



Analysis of Flood Susceptibility Potential in the Balikhli Chay Watershed Using the MFFPI Model and Its Relationship with Geomorphological Indices

Mousa Abedini^{1*}, AmirHesam Pasban¹

¹ Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 10 June 2026

Revised: 12 October 2026

Accepted: 15 October 2026

Available Online:

16 October 2026

Keywords:

Flash Flood

Geomorphological Indices

Spearman Correlation

Google Earth Engine (GEE)

Balikhli Chay Watershed

ABSTRACT

Flash floods are among the most hazardous natural disasters, causing severe human and economic losses in mountainous–plain watersheds. The aim of this study was to assess and map flash flood potential in the Balikhli Chay Watershed using the Modified Flash Flood Potential Index (MFFPI) and to investigate its relationship with selected geomorphological indices. To achieve this objective, six thematic layers, including slope, flow accumulation, land use/land cover (LULC), slope curvature, soil texture, and lithology, were prepared and integrated within the ArcGIS environment. LULC data were derived from the GLC-FCS30D database using the Google Earth Engine platform, while geological maps at a scale of 1:100,000, soil texture maps at a scale of 1:250,000, NDVI derived from Sentinel-2 imagery for 2025, and a 30-m resolution ASTER Digital Elevation Model (DEM) were utilized as input datasets. All layers were reclassified into five hydrological classes and combined using weighted overlay analysis. The results revealed that 444 km² (36.75%) of the watershed falls within the high flood susceptibility class, while 59 km² (4.88%) is categorized as very high susceptibility. Overall, 41.63% of the watershed exhibits high to very high flash flood potential. These areas are primarily concentrated in the middle and downstream sections of the watershed, particularly along the main river corridor and associated floodplains. To evaluate the relationship between geomorphological indices and MFFPI, Spearman's rank correlation coefficient was calculated using 300 randomly selected sample points. The findings indicated that the Topographic Wetness Index (TWI) exhibited the strongest positive correlation with MFFPI ($\rho = 0.7674$), whereas the Digital Elevation Model (DEM) showed the strongest negative correlation ($\rho = -0.6204$). The Terrain Ruggedness Index (TRI) and Length–Slope Factor (LSF) also demonstrated moderate negative correlations, while the Topographic Position Index (TPI) and aspect showed no statistically significant relationship with flood susceptibility. The results highlight the critical role of topographic wetness, elevation, and terrain characteristics in controlling flash flood occurrence and emphasize the necessity of implementing watershed management measures, vegetation conservation programs, and land-use regulation strategies in high-risk areas of the Balikhli Chay Watershed.

* Corresponding author: Mousa Abedini

E-mail address: Abedini@uma.ac.ir

How to cite this article: Abedini, M., & Pasban, A. H. (2026). Analysis of Flood Susceptibility Potential in the Balikhli Chay Watershed Using the MFFPI Model and Its Relationship with Geomorphological Indices. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 2(2), 2-2. <https://doi.org/10.22067/geoeH.2026.97676.1676>



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

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Floods are among the most destructive natural hazards worldwide, causing substantial economic losses, environmental degradation, infrastructure damage, and threats to human life each year. In recent decades, the increasing frequency and intensity of extreme climatic events, combined with rapid land-use changes, urban expansion, and vegetation degradation, have significantly increased watershed vulnerability to flood occurrence. Consequently, flood susceptibility assessment and the identification of flood-prone areas have become essential components of watershed management, disaster risk reduction, and sustainable land-use planning. Flood generation is controlled by a complex interaction of geomorphological, hydrological, geological, soil, and land-cover characteristics. Factors such as slope gradient, drainage patterns, elevation, soil permeability, lithology, vegetation cover, and land use directly influence runoff production, flow concentration, and flood propagation processes. Recent advances in Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing (RS) technologies have greatly enhanced the ability to integrate and analyze these spatial factors, providing effective tools for flood hazard mapping and susceptibility assessment. Among the available approaches, the Modified Flash Flood Potential Index (MFFPI) has emerged as a practical and efficient method for evaluating flash flood susceptibility. The model combines multiple physiographic and environmental variables within a GIS framework and has been successfully applied in various mountainous and semi-arid watersheds. Despite numerous flood susceptibility studies worldwide, comprehensive assessments integrating geomorphological indicators with MFFPI remain limited in many Iranian watersheds. Therefore, the present study aimed to evaluate flash flood susceptibility in the Balikhli Chay Watershed, Ardabil Province, Iran, using the MFFPI model and to investigate the relationships between geomorphological indices and flood potential. The aforementioned studies are comparable to the present research in terms of their overall framework for spatial flood assessment; however, they differ in their analytical approaches and ultimate objectives. In particular, the present study focuses on flash-flood potential rather than solely on general flood susceptibility or hazard. Despite the numerous studies conducted on floods and flash floods, a considerable proportion of previous research has focused on mapping flood potential or susceptibility using a set of environmental factors. However, producing such maps alone is insufficient to determine the extent to which the spatial distribution of flood potential is associated with the geomorphological characteristics of a watershed. Therefore, the main research gap addressed by the present study does not lie in the repeated use of environmental indicators, but rather in the simultaneous assessment of flash-flood potential and its relationship with geomorphological characteristics at the watershed scale. In the Balikhli-Chay watershed, previous studies have primarily focused on hydrological characteristics, runoff, river flow, or the investigation of selected factors influencing flood occurrence. In contrast, the direct relationship between the spatial distribution of flash-flood potential and the watershed's geomorphological indices has received comparatively little attention. Accordingly, the present study employs the Modified Flash Flood Potential Index (MFFPI) to assess the spatial potential for flash floods in the Balikhli-Chay watershed based on a combination of relevant environmental factors. Subsequently, geomorphological indices and correlation analysis are used to investigate the relationship between the watershed's geomorphometric characteristics and MFFPI values.

Thus, the objective of this study extends beyond merely producing a flash-flood potential map; it also seeks to elucidate the relationship between the spatial distribution of flash-flood potential and the geomorphological structure and characteristics of the watershed. This approach can identify which geomorphological characteristics are associated with increases or decreases in flash-flood potential, thereby providing a more comprehensive understanding of the spatial controls governing flash-flood potential in the Balikhli-Chay watershed.

Material and Methods

The study was conducted in the Balikhli Chay Watershed, one of the most important watersheds in Ardabil Province, characterized by complex topography, diverse geological formations, extensive agricultural activities, and significant hydrological variability. The MFFPI model was implemented within a GIS environment by integrating six thematic layers including slope, flow accumulation, land

use/land cover (LULC), slope curvature, soil texture, and lithology. A 30-m resolution ASTER Digital Elevation Model (DEM) was used to derive slope, curvature, and flow accumulation layers. Land-use data were obtained from the GLC-FCS30D database through Google Earth Engine, while geological information was derived from 1:100,000 geological maps. Soil texture maps and Sentinel-2 satellite imagery were utilized for soil and vegetation analyses. All thematic layers were converted into raster format and reclassified into five classes according to their hydrological response and contribution to flood generation. The weighted layers were subsequently integrated using the MFFPI equation within ArcGIS. To provide a more comprehensive geomorphological assessment, seven additional geomorphometric indices were calculated, including Topographic Wetness Index (TWI), Elevation (DEM), Terrain Ruggedness Index (TRI), Length-Slope Factor (LSF), Topographic Position Index (TPI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), and Aspect. These indices were extracted from DEM and Sentinel-2 data using ArcGIS 10.8. To quantify the relationship between geomorphological characteristics and flood susceptibility, 300 random sample points were extracted from the spatial intersection of the MFFPI map and the geomorphological layers. Spearman's rank correlation coefficient was calculated in R 4.3 software. The Shapiro–Wilk test confirmed non-normal distributions for most variables; therefore, the non-parametric Spearman approach was selected. Multiple testing effects were controlled using the Benjamini–Hochberg false discovery rate correction.

Results and Discussion

The resulting MFFPI map classified the watershed into five flood susceptibility categories: very low, low, moderate, high, and very high. The high susceptibility class occupied the largest area, covering 444 km² (36.75%) of the watershed. Low and very low susceptibility classes accounted for 246 km² (20.36%) and 241 km² (19.95%), respectively, while the moderate class covered 218 km² (18.04%). The very high susceptibility class represented 59 km² (4.88%) of the watershed. Overall, approximately 503 km² (41.63%) of the watershed fell within the high and very high flood susceptibility classes, indicating considerable vulnerability to flash flood events. These areas are primarily concentrated in the middle and downstream sections of the watershed, particularly along the Balikhli Chay River corridor and associated floodplains. Their high susceptibility can be attributed to low elevations, gentle slopes, high flow accumulation, elevated topographic wetness values, and extensive agricultural land use. Conversely, approximately 40.31% of the watershed exhibited low or very low susceptibility, mainly within the mountainous northern and northwestern sectors characterized by steep slopes, higher elevations, greater infiltration potential, and relatively natural vegetation cover. Geomorphological analysis revealed significant spatial variability across the watershed. Elevation ranged from 1,316 m in downstream regions to 4,788 m in mountainous headwaters, producing substantial hydraulic gradients that facilitate rapid runoff transfer. TWI values varied between 7.02 and 14.45, with the highest values concentrated in the middle portions of the watershed, indicating zones prone to water accumulation and soil saturation. LSF values reached 33.47 in steep northern slopes, highlighting areas with high sediment transport and erosion potential. Correlation analysis demonstrated that five of the seven geomorphological indices exhibited statistically significant relationships with MFFPI. TWI showed the strongest positive correlation ($\rho = 0.7674$), confirming the critical role of moisture accumulation and runoff concentration in flash flood generation. Elevation displayed the strongest negative correlation ($\rho = -0.6204$), indicating increased flood susceptibility in lower-lying areas. TRI ($\rho = -0.3173$) and LSF ($\rho = -0.3011$) also exhibited moderate negative relationships, suggesting that relatively smoother and less rugged terrains are more susceptible to flood accumulation. NDVI showed a weak but significant negative correlation ($\rho = -0.1898$), emphasizing the protective role of vegetation cover in reducing runoff generation. In contrast, TPI and Aspect displayed weak and statistically insignificant relationships with flood susceptibility. The correlation matrix further demonstrated the absence of multicollinearity among independent variables, as no correlation coefficient exceeded the critical threshold of 0.80. These findings highlight the dominant influence of hydrological and topographic factors, particularly TWI and elevation, in controlling flood susceptibility patterns within the watershed.

Conclusion

This study demonstrated the effectiveness of integrating the Modified Flash Flood Potential Index (MFFPI) with geomorphological analysis within a GIS framework for flash flood susceptibility assessment in the Balikhli Chay Watershed. The results revealed that more than 41% of the watershed is exposed to high and very high flood susceptibility, primarily concentrated within downstream floodplains and river corridors. Among the investigated geomorphological factors, Topographic Wetness Index and elevation emerged as the most influential predictors of flood susceptibility, while vegetation cover contributed to reducing flood risk through enhanced infiltration and runoff regulation. The findings confirm that the combined effects of topography, hydrological accumulation processes, land use, soil properties, and lithological characteristics govern flood generation and spatial flood patterns in the watershed. The methodology presented in this study provides a reliable, cost-effective, and data-efficient approach for flood hazard assessment in mountainous and semi-arid watersheds. The resulting susceptibility maps can support watershed management, flood mitigation planning, land-use regulation, and the implementation of early warning systems. Future studies should incorporate climate change scenarios, hydrodynamic modeling, and machine learning algorithms to further improve flood susceptibility prediction and risk management strategies.



تحلیل پتانسیل سیل خیزی حوضه آبخیز بالیخلی چای با استفاده از مدل MFFPI و ارتباط آن با شاخص های ژئومورفولوژی

موسی عابدینی^{۱*}، امیر حسام پاسبان^۱

^۱گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۲۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۷/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۲۳	سیلاب های ناگهانی از مخاطره آمیزترین بلایای طبیعی هستند که در حوضه های آبخیز کوهستانی - دشتی خسارات جانی و مالی سنگینی به بار می آورند. هدف این پژوهش، ارزیابی و پهنه بندی پتانسیل سیلاب ناگهانی در حوضه آبخیز بالیخلی چای با استفاده از شاخص اصلاح شده پتانسیل سیلاب ناگهانی (MFFPI) و تحلیل ارتباط آن با شاخص های ژئومورفولوژی است. بدین منظور، شش لایه موضوعی شامل شیب، تجمع جریان، کاربری اراضی و پوشش زمین (LULC)، انحناى دامنه، بافت خاک و زمین شناسی در محیط نرم افزار ArcGIS تهیه و تلفیق شدند. داده های LULC از پایگاه GLC-FCS30D در محیط سامانه گوگل ارث انجین تهیه و استخراج شدند، نقشه زمین شناسی از سازمان زمین شناسی کشور در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، نقشه بافت خاک در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰، شاخص NDVI از تصاویر سنتینل-۲ سال ۲۰۲۵ و مدل رقومی ارتفاع ASTER با تفکیک ۳۰ متر استخراج شدند. تمامی لایه ها در پنج کلاس هیدرولوژیکی طبقه بندی مجدد و با وزن های متفاوت تلفیق گردیدند. نتایج نشان داد که ۴۴۴ کیلومتر مربع معادل ۳۶/۷۵ درصد از مساحت حوضه در کلاس خطر زیاد و ۵۹ کیلومتر مربع معادل ۴/۸۸ درصد در کلاس خطر خیلی زیاد قرار دارد؛ بدین ترتیب در مجموع ۴۱/۶۳ درصد از مساحت حوضه از پتانسیل سیل خیزی بالایی برخوردار است. این پهنه ها عمدتاً در بخش های میانی و پایین دست حوضه، در حاشیه رودخانه اصلی و دشت های سیلابی تمرکز دارند. برای بررسی ارتباط شاخص های ژئومورفولوژی با MFFPI، از ضریب همبستگی رتبه ای اسپیرمن بر روی ۳۰۰ نقطه نمونه تصادفی استفاده شد. نتایج نشان داد که شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) با ضریب ۰/۷۶۷۴ درصد قوی ترین همبستگی مثبت و مدل رقومی ارتفاع (DEM) با ضریب ۰/۶۲۰۴ درصد مهم ترین رابطه منفی را با MFFPI دارند. شاخص های TRI و LSF نیز همبستگی منفی متوسط داشتند، در حالی که TPI و جهت شیب رابطه معنی داری نشان ندادند. یافته های پژوهش حاضر ضرورت اجرای اقدامات مدیریتی نظیر توسعه سازه های آبخیزداری، حفاظت از پوشش گیاهی، کنترل کاربری اراضی در پهنه های پرخطر را در حوضه بالیخلی چای آشکار می سازد.

مقدمه

سیلاب یکی از مهم‌ترین و مخرب‌ترین مخاطرات طبیعی در جهان است که هرساله خسارات گسترده‌ای به منابع اقتصادی، زیرساخت‌ها، اراضی کشاورزی و سکونتگاه‌های انسانی وارد می‌کند (Abedini, Sabouri & Pasban, 2025). افزایش فراوانی و شدت رخدادهای حدی اقلیمی در دهه‌های اخیر، همراه با گسترش شهرنشینی، تغییرات کاربری اراضی و تخریب پوشش گیاهی، موجب افزایش حساسیت حوضه‌های آبخیز به وقوع سیلاب و تشدید خسارات ناشی از آن شده است (Rezaeimoghaddam, Mokhtari, Rahimpoor & Eskandari, 2025; Bilbie, 2026). برآوردها نشان می‌دهد که حدود ۱/۸۱ میلیارد نفر، معادل ۲۳ درصد جمعیت جهان، در معرض خطر سیلاب قرار دارند که بخش قابل‌توجهی از این جمعیت در کشورهای در حال توسعه و مناطق پرجمعیت آسیا زندگی می‌کنند (Khendlo, 2026). از این‌رو، شناسایی نواحی مستعد سیلاب و ارزیابی عوامل مؤثر بر شکل‌گیری آن، به یکی از اولویت‌های اصلی در مدیریت منابع آب و کاهش خطر بلایای طبیعی تبدیل شده است (Sibandze, Kalumba, Afuye & Kganyago, 2025). وقوع سیلاب در هر حوضه آبخیز تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل طبیعی و انسانی قرار دارد. ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی حوضه، از جمله شیب، ارتفاع، تراکم زهکشی، شکل حوضه، وضعیت شبکه آبراهه‌ها، نوع خاک، ویژگی‌های زمین‌شناسی و پوشش اراضی، از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده تولید رواناب و تمرکز جریان به شمار می‌روند (Abedini & Pasban, 2026; Saikh & Mondal, 2023; Ullah et al., 2024). تغییرات در هر یک از این مؤلفه‌ها می‌تواند بر رفتار هیدرولوژیکی حوضه و میزان آمادگی آن برای وقوع سیلاب‌های ناگهانی تأثیرگذار باشد. بنابراین، تحلیل ارتباط میان ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه و پتانسیل سیل‌خیزی، یکی از مباحث مهم در مطالعات هیدرولوژی و مدیریت حوضه‌های آبخیز محسوب می‌شود. در سال‌های اخیر، توسعه سامانه اطلاعات جغرافیایی^۱ (GIS) و فن‌آوری سنجش از دور^۲ (RS) امکان تحلیل دقیق عوامل مؤثر بر سیل‌خیزی را در محیطی مکانی فراهم کرده است (Abedini, Babaei olam & Pasban, 2024; Oluwadare et al., 2025). این فناوری‌ها قابلیت تلفیق داده‌های متنوع محیطی، زمین‌شناسی، توپوگرافی و هیدرولوژیکی را داشته و ابزار مناسبی برای شناسایی مناطق مستعد وقوع سیلاب محسوب می‌شوند. استفاده از این فن‌آوری‌ها موجب افزایش دقت مطالعات سیلاب و تسهیل فرآیند تصمیم‌گیری در مدیریت حوضه‌های آبخیز شده است (Ginzarly, Joshi & Teller, 2024). یکی از روش‌های پرکاربرد در ارزیابی پتانسیل سیلاب‌های ناگهانی، مدل شاخص پتانسیل سیلاب ناگهانی اصلاح‌شده^۳ (MFFPI) است. این مدل با بهره‌گیری از ویژگی‌های فیزیوگرافی و محیطی حوضه، توانایی مناسبی در شناسایی نواحی دارای استعداد بیشتر برای تولید رواناب و وقوع سیلاب ناگهانی دارد (Tincu, Lazar & Lazar, 2018). در مدل MFFPI عواملی نظیر شیب، کاربری اراضی، نفوذپذیری خاک، شرایط زمین‌شناسی و ویژگی‌های شبکه زهکشی مورد توجه قرار گرفته و بر اساس تلفیق آن‌ها، میزان پتانسیل سیل‌خیزی در بخش‌های مختلف حوضه تعیین می‌شود. سادگی اجرا، نیاز به داده‌های در دسترس و قابلیت کاربرد در محیط GIS موجب شده است که این مدل در مطالعات متعددی برای ارزیابی پتانسیل سیلاب ناگهانی مورد استفاده قرار گیرد (Taloor et al., 2024). حوضه آبخیز بالیخلی چای یکی از حوضه‌های مهم استان اردبیل است که به دلیل برخورداری از شرایط متنوع توپوگرافی، تغییرات قابل‌توجه ارتفاع و شیب، ناهمگنی کاربری اراضی و ویژگی‌های متفاوت سطح زمین، از نظر پاسخ هیدرولوژیکی در برابر رخدادهای بارش و رواناب حائز اهمیت است. مطالعات پیشین نیز نقش ویژگی‌های توپوگرافی و شرایط سطح زمین را در کنترل تولید رواناب و رفتار هیدرولوژیکی این حوضه مورد تأکید قرار داده‌اند (Fatholouloumi et al., 2023). از این‌رو، بررسی الگوی مکانی پتانسیل سیلاب ناگهانی و شناسایی عوامل مؤثر بر آن در این حوضه می‌تواند در بهبود مدیریت خطر سیلاب و برنامه‌ریزی منابع آب منطقه مؤثر باشد. با وجود اهمیت این حوضه، مطالعات محدودی در زمینه ارزیابی مکانی پتانسیل سیل‌خیزی و تحلیل نقش عوامل ژئومورفولوژیکی در شکل‌گیری الگوی سیلاب در آن انجام شده است. بر این اساس، پژوهش حاضر

1- Geographic Information System (GIS)

2- Remote Sensing (RS)

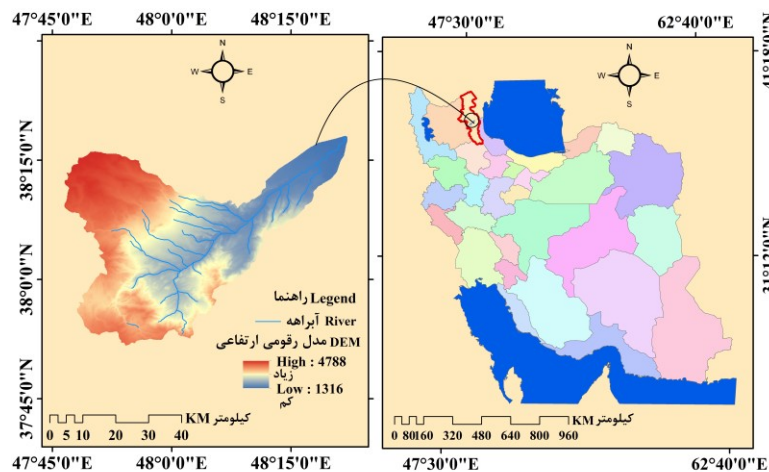
3- Modified Flash Flood Potential Index (MFFPI)

با هدف تحلیل پتانسیل سیل خیزی حوضه آبخیز بالیخلی چای با استفاده از مدل MFFPI و محیط GIS انجام شده است. در این پژوهش، ضمن بررسی و تلفیق مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع سیلاب ناگهانی، نقشه پتانسیل سیل خیزی حوضه تهیه و نواحی دارای استعداد بیشتر برای وقوع سیلاب شناسایی شده‌اند. همچنین نقش عوامل ژئومورفولوژیکی و فیزیوگرافی در توزیع مکانی پتانسیل سیل خیزی مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج این مطالعه می‌تواند در مدیریت حوضه آبخیز، برنامه‌ریزی کاربری اراضی، کاهش خسارات ناشی از سیلاب و تدوین راهبردهای پیشگیرانه در مناطق مستعد سیلاب مورد استفاده قرار گیرد. تاکنون پژوهش‌های متعددی در زمینه ارزیابی پتانسیل سیل خیزی و پهنه‌بندی مناطق مستعد سیلاب با استفاده از مدل‌های مختلف هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی در ایران و سایر کشورهای جهان انجام شده است که برخی از مهم‌ترین آن‌ها در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند. نگهبان و مکرم (Neghban & Mokarram, 2024)، در پژوهشی با رویکرد ارتباط طبقه‌بندی شکل زمین، کاربری اراضی و مناطق دارای پتانسیل سیل خیزی در استان بوشهر، وجود ارتباط معنادار میان نوع لندفرم و کاربری اراضی با پتانسیل سیل خیزی را تأیید کردند و نشان دادند که از طریق نقشه‌های دقیق اشکال زمین می‌توان سطوح خطر سیل را در کاربری‌های مختلف نظیر مرتع، اراضی کشاورزی و مناطق مسکونی تعیین نمود. صفری نامیوندی (Safari Namivandi, 2025)، با ارزیابی وضعیت سیل خیزی شهرهای استان خوزستان نشان داد که حدود ۶۵ درصد از وسعت این استان، عمدتاً در مناطق میانی و جنوبی، به دلیل ارتفاع و شیب کم و نزدیکی به رودخانه‌ها از پتانسیل سیل خیزی بالایی برخوردارند. عابدینی و همکاران (Abedini et al., 2024) با استفاده از مدل MFFPI در حوضه آبخیز شفارود استان گیلان نشان دادند که بخش‌های جنوب و جنوب‌غربی حوضه از پتانسیل خطر خیلی زیاد و زیاد برخوردارند. عابدینی و پاسبان (Abedini & Pasban, 2025) با بهره‌گیری از همین مدل در حوزه آبخیز سامیان دریافتند که لایه‌های شیب و بافت خاک به ترتیب با ضریب همبستگی ۰/۷۸ و ۰/۷۰ بیشترین ارتباط مثبت معنادار را با سیلاب ناگهانی دارند. عابدینی و کریمی (Abedini & Karimi, 2026) نیز در حوضه آبخیز کرگان‌رود نشان دادند که عامل شیب با ضریب همبستگی ۰/۷۶۸ بیشترین تأثیر را بر الگوی مکانی سیلاب دارد و حدود ۲۶/۶۲ درصد از مساحت حوضه در طبقات خطر زیاد و خیلی زیاد قرار دارد. رحیمی و وهاب‌زاده (Rahimi & Vahabzadeh Zargari, 2026) نیز اثر تغییرات کاربری اراضی بر مورفولوژی رودخانه و پیامدهای آن بر تشدید خطر سیلاب در رودخانه قره‌سو در اردبیل را مورد بررسی قرار دادند. سطح بین‌الملل نیز تیلور و همکاران (Taloor et al., 2024)، با بهره‌گیری از شاخص MFFPI در حوضه تروی هند نشان دادند که بخش‌های پایین‌دست حوضه، به‌ویژه مناطق با تراکم جمعیتی بالا، از بیشترین آسیب‌پذیری در برابر مخاطرات سیلابی برخوردارند. در اندونزی کاسروکو و همکاران (Kusratmoko, Septina & Falensky, 2025)، با استفاده از شاخص FFPI در حوضه Cikundul اندونزی نشان دادند که نواحی با شیب‌های تند و عوامل زمین‌شناختی خاص استعداد بیشتری برای وقوع سیلاب‌های ناگهانی دارند. رحیمی و وهاب‌زاده (Rahimi & Vahabzadeh Zargari, 2026)، با ترکیب داده‌های سنجش از دور و پنج الگوریتم یادگیری ماشین شامل XGBoost، Random Forest، LightGBM و Decision Tree نشان دادند که مدل‌های XGBoost و Random Forest با مقادیر AUC به ترتیب ۰/۹۸۵ و ۰/۹۸۴ عملکرد برتری در تهیه نقشه حساسیت سیل دارند. تانگ و همکاران (Tong, Pham & Nguyen, 2026) با ترکیب تحلیل چندمعیاره فضایی و فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی گروهی در ناحیه Song Hinh ویتنام نشان دادند که DEM با وزن ۰/۲۴۸ و شیب با وزن ۰/۱۸۸ بیشترین تأثیر را بر خطر سیل دارند و حدود ۲۷ درصد از منطقه در پهنه‌های ریسک بالا و بسیار بالا قرار می‌گیرد. خندلو (Khendlo, 2026) نیز در ناحیه Nkhotakota مالاوی با ترکیب سنجش از دور چندزمانه، یادگیری ماشین و GIS نشان داد که مدل SVR با AUC برابر ۰/۹۸ بالاترین دقت پیش‌بینی را داشته و بعد اقتصادی بیشترین آسیب‌پذیری مطلق را در برابر سیلاب دارد. وجه اشتراک روش‌شناختی این مطالعات با پژوهش حاضر در استفاده از داده‌های مکانی و محیطی، سامانه اطلاعات جغرافیایی و تلفیق چندین عامل مؤثر برای شناسایی و پهنه‌بندی فضایی مناطق مستعد سیلاب است؛ با این تفاوت که پژوهش حاضر به‌جای مدل‌های یادگیری ماشین یا روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، از شاخص اصلاح‌شده پتانسیل سیلاب ناگهانی

(MFFPI) برای ترکیب عوامل مؤثر بر تولید و تمرکز رواناب استفاده کرده و سپس ارتباط نتایج حاصل را با شاخص‌های ژئومورفومتری بررسی می‌کند. بنابراین، مطالعات مذکور از نظر چارچوب کلی ارزیابی فضایی سیلاب با پژوهش حاضر قابل مقایسه‌اند، اما از نظر روش تحلیلی و هدف نهایی، تفاوت دارند؛ به‌ویژه آنکه تمرکز مطالعه حاضر بر پتانسیل سیلاب ناگهانی است، نه صرفاً حساسیت یا خطر عمومی سیلاب. با وجود مطالعات متعدد درباره سیلاب و سیلاب‌های ناگهانی، بخش قابل‌توجهی از پژوهش‌های پیشین بر تهیه نقشه‌های پتانسیل یا حساسیت سیلاب با استفاده از مجموعه‌ای از عوامل محیطی متمرکز بوده‌اند؛ در حالی که صرف تهیه نقشه، به‌تنهایی نمی‌تواند نشان دهد که الگوی مکانی پتانسیل سیلاب تا چه اندازه با ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی حوضه ارتباط دارد. از این‌رو، خلأ اصلی پژوهش حاضر نه در استفاده مجدد از شاخص‌های محیطی، بلکه در بررسی هم‌زمان پتانسیل سیلاب ناگهانی و ارتباط آن با ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی در مقیاس حوضه است. در حوضه آبخیز بالیخلی چای، مطالعات پیشین عمدتاً بر ویژگی‌های هیدرولوژیکی، رواناب، جریان رودخانه و یا بررسی برخی عوامل مؤثر بر وقوع سیلاب متمرکز بوده‌اند و ارتباط مستقیم میان الگوی مکانی پتانسیل سیلاب ناگهانی و شاخص‌های ژئومورفولوژیکی حوضه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، پژوهش حاضر با استفاده از شاخص MFFPI، پتانسیل مکانی سیلاب ناگهانی را بر اساس ترکیب عوامل مؤثر محیطی در حوضه بالیخلی چای ارزیابی می‌کند و سپس با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژیکی و تحلیل همبستگی، رابطه میان ویژگی‌های ژئومورفومتری حوضه و مقادیر MFFPI را بررسی می‌کند. بدین ترتیب، هدف پژوهش صرفاً تولید نقشه پتانسیل سیلاب نیست، بلکه تبیین ارتباط الگوی پتانسیل سیلاب ناگهانی با ساختار و ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی حوضه است. این رویکرد می‌تواند مشخص کند که کدام ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی با افزایش یا کاهش پتانسیل سیلاب ناگهانی همراه هستند و در نتیجه، درک دقیق‌تری از کنترل‌های فضایی سیلاب ناگهانی در حوضه بالیخلی چای فراهم سازد.

منطقه مورد مطالعه

رودخانه بالیخلوچای یکی از سرشاخه‌های اصلی رودخانه قره‌سو است که از گردنه بالیخلی در جنوب‌غربی شهرستان نیر، در محدوده مرزی دو رشته‌کوه بزغوش و سبلان، سرچشمه می‌گیرد. این حوضه آبخیز در محدوده جغرافیایی ۴۷ درجه و ۴۶ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۶ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. موقعیت کوهستانی حوضه موجب تنوع قابل‌توجهی در ارتفاع آن شده، به‌گونه‌ای که بالاترین نقطه به ۴۷۸۸ متر و پایین‌ترین نقطه به ۱۲۹۸ متر از سطح دریا می‌رسد. این اختلاف ارتفاع چشمگیر، حدود ۳۴۹۰ متر، نقش مهمی در تنوع اقلیمی، پوشش گیاهی و رژیم هیدرولوژیکی حوضه ایفا می‌کند. حوضه آبخیز بالیخلوچای به‌دلیل قرارگیری در دامنه‌های جنوبی سبلان، از نظر منابع آب و ذخایر برفی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این حوضه بخشی از سیستم هیدرولوژیکی گسترده‌تر استان اردبیل را تشکیل می‌دهد و در تأمین منابع آبی منطقه نقش محوری دارد (Pasban, Abedini & Frotan, 2022). ویژگی‌های توپوگرافیک و موقعیت جغرافیایی این حوضه، آن را به یکی از حوضه‌های مهم از منظر مطالعات هیدرولوژی و مدیریت منابع آب تبدیل کرده است. موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز بالیخلوچای در سطح ایران و استان اردبیل در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز بالیخلی چای در استان اردبیل و ایران
Fig.1. Geographic location of the Balikhli Chay watershed in Ardabil Province, Iran

مواد و روش ها

برای محاسبه شاخص سیلاب ناگهانی (MFFPI)، از ابزارهای تحلیل فضایی نرم افزار ArcGIS جهت تلفیق لایه‌های موضوعی مختلف استفاده شد. لایه‌های موضوعی کاربری اراضی و پوشش زمین (LULC) با استفاده از پایگاه داده GLC-FCS30D و در محیط سامانه GEE در هفت طبقه شامل اراضی آبی، اراضی دیم، جنگل، پوشش گیاهی، مناطق مسکونی، پهنه‌های آبی و اراضی بایر تهیه شد. نقشه زمین‌شناسی بر پایه داده‌های سازمان زمین‌شناسی کشور در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه گردید. نقشه بافت خاک ایران با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ پایگاه‌های اطلاعاتی فائو (FAO) تهیه گردید و شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنیتل ۲ مربوط به فصل تابستان سال ۲۰۲۵ تهیه شدند. به منظور کاهش اثر ابر و اطمینان از کیفیت تصاویر، تصاویر مناسب مربوط به این فصل پس از اعمال فیلترهای لازم و پیش‌پردازش‌های مورد نیاز در محیط Google Earth Engine انتخاب و سپس NDVI محاسبه گردید. همچنین مدل رقومی ارتفاع ASTER با تفکیک مکانی ۳۰ متر برای سال ۲۰۲۵ به منظور استخراج لایه‌های موضوعی تجمع جریان، شیب و انحنا در محیط ArcGIS به کار گرفته شد. برای محاسبه شاخص MFFPI، لایه‌های موضوعی پس از استانداردسازی و تخصیص امتیاز متناسب با میزان تأثیرگذاری هر عامل بر پتانسیل تولید و تمرکز رواناب، با استفاده از رابطه ارائه شده در معادله (۱) با یکدیگر تلفیق شدند. استفاده از منطق جمعی در این شاخص با ماهیت چندعاملی فرآیند سیلاب ناگهانی سازگار است؛ زیرا شکل‌گیری و تشدید رواناب حاصل برهم‌کنش مجموعه‌ای از شرایط توپوگرافی، ژئومورفولوژیکی، هیدرولوژیکی و محیطی است و هر یک از عوامل می‌تواند به صورت مستقل سهمی در افزایش یا کاهش پتانسیل سیلاب داشته باشد. در این چارچوب، مقدار شاخص نهایی از تجمع سهم عوامل مؤثر حاصل می‌شود؛ به گونه‌ای که افزایش هم‌زمان مقادیر عوامل مرتبط با تولید، انتقال و تمرکز رواناب، به افزایش مقدار MFFPI و در نتیجه افزایش پتانسیل سیلاب ناگهانی منجر می‌شود. منطق جمع همچنین از ایجاد اثر صفرکننده میان عوامل جلوگیری می‌کند. به عبارت دیگر، در روش‌های مبتنی بر ضرب، مقدار پایین یک عامل می‌تواند اثر سایر عوامل را به شدت کاهش داده یا حتی خنثی کند؛ در حالی که در رویکرد جمعی، هر عامل سهم خود را در مقدار نهایی شاخص حفظ می‌کند. از این رو، منطق جمع برای تلفیق چندین عامل مؤثر بر سیلاب در چارچوب MFFPI مکان ارزیابی هم‌زمان اثر تجمعی شرایط محیطی و تولید یک شاخص مکانی پیوسته از پتانسیل سیلاب را فراهم می‌سازد. با این حال، استفاده از منطق جمع به معنای برابری اهمیت همه عوامل نیست؛ زیرا اهمیت نسبی عوامل از طریق رتبه‌بندی یا امتیازدهی اختصاص یافته به طبقات هر لایه در ساختار MFFPI لحاظ می‌شود. بنابراین، مقدار نهایی شاخص بیانگر اثر تجمعی عوامل

استاندارد شده و امتیازدهی شده است، نه صرفاً مجموع خام مقادیر لایه‌های ورودی. برای محاسبه MFFPI، تمامی لایه‌های موضوعی یادشده در محیط GIS با استفاده از معادله (۱) با یکدیگر تلفیق شدند.

$$MFFPI = 3S + 2.5Fa + 2Pc + St + G + 0.5LuLc/4 \quad (۱)$$

در این معادله، S نقشه شیب، Pc نقشه انحناء مقطع، Sc انحنای سطح، St بافت خاک، G نقشه زمین‌شناسی و LULC نقشه کاربری اراضی و پوشش زمین منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهند. معادله MFFPI نسخه پیشرفته‌ای از شاخص پتانسیل سیل ناگهانی (FFPI) است که توسط تینکو و همکاران (Tinku et al., 2018) پیشنهاد شده و با افزودن لایه انحنای دامنه و تأکید بیشتر بر LULC، دقت تعیین موقعیت مناطق مستعد سیل ناگهانی را ارتقا داده است. لایه‌های موضوعی LULC، بافت خاک و زمین‌شناسی که در قالب برداری (Vector) استخراج شده بودند، با استفاده از ابزارهای تبدیل در ArcGIS به فرمت رستری (Raster) تبدیل شدند. این تبدیل از آن جهت ضروری بود که امکان اجرای عملیات تحلیل فضایی و ترکیب لایه‌ها در محیط رستری فراهم شود. در مرحله بعد، تمامی شش لایه موضوعی با استفاده از تابع Reclassify در ابزارهای Spatial Analyst نرم‌افزار ArcGIS در پنج کلاس طبقه‌بندی مجدد شدند. طبقه‌بندی مجدد بر اساس نقش نسبی هر طبقه از عوامل محیطی در تولید، انتقال و تجمع رواناب و با توجه به ویژگی‌های هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی منطقه مورد مطالعه انجام شد. در این چارچوب، مقادیر طبقات از ۱ تا ۵ به‌صورت ترتیبی اختصاص یافتند؛ به‌طوری‌که کلاس ۱ بیانگر شرایط با پتانسیل کمتر برای تولید و تجمع رواناب و کلاس ۵ بیانگر شرایط با پتانسیل بیشتر برای تولید و تجمع رواناب است. بنابراین، افزایش مقدار طبقه در هر یک از لایه‌ها نشان‌دهنده افزایش نسبی مساعدبودن شرایط آن طبقه برای شکل‌گیری یا تمرکز رواناب و در نتیجه افزایش سهم آن در مقدار نهایی شاخص MFFPI است (جدول ۱). لازم به تأکید است که این مقادیر، وزن آماری مستقل یا ضریب اثر علی عوامل نیستند، بلکه امتیازهای رتبه‌ای مورد استفاده برای استانداردسازی و تلفیق عوامل در چارچوب شاخص MFFPI محسوب می‌شوند. در نهایت، لایه‌های موضوعی بازطبقه‌بندی‌شده با استفاده از ابزار Raster Calculator در محیط ArcGIS و مطابق رابطه (۱) با یکدیگر تلفیق شدند. در این فرآیند، هر سلول از سطح منطقه مطالعه‌شده بر اساس مجموع امتیازهای اختصاص‌یافته به عوامل مؤثر، یک مقدار نهایی MFFPI دریافت کرد. بنابراین، مقادیر بالاتر شاخص نشان‌دهنده شرایط مکانی مساعدتر برای تولید و تجمع رواناب و در نتیجه پتانسیل بیشتر وقوع سیلاب ناگهانی است. نقشه حاصل از این فرآیند به‌عنوان نقشه مکانی پتانسیل سیلاب ناگهانی (MFFPI) منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شد (Tinku et al., 2018). در ادامه به‌منظور ارزیابی جامع‌تر ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی حوضه آبخیز بالیخلی چای و بررسی ارتباط آن‌ها با پتانسیل سیلاب ناگهانی، هفت شاخص ژئومورفولوژی شامل رطوبت توپوگرافی (TWI)، مدل رقومی ارتفاع (DEM)، شاخص ناهمواری زمین (TRI)، فاکتور طول و درجه شیب (LSF)، شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)، شاخص تفاضلی نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) و جهت شیب (Aspect) از مدل رقومی ارتفاع Aster با تفکیک مکانی ۳۰ متر و تصاویر سنتینل-۲ در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8 استخراج و محاسبه شدند.

جدول ۱- نحوه امتیازدهی پارامترهای مدل MFFPI

Table 1- Scoring method for MFFPI model parameters (Tinku et al., 2018)

امتیای نهایی	وزن طبقات	طبقات	وزن لایه‌ها	لایه‌ها
Final score	Weight of each class	Class	Parameter weight	Parameters
3	1	10-60	3	شیب (درجه) Slope (Degrees)
6	2	8-10		
9	3	6-8		
12	4	3-6		
15	5	0-3	2.5	تجمع جریان Stream density
2.5	1	1-0		
5	2	1-2		
7.5	3	2-3		
10	4	3-4		
12.5	5	4-5		

2	1	(-18)-(-49)		
4	2	(-9)-(-0.5)		
6	3	(-0.5)-(-0.5)	2	انحناء دامنه Slope curvature
8	4	-0.1-5.5		
10	5	1.23-5		
		ماسه-رسی Sandy-clay		
1	1	ماسه‌ای-لومی-رسی Sandy-loamy-clay	1	بافت خاک Soil texture
2	2			
3	3	بافت‌های مختلف رسی Various textures		
4	4			
5	5	Clay		
		رسی-سیلانی- مواد رس دار Clay-silty-clay materials		
		نهشته آبرفتی Alluvial deposits		
		سازندهای ماسه سنگ، کنگلومرا Sandstone, conglomerate		
1	1			
2	2	مارنی Marl	1	لیتولوژی Lithology
3	3			
4	4	سازندهای آهکی Limestone		
5	5	سنگ‌های آذرین Igneous rocks		
		جنگل Forest		
		مراعات متراکم و نیمه متراکم Dense and semi-dense rangelands		
0.5	1			
1	2			
1.5	3	زمین زراعی Agricultural land	0.5	کاربری و پوشش زمین Land cover / Land use
2	4			
2.5	5	مراعات کم تراکم Sparse rangelands		
		سطوح آبی Water surfaces		

شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) که بیانگر تمایل هر نقطه از سطح زمین به تجمع و نگهداری رطوبت است بر اساس رابطه (۲) محاسبه گردید.

$$TWI = A_s / \tan \beta \quad (2)$$

که در آن A_s مساحت حوضه آبرگیر بالادست (متر مربع به ازای هر متر عرض) و β زاویه شیب محلی (رادیان) است (Tong, Pham & Nguyen, 2026). مقادیر بالای این شاخص نشان‌دهنده مناطقی با پتانسیل بالای تجمع رواناب و اشباع خاک است که در ارتباط مستقیم با ریسک سیلاب قرار دارد.

فاکتور طول و درجه شیب (LSF) از جمله مؤلفه‌هایی است که از ترکیب طول دامنه و درجه شیب محاسبه شد و بیانگر ظرفیت فرسایشی و پتانسیل انتقال رسوب در هر نقطه از حوضه است و با استفاده از رابطه (۳) به‌دست می‌آید (Luca, Conforti & Robustelli, 2011).

$$LSF = \left(\frac{\text{cell.size}^{0.4}}{22.3} \right) (\sin \theta / 0.896)^{1.3} \quad (3)$$

در این رابطه LSF؛ فاکتور طول دامنه، fa؛ تجمع جریان است.

شاخص ناهمواری زمین (TRI) از اختلاف ارتفاع میان سلول مرکزی و سلول‌های هشت‌گانه مجاور در DEM محاسبه شد و در پنج کلاس از مسطح تا بسیار ناهموار طبقه‌بندی گردید. شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) نیز موقعیت نسبی هر نقطه را نسبت به محیط پیرامونش ارزیابی می‌کند، بر اساس تفاوت ارتفاع هر سلول از میانگین ارتفاع سلول‌های همسایه در یک شعاع مشخص محاسبه و در پنج کلاس شامل درها و آبراهه‌ها، دامنه‌های پایینی، سطوح هموار، دامنه‌های بالایی و قله‌ها طبقه‌بندی شد (Tong et al., 2026). نقشه جهت شیب (Aspect) جهت رو به پایین بیشترین شیب هر سلول را نسبت به شمال جغرافیایی نشان می‌دهد و در ۹ کلاس شامل دشت و هشت جهت اصلی طبقه‌بندی و از منظر تأثیر بر میزان تبخیر، رطوبت خاک و پاسخ هیدرولوژیکی حوضه تحلیل شد. شاخص تفاضلی نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) نیز از تصاویر سنتینل-۲ مربوط به سال ۲۰۲۵ در سامانه Google Earth Engine محاسبه شد که مقادیر مثبت و بالای آن بیانگر تراکم پوشش گیاهی و نقش حفاظتی آن در کاهش رواناب است. پس از استخراج تمامی شاخص‌ها، به‌منظور بررسی رابطه کمی و آماری هر یک از آن‌ها با نقشه نهایی سیلاب ۳۰۰ نقطه نمونه تصادفی از تقاطع مکانی لایه‌ها در محیط GIS استخراج و ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن در نرم‌افزار R 4.3 محاسبه گردید. پیش از تحلیل، نرمالیتی داده‌ها با آزمون شاپیرو-ویلک (Shapiro & Wilk, 1965) بررسی و با تأیید انحراف از توزیع نرمال در اکثر شاخص‌ها، رویکرد ناپارامتری اسپیرمن به‌عنوان روش مناسب انتخاب شد. برای کنترل خطای چندگانه ناشی از مقایسه همزمان متغیرها، مقادیر p با روش بنجامینی-هوکرگ (BH) تصحیح شدند (Benjamini & Hochberg, 1995).

ارتباط بین شاخص‌های ژئومورفولوژی و سیلاب ناگهانی

برای ارزیابی رابطه آماری بین شاخص پتانسیل سیلاب ناگهانی چندعاملی (MFFPI) و شاخص‌های ژئومورفولوژی شامل شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)، شاخص ناهمواری زمین (TRI)، شاخص تفاضلی نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI)، مدل رقومی ارتفاعی (DEM)، جهت شیب (ASPECT)، عامل طول و درجه شیب (LSF)، و شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) از ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن (ρ) استفاده شد. همبستگی اسپیرمن یک معیار ناپارامتری از وابستگی آماری است که رابطه یکنواخت بین دو متغیر را بدون پیش‌فرض توزیع نرمال داده‌ها ارزیابی می‌کند. این روش به‌ویژه برای داده‌های رتبه‌ای یا داده‌هایی با توزیع غیرنرمال که در مجموعه‌های داده ژئومورفومتری و سنجش‌ازدور رایج است، مناسب می‌باشد. ضریب اسپیرمن (ρ) بر اساس مقادیر رتبه‌بندی‌شده هر متغیر به جای مقادیر خام محاسبه می‌شود و در بازه -۱ تا ۱ قرار می‌گیرد. مقدار ۱ نشان‌دهنده رابطه یکنواخت مثبت کامل، -۱ رابطه یکنواخت منفی کامل، و ۰ فقدان ارتباط یکنواخت است. در حوزه پهنه‌بندی حساسیت سیلاب، همبستگی اسپیرمن به‌طور گسترده برای بررسی روابط متقابل بین عوامل کنترل‌کننده و اعتبارسنجی نتایج مدل‌های حساسیت به‌کار رفته است (Vilasan & Kapse, 2022). پیش از تحلیل، آزمون نرمالیتی شاپیرو-ویلک روی تمامی متغیرها اجرا شد. نتایج نشان داد که اکثر شاخص‌های کنترل‌کننده از جمله LSF، DEM، TWI، و TRI انحراف معنی‌داری از توزیع نرمال دارند ($p > 0.05$)، که کاربرد رویکرد ناپارامتری اسپیرمن را به جای همبستگی پیرسون توجیه می‌کند. در مجموع ۳۰۰ نقطه نمونه تصادفی از تقاطع مکانی نقشه حساسیت MFFPI و هر یک از لایه‌های شاخص در محیط GIS استخراج شد. برای کنترل خطای چندگانه ناشی از مقایسه همزمان چند جفت متغیر، مقادیر p با استفاده از روش نرخ کشف کاذب بنجامینی-هوکرگ (BH) تصحیح شدند (Benjamini & Hochberg, 1995). کلیه تحلیل‌ها در نرم‌افزار R 4.3 با استفاده از بسته‌های psych و ggplot2 انجام پذیرفت.

نتایج و بحث

تحلیل لایه‌های موضوعی مدل شاخص اصلاح‌شده پتانسیل سیل ناگهانی (MFFPI)

در این پژوهش، شش لایه موضوعی شامل شیب، تجمع جریان، کاربری اراضی و پوشش زمین، انحنا، دانه، بافت خاک و زمین‌شناسی به‌عنوان متغیرهای ورودی مدل MFFPI در حوضه آبخیز بالیخلی‌چای انتخاب شدند. لایه‌ها در محیط ArcGIS استخراج، به پنج کلاس بازطبقه‌بندی و بر اساس پاسخ هیدرولوژیکی وزن‌دهی و تلفیق شدند. نتایج حاصل از این لایه‌ها در شکل‌های ۲ تا ۸ ارائه شده است.

لایه تجمع جریان از مدل رقمی ارتفاع استخراج شد. بیشینه مقدار تجمع جریان در حوضه ۱۶۹/۵۴ واحد بود (شکل ۲). مقادیر بالاتر عمدتاً در امتداد رودخانه اصلی بالیخلی‌چای و شاخه‌های فرعی آن مشاهده شد که نشان‌دهنده تمرکز بیشتر جریان و در نتیجه حساسیت بالاتر این مناطق به وقوع سیلاب است.

نقشه کاربری اراضی حوضه مورد مطالعه در شکل ۳ ارائه شده است. مطابق جدول ۱، پوشش گیاهی با ۳۰۷/۵۰ کیلومتر مربع (۲۵/۴۵ درصد)، اراضی دیم با مساحت ۳۰۰/۱۵ کیلومتر مربع (۲۴/۸۴ درصد) و اراضی آبی با ۵۳۰/۱۱ کیلومتر مربع معادل ۴۳/۸۸ درصد بیشترین سهم را در حوضه دارند. در مجموع، این سه طبقه حدود ۹۴/۱۷ درصد از مساحت حوضه را پوشش می‌دهند و بیانگر غلبه کاربری‌های کشاورزی و پوشش‌های مرتبط با آن هستند. مناطق مسکونی، اراضی بایر، پهنه‌های آبی و جنگل نیز به‌ترتیب ۴۹/۲۷ (۴/۰۷ درصد)، ۱۳/۰۷ (۱/۰۸ درصد)، ۴/۱۵ (۰/۳۴ درصد) و جنگل با تنها ۳/۸۲ کیلومتر مربع (۰/۳۱ درصد) از مساحت حوضه را تشکیل می‌دهند. از نظر هیدرولوژیکی، تفاوت در میزان نفوذپذیری و تولید رواناب میان این طبقات، نقش آن‌ها را در تعیین پتانسیل سیلابی حوضه توجیه می‌کند (جدول ۲).

جدول ۲- مساحت و درصد کلاس‌های کاربری اراضی

Table 2- Area and Percentage of Land Use Classes

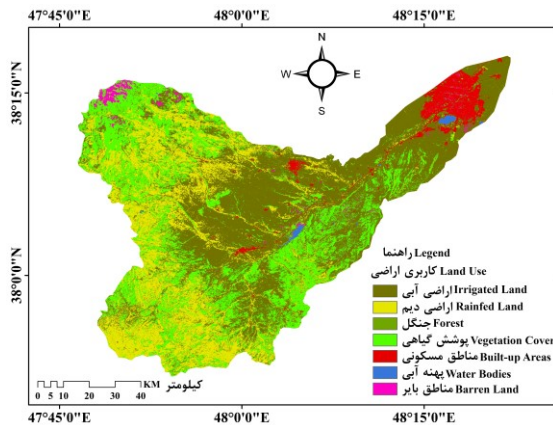
درصد مساحت‌ها Area Percentage (%)	مساحت (کیلومتر مربع) Area (km ²)	کلاس‌های کاربری اراضی Land Use Classes
43.88	530.11	اراضی آبی Irrigated Agricultural Lands
24.84	300.15	اراضی دیم Rainfed Agricultural Lands
0.31	3.82	جنگل Forest
25.45	307.50	پوشش گیاهی Vegetation Cover
4.07	49.27	مناطق مسکونی Residential Areas
0.34	4.15	پهنه آبی Water Bodies
1.08	13.07	زمین بایر Barren Lands
100	1208	مجموع Total

نقشه بافت خاک سه واحد اصلی شامل لوم، شن‌لوم و شن‌رس را نشان می‌دهد (شکل ۴). بافت لوم که بخش وسیعی از مناطق میانی و جنوبی حوضه را در بر می‌گیرد، با نفوذپذیری متوسط، ظرفیت نگهداری آب نسبتاً خوب و پتانسیل رواناب متوسطی مشخص می‌شود. بافت شن‌لوم که در بخش‌های شمالی و غربی حوضه تمرکز بیشتری دارد، نفوذپذیری بالاتری داشته و پتانسیل تولید رواناب کمتری دارد، اما در شرایط بارندگی شدید و اشباع خاک می‌تواند به‌سرعت منشأ سیلاب شود. بافت شن‌رس با کمترین نفوذپذیری و

بیشترین پتانسیل رواناب، در مناطق محدودی از حوضه دیده می‌شود. از منظر وزن‌دهی در مدل MFFPI، بافت‌های با نفوذپذیری کمتر (شن‌رس) بالاترین وزن و بافت‌های با نفوذپذیری بالاتر (شن‌لوم) کمترین وزن را در ارزیابی پتانسیل سیل دریافت کردند. نقشه انحنای دامنه حوضه مورد مطالعه با استفاده از مدل رقومی ارتفاع و در محیط ArcGIS استخراج شد. دامنه مقادیر انحنای ۱/۶۹- تا ۲/۰۶ متغیر بود (شکل ۵). مقادیر منفی که بیانگر سطوح مقعر و عمدتاً مرتبط با فرورفتگی‌ها، دره‌ها و مسیرهای تمرکز جریان هستند، در برخی بخش‌های حوضه با تمرکز بیشتر رواناب و پتانسیل بالاتر تولید سیلاب همراه‌اند. در مقابل، مقادیر مثبت نشان‌دهنده سطوح محدب و نواحی برجسته‌تر توپوگرافی هستند که در مقایسه با سطوح مقعر، تمایل بیشتری به پراکنش جریان دارند. مقادیر نزدیک به صفر نیز بیانگر سطوح نسبتاً هموار یا دارای انحنای اندک هستند. بنابراین، الگوی فضایی انحنای حوضه بالیخلی چای، همراه با سایر عوامل توپوگرافی، در تعیین میزان تمرکز رواناب و پتانسیل سیلاب‌زایی مناطق مختلف مؤثر است. نقشه شیب حوضه آبخیز بالیخلی چای نشان‌دهنده تنوع چشمگیر توپوگرافیکی در سطح حوضه است. بر اساس تحلیل مدل رقومی ارتفاع (DEM)، شیب در منطقه از صفر تا ۴۷/۱۸ درجه متغیر است که بازتاب‌دهنده ناهمگونی توپوگرافیکی بالای حوضه می‌باشد (شکل ۶). مناطق کوهستانی شمالی و شمال‌غربی حوضه با شیب‌های تند (بیش از ۳۰ درجه) از نظر سرعت انتقال رواناب به پایین‌دست دارای اهمیت بالایی هستند، اگرچه خطر تجمع آب در این مناطق کمتر است. در مقابل، بخش‌های میانی و پایین‌دست حوضه که دارای شیب‌های ملایم (صفر تا ۵ درجه) هستند، به دلیل کاهش سرعت جریان و افزایش زمان ماندگاری آب، بیشترین پتانسیل سیل خیزی را دارا می‌باشند. این یافته با مبانی هیدرولوژیکی تأییدشده توسط جهانگیری و همکاران (Jahangir et al., 2019)، گومز و کاوزلو (Gomez & Kavzoglu, 2005) مبنی بر رابطه معکوس میان شیب و پتانسیل تجمع رواناب کاملاً همخوانی دارد.

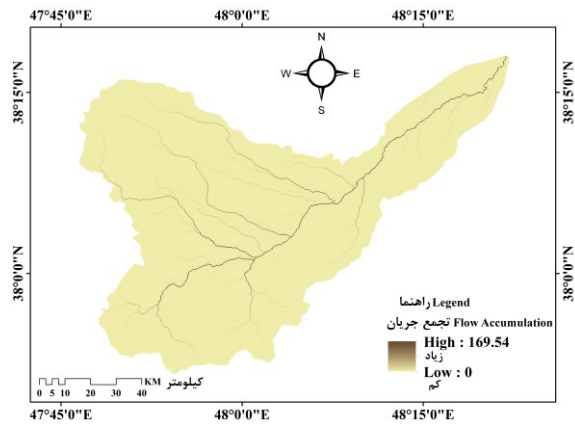
لیتولوژی یکی از عوامل مؤثر بر پاسخ هیدرولوژیکی حوضه است و تنوع واحدهای زمین‌شناسی موجود در حوضه بالیخلی چای، تفاوت‌هایی را در نفوذپذیری، تخلخل، هوازدگی و ظرفیت انتقال و ذخیره آب ایجاد می‌کند (شکل ۶). این تفاوت‌ها می‌توانند بر میزان نفوذ آب و سهم رواناب سطحی اثر گذاشته و در نتیجه در تعیین پتانسیل سیلاب‌خیزی مناطق مختلف نقش داشته باشند. در حوضه مورد مطالعه، ۱۳ واحد زمین‌شناسی شامل رسوبات کواترنری، سنگ‌های رسوبی نفوژن و واحدهای آذرین ائوسن شناسایی شد. واحد Qabv بخش وسیعی از نواحی شمالی و شمال‌غربی حوضه را پوشش می‌دهد و عمدتاً از آبرفت‌های جوان رودخانه‌ای و رسوبات کواترنری تشکیل شده است. نفوذپذیری نسبتاً مناسب این رسوبات در شرایط غیراشباع می‌تواند موجب افزایش نفوذ آب شود؛ با این حال، در شرایط بارش شدید و نزدیک شدن لایه‌های سطحی به حالت اشباع، ظرفیت نفوذ کاهش یافته و سهم رواناب سطحی افزایش می‌یابد. واحد Md.av که در بخش‌های مرکزی و شرقی حوضه گسترش دارد، شامل ماسه‌سنگ، کنگلومرا و رسوبات نسبتاً متراکم میوسن است و بسته به میزان سیمانی شدن و هوازدگی، می‌تواند نفوذپذیری متفاوتی داشته باشد. بنابراین، اثر این واحد بر تولید رواناب باید در ارتباط با سایر عوامل کنترل‌کننده، به‌ویژه شیب و شرایط بارش، تفسیر شود. واحدهای Qft1 و Qft2 که به ترتیب با دشت‌های سیلابی و مخروط‌افکنه‌های کواترنری مرتبط‌اند، عمدتاً در بخش‌هایی با شیب کمتر و شرایط مساعد برای تجمع آب و رسوب قرار دارند. در این مناطق، کاهش سرعت جریان و افزایش احتمال ماندگاری و انباشت آب می‌تواند موجب افزایش حساسیت به آب‌گرفتگی در هنگام رخدادهای شدید بارش شود. بنابراین، نقش این واحدها در مدل MFFPI بیشتر از طریق تأثیر آن‌ها بر شرایط نفوذ، زهکشی و تجمع آب تفسیر می‌شود، نه صرفاً به دلیل ماهیت کواترنری آن‌ها. واحد Mur متشکل از سنگ‌آهک و دولومیت میوسن، به دلیل وجود احتمالی شکستگی‌ها و فرایندهای کارستی می‌تواند نفوذ و انتقال زیرسطحی آب را افزایش دهد و در نتیجه، بسته به شرایط ساختاری و درجه کارستی شدن، سهم متفاوتی در تولید رواناب سطحی داشته باشد. در جنوب‌غربی حوضه نیز واحدهای آذرین ائوسن شامل Ebv و Ea.bv و نهشته‌های آتشفشانی کواترنری مانند Qvc و Qasv رخمون دارند. در صورت وجود سطح کم‌نفوذ، هوازدگی محدود یا تراکم بالا، این واحدها می‌توانند نفوذ آب را کاهش داده و سهم رواناب سطحی را افزایش دهند؛ با این حال، وجود شکستگی‌ها می‌تواند این رفتار را تعدیل کند. واحدهای Plms و Pld.avs نیز به ترتیب شامل رخساره‌های

ماسه‌سنگی، مارنی و سنگ‌های آندزیتی هستند و بر اساس ویژگی‌های بافتی و ساختاری خود می‌توانند رفتار هیدرولوژیکی متفاوتی داشته باشند. واحد Qtr متشکل از رسوبات ریزدانه دریاچه‌ای کواترنری، به دلیل نفوذپذیری پایین‌تر و زهکشی محدود می‌تواند در شرایط بارش شدید سهم بیشتری در تولید و ماندگاری رواناب سطحی داشته باشد. بر این اساس، در مدل MFFPI واحدهای Qabv، Qft1، Qft2 و Qtr بر اساس ویژگی‌های هیدرولوژیکی و موقعیت مکانی خود در ارتباط با نفوذپذیری، زهکشی و تجمع آب، اهمیت بیشتری در تعیین پتانسیل سیلاب‌خیزی نشان دادند. بنابراین، منظور از تأثیر این واحدها بر تشدید سیلاب، افزایش مستقیم و مستقل سیلاب توسط لیتولوژی نیست؛ بلکه تفاوت در ویژگی‌های نفوذ و زهکشی آن‌ها می‌تواند میزان رواناب سطحی و ماندگاری آب را تحت تأثیر قرار دهد و در ترکیب با سایر عوامل مؤثر بر سیلاب، به افزایش پتانسیل سیلاب‌خیزی منجر شود. در مجموع، لیتولوژی از طریق کنترل نسبی نفوذ، ذخیره و انتقال آب، یکی از عوامل مؤثر بر الگوی مکانی پتانسیل سیلاب در حوضه بالیخلی چای است.



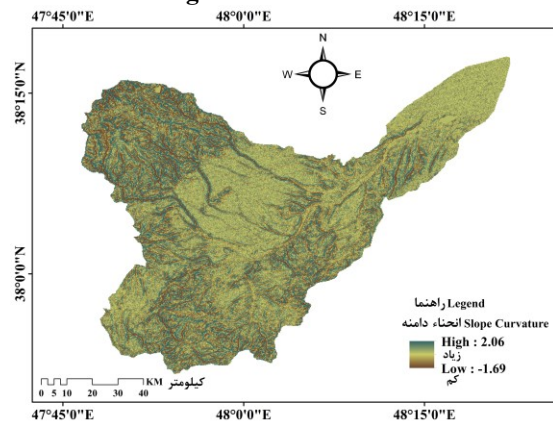
شکل ۳- عامل کاربری اراضی

Fig.3. Land Use Factor



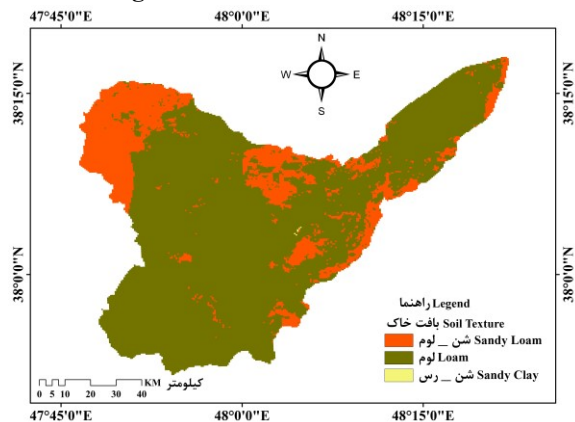
شکل ۲- عامل تجمع جریان

Fig.2. Flow Accumulation Factor



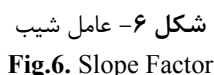
شکل ۵- عامل انحناء دامنه

Fig.5. Slope Curvature Factor



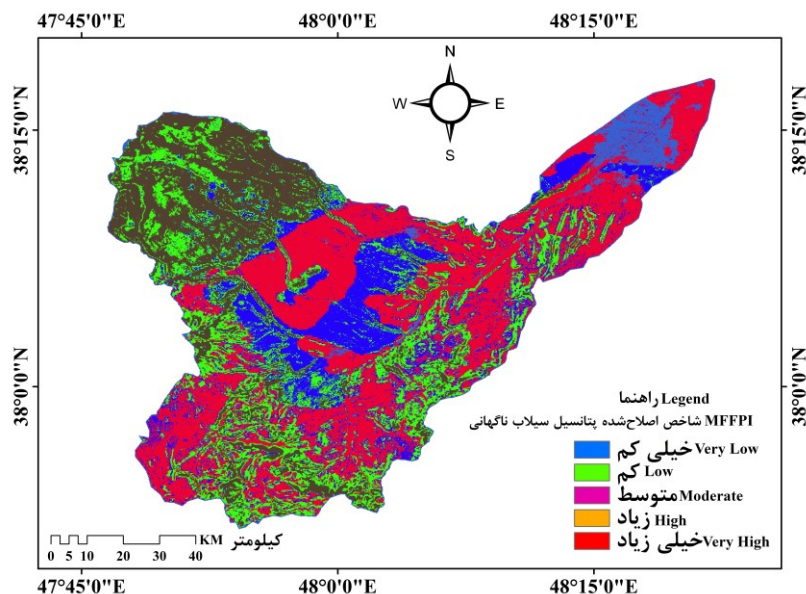
شکل ۴- عامل بافت خاک

Fig.4. Soil Texture Factor



نقشه نهایی MFFPI حوضه آبخیز بالیخلی چای که از تلفیق وزنی شش لایه موضوعی در محیط GIS به دست آمده است، حوضه را در پنج کلاس خطر شامل خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی می‌کند (شکل ۸). نتایج نشان می‌دهد که کلاس خطر زیاد با ۴۴۴ کیلومتر مربع (۳۶/۷۵ درصد) بیشترین سهم از مساحت حوضه را به خود اختصاص داده است. پس از آن، کلاس خطر کم با ۲۴۶ کیلومتر مربع (۲۰/۳۶ درصد) و کلاس خطر خیلی کم با ۲۴۱ کیلومتر مربع (۱۹/۹۵ درصد) قرار دارند. همچنین کلاس خطر متوسط با ۲۱۸ کیلومتر مربع (۱۸/۰۴ درصد) بخشی قابل توجه از حوضه را شامل می‌شود، در حالی که کلاس خطر خیلی زیاد با ۵۹ کیلومتر مربع (۴/۸۸ درصد) کمترین مساحت را در بر می‌گیرد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در مجموع ۵۰۳ کیلومتر مربع معادل ۴۱/۶۳ درصد از مساحت حوضه در کلاس‌های خطر زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است. این موضوع بیانگر آن است که نزدیک به نیمی از سطح حوضه از پتانسیل بالای وقوع سیلاب برخوردار بوده و نیازمند مدیریت ویژه و برنامه‌ریزی حفاظتی است. این پهنه‌ها عمدتاً در مناطق میانی و پایین‌دست حوضه، حاشیه رودخانه اصلی بالیخلی‌چای و دشت‌های سیلابی متمرکز شده‌اند؛ مناطقی که هم‌زمان دارای شیب ملایم، ارتفاع کمتر، مقادیر بالای تجمع جریان، رطوبت توپوگرافی بیشتر و کاربری‌های کشاورزی گسترده هستند. در مقابل، ۴۸۷ کیلومتر مربع معادل ۴۰/۳۱ درصد از مساحت حوضه در کلاس‌های خطر کم و خیلی کم قرار دارد که عمدتاً در بخش‌های مرتفع شمالی و شمال‌غربی حوضه واقع شده‌اند. وجود شیب‌های تند، ارتفاعات زیاد، نفوذپذیری مناسب‌تر خاک و پوشش گیاهی طبیعی در این مناطق موجب کاهش احتمال تجمع آب و کاهش خطر سیلاب شده است. همچنین کلاس خطر متوسط با سهم ۱۸/۰۴ درصدی به عنوان ناحیه انتقالی میان مناطق پرخطر و کم‌خطر عمل می‌کند. به طور کلی، نتایج مدل MFFPI نشان می‌دهد که اگرچه بخش‌هایی از ارتفاعات حوضه دارای خطر پایین سیل‌خیزی هستند، اما تمرکز بیش از ۴۱ درصد مساحت حوضه در کلاس‌های خطر زیاد و خیلی زیاد، بیانگر آسیب‌پذیری قابل توجه حوضه بالیخلی‌چای در برابر سیلاب‌های ناگهانی است (جدول ۳). این شرایط ضرورت اجرای اقدامات مدیریتی نظیر توسعه سازه‌های آبخیزداری، حفاظت و احیای پوشش گیاهی، کنترل تغییرات کاربری اراضی، ساماندهی ساخت‌وساز در دشت‌های سیلابی و استقرار سامانه‌های هشدار سریع سیل را بیش از پیش آشکار می‌سازد. نتایج این مطالعه از نظر الگوی مکانی و نقش عوامل کنترل‌کننده با مطالعات پیشین همخوانی قابل توجهی دارد، هرچند تفاوت در شرایط طبیعی حوضه‌ها موجب تفاوت در سهم طبقات خطر شده است. (Tincu et al., 2018)، در حوضه Trotuş رومانی با استفاده از شش عامل شامل شیب، تجمع جریان، انحنای پروفیل، کاربری اراضی، بافت خاک و نفوذپذیری سنگ، MFFPI را تهیه کردند و حدود ۱۸ درصد از منطقه را در طبقات زیاد و خیلی زیاد قرار دادند؛ مهم‌تر آنکه تحلیل گرسون چندمتغیره آنها نشان داد تجمع جریان، انحنای دامنه و کاربری اراضی در مجموع ۹۱/۶ درصد از تغییرات شاخص را توضیح

می‌دهند و مقایسه نقشه MFFPI با نقشه خطر سیلاب نیز انطباق مناسبی میان پهنه‌های پرخطر نشان داد. در مطالعه حاضر نیز تمرکز پهنه‌های خطر زیاد و خیلی زیاد در بخش‌های میانی و پایین‌دست، حاشیه رودخانه اصلی و نواحی دارای تجمع جریان بالا، با اهمیت بالای فرآیندهای تمرکز رواناب در مطالعه تینکو و همکاران (Tincu et al., 2018) سازگار است؛ با این تفاوت که در بالیخلی‌چای، ارتفاع و رطوبت توپوگرافی نیز از طریق تحلیل مستقل همبستگی، رابطه بسیار قوی با MFFPI نشان دادند. بنابراین تحلیل حاضر علاوه بر تلفیق وزنی عوامل، شواهد آماری بیشتری برای تفسیر الگوی فضایی شاخص فراهم می‌کند. از سوی دیگر، تیلور و همکاران (Taloor et al., 2021) در مطالعه حوضه Tawi هند با استفاده از لایه‌های شیب، انحنا، پروفیل، انحنا، سطح، بافت خاک، زمین‌شناسی و LULC و تلفیق آن‌ها در محیط GIS پهنه‌بندی MFFPI را انجام دادند و ۱۰۰/۴۰ کیلومتر مربع را در کلاس خیلی زیاد و ۹۷۱/۶۰ کیلومتر مربع را در کلاس زیاد قرار دادند؛ نتایج آنها نیز تمرکز پهنه‌های پرخطر در بخش‌هایی با شرایط مساعد برای تجمع آب را نشان داد. بنابراین، مشابهت نتایج دو مطالعه نشان می‌دهد که MFFPI قادر است الگوی فضایی استعداد تجمع آب و سیلاب را در حوضه‌هایی با شرایط توپوگرافی متفاوت آشکار کند، اما اختلاف در درصد مساحت طبقات خطر را باید ناشی از تفاوت در اندازه و ساختار حوضه، توپوگرافی، کاربری اراضی، خاک، زمین‌شناسی و نحوه طبقه‌بندی و وزن‌دهی عوامل دانست و نه تفاوت در عملکرد مدل. نقطه قوت مطالعه تینکو و همکاران (Tincu et al., 2018) استفاده از رگرسیون برای شناسایی عوامل مؤثر و مقایسه مستقیم MFFPI با نقشه خطر سیلاب است، در حالی که مزیت مطالعه حاضر، بررسی هم‌زمان رابطه MFFPI با مجموعه‌ای از شاخص‌های ژئومورفولوژی و محیطی است؛ در مقابل، محدودیت اصلی مطالعه حاضر نبود داده‌های مکانی کافی از رخدادهای واقعی سیلاب برای اعتبارسنجی مستقل نقشه است، در حالی که مطالعات تینکو و همکاران، تیلور و همکاران نوعی ارزیابی مقایسه‌ای برای نتایج خود ارائه کرده‌اند. از این رو، ۴۱/۶۳ درصد به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر باید به‌عنوان سهم مکانی مناطق دارای پتانسیل بالاتر سیلاب ناگهانی تفسیر شود و برای افزایش قابلیت اعتماد نتایج در مطالعات آینده، استفاده از داده‌های ثبت‌شده رخدادهای سیلاب، پهنه‌های آب‌گرفتگی استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های دبی و مشاهدات میدانی ضروری است.



شکل ۸- نقشه نهایی پتانسیل سیلاب ناگهانی حوضه آبخیز بالیخلی‌چای

Fig.8. Final Flood Susceptibility Map of the Balikhli chay Watershed

جدول ۳- مساحت و درصد کلاس‌های خطر سیلاب ناگهانی

Table 3- Area and Percentage of Flash Flood Hazard Classes

درصد مساحت‌ها Area Percentage(%)	مساحت (کیلومتر مربع) Area (km ²)	کلاس‌های خطر Flood Susceptibility Class
19.95	241	خیلی کم Very Low
20.36	246	کم Low
18.04	218	متوسط Moderate
36.75	444	زیاد High
4.88	59	خیلی زیاد Very High
100	1208	مجموع Total

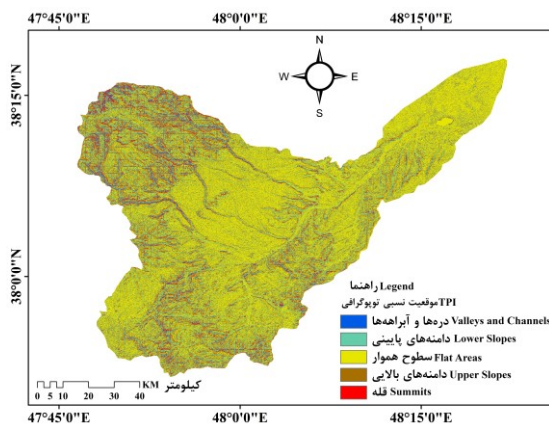
تحلیل شاخص‌های ژئومورفولوژی حوضه

علاوه بر لایه‌های مدل MFFPI، شاخص‌های ژئومورفولوژیکی مکملی شامل ارتفاع، شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، فاکتور طول شیب (LSF)، شاخص موقعیت نسبی توپوگرافی (TPI) و شاخص ناهمواری (TRI) نیز برای ارزیابی جامع تر وضعیت ژئومورفولوژیکی حوضه بالیخلی چای تحلیل شدند.

فاکتور طول شیب (LSF) که یکی از مؤلفه‌های اساسی در ارزیابی فرسایش‌پذیری خاک و پتانسیل انتقال رسوب است، در حوضه بالیخلی چای از صفر تا ۳۳/۴۷ متغیر می‌باشد (شکل ۹). مقادیر بالای این شاخص در بخش‌های شمالی و شمال غربی حوضه نشان‌دهنده دامنه‌های طولانی و شیب‌های تند است که در آن‌ها انرژی جریان برای حمل رسوب و بار سیلابی بالا است. این مناطق در رویدادهای سیل ناگهانی، سیلاب‌های حاوی بار رسوبی بالایی تولید می‌کنند که خطرات مضاعفی برای بخش‌های پایین‌دست ایجاد می‌کند. مقادیر پایین LSF (نزدیک به صفر) در مناطق هموار و دشتی حوضه دیده می‌شود.

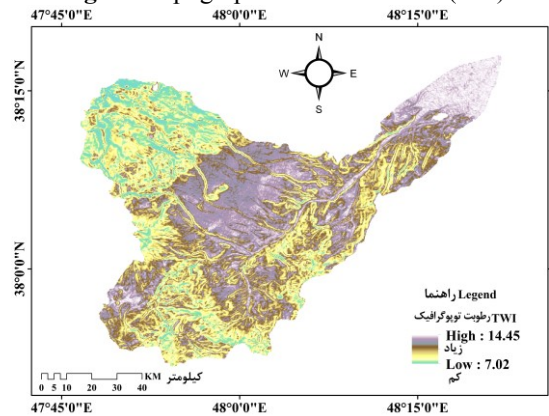
شاخص موقعیت نسبی توپوگرافی (TPI) که موقعیت هر نقطه را نسبت به محیط پیرامونش ارزیابی می‌کند، در حوضه بالیخلی چای پنج کلاس اصلی را نشان می‌دهد درها و آبراهه‌ها، دامنه‌های پایینی، سطوح هموار، دامنه‌های بالایی و قله‌ها (شکل ۱۰). بر اساس نقشه TPI، سطوح هموار به‌صورت گسترده‌ای در حوضه توزیع شده‌اند و بخش غالب مساحت را تشکیل می‌دهند، که نشان‌دهنده سلطه توپوگرافی نیمه‌مسطح در مناطق میانی حوضه است. درها و آبراهه‌ها که به‌صورت خطوط باریکی در امتداد شبکه زهکشی ترسیم شده‌اند، مهم‌ترین پهنه‌های خطر سیل هستند، زیرا مسیرهای اصلی تجمع و انتقال رواناب به شمار می‌روند. دامنه‌های پایینی که در انتقال بار سیلابی از ارتفاعات به دشت نقش واسطه دارند، آسیب‌پذیری متوسطی نسبت به سیل دارند. شاخص ناهمواری (TRI) حوضه بالیخلی چای پنج طبقه را نشان می‌دهد (شکل ۱۱). مناطق کاملاً مسطح، اراضی با شیب ملایم، مناطق تپه‌ای، مناطق کوهستانی و مناطق بسیار ناهموار و صخره‌ای. تحلیل نقشه ناهمواری نشان می‌دهد که اراضی با شیب ملایم بخش وسیعی از حوضه را در بر می‌گیرند و در توزیع فضایی متوازی در سراسر حوضه پراکنده‌اند. مناطق کاملاً مسطح به‌صورت عمده در بخش شرقی حوضه و برخی نواحی میانی دیده می‌شوند و از منظر سیل خیزی دارای بیشترین آسیب‌پذیری هستند، زیرا در این نواحی آب به‌آرامی جریان یافته و گسترش سیلاب آسان‌تر است. مناطق بسیار ناهموار و صخره‌ای که عمدتاً در ارتفاعات شمالی و شمال غربی متمرکزند، با وجود پتانسیل بالای تولید رواناب سریع، به‌دلیل شیب تند، زمان ماندگاری آب در آن‌ها اندک است. شاخص رطوبت توپوگرافی در حوضه بالیخلی چای دامنه‌ای از ۷/۰۲ تا ۱۴/۴۵ متغیر است (شکل ۱۲). مقادیر بالاتر از ۱۲ عمدتاً در بخش‌های میانی حوضه متمرکز بوده و

نشان‌دهنده ظرفیت بیشتر برای تجمع و ماندگاری آب و در نتیجه پتانسیل بالاتر سیلاب‌خیزی هستند. مقادیر پایین‌تر TWI، عمدتاً در مناطق مرتفع و پرشیب مشاهده شدند. ارتفاع حوضه از ۱۳۱۶ تا ۴۷۸۸ متر متغیر است (شکل ۱۳). ارتفاعات بیش از ۳۵۰۰ متر عمدتاً در بخش‌های شمالی و شمال‌غربی و مناطق کم‌ارتفاع‌تر از ۲۰۰۰ متر در بخش‌های میانی و جنوب‌شرقی حوضه قرار دارند. مناطق کم‌ارتفاع به دلیل شرایط توپوگرافی و تجمع جریان، حساسیت بیشتری نسبت به آب‌گرفتگی و سیلاب نشان می‌دهند. مقادیر NDVI بین بازه ۰/۳۴- تا ۰/۶۶ متغیر است (شکل ۱۴). مقادیر بالاتر NDVI عمدتاً در بخش‌های جنوبی و اراضی دارای پوشش گیاهی مشاهده شد، در حالی که مقادیر پایین و منفی بیشتر در مناطق فاقد پوشش گیاهی و ارتفاعات شمالی رخ دادند. پوشش گیاهی متراکم‌تر با افزایش نفوذ و کاهش رواناب سطحی همراه است؛ بنابراین، مناطق دارای NDVI پایین‌تر از نظر تولید رواناب حساسیت بیشتری دارند. توزیع جهت شیب در حوضه بیانگر تنوع قابل توجه جهت دامنه‌هاست (شکل ۱۵). دامنه‌های جنوبی و جنوب‌غربی در بخش‌های شمالی و شمال‌غربی و دامنه‌های شرقی و شمال‌شرقی در بخش شرقی حوضه گسترش بیشتری دارند. تفاوت در جهت دامنه می‌تواند از طریق تأثیر بر شرایط رطوبتی و پوشش گیاهی، الگوی تولید رواناب را تغییر دهد. از این‌رو، جهت شیب به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر در تعیین پتانسیل مکانی سیلاب در مدل MFFPI در نظر گرفته شد.



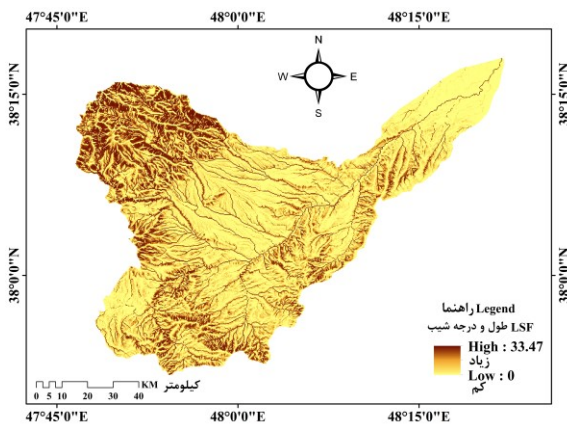
شکل ۱۰- شاخص موقعیت نسبی توپوگرافی (TPI)

Fig.10. Topographic Position Index (TPI)



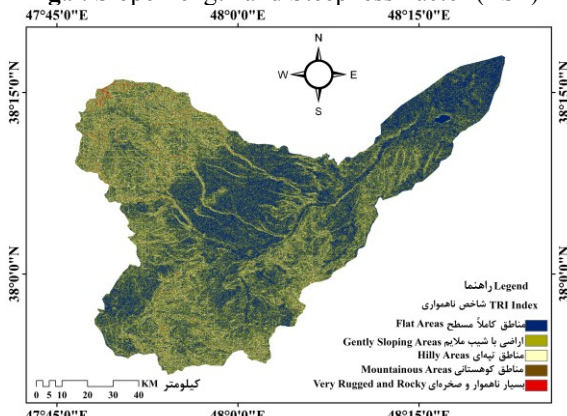
شکل ۱۲- شاخص رطوبت توپوگرافیک (TWI)

Fig.12. Topographic Wetness Index (TWI)



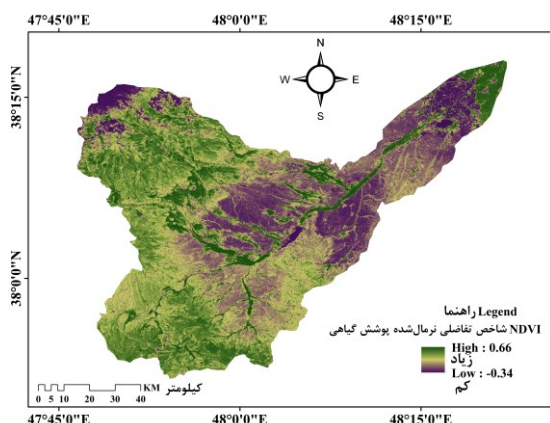
شکل ۹- شاخص طول و درجه شیب (LSF)

Fig.9. Slope Length and Steepness Factor (LSF)



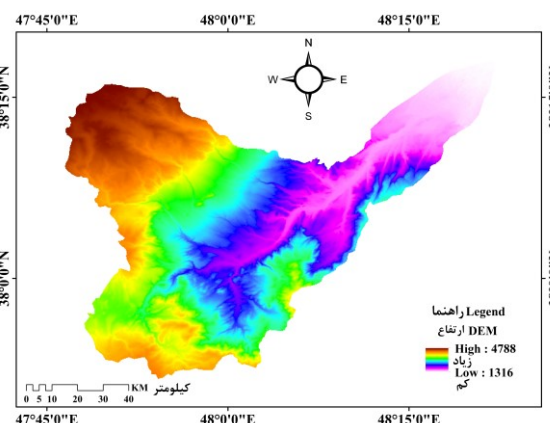
شکل ۱۱- شاخص ناهمواری (TRI)

Fig.11. Terrain Ruggedness Index (TRI)



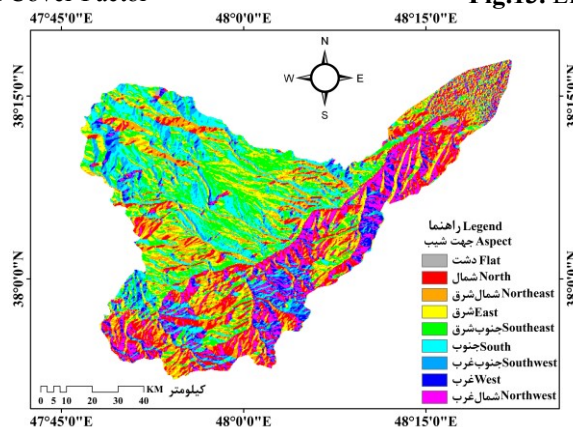
شکل ۱۴- شاخص پوشش گیاهی

Fig.14. Vegetation Cover Factor



شکل ۱۳- شاخص ارتفاع

Fig.13. Elevation Factor



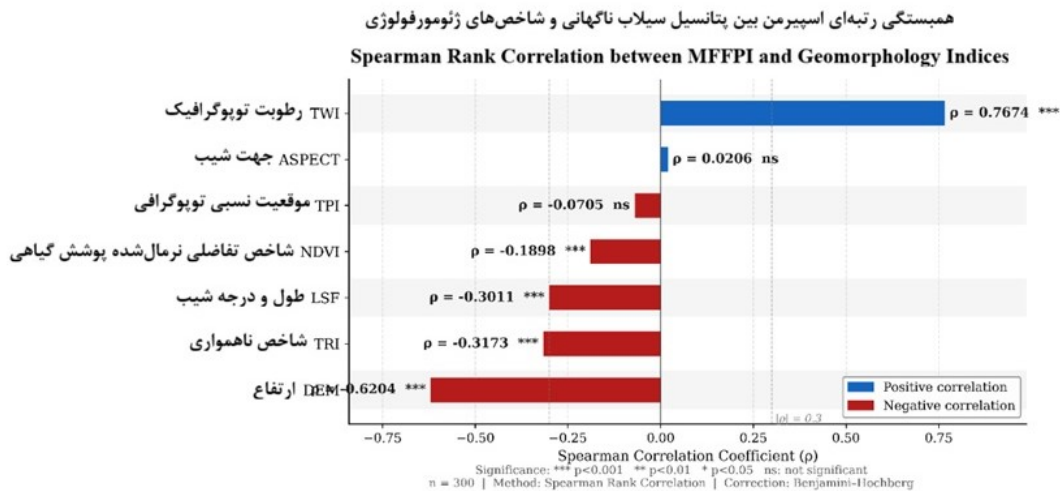
شکل ۱۵- شاخص جهت شیب

Fig.15. Slope Aspect Factor

ارتباط شاخص‌های ژئومورفولوژی با MFFPI

به منظور بررسی نقش عوامل ژئومورفولوژی با پتانسیل سیل خیزی حوضه آبخیز بالیخلی چای، ارتباط بین شاخص پتانسیل سیلاب ناگهانی چندعاملی (MFFPI) و شاخص‌های ژئومورفولوژی با استفاده از ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن در محیط نرم‌افزار RStudio مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که از میان هفت شاخص مورد مطالعه، پنج شاخص دارای رابطه آماری معنی‌دار با MFFPI بودند، در حالی که شاخص‌های TPI و Aspect ارتباط معنی‌داری با پتانسیل سیل خیزی نشان ندادند. در بین تمامی متغیرها، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) با ضریب همبستگی 0.7674 قوی‌ترین رابطه مثبت را با MFFPI داشت که بیانگر نقش اساسی تجمع رطوبت و تمرکز رواناب در افزایش خطر سیلاب ناگهانی است. پس از آن، مدل رقومی ارتفاع (DEM) با ضریب همبستگی 0.6204 -مهم‌ترین رابطه منفی را نشان داد که حاکی از افزایش حساسیت سیلاب در مناطق کم‌ارتفاع نسبت به نواحی مرتفع است. همچنین شاخص‌های ناهمواری زمین (TRI) و عامل طول و شیب دامنه (LSF) به ترتیب با ضرایب 0.3173 - و 0.3011 - دارای همبستگی منفی متوسط بودند که نشان می‌دهد مناطق هموارتر و کم‌شیب‌تر از استعداد بیشتری برای تجمع رواناب و وقوع سیلاب برخوردارند. شاخص پوشش گیاهی (NDVI) نیز با ضریب همبستگی 0.1898 - رابطه‌ای منفی، ضعیف اما معنی‌دار با MFFPI نشان داد که بیانگر نقش پوشش گیاهی در کاهش رواناب سطحی و کنترل خطر سیلاب است. در مقابل، شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) و جهت شیب (Aspect) به ترتیب با ضرایب 0.0705 - و 0.0206 - دارای همبستگی بسیار ضعیف و غیرمعنی‌دار

بودند که نشان می‌دهد این دو عامل نقش محدودی در تبیین الگوی مکانی سیل‌خیزی منطقه دارند. بررسی ماتریس همبستگی بین متغیرها نیز نشان داد که قوی‌ترین رابطه میان شاخص‌های مستقل مربوط به TWI و DEM با ضریب همبستگی ۰/۶۹- است که بیانگر کاهش رطوبت تجمعی با افزایش ارتفاع می‌باشد. همچنین DEM با NDVI (0.38) و TRI (0.31) دارای همبستگی مثبت متوسط بود که نشان می‌دهد نواحی مرتفع‌تر عموماً از ناهمواری بیشتر و پوشش گیاهی متراکم‌تری برخوردار هستند. از سوی دیگر، همبستگی منفی بین TWI و TRI (-0.42) همچنین نیز بین TWI و LSF (-0.37) نشان می‌دهد که افزایش ناهمواری و شیب موجب کاهش ظرفیت تجمع آب و رطوبت می‌شود. از آنجا که هیچ‌یک از ضرایب همبستگی بین متغیرهای مستقل از آستانه بحرانی ۰/۸۰ فراتر نرفته‌اند، مشکل هم‌خطی چندگانه در مجموعه عوامل مورد استفاده مشاهده نشد. به‌طور کلی، نتایج حاصل نشان می‌دهد که شاخص‌های مرتبط با تجمع آب و ویژگی‌های توپوگرافی، به‌ویژه TWI و DEM، مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده پتانسیل سیل‌خیزی در حوضه آبخیز بالیخلی‌چای هستند، در حالی که جهت شیب و موقعیت نسبی توپوگرافی تأثیر چندانی بر تغییرات مکانی این پدیده ندارند. در شکل (۱۶ و جدول ۴) و (شکل ۱۷) به‌ترتیب ضرایب همبستگی و ماتریس همبستگی بین شاخص‌های ژئومورفولوژی و MFFPI ارائه شده است.



شکل ۱۶- ضرایب همبستگی اسپیرمن بین نقشه حساسیت سیلاب ناگهانی MFFPI و شاخص‌های ژئومورفولوژی

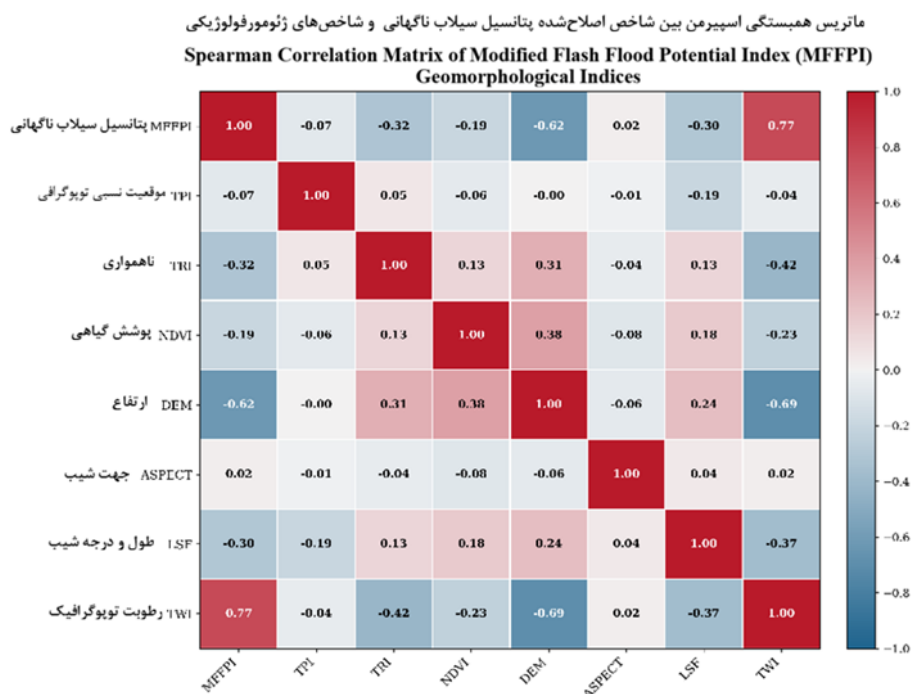
Fig.16. Spearman correlation coefficients between the MFFPI flash flood susceptibility map and geomorphological indices

جدول ۴- ضرایب همبستگی بین MFFPI و شاخص‌های ژئومورفولوژی با روش بنجامینی-هوکرگ

Table 4- Correlation coefficients between MFFPI and geomorphological indices using the Benjamini-Hochberg method

جهت	شدت همبستگی	معنی‌داری	مقدار p	ضریب اسپیرمن (ρ)	شاخص‌ها
Direction	Correlation strength	Significance	p-value	Spearman's correlation coefficient (ρ)	Indexes
مثبت	بسیار قوی	***	<0.001	0.7674	رطوبت توپوگرافیک
Positive	Very strong	***	<0.001	0.7674	TWI
منفی	بسیار قوی	***	<0.001	-0.6204	ارتفاع
Negative	Very strong	***	<0.001	-0.6204	DEM
منفی	متوسط	***	<0.001	-0.3173	ناهمواری
Negative	Moderate	***	<0.001	-0.3173	TRI
منفی	متوسط	***	<0.001	-0.3011	طول و درجه شیب
Negative	Moderate	***	<0.001	-0.3011	LSF
منفی	ضعیف	**	0.0009	-0.1898	پوشش گیاهی
Negative	Weak	**	0.0009	-0.1898	NDVI

منفی Negative	ناچیز Negligible	ns	0.2232	-0.0705	موقعیت نسبی توپوگرافی TPI
مثبت Positive	ناچیز Negligible	ns	0.7224	0.0206	جهت شیب Aspect



شکل ۱۷- ماتریس همبستگی بین شاخص‌های ژئومورفولوژی و MFFPI

Fig.17. Correlation matrix between geomorphological indices and MFFPI

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی پتانسیل مکانی سیلاب ناگهانی در حوضه آبخیز بالیخلی چای و بررسی ارتباط آن با ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی انجام شد. نتایج نشان داد که پتانسیل سیلاب ناگهانی در حوضه از الگوی مکانی یکنواختی برخوردار نیست و تحت تأثیر همزمان شرایط توپوگرافی، هیدرولوژیکی، زمین‌شناسی، خاک و کاربری اراضی قرار دارد. تمرکز پهنه‌های دارای پتانسیل بالاتر در بخش‌های میانی و پایین‌دست حوضه، به‌ویژه در مجاورت شبکه زهکشی و سطوح کم‌شیب، بیانگر نقش مهم تجمع و تمرکز رواناب در شکل‌گیری شرایط مستعد سیلاب ناگهانی است. در مقابل، بخش‌های مرتفع و کوهستانی به دلیل ویژگی‌های متفاوت توپوگرافی و شرایط سطح زمین، عمدتاً پتانسیل پایین‌تری نشان دادند. تحلیل ژئومورفومتری نیز نشان داد که ویژگی‌های مرتبط با تجمع رطوبت و تمرکز جریان، بیش از سایر شاخص‌های بررسی‌شده با MFFPI ارتباط دارند. این یافته بیانگر آن است که در حوضه‌های دارای ساختار ترکیبی کوهستانی-دشتی، شناخت الگوی توزیع رطوبت و مسیرهای تمرکز رواناب می‌تواند در تفسیر فضایی پتانسیل سیلاب ناگهانی اهمیت ویژه‌ای داشته باشد. در مقابل، نبود رابطه معنی‌دار برخی شاخص‌ها نشان می‌دهد که اثر ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی بر پتانسیل سیلاب ناگهانی یکسان نیست و نمی‌توان نقش آن‌ها را مستقل از شرایط محیطی و هیدرولوژیکی حوضه تفسیر کرد. نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های تیلور و همکاران (Taloor et al., 2021)، تینکو و همکاران (Tincu et al., 2018)، عابدینی و پاسبان (Abedini & Pasban, 2025) همخوانی دارد و اعتبار روش‌شناسی به‌کاررفته را تأیید می‌کند. از نظر کاربردی، نتایج پژوهش می‌تواند مبنایی برای اولویت‌بندی اقدامات مدیریت آبخیز و کاهش پیامدهای سیلاب ناگهانی در بخش‌های مستعد

حوضه باشد. اجرای اقدامات سازه‌ای و غیرسازه‌ای آبخیزداری، حفاظت و تقویت پوشش گیاهی، کنترل توسعه کاربری‌های نامتناسب در مجاورت آبراهه‌ها و توجه به پهنه‌های مستعد در برنامه‌ریزی کاربری اراضی، از مهم‌ترین اقدامات قابل توصیه است. با این حال، از آنجا که داده مکانی و زمانی مستقل از رخداد‌های واقعی سیلاب ناگهانی برای حوضه در دسترس نبود، نتایج MFFPI به‌عنوان ارزیابی نسبی پتانسیل مکانی تفسیر می‌شوند و نه پیش‌بینی قطعی وقوع سیلاب. بنابراین، ایجاد و تکمیل پایگاه داده رخداد‌های سیلاب و استفاده از داده‌های هیدرومتری، مشاهدات میدانی و شواهد سنجش‌ازدوری در پژوهش‌های آینده می‌تواند زمینه اعتبارسنجی کمی و مستقل نتایج و افزایش قابلیت کاربرد مدل را فراهم سازد.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

References

- Abedini, M., & Karimi, A. R. (2026). Spatial Analysis of Flash Flood Hazard in the Karganroud Watershed Using the Global MFFPI Model and GIS-Based Approach. (e242805). *Quantitative Geomorphological Research*, [In Persian] <https://doi:10.22034/gmpj.2026.569243.1596>
- Abedini, M., & Pasban, A. H. (2026). Zoning the potential flood hazard and its relationship with hydro-geomorphological indices using the MFFPI model in the Samian watershed. *Water and Soil Management and Modelling*, 6(1), 1–16. [In Persian] <https://doi.org/10.22098/mmws.2025.16491.1537>
- Abedini, M., Babaee Olam, T., & Pasban, A. H. (2024). Flood risk assessment and zoning using MFFPI model (case study: Shafarood watershed, Gilan province). *Geography and Human Relationships*, 7(1), 871–821. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/gahr.2024.466493.2198>
- Abedini, M., Sabouri, H., & Pasban, A. H. (2025). Flood hazard zoning and its relationship with land use using the Analytic Network Process model (case study: Razi Chay watershed, Ardabil province). *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, 6(2), 68–84. [In Persian] https://www.srds.ir/article_214387_en.html?
- Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995). Controlling the false discovery rate: A practical and powerful approach to multiple testing. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 57(1), 289–300. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1995.tb02031.x>
- Bilbie, F. (2026). *Common Alerting Protocol (CAP) for flash flood early warning systems: A global review of implementations, Technical Approaches, and Operational Challenges Preprints*, <https://doi.org/10.20944/preprints202603.1203.v1>
- Fatholouloumi, S., Vaezi, A. R., Alavipanah, S. K. & Ghorbani, A. (2020). Modeling the Influence of Biophysical Properties and Surface Topography on the Spatial Distribution of Soil Moisture in the Summer: A Case Study of Balikhli-Chay Watershed. *Journal of Ecohydrology*, 7(3), 563–581. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/ije.2020.299783.1307>
- Ginzarly, J., Joshi, M., & Teller, J. (2024). A multidimensional framework for assessing cultural heritage vulnerability to flood hazards. *International Journal of Heritage Studies*, 30(10), 1173–1192. doi.org/10.1080/13527258.2024.2378438
- Gomez, H., & Kavzoglu, T. (2005). Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basin, Venezuela. *Engineering Geology*, 78(1–2), 11–27. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.10.004>
- Jahangir, M. H., Mousavi Reineh, S. M., & Abolghasemi, M. (2019). Spatial prediction of flood zonation mapping in Kan River Basin, Iran, using artificial neural network algorithm. *Weather and Climate Extremes*, 25, 100215. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2019.100215>

- Khendlo, J. (2026). Integrating machine learning and participatory GIS with multi-temporal remote sensing for flood susceptibility and vulnerability mapping in Nkhotakota, Malawi. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-8760455/v1>
- Kusratmoko, E., Septina, A. R., & Falensky, M. A. (2025). Assessment of flash flood hazard potential in a small mountainous Cikundul watershed in West Java, Indonesia. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences*, 21(1), 3918. <https://doi.org/10.30536/j.ijreses.2024.v21.a3918>
- Lucà, F., Conforti, M., & Robustelli, G. (2011). Comparison of GIS-based gully susceptibility mapping using bivariate and multivariate statistics: Northern Calabria, South Italy. *Geomorphology*, 134(3-4), 297-308. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.07.006>
- Negahban, S., & Mokarram, M. (2024). Correlation of landform classification, land use and flood potential areas in Bushehr province. *Quantitative Geomorphological Research*, 13(1), 64-79. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2024.457694.1503>
- Oluwadare, T. S., Ribeiro, M. P., Chen, D., Babadi Ataabadi, M., Tabesh, S. H., & Daomi, A. E. (2025). Applying machine learning algorithms for spatial modeling of flood susceptibility prediction over Sao Paulo sub-region. *Land*, 14(5), 985. <https://doi.org/10.3390/land14050985>
- Pasban, A. H., Abedini, M., & Frotan, M. (2022). Evaluation and analysis of the impact of land use on soil erosion using the RUSLE experimental model (case study: Balikhlochai watershed, Ardabil province). *Geography and Human Relationships*, 5(3), 238-258. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/gahr.2023.382150.1796>
- Rahimi, M. & Vahabzadeh Zargari, M. (2026). Assessment of Land-Use Changes Impact on River Morphology and Its Implications for Increasing Flood Hazard (Case Study: QaraSu River, Ardabil). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 15(1), 1-22. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoh.2025.95345.1607>
- Rahimi, M., Malekmohammadi, B., Firozjaei, M. K., Kerachian, R., Arsanjani, J. J., Tan, M. L., ... & AghaKouchak, A. (2026). Integrating geospatial intelligence and machine learning for flood susceptibility mapping. *Scientific Reports*, 16(1), 10228. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-41014-3>
- Rezaei Moghaddam, M. H., Mokhtari, D., Rahimpour, T., & Skandar, M. (2025). Flood flow zoning for different return periods using hydrodynamic model HEC-RAS (case study: Gomanab Chai River). *Quantitative Geomorphological Research*, 13(4), 23-36. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/gmpj.2024.480574.1523>
- Safari Namivandi, M. (2025). Assessment of the flooding situation in the cities of Khuzestan province. *Geography and Human Relationships*, 7(4), 299-315. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/gahr.2025.514247.2433>
- Saikh, N. I., & Mondal, P. (2023). GIS-based machine learning algorithm for flood susceptibility analysis in the Pagla River Basin, Eastern India. *Natural Hazards Research*, 3(3), 420-436. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2023.05.004>
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3-4), 591-611. <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>
- Sibandze, P., Kalumba, A. M., Afuye, G. A., & Kganyago, M. (2025). Integrating remote sensing data and fully connected CNN for flood probability and risk assessment in the Port St Johns coastal town, South Africa. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 39, 101630. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2025.101630>
- Taloor, A. K., Manhas, D. S., & Kothiyari, G. C. (2021). Retrieval of land surface temperature, normalized difference moisture index, normalized difference vegetation index of the Ravi basin using Landsat data. *Applied Computing and Geosciences*, 9, 100051. <https://doi.org/10.1016/j.acags.2020.100051>
- Taloor, A. K., Sharma, S., Sharma, D., Chib, R., Jasrotia, R., Gupta, S., ... & Kale, R. V. (2024). Estimation of MFFPI for flood hazards assessment using geospatial technology in the Tawi Basin, India. *Geosystems and Geoenvironment*, 3(1), 100-123. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2023.100233>
- Tincu, L., Lazar, I., & Lazar, G. (2018). Modified flash flood potential index in order to estimate areas with predisposition to water accumulation. *Open Geosciences*, 10(1), 593-606.

- Tong, H. T., Pham, M. P., & Nguyen, N. T. T. (2026). Flood disaster risk identification using integrated fuzzy MCDA and GIS in Song Dinh District, Phu Yen Province. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 13(2), 10165–10176. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2026.132.10165>
- Ullah, N., Chao, L., Khan, T. U., Sai, W. L., Yazhuo, Z., Khan, I. A., ... & Hu, Y. (2024). Insights into climate change dynamics: A tourism climate index-based evaluation of Gilgit-Baltistan, Pakistan. *Heliyon*, 10(15), e35315.
- Vilasan, R. T., & Kapse, V. S. (2022). Evaluation of the prediction capability of AHP and F-AHP methods in flood susceptibility mapping of Ernakulam district (India). *Natural Hazards*, 112(2), 1767-1793. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05248-4>
- Weday, G. A., Chukalla, A. D., & Hunde, D. K. (2023). GIS-based flood susceptibility analysis using analytical hierarchy process in Huluka watershed, Oromia, Ethiopia. *Environmental Systems Research*, 12(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s40068-022-00283-5>
- Wondim, Y. K. (2016). Flood hazard and risk assessment using GIS and remote sensing in lower Awash sub-basin, Ethiopia. *Journal of Environment and Earth Science*, 6(1), 94–117.