



Spatial Prediction of Flood hazard Potential Using Two Statistical Models: Surface Density and Frequency Ratio (Case Study: Buyouk Chai drainage basin, Sarab County)

Mohammad Hossein Rezaei Moghaddam¹ | Tohid Rahimpour² | Aily Farahmand
Tabar³

1. Corresponding author, Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz and Iranian Hazardology Association, Tabriz, Iran. E-mail: Rezmogh@tabrizu.ac.ir
2. Postdoctoral Researcher, Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: Rahimpour1990@gmail.com
3. MSc, Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: farahmand_aily@yahoo.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 13 March 2025

Received in revised form 17
April 2025

Accepted 04 August 2025

Published online 27 August
2025

Keywords:

Flood hazard,
Zoning,
Statistical analysis,
Buyouk Chai basin.

ABSTRACT

Objective: Annually, intense and flood-inducing rainfall in northwestern Iran, particularly in the Buyouk Chai basin, results in significant human and financial losses. The Buyouk Chai basin, located in Sarab County, is considered a high-hazard area for flooding due to its vast area and adequate rainfall. Therefore, the objective of this study is to spatially predict the potential flood hazard across this basin.

Methods: This research employs two statistical models: Surface Density and Frequency Ratio (FR). To prepare flood hazard potential maps for the study area, 11 parameters influencing flood occurrence were utilized, including elevation, slope, aspect, land use, vegetation index, precipitation, distance from river, drainage density, lithology, soil type, and topographic wetness index.

Results: An analysis of the parameter importance using both models revealed that low-lying areas with gentle slopes, as well as areas in proximity to streams, exhibited the highest frequency of flooding. Consequently, these areas were assigned the highest weight coefficients in both models, indicating the pivotal role of these regions in the occurrence of floods in the study area.

Conclusions: The findings indicate that topographic features, such as slopes and elevations, significantly influence water flow and flood hazard. The calculation of the area for each flood hazard class shows that in the Frequency Ratio model, over 10% of the region's area falls within the very high-hazard category, while in the Surface Density model, approximately 6% of the area is classified as very high-hazard in terms of flood potential. These results underscore the importance of topographic factors in flood hazard assessment and highlight the effectiveness of the employed models in identifying high-hazard zones. The evaluation of model accuracy demonstrated that both models are capable of producing flood hazard maps with relatively high precision across different areas of the basin.

Cite this article: Rezaei Moghaddam, Mohammad Hossein., Rahimpour, Tohid., & Farahmand Tabar, Aily. (2025). Spatial prediction of flood hazard potential using two statistical models: surface density and frequency ratio (case study: Buyouk Chai drainage basin, Sarab County) *Journal of Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences*, 5 (15), ?-?. <http://doi.org/10.22034/rsgi.2025.66386.1126>



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.22034/rsgi.2025.66386.1126>

Publisher: University of Tabriz.



Introduction

Buyouk Chai drainage basin is located in the northeastern part of Sarab County. The primary tributaries of this river originate from the slopes of the Sabalan Mountain range and ultimately form the Buyouk Chai River. Due to its unique geographical position and specific climatic conditions, this basin has a high potential for flooding. Annually, with the onset of spring and the increase in water levels caused by snowmelt and seasonal rainfall, the tributaries of the Buyouk Chai River overflow, exposing surrounding villages and agricultural lands to flood hazard. This study aims to provide a comprehensive map of flood hazard potential in the Buyouk Chai basin. To achieve this objective, hydrological, meteorological, and spatial data were utilized. The resulting map can serve as an effective tool for local managers and decision-makers, enabling them to implement more precise planning and preventive measures to mitigate flood-related damages in the region. This research represents a significant step toward optimizing water resource management and reducing flood hazard in the Buyouk Chai basin.

Materials and Methods

This research employs two statistical models: Surface Density and Frequency Ratio (FR). To prepare flood hazard potential maps for the study area, 11 parameters influencing flood occurrence were utilized, including elevation, slope, aspect, land use, vegetation index, precipitation, distance from river, drainage density, lithology, soil type, and topographic wetness index. The Surface Density Model is one of the most widely used statistical methods for flood hazard analysis and simulating the potential occurrence of floods in various regions. By employing statistical analyses and processing spatial data, the Surface Density Model provides an effective tool for simulating and predicting flood hazard. This model can accurately identify flood-prone areas, thereby contributing to improved planning and crisis management. The Frequency Ratio (FR) model is a simple and practical tool that aids in understanding the probabilistic relationship between independent variables (such as information layers) and a dependent variable (such as flood occurrence). This model examines the relationship between influencing factors and the phenomenon of interest through the analysis of classified maps. The frequency ratio method indicates the probability of the presence of a phenomenon with specific characteristics. In other words, this method determines the level of correlation between flood locations. The greater the value of this ratio in a particular class or category of a given factor, the more significant the role or importance of that class in the occurrence of floods.

Results

The results of the analysis of the parameters used in the research with two statistical models are as follows: Soil hydrologic groups indicate the soil's infiltration capacity. The weighting results of this parameter reveal that in both models, Group B has had the most significant impact on flood occurrence. Regarding the elevation parameter, the analysis of frequency ratio and density models demonstrates that downstream areas of elevations have a high potential for flooding. Consequently, elevation levels between 1645 and 1767 meters have the highest weight in both models. The examination of the slope parameter's relationship with the spatial location of flood-affected areas shows that the 0 to 10% slope class, with a weight coefficient of 2.44 in the frequency ratio model and 0.104 in the density model, has the most substantial influence on flood occurrences in the region. The analysis of the aspect parameter also indicates that northern and western aspects have the most significant impact on flood events. Concerning the distance from the river, the 0 to 250-meter class has the highest number of flood occurrences and, consequently, the highest weight coefficient in both models. The analysis of the river density parameter reveals that the 0.72 to 1.31 class has the highest weight in both models, highlighting the importance of this class in regional flood events. For the precipitation parameter, the weighting results show that despite high rainfall in elevated areas, downstream regions of the basin, which receive less precipitation compared to the highlands, are more susceptible to flood risks due to being the formation zones of surface runoff. Regarding the topographic wetness index parameter, the weighting results indicate that the higher the value of this index, the greater the risk of flooding. Therefore, the 8.5 to 9.8 class has the highest weight in both models, signifying its high susceptibility to flooding. In the land use parameter, the categories of gardens and agricultural areas demonstrate the highest significance in both models. Analysis of the lithology parameter reveals that volcanic rocks, spanning from dacitic to andesitic compositions, along with recent alluvial terraces and red to brown marls associated with sandstone, hold the greatest weight.

Conclusion

The analysis of parameter significance revealed that low-lying areas with gentle slopes and regions adjacent to watercourses are highly susceptible to flood hazard. The results of the study indicated that in the frequency ratio



model, more than 38 km², and in the surface density model, approximately 22 km² of the study area fall into the very high flood hazard potential category. To evaluate the accuracy of the final maps produced by both models, statistical indices such as Sensitivity, Specificity, and Accuracy, as well as the ROC curve and the area under the curve (AUC), were utilized. The results of this section indicate that both models exhibit high accuracy in generating flood hazard potential maps for the studied basin. Specifically, the accuracy of the frequency ratio model, based on the Accuracy statistical index, was 0.86, while the accuracy of the surface density model was 0.85. This demonstrates that both models are effective in producing reliable flood hazard potential maps for the area under investigation.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Funding

This article was conducted with the financial support of the Vice Chancellor for Research of the University of Tabriz as part of the first author's student thesis research.

Acknowledgments

We would like to express our gratitude to the Vice Chancellor for Research of University of Tabriz, the Meteorological Organization of East Azerbaijan Province, the Regional Water Organization of East Azerbaijan Province, and all those who contributed to the material and moral support of writing this article.

References

- Rahimpour, T., Rezaei Moghaddam, M.H. (2025). Modeling the Flood Hazard Potential in the Aji Chai basin using Data Mining Algorithms. *Journal of Environmental Erosion Research*, 14 (4), 19-38. (In Persian) <http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-862-fa.html>
- Rezaei Moghaddam, M.H. Rahimpour, T. (2024). Preparation of flood hazard potential map using two methods: Frequency Ratio and Statistical Index (Case study: Aji Chai Basin). *Environmental Management Hazards*, 10(4), 291-308. (In Persian) doi: 10.22059/jhsci.2024.369163.803



پیش‌بینی مکانی پتانسیل خطر وقوع سیل با استفاده از دو مدل آماری تراکم سطح و نسبت فراوانی (مطالعه موردی: حوضه آبریز بیوک چای، شهرستان سراب)

محمدحسین رضائی مقدم^۱ | توحید رحیم پور^۲ | آیلی فرهمند تبار^۳

۱. نویسنده مسئول، استاد، گروه ژئومورفولوژی و انجمن مخاطره‌شناسی ایران، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: Rezmogh@tabrizu.ac.ir

۲. پژوهشگر پسادکتری، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: Rahimpour1990@gmail.com

۳. کارشناس ارشد، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: farahmand_aily@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: هر ساله، بارش‌های شدید و سیل‌آسا در شمال غرب ایران، به ویژه در حوضه آبریز بیوک چای، خسارات جانی و مالی قابل توجهی به همراه دارد. حوضه آبریز بیوک چای، واقع در شهرستان سراب، به دلیل وسعت زیاد و دریافت بارش‌های مناسب، از جمله مناطق با پتانسیل بالای خطر وقوع سیل محسوب می‌شود. بنابراین، هدف این پژوهش، پیش‌بینی مکانی پتانسیل خطر وقوع سیل در سطح این حوضه است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۳	روش پژوهش: جهت انجام تحقیق حاضر از دو مدل آماری تراکم سطح و نسبت فراوانی (FR) استفاده شده است. برای تهیه نقشه‌های پتانسیل خطر سیل در منطقه مورد مطالعه، از ۱۱ پارامتر مؤثر در وقوع سیل استفاده شده است که شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، کاربری اراضی، شاخص پوشش گیاهی، بارش، فاصله از آبراهه، تراکم آبراهه، لیتولوژی، خاک و شاخص رطوبت توپوگرافی می‌شود.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۲۸	نتایج: بررسی اهمیت پارامترها با استفاده از هر دو مدل نشان داد که مناطق کم‌ارتفاع با شیب کم و همچنین مناطق نزدیک به آبراهه‌ها، بیشترین فراوانی سیل‌گیری را داشته و در نتیجه بالاترین ضریب وزنی را در هر دو مدل به خود اختصاص داده‌اند که بیانگر نقش کلیدی این مناطق در وقوع سیلاب‌های منطقه مورد مطالعه می‌باشد.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۳	نتیجه‌گیری: نتایج تحقیق نشان داد که ویژگی‌های توپوگرافی، مانند شیب‌ها و ارتفاعات، تأثیر قابل توجهی بر جریان آب و خطر سیل دارند. محاسبه مساحت هر یک از کلاس‌های خطر وقوع سیل نشان می‌دهد که در مدل نسبت فراوانی بیش از ۱۰ درصد از مساحت منطقه در پهنه‌های خیلی زیاد و در مدل تراکم سطح حدود ۶ درصد از مساحت منطقه در طبقه خیلی زیاد از نظر پتانسیل خطر وقوع سیل قرار دارند. ارزیابی دقت مدل‌ها نیز نشان داد که هر دو مدل با دقت نسبتاً بالایی قادر به تهیه نقشه‌های خطر سیل در مناطق مختلف حوضه هستند.
کلیدواژه‌ها: مخاطره سیل، پهنه‌بندی، تحلیل آماری، حوضه آبریز بیوک چای.	

استناد: رضائی مقدم، محمدحسین؛ رحیم‌پور، توحید؛ و فرهمندتبار، آیلی (۱۴۰۴). پیش‌بینی مکانی پتانسیل خطر وقوع سیل با استفاده از دو مدل آماری تراکم سطح و نسبت فراوانی (مطالعه موردی: حوضه آبریز بیوک چای، شهرستان سراب). کاربرد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در علوم محیطی، ۵ (۱۵)، ۱-۵.



<http://doi.org/10.22034/rsgi.2025.66386.1126>

© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه تبریز.

مقدمه

سیل به‌عنوان یکی از بلایای طبیعی گسترده، هر ساله خسارت‌های قابل‌توجهی به محیط طبیعی و سازه‌های انسانی در نقاط مختلف جهان وارد می‌کند (رضائی‌مقدم و همکاران، ۱۳۹۹). این پدیده غالباً به‌صورت غیرمنتظره رخ می‌دهد و در بازه‌ی زمانی کوتاهی، آسیب‌های شدید و غیرقابل‌جبرانی ایجاد می‌نماید (رضائی‌مقدم و همکاران، ۱۳۹۹). در طی دو دهه گذشته، تعداد وقوع سیل‌ها در سراسر جهان بیش از ۴۰ درصد افزایش یافته است (Hirabayashi et al., 2013). افزایش جمعیت و رشد سریع توسعه شهری و ساخت‌وساز در کنار رودخانه، خطر سیل‌گیری را در بسیاری از مناطق افزایش داده است (احمدی‌شرف و همکاران، ۲۰۱۶). مناطقی که بیشتر در معرض خطر سیل قرار دارند، شامل نواحی با تراکم جمعیت بالا، زمین‌های کشاورزی و همچنین شبکه‌های رودخانه‌ای می‌شوند که در آن‌ها آب‌های ناشی از بارش‌های شدید جمع‌آوری و متمرکز می‌گردد (Dankers et al., 2014). با توجه به غیرمترقبه بودن سیل‌ها و خسارات جبران‌ناپذیر آن‌ها، ضروری است با اتخاذ راهکارهای جامع مانند مدیریت صحیح آب‌های سطحی، برنامه‌ریزی کاربری اراضی و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی، تاب‌آوری جوامع را افزایش داد. بدون اقدامات پیشگیرانه و سیاست‌گذاری‌های پایدار، پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی سیل‌ها به‌ویژه در مناطق پرخطر، تشدید خواهد شد. بنابراین مطالعه‌ی حاضر در راستای پاسخ به این سؤال انجام شده است: پهنه‌های در معرض خطر سیل در سطح حوضه‌ی آبریز بیوک‌چای کدامند؟

حوضه آبریز بیوک‌چای در شمال شرق شهرستان سراب واقع شده است. این رودخانه از سرشاخه‌هایی تشکیل می‌شود که از دامنه‌های کوه سبلان سرچشمه می‌گیرند. به‌دلیل ویژگی‌های جغرافیایی منحصربه‌فرد و شرایط اقلیمی خاص این منطقه، حوضه بیوک‌چای پتانسیل بالایی برای وقوع سیلاب دارد. هر سال با فرا رسیدن فصل بهار و افزایش آبدی شاخه‌های فرعی این رودخانه، روستاها و زمین‌های کشاورزی مجاور در معرض خطر سیل قرار می‌گیرند. این پژوهش با استفاده از داده‌های هیدرولوژیکی، هواشناسی و مکانی، به تهیه نقشه‌ای جامع از مناطق پرخطر سیلابی در حوضه بیوک‌چای می‌پردازد. چنین نقشه‌ای می‌تواند ابزار ارزشمندی برای برنامه‌ریزی و اجرای اقدامات پیشگیرانه توسط مسئولان و تصمیم‌سازان محلی باشد. نوآوری اصلی این مطالعه در بهره‌گیری همزمان از دو روش آماری پیشرفته و ارزیابی نتایج آن‌ها با یکدیگر است.

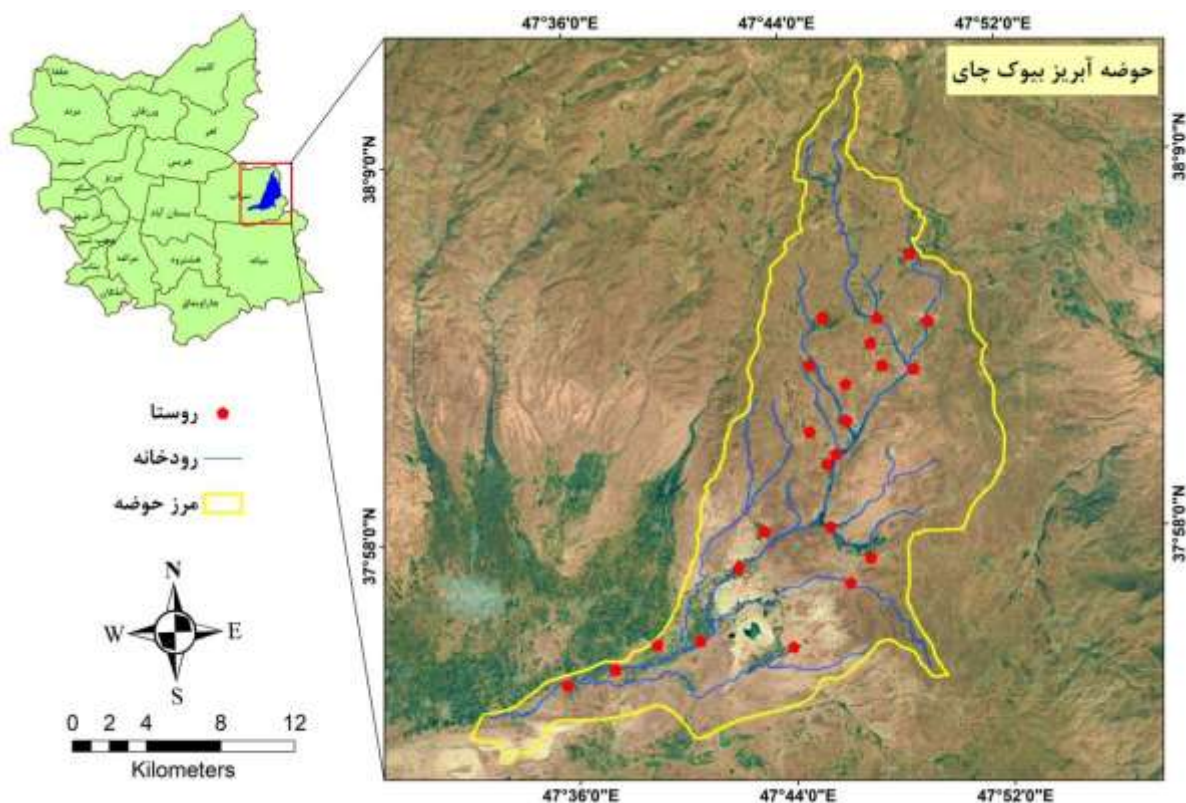
تحقیقات ارزشمندی با بهره‌گیری از روش‌های آماری در زمینه موضوع پژوهش صورت گرفته است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. انتظاری و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از ارزیابی کارایی روش‌های نسبت فراوانی و وزن شواهد به پهنه‌بندی نقشه حساسیت سیل‌گیری در استان کرمانشاه پرداختند که یافته‌های این پژوهش حاکی از آن است که دقت مدل‌های نسبت فراوانی و وزن شواهد در شناسایی مناطق دارای استعداد سیل در استان کرمانشاه مناسب می‌باشند بنابراین استفاده از تکنیک نسبت فراوانی و وزن شواهد در ارزیابی خطر سیل گرفتگی مفید و قابل‌اعتماد است. یوسفی و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از مدل‌های SI، FR و Shannon در محیط GIS، مناطق مستعد سیل در حوضه آبریز کشکان (لرستان) را بررسی کردند. نتایج نشان داد فاصله از رودخانه مهم‌ترین عامل است و مدل آنترپی شانون با دقت ۰/۸۲ بهترین عملکرد را داشته است. این مدل همچنین مساحت بیشتری از حوضه را در معرض خطر زیاد سیل‌گیری نشان داد. رضائی‌مقدم و رحیم‌پور (۱۴۰۲) با هدف تهیه نقشه پتانسیل خطر وقوع سیل در حوضه آبریز آجی‌چای، از ۱۸ پارامتر مؤثر و دو روش آماری نسبت فراوانی (FR) و شاخص آماری (SI) استفاده کردند. نتایج نشان داد که مناطق پایین‌دست و اطراف آبراهه‌های اصلی بیشترین خطر سیل را دارند. ارزیابی دقت مدل‌ها با منحنی ROC نیز عملکرد عالی هر دو روش را در پیش‌بینی خطر سیل تأیید کرد. توفیق‌لو اسلام و همکاران (۲۰۲۱)، در پژوهشی با استفاده از مدل‌های پیشرفته یادگیری ماشین اقدام به مدل‌سازی حساسیت سیل در زیر حوضه تیستا واقع در شمال بنگلادش نمودند. جهت تهیه نقشه حساسیت خطر سیل از ۱۲ پارامتر مؤثر در وقوع این پدیده شامل ارتفاع، انحناء، شیب، جهت شیب، شاخص زبری توپوگرافی TRI، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص قدرت آبراهه، شاخص حمل رسوب، کاربری اراضی، فاصله از رودخانه، نوع خاک و بارش استفاده گردید. نتایج تحقیق نشان داد که مدل Dagging نتایج بهتری نسبت به سایر مدل‌ها داشته است. ماجد و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای با به‌کارگیری مدل‌های تحلیل سلسله مراتبی و نسبت

فراوانی، نقشه‌ای از حساسیت خطر وقوع سیل در منطقه جلوم واقع در پاکستان تهیه کردند. پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش شامل ارتفاع، شیب، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، خاک و بارش بودند. بر اساس نتایج وزن‌دهی عوامل، تراکم زهکشی به عنوان مؤثرترین پارامتر شناسایی شد. یافته‌ها نشان داد که حدود ۱۱ درصد از مساحت منطقه در طبقات با خطر زیاد و بسیار زیاد از نظر احتمال وقوع سیل قرار دارد.

روش پژوهش

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز بیوک چای در محدوده جغرافیایی $37^{\circ} 51' 39''$ تا $38^{\circ} 11' 38''$ عرض شمالی و $73^{\circ} 52' 01''$ تا $73^{\circ} 52' 01''$ طول شرقی قرار گرفته است (شکل ۴-۱). بر اساس آخرین سرشماری انجام شده در سال ۱۳۹۵، جمعیت کل روستاهای واقع در حوضه به حدود ۵۰۰۰ نفر می‌رسد. مساحت حوضه حدود $374/3$ کیلومتر مربع می‌باشد. این وسعت قابل توجه نشان‌دهنده تنوع ویژگی‌های جغرافیایی و هیدرولوژیکی حوضه است. مساحت بزرگ این حوضه به معنای وجود مناطق مختلف از نظر توپوگرافی، پوشش گیاهی، و منابع آبی است که باید به‌طور جامع در مطالعات مربوط به مدیریت منابع آبی و پیش‌بینی خطرات سیلاب‌ها مورد بررسی قرار گیرد. ارتفاع این منطقه از سطح دریا بین 1645 تا 3816 متر متغیر است. رودخانه اصلی حوضه، بیوک چای می‌باشد. این رودخانه از ارتفاعات سبلان سرچشمه می‌گیرد و به آبی چای می‌پیوندد. اهمیت این رودخانه در تأمین آب برای منطقه و همچنین نقش آن در بروز سیلاب‌ها مورد توجه است. طول رودخانه بیوک چای حدود 42 کیلومتر است. این حوضه یکی از زیر حوضه‌های دریاچه ارومیه محسوب می‌شود.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز بیوک چای

Fig. 1- Geographical location of the Buyouk Chai basin

مدل تراکم سطح

مدل تراکم سطح یکی از روش‌های آماری پرکاربرد در تحلیل خطر سیلاب و شبیه‌سازی پتانسیل وقوع سیلاب در مناطق مختلف است. این روش یکی از روش‌های آماری دو متغیره می‌باشد و به محققان کمک می‌کند تا با استفاده از داده‌های موجود، نقشه‌های حساسیت به خطر سیلاب را تهیه کنند. در این روش با استفاده از روابط زیر برای هر یک از طبقات پارامترها تراکم سیل محاسبه و نقشه حساسیت خطر وقوع سیل تهیه می‌شود:

$$D_{area} = \frac{N_{pix}(S_{xi})}{N_{pix}(X_i)}$$

$$W_{area} = 1000 \left[D_{area} - \frac{\sum N_{pix}(S_{xi})}{\sum N_{pix}(X_i)} \right] \quad \text{رابطه (۱)}$$

D_{area} تراکم سیل در هر رده از پارامتر. $N_{pix}(s_{xi})$ تعداد پیکسل‌های سیل در هر رده از پارامتر مشخص. $N_{pix}(x_i)$ تعداد کل پیکسل‌های سیل در هر رده از پارامتر مشخص. W_{area} وزن متغیر در هر رده از هر پارامتر. پس از محاسبه وزن‌های هر یک از کلاس‌های پارامترهای مختلف، نقشه نهایی با جمع بستن ارزش پیکسل‌های پارامترهای مختلف و طبقه‌بندی آن در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه می‌شود. مدل تراکم سطح با استفاده از تحلیل‌های آماری و پردازش داده‌های فضایی، ابزاری مؤثر برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی خطر سیلاب فراهم می‌کند. این مدل با دقت بالا می‌تواند نقاط مستعد سیلاب را شناسایی کرده و به بهبود برنامه‌ریزی و مدیریت بحران کمک نماید.

مدل نسبت فراوانی

مدل نسبت فراوانی (FR) یک ابزار ساده و کاربردی است که به درک رابطه احتمالی بین متغیرهای مستقل (مانند لایه‌های اطلاعاتی) و متغیر وابسته (مانند وقوع سیل) کمک می‌کند. این مدل از طریق تحلیل نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده، ارتباط بین عوامل مؤثر و پدیده مورد نظر را بررسی می‌نماید. روش نسبت فراوانی نشان‌دهنده احتمال حضور یک پدیده با مشخصاتی ویژه است. به عبارت دیگر این روش سطح همبستگی بین موقعیت‌های سیلاب‌ها را مشخص می‌نماید. هرچقدر مقدار این نسبت در یک طبقه یا کلاس یک عامل مشخص بزرگ‌تر باشد بیانگر اهمیت یا نقش بیشتر آن کلاس در عامل مربوطه در وقوع سیل است. به‌طور کلی عدد یک FR نشان‌دهنده همبستگی متوسط نقاط سیل‌خیز و عوامل مؤثر بر آن می‌باشد. اگر مقدار FR بزرگ‌تر از ۱ باشد همبستگی بالایی دارد و ارتباط کمتر برابر است با ارزش FR کمتر از ۱ (Pradhan, 2010). مقادیر نسبت فراوانی برای یک طبقه یا کلاس مشخص از یک پارامتر معین از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$FR = \frac{E/F}{M/L} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن E تعداد نقاط سیل در کلاس موردنظر. F تعداد کل رخداد‌های سیل در منطقه مورد مطالعه است. M تعداد پیکسل‌های کلاس موردنظر و L تعداد کل پیکسل‌های مربوط به فاکتور مربوطه (مثلاً ارتفاع) در منطقه مورد مطالعه است.

$$FSI = \sum_{R=1}^{R=n} FR \quad \text{رابطه (۳)}$$

معادله روش نسبت فراوانی نسبت وقوع سیلاب در یک کلاس خاص از پارامتر را به وقوع کلی سیلاب در تمام منطقه مقایسه می‌کند و میزان اهمیت آن کلاس را در ایجاد سیلاب مشخص می‌کند. مدل نسبت فراوانی در مطالعات مختلف برای تحلیل خطر سیلاب و شبیه‌سازی پتانسیل وقوع سیلاب در مناطق مختلف استفاده شده است. به عنوان مثال، این مدل می‌تواند به شناسایی نواحی با خطر بالا بر اساس ویژگی‌های توپوگرافی، نوع خاک، و پوشش گیاهی کمک کند و به برنامه‌ریزان و مدیران بحران کمک کند تا اقدامات پیشگیرانه و مدیریتی مناسبی اتخاذ کنند.

ارزیابی مدل‌ها

در پژوهش حاضر جهت ارزیابی مدل‌های تحقیق از داده‌های میدانی، منحنی مشخصه عملیاتی دریافت‌کننده یا منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) و سطحی زیر منحنی (AUC) استفاده شده است. در منحنی ROC روی محور X مقدار تشخیص‌پذیری یا ویژگی Specificity (نسبت پیکسل‌های بدون سیل که به درستی به‌عنوان بدون سیل طبقه‌بندی شده‌اند) و روی محور Y مقدار حساسیت Sensitivity (نسبت پیکسل‌های سیل که به درستی به‌عنوان سیل طبقه‌بندی شده‌اند) مشخص می‌باشد:

$$\text{specificity} = \frac{\text{TN}}{\text{FP} + \text{TN}} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$\text{sensitivity} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}} \quad \text{رابطه ۵}$$

که در آن TN^1 تعداد مناطق بدون سیل که درست تشخیص داده شده‌اند؛ FP^2 تعداد نقاط سیل که اشتباه تشخیص داده شده‌اند؛ TP^3 تعداد نقاط سیل که درست تشخیص داده شده‌اند و FN^4 تعداد نقاط بدون سیل که اشتباه تشخیص داده شده‌اند. جهت نشان دادن عملکرد هر یک از مدل‌ها از شاخص آماری صحت (Accuracy) نیز استفاده گردید. این شاخص نسبت نقاط سیل گیر و بدون سیل که به درستی طبقه‌بندی شده‌اند را نشان می‌دهد.

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{TN} + \text{FP} + \text{FN}} \quad \text{رابطه ۶}$$

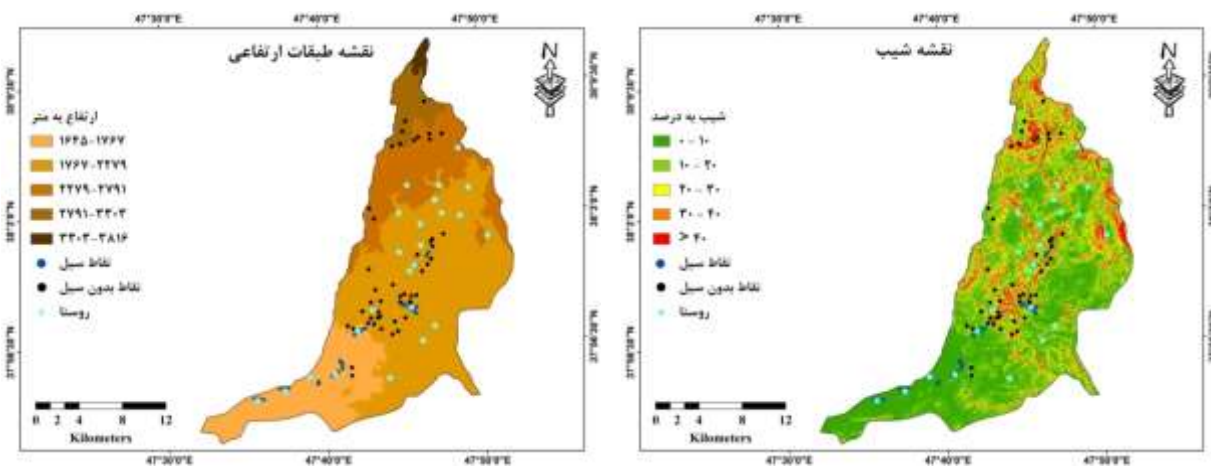
مقدار AUC صفر بیانگر این است که مدل غیرواقعی می‌باشد و هر چقدر مقدار AUC بیشتر باشد عملکرد و کارایی مدل در پیش‌بینی بهتر خواهد بود (Tien Bui et al., 2016).

نتایج و بحث

ارتفاع یکی از مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار بر روی سیل می‌باشد به طور کلی رابطه معکوسی بین خطر وقوع سیل و ارتفاع وجود دارد. فراوانی وقوع سیل با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد، در نتیجه ارتفاعات پست تر از حساسیت بیشتری برای وقوع سیل برخوردار هستند. شیب یکی از عوامل کلیدی در ایجاد رواناب و شناسایی مناطق مستعد سیل است. این پارامتر تأثیر قابل توجهی بر سرعت جریان آب و توان فرسایشی آن دارد. در مناطق با شیب تند، آب با سرعت بیشتری جریان یافته و احتمال وقوع سیل‌های شدید افزایش می‌یابد. در مقابل، در مناطق با شیب ملایم، جریان آب آرام‌تر بوده و شدت سیلاب‌ها معمولاً کمتر است. جهت شیب با تأثیر بر فاکتورهای تبخیر و ذوب همچنین، رطوبت خاک و باد از طریق تشدید یا کاهش این عوامل می‌تواند در میزان نفوذپذیری مؤثر باشد. به منظور تهیه نقشه‌های طبقات ارتفاعی، شیب و جهت شیب منطقه از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر استفاده شده است. کاربری اراضی از دیگر عوامل مهم و مؤثر در تشکیل رواناب سطحی و وقوع سیل حوضه آبریز می‌باشد. سیلاب در مناطقی که از نظر مرتع و پوشش گیاهی ضعیف هستند و در مناطق شهری به دلیل غیرقابل نفوذ بودن باعث جاری شدن رواناب می‌گردد. تغییر کاربری اراضی، مانند تبدیل اراضی طبیعی به مناطق مسکونی یا صنعتی، می‌تواند به کاهش نفوذپذیری و افزایش رواناب منجر شود و خطر سیل را افزایش دهد. در تحقیق حاضر جهت تهیه نقشه کاربری اراضی از تصویر ماهواره ای سنتینل مربوط به سال ۲۰۲۳ استفاده شده و کاربری‌های منطقه با استفاده از الگوریتم حداکثر احتمال استخراج شدند. پوشش گیاهی در یک حوضه نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان نفوذپذیری خاک و حجم رواناب ایفا

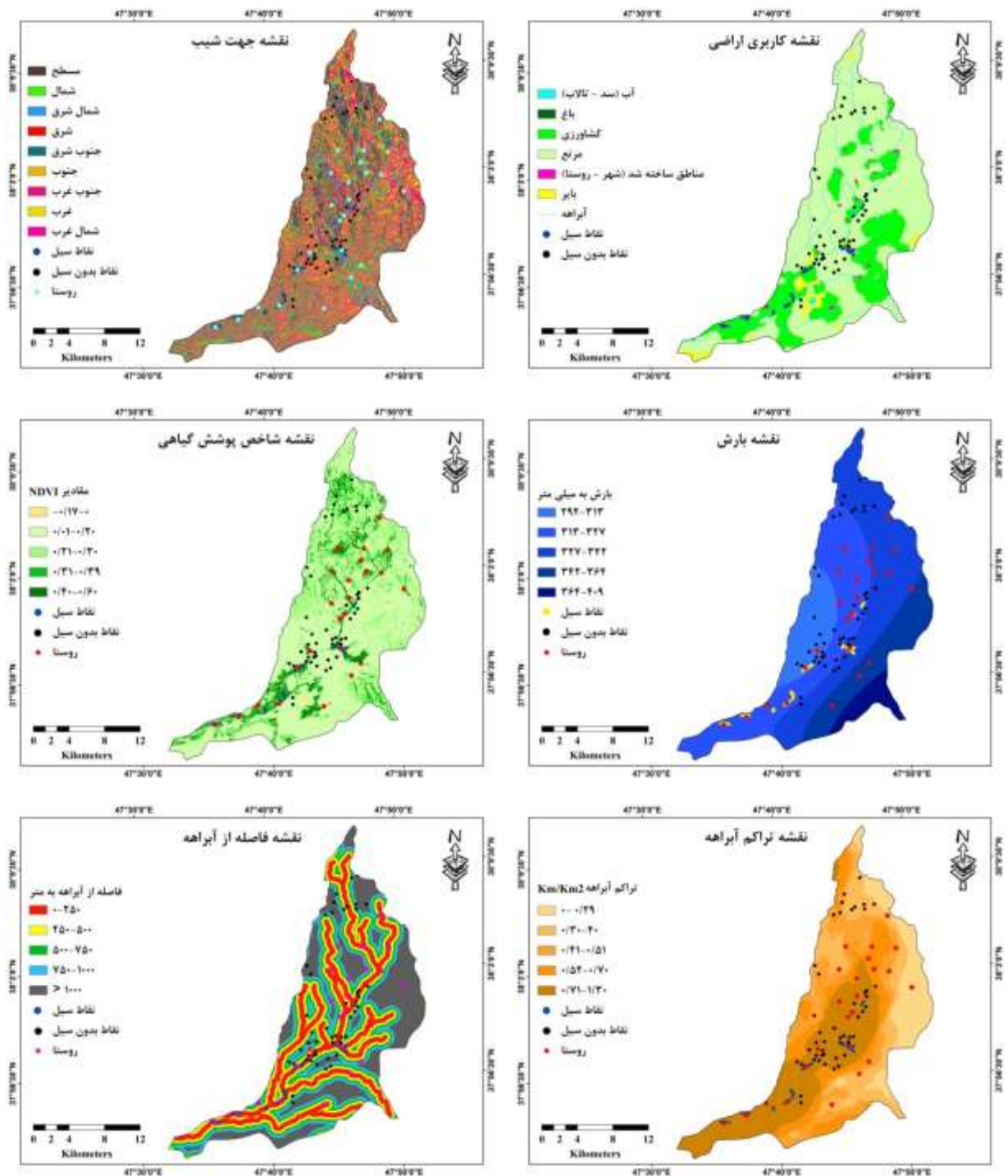
1. True Negative
2. False Positive
3. True Positive
4. False Negative

می‌کند. وجود پوشش گیاهی مناسب نه تنها سرعت جریان رواناب را کاهش می‌دهد، بلکه باعث افزایش نفوذ آب به خاک شده و به این ترتیب، نقش مؤثری در مدیریت رواناب و کاهش خطر سیل‌های ناگهانی دارد. نقشه پوشش گیاهی منطقه با استفاده از تصاویر ماهواره ای لندست ۸ و مربوط به سال ۲۰۲۳ در محیط نرم افزار ENVI تهیه شده است. بارش به همراه شیب منطقه به طور مستقیم در تشدید وقوع پدیده سیل مؤثر است از این رو عامل بارندگی یکی از متغیرهای مهم در ارزیابی پتانسیل سیل در حوضه‌های آبریز می باشد. هرچه میزان بارش میانگین سالانه بیشتر باشد احتمال وقوع سیل نیز بیشتر است در نتیجه مناطق با میانگین بارش بیشتر وزن بیشتری در ارزیابی خطر سیل هستند. خطرات سیل با کاهش فاصله از رودخانه افزایش می‌یابد و بالعکس (Costache et al. 2020). به عبارت دیگر، گسترش سیل در حوضه با فاصله محل تا شبکه زهکشی ارتباط دارد (Elkhrachy, 2015). هرچه پیکسلی به آبراهه‌ها نزدیک تر باشد تخلیه رواناب ناشی از بارش در آن محدوده زود تر اتفاق می افتد اما با افزایش فاصله از آبراهه تخلیه رواناب نیز به مراتب طولانی تر و مشکل تر می گردد. نقشه فاصله از آبراهه در ۵ کلاس طبقه بندی شد. تراکم زهکشی بر روی جریان های اوج تاثیر می گذارد در مناطق با تراکم زهکشی بالا در مقایسه با مناطقی که از تراکم زهکشی پایینی برخوردارند رواناب سطحی بالاتری تشکیل می شود. سنگ شناسی به دلیل تاثیر مستقیم بر توان نفوذ پذیری و رواناب سطحی یکی از عوامل مهم در پدیده سیل حوضه‌های آبریز است. نقشه لیتولوژی منطقه با استفاده از نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ برگرفته از سازمان زمین شناسی و در محیط نرم افزار ArcGIS در ۶ کلاس تهیه گردید. بررسی نقشه نشان می‌دهد که سنگ های آتشفشانی آندزیتی بیشتر مساحت حوضه را پوشش می دهند. این سازندها به دلیل ظرفیت نفوذپذیری نسبتاً پایین نقش مهم در شکل گیری رواناب های سطحی و در نتیجه وقوع سیل در سطح حوضه آبریز دارند. گروه‌های هیدرولوژیکی خاک به چهار گروه A، B، C، D طبقه بندی می شوند. خاک های گروه A دارای حداقل پتانسیل جهت تولید رواناب هستند در حالی که خاک های گروه‌های D دارای حداکثر پتانسیل برای ایجاد رواناب می باشند. نقشه گروه‌های هیدرولوژیکی خاک منطقه در سه گروه B، C، D تهیه شده است. بیشتر مساحت منطقه در گروه C قرار دارند که نشان‌دهنده ظرفیت نفوذپذیری نسبتاً پایین منطقه می باشد. شاخص رطوبت توپوگرافی ابزاری مفید و رایج برای توصیف شرایط رطوبتی در مقیاس حوضه می باشد. مقادیر بالای این شاخص مکان‌هایی را نشان می‌دهد که مستعد سطوح زمین اشباع‌شده و آن‌هایی که دارای ظرفیت ایجاد جریان زمینی هستند (Manfreda et al., 2011).



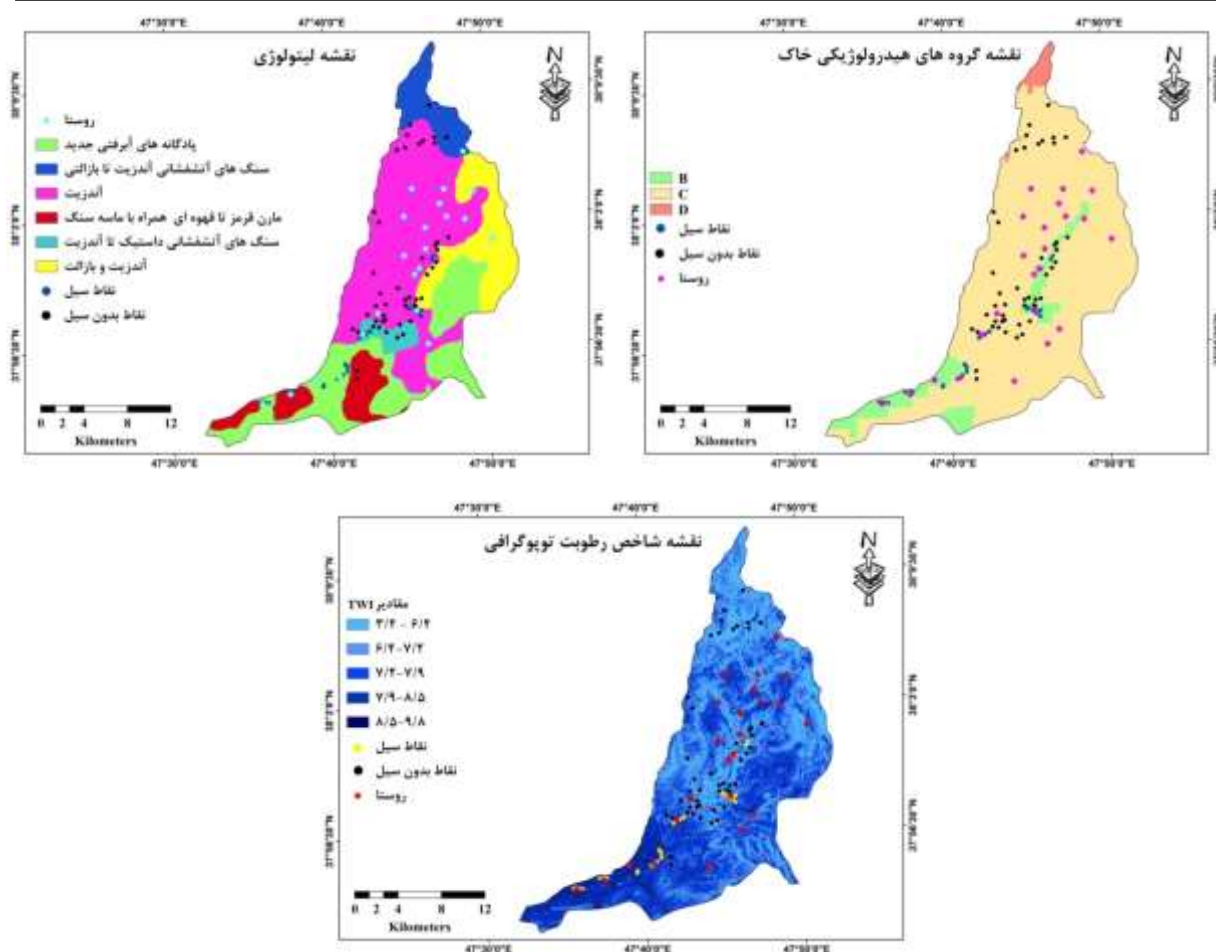
شکل ۲. نقشه پارامترهای مورد استفاده در تحقیق

Fig. 2- Map of the parameters used in the research



ادامه شکل ۲. نقشه پارامترهای مورد استفاده در تحقیق

Fig. 2- Map of the parameters used in the research



ادامه شکل ۲. نقشه پارامترهای مورد استفاده در تحقیق

Fig. 2- Map of the parameters used in the research

با تهیه لایه‌های اطلاعاتی مربوط به هر پارامتر و تعیین مقادیر پیکسلی طبقات مختلف، وزن هر طبقه از لایه‌ها با استفاده از روش‌های نسبت فراوانی و تراکم سطح محاسبه گردید. نتایج این بخش به صورت جدول ۱ تا ۱۱ ارائه شده است.

جدول ۱. وزن طبقات معیار ارتفاع (متر)

Table 1- Weight of elevation criterion classes (meters)

طبقه	تعداد پیکسل	تعداد نقاط سیل	وزن نسبت فراوانی	وزن تراکم سطح
۱۶۴۵-۱۷۶۷	۹۵۶۳۹	۲۱	۳/۲۱۱	۰/۱۵۱
۱۷۶۷-۲۲۷۹	۲۷۴۸۷۰	۱۳	۰/۶۹۱	-۰/۰۲۱۰
۲۲۷۹-۲۷۹۱	۹۵۱۱۴	۰	۰	-۰/۰۶۸۳
۲۷۹۱-۳۳۰۳	۲۶۸۸۷	۰	۰	-۰/۰۶۸۳
۳۳۰۳-۳۸۱۶	۴۷۶۳	۰	۰	-۰/۰۶۸۳

جدول ۲. وزن طبقات معیار شیب (درصد)

Table 2- Weight of slope criterion classes (percent)

طبقه	تعداد پیکسل	تعداد نقاط سیل	وزن نسبت فراوانی	وزن تراکم سطح
۰-۱۰	۱۹۲۳۶۴	۳۴	۲/۴۴	۰/۱۰۴
۱۰-۲۰	۱۴۲۷۷۷	۰	۰	-۰/۰۷۲۳
۲۰-۳۰	۷۳۰۸۲	۰	۰	-۰/۰۷۲۳
۳۰-۴۰	۳۵۴۳۴	۰	۰	-۰/۰۷۲۳
بیشتر از ۴۰	۲۶۴۸۴	۰	۰	-۰/۰۷۲۳

جدول ۳. وزن طبقات معیار جهت شیب

Table 3- Weight of aspect criterion classes (meters)

طبقه	تعداد پیکسل	تعداد نقاط سیل	وزن نسبت فراوانی	وزن تراکم سطح
مسطح	۴۷۸۳	۰	۰	-۰/۰۶۸۵
شمال	۴۷۵۲۸	۶	۱/۸۴۰	۰/۰۵۷۶
شمال شرق	۳۸۴۹۷	۱	۰/۳۷۸	-۰/۰۴۲۶
شرق	۴۴۳۳۳	۳	۰/۹۸۶	-۰/۰۰۸۹
جنوب شرق	۷۳۹۸۹	۳	۰/۵۹۹	-۰/۰۲۷۴
جنوب	۹۸۷۱۰	۵	۰/۷۳۸	-۰/۰۱۷۹
جنوب غرب	۷۵۲۳۷	۵	۰/۹۶۹	-۰/۰۰۲۱
غرب	۵۴۹۸۸	۷	۱/۸۵۶	۰/۰۵۸۷
شمال غرب	۵۸۷۳۶	۴	۰/۹۹۳	-۰/۰۰۰۴

جدول ۴. وزن طبقات معیار فاصله از آبراهه (متر)

Table 4- Weight of distance from river criterion classes (meters)

طبقه	تعداد پیکسل	تعداد نقاط سیل	وزن نسبت فراوانی	وزن تراکم سطح
۰ - ۲۵۰	۹۵۸۴۶	۳۴	۴/۳۴۲	۰/۲۷۳
۲۵۰ - ۵۰۰	۸۰۶۳۵	۰	۰	-۰/۰۸۱۶
۵۰۰ - ۷۵۰	۶۵۹۰۰	۰	۰	-۰/۰۸۱۶
۷۵۰ - ۱۰۰۰	۵۶۰۵۷	۰	۰	-۰/۰۸۱۶
> ۱۰۰۰	۱۱۷۷۳۳	۰	۰	-۰/۰۸۱۶

جدول ۵. وزن طبقات معیار تراکم آبراهه

Table 5- Weight of river density criterion classes

طبقه	تعداد پیکسل	تعداد نقاط سیل	وزن نسبت فراوانی	وزن تراکم سطح
۰ - ۰/۳۰	۶۱۰۳۰	۰	۰	-۰/۰۸۱۶
۰/۳۱ - ۰/۴۲	۷۵۷۵۰	۰	۰	-۰/۰۸۱۶
۰/۴۳ - ۰/۵۲	۷۷۶۷۴	۰	۰	-۰/۰۸۱۶
۰/۵۳ - ۰/۷۱	۶۶۵۵۴	۰	۰	-۰/۰۸۱۶
۰/۷۲ - ۱/۳۱	۱۳۵۱۶۳	۳۴	۳/۰۷	۰/۱۶۹

جدول ۶. وزن طبقات معیار گروه‌های هیدرولوژیکی خاک

Table 6- Weight of soil hydrological group criterion classes

طبقه	تعداد پیکسل	تعداد نقاط سیل	وزن نسبت فراوانی	وزن تراکم سطح
B	۴۱۵۳۷	۲۳	۶/۷۵۹	۰/۴۷۱
C	۳۶۵۷۵۶	۱۱	۰/۳۶۷	-۰/۰۵۱۸
D	۷۷۴۷	۰	۰	-۰/۰۸۱۹

جدول ۷. وزن طبقات معیار بارش

Table 7- Weight of precipitation criterion classes

طبقه	تعداد پیکسل	تعداد نقاط سیل	وزن نسبت فراوانی	وزن تراکم سطح
۲۹۲/۸-۳۱۶/۲	۵۳۷۲۰	۶	۱/۳۹۲	۰/۰۳۲
۳۱۶/۳-۳۳۱/۵	۱۲۸۴۰۸	۲۳	۰/۳۰۸	۰/۰۹۷۳
۳۳۱/۶-۳۴۵	۱۴۷۱۲۱	۵	۰/۳۵۳	۰/۰۴۷۷
۳۴۶-۳۶۵	۶۶۵۴۶	۰	۰	۰/۰۸۱۷
۳۶۶-۴۰۷	۳۱۱۲۲	۰	۰	۰/۰۸۱۷

جدول ۸. وزن طبقات معیار شاخص پوشش گیاهی

Table 8- Weight of vegetation index criterion classes

طبقه	تعداد پیکسل	تعداد نقاط سیل	وزن نسبت فراوانی	وزن تراکم سطح
۰-۰/۱۷	۶۶۵	۰	۰	۰/۰۸۱۷
۰/۲۰-۰/۰۱	۳۴۵۲۶۴	۴	۰/۱۹۹	۰/۰۶۵۱
۰/۳۰-۰/۲۱	۱۰۷۵۴۴	۳	۰/۳۴۱	۰/۰۵۳۸
۰/۴۰-۰/۳۱	۳۹۱۶۹	۹	۲/۸۱۰	۰/۱۴۸
۰/۶۱-۰/۴۱	۳۳۳۹۹	۱۸	۹/۴۵۱	۰/۶۹۰

جدول ۹. وزن طبقات معیار کاربری اراضی

Table 9- Weight of land use criterion classes

طبقه	تعداد پیکسل	تعداد نقاط سیل	وزن نسبت فراوانی	وزن تراکم سطح
آب (سد-تالاب)	۵۹۹۶	۰	۰	۰/۰۰۹
باغ	۲۲۵۲	۱	۴۸/۸	۰/۴۳۷
کشاورزی	۹۶۵۱۳۲	۲۶	۲/۹۶۵	۰/۰۱۷۸
مرتع	۲۶۴۳۱۶۵	۴	۰/۱۶۷	۰/۰۰۷۵
مناطق ساخته شده (شهر-روستا)	۲۷۵۲۳	۳	۱۲	۰/۰۹۹
بایر	۹۹۲۳۶	۰	۰	۰/۰۰۹

جدول ۱۰. وزن طبقات معیار لیتولوژی

Table 10- Weight of lithology criterion classes

طبقه	تعداد پیکسل	تعداد نقاط سیل	وزن نسبت فراوانی	وزن تراکم سطح
سنگ های آتشفشانی داستیک تا آندزیت	۱۲۶۱۶	۶	۵/۸۴۲	۰/۳۹۴
مارن قرمز تا قهوه ای همراه با ماسه سنگ	۳۵۳۷۳	۴	۱/۳۸۹	۰/۰۳۱۶
سنگ های آتشفشانی آندزیت تا بازالتی	۳۲۵۴۵	۰	۰	۰/۰۸۱۳
آندزیت	۱۷۸۹۱۵	۱۳	۰/۸۹۲	۰/۰۰۸
پادگانه های ابرفتی جدید	۹۷۷۰۶	۱۱	۱/۳۸۳	۰/۰۳۱۱
آندزیت و بازالت	۶۰۵۶۱	۰	۰	۰/۰۸۱۳

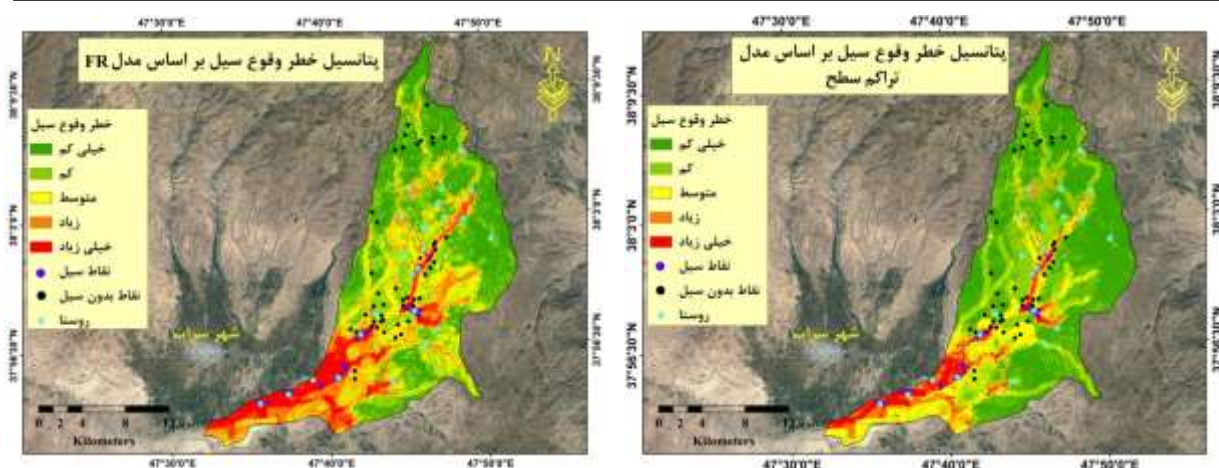
جدول ۱۱. وزن طبقات معیار شاخص رطوبت توپوگرافی

Table 11- Weight of topographic wetness index (TWI) criterion classes

طبقه	تعداد پیکسل	تعداد نقاط سیل	وزن نسبت فراوانی	وزن تراکم سطح
۳/۴-۶/۴	۹۳۱۷۸	۰	۰	۰/۰۷۳۴
۶/۴-۷/۲	۱۳۰۱۶۴	۰	۰	۰/۰۷۳۴
۷/۲-۷/۹	۱۲۵۷۲۰	۱۱	۱/۲۰۸	۰/۰۱۵۰
۷/۹-۸/۵	۸۷۸۱۷	۱۶	۲/۵۱۶	۰/۱۰۹
۸/۵-۹/۸	۳۲۷۱۳	۷	۲/۹۵۵	۰/۱۴۱

گروه‌های هیدرولوژیکی خاک نشان‌دهنده میزان نفوذپذیری خاک هستند. نتایج وزندهی این پارامتر حاکی از آن است که در هر دو مدل، گروه B بیشترین نقش را در وقوع سیل داشته است. تحلیل مدل‌های نسبت فراوانی و تراکم سطح در مورد پارامتر ارتفاع نشان می‌دهد که مناطق پایین‌دست ارتفاعات، پتانسیل بیشتری برای سیل‌گیری دارند. این نتایج با یافته‌های انتظاری و همکاران (۱۳۹۸) مطابقت دارد. لذا سطوح ارتفاعی ۱۶۴۵-۱۷۶۷ در هر دو مدل بیشترین وزن را داشته‌اند. تحلیل ارتباط بین شیب زمین و موقعیت مناطق سیل‌گیر نشان می‌دهد که مناطق با شیب ۰ تا ۱۰ درصد بیشترین نقش را در وقوع سیلاب‌ها داشته‌اند. این کلاس شیب در مدل نسبت فراوانی ضریب وزنی ۲/۴۴ و در مدل تراکم سطح ضریب ۰/۱۰۴ را به خود اختصاص داده است. نتایج تحلیل پارامتر شیب با یافته‌های رحیم‌پور و رضائی‌مقدم (۱۴۰۳) مطابقت دارد. همچنین، بررسی جهت شیب نشان می‌دهد که شیب‌های رو به شمال و غرب بیشترین تأثیر را در وقوع سیلاب‌های منطقه داشته‌اند. تحلیل پارامتر فاصله از آبراهه نشان داد که کلاس ۰ تا ۲۵۰ متر بیشترین فراوانی سیل‌گیری را داشته و در نتیجه بالاترین ضریب وزنی را در هر دو مدل به خود اختصاص داده است. طبق نظر فرناندز و لوتز (۲۰۱۰) مناطق نزدیک رودخانه‌ها از پتانسیل بالایی نسبت به وقوع سیل برخوردار هستند که تحلیل این پارامتر در پژوهش حاضر این مطلب را تأیید می‌کند. همچنین، بررسی پارامتر تراکم آبراهه حاکی از آن است که کلاس ۰/۷۲ تا ۱/۳۱ بیشترین اهمیت وزنی را در هر دو مدل داشته که بیانگر نقش کلیدی این محدوده در وقوع سیلاب‌های منطقه مورد مطالعه می‌باشد. نتایج تحلیل این پارامتر با یافته‌های سویک و کوپال (۲۰۰۳) مطابقت دارد. تحلیل وزن‌دهی پارامتر بارش حاکی از آن است که با وجود بارش‌های سنگین در ارتفاعات، خطر وقوع سیل در مناطق پایین‌دست حوضه که بارندگی کمتری دارند، بیشتر است؛ چرا که این مناطق دریافت‌کننده رواناب‌های تولیدشده در نواحی مرتفع هستند. نتایج وزن‌دهی پارامتر شاخص رطوبت توپوگرافیک نشان می‌دهد که بین مقدار این شاخص و خطر وقوع سیل رابطه مستقیم وجود دارد، به طوری که با افزایش مقدار این شاخص، خطر وقوع سیل نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، کلاس ۸/۵-۹/۸ در هر دو مدل مورد بررسی بیشترین وزن را به خود اختصاص داده است که بیانگر پتانسیل بالای این محدوده در وقوع سیلاب می‌باشد. نتایج تحلیل این پارامتر با یافته‌های رضائی‌مقدم و رحیم‌پور (۱۴۰۲) مطابقت دارد. مناطقی که در پایین‌دست حوضه قرار دارند محل تمرکز و تخلیه رواناب‌ها هستند که باعث سیل‌گیری این مناطق می‌شود. لذا در ارتباط با پارامتر پوشش گیاهی با وجود پوشش گیاهی نسبتاً متراکم در این مناطق، نقش مهمی در وقوع سیلاب‌های منطقه دارند. در پارامتر کاربری اراضی، کلاس‌های باغ و کشاورزی بیشترین وزن را در هر دو مدل نشان می‌دهد. نتایج تحلیل پارامتر لیتولوژی می‌دهد که سنگ‌های آتشفشانی داستیک تا آندزیت، پادگانه‌های آبرفتی جدید و مارن قرمز تا قهوه‌ای همراه با ماسه‌سنگ بیشترین وزن را داشته‌اند.

در ادامه با استفاده از وزن‌های محاسبه‌شده و داده‌های موجود، نقشه‌های پتانسیل خطر وقوع سیلاب در محیط نرم‌افزار GIS تهیه شدند. به این صورت که وزن‌های هر یک از طبقات معیارها در لایه اطلاعاتی خود ضرب شدند. این نقشه‌ها به‌طور بصری نشان می‌دهند که کدام نواحی در معرض خطر بیشتری از وقوع سیلاب قرار دارند. نقشه نهایی با جمع‌بندی ارزش پیکسل‌های پارامترهای مختلف و طبقه‌بندی آن در نرم‌افزار ArcGIS تهیه گردید. این نقشه نهایی، نمایی واضح از نقاط پرخطر و نواحی مستعد سیلاب در منطقه مورد مطالعه ارائه می‌دهد. بررسی مساحت هر یک از کلاس‌های خطر وقوع سیل نشان داد که در مدل نسبت فراوانی بیش از ۳۸ کیلومترمربع و در مدل تراکم سطح حدود ۲۲ کیلومترمربع از مساحت منطقه در طبقه خیلی زیاد از نظر پتانسیل خطر وقوع سیل قرار دارند.

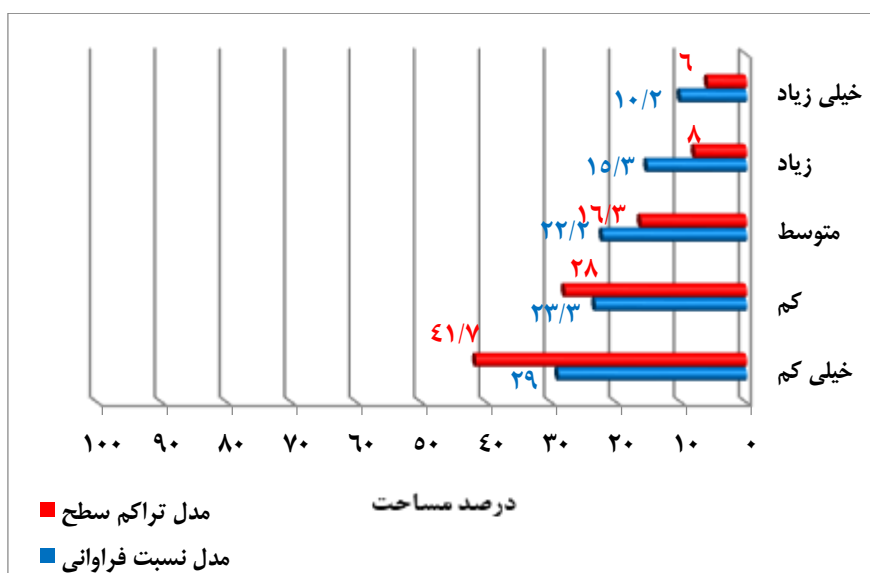


شکل ۳. نقشه‌های پتانسیل خطر وقوع سیلاب
Fig. 3- Flood hazard potential maps

جدول ۱۱. مساحت پهنه‌های خطر در مدل‌های نسبت فراوانی و تراکم سطح (کیلومترمربع)

Table 11- Area of hazard zones in frequency ratio and surface density models (km²)

کلاس	مدل نسبت فراوانی	مدل تراکم سطح
خیلی کم	۱۰۹	۱۵۶
کم	۸۷	۱۰۵
متوسط	۸۳	۶۱
زیاد	۵۷	۳۰
خیلی زیاد	۳۸/۲	۲۲



شکل ۴. درصد مساحت پهنه‌های خطر در مدل‌های نسبت فراوانی و تراکم سطح

Fig. 4- Percentage of hazard zone areas in frequency ratio and surface density models

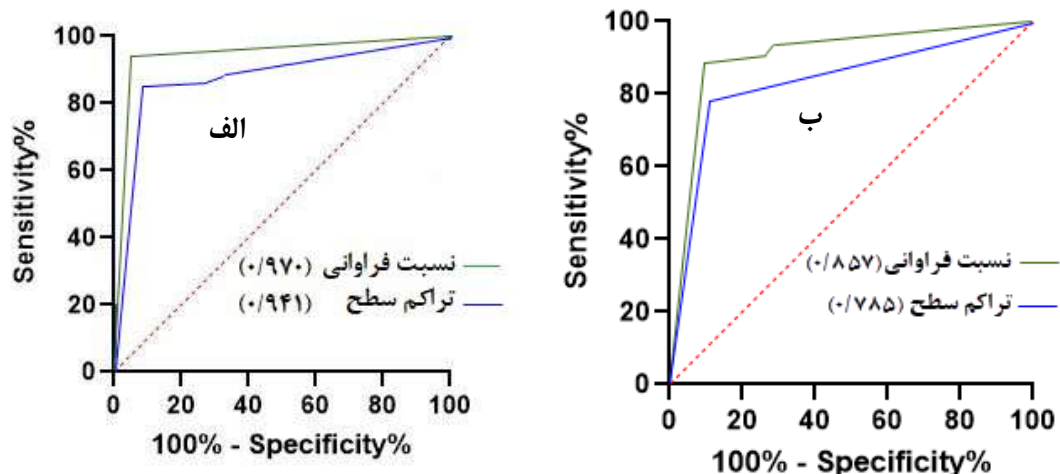
به منظور ارزیابی دقت نقشه‌های نهایی به‌دست‌آمده از هر دو مدل از شاخص‌های آماری از قبیل Sensitivity، Specificity و Accuracy و همچنین منحنی ROC و سطح زیر منحنی (AUC) استفاده شده است. نتایج این بخش نشان می‌دهد که هر دو مدل از دقت خوبی در تهیه نقشه‌های پتانسیل خطر وقوع سیل در حوضه مورد مطالعه برخوردار بوده است. به

این ترتیب که میزان دقت مدل نسبت فراوانی بر اساس شاخص آماری Accuracy برابر با ۰/۸۶ و در مدل تراکم سطح برابر با ۰/۸۵ بوده است.

جدول ۱۲. ارزیابی دقت مدل‌های تحقیق بر اساس داده‌های آموزشی و اعتبارسنجی

Table 12- Evaluation of the accuracy of research models based on training and validation data

مدل شاخص آماری	مدل نسبت فراوانی		مدل تراکم سطح	
	داده‌های آموزشی	داده‌های اعتبارسنجی	داده‌های آموزشی	داده‌های اعتبارسنجی
True positive	۳۲	۱۲	۳۰	۱۱
True negative	۲۷	۱۲	۲۸	۱۲
False positive	۲	۲	۴	۳
False negative	۷	۱۲	۶	۲
Sensitivity (%)	۰/۹۴	۰/۸۵	۰/۸۳	۰/۸۴
Specificity (%)	۰/۹۳	۰/۸۵	۰/۸۷	۰/۸۰
Accuracy (%)	۰/۸۶	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۲



شکل ۵. منحنی ROC بر اساس داده‌های آموزشی (الف) و اعتبارسنجی (ب)

Fig. 5- ROC curve based on training and validation data

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به بررسی و پیش‌بینی پتانسیل خطر سیل در حوضه آبریز بیوک چای واقع در شهرستان سراب با استفاده از دو مدل آماری تراکم سطح و نسبت فراوانی پرداخته شد. به همین منظور از ۱۱ عامل مؤثر در وقوع سیل به همراه داده‌های نقاط سیل و بدون سیل برای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی استفاده شد. داده‌های نقاط سیل و بدون سیل به دو گروه آموزشی و اعتبارسنجی تقسیم شدند. نقشه‌های نهایی پتانسیل خطر وقوع سیل از همپوشانی و ضرب وزن نهایی هر یک از طبقات در نقشه‌های خود در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شدند. نتایج تحقیق نشان داد که ویژگی‌های توپوگرافی، مانند شیب‌ها و ارتفاعات، تأثیر قابل‌توجهی بر جریان آب و خطر سیل دارند. محاسبه مساحت هر یک از کلاس‌های خطر وقوع سیل نشان می‌دهد که در مدل نسبت فراوانی بیش از ۱۰ درصد از مساحت منطقه در پهنه‌های خیلی زیاد و در مدل تراکم سطح حدود ۶ درصد از مساحت منطقه در طبقه خیلی زیاد از نظر پتانسیل خطر وقوع سیل قرار دارند. ارزیابی دقت مدل‌ها نیز نشان داد که هر دو مدل نسبت فراوانی و تراکم سطح در پیش‌بینی خطر سیلاب مؤثر هستند و می‌توانند در ترکیب با داده‌های GIS و تصاویر ماهواره‌ای نتایج قابل اعتمادی ارائه دهند. یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات پژوهشگرانی همچون رضائی‌مقدم و همکاران (۱۴۰۳) در حوضه آبریز آذرشهر چای همسو است. ایشان به‌کارگیری روش‌های آماری را به عنوان ابزاری مناسب برای تهیه نقشه‌های

پتانسیل خطر وقوع سیل پیشنهاد کرده‌اند که نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر بیانگر تأیید نتایج محققین مذکور می‌باشد. نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق به مدیران منابع آبی و برنامه‌ریزان کمک می‌کند تا اقدامات پیشگیرانه و استراتژی‌های مدیریت سیل را بر اساس نقشه‌های دقیق و اطلاعات جامع تدوین کنند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در ارتباط با نویسندگی یا انتشار مقاله ندارند.

سهم نویسندگان در پژوهش

نویسندگان در تمام مراحل و بخش‌های انجام پژوهش سهم برابر داشتند.

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه تبریز در قالب پژوهانه پایان‌نامه دانشجویی نویسنده اول انجام شده است.

تقدیر و تشکر

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تبریز، سازمان هواشناسی استان آذربایجان شرقی، سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی و همه کسانی که در حمایت مادی و معنوی نگارش این مقاله نقش داشته‌اند کمال تشکر را داریم.

منابع

- انتظاری، مژگان؛ جلیلیان، طاهره؛ درویشی خاتونی، جواد (۱۳۹۸). پهنه‌بندی نقشه حساسیت سیل‌گیری با استفاده از ارزیابی کارایی روش‌های نسبت فراوانی و وزن شواهد، مطالعه موردی: استان کرمانشاه. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۶ (۴)، ۱۴۳-۱۶۲.
<http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-2707-fa.html>
- رحیم‌پور، توحید؛ رضائی‌مقدم، محمدحسین (۱۴۰۳). مدل‌سازی پتانسیل خطر وقوع سیلاب در حوضه آبریز آجی‌چای با استفاده از الگوریتم‌های داده‌کاوی. *پژوهش‌های فرسایش محیطی*، ۱۴ (۴)، ۳۸-۱۹.
<http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-862-fa.html>
- رضائی‌مقدم، محمدحسین؛ حجازی، اسدالله؛ ولیزاده کامران، خلیل؛ رحیم‌پور، توحید (۱۳۹۹). بررسی حساسیت سیل‌خیزی حوضه‌های آبریز با استفاده از شاخص‌های هیدروژئومورفیک (مطالعه موردی: حوضه آبریز الوندچای، شمال غرب ایران). *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۲۹ (۲)، ۱۹۵-۲۱۴.
doi: 10.22034/gmpj.2020.118241
- رضائی‌مقدم، محمدحسین؛ حجازی، سید اسدالله؛ ولیزاده کامران، خلیل؛ رحیم‌پور، توحید (۱۳۹۹). تحلیل خصوصیات هیدروژئومورفیک حوضه آبریز الوندچای به‌منظور اولویت‌بندی زیر حوضه‌ها از نظر حساسیت سیل‌خیزی. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۹ (۱)، ۸۳-۶۱.
doi: 10.22067/geo.v9i1.84675
- رضائی‌مقدم، محمدحسین؛ رحیم‌پور، توحید (۱۴۰۲). تهیه نقشه پتانسیل خطر وقوع سیل با استفاده از دو روش نسبت فراوانی و شاخص آماری (مطالعه موردی: حوضه آبریز آجی‌چای). *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۱۰ (۴)، ۳۰۸-۲۹۱.
doi: 10.22059/jhsci.2024.369163.803
- رضائی‌مقدم، محمدحسین؛ مختاری، داود؛ رحیم‌پور، توحید؛ تقی‌زاده، وحیده (۱۴۰۳). تهیه نقشه پتانسیل خطر وقوع سیل با استفاده از روش آماری EBF مطالعه موردی: حوضه آبریز آذرشهر چای. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۶ (۲)، ۳۳-۴۹.
<https://doi.org/10.22059/jphgr.2024.374985.1007825>
- یوسفی، حسین؛ یونس، حجت‌الله؛ داودی مقدم، داود؛ ارشیا، آزاده؛ شمسی، زهرا (۱۴۰۱). تعیین پتانسیل سیل با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین CART، GLM و GAM (مطالعه موردی: حوضه کشکان). *مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۱۲ (۴۸)، ۸۴-۱۰۵.
<https://doi.org/10.22125/iwe.2022.150684>

References

- Cevik, E., Topal, T. (2003). GIS-based landslide susceptibility mapping for a problematic segment of the natural gas pipeline, Hendek (Turkey). *Environment Geology*, 44, 949–962.
- Costache, R., Popa, M.C., Tien Bui, D., Diaconu, D.C., Ciubotaru, N., Minea, G., Pham, Q.B. (2020). Spatial predicting of flood potential areas using novel hybridizations of fuzzy decision-making, bivariate statistics, and machine learning. *Journal of Hydrology*, 585, 124808. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124808>
- Dankers, R., Arnell, N.W., Clark, D.B., Falloon, P.D., Fekete, B.M., Gosling, S.N., Heinke, J., Kim, H., Masaki, Y., Satoh, Y., Stacke, T., Wada, Y., Wisser, D. (2014). First look at changes in flood hazard in the inter-sectoral impact model intercomparison project ensemble. *Proc. Natl. Acad. Sci*, 111, 3257–3261.
- Elkhrachy, I. (2015). Flash flood hazard mapping using satellite images and GIS tools: a case study of Najran City, Kingdom of Saudi Arabia (KSA). *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18(2), 261–278.
- Entezari, M., Jalilian, T., Darvishi Khatooni, J. (2020). Classification map of the sensitivity of flooding using the method of assessment frequency and weight of evidence in the Kermanshah Province. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 6 (4), 143-162. (In Persian) <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-2707-fa.html>
- Fernandez, D.S., Lutz, M.A. (2010). Urban flood hazard zoning in Tucuman Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Eng Geol*, 111, 90-98.
- Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., Kim, H., Kanae, S. (2013). Global flood risk under climate change. *Nat. Clim. Chang*, 3, 816.
- Majeed, M., Lu, L., Anwar, M.M., Tariq, A., Qin, S., El-Hefnawy, ME., El-Sharnouby, M., Li, Q., and Alasmari, A. (2023). Prediction of flash flood susceptibility using integrating analytic hierarchy process (AHP) and frequency ratio (FR) algorithms. *Front. Environ. Sci*, 10, 1-14. doi: [10.3389/fenvs.2022.1037547](https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1037547)
- Manfreda, S., di Leo, M., Sole, A. (2011). Detection of flood-prone areas using digital elevation models. *J Hydrol Eng*, 16, 781–790. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000367](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000367)
- Pradhan, B. (2010). Remote sensing and GIS-based landslide hazard analysis and cross-validation using multivariate logistic regression model on three test areas in Malaysia. *Advances in Space Research*, 45(10), 1244–1256. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.01.006>
- Rahimpour, T., Rezaei Moghaddam, M.H. (2025). Modeling the Flood Hazard Potential in the Aji Chai basin using Data Mining Algorithms. *Journal of Environmental Erosion Research*, 14 (4), 19-38. (In Persian) <http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-862-fa.html>
- Rezaei Moghaddam, M.H. Rahimpour, T. (2024). Preparation of flood hazard potential map using two methods: Frequency Ratio and Statistical Index (Case study: Aji Chai Basin). *Environmental Management Hazards*, 10(4), 291-308. (In Persian) doi: [10.22059/jhsci.2024.369163.803](https://doi.org/10.22059/jhsci.2024.369163.803)
- Rezaei Moghaddam, M.H., Hejazi, A., Valizadeh Kamran, K. Rahimpour, T. (2020). Study of Hydrogeomorphic Indices in Flood Sensitivity (Case study: Aland Chai Basin, Northwest of Iran). *Quantitative Geomorphological Research*, 9(2), 195-214. (In Persian) doi: [10.22034/gmpj.2020.118241](https://doi.org/10.22034/gmpj.2020.118241)
- Rezaei Moghaddam, M. H., Hejazi, S. A., Vlaizadeh Kamran, K. Rahimpour, T. (2020). Analysis of Hydrogeomorphic Properties of Aland Chai Basin to Prioritize Sub-Basins in terms of Flood Sensitivity. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 9(1), 61-83. (In Persian) doi: [10.22067/geo.v9i1.84675](https://doi.org/10.22067/geo.v9i1.84675)
- Rezaei Moghaddam, M.H., mokhtari, D., Rahimpour, T., taghizadeh, V. (2024). Preparation of Flood Hazard Potential Map using EBF Statistical Method: The Case Study of Azarshahr Chai Basin. *Physical Geography Research*, 56(2), 33-49. (In Persian) doi: [10.22059/jphgr.2024.374985.1007825](https://doi.org/10.22059/jphgr.2024.374985.1007825)

- Tien Bui, D., Pradhan, B., Nampak, H., Bui, Q.T., Tran, Q.A., Nguyen, Q.P. (2016). Hybrid artificial intelligence approach based on neural fuzzy inference model and metaheuristic optimization for flood susceptibility modeling in a high-frequency tropical cyclone area using GIS. *Journal of Hydrology*, 540, 317–330. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.027>
- Towfiqul Islam, A.B., Talukdar, S., Mahato, S., Kundu, S., UddinEibek, K., BaoPham, Q., Kuriqi, A., ThuyLinh, N.T. (2021). Flood susceptibility modelling using advanced ensemble machine learning models, *Geoscience Frontiers*, 12(3), 101075. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.09.006>
- Yousefi, H., Yonesi, H. A., Davoudimoghadam, D., Arshia, A., Shamsi, Z. (2022). Determination of Flood potential Using CART, GLM and GAM Machine learning Models. *Irrigation and Water Engineering*, 12(4), 84-105. (In Persian) doi: 10.22125/iwe.2022.150684