



Evaluation of the Role of Spatial Neighborhood Structures in Flood Susceptibility Zonation Using the Fuzzy Weighting Model (Case Study: Abdollah-Abad Watershed, Semnan)

Peyman Peymankhah¹, Mohammadreza Jelokhani Niaraki^{2*}, Saeid Hamzeh³

1. PhD Student of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: P.Peymankhah@ut.ac.ir
2. Associate Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: Mrjelokhani@ut.ac.ir
3. Associate Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: Saeid.hamzeh@ut.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received 02 April 2026 Revised 11 May 2026 Accepted 08 June 2026 Available online 22 June 2026 Keywords: Flood susceptibility zonation, Fuzzy AHP, Fuzzy overlay, Boundary-based, Distance-based.	Objective: This study aimed to zone the flood susceptibility in the Abdollah-Abad watershed of Sorkheh County, with an emphasis on evaluating the role of spatial neighborhood structures in improving spatial analyses. Given the limited availability of hydrological data in many watersheds, the use of multi-criteria analysis and fuzzy logic provides an effective approach for identifying flood-prone areas. Method: Nine environmental criteria influencing flood occurrence were analyzed in a GIS environment. First, thematic layers were standardized using fuzzy membership functions, and the weights of the criteria were determined through the Analytic Hierarchy Process (AHP). The flood susceptibility map was then generated using the fuzzy Gamma operator. To examine the effects of spatial dependencies, two types of spatial neighborhood structures, distance-based and boundary-based were incorporated into the model, and the final map was produced by integrating their outputs. Results: The results indicated that slope and precipitation had the highest influence on flood susceptibility. Comparing the baseline model with the models incorporating neighborhood structures showed that applying spatial neighborhoods reduced spatial noise and increased the spatial continuity of susceptibility zones. The distance-based structure smoothed spatial patterns by accounting for the gradual influence of adjacent units, whereas the boundary-based structure enhanced the continuity along the boundaries of hazard classes. The final flood susceptibility map revealed that the moderate class occupies the largest proportion of the watershed (42.24%), followed by the high (26.70%) and low (21.78%) classes, whereas the very high and very low classes represent only 2.35% and 6.93% of the total area, respectively. Conclusions: The findings demonstrate that integrating fuzzy logic, multi-criteria decision-making methods, and spatial neighborhood structures provides an effective framework for flood susceptibility zonation. Considering spatial dependencies among spatial units enhances the coherence of output maps and leads to a more accurate understanding of the spatial pattern of flood susceptibility. This approach can support flood-risk management and land-use planning.

Cite this article: Peymankhah, P., Jelokhani Niaraki, M., Hamzeh, S. (2026). Evaluation of the Role of Spatial Neighborhood Structures in Flood Susceptibility Zonation Using the Fuzzy Weighting Model (Case Study: Abdollah-Abad Watershed, Semnan). *Journal of Ecohydrology*, 13(2), 1268-1295.
<https://doi.org/10.22059/ije.2026.412878.1912>



© Peyman Peymankhah, Mohammadreza Jelokhani Niaraki, Saeid Hamzeh.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ije.2026.412878.1912>

Introduction

Floods are among the most frequent and destructive natural hazards, causing significant environmental damage, economic losses, and threats to human life. Identifying areas that are susceptible to flooding is therefore an essential step for effective watershed management, land-use planning, and disaster risk reduction. In many regions, especially in semi-arid environments, the lack of long-term hydrological and discharge data limits the application of traditional hydrological models for flood analysis. As a result, spatial decision-making approaches that integrate environmental indicators have increasingly been used for flood susceptibility assessment. Geographic Information Systems (GIS) combined with multi-criteria decision-making (MCDM) techniques and fuzzy logic provide powerful tools for handling spatial uncertainty and integrating heterogeneous datasets. Despite the extensive use of fuzzy models in flood susceptibility mapping, many studies treat spatial units independently and often overlook spatial dependency between neighboring areas. However, environmental processes such as surface runoff and water accumulation are inherently spatial and influenced by surrounding conditions. Therefore, incorporating spatial neighborhood structures into flood susceptibility analysis may improve the realism and spatial consistency of the results. Accordingly, the main objective of this study is to map flood susceptibility in the Abdollah-Abad watershed located in Sorkheh County, Iran, while evaluating the role of spatial neighborhood structures in improving the spatial pattern of flood susceptibility maps.

Method

The present study was conducted in the Abdollah-Abad watershed using a GIS-based multi-criteria approach combined with fuzzy logic. A set of environmental factors influencing flood occurrence was selected based on literature review and data availability. These factors included slope, elevation, rainfall, lithology, geomorphology, land use, land cover, drainage density and distance from streams. Spatial datasets related to each factor were prepared and processed in the GIS environment to generate thematic layers. To address uncertainty and variability in the data, all criteria were standardized using fuzzy membership functions. This process transformed the original values of each factor into a continuous scale ranging from 0 to 1, representing the degree of membership in flood susceptibility.

The relative importance of the criteria was determined using the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP). Expert judgments and pairwise comparisons were applied to calculate the weights of each factor, ensuring a structured and consistent decision-making process. After determining the weights, the standardized layers were integrated using the fuzzy gamma operator to generate the initial flood susceptibility map.

To examine the influence of spatial dependency, two types of spatial neighborhood structures were applied to the model outputs: distance-based and boundary-based neighborhoods. The distance-based approach considers the influence of surrounding cells based on their spatial distance, allowing gradual interaction between neighboring areas. In contrast, the boundary-based structure emphasizes the direct adjacency of spatial units and analyzes relationships based on shared borders. Finally, the results obtained from the base model and the two neighborhood structures were combined to produce a final flood susceptibility map for the study area.

Results

The results of the FAHP weighting process indicated that slope and rainfall were the most influential factors controlling flood susceptibility in the study area. Steeper slopes contribute to faster runoff concentration, while higher rainfall intensity increases the likelihood of surface

flow accumulation and flood generation. Other variables such as lithology, land use, and drainage density also showed notable contributions to the spatial distribution of flood susceptibility.

The initial flood susceptibility map produced using the fuzzy gamma operator revealed that different parts of the watershed fall into varying susceptibility classes. However, the spatial pattern of the base model contained scattered patches and abrupt transitions between classes. When spatial neighborhood structures were incorporated, noticeable improvements were observed in the spatial consistency of the results. The distance-based neighborhood reduced local fluctuations and smoothed spatial patterns by considering the gradual influence of surrounding cells. Meanwhile, the boundary-based neighborhood enhanced the continuity of susceptibility zones by emphasizing the relationship between directly adjacent spatial units. The combined final map demonstrated a more coherent spatial pattern of flood susceptibility distribution. According to the results, a considerable portion of the Abdollah-Abad watershed falls within moderate to high flood susceptibility classes. These areas are primarily located in zones characterized by higher rainfall, steeper slopes, and lithological formations with lower permeability, which facilitate rapid runoff generation.

Conclusions

The findings of this study highlight the effectiveness of integrating fuzzy logic, multi-criteria decision-making methods, and spatial neighborhood analysis for flood susceptibility mapping. The use of FAHP allowed for a systematic evaluation of the relative importance of environmental factors, while fuzzy standardization helped address uncertainties in spatial data. Incorporating spatial neighborhood structures significantly improved the spatial coherence of the resulting maps by accounting for spatial dependency among neighboring units.

The results indicate that considering spatial relationships between environmental units can enhance the realism and interpretability of flood susceptibility assessments. The proposed approach is particularly useful in regions where hydrological observations are limited or unavailable. Therefore, the methodology applied in this study can serve as a practical framework for flood risk assessment, watershed management, and spatial planning. By identifying areas with higher flood susceptibility, decision-makers and planners can prioritize mitigation strategies, improve land-use management, and reduce the potential impacts of flood events in vulnerable regions.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Credit authorship contribution statement

The contributions of the authors to this research are as follows:

First author: Data collection and analysis, conducting the research, and writing the initial draft of the manuscript.

Second and third authors: Supervision, editing, reviewing, and validation of the results.

Conflict of interest

According to the authors' statement, this article has no conflict of interest.

Ethical considerations

The authors have observed ethical principles in conducting and publishing this scientific research, and this has been confirmed by all of them.

Data availability statement

The data used in this study are available upon request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Semnan Provincial Meteorological Organization for their cooperation and for providing the data used in this research. The authors also appreciate the anonymous reviewers for their constructive and scientific comments.



ارزیابی نقش ساختارهای همسایگی مکانی در پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی بر پایه مدل وزن‌دهی فازی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز عبدالله‌آباد سمنان)

پیمان پیمان‌خواه^۱، محمدرضا جلوخانی نیارکی^۲، سعید حمزه^۳

۱. دانشجوی دکتری سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران، رایانامه: P.Peymankhah@ut.ac.ir

۲. دانشیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران، رایانامه: Mrjelokhani@ut.ac.ir

۳. دانشیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران، رایانامه: Saeid.hamzeh@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف: هدف این پژوهش، پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی در حوضه آبخیز عبدالله‌آباد شهرستان سرخه با تأکید بر بررسی نقش ساختارهای همسایگی مکانی در بهبود تحلیل‌های فضایی بود. با توجه به محدودیت داده‌های هیدرولوژیکی در بسیاری از حوضه‌ها، استفاده از روش‌های مبتنی بر تحلیل چندمعیاره و منطق فازی می‌تواند رویکردی مناسب برای شناسایی مناطق مستعد سیلاب فراهم کند.

نوع مقاله: پژوهشی

روش پژوهش: در این پژوهش عوامل مؤثر در بروز سیلاب شامل ۹ معیار محیطی مؤثر بر بروز سیلاب در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی تحلیل شدند. ابتدا لایه‌های اطلاعاتی با استفاده از توابع عضویت فازی استانداردسازی شدند و سپس وزن معیارها با روش تحلیل سلسله‌مراتبی تعیین شد. در ادامه، نقشه پتانسیل سیل‌خیزی با استفاده از عملگر گامای فازی تولید شد. به منظور بررسی اثر وابستگی‌های فضایی، دو نوع ساختار همسایگی مکانی شامل Distance-based و Boundary-based بر نتایج مدل اعمال و در نهایت نقشه نهایی از ترکیب نتایج تهیه شد.

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۳۰۵/۰۱/۱۳

تاریخ بازنگری: ۱۳۰۵/۰۲/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۰۵/۰۳/۱۸

تاریخ انتشار: ۱۳۰۵/۰۴/۰۱

یافته‌ها: نتایج نشان داد شیب و بارش بیشترین نقش را در تعیین پتانسیل سیل‌خیزی دارند. مقایسه نقشه‌های حاصل از مدل پایه و مدل‌های دارای ساختار همسایگی نشان داد اعمال همسایگی مکانی موجب کاهش پراکندگی لکه‌ای و افزایش پیوستگی فضایی پهنه‌های خطر می‌شود. ساختار Distance-based با در نظر گرفتن تأثیر تدریجی واحدهای مجاور باعث هموارسازی الگوهای فضایی شد، در حالی که ساختار Boundary-based پیوستگی بیشتری در مرز پهنه‌های خطر ایجاد کرد. براساس نتایج حاصل ۴۲/۲۴ درصد از مساحت حوضه در طبقه پتانسیل متوسط، ۲۶/۷۰ درصد در طبقه پتانسیل زیاد و ۲۱/۷۸ درصد در طبقه پتانسیل کم قرار دارد، در حالی که طبقات بسیار زیاد و بسیار کم به ترتیب تنها ۲/۳۵ و ۶/۹۳ درصد از مساحت حوضه را شامل می‌شوند.

کلیدواژه‌ها:

پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی،

AHP فازی،

همپوشانی فازی،

مرز مینا،

فاصله مینا.

نتیجه‌گیری: نتایج پژوهش نشان می‌دهد ترکیب منطق فازی، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و تحلیل ساختارهای همسایگی مکانی می‌تواند چارچوبی کارآمد برای پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی فراهم کند. در نظر گرفتن وابستگی‌های فضایی میان واحدهای مکانی موجب افزایش انسجام نقشه‌های خروجی و درک دقیق‌تر الگوی فضایی پتانسیل سیل‌خیزی می‌شود و می‌تواند در مدیریت ریسک سیلاب و برنامه‌ریزی کاربری اراضی مورد استفاده قرار گیرد.

استناد: پیمان‌خواه، پیمان؛ جلوخانی نیارکی، محمدرضا؛ حمزه، سعید؛ (۱۴۰۵). ارزیابی نقش ساختارهای همسایگی مکانی در پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی بر پایه



مدل وزن‌دهی فازی (مطالعه موردی: حوضه عبدالله‌آباد سمنان) مجله اکوهیدرولوژی، ۱۳(۲)، ۱۲۹۵-۱۲۶۸

<https://doi.org/10.22059/ije.2026.412878.1912>

© نویسندگان: پیمان پیمان‌خواه، محمدرضا جلوخانی نیارکی، سعید حمزه

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

سیلاب از پرخطرترین بلایای طبیعی است که به دلیل ماهیت ناگهانی و گستره اثرگذاری وسیع، سالانه خسارت‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی سنگینی به جا می‌گذارد (اسمیت و وارد، ۱۹۹۸). افزایش فرکانس و شدت سیلاب‌ها در دهه‌های اخیر، که بخشی از آن ناشی از تغییرات اقلیمی و بخشی دیگر نتیجه فعالیت‌های انسانی مانند تغییر کاربری اراضی، کاهش پوشش گیاهی و گسترش شهرنشینی است، ضرورت مطالعات پیشگیرانه را بیش از پیش آشکار کرده است (پرادهان، ۲۰۱۰).

در این راستا، یکی از ابزارهای کلیدی برای مدیریت ریسک سیلاب، تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی است. با این حال، لازم است میان نقشه‌های خطر سیلاب و نقشه‌های پتانسیل سیل‌خیزی تمایز قائل شد. نقشه‌های خطر سیلاب معمولاً بر پایه رخداد‌های تاریخی، داده‌های هیدرولوژیکی و مدل‌های هیدرودینامیک تهیه می‌شوند و نواحی تحت تأثیر سیلاب را با توجه به دوره بازگشت مشخص، مانند سیلاب‌های ۲۵ یا ۱۰۰ ساله، نمایش می‌دهند. در مقابل، نقشه‌های پتانسیل سیل‌خیزی با استفاده از پارامترهای محیطی و مکانی مانند شیب، ارتفاع، بارش، پوشش گیاهی و کاربری اراضی، مناطق مستعد وقوع سیلاب را حتی در شرایط نبود داده‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی دقیق مشخص می‌کنند. این نوع نقشه‌ها به‌ویژه در کشورهایی مانند ایران اهمیت زیادی دارند، زیرا بسیاری از حوضه‌های آبخیز فاقد داده‌های بلندمدت و دقیق هیدرولوژیکی و هیدرولیکی هستند و در نتیجه، امکان مدل‌سازی دقیق جریان‌های سیلابی در همه مناطق فراهم نیست. در چنین شرایطی، بهره‌گیری از تحلیل‌های مکانی و مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند ابزار مؤثری برای شناسایی و اولویت‌بندی نواحی مستعد سیلاب باشد (اشفق و همکاران، ۲۰۲۵).

اهمیت این مطالعات در ایران نه تنها به دلیل شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک و بارش‌های رگباری کوتاه‌مدت است، بلکه به دلیل رشد سریع شهرنشینی در حاشیه رودخانه‌ها و افزایش بهره‌برداری ناپایدار از اراضی نیز دوچندان می‌شود. در نتیجه، پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی می‌تواند مبنای برنامه‌ریزی شهری، حفاظت از زیرساخت‌ها، مدیریت منابع طبیعی و کاهش خسارت‌های جانی و مالی باشد (سیکمز و همکاران، ۲۰۲۵).

پیشینه پژوهش

پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی در دهه‌های اخیر با بهره‌گیری از داده‌های سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) مورد توجه گسترده پژوهشگران قرار گرفته است. بخش قابل توجهی از مطالعات داخلی از رویکردهای فازی و روش‌های وزن‌دهی تصمیم‌گیری چندمعیاره برای ارزیابی حساسیت مناطق مختلف به سیلاب استفاده کرده‌اند. برای مثال، محمودزاده و باکوئی (۱۳۹۷) با به‌کارگیری منطق فازی در محیط GIS به پهنه‌بندی سیلاب شهر ساری پرداختند و نشان دادند مرکز و جنوب شهر بیشترین خطر را تجربه می‌کنند. همچنین، نجفی و کریمی کرک‌آبادی (۱۳۹۹) با استفاده از مدل ترکیبی AHP-Fuzzy در منطقه ۱ تهران دریافتند که حدود یک‌چهارم محدوده در پهنه خطر زیاد و بسیار زیاد قرار دارد. سایر مطالعات داخلی نیز با توسعه مدل‌های مبتنی بر تصمیم‌گیری چندمعیاره تلاش کرده‌اند عوامل مؤثر بر وقوع سیلاب را استخراج و وزن‌دهی کنند. از جمله، سامی و عبادی (۱۴۰۳) با ترکیب ANP و منطق فازی نشان دادند فاصله از آبراهه مهم‌ترین عامل در وقوع سیلاب شهر مراغه است. در کنار رویکردهای فازی، برخی پژوهش‌ها از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تحلیل پتانسیل خطر سیلاب بهره گرفته‌اند. کاظمی و جعفرپور (۱۴۰۳) با استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین در حوضه کارون بزرگ، پوشش گیاهی، بارش تجمعی و ویژگی‌های رطوبتی خاک را مهم‌ترین متغیرهای مؤثر بر سیل‌خیزی تشخیص دادند. عابدینی و همکاران (۱۴۰۴) نیز با استفاده از مدل ANP در حوضه رضی‌چای، شیب، ارتفاع و کاربری اراضی را عوامل غالب در شکل‌گیری سیلاب معرفی کردند.

در سطح بین‌المللی نیز رویکردهای ترکیبی GIS و مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره همچنان از رایج‌ترین روش‌های پهنه‌بندی سیل‌خیزی هستند. یودینگ و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از Fuzzy AHP نشان دادند مجاورت با شبکه زهکشی و انباشت جریان از مهم‌ترین شاخص‌های مؤثر بر پتانسیل سیل‌خیزی است. زنگ و همکاران (۲۰۲۰) با بهره‌گیری از روش دلفی فازی و مدل ANP به ارزیابی مقاومت اجتماعی در برابر سیلاب پرداختند و نشان دادند ساختار فضایی کاربری اراضی نقش مهمی در تاب‌آوری جامعه دارد. راشتنیا و جهان‌بانی (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای مبتنی بر مدل فازی در شهر ملبورن، فاصله از رودخانه و میزان بارش را

عوامل تعیین کننده آسیب پذیری معرفی کردند. علاوه بر این، پژوهش های اخیر مانند چن و الکساندر (۲۰۲۲) و وو، چن و لو (۲۰۲۲) اهمیت استفاده از AHP، آنتروپی و مدل های ترکیبی را برای شناسایی پهنه های پرخطر و مدیریت ریسک سیلاب در حوضه های رودخانه ای تأیید کرده اند. مطالعات جدیدتری همچون فنگلین و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از معیارهای محیطی و مکانی شامل ارتفاع، شیب، بارش، تراکم زهکشی، کاربری اراضی، نوع خاک، شاخص ترکیبی توپوگرافی و تراکم خطواره، نقشه پتانسیل سیلاب را در محیط GIS تهیه کردند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد مناطق کم ارتفاع با شیب ملایم، بارش بیشتر و تراکم زهکشی بالاتر، حساسیت بیشتری به سیلاب دارند. همچنین، تحلیل شاخص موران و رگرسیون اکتشافی وجود خودهمبستگی مکانی در داده ها را تأیید کرد و بر ضرورت در نظر گرفتن وابستگی فضایی در مدل سازی سیلاب تأکید کرد. بنگ و چورچورت (۲۰۲۳) و دوتا و دکا (۲۰۲۴) نیز با تمرکز بر مدیریت ریسک و پیش بینی سیلاب ها نشان داده اند روش های تصمیم گیری چندمعیاره همچنان ابزار مؤثری برای تحلیل سیل خیزی در محاسبات در مقیاس های مختلف هستند. سیکمز و همکاران (۲۰۲۵) در پژوهشی با هدف پهنه بندی پتانسیل سیل خیزی در شهری در ایالت آیووا، از روش های AHP و فازی AHP در چارچوب GIS بهره گرفتند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد نواحی با خطر زیاد و بسیار زیاد عمدتاً در مناطق مرکزی شهری با ارتفاع کمتر متمرکز هستند. اشفق و همکاران (۲۰۲۵) در پژوهشی به ارزیابی و پهنه بندی حساسیت سیلاب با استفاده از مدل های AHP مبتنی بر GIS و نسبت فراوانی پرداختند. در مطالعه یادشده، ۱۲ عامل هیدروژئومورفولوژیکی مؤثر بر وقوع سیلاب در محیط ArcGIS وزن دهی و تلفیق شد و نقشه حساسیت سیلاب در پنج طبقه تهیه شد. براساس نتایج حاصل مشخص شد بخش قابل توجهی از منطقه در پهنه های با خطر متوسط تا زیاد قرار دارد و ترکیب رویکردهای چندمعیاره و آماری می تواند چارچوبی قابل انتقال برای مدیریت پتانسیل خطر سیلاب فراهم کند. زینگ و همکاران (۲۰۲۵) طی پژوهشی حساسیت سیلاب شهری در چین را بررسی کردند. در پژوهش یادشده، با ترکیب مدل های یادگیری ماشین و تحلیل خودهمبستگی مکانی، نقشه حساسیت سیلاب بر اساس عوامل توپوگرافی، بارش و ویژگی های شهری تهیه شد. نتایج پژوهش یادشده نشان داد الگوی مکانی مناطق با حساسیت بالا عمدتاً با نواحی ساخته شده و شبکه راه ها همخوانی دارد. این مطالعه بر اهمیت تحلیل وابستگی مکانی در درک بهتر الگوهای سیلاب شهری تأکید می کند.

مرور مطالعات پیشین نشان می دهد بخش قابل توجهی از پژوهش ها در زمینه پهنه بندی سیل خیزی عمدتاً بر استفاده از معیارهای محیطی و روش های تصمیم گیری چندمعیاره متمرکز بوده اند. با این حال، چند محدودیت اساسی در این حوزه قابل شناسایی است:

۱. عدم قطعیت در فرایندهای هیدرولوژیکی که سبب می شود روش های قطعی نتوانند طیف واقعی اثرگذاری عوامل مؤثر بر سیلاب را به طور کامل بازنمایی کنند. در این زمینه، منطق فازی با فراهم کردن امکان نمایش پیوسته و طیفی معیارها، ابزاری کارآمد برای استانداردسازی و مدل سازی این عدم قطعیت محسوب می شود.
۲. بی توجهی به وابستگی های مکانی در بسیاری از مدل های پهنه بندی سیلاب؛ در حالی که پدیده های محیطی ماهیتی فضایی داشته و علاوه بر شرایط نقطه ای، به ویژگی های مناطق پیرامونی نیز وابسته اند. این وابستگی ها را می توان از طریق ساختارهای همسایگی مکانی در قالب های Distance-based و Boundary-based مدل سازی کرد.
۳. کمبود مطالعاتی که به طور هم زمان منطق فازی و ساختارهای همسایگی مکانی را در فرایند پهنه بندی سیل خیزی به کار گرفته باشند؛ در حالی که ترکیب این دو رویکرد می تواند ضمن مدیریت عدم قطعیت معیارها، وابستگی های فضایی بین واحدهای مکانی را نیز در تحلیل لحاظ کند.

با توجه به شکاف های پژوهشی یادشده، تحقیق حاضر با بهره گیری از مدل وزن دهی FAHP برای تعیین اهمیت معیارها و استفاده از ساختارهای همسایگی مکانی در دو قالب فاصله ای^۱ و مرزی^۲، به بررسی نقش این ساختارها در بهبود انسجام فضایی و

1 Distance-based

2 Boundary-based

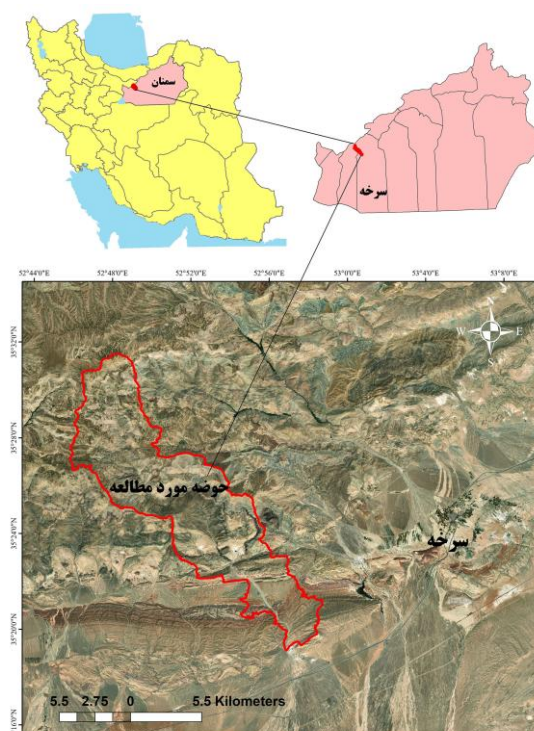
کارایی نقشه‌های پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی می‌پردازد. مطالعه حاضر در حوضه آبخیز عبدالله‌آباد سمنان انجام شد. این حوضه به دلیل برخورداری از شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک، وقوع بارش‌های رگباری و کوتاه‌مدت، وجود شیب‌های نسبتاً زیاد در بخش‌هایی از حوضه، توسعه شبکه آبراهه‌ای و پاسخ سریع هیدرولوژیکی به بارش، از استعداد قابل توجهی برای تولید رواناب و وقوع سیلاب برخوردار است. همچنین، وقوع مکرر رخدادهای سیلابی و نبود پایگاه داده مکانی قابل اتکا از رخدادهای تاریخی سیلاب، شامل مختصات نقاط وقوع، گستره پهنه‌های آب‌گرفتگی یا نقشه‌های میدانی ثبت‌شده، موجب شده است که محدوده یادشده به عنوان نمونه‌ای مناسب برای ارزیابی روش‌های پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی انتخاب شود. از این‌رو، بررسی الگوهای مکانی سیلاب در این حوضه می‌تواند در شناخت بهتر نواحی مستعد سیلاب و بهبود مدیریت ریسک سیلاب در مناطق خشک و نیمه‌خشک مؤثر باشد.

انتخاب روش مورد استفاده در این پژوهش به این دلیل بوده است که مدل FAHP با در نظر گرفتن عدم قطعیت و ابهام موجود در قضاوت‌های کارشناسی، امکان وزن‌دهی واقع‌بینانه‌تر به معیارهای مؤثر بر سیلاب را فراهم می‌کند. از سوی دیگر، به‌کارگیری ساختارهای همسایگی مکانی در دو قالب فاصله‌ای و مرزی موجب می‌شود فقط مقدار هر سلول یا واحد مکانی به صورت مستقل بررسی نشود، بلکه اثرپذیری آن از واحدهای مجاور نیز در تحلیل لحاظ شود. این موضوع به‌ویژه در پدیده‌هایی مانند سیلاب که ماهیتی پیوسته، مکانی و وابسته به شرایط بالادست و مجاور دارد، اهمیت زیادی دارد.

روش پژوهش

منطقه مورد مطالعه

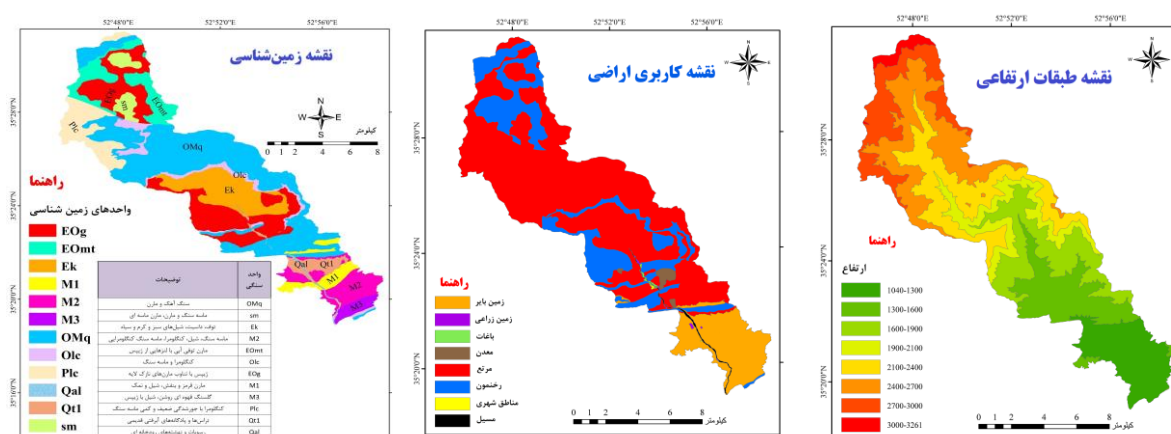
منطقه مورد مطالعه با نام حوضه آبخیز عبدالله‌آباد سرخه دارای مساحتی حدود ۱۳۷۹۲/۶ هکتار و محیط کل ۸۷۲۹۷ متر است. این حوضه ۷ زیرحوضه دارد که ۶ زیرحوضه مستقل و ۱ زیرحوضه وابسته است. منطقه مورد مطالعه در محدوده جغرافیایی $30^{\circ} 45'$ تا $52^{\circ} 15' 58''$ طول شرقی و $35^{\circ} 18' 48''$ تا $35^{\circ} 31' 30''$ عرض شمالی واقع شده است. بیشترین شیب حوضه در قسمت‌های شمالی است و شیب کم در قسمت‌های جنوبی حوضه دیده می‌شود. حداقل ارتفاع حوضه معادل ۱۰۴۰ متر در جنوب حوضه و حداکثر ارتفاع در قسمت شمال حوضه معادل ۳۲۱۶ متر از سطح دریا است. متوسط ارتفاع حوضه برابر ۲۰۴۸ متر و میانگین ۲۰۰۷ متر است. متوسط شیب وزنی حوضه برابر با ۴۳/۶۲ درصد است. به طور کلی، طبقه شیب ۳۰ - ۶۰ درصد اکثریت منطقه را به خود اختصاص می‌دهد. حوضه عبدالله‌آباد سرخه در ۷۰ کیلومتری غرب شهر سمنان واقع شده است. شکل ۱ موقعیت منطقه مطالعاتی و نقشه راه‌های دسترسی به منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

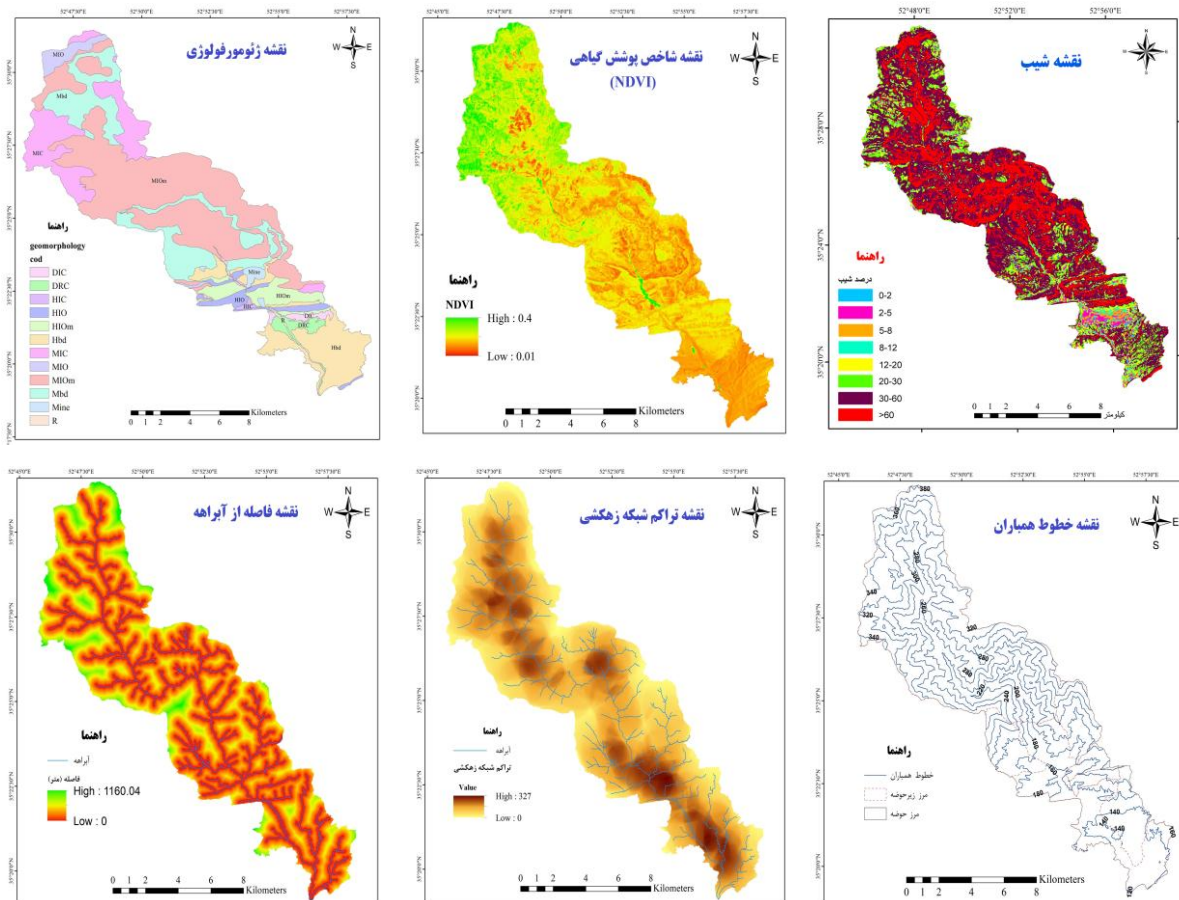


شکل ۱. نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

داده‌ها و معیارهای مؤثر

برای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی، داده‌های متنوعی شامل اطلاعات اقلیمی، هیدرولوژیک، ژئومورفولوژیک و کاربری اراضی مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به مطالعات پیشین و نظر کارشناسان، ۹ معیار اصلی به عنوان عوامل مؤثر انتخاب شدند: فاصله از آبراهه، شیب، زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، پوشش گیاهی، تراکم شبکه زهکشی، بارش، ارتفاع و کاربری اراضی (اشفق و همکاران، ۲۰۲۵، حسین و همکاران، ۲۰۲۵ و فنگلین و همکاران، ۲۰۲۳). کلیه داده‌ها به فرمت رستری تبدیل و در محیط ArcGIS پردازش شدند. نقشه‌های مربوط به هر یک از معیارهای اصلی در شکل ۲ ارائه شده است که وضعیت مکانی و پراکنش پارامترهای مؤثر در پهنه‌بندی سیل‌خیزی را نشان می‌دهد.





شکل ۲. نقشه پارامترهای مؤثر در تهیه نقشه پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی

استانداردسازی فازی

با توجه به اینکه معیارهای مورد استفاده دارای واحدها و مقیاس‌های متفاوت بودند، به منظور هم‌مقیاس‌سازی آن‌ها از توابع عضویت فازی در بازه [۰,۱] استفاده شد. در این چارچوب، مقدار صفر نشان‌دهنده کمترین و مقدار یک بیانگر بیشترین پتانسیل سیل‌خیزی است. این فرایند با تبدیل معیارهای ناهمگون به مقیاسی مشترک، امکان مقایسه و تلفیق آن‌ها را در چارچوب تحلیل چندمعیاره فراهم می‌سازد و مانع از آن می‌شود که تفاوت در واحد اندازه‌گیری یا دامنه تغییرات عددی معیارها، بر نتایج نهایی اثر نامتناسب بگذارد. به‌کارگیری منطق فازی نیز به دلیل توانایی آن در نمایش تدریجی شدت اثر معیارها و لحاظ کردن عدم قطعیت موجود در پدیده‌های محیطی، به‌ویژه در مطالعات پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی که با تغییرات مکانی پیوسته و مرزهای غیرقطعی سروکار دارند، رویکردی مناسب و پرکاربرد محسوب می‌شود (گورسفسکی و همکاران، ۲۰۲۶ و گوئیل و همکاران، ۲۰۲۴). بر اساس ماهیت هر معیار و ارتباط آن با پدیده سیلاب، تابع عضویت مناسب انتخاب شد. خلاصه ویژگی‌های هر معیار در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. نوع تابع عضویت با توجه به ویژگی‌های هر معیار

معیار	رابطه با سیلاب	توضیح خلاصه	نوع تابع عضویت	جهت اثر
شیب	مستقیم	شیب زیاد ← نفوذ کمتر، رواناب بیشتر	Linear	افزاینده
بارش	مستقیم	بارش بیشتر ← رواناب بیشتر	Large	افزاینده
تراکم زهکشی	معکوس	تراکم بالاتر ← تخلیه سریع رواناب	Small	کاهنده
ارتفاع	مستقیم	ارتفاع زیادتر ← شیب و رواناب بیشتر	Linear	افزاینده
کاربری اراضی	متغیر	پوشش خوب ← سیل‌خیزی کم پوشش فقیر ← زیاد	User define	وابسته به کلاس
زمین‌شناسی	مستقیم	سنگ سخت و نفوذپذیری کم ← رواناب بیشتر	User define	وابسته به کلاس

پوشش گیاهی	معکوس	پوشش متراکم ← کاهش رواناب	Linear	کاهنده
فاصله از آبراهه	معکوس	فاصله بیشتر ← خطر کمتر	Linear	کاهنده
ژئومورفولوژی	مستقیم	واحدهای شیب‌دار و مخروطی ← سیل‌خیزی زیاد	User define	وابسته به کلاس

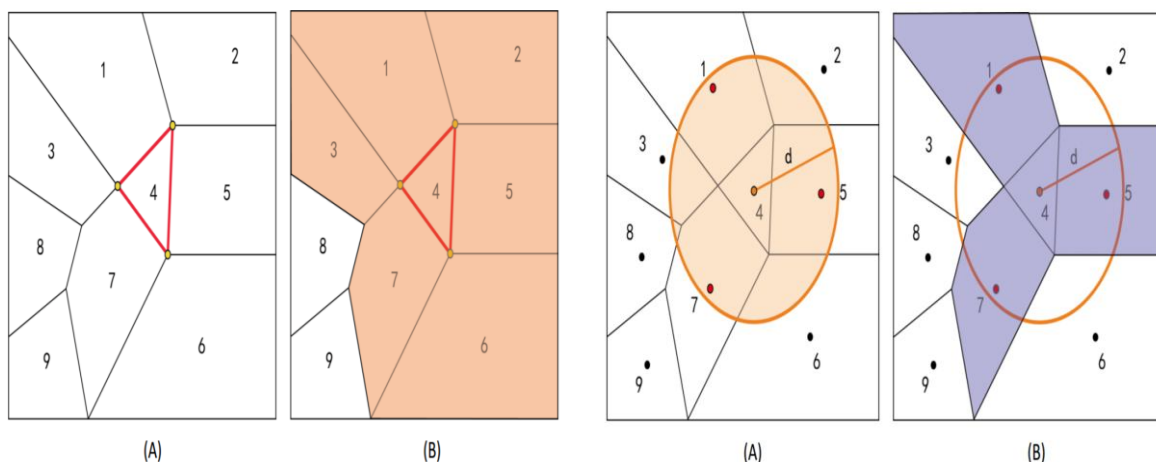
برای معیارهای گسسته مانند کاربری اراضی، ژئومورفولوژی و زمین‌شناسی، وزن نسبی کلاس‌ها با استفاده از نرم‌افزار Terreset تعیین و سپس به مقیاس فازی تبدیل شد. در نهایت، نقشه‌های استاندارد شده تمامی معیارها تولید شد (جلوخوانی نیارکی و میرزایی، ۱۴۰۲).

وزن‌دهی معیارها (AHP فازی)

به منظور تعیین اهمیت نسبی معیارها، از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) استفاده شد. به این منظور، ابتدا ساختار سلسله‌مراتبی مسئله شامل هدف، معیارها و زیرمعیارهای مؤثر بر سیل‌خیزی منطقه تدوین شد. سپس، ماتریس‌های مقایسات زوجی معیارها بر اساس طیف ۹ درجه‌ای ساعتی (۱ تا ۹) و با بهره‌گیری از نظرات کارشناسان و متخصصان حوضه آبخیزداری، هیدرولوژی، سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی تشکیل شد. در این روش، اهمیت نسبی هر معیار نسبت به سایر معیارها به صورت زوجی مورد ارزیابی قرار گرفت و مقادیر حاصل در ماتریس مقایسات ثبت شدند. پس از تشکیل ماتریس‌ها، وزن اولیه معیارها از طریق محاسبه بردار ویژه استخراج و اهمیت نسبی هر عامل تعیین شد. به منظور اطمینان از منطقی بودن قضاوت‌های انجام‌شده، شاخص ناسازگاری (CI) و نرخ ناسازگاری (CR) محاسبه شد (سیکمز و همکاران، ۲۰۲۵). نتایج نشان داد مقدار نرخ ناسازگاری برای تمامی مقایسات کمتر از ۰/۱ بوده است؛ بنابراین سازگاری قابل قبول قضاوت‌ها تأیید شد و وزن‌های به‌دست‌آمده از اعتبار لازم برای استفاده در مراحل بعدی تحلیل برخوردار بودند. این وزن‌ها به عنوان مبنای اولیه تعیین اهمیت معیارها در فرایند ارزیابی پتانسیل سیل‌خیزی منطقه مورد استفاده قرار گرفتند.

لحاظ کردن ساختارهای همسایگی مکانی

در مطالعات پهنه‌بندی سیل‌خیزی، اغلب معیارهای مؤثر بر وقوع سیلاب نظیر شیب، بارش، کاربری اراضی، پوشش گیاهی، تراکم زهکشی و ویژگی‌های ژئومورفولوژیک ماهیت فضایی دارند و به صورت مستقل از واحدهای مجاور عمل نمی‌کنند. فرایندهایی مانند تولید رواناب، تمرکز جریان، نفوذ آب و انتقال رسوبات تحت تأثیر شرایط محیطی پیرامون قرار دارند و معمولاً الگوهای مکانی پیوسته‌ای را در سطح حوضه ایجاد می‌کنند. با این حال، در بسیاری از مطالعات پهنه‌بندی سیل‌خیزی، هر پیکسل یا واحد مکانی به صورت مستقل ارزیابی شده و اثر وابستگی فضایی میان واحدهای مجاور نادیده گرفته می‌شود. این موضوع می‌تواند به ایجاد نوسانات موضعی، پراکندگی لکه‌ای و کاهش واقع‌نمایی نقشه‌های نهایی منجر شود. از این رو، در نظر گرفتن ساختارهای همسایگی و وابستگی فضایی می‌تواند به بازنمایی بهتر فرایندهای طبیعی، افزایش پیوستگی مکانی نتایج و بهبود دقت نقشه‌های سیل‌خیزی کمک کند. در سال‌های اخیر نیز توجه به خودهمبستگی مکانی و ساختارهای همسایگی به عنوان یکی از عوامل مؤثر در ارتقای کیفیت مدل‌های مکانی و تصمیم‌گیری‌های محیطی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (جلوخوانی نیارکی و میرزایی، ۱۴۰۲). بر این اساس، یکی از نوآوری‌های اصلی این تحقیق، بررسی اثر همسایگی مکانی در فرایند وزن‌دهی و تلفیق لایه‌های مؤثر بر سیل‌خیزی است. به این منظور، دو ساختار همسایگی فاصله‌مبنا^۱ و مرز‌مبنا^۲ مطابق شکل ۳ مورد استفاده قرار گرفت. در ساختار فاصله‌مبنا، تأثیر واحدهای مجاور بر اساس فاصله از سلول مرکزی و با استفاده از توابع وزن معکوس فاصله اعمال شد، در حالی که در ساختار مرز‌مبنا، همسایگی بر پایه اشتراک مرز بین سلول‌ها یا پلیگون‌ها تعریف شد. به کارگیری این دو رویکرد امکان بررسی نحوه تأثیر وابستگی فضایی بر نتایج پهنه‌بندی سیل‌خیزی و مقایسه کارایی ساختارهای مختلف همسایگی را فراهم می‌کند. همچنین، لحاظ کردن همسایگی در فرایند مدل‌سازی موجب کاهش نوسانات لکه‌ای، افزایش پیوستگی فضایی و بهبود واقع‌نمایی نقشه‌های خروجی می‌شود (جلوخوانی نیارکی و میرزایی، ۱۴۰۲). این ساختارها برای تمامی معیارها اعمال و نتایج حاصل از آن‌ها در نقشه‌های نهایی سیل‌خیزی با یکدیگر مقایسه شدند.



ب) ساختار همسایگی Boundry-base

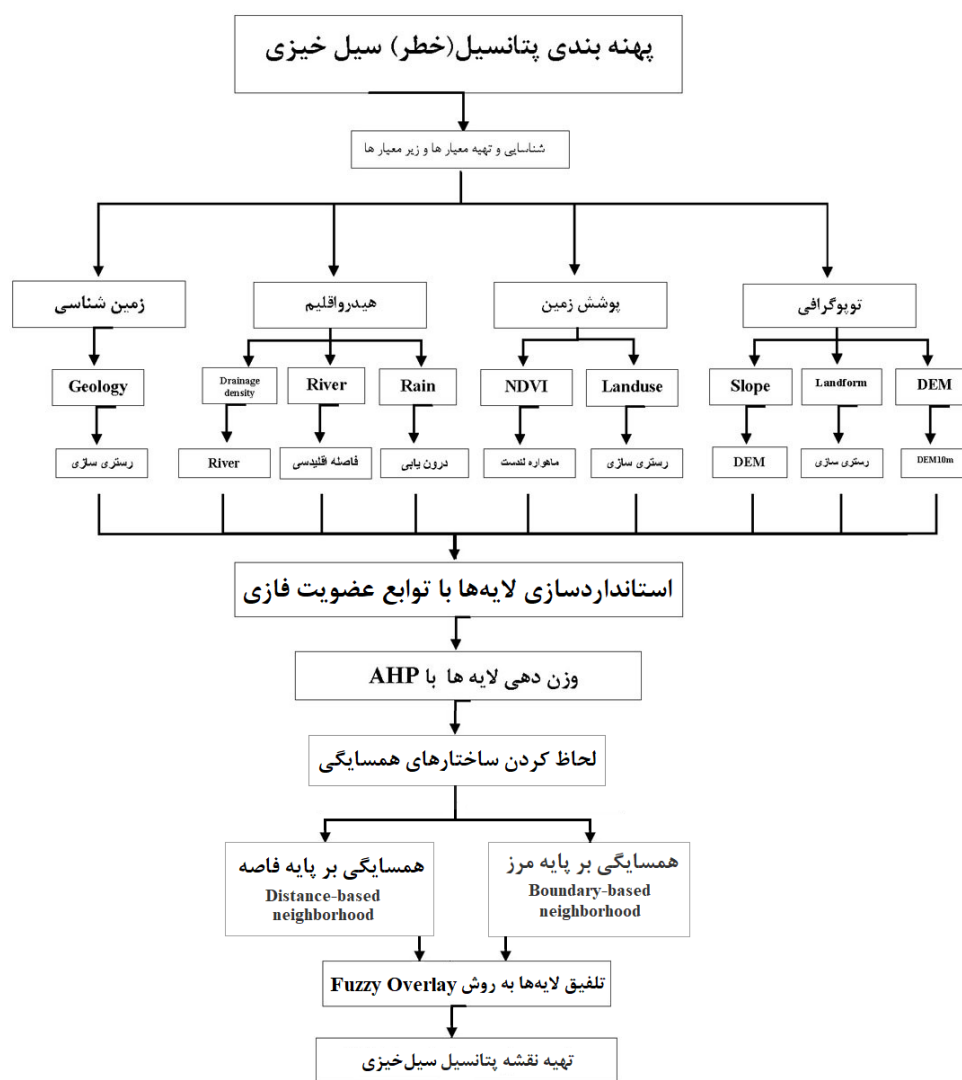
الف) ساختار همسایگی Distance-Base

شکل ۳. انواع ساختارهای همسایگی (جلوخوانی نیارکی و میرزایی، ۱۴۰۲)

تلفیق لایه‌ها و تهیه نقشه نهایی

در نهایت، لایه‌های استاندارد شده و وزن‌دهی شده در محیط GIS با استفاده از عملگر همپوشانی^۳ ترکیب شد. به این ترتیب دو نقشه پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی (یکی بر اساس همسایگی فاصله‌ای و دیگری بر اساس همسایگی مرزی) تهیه شد. در شکل ۴ فلوجارت روش انجام کار نشان داده شده است.

1 Distance-based
2 Boundary-based
3 Fuzzy Overlay



شکل ۴. فلوچارت روش انجام کار

یافته‌های پژوهش

استانداردسازی لایه‌ها با توابع عضویت فازی

مطابق آنچه در جدول ۱ ارائه شده است، معیارهای مؤثر بر سیلاب بر اساس رابطه آن‌ها با پدیده سیل خیزی و با استفاده از توابع عضویت مناسب فازی سازی شدند. در این فرایند، کلیه لایه‌ها به بازه $[0-1]$ تبدیل شدند، به گونه‌ای که مقدار صفر بیانگر کمترین و مقدار ۱ نشان‌دهنده بیشترین پتانسیل سیل خیزی است. برای معیارهای پیوسته نظیر شیب، بارش، تراکم زهکشی، ارتفاع و فاصله از آبراهه، توابع عضویت مناسب بر اساس ارتباط هر معیار با سیلاب تعیین شد.

در مقابل، برای معیارهای گسسته نظیر کاربری اراضی، ژئومورفولوژی و زمین‌شناسی، وزن نسبی کلاس‌ها با استفاده از نرم‌افزار TerraSet محاسبه و پس از نرمال‌سازی به مقیاس فازی تبدیل شد. مقادیر به‌دست‌آمده نشان داد در کاربری اراضی، کلاس‌هایی مانند بستر مسیل و اراضی مسکونی بالاترین پتانسیل سیل خیزی را داشته‌اند، در حالی که باغ‌ها و معادن کمترین وزن را دریافت کرده‌اند (جدول ۲). در لایه ژئومورفولوژی، واحدهای کوهستانی با برونزد سنگی بالا بیشترین پتانسیل و دشتهای هموار کمترین پتانسیل سیل خیزی را نشان دادند (جدول ۳). در واحدهای زمین‌شناسی نیز سازندهای مارنی و گچی به دلیل نفوذپذیری پایین بیشترین وزن و رسوبات آبرفتی جوان کمترین وزن را به خود اختصاص دادند (جدول ۴).

جدول ۲. وزن‌های لایه‌های کاربری اراضی

رخنمون	مرتج	معدن	مسکونی	زمین بایر	زراعت	بستر مسیل	باغ‌ها
rock	range	mine	urban	BL	CL	masil	garden
۰/۹	۰/۳	۰/۱	۰/۸	۰/۷	۰/۵	۰/۹	۰/۲

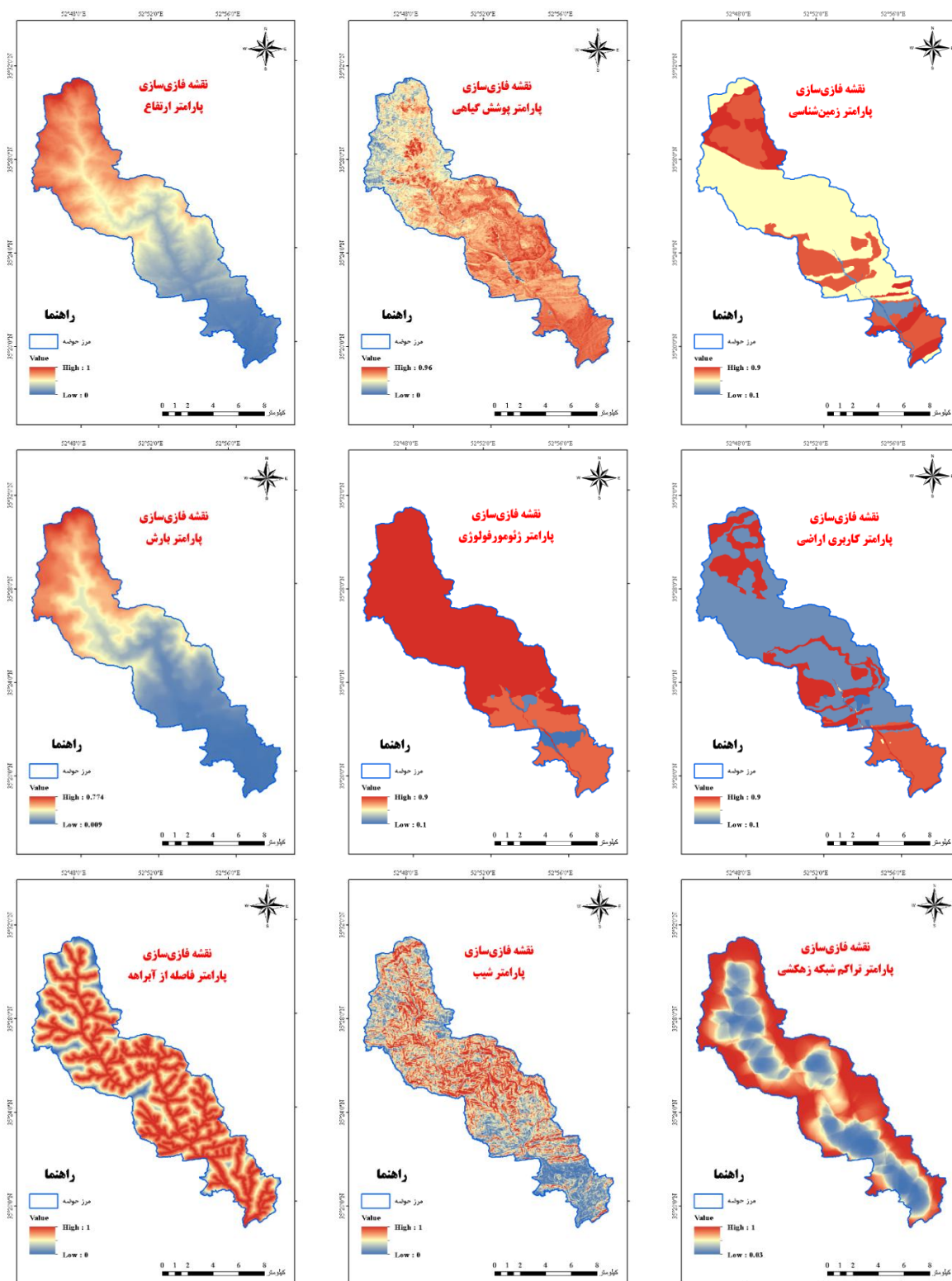
جدول ۳. وزن‌های لایه ژئومورفولوژی

واحد	وزن	تیپ	کد رخساره	رخساره (ژئومورفولوژی)	مساحت (ha)	درصد از کل
کوهستان	۰/۹	نامنظم	MIO	کوهستان دامنه نامنظم با برونزد سنگی بیش از ۷۵ درصد	۳۲۹/۱۲	٪ ۲/۳۹
			MIOm	کوهستان با دامنه نامنظم و برونزد سنگی بین ۲۵ تا ۷۵ درصد	۵۹۴۸/۱۹	٪ ۴۳/۱۲
			MIC	کوهستان با دامنه‌های نامنظم با برونزد سنگی کمتر از ۲۵ درصد	۱۸۱۴/۰۶	٪ ۱۳/۱۵
			Mbd	کوهستان‌های بدلدنی واجد فرسایش‌های شیبی و خندقی بدون پوشش گیاهی	۲۳۰۴/۷۴	٪ ۱۶/۷۲
تپه‌ماهور	۰/۷	نامنظم	HIO	تپه‌ماهور دامنه نامنظم با برونزد سنگی بیش از ۷۵ درصد	۳۹۵/۵۵	٪ ۲/۸۷
			HIOm	تپه‌ماهور با دامنه نامنظم و برونزد سنگی بین ۲۵ تا ۷۵ درصد	۶۵۱/۳۶	٪ ۴/۷۲
			HIC	تپه‌ماهور با دامنه‌های نامنظم با برونزد سنگی کمتر از ۲۵ درصد	۳۵/۱۴	٪ ۰/۲۵
			Hbd	تپه‌ماهورهای واجد فرسایش‌های شیبی و خندقی بدون پوشش گیاهی	۱۷۴۰/۱۲	٪ ۱۲/۶۲
دشت	۰/۱	ناهموار	DIC	دشت‌های ناهموار	۱۲۴/۰۹	٪ ۰/۹۰
			DRC	دشت‌های هموار	۲۲۱/۰۷	٪ ۱/۶۰
مسیل	۰/۹		R	مسیل آبراهه	۶۱/۷۱	٪ ۰/۴۵
معدن	۰/۴		Mine	معدن	۱۲۱/۵۹	٪ ۰/۸۸

جدول ۴. وزن‌های لایه زمین‌شناسی

شرح لیتولوژی	نماد سازند یا واحد	مساحت (ha)	درجه نفوذپذیری				وزن
			خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	
رسوبات و نهشته‌های رودخانه‌ای	Qal	۶۳/۱۵				*	۰/۱
تراس‌ها و پادگانه‌های آبرفتی قدیمی	Qt1	۳۷۹/۷۵				*	۰/۳
کنگلومرا با جورشدگی ضعیف و کمی ماسه‌سنگ	Plc	۱۰۳۸/۲۷			*		۰/۵
گل‌سنگ قهوه‌ای روشن، شیل با ژئیس	M3	۲۳۲/۲۰	*				۰/۹
ماسه‌سنگ، شیل، کنگلومرا، ماسه‌سنگ کنگلومرای	M2	۸۵۵/۲۱		*			۰/۷
مارن قرمز و بنفش، شیل و نمک	M1	۴۵۳/۰۴	*				۰/۹
سنگ آهک و مارن	OMq	۴۷۶۶/۹۴			*		۰/۵
کنگلومرا و ماسه‌سنگ	Olc	۵۹۰/۵۱			*		۰/۵
مارن توفی آبی با لندزهایی از ژئیس	EOmt	۱۰۱۵/۰۱	*				۰/۹
ژئیس با تناوب مارن‌های نازک لایه	EOg	۲۶۲۸/۰۷		*			۰/۷
ماسه‌سنگ و مارن، مارن ماسه‌ای	sm	۳۷۱/۱۷		*			۰/۷
توف، داسیت، شیل‌های سبز و کرم و سیاه	Ek	۱۳۹۹/۲۷			*		۰/۵
مجموع		۱۳۷۹۲/۶۰	۱۷۰۰/۲۵	۳۸۵۴/۴۶	۷۷۹۴/۹۹	۳۷۹/۷	۶۳/۱

بر مبنای این وزن‌ها، لایه‌های گسسته یادشده به مقیاس فازی تبدیل و نقشه‌های استانداردشده تولید شدند. نتایج حاصل از این مرحله به صورت نقشه‌های فازی شده معیارها در شکل ۵ نمایش داده شده است. این نقشه‌ها بیانگر تغییرات مکانی هر یک از عوامل مؤثر هستند و زمینه لازم را برای وزن‌دهی و تلفیق نهایی لایه‌ها فراهم می‌سازند.



شکل ۵. نقشه‌های استانداردسازی لایه‌ها با توابع عضویت فازی

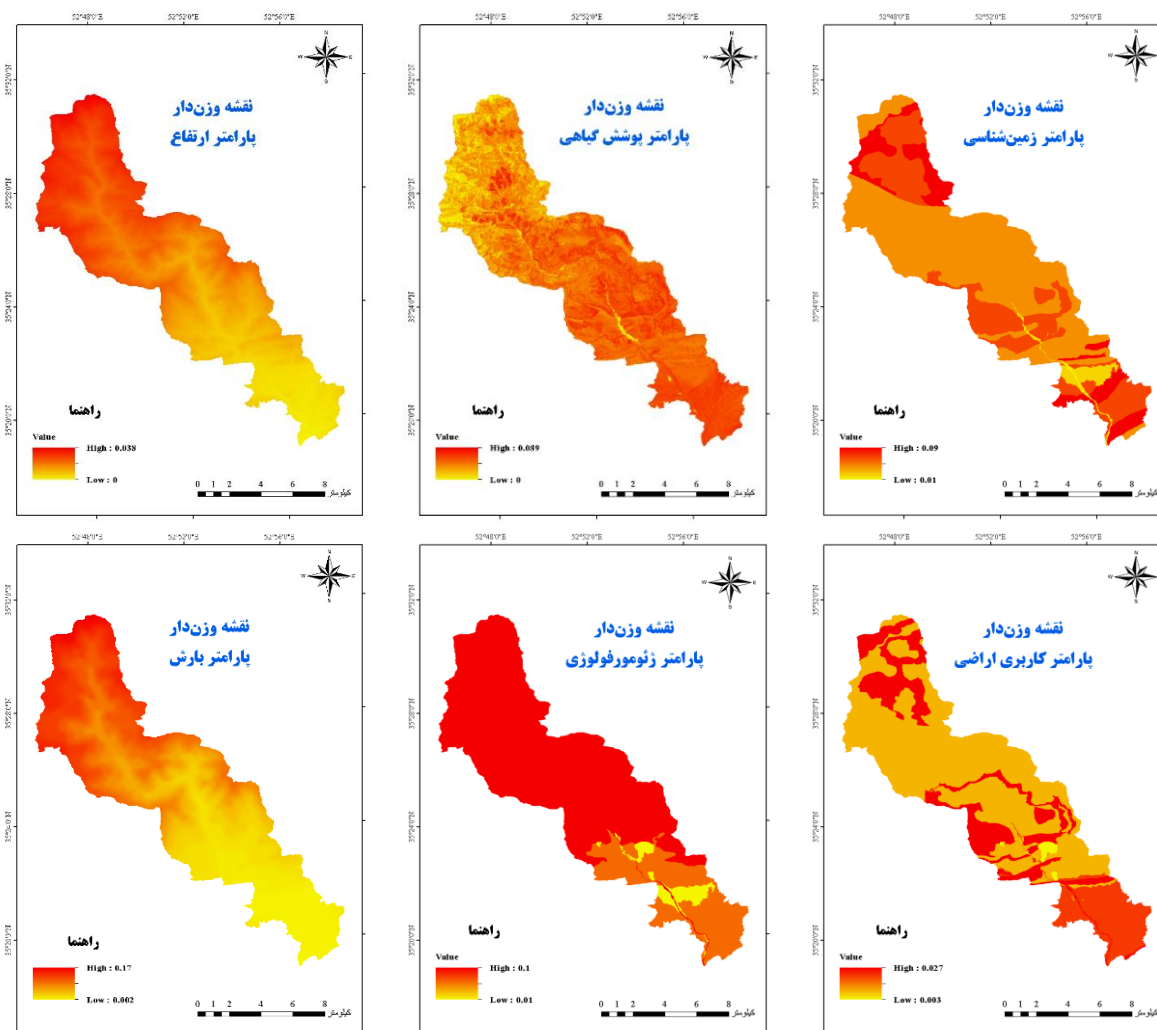
تعیین وزن معیارها به روش AHP فازی

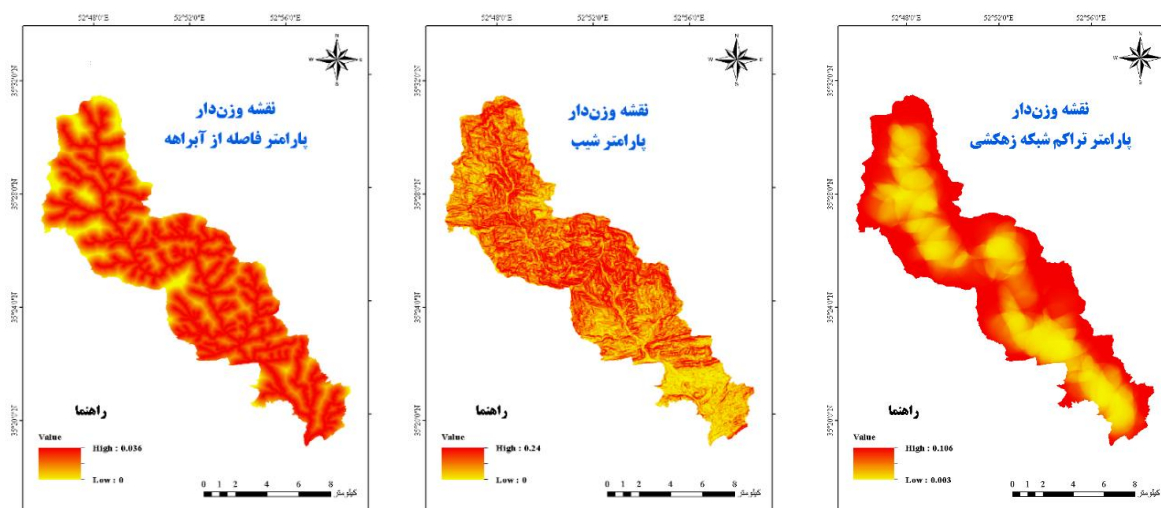
با توجه به اهمیت نسبی هر یک از پارامترهای مؤثر بر پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی، لایه‌های مورد نظر براساس مدل کمی - کیفی فرایند سلسله‌مراتبی فازی (AHP) وزن‌دهی شدند. فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی مبتنی بر مقایسه زوجی است که در آن معیارها در سطوح مختلف هدف، شاخص‌ها و گزینه‌ها با یکدیگر مقایسه می‌شوند. این روش امکان تعیین ارجحیت بین معیارها را فراهم ساخته و در نهایت، وزن نهایی هر یک از لایه‌ها محاسبه می‌شود. نرخ ناسازگاری محاسبات کمتر از ۰/۱ به دست آمد که نشان‌دهنده اعتبار نتایج است. وزن معیارها در جدول ۵ ارائه شده است. مطابق این جدول، شیب با وزن ۰/۲۴۶ بیشترین اهمیت را در وقوع سیلاب داشته و پس از آن معیارهای بارش (۰/۲۳۱)، ژئومورفولوژی (۰/۱۱۳) و تراکم شبکه زهکشی (۰/۱۰۶) از اهمیت بالاتری برخوردارند. در مقابل، کاربری اراضی با وزن ۰/۰۳۰ کمترین سهم را در مدل نهایی ایفا کرده است.

جدول ۵. وزن پارامترهای مؤثر به روش AHP فازی

ردیف	پارامتر	وزن	ردیف	پارامتر	وزن
۱	شیب	۰/۲۴۶	۴	زمین‌شناسی	۰/۱۰۴
۲	ارتفاع	۰/۰۳۸	۵	کاربری اراضی	۰/۰۳۰
۳	ژئومورفولوژی	۰/۱۱۳	۶	پوشش گیاهی	۰/۰۹۲
			۷	بارش	۰/۲۳۱
			۸	فاصله از آبراهه	۰/۰۳۶
			۹	تراکم شبکه زهکشی	۰/۱۰۶

به منظور نمایش بهتر توزیع اهمیت معیارها، نقشه‌های وزن‌دار شده لایه‌های مورد استفاده در شکل ۶ ارائه شده است. این نقشه‌ها بیانگر نقش متفاوت هر یک از عوامل در شکل‌گیری پتانسیل سیلاب و توزیع مکانی اثرگذاری آن‌ها هستند.





شکل ۶ نقشه‌های وزن دار پارامترهای مؤثر در پهنه‌بندی پتانسیل سیلاب

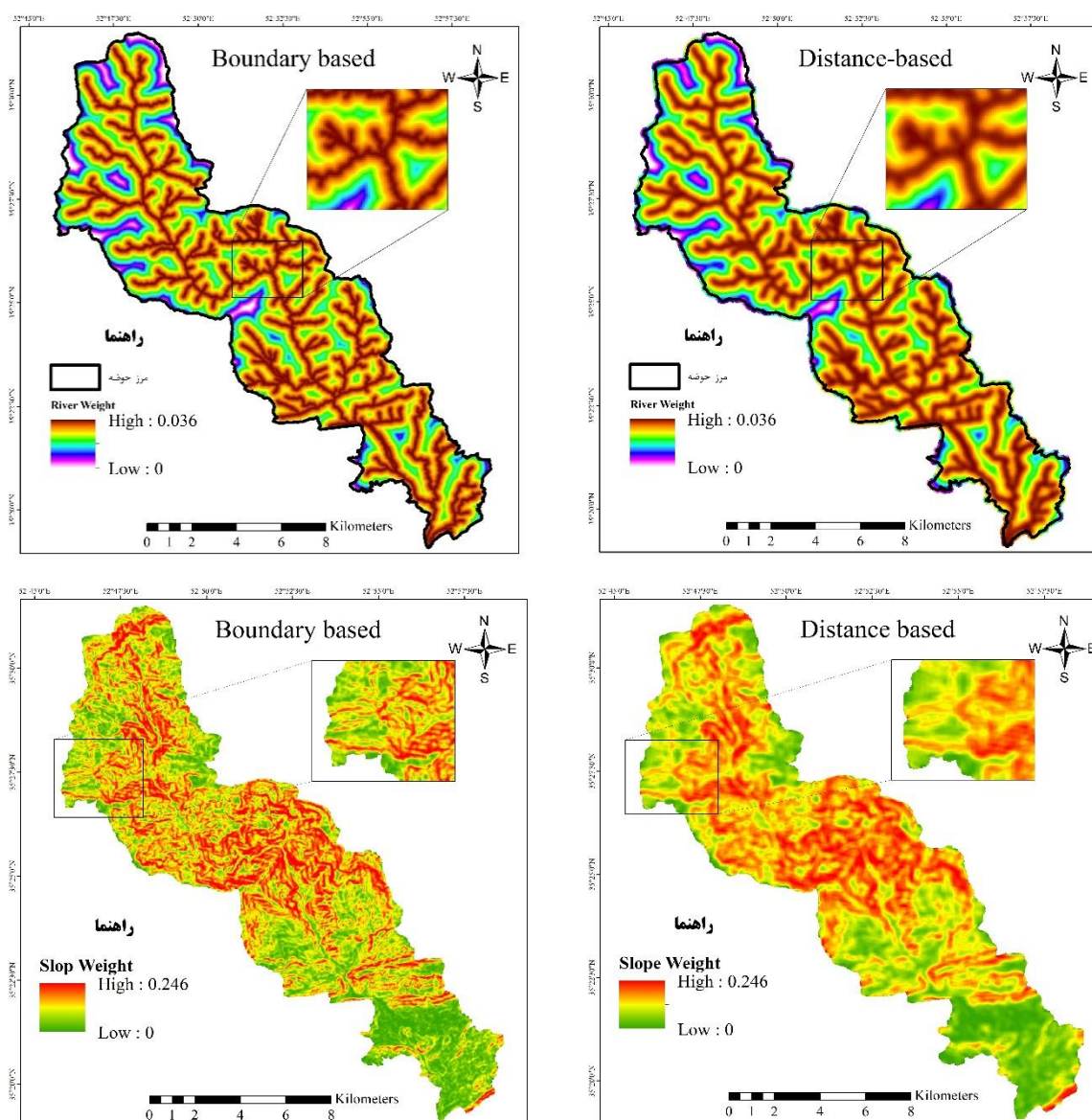
لحاظ کردن ساختارهای همسایگی مکانی

در این پژوهش، با توجه به اینکه کلیه داده‌ها به فرمت رستری تبدیل شدند، ساختارهای همسایگی مکانی به صورت سلولی و با استفاده از فیلترهای کانونی در محیط ArcGIS پیاده‌سازی شد. این رویکرد باعث می‌شود اثر وابستگی‌های فضایی میان پیکسل‌ها در الگوی پهنه‌بندی پتانسیل سیل خیزی بازنمایی شود.

به منظور جلوگیری از تداخل اثر وزن معیارها با اثر همسایگی، ابتدا وزندهی لایه‌ها به روش AHP فازی انجام شد و سپس، ساختارهای همسایگی به عنوان لایه‌ای تکمیلی بر نتایج وزن‌دار شده اعمال شد. به این ترتیب سهم واقعی وابستگی مکانی در بهبود دقت نقشه‌ها آشکار می‌شود. دو سناریوی اصلی برای مدل‌سازی همسایگی مورد استفاده قرار گرفت:

- **ساختار Distance-based:** در ساختار همسایگی فاصله‌مبنای از فیلتر دایره‌ای با شعاع ۵ سلول، معادل حدود ۱۴۰ متر، استفاده شد (شکل ۷-الف). انتخاب این شعاع با توجه به اندازه سلول رستر و با هدف بازتاب اثرات همسایگی در مقیاس محلی صورت گرفت؛ به گونه‌ای که علاوه بر پیکسل‌های مجاور نزدیک، تأثیر واحدهای مکانی پیرامونی نیز در تحلیل لحاظ شود. استفاده از شعاع‌های بسیار کوچک ممکن است موجب باقی ماندن نوسانات لکه‌ای و گسستگی فضایی در نقشه شود، در حالی که شعاع‌های بسیار بزرگ می‌توانند به هموارسازی بیش‌ازحد و کاهش جزئیات مکانی منجر شوند. از این‌رو، شعاع ۵ سلول به عنوان یک شعاع میانی انتخاب شد تا میان حفظ جزئیات مکانی و افزایش انسجام فضایی نقشه تعادل برقرار شود.
- **ساختار Boundary-based:** با استفاده از فیلتر مستطیلی (NbrRectangle) در ابعاد ۳×۳ سلول (حدود ۸۵ متر × ۸۵ متر)، همسایگی بر اساس مرزهای مشترک و مجاورت مستقیم سلول‌ها تعریف شد (شکل ۷-ب). انتخاب این اندازه کوچک به این دلیل انجام شد که تأثیر وابستگی مکانی در مقیاس بسیار محلی و نقش سلول‌های هم‌مرز در یکپارچه‌سازی الگوها نمایان شود.

شکل ۷ به طور نمونه تفاوت ناشی از اعمال وزن ساختارهای همسایگی را در دو پارامتر شیب و فاصله از آبراهه نشان می‌دهد. بهره‌گیری هم‌زمان از دو ساختار همسایگی با مقیاس‌های متفاوت (خیلی محلی و محلی - منطقه‌ای) امکان تحلیل چندسطحی وابستگی‌های فضایی را فراهم ساخت و نشان داد انتخاب نوع و اندازه همسایگی می‌تواند به طور معناداری بر الگوی نهایی پهنه‌بندی سیل خیزی اثرگذار باشد.



شکل ۷. مقایسه خروجی ساختارهای همسایگی مکانی برای معیار فاصله از آبراهه (ردیف اول) و شیب (ردیف دوم)

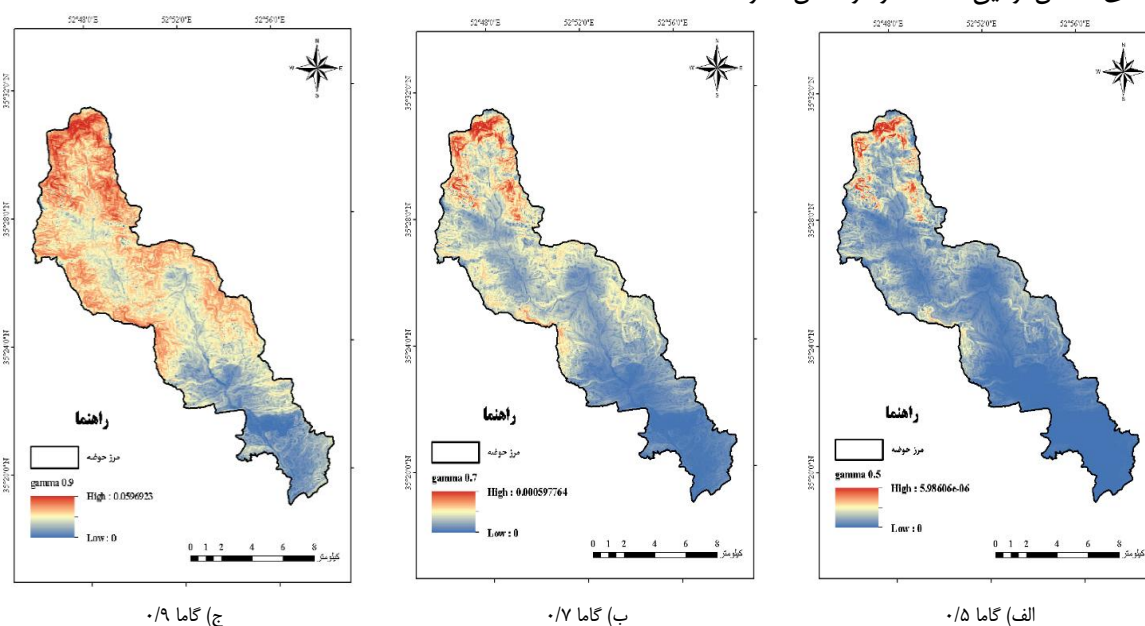
همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از اعمال این فیلترها نشان داد لحاظ کردن همسایگی فضایی موجب تعدیل مقادیر محلی و آشکارسازی الگوهای خوشه‌ای سیل‌خیزی می‌شود. مقایسه خروجی‌ها نشان داد ساختار Distance-based موجب کاهش پراکندگی لکه‌ای و تقویت خوشه‌های پرخطر شد، در حالی که ساختار Boundary-based بیشتر به یکپارچه‌سازی سطوح و بازنمایی پیوستگی پهنه‌ها کمک کرده است.

تلفیق لایه‌ها و تهیه نقشه‌های پتانسیل سیل‌خیزی

پس از استانداردسازی و وزن‌دهی لایه‌ها، برای تلفیق آن‌ها و تولید شاخص پتانسیل سیل‌خیزی از روش Fuzzy Overlay استفاده شد. منطق فازی این امکان را فراهم می‌سازد که پدیده‌های محیطی به صورت پیوسته و طیفی مدل‌سازی شوند و عدم قطعیت‌های موجود در داده‌ها بازتاب یابد. در میان عملگرهای مختلف فازی، عملگر گاما (Gamma Operator) به دلیل انعطاف‌پذیری بالا انتخاب شد. این عملگر ترکیبی از (جمع) و (ضرب) فازی است و با تغییر مقدار γ می‌تواند میان دو حالت تعادل برقرار کند:

- حالت محدودکننده (مقادیر پایین γ) که بر هم‌زمانی شرایط پرخطر تأکید دارد (مانند ضرب فازی عمل می‌کند).
- حالت فراگیرتر (مقادیر بالای γ) که بر شمول و کلیت بیشتر شرایط تأکید می‌کند (مانند جمع فازی عمل می‌کند).

در نرم افزار ArcGIS، به منظور همپوشانی فازی، عملگر گاما به عنوان ترکیبی از عملگرهای جمع فازی و ضرب فازی عمل می کند و مقدار پارامتر γ در بازه صفر تا یک قرار می گیرد. این پارامتر میزان تأثیر نسبی دو عملگر یادشده را کنترل می کند؛ به طوری که مقادیر کوچکتر γ رفتار نزدیک تری به عملگر ضرب فازی و مقادیر بزرگتر آن رفتار نزدیک تری به عملگر جمع فازی دارند. در این پژوهش، به منظور بررسی تأثیر مقدار γ بر نتایج همپوشانی، سه مقدار $0/5$ ، $0/7$ و $0/9$ مورد آزمون قرار گرفت. سپس، نقشه های حاصل از هر مقدار از نظر الگوی فضایی و میزان انسجام پهنه های سیل خیزی با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان داد مقدار $0/9$ نسبت به سایر مقادیر، الگوی فضایی منسجم تر و انطباق بهتری با شرایط ژئومورفولوژیکی منطقه مطالعه و پراکنش عوامل مؤثر بر وقوع سیلاب ارائه می دهد؛ از این رو این مقدار به عنوان پارامتر مناسب برای تولید نقشه نهایی انتخاب شد. نقشه های حاصل از این سه مقدار در شکل ۸ ارائه شده است.



شکل ۸. نقشه های پهنه بندی پتانسیل سیل خیزی حوضه عبدالله آباد بر اساس عملگر گاما به روش Fuzzy Overlay

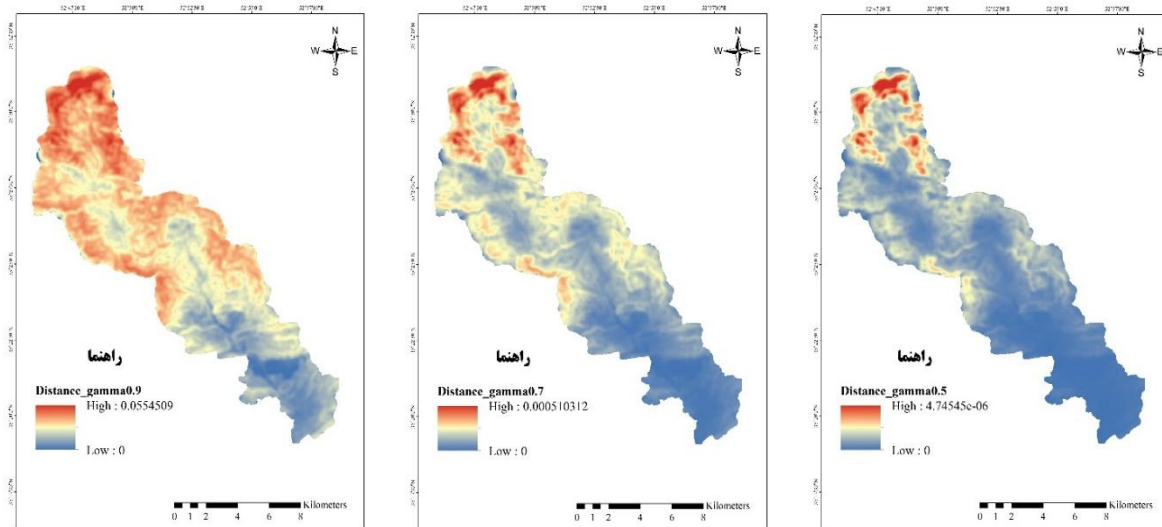
براساس نتایج، نقشه حاصل از گاما $0/9$ بالاترین همبستگی را با لایه های اطلاعاتی اولیه نشان داد. از این رو، این مقدار به عنوان مبنای اصلی برای طبقه بندی و همپوشانی نقشه نهایی پهنه بندی پتانسیل سیل خیزی انتخاب شد. همان گونه که مشاهده می شود، مناطق بالادست حوضه، واقع در ارتفاعات و خط الرأس ها با شیب زیاد، دارای پتانسیل خطر بسیار بالا بوده و با رنگ قرمز مشخص شده اند. در مقابل، مناطق پایین دست حوضه بیشتر در پهنه های دارای پتانسیل خطر بسیار کم و کم قرار گرفته اند که با رنگ های زرد و آبی نمایش داده شده است.

به طور کلی، افزایش نفوذپذیری رخساره های سنگی و رسوبی موجب افزایش نفوذ آب، کاهش رواناب سطحی و محدود شدن توسعه شبکه آبراهه ها می شود. در مقابل، واحدهای کم تراوا بارش را سریع تر به رواناب تبدیل کرده و خروج طغیانی جریان از حوضه را تشدید می کنند. همچنین، عواملی مانند شیب زیاد، تراکم بالای زهکشی و نزدیکی به آبراهه ها پتانسیل سیل خیزی را افزایش می دهند، در حالی که پوشش گیاهی متراکم و کاربری های نفوذپذیر نقش کاهنده دارند. برهم کنش این عوامل موجب شکل گیری پهنه هایی با درجات متفاوت سیل خیزی در سطح حوضه می شود.

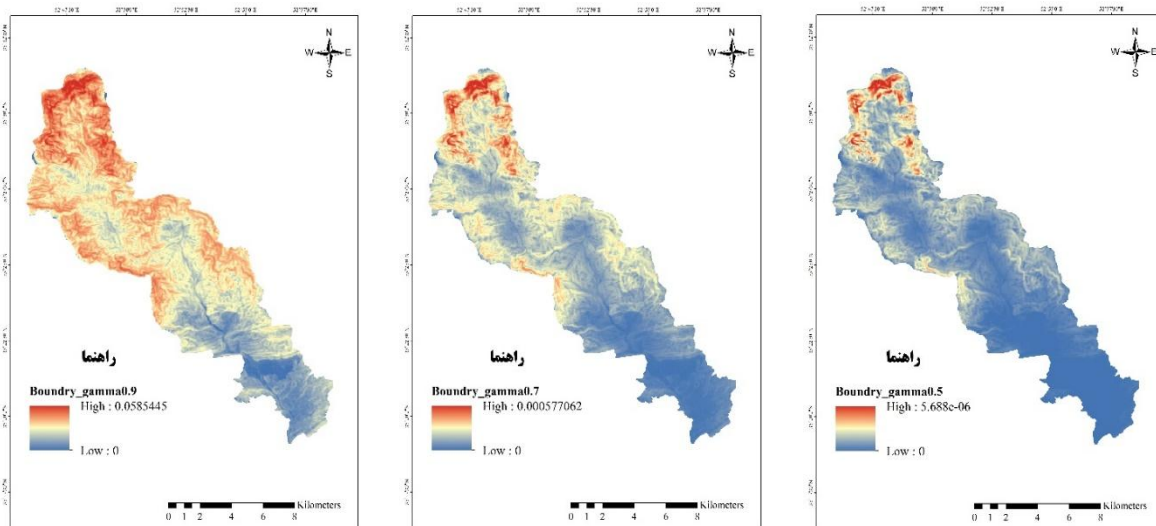
بررسی اثر ساختارهای همسایگی مکانی در پهنه بندی پتانسیل سیل خیزی

در گام بعد، اثر ساختارهای همسایگی مکانی بر نقشه های نهایی بررسی شد. برای این منظور، لایه های وزن دار پس از اعمال فیلترهای همسایگی وارد فرایند Fuzzy Overlay شدند. مشابه رویکرد پایه، در این بخش نیز عملگر گاما (γ) به کار گرفته شد

تا امکان کنترل انعطاف‌پذیری میان حالت محدودکننده (γ پایین) و حالت فراگیرتر (γ بالا) فراهم شود. سه مقدار $0/5$ ، $0/7$ و $0/9$ برای هر دو ساختار همسایگی محاسبه و نقشه‌های حاصل ترسیم شدند (شکل ۹).



الف) رویکرد ساختار همسایگی Distance based



ب) رویکرد ساختار همسایگی Boundry based

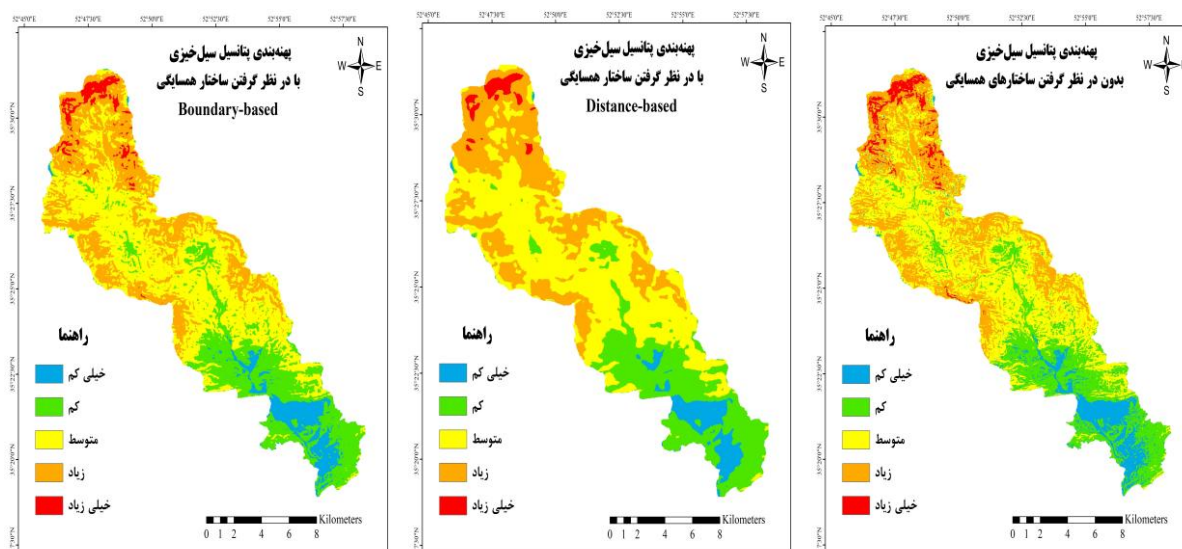
شکل ۹. نقشه‌های پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی در دو ساختار همسایگی مکانی (Distance-based و Boundary-based) بر اساس عملگر گاما ($0/5$ ، $0/7$ و $0/9$). این نقشه‌ها نشان می‌دهند کاهش مقدار γ موجب سخت‌گیرانه‌تر شدن نتایج و محدودتر شدن پهنه‌های پرخطر شده، در حالی که افزایش آن به گسترش مناطق پرخطر و بازنمایی پیوسته‌تر الگوها منجر شده است.

مقایسه نقشه‌های حاصل از دو ساختار همسایگی نشان داد در هر دو حالت، مقدار $\gamma = 0/9$ بیشترین همبستگی را با لایه‌های پایه داشته و به عنوان نقشه نهایی انتخاب شد. در مقایسه با رویکرد پایه (شکل ۸)، استفاده از ساختار Distance-based موجب برجسته‌تر شدن خوشه‌های پرخطر و نمایش واضح‌تر کانون‌های اصلی خطر شد، در حالی که در ساختار Boundary-based، الگوهای خطر به صورت پیوسته‌تر و یکپارچه‌تر بازنمایی شدند. این نتایج نشان می‌دهد اعمال همسایگی نه تنها دقت فضایی نقشه‌ها را افزایش داده، بلکه باعث بهبود بازنمایی واقع‌بینانه‌تر از توزیع مکانی پتانسیل سیل‌خیزی در سطح حوضه شده است.

نتایج کمی و مقایسه سه رویکرد

به منظور سهولت در تفسیر نتایج، براساس نفوذپذیری واحدهای زمین‌شناسی و سایر عوامل مؤثر، مناطق مختلف حوضه از نظر پتانسیل سیل‌خیزی در پنج طبقه (خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) پهنه‌بندی شدند (شکل ۱۰). مقایسه کمی درصد

مساحت هر طبقه در دو رویکرد نشان داد در حالت Distance-based، سهم طبقه (پتانسیل زیاد) افزایش یافته و الگوهای پرخطر با انسجام بیشتری ظاهر شدند، در حالی که در حالت Boundary-based، تمرکز بیشتر بر پیوستگی مکانی و گسترش طبقات (متوسط تا زیاد) بوده است. این نتایج نشان می‌دهد انتخاب ساختار همسایگی می‌تواند اثر قابل توجهی بر نقشه‌های پهنه‌بندی پتانسیل سیل خیزی داشته باشد.



شکل ۱۰. نقشه‌های نهایی پهنه‌بندی پتانسیل سیل خیزی در پنج طبقه (خیلی کم تا خیلی زیاد) برای سه رویکرد Base، Distance-based و Boundary-based. نتایج نشان می‌دهد در رویکرد Distance-based، پهنه‌های پرخطر (طبقه زیاد) با انسجام بیشتری نمایان شده‌اند، در حالی که در رویکرد Boundary-based توزیع مکانی یکنواخت‌تر بوده و طبقات متوسط تا زیاد گسترش بیشتری یافته‌اند.

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، بر اساس نتایج جدول ۶، توزیع طبقات پتانسیل سیل خیزی در سه رویکرد یادشده در نگاه کلی مشابه است، اما تفاوت‌های جزئی میان آن‌ها مشاهده می‌شود:

پتانسیل بسیار کم: در رویکرد Base بیشترین مساحت ۱۰/۷۰ کیلومتر مربع معادل (۸/۰۳ درصد) به این طبقه اختصاص یافته است. در روش Distance-based این مقدار به ۷/۸۵ کیلومتر مربع (۵/۹۰ درصد) کاهش یافته و در روش Boundary-based نیز برابر با ۹/۰۳ کیلومتر مربع (۶/۷۹ درصد) است. بنابراین، اعمال ساختارهای همسایگی سبب کاهش سهم این طبقه نسبت به روش پایه شده است.

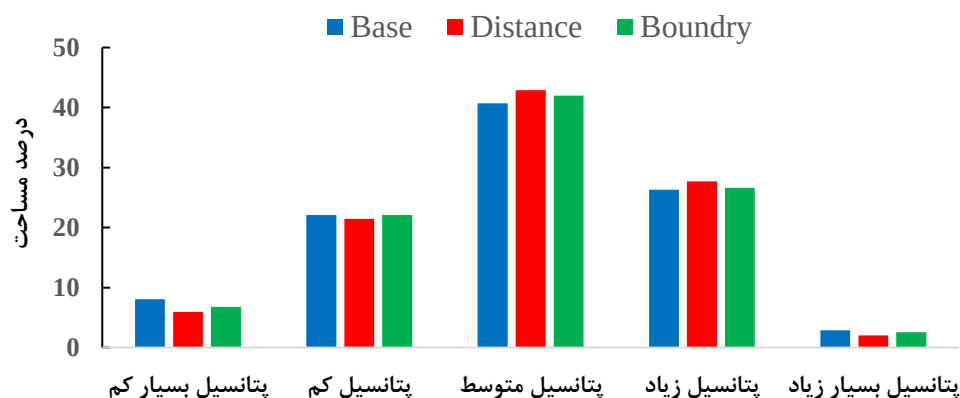
پتانسیل کم: توزیع این طبقه در هر سه رویکرد تقریباً نزدیک است ۲۲/۰۹ درصد در Base، ۲۱/۴۵ درصد در Distance-based و ۲۲/۰۷٪ در Boundary-based و تغییرات چشمگیری مشاهده نمی‌شود.

پتانسیل متوسط: این طبقه بیشترین سهم مساحتی را در هر سه روش به خود اختصاص داده است. در روش Distance-based سهم آن به ۴۲/۹۱ درصد افزایش یافته که نسبت به ۴۰/۶۹ درصد رشد محسوسی دارد. در روش Boundary-based نیز این طبقه ۴۱/۹۹ درصد را پوشش داده است. بنابراین، اعمال همسایگی فاصله‌ای باعث تقویت طبقه متوسط شده است.

پتانسیل زیاد: سهم این طبقه در Base برابر با ۲۶/۳۱ درصد است. در Distance-based مقدار آن افزایش یافته و به ۲۷/۶۹ درصد رسیده، در حالی که در Boundary-based برابر با ۲۶/۶۱ درصد است. به این ترتیب، روش فاصله‌ای موجب گسترش پهنه‌های با خطر زیاد شده است.

پتانسیل بسیار زیاد: هر سه رویکرد سهم نسبتاً کمی را برای این طبقه نشان داده‌اند. مقدار آن در Base برابر با ۲/۸۸ درصد، در Distance-based به ۲/۰۵ درصد کاهش یافته و در Boundary-based معادل ۲/۵۴ درصد است. بنابراین، روش فاصله‌ای نسبت به روش پایه و مرزی سهم نواحی با خطر بسیار زیاد را کاهش داده است.

در مجموع، می‌توان گفت که در هر سه رویکرد، طبقه پتانسیل متوسط بیشترین سهم مساحت را به خود اختصاص داده است. روش Distance-based نسبت به Base سهم طبقات (متوسط) و (زیاد) را افزایش داده و در مقابل از طبقات (بسیار کم) و (بسیار زیاد) کاسته است. این امر نشان‌دهنده کاهش نوسانات شدید و تمرکز بیشتر بر پهنه‌های میانی است. روش Boundary-based الگوی مشابه Base را حفظ کرده، اما سهم (پتانسیل زیاد) و (پتانسیل بسیار زیاد) را اندکی تقویت کرده است که بیانگر تأکید بر پیوستگی فضایی و یکپارچگی پهنه‌ها است.



شکل ۱۱. مقایسه درصد مساحت طبقات پنج‌گانه پتانسیل سیل‌خیزی (خیلی کم تا خیلی زیاد) در سه رویکرد

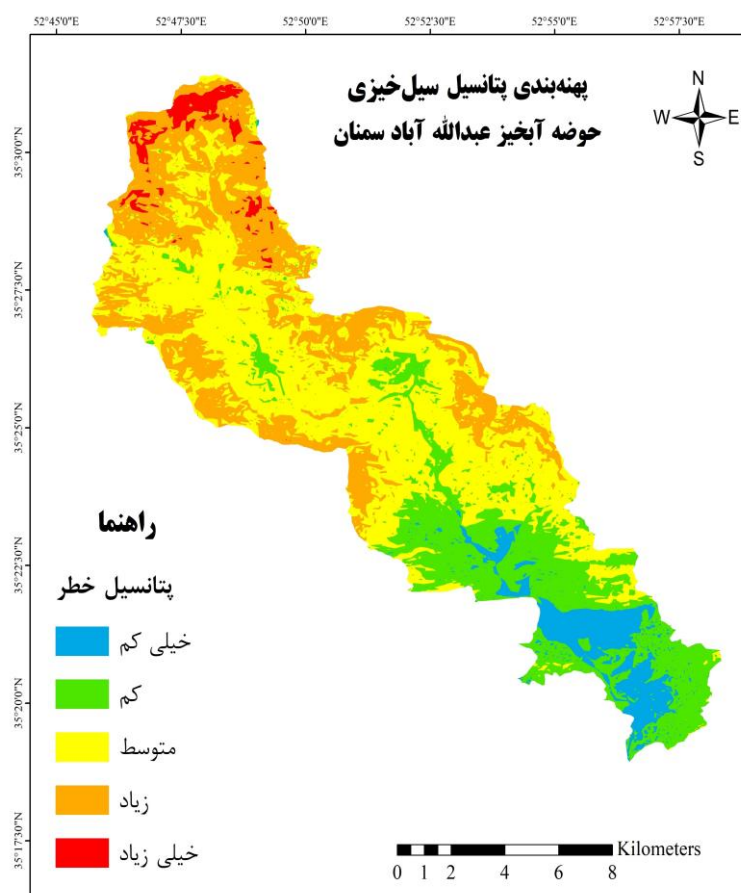
جدول ۶. مقایسه مساحت و درصد طبقات پتانسیل سیل‌خیزی در سه رویکرد مختلف

ردیف	Boundary-based		Distance-based		Base		طبقات خطر
	درصد	(km ²)	درصد	(km ²)	درصد	(km ²)	
۱	۶/۷۹	۹/۰۳	۵/۹۰	۷/۸۵	۸/۰۳	۱۰/۷۰	پتانسیل بسیار کم
۲	۲۲/۰۷	۲۹/۳۹	۲۱/۴۵	۲۸/۵۷	۲۲/۰۹	۲۹/۴۲	پتانسیل کم
۳	۴۱/۹۹	۵۵/۹۱	۴۲/۹۱	۵۷/۱۴	۴۰/۶۹	۵۴/۱۷	پتانسیل متوسط
۴	۲۶/۶۱	۳۵/۴۴	۲۷/۶۹	۳۶/۸۶	۲۶/۳۱	۳۵/۰۴	پتانسیل زیاد
۵	۲/۵۴	۳/۳۹	۲/۰۵	۲/۷۴	۲/۸۸	۳/۸۳	پتانسیل بسیار زیاد
مجموع	۱۰۰	۱۳۳/۱۶	۱۰۰	۱۳۳/۱۶	۱۰۰	۱۳۳/۱۶	

نقشه نهایی پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی

در نهایت، با توجه به اینکه در مراحل پیشین مشخص شد مقدار گاما ۰/۹ بالاترین همبستگی را با لایه‌های پایه و رخدادهای سیلابی دارد، تنها نقشه‌های حاصل از این مقدار در سه رویکرد Base، Distance-based و Boundary-based مورد استفاده قرار گرفت. این سه نقشه با یکدیگر تلفیق و میانگین‌گیری شدند تا اثرات هر دو ساختار همسایگی در کنار رویکرد پایه بازتاب یابد. خروجی نهایی به عنوان نقشه نهایی پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی در حوضه عبدالله‌آباد به دست آمد (شکل ۱۲).

این نقشه ترکیبی از مزایای سه رویکرد است، به گونه‌ای که هم خوشه‌ای شدن مناطق پرخطر ویژگی روش (Distance-based) و هم پیوستگی فضایی پهنه‌ها ویژگی روش (Boundary-based) در آن منعکس شده و هم همبستگی بالای رویکرد Base با داده‌های پایه حفظ شده است. بنابراین، نقشه نهایی از جامعیت و پایداری بیشتری نسبت به نتایج منفرد برخوردار بوده و می‌تواند به عنوان مبنای اصلی برای تحلیل‌های مدیریتی و تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱۲. نقشه نهایی پهنه‌بندی پتانسیل سیل خیزی در حوضه عبدالله آباد ($\gamma=0.9$) حاصل از میانگین‌گیری سه رویکرد Base، Distance-based و Boundary-based. این نقشه ترکیبی از مزایای هر سه روش بوده و از جامعیت و پایداری بیشتری برخوردار است

همچنین، طبق جدول ۷، نتایج حاصل از نقشه نهایی پهنه‌بندی پتانسیل سیل خیزی نشان می‌دهد بیشترین مساحت حوضه در طبقه پتانسیل متوسط قرار گرفته است (۴۲/۲۴ درصد کل مساحت). پس از آن، طبقه پتانسیل کم با ۲۱/۷۸ درصد و پتانسیل زیاد ۲۶/۷۰ درصد بیشترین سهم را دارند. در مقابل، طبقات پتانسیل بسیار کم و پتانسیل بسیار زیاد سهم کمتری از مساحت حوضه را به خود اختصاص داده‌اند (به ترتیب ۶/۹۳ و ۲/۳۵ درصد). این توزیع نشان می‌دهد بخش عمده‌ای از حوضه در محدوده‌های با خطر متوسط تا زیاد قرار دارد و تنها بخش کوچکی در وضعیت بسیار پرخطر یا بسیار کم‌خطر قرار گرفته است. به بیان دیگر، الگوی نهایی نقشه میانگین بیانگر غلبه پهنه‌های میانی خطر و تمرکز نسبی مناطق پرخطر در مقایسه با رویکردهای منفرد است که می‌تواند بازنمایی واقع‌بینانه‌تری از شرایط هیدرولوژیکی و مکانی منطقه ارائه دهد.

همچنین، نتایج به‌دست‌آمده با ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه نیز همخوانی دارد، به گونه‌ای که تمرکز طبقات پرخطر در نواحی با شیب‌های تند و تراکم بالای زهکشی و حضور طبقات کم‌خطر در مناطق کم‌شیب و دارای پوشش گیاهی، نشان‌دهنده توانایی مدل در بازنمایی الگوی مکانی سیلاب است. این انطباق میان خروجی مدل و شرایط طبیعی منطقه، بیانگر اعتبار روش و کفایت معیارهای انتخاب‌شده برای شناسایی پهنه‌های پرخطر است.

جدول ۷. مساحت و درصد طبقات نقشه نهایی پهنه‌بندی پتانسیل سیل خیزی

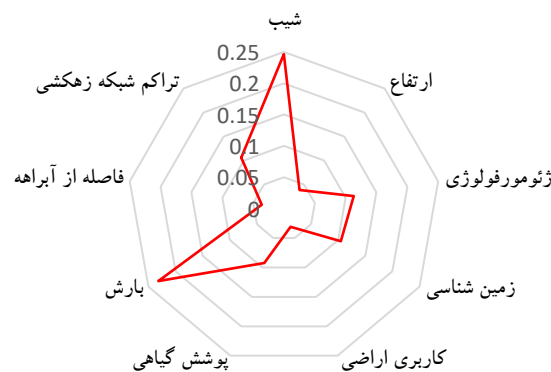
ردیف	طبقات خطر	Base (km ²)	%
۱	پتانسیل بسیار کم	۹/۲۳	۶/۹۳
۲	پتانسیل کم	۲۸/۹۹	۲۱/۷۸
۳	پتانسیل متوسط	۵۶/۲۵	۴۲/۲۴

۴	پتانسیل زیاد	۳۵/۵۶	۲۶/۷۰
۵	پتانسیل بسیار زیاد	۳/۱۳	۲/۳۵
مجموع		۱۳۳/۱۶	۱۰۰

بحث

نتایج حاصل از تحلیل‌ها بیانگر آن است که معیارهای شیب (۰/۲۴۶) و بارش (۰/۲۳۱) بیشترین وزن را در مدل AHP فازی کسب کرده‌اند (شکل ۱۳) و به عنوان مؤثرترین عوامل در سیلاب‌خیزی حوضه عبدالله‌آباد شناخته می‌شوند. چنین نتیجه‌ای از نظر هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی منطقی است، زیرا شیب‌های تند در منطقه مورد مطالعه (۳۰ - ۶۰ درصد) که در بخش قابل توجهی از حوضه گسترش دارند، موجب کاهش نفوذپذیری و افزایش سرعت رواناب سطحی می‌شوند. همچنین با توجه به جدول ۸، بارش نیز به عنوان محرک اولیه فرایند رواناب، با میانگین‌های زیاد در زمستان (۱۰۲/۳ میلی‌متر) و بهار (۶۴/۵ میلی‌متر) بیشترین نقش را در آغاز و تشدید رخداد سیلاب ایفا می‌کند. ترکیب این دو عامل در کنار سازندهای کم‌تراوا (مانند مارن‌ها و گچ‌ها) شرایط مساعدی را برای تشکیل رواناب‌های شدید و سیلاب‌های طغیانی فراهم می‌سازد.

نتایج این پژوهش با یافته‌های مطالعات پیشین نیز همخوانی دارد. بسیاری از تحقیقات انجام‌شده در زمینه پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی نشان داده‌اند عوامل توپوگرافی و اقلیمی از جمله شیب، بارش و ارتفاع از مهم‌ترین متغیرهای کنترل‌کننده سیلاب‌خیزی در حوضه‌های آبخیز محسوب می‌شوند (پیرادهان، ۲۰۱۰؛ چن و الکساندر، ۲۰۲۲). همچنین نقش سازندهای زمین‌شناسی کم‌تراوا و تراکم بالای شبکه زهکشی در افزایش رواناب سطحی و تشدید پتانسیل سیل‌خیزی در مطالعات مختلف گزارش شده است.

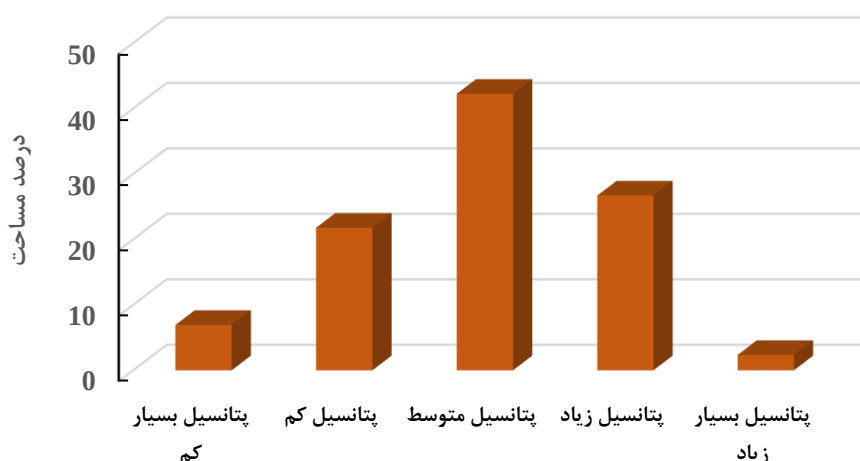


شکل ۱۳. توزیع وزنی معیارهای مؤثر بر پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی به روش AHP فازی

جدول ۸. مقادیر بارش فصلی واحدهای فیزیوگرافیک حوضه مطالعاتی به میلی‌متر

فصل	بهار	تابستان	پاییز	زمستان
میانگین بارش کل حوضه (میلی‌متر)	۶۴/۵	۱۶/۵	۵۶/۷	۱۰۲/۳

از سوی دیگر، همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، نتایج نقشه نهایی پهنه‌بندی (جدول ۷) نشان می‌دهد بیشترین سهم مساحت حوضه در طبقه پتانسیل متوسط (۴۲/۲۴ درصد) قرار دارد و پس از آن طبقه زیاد (۲۶/۷۰ درصد) و کم (۲۱/۷۸ درصد) مشاهده می‌شوند، در حالی که طبقات بسیار کم (۶/۹۳ درصد) و بسیار زیاد (۲/۳۵ درصد) سهم اندکی از مساحت کل دارند. این الگو با شرایط فیزیوگرافی منطقه همخوانی دارد، به طوری که طبقات پرخطر عمدتاً در نواحی کوهستانی با شیب زیاد، بارش بالا، تراکم زهکشی قابل توجه و سازندهای نفوذناپذیر مستقر شده‌اند، در حالی که طبقات کم‌خطر بیشتر در دشت‌ها و مناطق با پوشش گیاهی مناسب دیده می‌شوند. تمرکز عمده مساحت حوضه در طبقات میانی خطر نشان می‌دهد منطقه نه به طور گسترده بحرانی، و نه کاملاً ایمن است، بلکه در معرض سطوح متوسط تا زیاد خطر قرار دارد که مستلزم مدیریت پیشگیرانه است.



شکل ۱۴. درصد مساحت طبقات پتانسیل سیل خیزی حاصل از میانگین گیری سه رویکرد Base، Distance-based و Boundary-based

به طور کلی، انطباق بالای خروجی مدل با ویژگی‌های فیزیوگرافی و اقلیمی حوضه، نشان‌دهنده سازگاری فضایی و تفسیرپذیری نتایج حاصل از روش به کاررفته بوده و نشان می‌دهد ترکیب وزن‌دهی فازی و لحاظ کردن همسایگی مکانی توانسته است بازنمایی واقع‌بینانه‌ای از الگوی پتانسیل سیل‌خیزی در منطقه مطالعه ارائه دهد. با توجه به نبود داده‌های ثبت‌شده و مکان‌مند از رخدادهای سیلاب در حوضه عبدالله‌آباد، امکان اعتبارسنجی کمی مستقل در این پژوهش فراهم نبود. از این‌رو ارزیابی نتایج بر پایه منطق ژئومورفولوژیکی، قضاوت کارشناسی و بررسی سازگاری مکانی خروجی با شرایط طبیعی حوضه انجام شد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

هدف اصلی این پژوهش پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی در حوضه آبخیز عبدالله‌آباد شهرستان سرخه با تأکید بر نقش ساختارهای همسایگی مکانی در بهبود تحلیل‌های فضایی بود. به این منظور، مجموعه‌ای از عوامل محیطی مؤثر در بروز سیلاب شامل شیب، ارتفاع، بارش، زمین‌شناسی، کاربری اراضی و تراکم زهکشی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی مورد تحلیل قرار گرفت. ابتدا معیارها با استفاده از توابع عضویت فازی استانداردسازی شدند و سپس، وزن نسبی آن‌ها به روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی تعیین شد. در ادامه، نقشه پتانسیل سیل‌خیزی با استفاده از عملگر گامای فازی تولید شد و اثر دو نوع ساختار همسایگی مکانی شامل Distance-based و Boundary-based بر الگوی فضایی نتایج مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج وزن‌دهی معیارها نشان داد شیب و بارش به ترتیب بیشترین تأثیر را در شکل‌گیری پتانسیل سیل‌خیزی در محدوده مورد مطالعه دارند، در حالی که سایر عوامل محیطی نظیر زمین‌شناسی، کاربری اراضی و تراکم شبکه زهکشی نیز نقش قابل توجهی در کنترل الگوی فضایی سیلاب‌خیزی ایفا می‌کنند. نقشه‌های حاصل از مدل پایه و دو ساختار همسایگی نشان دادند اگرچه توزیع کلی طبقات خطر در هر سه رویکرد تا حد زیادی مشابه است، اما اعمال ساختارهای همسایگی مکانی موجب افزایش پیوستگی فضایی و کاهش پراکندگی لکه‌ای در نقشه‌های خروجی می‌شود.

بررسی نتایج نشان داد ساختار Distance-based با در نظر گرفتن تأثیر تدریجی سلول‌های پیرامونی بر اساس فاصله، به هموارسازی الگوهای فضایی و کاهش نوسانات شدید محلی کمک می‌کند. در مقابل، ساختار Boundary-based با تأکید بر مجاورت مستقیم واحدهای فضایی، موجب افزایش پیوستگی و یکپارچگی پهنه‌های خطر در نقشه نهایی می‌شود. ترکیب نتایج این رویکردها از طریق میانگین‌گیری نقشه‌ها توانست الگوی متعادل‌تر از توزیع پتانسیل سیل‌خیزی ارائه دهد که هم خوشه‌های پرخطر را به خوبی مشخص می‌کند و هم از ایجاد تغییرات ناگهانی در الگوی فضایی جلوگیری می‌کند.

بر اساس نقشه نهایی پهنه‌بندی، بخش قابل توجهی از حوضه در طبقات خطر متوسط تا زیاد قرار دارد که عمدتاً در نواحی با شیب‌های زیاد، بارش بالاتر و سازندهای زمین‌شناسی کم‌تراوا متمرکز شده‌اند. این مناطق از نظر برنامه‌ریزی کاربری اراضی و مدیریت مخاطرات طبیعی نیازمند توجه بیشتری هستند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد استفاده هم‌زمان از منطق فازی، روش‌های

تصمیم‌گیری چندمعیاره و تحلیل ساختارهای همسایگی مکانی می‌تواند چارچوبی کارآمد برای ارزیابی پتانسیل سیل‌خیزی در حوضه‌هایی فراهم کند که با محدودیت داده‌های هیدرولوژیکی مواجه هستند. در مجموع، یافته‌های این تحقیق بیانگر آن است که در نظر گرفتن وابستگی‌های فضایی میان واحدهای مکانی می‌تواند دقت و واقع‌نمایی نقشه‌های پهنه‌بندی مخاطرات طبیعی را افزایش دهد. بنابراین، به‌کارگیری ساختارهای همسایگی مکانی در مدل‌های تحلیل فضایی می‌تواند به عنوان رویکردی مؤثر در مطالعات آینده پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی و سایر مخاطرات محیطی مورد توجه قرار گیرد و نتایج آن در برنامه‌ریزی فضایی، مدیریت منابع طبیعی و کاهش خسارت‌های ناشی از سیلاب استفاده شود. همچنین، در مطالعات آینده می‌توان از الگوریتم‌های یادگیری ماشین در کنار تصاویر ماهواره‌ای سنجش از دور با وضوح مکانی بالاتر برای بهبود مدل‌سازی و شناسایی بهتر مناطق مستعد سیلاب استفاده کرد. نتایج این نوع پژوهش‌ها می‌تواند در برنامه‌ریزی کاربری اراضی، مدیریت حوضه‌های آبخیز و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی مرتبط با کاهش خسارت‌های ناشی از سیلاب مورد استفاده قرار گیرد.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

مقاله حاضر از هیچ حمایت مالی برخوردار نیست.

مشارکت نویسندگان

نحوه و میزان مشارکت نویسندگان در انجام این پژوهش به صورت زیر است: نویسنده اول: جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها، انجام تحقیق و نوشتن نسخه اولیه نویسنده دوم و سوم: راهنمایی، ویرایش، بازبینی و کنترل نتایج

تعارض منافع

بنا به اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت کرده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها است.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از همکاری سازمان هواشناسی استان سمنان برای همکاری و در اختیار قرار دادن اطلاعات این پژوهش تشکر می‌شود. همچنین، از داوران محترم به دلیل ارائه نظرات سازنده و علمی سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- 1 Abedini, M., Sabouri, H., & Pasban, E.H. (2025). Flood hazard zonation and its relationship with land use using the Analytic Network Process (ANP) model (Case Study: Raziehchay Watershed, Ardabil Province). *Journal of Urban and Regional Sustainable Development Studies*, 6(2), 68–84.
- 2 Anselin, L. (1995). Local indicators of spatial association—LISA. *Geographical Analysis*, 27(2), 93–115.
- 3 Ashfaq, S., Tufail, M., Niaz, A., Muhammad, S., Alzahrani, H., & Tariq, A. (2025). Flood susceptibility assessment and mapping using GIS-based analytical hierarchy process and frequency ratio models. *Global and Planetary Change*, 251, 104831.
- 4 Bang, N., & Church Burton, N. (2021). Contemporary flood risk perceptions in England: Implications for flood risk management foresight. *Henry Disaster Management Centre, Bournemouth University, Dorset*.
- 5 Bouamrane, A., Derdous, O., Dahri, N., Tachi, S. E., Boutebba, K., & Bouziane, M. T. (2022). A comparison of the analytical hierarchy process and the fuzzy logic approach for flood susceptibility mapping in a semi-arid ungauged basin (Biskra basin: Algeria). *International Journal of River Basin Management*, 20(2), 203–213.
- 6 Chen, Y., & Alexander, D. (2022). Integrated flood risk assessment of river basins: Application in the Dadu river basin, China. *Journal of Hydrology*, 613, 128456.
- 7 Cikmaz, B. A., Yildirim, E., & Demir, I. (2025). Flood susceptibility mapping using fuzzy analytical hierarchy process for Cedar Rapids, Iowa. *International journal of river basin management*, 23(1), 1-13.
- 8 Dutta, P., & Deka, S. (2024). A novel approach to flood risk assessment: Synergizing with geospatial-based MCDM-AHP model, multicollinearity, and sensitivity analysis in the Lower Brahmaputra Flood Plain, Assam. *Journal of Cleaner Production*.
- 9 Farhadi, M., Ahmadi, R., & Rezaei, S. (2019). Flood hazard zonation using GIS and multi-criteria decision-making methods. *Geographical Research Journal*, 34(2), 45–62. [In Persian]
- 10 Fenglin, W., Ahmad, I., Zelenakova, M. *et al.* (2023). Exploratory regression modeling for flood susceptibility mapping in the GIS environment. *Sci Rep* 13, 247
- 11 Gorsevski, Pece V., and Ivica Milevski. "Multilevel Flood Susceptibility Mapping by Fuzzy Sets, Analytical Hierarchy Process, Weighted Linear Combination and Random Forest." *ISPRS International Journal of Geo-Information* 15, no. 4 (2026): 148.
- 12 Gohil, M., Mehta, D., & Shaikh, M. (2024). An integration of geospatial and fuzzy-logic techniques for flood-hazard mapping. *Journal of Earth System Science*, 133(2), 1.
- 13 Husein, Musa., Tariku Takele, Dechasa Diriba, and Shankar Karuppannan. (2025). Flood hazard and risk assessment using GIS and remote sensing in the case of Ziway Lake watershed, central Main Ethiopian Rift. *Environmental and Sustainability Indicators*, 100920.
- 14 Jelokhani Niaraki, M.R., & Mirzaei, A. (2023). Multi-criteria Decision Making Analysis in Geographic Information Science. Tehran University Press. [In Persian]
- 15 Kazemi, M., & Jafarpour, A. (2024). Identifying the threshold of variables affecting flood zones using machine learning technique (Case study: the downstream region of the Karun River). *Water and Soil Management and Modelling*, 4(1), 214-232. [In Persian].
- 16 Mahmoudzadeh, H. and Bakoi, M. (2018). Flood zoning using fuzzy analysis (case study: Sari city). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 7(18), 51-68. [In Persian]
- 17 Najafi, E. and Karimi Kerdabadi, M. (2020). Flood Risk Evaluation and Zoning using with AHP-Fuzzy Combined Model with Emphasis on Urban Safety (Case Study: Region 1 of Tehran Municipality). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 9(2), 43-60. [In Persian]
- 18 Pradhan, B. (2010). Flood susceptible mapping and risk area delineation using logistic regression, GIS and remote sensing. *Journal of Spatial Hydrology*, 9(2), 1–18.
- 19 Rashetnia, S., & Jahanbani, H. (2021). Flood vulnerability assessment using a fuzzy rule-based index in Melbourne, Australia. *Sustainable Water Resources Management*, 7(2), 351–362.
- 20 Sami, E. and Ebadi, M. (2024). Urban Flood Hazard Zoning Using Fuzzy-Analytic Network Process (ANP), Case study: Maragheh City. *Journal of Urban Ecology Researches*, 15(1), 171-186. [In Persian]
- 21 Smith, K., & Ward, R. (1998). *Floods: Physical processes and human impacts*. Chichester: Wiley.

- 22 Wu, J., Chen, X., & Lu, J. (2022). Assessment of long- and short-term flood risk using the multi-criteria analysis model with the AHP-Entropy method in Poyang Lake Basin. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 75(3), 102968.
- 23 Xing, Z., Lyu, G., Yao, Y., Liu, Z., & Zhang, X. (2025). Fine-grained analysis and mapping of urban flood susceptibility with interpretable machine learning: A case study of Hefei, China. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 60, 102501.
- 24 Yodying.A, Seejata.K, Chatsudarat.S Chidburee.P, Mahavik.N, Kongmuang.CH, Tantanee.S., 2019. FD Flood Hazard assessment using Fuzzy analytic hierarchy process: A case studt of Bang Rakam model in Thailand. The 40th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS 2019) October 14-18, 2019 / Daejeon Convention Center (DCC), Daejeon, Korea.
- 25 Zhong, M., Lin, K., Tang, G., Zhang, Q., Hong, Y., & Chen, X. (2020). A Framework to Evaluate Community Resilience to Urban Floods: A Case Study in Three Communities. *Sustainability*, 12(4), 1-21.