هدف: با توجه به افزایش فراوانی و شدت سیلاب‌ها تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و تغییر کاربری اراضی، این پژوهش با هدف پهنه‌بندی مکانی خطر سیلاب و تحلیل عوامل مؤثر بر سیل‌خیزی در حوضه آبریز کلارود بابل، با بهره‌گیری از مدل تابع شواهد قطعی (EBF) در محیط GIS انجام شد.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۲۲	روش تحقیق: در این مطالعه، داده‌های مکانی، توپوگرافی و هیدرولوژیکی سال‌های ۱۴۰۳ و ۱۴۰۴ گردآوری شد. نقاط وقوع سیلاب‌های گذشته به عنوان داده‌های آموزشی استفاده شد. متغیرهای ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی و شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) از مدل رقومی ارتفاع استخراج و به‌عنوان ورودی‌های مدل EBF به کار گرفته شدند. پردازش و مدل‌سازی در محیط ArcGIS انجام شد و دقت مدل با استفاده از منحنی ROC و شاخص AUC ارزیابی شد.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۷	یافته‌ها: نتایج نشان داد فاصله از رودخانه، شیب و ارتفاع بیشترین نقش را در وقوع سیلاب دارند. مناطق کم‌ارتفاع با شیب نسبتاً زیاد و مجاور آبراهه‌ها بالاترین خطر سیلاب را نشان دادند. بیشترین وزن به فاصله از رودخانه (0.36) و کمترین وزن به شاخص TWI (0.09) اختصاص یافت. ارزیابی دقت مدل EBF با مقدار AUC برابر 0.94 بیانگر عملکرد بسیار مطلوب مدل در تفکیک مناطق پایدار، متوسط و بحرانی سیلابی است.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱	نتیجه‌گیری: یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد مدل EBF ابزاری کارآمد و دقیق برای شناسایی مناطق مستعد سیلاب در حوضه کلارود است. نتایج این مطالعه می‌تواند در مدیریت ریسک سیلاب، برنامه‌ریزی کاربری اراضی و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، ترکیب مدل EBF با روش‌های فازی و هوش مصنوعی می‌تواند دقت پیش‌بینی سیلاب را در حوضه‌های مرطوب شمال کشور افزایش دهد.

استناد: حجازی، سید اسدالله؛ رجیبی معصومه؛ روحانی‌زاده، سبیکه. پهنه‌بندی مکانی خطر سیلاب و ارزیابی مناطق بحرانی در راستای مدیریت توسعه پایدار (مطالعه

موردی حوضه آبریز کلارود بابل، استان مازندران). مجله اکوهیدرولوژی، ۱۲(۴)، ۱۰۲۵-۱۰۴۹.

<http://doi.org/10.22059/ije.2026.405335.1893>



ناشر: انتشارات دانشگاه تهران. © سید اسدالله حجازی، معصومه رجیبی، سبیکه روحانی‌زاده.

مقدمه

سیلاب‌ها از جمله بلایای طبیعی هستند که می‌توانند خسارت‌های سنگینی به زیرساخت‌ها، محیط زیست و جوامع انسانی وارد کنند. وقوع سیلاب‌ها به دلیل تغییرات اقلیمی، تغییرات کاربری اراضی و سایر عوامل انسانی و طبیعی در دهه‌های اخیر افزایش یافته است. فلاح و همکاران (۲۰۲۳) بیان می‌کنند که پیش‌بینی دقیق و کارآمد مناطق مستعد سیلاب و مدیریت بهینه منابع آب و خاک از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. سیلاب‌ها علاوه بر ایجاد خسارت‌های اقتصادی و اجتماعی گسترده، می‌توانند سبب تضعیف اکوسیستم‌ها و تخریب محیط زیست شوند. از این‌رو، تهیه و تولید نقشه‌های پهنه‌بندی خطر سیلاب با بهره‌گیری از مدل‌های گوناگون، نقش مؤثری در شبیه‌سازی، پیش‌بینی وقوع سیلاب‌ها و کاهش اثرات مخرب آن‌ها ایفا می‌کند.

منبری و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که پهنه‌بندی سیلاب با هدف شناسایی و ارزیابی مناطق مستعد سیلاب انجام می‌شود و این فرایند به طور مستقیم به کاهش خسارت‌های سیلاب‌ها، مدیریت بهتر منابع آب و ارتقای ایمنی جوامع انسانی کمک می‌کند. درباره این موضوع تحقیقات مختلفی در نقاط مختلف ایران و جهان صورت گرفته است که در جدیدترین تحقیقات پژوهشگران ایرانی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: آزادطلب و همکاران (۱۳۹۹) تحقیق خود را با عنوان «پهنه‌بندی خطر سیلاب در سندج، با استفاده از مدل‌های ترکیبی شاخص آماری و تابع شواهد قطعی EBF» مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعه یادشده نشان داد تراکم ساختمانی و معابر شهری عوامل اصلی در وقوع سیلاب هستند. داوند و همکاران (۱۴۰۰) در یک مطالعه با عنوان «پهنه‌بندی خطر وقوع سیلاب در شهر ایلام با استفاده از مدل تابع باور قطعی (EBF)» به این نتیجه رسیدند که احتمال بروز سیل در این منطقه عمدتاً تحت تأثیر شرایط محیطی از جمله شیب زیاد زمین و تغییرات پوشش و کاربری اراضی قرار دارد. نتایج حاصل از نقشه پیش‌بینی خطر سیلاب نشان می‌دهد با استفاده از این تحلیل می‌توان راهکارهای مدیریتی مؤثری برای کاهش تلفات انسانی و خسارت‌های مالی ناشی از سیل در آینده طراحی و اجرا کرد. عباسی (۱۴۰۰) مقاله‌ای با محور ارزیابی تاب‌آوری شهری با رویکرد توسعه پایدار در برابر سیلاب به عنوان مطالعه موردی شهر شیراز، با استفاده از شاخص‌های تاب‌آوری شهری، انجام داد. نتایج پژوهش یادشده نشان داد برنامه‌ریزی کاربردی و اقدامات غیرسازه‌ای مانند اصلاح شبکه‌های دفع آب، می‌تواند به کاهش آسیب ناشی از سیلاب و حفظ پایداری اجتماعی و اقتصادی کمک کند. تحقیق یادشده به‌ویژه بر اهمیت مکان‌یابی مناطق آسیب‌پذیر در چارچوب GIS تأکید داشت. در پژوهش انجام‌شده توسط حجازی و همکاران (۱۴۰۱) با هدف ارزیابی پتانسیل وقوع سیلاب و تعیین اولویت مناطق مستعد سیل به منظور کنترل و کاهش فرسایش در حوضه آبریز حاجیلر، داده‌ها و اطلاعات موجود با بهره‌گیری از روش SCS تلفیق شدند. نتایج حاصل از تحلیل‌های یادشده بیانگر آن بود که بخش‌های مرکزی حوضه با وسعتی حدود ۱۰۰ کیلومتر مربع بیشترین ظرفیت سیلابی را دارند. رجبی و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از شاخص‌های مورفومتری و آزمون‌های آماری، پتانسیل سیل‌خیزی زیرحوضه‌های حوضه آبریز زاب تا میرآباد را ارزیابی کردند. هدف پژوهش یادشده، اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها از نظر خطر سیلاب و تعیین سهم آن‌ها در دبی اوج خروجی حوضه بود. نتایج پژوهش یادشده نشان داد زیرحوضه‌های شین‌آباد و صوفیان دارای پتانسیل بالایی سیل‌خیزی، زاب کوچک دارای پتانسیل متوسط، و کوپر و لاوین چای دارای پتانسیل پایین سیلابی هستند. اسکوهی و همکاران (۱۴۰۲) در پژوهشی با محور حکمرانی و مدیریت ریسک سیلاب، نقش سیاست‌گذاری‌های کلان و حکمرانی آب را در کاهش خطر سیلاب بررسی کردند. نتایج پژوهش یادشده با استفاده از نرم‌افزار MAXQDA نشان داد برنامه‌ریزی زیرساختی، مشارکت جوامع محلی و مدیریت ریسک جامع، برای تحقق توسعه پایدار در مناطق سیلاب‌خیز ضروری است. فلاح و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از مدل تابع شواهد قطعی در دشت سیلاخور، مناطق مستعد سیلاب را شناسایی کردند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد ارتفاع، فاصله از رودخانه و تراکم زهکشی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در سیل‌خیزی منطقه هستند. اسماعیلی و همکاران (۱۴۰۳) در پژوهشی درباره کنترل پیامدهای سیلاب‌های ساحلی با رویکرد توسعه پایدار گردشگری، نشان دادند سیلاب‌های ساحلی باعث آسیب به

اکوسیستم‌ها و تهدید توسعه پایدار و امنیت اقتصادی جوامع محلی می‌شوند. نتایج پژوهش یادشده بر لزوم اقدامات پیشگیرانه در مدیریت حوضه‌های آبریز مناطق ساحلی تأکید دارد. رضایی مقدم و همکاران (۱۴۰۳) با استفاده از مدل تحلیل چندمعیاره ویکور، پهنه‌بندی خطر سیلاب در حوضه آبریز رود زرد را بررسی کردند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد مناطق شرقی، شمالی، شمال شرقی و بخش‌هایی از جنوب حوضه دارای سیل‌خیزی بیشتری هستند. عوامل مؤثر شامل ارتفاع زیاد، شیب بیش از ۲۷ درصد، پوشش گیاهی کم‌تراکم، شکل نسبتاً فشرده حوضه و کمبود اقدامات حفاظتی منابع آب و خاک بود. این مطالعه تأکید کرد که پهنه‌بندی خطر سیلاب نقش مهمی در برنامه‌ریزی حفاظتی و مدیریت آبخیزداری دارد.

حوضه آبریز کلارود در شهرستان بابل، به دلیل موقعیت جغرافیایی و اقلیم مرطوب خود در مجاورت دریای خزر، از نواحی مستعد وقوع سیلاب در استان مازندران محسوب می‌شود. با توجه به خطرپذیری بالای منطقه، این پژوهش با هدف ارزیابی و پهنه‌بندی مناطق مستعد سیلاب در حوضه آبریز کلارود بابل، با استفاده از مدل تابع شواهد قطعی (EBF)، انجام شده است. اهمیت این مطالعه از دیدگاه مدیریت ریسک سیلاب، توسعه پایدار و ایمنی جوامع انسانی ناشی می‌شود. در مناطقی مانند کلارود بابل که به دلیل شرایط توپوگرافی و بارش‌های فراوان، از مناطق مستعد وقوع سیلاب هستند، شناسایی مناطق بحرانی و ارائه راهکارهای مدیریتی می‌تواند به کاهش خسارت‌های مالی و انسانی و تخریب محیط زیست کمک کند. استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی و ترکیب آن‌ها با روش‌های مبتنی بر پیش‌بینی، امکان تهیه نقشه‌های دقیق خطر سیل را فراهم می‌سازد که می‌تواند در مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی کاهش مخاطرات سیلاب نقشی مؤثر داشته باشد.

روش‌شناسی پژوهش

داده‌های مورد نیاز

داده‌های مکانی و توپوگرافی: مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با دقت ۳۰ متری از سایت USGS یا سازمان منابع طبیعی کشور. داده‌های هیدرولوژیکی: نقاط وقوع سیلاب‌های گذشته در سال‌های ۱۴۰۳ و ۱۴۰۴ از ایستگاه‌های هیدرومتری و گزارش‌های میدانی جمع‌آوری شد.

داده‌های کاربری اراضی: از تصاویر ماهواره‌ای (مثل Landsat 8) با دقت ۳۰ متری استخراج شد.

داده‌های اقلیمی: داده‌های بارش و دما از ایستگاه‌های هواشناسی نزدیک به حوضه.

مختصات نقاط سیل‌گیر تاریخی (حداقل ۳۰-۵۰ نقطه، ترجیحاً ≤ 100 نقطه) - با تقسیم تصادفی: ۷۰ درصد برای آموزش، ۳۰ درصد برای اعتبارسنجی

تبدیل داده‌ها به فرمت مناسب

DEM در ArcGIS 8/10 پیش‌پردازش شد (حذف نویز، تصحیح خطاهای مسیریابی).

نقاط سیلاب به لایه نقطه‌ای^۱ تبدیل شدند.

استخراج متغیرهای فیزیوگرافی و هیدرولوژیکی

ارتفاع: با استفاده از ابزار Contour در DEM، طبقات ارتفاعی ۱۰۰ متری ایجاد شد.

شیب: با استفاده از ابزار Slope، نقشه شیب با دقت ۲۰ متری تهیه شد و به ۸ کلاس (۰-۲، ۲-۵، ۵-۸، ۸-۱۲، ۱۲-۲۰، ۲۰-۳۰، ۳۰-۴۰، ۴۰-۶۰، ۶۰-۱۰۰ درصد) تقسیم شد.

جهت شیب: با ابزار Aspect، نقشه جهت شیب بر اساس ۸ جهت اصلی (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW) تهیه شد.

فاصله از رودخانه: با ابزار Euclidean Distance، فاصله هر پیکسل از بستر رودخانه محاسبه شد و به کلاس‌های ۰-۱۰۰، ۱۰۰-۲۵۰، ۲۵۰-۵۰۰، ۵۰۰-۵۰۰ متر تقسیم شد.

تراکم زهکشی: با ابزار Flow Accumulation، مساحت جریان تجمعی (a) محاسبه شد. سپس با استفاده از ابزار Flow Direction، مسیر جریان تعیین شد.

شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI): با فرمول $TWI = \ln(\alpha / \tan\beta)$ که در آن α مساحت جریان تجمعی و β زاویه شیب (بر حسب رادیان) است، محاسبه شد.

مدل‌سازی با مدل EBF^۱

در این پژوهش به منظور شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مستعد وقوع سیلاب در حوضه آبریز کلارودبار، از مدل تابع شاهد قطعی به عنوان یکی از روش‌های آماری و احتمالی استفاده شد. این مدل با ترکیب لایه‌های مختلف اطلاعاتی شامل ویژگی‌های توپوگرافی، ژئومورفولوژی و شاخص‌های محیطی همچون ارتفاع، شیب، جهت شیب و شاخص رطوبت وپوگرافی، توانایی هر ناحیه را در وقوع سیلاب بر اساس میزان باور (Bel)، عدم باور (Dis) و قطعیت (EBF) برآورد می‌کند. سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) با قابلیت تحلیل‌های مکانی، زمینه‌ساز مدل‌سازی دقیق فرایندهای محیطی‌اند. از آنجا که سیل‌خیزی حاصل تأثیر مجموعه‌ای از عوامل طبیعی و انسانی است، بهره‌گیری از مدل‌های داده‌محور مبتنی بر GIS، روشی مؤثر برای ارزیابی و پیش‌بینی مناطق مستعد سیلاب به شمار می‌رود. مدل تابع شاهد قطعی نسبت به سایر روش‌های آماری، توانایی ارزیابی اثر و همبستگی تمام طبقات عوامل مؤثر را دارد (تهرانی و کومار، ۲۰۱۸). مدل EBF مبتنی بر نظریه شواهد دمپستر - شفر بوده و هدف آن سنجش درجه درجه باور هر کلاس داده نسبت به وقوع پدیده هدف است. برای اجرای مدل، ابتدا لایه‌های مربوط به عوامل مؤثر بر سیلاب به لایه‌های شاهد تبدیل شده و سپس رابطه کمی میان وقوع سیل و این عوامل تعیین می‌شود. فرایند محاسباتی مدل شامل مراحل زیر است:

محاسبه عامل تمرکز^۲

برای هر کلاس از هر عامل (مانند شیب، لیتولوژی، فاصله از رودخانه و...) نسبت تراکم نقاط وقوع پدیده و نقاط فاقد پدیده تعیین می‌شود، تا میزان وابستگی هر کلاس مشخص شود.

محاسبه تابع باور^۳

$$\text{Belief} = P / P + NP \quad (1)$$

مقادیر منفی: تأثیر بازدارنده مقادیر مثبت: تأثیر مثبت عامل

محاسبه تابع غیر باور^۴

$$\text{Disbelief} = NP / P + NP \quad (2)$$

مکمل تابع باور: نشان‌دهنده ضعف ارتباط

1. Empirical Bayesian Framework
2. Contrast Factor
3. Belief
4. Disbelief

محاسبه شاخص نهایی شواهد^۱

علوی و همکاران (۱۴۰۱) بیان می‌کنند که اختلاف میان باور و ضدباور نشان‌دهنده درجه تأثیر واقعی هر عامل در وقوع پدیده است؛ به گونه‌ای که مقادیر بالاتر تابع شواهد (EBF) بیانگر نقش و سهم بیشتر آن عامل در بروز پدیده مورد بررسی است.

$$EBF = \text{Belief} - \text{Disbelief} \quad (۳)$$

مقادیر مثبت: عامل مؤثر در سیلاب مقادیر منفی: عامل بازدارنده

استخراج وزن نسبی

وزن هر عامل از میانگین EBF آن عامل در تمام کلاس‌ها محاسبه می‌شود.

$$WF = \sum EBF / n \quad (۴)$$

ترکیب نتایج در GIS

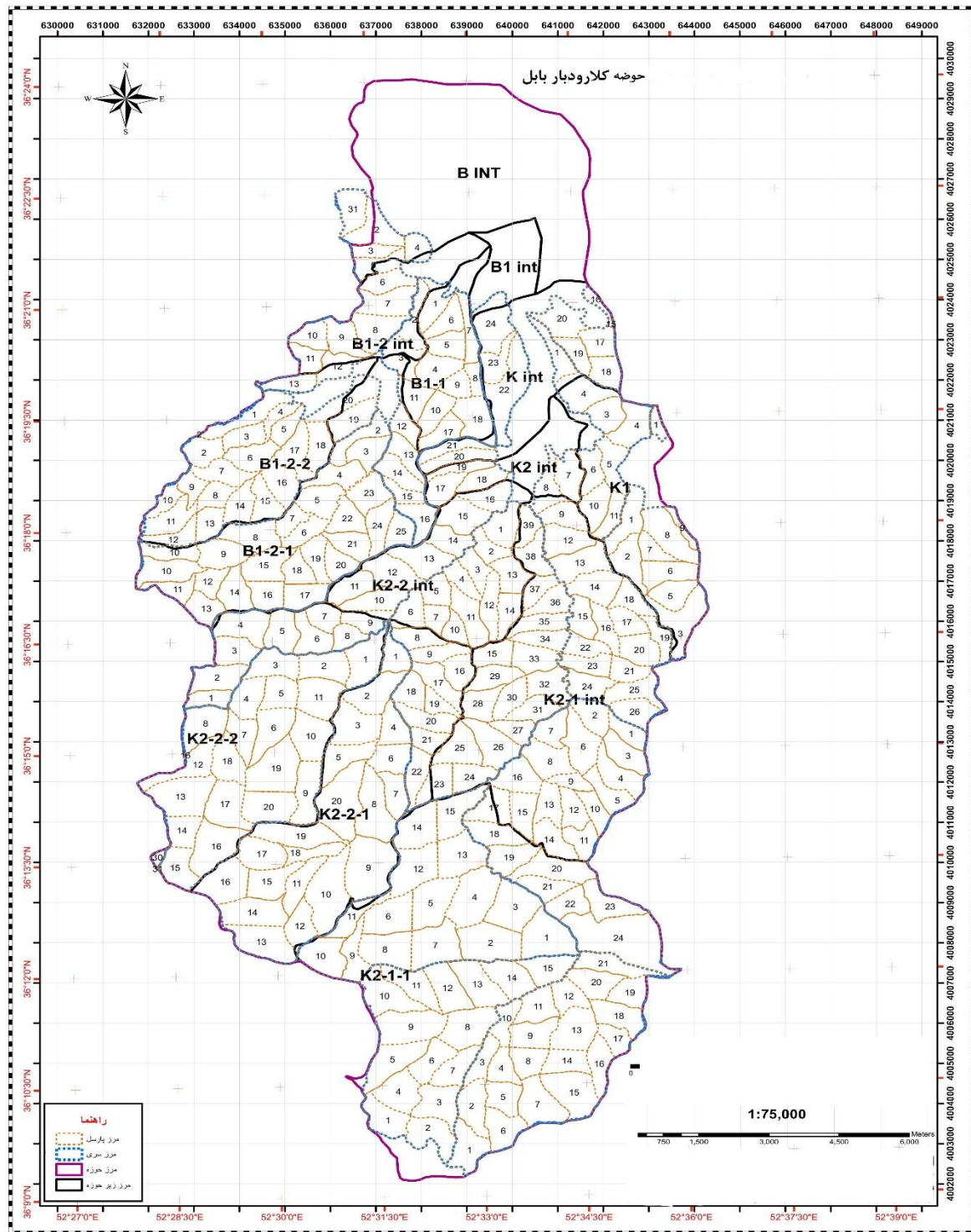
با استفاده از عملگر Raster Calculator، نقشه حساسیت نهایی (احتمال وقوع سیلاب) با فرمول ۵ تهیه می‌شود:

$$\text{Susceptibility} = \sum (WE_i \times EBF_i) \quad (۵)$$

نقشه نهایی به سه کلاس تقسیم می‌شود: Stable (خطر پایین)، Intermediate (خطر متوسط)، Critical (خطر بالا)

معرفی محدوده مورد مطالعه

حوضه آبریز کلارود بابل در استان مازندران واقع شده است. این حوضه از ارتفاعات البرز مرکزی در منطقه بندپی غربی بابل (ارتفاع حدود ۲۲۰۰ متری) آغاز می‌شود و پس از عبور ۶۰ کیلومتر، از میان جنگل‌های هیرکانی عبور می‌کند و به رودخانه بابل‌رود می‌ریزد. محدوده مطالعه بین طول ۲۷' ۵۲° تا ۳۷' ۵۳° شرقی و عرض ۰۸' ۳۶° تا ۲۴' ۳۶° شمالی قرار دارد. وسعت حوضه حدود ۲۱۶ کیلومترمربع، محیط حوضه ۷۹/۳۶ کیلومتر، حداقل ارتفاع ۴۵ متر و حداکثر ارتفاع ۲۲۷۲ متر است. طول آبراهه اصلی ۳۰/۷ کیلومتر است. از لحاظ فیزیوگرافی، حوضه شامل تپ‌های کوهستان، تپه‌ها، فلات و تراس‌های فوقانی است که بیشترین مساحت مربوط به تپه‌ها است. خاک‌ها دارای pH اسیدی تا ترخ، بافت نیمه‌سنگین تا سنگین و عمق نیمه‌عمیق تا خیلی عمیق هستند.



شکل ۲. نقشه زیرحوضه‌ها و پارسل‌بندی حوضه آبریز کلارود بابل (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴)

یافته‌ها

نقشه‌های مربوط به عوامل تأثیرگذار بر وضعیت سیلاب

پس از بررسی مطالعات مختلف، نقشه پارامترهای یادشده در پاراگراف فوق در محیط GIS تهیه و در کلاس‌های مختلف طبقه‌بندی شدند.

ارتفاع

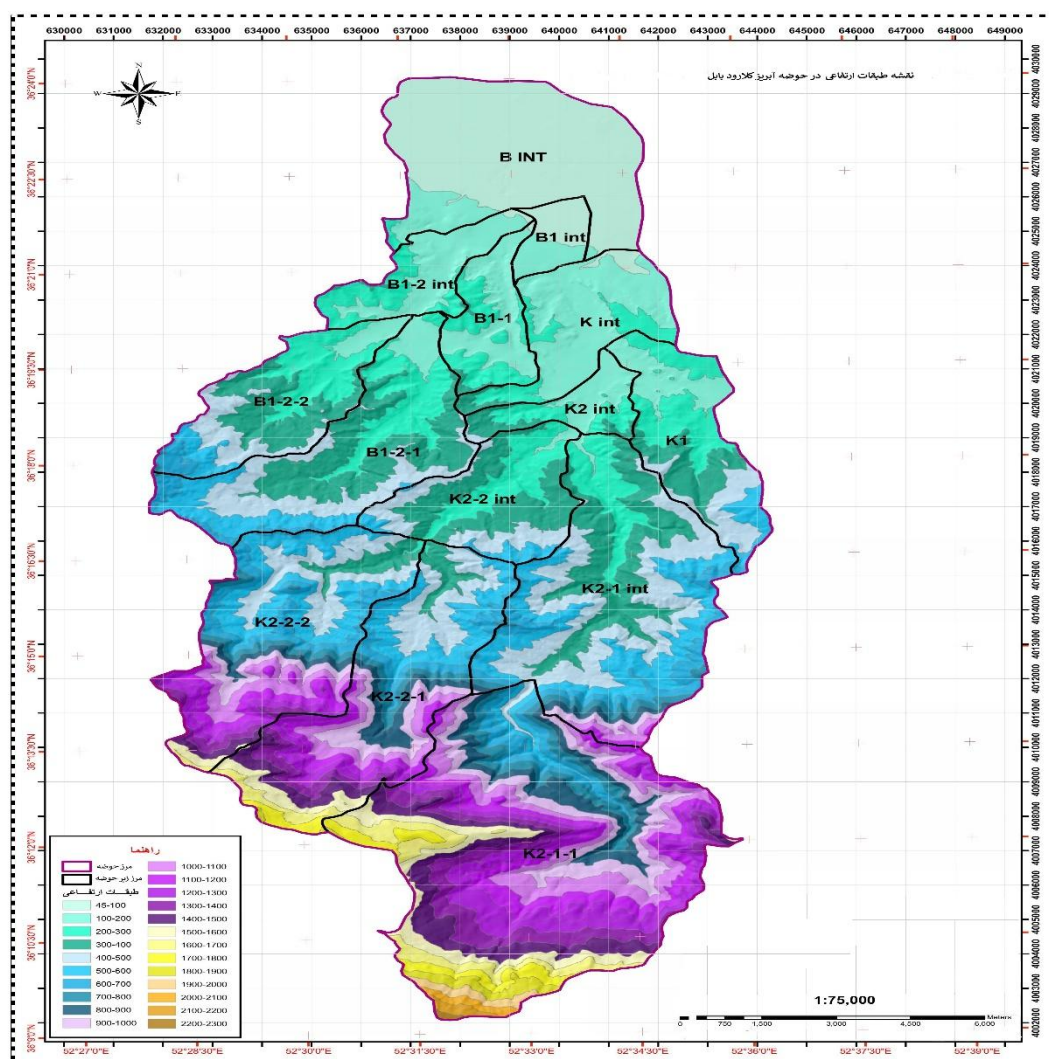
رحمتی و همکاران (۲۰۱۶) بیان کردند که تغییرات ارتفاعی در یک حوضه سبب شکل‌گیری گرادیان‌های اقلیمی و زیست‌محیطی می‌شود و توزیع سطح حوضه در طبقات ارتفاعی، شاخصی مهم برای تحلیل رژیم آبی و رفتار هیدرولوژیکی آن است. همچنین تعیین درصد سطوح در محدوده‌های ارتفاعی مختلف، در ارزیابی پتانسیل بارش، رواناب و تغذیه آب زیرزمینی نقش مؤثری دارد. در این زمینه، با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی دقیق و داده‌های مدل رقومی ارتفاعی (DEM)، مساحت نواحی واقع بین خطوط تراز با فواصل ۱۰۰ متری در حوضه محاسبه شد تا ساختار ارتفاعی و تأثیر آن بر فرایندهای هیدرولوژیکی منطقه، به صورت کمی و علمی مورد ارزیابی قرار گیرد (شکل ۳).

شیب

شیب زمین یکی از مؤلفه‌های اصلی و تعیین‌کننده در پاسخ‌های هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز به بارش و رواناب محسوب می‌شود. زارع و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که در مناطق با شیب زیاد، زمان تمرکز جریان کاهش می‌یابد و فرصت نفوذ آب به درون خاک به حداقل می‌رسد، بنابراین حجم آب تجمع‌یافته در سطح زمین افزایش می‌یابد و احتمال وقوع سیلاب‌های پرشدت بیشتر می‌شود. به طور خلاصه، با افزایش شیب حوضه آبریز، نفوذپذیری خاک کاهش، شدت و حجم رواناب افزایش و در نتیجه پاسخ هیدرولوژیکی سیستم به بارش سریع‌تر و شدیدتر خواهد بود. برای تهیه نقشه شیب از نرم‌افزار ArcGIS 9.3 با توجه به خطوط توپوگرافی با فواصل ۲۰ متری در حوضه برای هر قطعه محاسباتی استفاده شده است. سپس، با توجه به اهداف مورد مطالعه به کلاس‌های شیب (۰-۲، ۲-۵، ۵-۸، ۸-۱۲، ۱۲-۲۰، ۲۰-۳۰، ۳۰-۶۰ و بیشتر از ۶۰ درصد در ۸ کلاس طبقه‌بندی و تفکیک شد (شکل ۴)).

جهت شیب

جهت شیب یکی از پارامترهای بنیادی در تحلیل‌های ژئومورفولوژیکی و هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز است و بیانگر سمتی است که سطح زمین در آن جهت بیشترین انحراف از افق را دارد (ناهین^۱ و همکاران، ۱۴۰۳). به منظور تحلیل کمی این پدیده، لازم است سهم هر کلاس جهت شیب در سطح کل حوضه تعیین شود. برای این هدف، نقشه جهت شیب با استفاده از نرم‌افزار Arc-GIS 9.3 و بر اساس هشت جهت اصلی جغرافیایی (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW) تهیه شد. این نقشه امکان ارزیابی رابطه بین جهت دامنه و فرایندهای تبخیر و تعرق، پوشش گیاهی و پویایی فرسایش را در چارچوب مدل‌های هیدرولوژیکی پیشرفته فراهم می‌سازد (شکل ۵).



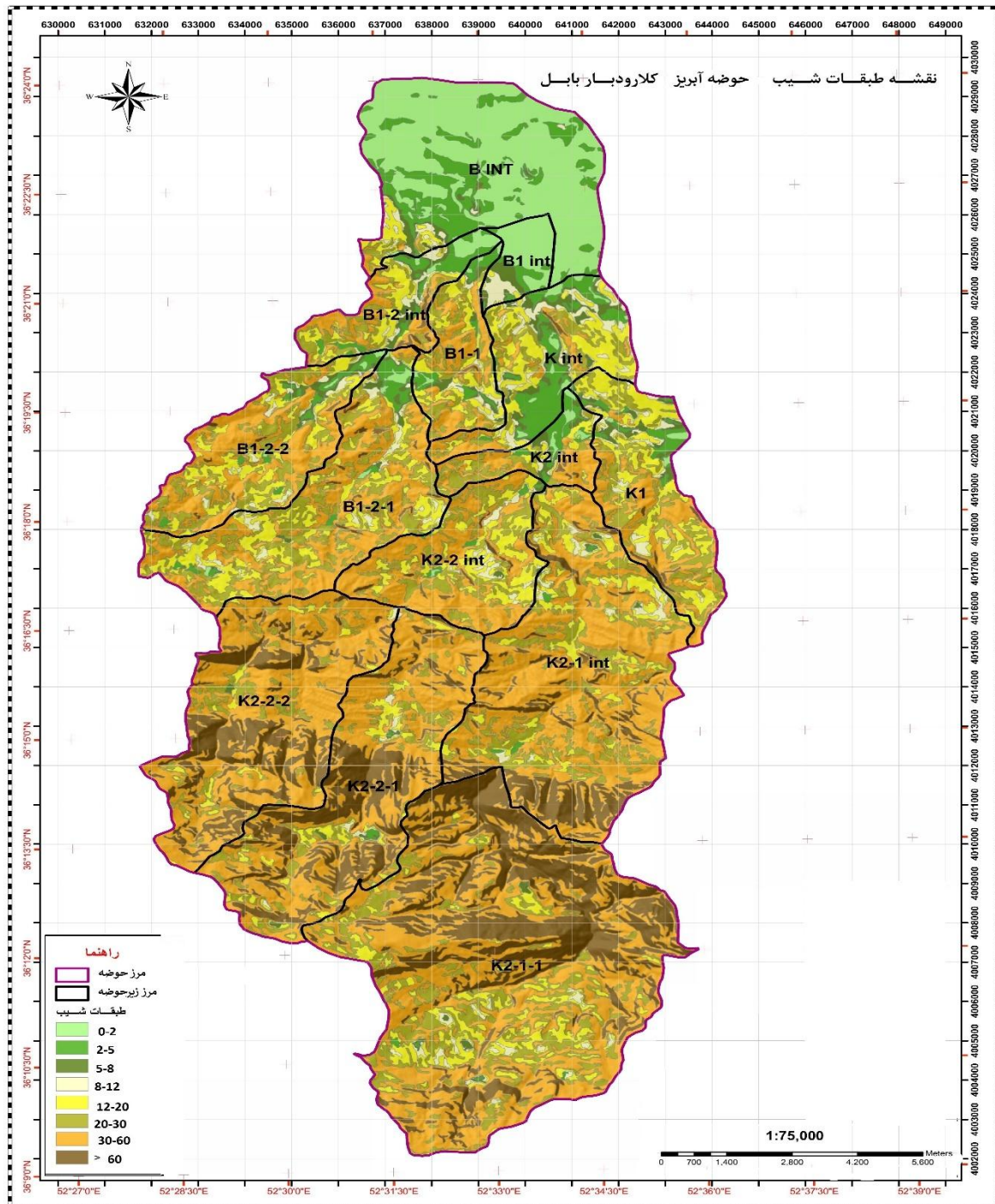
شکل ۳. نقشه طبقات ارتفاعی در حوضه مورد مطالعه (منبع: نگارنگان، ۱۴۰۴)

فاصله از رودخانه

فاصله از رودخانه یک معیار ژئومورفولوژیک کلیدی است که میزان آسیب‌پذیری نقاط مختلف حوضه را نسبت به وقوع سیلاب نشان می‌دهد. مناطق نزدیک به بستر اصلی و شاخه‌های فرعی رودخانه به دلیل قرار گرفتن در مسیر جریان مستقیم آب، بیشترین احتمال وقوع و شدت خسارت را دارند. با افزایش فاصله از رودخانه، به طور معمول احتمال غرقاب شدن و شدت سیلاب کاهش می‌یابد، هرچند که این رابطه می‌تواند تحت تأثیر شیب زمین، تراکم زهکش‌ها و مشخصات سطحی تغییر کند (خان الزهرانی^۱ و همکاران، ۱۴۰۴) طبق بررسی‌های انجام‌شده در حوضه آبریز کلارود:

- مناطق با فاصله کمتر از ۱۰۰ متر از بستر رودخانه، عموماً در کلاس خطر بسیار بالا قرار گرفتند، به‌خصوص در زیرحوضه‌های K2 و K1-2 که بیشترین حجم رواناب ثبت‌شده را داشتند.
- فاصله ۱۰۰ تا ۲۵۰ متر معمولاً در کلاس خطر بالا تا متوسط قرار گرفت، اما در نقاط با شیب پایین و خاک‌های نفوذپذیری کم، خطر همچنان بالا بود.

- در فواصل بیش از ۵۰۰ متر، خطر به طور ملموسی کاهش یافت، مگر در پهنه‌های مسطح با تراکم زهکشی زیاد که جریان‌های سطحی غیرمتمرکز باعث آبگرفتگی می‌شوند.

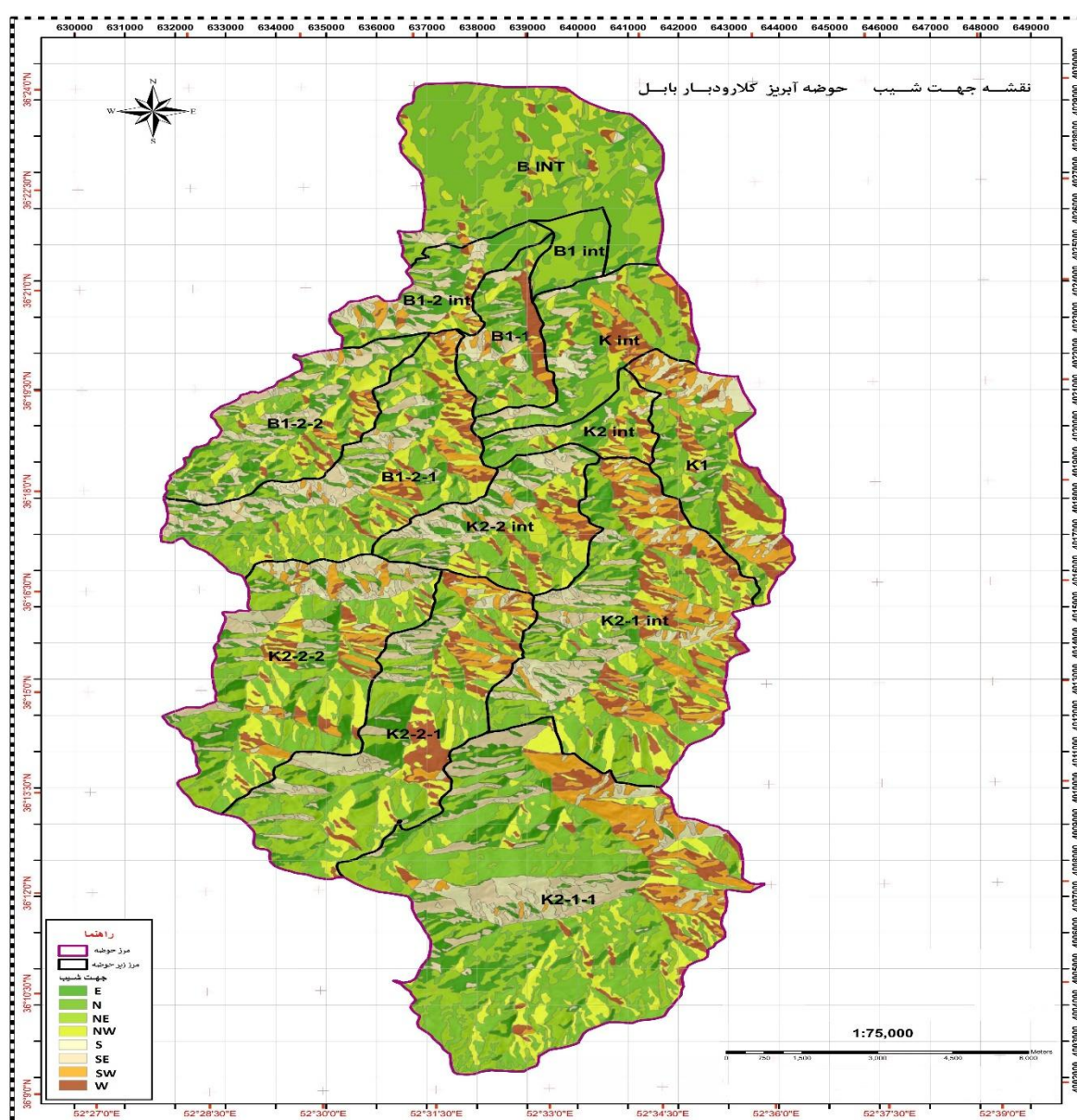


شکل ۴. نقشه شیب در حوضه مورد مطالعه (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴)

تراکم زهکشی

این شاخص بازتابی از ویژگی‌های هندسی حوضه و توانایی آن در هدایت رواناب سطحی به سمت مجرای اصلی است. ویژگی‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی حوضه کلارود باعث شده بخش‌های مختلف آن تراکم‌های متفاوتی داشته باشند:

مناطق کوهستانی جنوب حوضه (مانند محدوده بالادست زیرحوضه K2) دارای شیب‌های تند هستند که باعث شکل‌گیری آبراهه‌های متعدد و تراکم بالاتر می‌شود. واحدهای سنگی کم‌نفوذ (مانند رسوبات رسی یا کنگلومراهای فشرده) آب کمتری را جذب کرده و رواناب بیشتری تولید می‌کنند، در نتیجه تراکم زهکشی افزایش می‌یابد. مناطق دارای کاربری کشاورزی اغلب مسیرهایی برای هدایت آب سطحی ایجاد می‌کنند، ولی پوشش جنگلی و مرتعی متراکم با افزایش نفوذ، تراکم زهکشی مؤثر را کاهش می‌دهد. بارش‌های سنگین و مکرر در حوضه باعث برجسته‌تر شدن شبکه زهکشی می‌شود. بیشترین تراکم زهکشی در زیرحوضه‌های K2 و K2-1 مشاهده شده است که علت آن همزمانی شیب زیاد و سنگ‌های کم‌نفوذ است. بخش‌های دشت پایین‌دست (نزدیک خروجی حوضه) تراکم کمتری دارند، اما به دلیل تمرکز جریان و موانع مصنوعی، همچنان استعداد سیلاب بالایی دارند.



شکل ۵. نقشه جهت شیب در منطقه مطالعاتی (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴)

تعریف شاخص TWI

شاخص رطوبت توپوگرافی^۱ برای حوضه آبریز کلارود می‌تواند مثل فاصله از رودخانه و تراکم زهکشی به عنوان یک ورودی مدل EBF استفاده شود [۱۸].

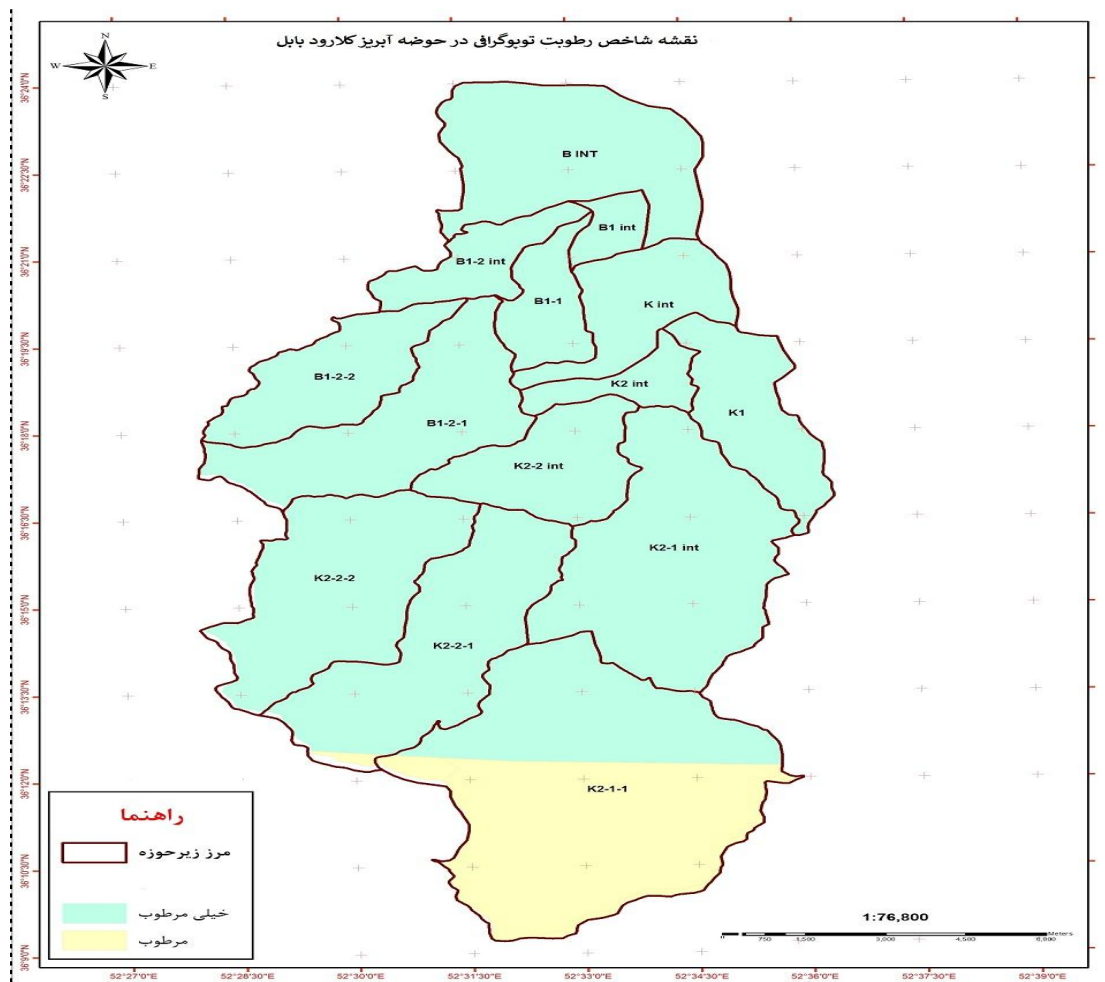
$$TWI = \ln(a/\tan\beta)$$

که در آن:

a = مساحت جریان تجمع^۲ به ازای واحد عرض (m^2/m)، معمولاً از نقشه Flow Accumulation بر اساس DEM به دست می‌آید.

β = زاویه شیب^۳ به رادیان از نقشه شیب DEM محاسبه می‌شود.

L_n = لگاریتم طبیعی.



شکل ۶. نقشه شاخص رطوبت توپوگرافی در حوضه مورد مطالعه (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴)

1. Topographic Wetness Index–TWI
2. Flow Accumulation Area
3. Slope Angle

نتایج حاصل از طبقه‌بندی شاخص TWI به تفکیک زیرحوضه‌ها بیانگر آن است که نواحی دارای مقادیر بالاتر TWI عمدتاً در بخش‌های پایین دست و مجاور زهکش‌های اصلی تجمع دارند؛ این امر بیانگر توان بالاتر این مناطق در نگهداری رطوبت خاک و در نتیجه افزایش احتمال تمرکز رواناب سطحی است (جدول ۱ و شکل ۶).

جدول ۱. محاسبه شاخص TWI به تفکیک زیرحوضه در حوضه آبریز کلارودبار

Subbasin	Mean-TWI	Min-TWI	Max-TWI	Std-TWI	Area-TWI>10-ha
K2-1	293.4	123.1	272.16	310.1	30.14
B	298.7	118.2	637.29	783.2	63.1729
K	619.4	123.1	400.22	615.1	71.132
K2	355.4	123.1	337.20	391.1	66.52
B1	938.5	118.2	637.29	350.2	85.283
K2-2	305.4	372.1	621.19	329.1	82.13
B1-2	665.5	118.2	637.29	795.1	65.109

جدول ۲. جدول شاخص‌های فیزیوگرافی مؤثر بر سیلاب در زیرحوضه‌های حوضه کلارودبار بابل

زیرحوضه	شیب متوسط (%)	ارتفاع میانه (m)	تراکم آبراهه	فاصله از رودخانه (km)	TWI
K1	6.12	560	4.2	6.0	8.7
K2-1-1	8.9	690	2	2.1	9.6
K2-1 int	5.14	540	1.3	5.0	3.8
K2-1	9.8	720	7.1	5.1	3.6
K2-2-1	2.13	590	9.2	7.0	6.7
K2-2-2	4.15	520	3.3	4.0	1.8
K2-2 int	8.17	470	8.3	3.0	9.8
K2-2	4.10	650	2.3	1	2.7
K2 int	1.22	420	1.4	2.0	5.9
K2	2.7	760	6.1	8.1	1.6
K int	5.18	460	5.3	4.0	7.8
K	5.6	770	4.1	2	9.5
B1-1	3.23	410	4.4	3.0	7.9
B1-2-1	4.16	520	3.3	6.0	2.8
B1-2-2	8.14	540	3	5.0	9.7
B1-2 int	6.19	470	6.3	4.0	8.8
B1-2	1.11	620	4.2	1	7
B1 int	2.13	580	8.2	7.0	5.7
B1	4.9	710	9.1	3.1	5.6
B INT	1.8	740	9.1	4.1	2.6

نتایج و بحث

پژوهش حاضر با هدف پهنه‌بندی خطر وقوع سیلاب و تحلیل نقش شاخص‌های فیزیوگرافی مؤثر، با استفاده از مدل تابع شواهد قطعی (EBF) در حوضه آبریز کلارودبار بابل انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد مدل EBF با اتکا بر تلفیق داده‌های مکانی و شاخص‌های توپوگرافی هیدرولوژیک، از توان بالایی در تفکیک فضایی نواحی سیلاب‌خیز برخوردار است و می‌تواند رفتار سیلابی حوضه را با دقت و پایداری بالا بازنمایی کند.

تحلیل تخصصی نقش متغیرهای فیزیوگرافی

نتایج وزن‌دهی و رتبه‌بندی شاخص‌ها (جدول ۴) نشان داد فاصله از رودخانه با وزن نرمال شده ۳۶/۰ و بالاترین مقدار متوسط EBF (۷۲/۳)، مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده خطر سیلاب در حوضه کلارودبار است. تمرکز بالای نقاط سیلابی در فواصل کمتر از ۱۰۰ متر از بستر رودخانه بیانگر نقش غالب فرایندهای سرریز، تمرکز جریان و محدودیت ظرفیت انتقال مجرا در ایجاد سیلاب‌های مخرب است. این یافته مؤید آن است که سیلاب‌خیزی حوضه بیش از آن که تابع یک عامل منفرد باشد، به نزدیکی مکانی به شبکه زهکشی اصلی وابسته است.

شاخص شیب با وزن ۲۸/۰ در رتبه دوم قرار گرفت. زیرحوضه‌هایی با شیب بیش از ۱۵ درصد (نظیر K2-2int و B1-1) عمدتاً در زون‌های Intermediate تا Critical طبقه‌بندی شدند. این امر نشان‌دهنده نقش شیب در کاهش زمان تمرکز، افزایش سرعت رواناب و تشدید پاسخ هیدرولوژیک حوضه است. هم‌زمانی شیب زیاد با سایر عوامل (به‌ویژه تراکم زهکشی) به افزایش چشمگیر حساسیت سیلابی منجر شده است.

ارتفاع میانه با وزن ۰/۱۵، سومین عامل تأثیرگذار شناسایی شد. نتایج نشان داد مناطق کم‌ارتفاع (>۵۰۰ متر)، که عمدتاً در پایین‌دست و دشت حوضه قرار دارند، بیشترین بستر رودخانه بیانگر نقش غالب فرایندهای سرریز، تمرکز جریان و محدودیت ظرفیت انتقال مجرا در ایجاد سیلاب‌های مخرب است. این یافته مؤید آن است که سیلاب‌خیزی حوضه بیش از آن که تابع یک عامل منفرد باشد، به نزدیکی مکانی به شبکه زهکشی اصلی وابسته است.

شاخص تراکم زهکشی با وزن ۲۰/۰ نشان داد زیرحوضه‌هایی با تراکم بالا (<۳)، به‌ویژه در بخش‌های کوهستانی با سنگ‌های کم‌نفوذ، مستعد تولید و انتقال سریع رواناب هستند. اگرچه برخی از این مناطق به طور مستقیم محل وقوع سیلاب نقطه‌ای نیستند، اما به‌عنوان منابع تولید سیلاب برای نواحی پایین‌دست نقش کلیدی ایفا می‌کنند. در مقابل وزن مثبت EBF را کسب کرده‌اند، در حالی که ارتفاعات بالا (<۱۴۰۰ متر) دارای وزن منفی قوی بوده‌اند. این الگو بیانگر نقش مناطق پست به عنوان محل تجمع رواناب‌های تولیدشده در بالادست و تبدیل آن‌ها به سیلاب‌های خسارت‌زا است.

جهت شیب (۱۱/۰) و شاخص رطوبت توپوگرافی TWI (۰۹/۰) کمترین وزن مستقیم را داشتند، اما تحلیل مکانی نشان داد این شاخص‌ها نقش تعدیل‌کننده و تقویت‌کننده دارند. همبستگی مثبت بین TWI و مؤلفه Belief بیانگر آن است که افزایش رطوبت خاک، به‌ویژه در مناطق کم‌شیب و پایین‌دست، احتمال تمرکز رواناب و تشدید سیلاب را افزایش می‌دهد.

نتایج مدل EBF (تلفیق یافته‌های کمی وزن‌ها)، اولویت تأثیر را به شرح زیر نشان می‌دهد: فاصله از رودخانه به عنوان مهم‌ترین عامل کنترلی؛ نزدیکی به آبراهه بیشترین پتانسیل سیلاب را فراهم می‌کند. تراکم زهکشی و شیب، دو عاملی هستند که تأثیر بسیار بالایی دارند، اما با ماهیتی متفاوت. تراکم زیاد و شیب زیاد هم‌زمان، بالاترین خطر را ایجاد می‌کنند. عامل ارتفاع که تأثیر آن از دو عامل قبلی کمتر است، در مناطق کم‌ارتفاع پتانسیل بیشتری دارند.

جدول ۳. جدول شاخص‌های فیزیوگرافی مؤثر بر سیلاب و وزن‌های حاصل از مدل EBF در حوضه کلارود بابل

شاخص	طبقه	متر یا درجه	تعداد نقاط سیل		مقدار N-n	Contrast Factor (CF)	Belief (B)	Disbelief (D)	Uncertainty (U)	EBF Belief Disbelief	وزن نهایی (WF)
			(n)	(N)							
ارتفاع	45-200	15	30.15	30	1.00	0.50	0.50	0	0.00	0.00	
	200-400	20	30.20	10	2.00	0.67	0.33	0	0.34	0.34	
	400-600	18	30.18	12	1.50	0.60	0.40	0	0.20	0.20	
	600-800	12	30.12	18	0.67	0.40	0.60	0	0.20	0.20	
	800-1000	8	30.8	22	0.36	0.27	0.73	0	0.46	0.46	
	1000-1200	5	30.5	25	0.20	0.17	0.83	0	0.66	0.66	
	1200-1400	3	30.3	27	0.11	0.10	0.90	0	0.80	0.80	
	1400-2272	10	30.10	20	0.50	0.33	0.67	0	0.34	0.34	
شیب	0-2	10	30.10	20	0.50	33.0	67.0	0	34.0	34.0	
	2-5	15	30.15	15	0.10	50.0	50.0	0	0	0	
	5-8	20	30.20	10	0.20	67.0	33.0	0	34.0	34.0	
	8-12	18	30.18	12	50.1	60.0	40.0	0	46.0	46.0	
	12-20	12	30.12	18	67.0	40.0	60.0	0	66.0	66.0	
	20-30	8	30.8	22	36.0	27.0	73.0	0	80.0	80.0	
	30-60	5	30.5	25	20.0	17.0	83.0	0	34.0	34.0	
	>60	3	30.3	27	11.0	10.0	90.0	0	80.0	80.0	
فاصله از رودخانه	0-100	20	30.20	10	2.0	0.67	33.0	0	34.0	34.0	
	100-250	15	30.15	15	1.0	50.0	50.0	0	0	0	
	250-500	10	30.10	20	50.0	33.0	67.0	0	34.0	34.0	
	>500	5	30.5	25	20.0	17.0	83.0	0	66.0	66.0	
تراکم زهکشی	کم	5	5.30	20	50.0	33.0	67.0	0	34.0	34.0	
	متوسط	15	15.30	15	1.00	0.50	0.50	0	0	0	
	زیاد	20	20.30	10	2.00	0.67	0.33	0	0.34	0.34	
جهت شیب	N	10	10.30	20	0.50	0.33	0.67	0	0.34	0.34	
	NE	12	12.30	18	0.67	0.40	0.60	0	0.20	0.20	
	E	15	15.30	15	1.00	0.50	0.50	0	0	0	
	SE	18	18.30	12	1.50	0.60	0.40	0	0.20	0.20	
	S	20	20.30	10	2.00	-	-	0	-	-	

جدول ۴. وزن دهی و رتبه بندی شاخص های فیزیوگرافی مؤثر بر خطر وقوع سیلاب بر اساس مدل EBF در حوضه کلارودبار بابل

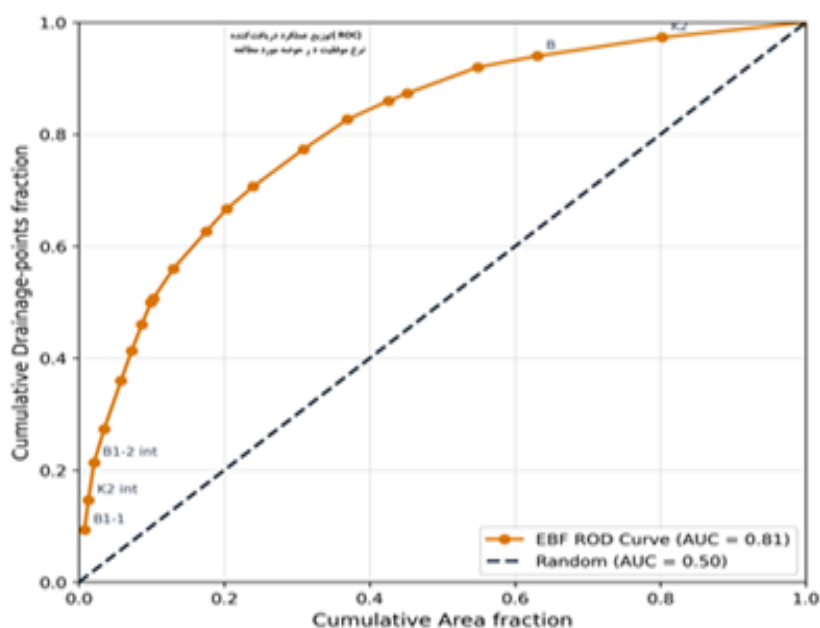
متغیرها	توضیحات و تحلیل	WFi نرمال شده	رتبه تأثیر	نقش در سیلاب	منطق فیزیکی	ضریب تبیین (R ² → پایداری مدل)
شیب (Slope)	در مناطق با شیب بیش از ۱۵ درصد، EBF معمولاً بیش از ۳ است (زون Intermediate تا Critical)، مانند زیرحوضه های K 2-2 int و B1-1 و k2 int	0.28	2	در شیب های بالا تولید رواناب سریع و پاسخ هیدرولوژیک تند	کنترل کننده زمان تمرکز و سرعت رواناب	0.92
جهت شیب (Aspect)	اثر این شاخص غیرمستقیم است ولی بر تشدید سیلاب در نواحی شرقی B1 و K2 نقش دارد.	0.11	5	افزایش رطوبت خاک و رواناب در زمین های کم شیب	شاخص های تعدیل کننده رطوبت و تابش	0.86
ارتفاع میانه (Elevation)	زیرحوضه های پایین دست مانند B1-1 و K2int با ارتفاع کمتر از 500 m در زون بحرانی (EBF > 8) قرار گرفته اند.	0.15	3	مناطق پست محل تمرکز رواناب و بروز سیلاب	تعیین کننده مسیر تجمع جریان از بالادست به پایین دست	0.89
فاصله از رودخانه (Distance to River)	مقدار زیاد حساسیت در زیرحوضه های B1-1 و K2int نتیجه همین شاخص است (فاصله ≈ 0.2-0.3 km).	0.46	بیشترین 1	نشان دهنده اصلی احتمال وقوع سیلاب (مستقیم ترین رابطه فضایی)	بیانگر تمرکز جریان و سرریز بستر	0.94
تراکم آبراهه (Drainage Density)	حوضه های با تراکم بالای 3 مانند K2-2 int و B1-1 دارای EBF زیاد و زون بحرانی اند.	0.20	4	باعث هدایت رواناب و افزایش شدت در پایین دست	شاخص هندسی برای تمرکز شبکه جریان	0.91
شاخص رطوبت توپوگرافی (Topographic Wetness Index - TWI)	شاخصی تقویت کننده است؛ در مناطق پایین دست همراه با شیب پایین باعث افزایش EBF می شود.	0.09	6 کمترین	افزایش رطوبت خاک و رواناب در زمین های کم شیب	شاخص های تعدیل کننده رطوبت و تابش	0.84

نقشه نهایی حساسیت سیلاب، حاصل از ترکیب لایه ها در محیط GIS، حوضه را به سه زون Stable، Intermediate و Critical تقسیم کرد. نتایج نشان داد:

زون Critical عمدتاً در پایین دست حوضه، نزدیک به مجرای اصلی رودخانه، با شیب متوسط تا زیاد و تراکم زهکشی بالا متمرکز است. زون Intermediate بیشتر در بخش های میانی و کوهستانی حوضه مشاهده می شود، جایی که تولید رواناب بالاست اما تمرکز نهایی جریان رخ نمی دهد. زون Stable عمدتاً در ارتفاعات بالاتر، دور از رودخانه و با تراکم زهکشی کم قرار دارد که از پایداری توپوگرافی و اکولوژیکی بیشتری برخوردار است. این الگوی فضایی نشان می دهد سیلاب در حوضه کلارودبار ماهیتی انتقالی دارد، به طوری که تولید رواناب در بالادست و تمرکز و بروز خسارت در پایین دست رخ می دهد.

ارزیابی عملکرد و اعتبار مدل EBF

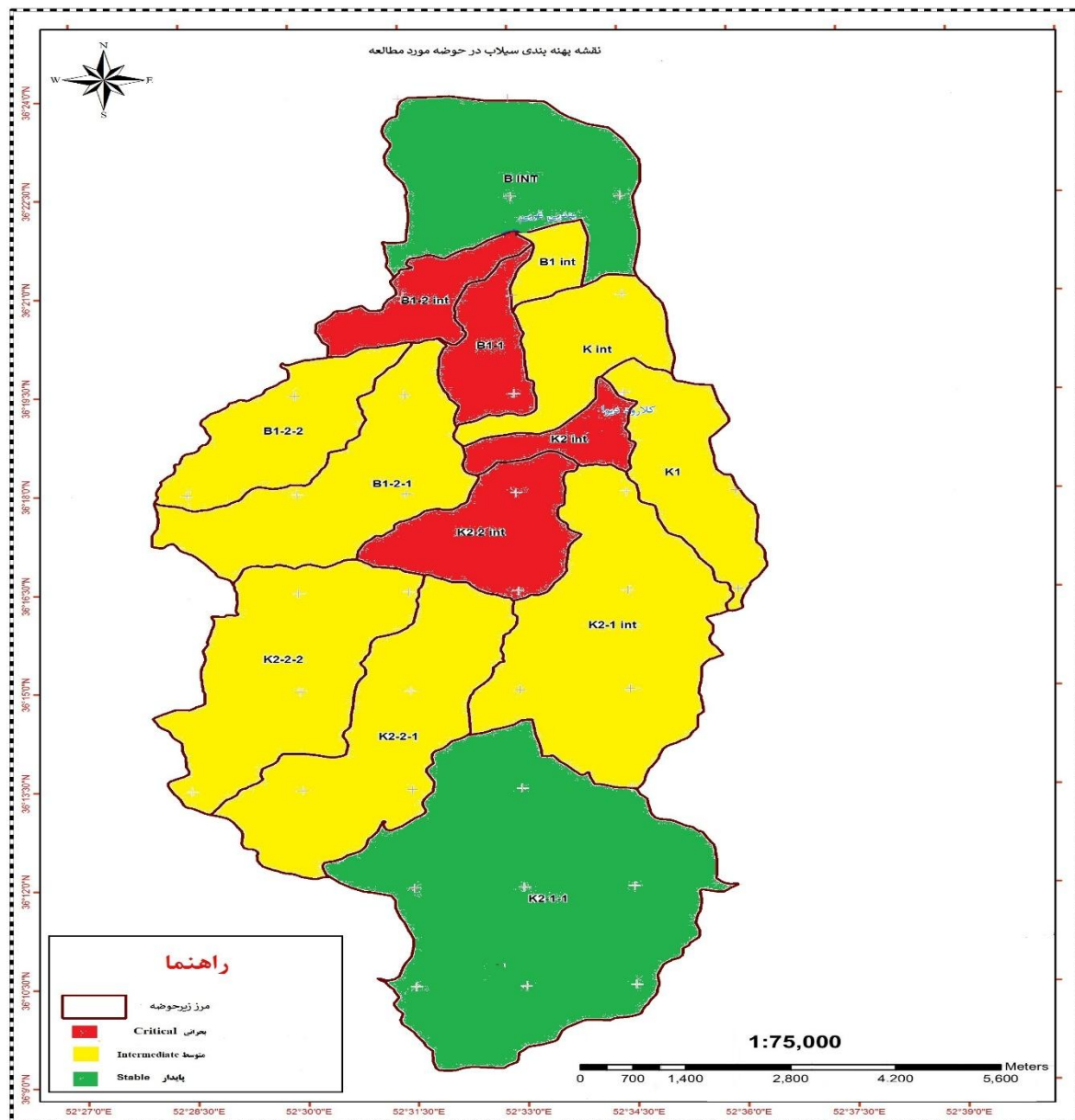
اعتبارسنجی مدل با استفاده از منحنی ROC نشان داد مقدار $AUC \approx 0/94$ و $R^2 \approx 0/94$ به دست آمده است که طبق استانداردهای بین‌المللی در محدوده Excellent قرار می‌گیرد. این مقادیر بیانگر توان بالای مدل در تشخیص صحیح نواحی سیلاب‌خیز (True Positive) و نرخ پایین خطا در شناسایی مناطق غیرسیلابی است. به بیان دیگر، مدل EBF توانسته است با پایداری آماری بالا، انطباق قابل توجهی با واقعیت مکانی رخداد‌های سیلاب نشان دهد (شکل ۷).



شکل ۷. منحنی ROC جهت اعتبارسنجی نتایج در حوضه آبریز کلارود بابل

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

پژوهش حاضر با هدف شناسایی نواحی بحرانی، ارزیابی توان مدل و تحلیل نقش شاخص‌های فیزیوگرافی در رفتار سیلابی انجام شد. مناطق با بیشترین خطر، مناطقی هستند که همزمان در فاصله نزدیک رودخانه قرار داشته، تراکم زهکشی بالایی داشته و دارای شیب زیاد هستند (نواحی بالادست تند، اما نزدیک به مسیر خروجی). مناطق با خطر کم، در ارتفاعات بالا، دور از رودخانه و با تراکم زهکشی کم قرار دارند. دلیل علمی غالب بودن فاصله از رودخانه این است که تمامی فرایندهای هیدرودینامیکی در نهایت در مجرای زهکشی اصلی تخلیه می‌شوند؛ نزدیکی به رودخانه یعنی حضور در مدار مستقیم انرژی جنبشی جریان و احتمال سرریز. از طرف دیگر، شیب و تراکم زهکشی به صورت غیرخطی بر رواناب سطحی اثر دارند و باعث تولید سیلاب نقطه‌ای در زمان کوتاه می‌شوند. نتایج حاصل از تحلیل داده‌های مؤلفه‌ای و منحنی ROC نشان دادند مدل EBF نه تنها توانایی بالایی در تفکیک مناطق آسیب‌پذیر دارد، بلکه می‌تواند به عنوان ابزار تصمیم‌یار برای مدیریت پایدار منابع طبیعی منطقه به کار رود. الگوی فضایی نتایج (شکل ۸ و جدول‌های ۲-۴) نشان داد تأثیر شاخص‌ها نه مستقل بلکه ترکیبی است. مناطقی که همزمان دارای شیب زیاد، تراکم آبراهه بالا و فاصله کمتر از ۲۵۰ متر از رودخانه هستند، در زون Critical (خطر بسیار بالا) قرار گرفته‌اند. این موضوع نشان می‌دهد مدل EBF نه تنها وابستگی مستقیم هر متغیر را شناسایی کرده، بلکه تعامل فضایی بین متغیرها را نیز لحاظ کرده است. به علاوه، همبستگی مثبت میان شاخص TWI و پارامتر Belief دلالت بر آن دارد که افزایش رطوبت خاک ← افزایش تجمع رواناب ← افزایش احتمال وقوع سیلاب. در مقابل، متغیر ارتفاع با وزن منفی در طبقات بالاتر، بیانگر نقش بافر طبیعی ارتفاعات در کاهش سیلاب است.



شکل ۸. نقشه پهنه بندی سیلاب در حوضه مورد مطالعه

تحلیل راهبردی برای توسعه پایدار

کاربرد مدیریتی

پهنه بندی حاصل از مدل EBF می تواند مبنای تعیین کاربری اراضی سازگار با خطر سیلاب باشد. نواحی Stable برای توسعه شهری و زیرساختی مناسب ترند، در حالی که نواحی Critical نیازمند محدودیت های ساخت و ساز، احیای پوشش گیاهی، و مدیریت رواناب هستند.

ارزیابی اثرات توسعه

توسعه جاده‌ها و ساخت‌وساز بدون توجه به زون EBF در نواحی پایین‌دست، ریسک خسارت‌های ناشی از سیلاب را به شدت افزایش می‌دهد. استفاده از مدل EBF می‌تواند هشدارهای اولیه برای مکان‌یابی ایمن زیرساخت‌ها ارائه دهد.

تناسب با توسعه پایدار

مدل EBF با ردیابی فیزیوگرافی طبیعی حوضه، امکان تلفیق برنامه‌ریزی محیطی و مدیریت خطر را فراهم کرده و به سمت راهبردهای توسعه پایدار هدایت می‌کند:

- کنترل بهره‌برداری اراضی با توجه به شاخص EBF.
- تقویت پوشش گیاهی در نواحی بحرانی.
- اعمال سیاست‌های حفاظتی در مناطق با $EBF \geq 4$.
- مکان‌یابی پروژه‌های عمرانی در زون‌های Stable و Intermediate.

مدل تابع شواهد قطعی EBF در پهنه‌بندی خطر سیلاب حوضه کلارود بابل قادر است نواحی آسیب‌پذیر را شناسایی کرده، ساختار هیدرولوژیک منطقه را تبیین کند و شاخصی معتبر برای راهبردهای توسعه پایدار ارائه دهد. کاربرد این مدل می‌تواند به صورت مؤثر در تصمیم‌گیری زیست‌محیطی، ارزیابی اثرات توسعه و کاهش خطر سیل در طرح‌های آمایش سرزمین بهره‌برداری شود. نتایج مدل EBF در حوضه کلارود بیانگر عملکرد علمی و مدیریتی قابل اطمینان است؛ این مدل نه تنها در تحلیل خطر سیلاب مؤثر بوده، بلکه به‌عنوان ابزاری برای سیاست‌گذاری و طراحی سناریوهای توسعه پایدار با کمترین ریسک محیطی قابلیت کاربرد دارد.

- 1 Azad Talab, M., Mehnaz, Sh., Shahabi, H., Heiman, Sh., Shirzadi, A., Ataollah, Ch., Kamran. 2020. Flood hazard zoning in Sanandaj city using combined statistical index and evidential belief function models. *Urban Studies Quarterly*, 9(36), 40–27. (in Persian).
- 2 Alavi, N., Khademi, K., & Moradi, M. 2022. Landslide hazard zoning using the evidential belief function (EBF) model in a GIS environment: A case study of the Dez watershed. *Geomorphological Research*, 13(2), 115–130. Shahid Beheshti University, Tehran (in Persian)
- 3 Abbasi, S. 2021. Evaluation of urban resilience against floods with a sustainable development approach: A case study of Shiraz City. *Sustainable Urban Management Quarterly*, 8(3), 65–82. University of Shiraz. (in Persian).
- 4 Bui, D. T., Khosravi, K., Shahabi, H., et al. 2023. Prediction of flood-prone areas using ensemble machine-learning models and topographic indices in GIS environment. *Journal of Hydrology*, 617, 129037. (in Persian)
- 5 Beven, K. J., & Kirkby, M. J. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), 43–69.
- 6 Bui, D. T., Rahmati, M., & Dou, T. T. 2022. Flood susceptibility assessment using geomorphological indices and distance from rivers in a GIS environment (Case study: Northern Iran). *Hydrology and Earth Sciences Research Quarterly*, 17(2), 95–110. (in Persian).
- 7 Davand, Kh., Shahabi, H., & Salari, M. 2021. Flood hazard zoning in Ilam city using the evidential belief function (EBF) model. *Geography and Environmental Hazards*, 10(2), 1–20. (in Persian).
- 8 Esmaceli, R., Mohammadi, F., & Ghanbari, M. 2024. The importance of controlling the consequences of coastal floods with a sustainable coastal tourism development approach. *Journal of Environmental Management and Planning*, 11(1), 45–62. University of Gilan (in Persian).
- 9 ESRI. 2008. *ArcGIS 9.3 Desktop Help: Surface Analysis and Slope Calculation*. Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA, USA.
- 10 Fallah, F., Zeynivand, H., Tahmasbipour, N., & Haghi Zadeh, A. 2023. Identification of flood-prone areas using the evidential belief function (EBF) model: A case study of Silakhor plain in Lorestan Province. *Applied Water Engineering Research*, 1, 138–149. (in Persian).
- 11 Forests, Rangelands and Watershed Management Organization of Iran. 2020. *Basic watershed management studies report of Kelarud bar basin, Babol County (Mazandaran Province)*.
- 12 Hejazi, S. A., Rezaei Moghaddam, M. H., Karami, F., Yarahmadi, J., & Bigham, A. 2022. Flood potential and prioritization of areas in terms of flood susceptibility for erosion control in the Hajilar watershed. *Journal of Environmental Erosion Research*, 12(3), 41–56. (in Persian).

- 13 Khan, N. A., Alzahrani, H., Bai, S., Hussain, M., Tayyab, M., Ullah, S., Ullah, K., & Khalid, S. 2025. Flood risk assessment in the Swat River catchment through GIS-based multi-criteria decision analysis. *Frontiers in Environmental Science*, 13, Article 1567796 .
- 14 Manbari, F., Maleki, A., & Nayeri, H. 2023. Factor analysis of morphometric parameters and flood modeling: A case study of the watersheds in Kurdistan Province. *Quantitative Geomorphology Research*, 12(1), 224–24. (in Persian).
- 15 Nahin, K. T. K., Islam, S., & Sumaiya Binte, I. (2023). Flood vulnerability assessment in the Jamuna River floodplain using multi-criteria decision analysis: A case study in Jamalpur district, Bangladesh. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14520>. *Heliyon*, 9(4).
- 16 Oskouhi, M., Rezaei, S., and Ahmadi, N. 2023. An analysis of flood governance and risk management with a sustainable development approach. *Journal of Natural Hazards Management and Water Governance*, 10(2), 85–102. University of Tehran. (in Persian).
- 17 Rajabi, M., Roostaei, Sh., & Barzkar, M. 2022. Assessment of flood potential in sub-watersheds based on morphometric parameters and correlation analysis (Case study: Zab–Mirabad watershed). *Geography and Planning*, 26(79), 127–139. (In Persian).
- 18 Rahmati, O., Pour Ghasemi, H. R., & Zeini Vand, H. 2016. Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(2), 155. (in Persian).
- 19 Rezaei Moghaddam, M. H., Rajabi, M., & Mousavi, S. M. 2024. Flood hazard zoning in the Rud Zard watershed using the multi-criteria decision analysis VIKOR model. *Journal of Natural Environmental Hazards*, (41, Autumn 2024), 19–38. (in Persian).
- 20 Tehrani MS, Shabani F, Javier DN, Kumar L. 2018. Soil erosion susceptibility mapping for current and 2100 climate conditions using evidential belief function and frequency ratio. *Geomat Nat Hazard Risk* 8:1695–1714. (in Persian).
- 21 Zare, S., et al. 2019. Analysis of the effects of slope and land use on surface runoff in the northern watersheds of Iran. *Iranian Journal of Earth Sciences*, 49(3), 211–223. (in Persian).