

Research Paper



Flood Hazard Zonation Using an Integrated GIS–AHP Approach in the Bardaskan Watershed, Khorasan Razavi Province, Iran



Mahdi Saghafi ^{1*}, Maryam Rabiei Gask ², Mohammad Hossein Madih ³

1. Associate Professor of Geomorphology, Department of Geography, Faculty of Law and Social sciences. Payame Noor University, Tehran, Iran. M.Saghafi@pnu.ac.ir
2. Assistant Professor of Geomorphology, Department of Geography Education, Farhangian University, Tehran, Iran. m.rabiei@cfu.ac.ir
3. Master of Science in Urban Planning, Ministry of Interior, Khorasan Razavi Provincial Government, Bardaskan Municipality, Iran. m.madhi@yahoo.com

Keywords

Zonation, flood hazard, Analytic Hierarchy Process (AHP), Geographic Information System (GIS), Bardaskan city watershed, Khorasan Razavi Province, Iran.

Receive: 2026/02/11

Accepted: 2026/05/12

Published: 2026/09/23

ABSTRACT

Introduction

The expansion of urbanization, land-use alterations, and the increase in impervious surfaces over recent decades have modified runoff regimes and intensified flood hazards. This issue is more pronounced in arid and semi-arid regions due to the occurrence of short-duration torrential rainfall, sparse vegetation cover, and poor natural drainage, leading to flash floods with severe economic and social consequences. Under such conditions, flood hazard zonation serves as a pivotal tool in risk management and spatial planning. Although hydrological-hydraulic models (e.g., HEC-HMS and HEC-RAS) are suitable for accurate flow simulation, they require long-term and highly detailed hydrometric data. In contrast, Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) approaches in a GIS environment, particularly the Analytic Hierarchy Process (AHP), enable the simultaneous integration of hydrological, geomorphological, and anthropogenic factors, proving highly efficient in data-scarce basins. The Bardaskan catchment in northeastern Iran, characterized by an arid to semi-arid climate, an absence of perennial rivers, and increasing development adjacent to waterways, is highly susceptible to flash floods. Therefore, this study aimed to map flood hazards in this basin using a GIS-AHP approach.

*Correspondin Author: Saghafi.M. Email: M.Saghafi@pnu.ac.ir

Saghafi, Mahdi., Maryam Rabiei Gask., Mohammad Hossein Madih. (2026). Flood Hazard Zonation Using an Integrated GIS–AHP Approach in the Bardaskan Watershed, Khorasan Razavi Province, Iran. *Hydrogeomorphology*, 13(48) 133 – 155. DOI: [10.22034/hyd.2026.71506.1839](https://doi.org/10.22034/hyd.2026.71506.1839)



Copyright: © by the authors

Publisher: University of Tabriz

Methodology

The research framework is based on multi-criteria analysis within a GIS environment. Initially, seven key flood occurrence criteria were selected based on literature review and expert consensus: physiography, slope, land use, soil permeability, annual rainfall, instantaneous rainfall, and distance from rivers. The utilized data included the 30-meter resolution SRTM Digital Elevation Model (DEM), geological and soil maps, Landsat 8 (OLI) imagery for land use extraction and 30-year (1991–2021) climatic data from regional meteorological stations.

Slope and drainage networks were derived using the DEM and Arc Hydro tools. The land use map was generated via supervised classification (Maximum Likelihood algorithm) and evaluated with an overall accuracy of 88% and a Kappa coefficient of 0.75. Mean annual and short-duration rainfall maps were prepared using Kriging interpolation.

To weight the criteria, a pairwise comparison questionnaire was completed by 23 experts. Weights were extracted through matrix normalization and row averaging, and the consistency of judgments was evaluated using the Inconsistency Index; the calculated Consistency Ratio (CR=0.034) was below the acceptable threshold of 0.1. Subsequently, the standardized layers were combined using the weighted overlay method to calculate the composite flood hazard index. The final map was classified into five hazard categories: no hazard, very low, low, moderate, and high. For validation, flood occurrence data from 30 villages and ROC curve analysis were employed.

Results and Discussion

The AHP results indicated that distance from the river, with a weight of 0.4289, is the most significant factor influencing flood hazard. This was followed by instantaneous rainfall (0.1897) and annual rainfall (0.1578), confirming the prominent role of hydro-climatic variables. Slope, with a weight of 0.0968, plays a complementary role in accelerating runoff routing. Physiographic criteria (0.0558), land use (0.0403), and soil permeability (0.0307) obtained lower weights, indicating that the occurrence pattern is primarily controlled by natural and hydrological factors rather than purely anthropogenic ones.

The zonation map revealed that 27.9% of the basin area falls within the high-hazard class and 26.9% in the moderate-hazard class, whereas 19.23%, 17.58%, and 8.35% were assessed as low, very low, and no hazard, respectively. High-hazard zones are predominantly concentrated adjacent to waterways in the central and downstream sections of the basin, where lower slopes, higher drainage density, and the concentration of human activities simultaneously facilitate runoff accumulation and increase peak discharge. Conversely, upstream elevations with steeper slopes and sparse drainage networks mostly fall into low-hazard categories.

Validation using observational data from 30 villages demonstrated that the model correctly placed 14 flooded villages in high-hazard classes (TP=14), missed 4 instances (FN=4), correctly identified 8 non-flooded villages as low-hazard (TN=8), and overestimated 4 cases (FP=4). The calculated sensitivity, specificity, and overall accuracy were 0.78, 0.67, and 0.73, respectively. The ROC analysis yielded an AUC=0.782 (SE=0.084, Sig=0.009), reflecting the model's acceptable performance in distinguishing flood-prone from non-flood-prone areas. Cross-analyses with slope and land use classes showed that the highest overlap for high-hazard zones occurs at slopes

less than 12% and within urban and agricultural land uses, while densely vegetated land uses predominantly align with low-hazard classes.

Conclusions

The dominant weight of distance from rivers and the significance of short-duration rainfall suggest that floods in the Bardaskan basin are primarily flash floods triggered by extreme short-duration precipitation and rapid runoff concentration in the drainage network. This pattern is consistent with the basin's arid/semi-arid climate and geomorphological conditions. Furthermore, the intersection of high-hazard zones with gently sloping and developed urban-agricultural areas demonstrates that the interaction between natural factors and land-use changes plays a decisive role in exacerbating risk. The model's performance, evaluated by statistical indices and the ROC curve, validates the efficiency of the GIS-AHP approach under data-scarce conditions. Managerial implications of the findings include establishing safe waterway buffers, prohibiting or conditionally managing development in high-hazard zones, reinforcing infrastructure for runoff collection and routing (especially in dilapidated urban fabrics), designing early warning systems tailored to short-duration rainfall, and improving land use by enhancing effective infiltration and surface roughness. To improve accuracy, future studies should employ systematic recording of flood events, higher spatiotemporal resolution rainfall data, and local calibration of weights. Overall, the integrated GIS-AHP approach provides a practical, cost-effective framework for flood hazard zonation in similarly data-scarce basins and can serve as a decision-making baseline for risk management and urban development planning in Bardaskan.

مقاله پژوهشی



پهنه‌بندی خطر سیلاب با استفاده از رویکرد تلفیقی GIS-AHP در حوضه آبریز شهر بردسکن، استان خراسان رضوی، ایران



مهدی ثقفی^{۱*}، مریم ربیعی گسک^۲، محمدحسین مدیح^۳

۱- دانشیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشکده حقوق و علوم اجتماعی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران. M.Saghafi@pnu.ac.ir

۲- استادیار ژئومورفولوژی، گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران. m.rabiei@cfu.ac.ir

۳- کارشناس ارشد برنامه‌ریزی شهری، وزارت کشور، استانداری خراسان رضوی، شهرداری بردسکن. m.madiah@yahoo.com

چکیده

کلیدواژه‌ها

سیلاب یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که به‌ویژه در پی بارش‌های رگباری و تمرکز سریع رواناب، خسارات چشمگیری به سکونتگاه‌ها و زیرساخت‌ها وارد می‌کند. به همین دلیل شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مستعد سیلاب نقش کلیدی در مدیریت خطر و برنامه‌ریزی فضایی دارد. این پژوهش با هدف ارزیابی و پهنه‌بندی خطر سیلاب در حوضه آبریز بردسکن، از رویکرد ترکیبی سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) بهره گرفته است. در این مطالعه مجموعه‌ای از معیارهای هیدرومورفولوژیکی، ژئومورفولوژیکی و محیطی شامل شیب، فاصله از آبراهه‌ها، تراکم زهکشی، کاربری اراضی، نفوذپذیری خاک و ویژگی‌های بارشی تحلیل شد و وزن هر معیار با روش AHP تعیین گردید. سپس با تلفیق لایه‌ها در محیط GIS، نقشه پهنه‌بندی خطر در پنج طبقه بسیار کم تا بسیار زیاد تهیه شد.

نتایج نشان می‌دهد که عوامل مرتبط با شبکه زهکشی و شرایط بارشی، به‌ویژه فاصله از آبراهه‌ها و بارش‌های کوتاه‌مدت، بیشترین تأثیر را در شکل‌دهی الگوی خطر سیلاب دارند. همچنین بخش‌های پایین‌دست و نواحی نزدیک آبراهه‌های اصلی، بالاترین پتانسیل وقوع سیلاب را نشان می‌دهند. ارزیابی مدل با استفاده از منحنی ROC و شاخص AUC برابر با ۰/۷۸۲، گویای عملکرد قابل قبول مدل در شناسایی مناطق سیلاب‌خیز است.

به‌طور کلی این پژوهش بیانگر آن است که ترکیب GIS و AHP حتی با وجود محدودیت داده‌های هیدرومتری، می‌تواند چارچوبی مؤثر برای تحلیل فضایی خطر سیلاب ارائه دهد و نقشه تولیدشده می‌تواند به‌عنوان مبنایی علمی برای مدیریت رواناب، برنامه‌ریزی کاربری اراضی و کاهش خسارات سیلاب در منطقه بردسکن مورد استفاده قرار گیرد.

پهنه‌بندی، خطر سیلاب، تحلیل سلسله‌مراتبی، سامانه اطلاعات جغرافیایی، حوضه آبریز شهر بردسکن، استان خراسان رضوی، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

رجاع به این مقاله: مهدی، ربیعی گسک، مریم؛ مدیح، محمدحسین (۱۴۰۵). پهنه‌بندی خطر سیلاب با استفاده از رویکرد تلفیقی GIS-AHP در حوضه آبریز شهر بردسکن، استان خراسان رضوی، ایران. هیدروژئومورفولوژی، ۱۳ (۴۸): ۱۳۳ - ۱۵۵.

*نویسنده مسئول: مهدی ثقفی
ایمانامه: M.Saghafi@pnu.ac.ir

شناسه دیجیتال مقاله: 10.22034/hyd.2026.71506.1839



Copyright: ©2025 by the authors

Publisher: University of Tabriz

مقدمه

در دهه‌های اخیر، گسترش شهرنشینی و تغییر کاربری اراضی موجب برهم خوردن تعادل سامانه‌های طبیعی و تشدید مخاطرات هیدرولوژیکی به‌ویژه سیلاب شده است. افزایش سطوح نفوذناپذیر، تصرف آبراهه‌های طبیعی و توسعه نامتوازن سکونتگاه‌ها از جمله عواملی هستند که رژیم طبیعی رواناب را تغییر داده و احتمال وقوع سیلاب و خسارات ناشی از آن را افزایش داده‌اند (کوندزویچ^۱ و همکاران، ۲۰۱۸؛ ۱۴). سیلاب‌ها از مهم‌ترین مخاطرات ژئومورفولوژیکی به شمار می‌روند که از طریق فرآیندهایی مانند فرسایش، انتقال رسوبات و غرقاب، علاوه بر ایجاد تغییرات مورفولوژیکی در سطح زمین، خسارات اقتصادی و اجتماعی گسترده‌ای به همراه دارند. اهمیت این پدیده در مناطق خشک و نیمه‌خشک بیشتر است؛ زیرا در این مناطق بارش‌ها غالباً به صورت رگباری و کوتاه‌مدت رخ می‌دهند و در نتیجه می‌توانند منجر به شکل‌گیری سیلاب‌های ناگهانی شوند. عواملی مانند پوشش گیاهی محدود، نفوذپذیری پایین خاک و ضعف شبکه‌های زهکشی طبیعی باعث تشدید رواناب و افزایش خطر سیلاب می‌شوند. علاوه بر این، در بسیاری از شهرهای این نواحی، توسعه کالبدی نامتوازن و ضعف زیرساخت‌های هدایت آب‌های سطحی سبب افزایش آسیب‌پذیری مناطق شهری، به‌ویژه بافت‌های فرسوده، در برابر سیلاب شده است. با این حال، سیلاب‌ها در صورت مدیریت صحیح می‌توانند نقش مثبتی در انتقال رسوبات، تغذیه آبخوان‌ها و تأمین بخشی از نیاز آبی اراضی کشاورزی ایفا کنند (علاقه‌مند و همکاران، ۲۰۲۰).

در بررسی پیشینه منابع مرتبط با موضوع این پژوهش می‌توان دریافت که به منظور مدیریت این مخاطره، پهنه‌بندی خطر سیلاب به عنوان یکی از ابزارهای مهم در برنامه‌ریزی محیطی و مدیریت منابع آب مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. به طور کلی، روش‌های مورد استفاده در این زمینه را می‌توان در سه دسته اصلی شامل مدل‌های هیدرولوژیکی-هیدرولیکی، مدل‌های آماری و داده‌محور و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی طبقه‌بندی کرد. مدل‌های هیدرولوژیکی-هیدرولیکی مانند HEC-HMS و HEC-RAS به طور گسترده برای شبیه‌سازی جریان و تعیین محدوده سیلاب مورد استفاده قرار می‌گیرند (فلدمن^۲، ۲۰۰۰؛ کنیل^۳ و همکاران، ۲۰۰۵)، اما کاربرد آن‌ها مستلزم دسترسی به داده‌های هیدرومتری دقیق و سری‌های زمانی بلندمدت است. در مقابل، روش‌های آماری و داده‌محور مانند رگرسیون لجستیک و مدل شواهد وزنی برای تحلیل ارتباط میان وقوع سیلاب و عوامل محیطی به کار گرفته شده‌اند (رضائی‌مقدم و همکاران، ۲۰۲۵؛ تهرانی و همکاران، ۲۰۱۳؛ پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۸). همچنین در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های یادگیری ماشین نظیر جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان و شبکه‌های عصبی مصنوعی در مطالعات حساسیت سیلاب گسترش یافته است (بوی^۴ و همکاران، ۲۰۱۸؛ خسروی و همکاران، ۲۰۲۰؛ ژائو^۵ و همکاران، ۲۰۲۱).

در کنار این روش‌ها، مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در محیط GIS به دلیل قابلیت تلفیق همزمان عوامل مختلف محیطی، کاربرد گسترده‌ای در مطالعات مخاطرات طبیعی یافته‌اند. در این میان، روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) که توسط ساعتی ارائه شد، یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای وزن‌دهی معیارها و تحلیل

1 Kundzewicz
3 Knebl
5 Zhao

2 Feldman
4 Bui

تصمیم‌گیری در مطالعات محیطی است (ساعتی^۱، ۱۹۸۰). این روش امکان ترکیب داده‌های کمی و کیفی و تحلیل همزمان شاخص‌های ژئومورفولوژیکی، هیدروولوژیکی و انسانی را فراهم می‌کند و در مطالعات مختلف پهنه‌بندی خطر سیلاب نتایج قابل قبولی ارائه داده است (بیاتی خطیبی و مقدم، ۲۰۲۶؛ تهرانی و همکاران، ۲۰۱۳؛ بوی و همکاران، ۲۰۱۸؛ پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۸).

با وجود پیشرفت‌های انجام‌شده، بخش قابل توجهی از این مطالعات در مناطقی با دسترسی مناسب به داده‌های هیدرومتری انجام شده است. در مقابل، در بسیاری از حوضه‌های کوچک و متوسط واقع در اقلیم‌های خشک ایران که فاقد رودخانه‌های دائمی و شبکه‌های پایش هیدرومتری منظم هستند، مطالعات جامع پهنه‌بندی خطر سیلاب محدود است. در چنین شرایطی، استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در محیط GIS به عنوان رویکردی مناسب برای تحلیل عوامل مؤثر بر وقوع سیلاب و تلفیق داده‌های مکانی اهمیت می‌یابد.

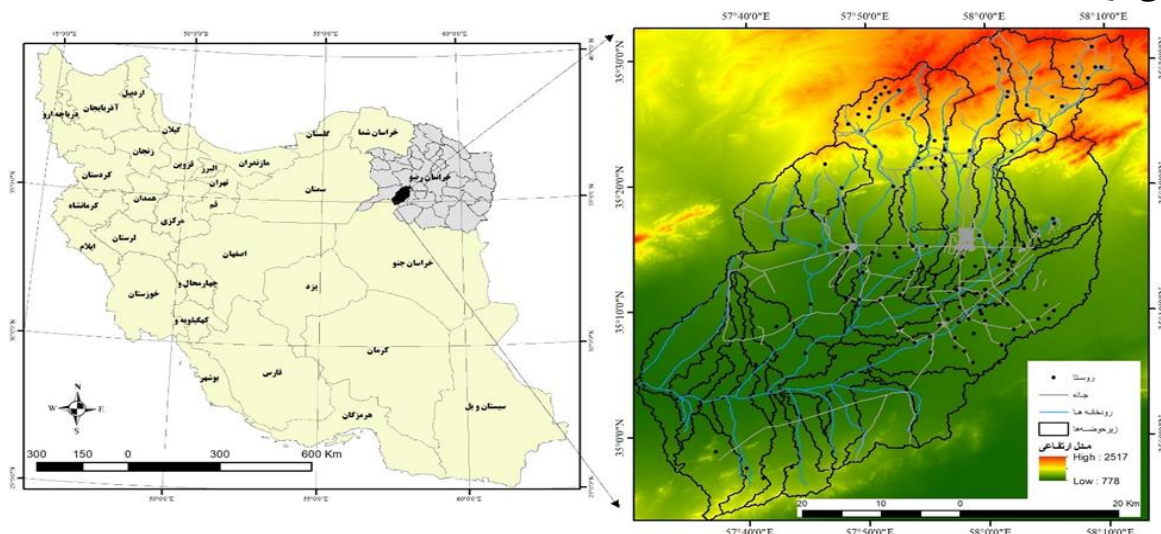
حوضه آبریز شهر بردسکن در شمال شرق ایران به دلیل قرارگیری در اقلیم خشک تا نیمه‌خشک، نبود رودخانه‌های دائمی و وقوع رواناب‌های فصلی و سیلاب‌های ناگهانی، از جمله مناطق مستعد خطر سیلاب محسوب می‌شود. توسعه سکونتگاه‌ها در مجاورت آبراهه‌ها، گسترش بافت‌های فرسوده و تغییرات کاربری اراضی در سال‌های اخیر نیز بر میزان آسیب‌پذیری این منطقه افزوده است. با این حال، تاکنون مطالعه جامعی در زمینه پهنه‌بندی خطر سیلاب در حوضه آبریز بردسکن انجام نشده است. بر این اساس، نوآوری پژوهش حاضر در ارائه چارچوبی تلفیقی برای ارزیابی و پهنه‌بندی خطر سیلاب در شرایط کمبود داده‌های هیدرومتری در یک حوضه واقع در اقلیم خشک نهفته است. در این مطالعه با بهره‌گیری از قابلیت‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی و روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، مجموعه‌ای از شاخص‌های ژئومورفولوژیکی، هیدروولوژیکی و کاربری اراضی به صورت هم‌زمان در یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره تلفیق شده‌اند تا الگوی مکانی مناطق مستعد سیلاب در حوضه آبریز بردسکن شناسایی شود. همچنین اعتبار نتایج مدل با استفاده از شاخص‌های آماری و تحلیل منحنی ROC مورد ارزیابی قرار گرفته است که امکان سنجش میزان کارایی مدل در شناسایی مناطق سیلاب‌خیز را فراهم می‌کند. این رویکرد می‌تواند چارچوبی کاربردی برای تحلیل مخاطرات سیلاب در حوضه‌های مشابه در مناطق خشک و نیمه‌خشک فراهم سازد.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز شهر بردسکن (مساحت ۲۴۹۶/۸۵ کیلومتر مربع) در استان خراسان رضوی، در مختصات جغرافیایی ۵۷/۴۷۷ تا ۵۸/۲۶۷ درجه طول شرقی و ۳۴/۷۵۳ تا ۳۵/۶۷۴ درجه عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). حداکثر ارتفاع حوضه در بخش شمال شرقی آن با حدود ۲۵۱۷ متر و حداقل ارتفاع حوضه در بخش جنوب غربی آن با حدود ۷۷۸ متر از سطح دریا قرار دارد. شهر بردسکن در میانه حوضه در گذرگاه تاریخی خراسان به کویر قرار داشته و امروزه در دامنه‌های شمالی کوه آهوبم و دشت‌های آبرفتی گسترده‌ای جای گرفته است. گسترش شهری به صورت طولی در راستای شمالی-جنوبی و میان ناحیه کوهستانی شمال و عرصه دشت‌ها در جنوب رخ داده است. بر پایه آخرین سرشماری (۱۳۹۵)، جمعیت بردسکن ۲۸۲۳۳ نفر در ۸۵۷۰ خانوار بوده که روند افزایشی مداومی از ۵۰۵۸ نفر در سال ۱۳۳۵ نشان می‌دهد. شهرستان بردسکن

1 Saaty

شامل سه بخش (مرکزی، انابد، شهرآباد)، هفت دهستان، سه شهر و ۳۹۳ روستا است. از دیدگاه اقلیمی، میانگین دمای سالانه حوضه ۱۸ درجه سانتی‌گراد با دامنه تغییرات سالانه حدود ۱۴/۵ درجه سانتی‌گراد است. بارندگی سالانه بر پایه داده‌های دهه ۲۰۱۱-۲۰۲۰ حدود ۲۱۷ میلی‌متر برآورد می‌شود که توزیع فصلی آن به شدت نامتوازن است: زمستان با سهم حدود ۵۷ درصد پرباران‌ترین فصل و تابستان با کمتر از ۱ درصد کم‌باران‌ترین فصل است. بیشترین بارش در بخش‌های کوهستانی شمالی (حدود ۲۷۰ میلی‌متر) و کمترین مقدار در محدوده شهری و نواحی جنوبی (حدود ۲۲۰ میلی‌متر) ثبت شده است. بر اساس شاخص‌های اقلیمی آمبرژه، بیوکلیما، تورنت‌وایت و ضریب خشکی دومارتن، منطقه در رده خشک تا نیمه‌خشک طبقه‌بندی می‌شود.



شکل (۱) موقعیت جغرافیای حوضه آبریز شهر بردسکن و زیرحوضه‌های آن بر پهنه ناهمواریهای منطقه مورد مطالعه

Figure (1): The geographical location of the Bardaskan city watershed and its sub-basins on the topography of the study area.

زمین‌شناسی منطقه عمدتاً شامل نهشته‌های کواترنری، مخروط‌افکنه‌ها و دشت‌های آبرفتی است که از شمال به ارتفاعات کوه آهوبم، از جنوب به تپه‌ماهورهای نفوژن و کویر، از شرق به دشت کاشمر و از غرب به دشت انابد و کویر محدود می‌شود. این ترکیب زمین‌شناختی، همراه با الگوی بارشی متمرکز در زمستان و شیب‌های تند شمالی، شرایط ایده‌آلی برای تولید رواناب سریع و وقوع سیلاب‌های ناگهانی فراهم می‌کند. تمرکز جمعیت و توسعه شهری و روستایی در بستر این دشت آبرفتی، آسیب‌پذیری سکونتگاه‌ها به‌ویژه در متطق روستایی و بافت فرسوده شهری را در برابر مخاطرات سیلابی افزایش داده است.

مواد و روش‌ها

چارچوب روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر با هدف پهنه‌بندی خطر سیلاب در حوضه آبریز شهر بردسکن و با بهره‌گیری از چارچوب تحلیل چندمعیاره مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) انجام شد. به‌منظور تلفیق داده‌های مکانی و قضاوت‌های کارشناسی و تعیین اهمیت نسبی عوامل مؤثر بر وقوع سیلاب، از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) استفاده گردید. این روش یکی از پرکاربردترین تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در مطالعات مدیریت خطرات طبیعی، به‌ویژه در شرایط عدم قطعیت داده‌ها، به‌شمار می‌رود (مخدوم، ۲۰۱۴؛

پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۲؛ ساعتی، ۱۹۸۰). انتخاب رویکرد تلفیقی GIS-AHP بر مبنای توانایی آن در انجام تحلیل فضایی، شفافیت ساختار تصمیم‌گیری و کارایی در مناطقی که با کمبود داده مواجه هستند، صورت گرفت. در مقابل مدل‌های هیدرودینامیکی نظیر HEC RAS که نیازمند داده‌های دقیق دبی، هندسه مقاطع و فرآیندهای پیچیده کالیبراسیون هستند و عمدتاً برای شبیه‌سازی جریان در شبکه‌های مشخص طراحی شده‌اند، روش GIS-AHP امکان ارزیابی یکپارچه خطر سیلاب را در کل پهنه فراهم می‌کند (مرز^۱ و همکاران، ۲۰۰۷؛ چاو^۲ و همکاران، ۱۹۸۸). همچنین، با وجود توسعه گسترده مدل‌های یادگیری ماشین، وابستگی آن‌ها به داده‌های آموزشی گسترده و محدودیت در تفسیرپذیری نتایج، کاربرد عملی آن‌ها را در بسیاری از مناطق کشور کاهش می‌دهد (موسوی و همکاران، ۲۰۱۸).

داده‌ها و پیش‌پردازش

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل لایه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، خاک و متغیرهای اقلیمی (بارش سالانه، بارش‌های کوتاه‌مدت، دما و تبخیر) بودند که از منابع رسمی و مطالعات کتابخانه‌ای گردآوری شدند. به منظور انجام تحلیل فضایی دقیق، کلیه داده‌ها از نظر سیستم مختصات، مقیاس و تفکیک مکانی یکسان‌سازی و در محیط GIS استانداردسازی گردیدند (اسدی و همکاران، ۲۰۱۷). به منظور استخراج پارامترهای توپوگرافی شامل شیب و شبکه زهکشی، از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر حاصل از داده‌های SRTM استفاده شد که از پایگاه داده USGS EarthExplorer دریافت گردید. این متغیرها نقش تعیین‌کننده‌ای در جهت، سرعت و تمرکز رواناب سطحی دارند و از عوامل کلیدی در شکل‌گیری سیلاب محسوب می‌شوند (سعیدی و همکاران، ۲۰۲۱؛ مور^۳ و همکاران، ۱۹۹۱).

انتخاب معیارها و ساختار سلسله‌مراتبی تصمیم‌گیری

بر اساس مرور نظام‌مند مطالعات داخلی و بین‌المللی در حوزه پهنه‌بندی خطر سیلاب و با بهره‌گیری از دیدگاه‌های کارشناسی متخصصان حوزه‌های هیدرولوژی، ژئومورفولوژی و برنامه‌ریزی شهری، هفت معیار اصلی مؤثر بر وقوع سیلاب در محدوده مورد مطالعه شناسایی شد. این معیارها شامل: فیزیوگرافی، شیب، کاربری اراضی، نفوذپذیری خاک، بارش متوسط، بارش‌های لحظه‌ای و فاصله از رودخانه‌ها هستند که در بسیاری از مطالعات پهنه‌بندی خطر سیلاب به‌عنوان مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده فرآیندهای رواناب و سیلاب معرفی شده‌اند (تهرانی و همکاران، ۲۰۱۳؛ خسروی و همکاران، ۲۰۲۰؛ مخدوم، ۲۰۱۴؛ پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۸). به منظور تحلیل و وزن‌دهی این معیارها، ساختار تصمیم‌گیری در قالب یک چارچوب سلسله‌مراتبی سازمان‌دهی شد؛ به‌طوری‌که هدف نهایی پژوهش (پهنه‌بندی خطر وقوع سیلاب) در سطح اول، معیارهای مؤثر در سطح دوم و لایه‌های اطلاعاتی مکانی متناظر با هر معیار در سطح سوم قرار گرفتند و مبنای اجرای مدل فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) را فراهم کردند. لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده از منابع مختلف داده‌ای استخراج و پردازش شدند؛ به‌گونه‌ای که پارامترهای فیزیوگرافی و شیب با استفاده از مدل ارتفاع رقومی (DEM) با تفکیک مکانی ۳۰ متر و با بهره‌گیری از ابزارهای تحلیل هیدرولوژیکی افزونه Arc Hydro

1 Merz
3 Moore

2 Chow

در محیط نرم‌افزار ArcGIS استخراج گردید. به‌منظور تهیه نقشه کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه، از تصاویر ماهواره‌ای Landsat-8 (OLI) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر مربوط به سال ۲۰۱۶ استفاده شد که از پایگاه داده USGS دریافت گردید. در این پژوهش از داده‌های Level-2 Surface Reflectance که شامل تصحیحات هندسی و اتمسفری است استفاده شد. پس از انجام مراحل پیش‌پردازش و برش محدوده مطالعه، طبقه‌بندی کاربری اراضی با استفاده از روش طبقه‌بندی نظارت‌شده مبتنی بر الگوریتم حداکثر احتمال (Maximum Likelihood) در محیط نرم‌افزار ERDAS انجام شد. به‌منظور ارزیابی دقت طبقه‌بندی، ماتریس خطا تشکیل و شاخص‌های دقت محاسبه گردید. نتایج نشان داد دقت کلی طبقه‌بندی ۸۸ درصد و ضریب کاپا ۰/۷۵ است که بیانگر دقت قابل قبول نقشه کاربری اراضی برای استفاده در تحلیل‌های بعدی پژوهش می‌باشد. برای تعیین پهنه‌های نفوذپذیری خاک، از طبقه‌بندی گروه‌های هیدرولوژیک خاک بر اساس دستورالعمل انجمن حفاظت خاک ایالات متحده استفاده گردید که یکی از روش‌های رایج در تحلیل‌های هیدرولوژیکی محسوب می‌شود. همچنین به‌منظور تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی بارش متوسط و بارش‌های لحظه‌ای، از داده‌های آماری ۳۰ ساله (۱۳۷۰-۱۴۰۰) ۵ ایستگاه‌های هواشناسی شامل: کاشمر، شریف‌آباد، درونه، خلیل‌آباد و بیروت استفاده شد و توزیع مکانی بارش با بهره‌گیری از روش درونیابی زمین‌آماري کریجینگ در محیط GIS برآورد گردید. در نهایت، نقشه فاصله از رودخانه‌ها با استفاده از شبکه هیدروگرافی استخراج‌شده از مدل ارتفاع رقومی و محاسبه فاصله اقلیدسی از آبراهه‌ها در محیط GIS تولید شد و به‌عنوان یکی از متغیرهای کلیدی در ارزیابی خطر سیلاب در تحلیل نهایی مورد استفاده قرار گرفت.

تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و نحوه محاسبه وزن معیارها

در این پژوهش، وزن‌دهی معیارها با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) انجام شد. در گام نخست، پرسشنامه مقایسات زوجی توسط ۲۳ نفر از خبرگان و متخصصان هیدرولوژی و ژئومورفولوژی تکمیل شد. ماتریس مقایسه زوجی معیارها بر اساس مقیاس ۱ تا ۹، مطابق با پیشنهاد ساعتی (۱۹۸۰) و با اتکا به قضاوت خبرگان تکمیل گردید. در این مقیاس، عدد ۱ نشان‌دهنده اهمیت برابر و عدد ۹ بیانگر اهمیت بسیار زیاد یک معیار نسبت به معیار دیگر است (جدول ۱).

در گام بعد، ماتریس مقایسه زوجی نرمال‌سازی شد؛ بدین‌صورت که هر درایه ماتریس بر مجموع ستون مربوطه تقسیم گردید. سپس، بردار وزن نسبی معیارها از طریق محاسبه میانگین مقادیر هر سطر ماتریس نرمال‌شده به‌دست آمد. این بردار، بیانگر اهمیت نسبی هر معیار در تحقق هدف نهایی پژوهش است (ساعتی، ۱۹۸۰؛ ساعتی، ۲۰۰۵).

به‌منظور ارزیابی سازگاری قضاوت‌های کارشناسی، بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس (λ_{max}) محاسبه شد و شاخص ناسازگاری (CI) با استفاده از رابطه زیر تعیین گردید:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

جدول (۱) مراحل محاسبه فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) در پهنه‌بندی خطر سیلاب
Table (1): Stages of calculating the Analytic Hierarchy Process (AHP) in flood hazard zonation.

گام	مرحله محاسباتی	توضیحات
۱	تعریف هدف تصمیم‌گیری	هدف اصلی، پهنه‌بندی خطر سیلاب در شهر بردسکن تعیین شد. ساختار تصمیم‌گیری در قالب یک سلسله‌مراتب شامل (۱) هدف، (۲) معیارهای مؤثر بر سیلاب و (۳) لایه‌های مکانی متناظر سازمان‌دهی گردید
۲	انتخاب معیارها	معیارهای مؤثر بر وقوع سیلاب بر اساس مرور پیشینه علمی و نظر خبرگان انتخاب شدند که شامل: فیزیوگرافی، شیب، کاربری اراضی، نفوذپذیری خاک، بارش سالانه، بارش‌های کوتاه‌مدت و فاصله از رودخانه‌ها بود
۳	تشکیل ماتریس مقایسه زوجی	با استفاده از مقیاس ۱ تا ۹ ساعتی و بر پایه قضاوت کارشناسی تشکیل شد؛ $(n \times n)$ ماتریس مقایسه زوجی به‌گونه‌ای که اهمیت نسبی هر معیار در مقایسه با سایر معیارها مشخص شود
۴	نرمال‌سازی ماتریس	عناصر ماتریس مقایسه زوجی بر مجموع مقادیر هر ستون تقسیم شدند تا ماتریس نرمال شده حاصل شود
۵	محاسبه بردار وزن معیارها	وزن نسبی هر معیار از طریق محاسبه میانگین مقادیر هر سطر در ماتریس نرمال شده به‌دست آمد و به‌عنوان بردار اولویت معیارها در نظر گرفته شد
۶	محاسبه مقدار ویژه بیشینه (λ_{max})	با ضرب ماتریس مقایسه زوجی اولیه در بردار وزن‌ها و محاسبه میانگین نسبت مقادیر حاصل به λ_{max} مقدار وزن‌های متناظر تعیین شد
۷	محاسبه شاخص ناسازگاری (CI)	تعداد معیارها است n محاسبه شد که در آن $CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$ شاخص ناسازگاری با استفاده از رابطه
۸	محاسبه نرخ ناسازگاری (CR)	محاسبه شد. ماتریس مقایسه زوجی در صورتی معتبر تلقی می‌شود که $CR = CI / RI$ نرخ ناسازگاری از رابطه برابر $0.34/0$ به‌دست آمد CR کمتر از $1/0$ باشد. در این پژوهش، مقدار CR مقدار
۹	تخصیص وزن‌ها در GIS	وزن‌های نهایی استخراج‌شده به لایه‌های مکانی متناظر در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی تخصیص داده شدند
۱۰	هم‌پوشانی وزنی و تولید نقشه نهایی	تمامی لایه‌های وزندار با استفاده از روش هم‌پوشانی وزنی تلفیق شدند و نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر سیلاب در پنج طبقه خطر تولید گردید

که در آن n تعداد معیارها است. سپس، نرخ ناسازگاری (CR) از طریق تقسیم CI بر شاخص تصادفی (RI) محاسبه شد:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

بر اساس معیارهای پیشنهادی سساعتی (۱۹۸۰)، زمانی که مقدار CR کمتر از 0.1 باشد، سازگاری قضاوت‌ها قابل قبول تلقی می‌شود. در این پژوهش، مقدار $CR = 0.34/0$ به‌دست آمد که بیانگر سازگاری مناسب ماتریس‌های مقایسه زوجی و اعتبار فرآیند وزن‌دهی است. نتایج وزن‌دهی نهایی به لایه‌های مکانی متناظر در محیط GIS تخصیص یافت (پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۲؛ رحمتی و همکاران، ۲۰۱۶).

پهنه‌بندی خطر سیلاب و اعتبارسنجی

پس از تعیین وزن نهایی معیارها، لایه‌های اطلاعاتی با استفاده از روش هم‌پوشانی وزنی^۱ در محیط GIS تلفیق شدند و شاخص ترکیبی خطر سیلاب محاسبه گردید. بر اساس این شاخص، محدوده مورد مطالعه به پنج طبقه خطر شامل پرخطر، متوسط، کم‌خطر، بسیار کم‌خطر و فاقد خطر تقسیم‌بندی شد؛ رویکردی که در

1 Weighted Overlay

اغلب مطالعات پهنه‌بندی سیلاب مورد استفاده قرار گرفته است (فرناندز^۱ و همکاران، ۲۰۱۰؛ سلیمانی و همکاران، ۲۰۱۹).

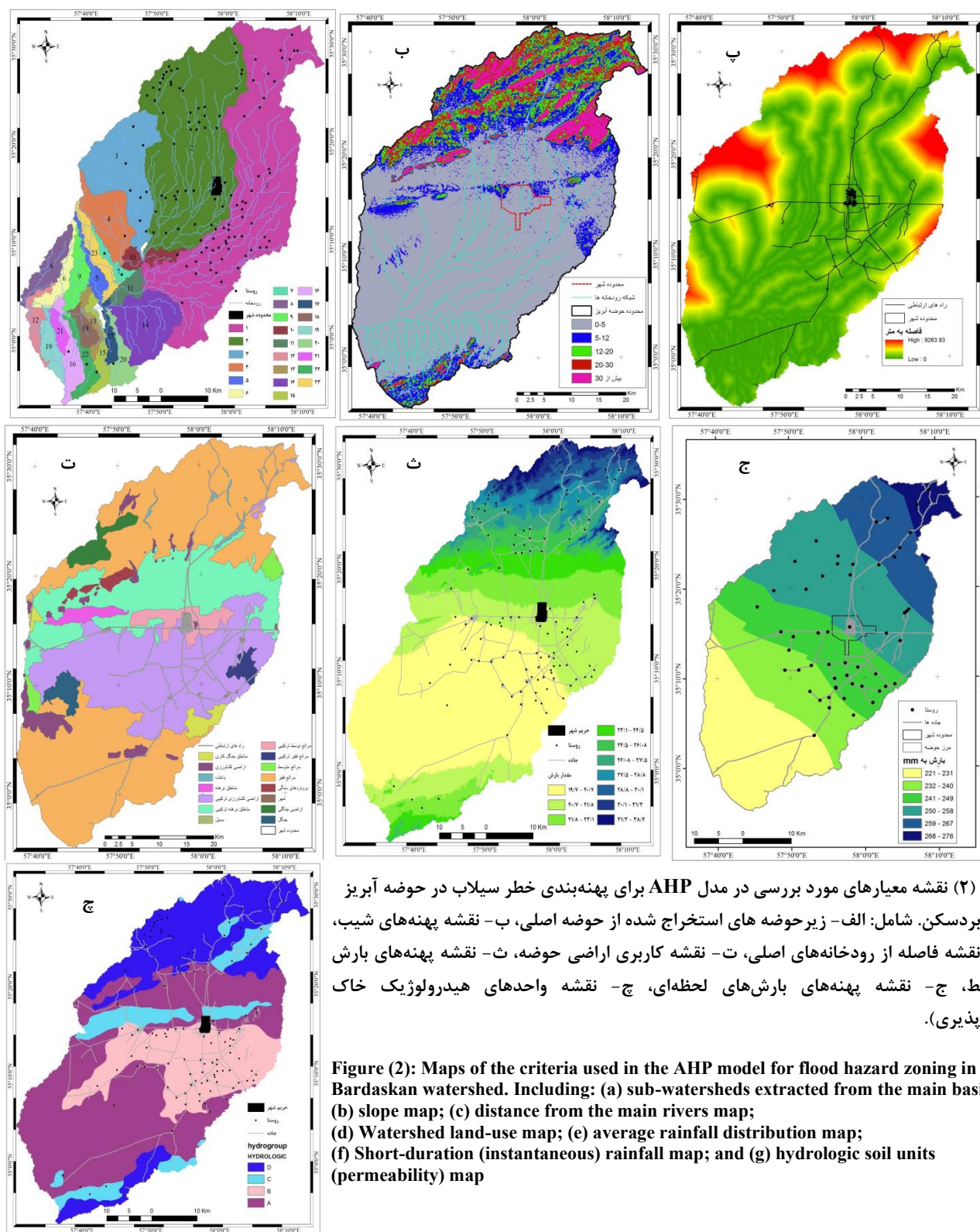
به‌منظور ارزیابی اعتبار نتایج، ابتدا سازگاری قضاوت‌های کارشناسی در فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) بررسی شد. سپس برای سنجش دقت مدل پهنه‌بندی حساسیت به سیلاب، از منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (ROC) استفاده گردید. در این روش، میزان تطابق بین نقشه پیش‌بینی‌شده حساسیت به سیلاب و نقاط وقوع سیلاب مورد تحلیل قرار گرفت و مساحت زیر منحنی (AUC) به‌عنوان شاخص کمی عملکرد مدل محاسبه شد؛ به‌طوری‌که مقادیر بالاتر AUC بیانگر توانایی بیشتر مدل در تفکیک مناطق مستعد و غیرمستعد سیلاب است. در نهایت، نتایج نقشه نهایی خطر سیلاب حوضه آبریز شهر بردسکن از نظر منطقی و فضایی نیز مورد بحث و ارزیابی قرار گرفت.

یافته‌ها

نتایج حاصل از مقایسه‌های زوجی هفت معیار مؤثر بر پهنه‌بندی خطر سیلاب در حوضه آبریز شهر بردسکن (شکل ۲)، بیانگر تمایز روشن در وزن نسبی معیارها و تفاوت در میزان نقش‌آفرینی عوامل هیدرولوژیکی، ژئومورفولوژیکی و انسانی در چارچوب مدل تصمیم‌گیری است (جدول ۲). وزن‌های استخراج‌شده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی نشان می‌دهد که فاصله از رودخانه با وزن ۰/۴۲۸۹ دارای غلبه ساختاری نسبت به سایر معیارها بوده و به‌عنوان مؤثرترین عامل در کنترل الگوی مکانی خطر سیلاب در حوضه آبریز شهر بردسکن شناخته می‌شود. این غلبه نشان‌دهنده نقش مستقیم مجاورت با آبراهه‌ها و مسیل‌های فعال در افزایش احتمال طغیان و سرریز جریان است. پس از آن، معیارهای بارش لحظه‌ای (۰/۱۸۹۷) و بارندگی سالانه (۰/۱۵۷۸) در مراتب بعدی اهمیت قرار دارند که نشان‌دهنده نقش برجسته مؤلفه‌های هیدروکلیماتیک در شکل‌گیری سیلاب‌های حوضه آبریز مورد مطالعه است. برتری نسبی بارش‌های کوتاه‌مدت و پرشدت نسبت به بارندگی تجمعی سالانه بیانگر آن است که سیلاب‌های منطقه عمدتاً ماهیت سیلاب‌های ناگهانی^۲ دارند؛ پدیده‌ای که با واکنش سریع حوضه، نفوذپذیری پایین سطوح انسان‌ساخت و تمرکز کوتاه رواناب سازگار است. شیب زمین با وزن ۰/۰۹۶۸ به‌عنوان یک عامل ژئومورفولوژیکی مکمل شناخته می‌شود که در تسریع انتقال رواناب سطحی و کاهش زمان تمرکز نقش دارد. اگرچه اهمیت این معیار در مقایسه با عوامل هیدروکلیماتیک کمتر است، اما نتایج نشان می‌دهد که شیب زمین در تعامل با الگوی بارش و فاصله از رودخانه، به تقویت شرایط سیلاب‌خیز در برخی محدوده‌ها منجر می‌شود. در مقابل، معیارهای فیزیوگرافی (۰/۰۵۵۸)، کاربری اراضی (۰/۰۴۰۳) و نفوذپذیری (۰/۰۳۰۷) پایین‌ترین وزن‌ها را در ساختار تصمیم‌گیری به خود اختصاص داده‌اند. این موضوع بیانگر آن است که اگرچه این عوامل در افزایش آسیب‌پذیری و شدت خسارات سیلاب نقش دارند، اما در الگوی مکانی وقوع خطر سیلاب، نسبت به سایر متغیرهای مورد بررسی از اهمیت نسبی کمتری برخوردارند. بنابراین، سیلاب‌های حوضه آبریز شهر بردسکن بیش از آنکه ناشی از مؤلفه‌های انسان‌ساخت باشند، تحت کنترل فرآیندهای طبیعی حوضه قرار دارند.

1 Fernández

2 Flash Floods



شکل (۲) نقشه معیارهای مورد بررسی در مدل AHP برای پهنه‌بندی خطر سیلاب در حوضه آبریز شهر بردسکن. شامل: الف- زیر حوضه‌های استخراج شده از حوضه اصلی، ب- نقشه پهنه‌های شیب، پ- نقشه فاصله از رودخانه‌های اصلی، ت- نقشه کاربری اراضی حوضه، ث- نقشه پهنه‌های بارش متوسط، ج- نقشه پهنه‌های بارش‌های لحظه‌ای، چ- نقشه واحدهای هیدرولوژیک خاک (نفوذپذیری).

Figure (2): Maps of the criteria used in the AHP model for flood hazard zoning in the Bardaskan watershed. Including: (a) sub-watersheds extracted from the main basin; (b) slope map; (c) distance from the main rivers map; (d) Watershed land-use map; (e) average rainfall distribution map; (f) Short-duration (instantaneous) rainfall map; and (g) hydrologic soil units (permeability) map

جدول (۲) مقایسه زوجی بین ۷ معیار انتخاب شده به منظور پهنه بندی مخاطرات سیلاب های شهری بردسکن (نتیجه نظرات ۲۳ نفر از خبرگان و متخصصان هیدرولوژی و ژئومورفولوژی)

Table (1): Pairwise comparison matrix among the 7 selected criteria for urban flood hazard zonation in Bardaskan (The results were derived from the opinions of 23 experts and specialists in hydrology and geomorphology).

معیار	نفوذپذیری	شیب	کاربری اراضی	فیزیوگرافی	بارندگی	بارش لحظه ای	فاصله از رودخانه	وزن
نفوذپذیری	۱	۱/۵	۱	۱/۳	۱/۵	۱/۵	۱/۷	۰/۳۰۷
شیب	۵	۱	۳	۱	۱/۳	۱	۱/۵	۰/۰۹۶۸
کاربری اراضی	۱	۱/۳	۱	۱	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۰/۰۴۰۳
فیزیوگرافی	۳	۱	۱	۱	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۰/۰۵۵۸
بارندگی	۵	۳	۵	۵	۱	۱/۳	۱/۵	۰/۱۵۷۸
بارش لحظه ای	۵	۱	۵	۵	۳	۱	۱/۵	۰/۱۸۹۷
فاصله از رودخانه	۷	۵	۵	۵	۵	۵	۱	۰/۴۲۸۹

در مجموع، توزیع وزن‌های به‌دست‌آمده از مدل AHP نشان‌دهنده غلبه فرآیندهای اقلیماتیک-هیدرولوژی بر عوامل انسانی در تبیین خطر سیلاب حوزه آبریز شهر بردسکن است. این الگوی وزنی، کارایی رویکرد-GIS AHP را برای پهنه‌بندی خطر سیلاب در منطقه مورد مطالعه به‌طور کامل توجیه می‌کند و تأکید دارد که راهبردهای مدیریت خطر باید بر حفظ و مدیریت حریم رودخانه‌ها، سازگارسازی زیرساخت‌های شهری و روستایی با بارش‌های حدی کوتاه‌مدت و ارتقای ظرفیت دفع رواناب متمرکز شوند.

پهنه‌های مستعد بروز سیل در حوزه آبریز بردسکن

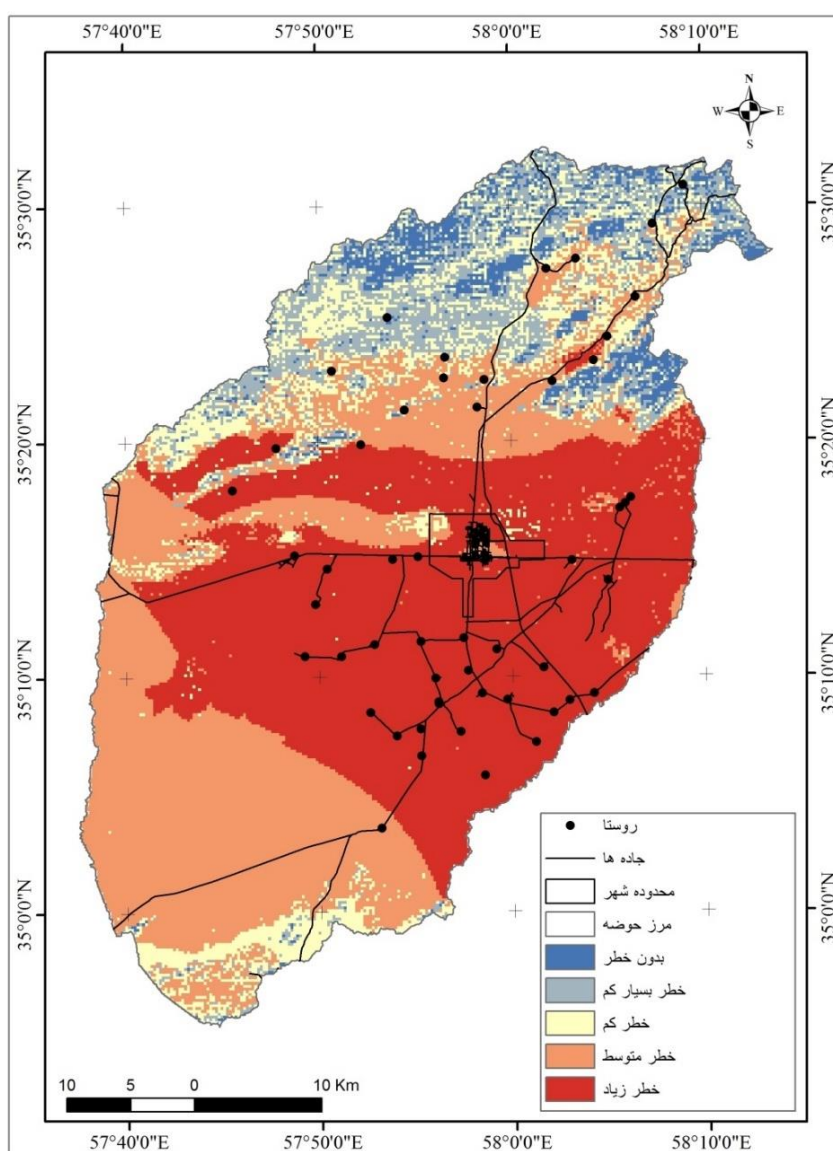
نتایج حاصل از تلفیق معیارهای هفت‌گانه در چارچوب مدل تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) منجر به تولید نقشه پهنه‌بندی خطر سیلاب در حوزه آبریز شهر بردسکن در پنج طبقه «بدون خطر، خطر بسیار کم، خطر کم، خطر متوسط و خطر زیاد» شد (شکل ۳). ساختار فضایی طبقات خطر نشان‌دهنده انطباق بالای الگوی نهایی خطر با منطق وزنی استخراج‌شده از جدول مقایسه‌های زوجی است.

بر اساس نتایج مدل AHP، معیار فاصله از رودخانه با وزن ۰/۴۲۸۹ به‌عنوان عامل غالب در تعیین الگوی نهایی خطر شناخته شد. این برتری وزنی به‌طور مستقیم در نقشه نهایی بازتاب یافته است؛ به‌گونه‌ای که پهنه‌های با خطر زیاد و بسیار زیاد عمدتاً در مجاورت آبراهه‌ها، مسیل‌های اصلی و شبکه زهکشی متمرکز شده‌اند. این الگوی فضایی بیانگر نقش تعیین‌کننده فرآیندهای هیدرولوژیک در کنترل وقوع سیلاب‌ها در محدوده مورد مطالعه است. معیارهای اقلیمی شامل بارش لحظه‌ای (۰/۱۸۹۷) و بارندگی تجمعی (۰/۱۵۷۸) در مجموع سهم قابل‌توجهی در تشدید خطر سیلاب ایفا کرده‌اند. هم‌پوشانی این معیارها با بافت متراکم شهری و سطوح نفوذناپذیر سبب شده است پهنه‌های مرکزی و جنوبی شهر بردسکن در طبقات خطر بالا قرار گیرند. این امر نشان می‌دهد که وقوع بارش‌های شدید کوتاه‌مدت، در تعامل با شرایط کالبدی شهر، نقش مهمی در افزایش شدت و فراوانی سیلاب‌های ناگهانی دارد.

در مقابل، معیار شیب با وزن ۰/۰۹۶۸ نقش کمتری در تعیین خطر نهایی ایفا کرده است. نتایج نقشه نشان می‌دهد که نواحی مرتفع و با شیب نسبتاً زیاد واقع در بخش‌های شمالی حوزه، به دلیل فاصله زیاد از آبراهه‌ها و تراکم کم مراکز سکونت‌گاهی، عمدتاً در طبقات خطر کم یا بدون خطر قرار گرفته‌اند. این موضوع

بیانگر آن است که صرف وجود شیب بالا، بدون همزمانی با سایر عوامل کلیدی به‌ویژه نزدیکی به رودخانه، الزاماً منجر به افزایش خطر سیلاب نمی‌شود.

معیارهای فیزیوگرافی (۰/۰۵۵۸)، کاربری اراضی (۰/۰۴۰۳) و نفوذپذیری (۰/۰۳۰۷) با وجود وزن‌های پایین‌تر، نقش تقویتی در پهنه‌های پرخطر ایفا کرده‌اند. تمرکز جمعیت و گسترش کاربری‌های در نواحی نزدیک به مسیل‌ها سبب تشدید پیامدهای سیلاب و افزایش سطح خطر در این بخش‌ها شده است، هرچند تأثیر آن‌ها در مقایسه با معیارهای هیدرولوژیک محدودتر بوده است. غلبه پهنه‌های با خطر زیاد در مجاورت رودخانه‌ها و درون بافت متراکم کاربری‌ها، همراه با کاهش منطقی خطر در نواحی دور از شبکه زهکشی، گویای کارایی مدل در تفکیک مناطق واقعاً در معرض خطر از نواحی صرفاً مستعد تولید رواناب است (شکل ۳).



شکل (۳) نقشه پهنه‌بندی خطر سیلاب در گستره حوضه آبریز شهر بردسکن
Figure (2): Flood hazard zonation map within the Bardaskan city watershed.

برای تبیین ارتباط میان وزن معیارهای حاصل از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و توزیع فضایی پهنه‌های خطر سیلاب با بررسی سهم مساحت هر یک از طبقات خطر، معیارهای غالب مؤثر در شکل‌گیری هر پهنه مورد بررسی قرار گرفته است (جدول ۳). مقایسه مقادیر مساحت با معیارهای غالب نشان می‌دهد که پهنه‌های با خطر زیاد و متوسط، که در مجموع بیش از نیمی از سطح حوضه را شامل می‌شوند، عمدتاً تحت تأثیر معیارهای هیدرولوژیکی با وزن بالا، به‌ویژه فاصله از رودخانه و بارش‌های کوتاه‌مدت، شکل گرفته‌اند، در حالی که پهنه‌های کم‌خطر و بدون خطر عمدتاً در نواحی با کاهش اثر این معیار غالب و کنترل شرایط ژئومورفولوژیک توسعه یافته‌اند.

جدول (۳) تطبیق طبقات خطر سیلاب با سهم مساحتی و معیارهای غالب مدل AHP

Table (3): Correlation of flood hazard classes with areal share and the dominant AHP model criteria.

تفسیر تحلیلی	معیارهای غالب مؤثر	مساحت (%)	طبقه خطر سیلاب
بیشترین سهم فضایی خطر در به این طبقه اختصاص دارد و تمرکز آن عمدتاً در مجاورت شبکه آبراهه‌ها مشاهده می‌شود که بیانگر نقش مسلط فاصله از رودخانه (با وزن ۰.۴۲۸۹) و تقویت‌کننده بارش‌های لحظه‌ای در مدل AHP است.	فاصله کم از رودخانه به‌عنوان معیار غالب به‌همراه شدت بالای بارش‌های کوتاه‌مدت	۲۷/۹	خطر زیاد
این پهنه‌ها شرایط انتقالی بین نواحی پرخطر و کم‌خطر را بازنمایی می‌کنند که در آن‌ها معیارهای با وزن متوسط در کنار یکدیگر موجب افزایش حساسیت به سیلاب بدون رسیدن به آستانه بحرانی می‌شوند.	بارندگی سالانه، شیب زمین و نوع کاربری اراضی با تأثیر تجمعی	۲۶/۹	خطر متوسط
نواحی با شدت خطر محدود که اگرچه برخی ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی مستعد را دارا هستند، اما به دلیل کاهش اثر معیار غالب، احتمال وقوع سیلاب در آن‌ها کمتر است.	شیب ملایم و فاصله متوسط از رودخانه	۱۹/۲۳	خطر کم
این پهنه‌ها به‌طور عمده تحت تأثیر ضعیف معیارهای ثانویه قرار دارند و از نظر هیدرولوژیکی نقش نواحی کم‌حساس را در ساختار فضایی حوضه ایفا می‌کنند.	فاصله زیاد از رودخانه و کاربری‌های نسبتاً پایدار	۱۷/۵۸	خطر بسیار کم
پایدارترین بخش‌های حوضه که در آن‌ها هم‌زمانی عوامل مؤثر بر ایجاد سیلاب مشاهده نمی‌شود و کمترین اولویت را از نظر مدیریت خطر سیلاب دارند.	فاصله بسیار زیاد از رودخانه و نبود شرایط مناسب تمرکز رواناب	۸/۳۵	بدون خطر

بحث

نقشه پهنه‌بندی خطر سیلاب، در صورتی از اعتبار علمی برخوردار است که الگوی مکانی پهنه‌های مختلف خطر آن با منطق حاکم بر فرآیندهای تولید، تمرکز و انتقال رواناب سطحی سازگار باشد. بر این اساس، انتظار می‌رود مناطقی که از نظر ویژگی‌های فیزیوگرافی، شیب زمین و نوع کاربری اراضی مستعد تولید رواناب و تشدید پدیده سیلاب هستند، در کلاس‌های بالاتر خطر سیلاب قرار گیرند. عدم همخوانی میان این متغیرهای پایه و پهنه‌های خطر می‌تواند بیانگر ضعف در ساختار مدل یا وزن‌دهی معیارها باشد.

برای ارزیابی دقت مدل، از داده‌های مشاهده‌ای مربوط به ۳۰ روستا استفاده شد که شامل ۱۸ روستا با سابقه وقوع سیلاب مخرب (طی دو سال گذشته) و ۱۲ روستا بدون گزارش سیلاب مخرب (طی دو سال گذشته) بودند. مقایسه وضعیت واقعی روستاها با طبقات نقشه حساسیت به سیلاب نشان داد که مدل، وقوع سیلاب را در ۱۴ روستا به‌درستی در طبقات با خطر بالا پیش‌بینی کرده است ($TP = 14$)؛ در حالی که ۴ روستای سیلاب‌دیده در طبقات با خطر پایین قرار گرفته‌اند ($FN = 4$). همچنین، ۸ روستای بدون سابقه سیلاب به‌درستی در طبقات با خطر پایین قرار گرفته‌اند ($TN = 8$) و ۴ روستای بدون سیلاب به‌صورت اشتباه در

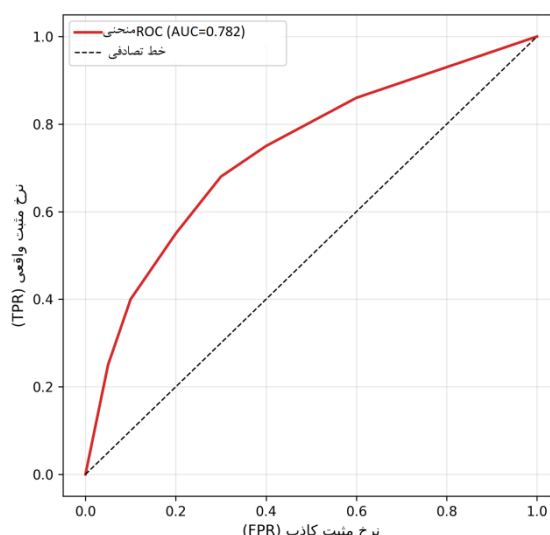
پهنه‌های با خطر بالا طبقه‌بندی شده‌اند ($FP = 4$). بر این اساس، میزان حساسیت مدل برابر با $0/78$ ، ویژگی برابر با $0/67$ و دقت کلی مدل برابر با $0/73$ به دست آمد که بیانگر توان نسبتاً مناسب مدل در تشخیص روستاهای سیلاب‌خیز است (جدول ۴).

به‌منظور ارزیابی جامع‌تر عملکرد مدل، از منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (ROC) نیز استفاده شد (شکل ۴). نتایج تحلیل ROC نشان داد که مقدار مساحت زیر منحنی (AUC) برابر با $0/782$ با خطای استاندارد $0/084$ و مقدار معنی‌داری $0/009$ ($0.05 > Sig$) است. این مقادیر نشان می‌دهد که مدل از نظر آماری معنادار بوده و توان تفکیک قابل قبولی در تمایز بین مناطق سیلاب‌خیز و غیرسیلاب‌خیز دارد.

جدول (۴) ماتریس خطا و شاخص‌های ارزیابی دقت مدل پهنه‌بندی حساسیت به سیلاب

Table (4): Error matrix and accuracy assessment indices of the flood susceptibility zoning model.

وضعیت واقعی	پیش‌بینی سیلاب (پهنه پرخطر)	پیش‌بینی غیرسیلاب (پهنه کم‌خطر)	مجموع
روستاهای دارای سابقه سیلاب	۱۴ (True Positive)	۴ (False Negative)	۱۸
روستاهای بدون سابقه سیلاب	۴ (False Positive)	۸ (True Negative)	۱۲
مجموع	۱۸	۱۲	۳۰



شکل (۴) منحنی ROC برای ارزیابی دقت نقشه حساسیت به سیلاب (مقدار مساحت زیر منحنی (AUC) برابر با $0/782$ با خطای استاندارد $0/084$ و مقدار معنی‌داری $0/009$)

Figure (4): ROC curve for evaluating the accuracy of the flood susceptibility map (Area under the Curve (AUC) = 0.782, standard error = 0.084 and significance level = 0.009).

در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی اعتبار و صحت منطقی نقشه پهنه‌بندی خطر سیلاب حوضه آبریز شهر بردسکن، از سه تحلیل تطبیقی شامل بررسی ارتباط پهنه‌های خطر سیلاب با خصوصیات فیزیوگرافی زیرحوضه‌ها، طبقات شیب و کاربری اراضی استفاده شده است. این رویکرد امکان تحلیل همخوانی فضایی بین سطوح مختلف خطر سیلاب و عوامل کنترل‌کننده اصلی آن را فراهم ساخته و زمینه استنتاجی مستدل درباره میزان اعتمادپذیری و سازگاری نقشه نهایی با واقعیت‌های طبیعی حوضه را فراهم می‌آورد.

تحلیل تطبیقی خطر سیل و خصوصیات فیزیوگرافی زیرحوضه‌ها

به‌منظور تحلیل ارتباط بین ویژگی‌های مورفومتری زیرحوضه‌ها (جدول ۵) و الگوی مکانی خطر سیلاب، نقشه خطر سیلاب با نقشه زیرحوضه‌های استخراج‌شده در محیط ArcGIS به روش Arc Hydro (شکل ۲الف) به‌صورت مکانی تطبیق داده شد. نتایج این تطبیق نشان می‌دهد که توزیع پهنه‌های مختلف خطر سیلاب، همبستگی خوبی با خصوصیات مورفومتری و شکل هندسی زیرحوضه‌ها دارد.

بر اساس نتایج، زیرحوضه‌هایی که در بخش‌های میانی و پایین‌دست حوضه آبریز قرار دارند، سهم عمده‌ای از پهنه‌های با خطر زیاد و بسیار زیاد سیلاب را به خود اختصاص داده‌اند. این زیرحوضه‌ها عمدتاً دارای مساحت بزرگ‌تر، شبکه زهکشی متراکم‌تر، طول مسیر جریان اصلی بیشتر و شیب عمومی کمتر هستند که این شرایط سبب افزایش زمان تمرکز جریان‌های سطحی و تجمع رواناب در مسیرهای اصلی شده است. کاهش شیب طولی در پایین‌دست، همراه با افزایش همگرایی جریان، زمینه‌ساز تشدید پتانسیل طغیان و گسترش پهنه‌های سیلابی شده است (جدول ۶).

جدول (۵) ویژگی‌های فیزیوگرافی زیرحوضه‌های استخراج شده از حوضه آبریز شهر بردسکن

Table (5): Physiographic characteristics of the sub-watersheds extracted from the Bardaskan city watershed.

شماره	محیط (km)	مساحت (km ²)	طول کل آبراهه‌ها (km)	تراکم زهکشی (km/km ²)	طول بلندترین آبراهه (km)	طول حوضه (km)	ضریب شکل حوضه	زمان تمرکز کرپیچ (دقیقه)
۱	۲۶۵/۵	۸۱۱/۹	۴۶۵/۳	۵۷۳/۱	۹۰/۴	۸۸/۱	۰/۱۰۴	۸۲۱/۹
۲	۱۶۱/۱	۶۵۹/۱	۴۲۷/۴	۶۴۸/۴	۷۱/۷	۶۹/۳	۰/۱۳۷	۵۸۱/۹
۴	۱۰۶	۲۲۶/۹	۱۰۶/۸	۴۷۰/۵	۳۹	۳۶/۵	۰/۱۷۱	۴۵۳/۱
۵	۶۸/۸	۹۹/۸	۴۹/۴	۴۹۵/۵	۳۰/۶	۲۶/۲	۰/۱۴۵	۴۷۵/۶
۶	۵۷/۵	۲۷/۶	۲۱/۲	۷۶۵/۹	۲۵/۵	۲۱/۲	۰/۰۶۱	۵۶۶/۱
۷	۶۱/۷	۳۵/۹	۲۳/۷	۶۶۱/۷	۲۸/۵	۲۳/۷	۰/۰۶۴	۶۶۴/۳
۸	۴۵/۸	۱۹/۱	۱۳/۴	۶۹۷/۶	۱۸/۴	۱۳/۴	۰/۱۰۶	۵۲۸/۹
۹	۵۸/۲	۵۲/۷	۳۳/۲	۶۲۸/۸	۲۳/۸	۱۹/۵	۰/۱۳۸	۴۸۸/۹
۱۰	۵۸/۸	۴۴/۴	۳۵/۷	۸۰۵/۷	۲۴/۴	۱۹/۴	۰/۱۱۸	۵۷۰/۱
۱۱	۵۲/۸	۳۳/۲	۱۷	۵۱۲/۴	۲۱/۳	۱۷	۰/۱۱۵	۷۱۸/۳
۱۲	۳۶/۳	۲۷/۲	۱۱/۶	۴۲۵/۸	۱۱/۴	۱۱/۶	۰/۲۰۲	۴۷۷/۳
۱۳	۶۱/۸	۳۱/۳	۲۰/۳	۶۴۸/۳	۱۹/۳	۱۳	۰/۱۸۵	۳۷۵/۲
۱۴	۴۸/۱	۱۹/۹	۱۲	۶۰۳/۶	۱۶/۲	۱۲	۰/۱۳۸	۳۰۱/۴
۱۵	۶۸	۱۳۸/۹	۷۴/۲	۵۳۴/۵	۲۸	۲۴/۹	۰/۲۴۵	۳۷۰/۸
۱۶	۶۴/۷	۳۳/۲	۲۲	۶۶۱/۷	۲۵/۴	۲۲	۰/۰۶۹	۳۵۲/۶
۱۷	۶۷/۵	۵۰/۴	۳۲/۹	۶۵۲/۶	۲۴	۲۵/۵	۰/۰۷۷	۲۶۳/۵
۱۸	۴۱	۲۰/۹	۱۱/۹	۵۶۹	۱۴/۸	۱۱/۹	۰/۱۴۸	۲۷۹/۵
۱۹	۳۲/۴	۲۳/۵	۹/۵	۴۰۳/۹	۱۲/۴	۹/۵	۰/۲۶	۲۶۲/۱
۲۰	۵۰/۵	۳۸/۳	۲۴/۸	۶۴۵/۹	۲۲	۱۷/۷	۰/۱۲۲	۳۴۹/۷
۲۱	۵۳/۷	۳۸/۶	۲۳/۹	۶۱۹	۲۰/۹	۱۸	۰/۱۱۹	۲۷۳
۲۲	۲۸/۸	۱۷/۲	۹/۲	۵۳۵/۸	۱۳/۸	۹/۲	۰/۲۰۳	۳۰۲/۲
۲۳	۵۴/۲	۳۴/۶	۲۲/۳	۶۴۵/۱	۲۴/۹	۲۲/۳	۰/۰۷	۳۳۲/۴
۲۴	۲۴۴/۱	۹۰۳/۶	۳۵۷	۳۹۵/۲	۹۸	۹۴/۹	۰/۱۰۱	۱۲۴۸

در مقابل، زیرحوضه‌های واقع در بخش‌های بالادست، علی‌رغم دارا بودن شیب‌های نسبتاً تند، عمدتاً در پهنه‌های خطر کم تا متوسط سیلاب قرار گرفته‌اند. این امر را می‌توان به مساحت کوچک‌تر زیرحوضه‌ها، کوتاه بودن مسیرهای جریان و قابلیت تخلیه سریع رواناب نسبت داد که منجر به کاهش حجم انباشت جریان در نقطه خروجی هر زیرحوضه می‌شود. در این زیرحوضه‌ها، فرآیند انتقال جریان غالب بوده و شرایط لازم برای شکل‌گیری سیلاب گسترده کمتر فراهم است (جدول ۶).

تحلیل مورفومتریک واحدها نشان داد که زیرحوضه‌هایی با ضریب شکل بیشتر (کشیدگی کمتر) و نسبت انشعاب بالا، به‌طور غالب با پهنه‌های خطر بالای سیلاب هم‌پوشانی دارند. این نوع ساختار هندسی باعث هم‌زمانی ورود رواناب از شاخه‌های فرعی متعدد به کانال اصلی شده و دبی اوج را در مقاطع پایین‌دست افزایش می‌دهد. علاوه بر این، افزایش تراکم زهکشی در این زیرحوضه‌ها نقش کلیدی در تسریع انتقال رواناب سطحی ایفا می‌کند.

نتایج تطبیق همچنین نشان می‌دهد که پهنه‌های با خطر بسیار زیاد سیلاب، عمدتاً در محل همگرایی زیرحوضه‌ها و در مجاورت رودخانه‌های اصلی متمرکز شده‌اند. این مناطق از دیدگاه مورفودینامیکی، نواحی با حساسیت بالا به فرآیندهای هیدرولوژیکی محسوب می‌شوند که تحت تأثیر هم‌زمان عوامل توپوگرافی، الگوی شبکه زهکشی و شرایط پایین‌دست قرار دارند.

در مجموع، تطبیق نقشه خطر سیلاب با نقشه زیرحوضه‌ها بیانگر آن است که خطر وقوع سیلاب در منطقه تابعی مستقیم از ساختار مورفومتری زیرحوضه‌ها، موقعیت آن‌ها در حوضه آبریز و ویژگی‌های شبکه زهکشی است. این نتایج بر اهمیت تحلیل‌های مورفومتریک در شناسایی زیرحوضه‌های بحرانی و اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی و کاهش خطر سیلاب تأکید دارد.

جدول (۶) نتیجه تطابق مکانی نقشه خطر سیلاب و زیرحوضه‌ها با تفسیر مورفومتری

Table (6): The result of spatial correlation between the flood hazard map and sub-basins, interpreted through morphometric analysis.

جمع‌بندی تفسیر مورفومتری مبتنی بر تطابق مکانی	وضعیت زیرحوضه‌های منطبق در این طبقه	سهم سطحی (%)	طبقه خطر سیلاب
هم‌پوشانی این طبقه با خروجی زیرحوضه‌های با مساحت زیاد، شیب کم و شبکه زهکشی متراکم نشان می‌دهد تمرکز رواناب حاصل از چند واحد بالادست عامل اصلی افزایش دبی اوج و گسترش سیلاب است	عمدتاً بخش‌های پایین‌دست چند زیرحوضه اصلی و نواحی خروجی زیرحوضه‌های بزرگ	۲۷/۹	خطر زیاد
تطابق این طبقه با زیرحوضه‌هایی با ابعاد متوسط و شیب ملایم بیانگر شرایط انتقال-تجمع نسبی رواناب است که در رخدادهای بارشی شدید می‌تواند به سیلاب‌های محدود منجر شود	بخش‌های میانی زیرحوضه‌ها و قسمت‌هایی از دشت‌های حدواسط	۲۶/۹	خطر متوسط
غالب بودن این طبقه در زیرحوضه‌های کوچک‌تر با شیب نسبتاً بیشتر نشان‌دهنده کاهش تمرکز جریان و پاسخ هیدرولوژیکی ضعیف‌تر است	قسمت‌های بالادست برخی زیرحوضه‌ها و واحدهای فرعی مستقل	۱۹/۲۳	خطر کم
هم‌پوشانی این طبقه با سرچشمه‌ها و زیرحوضه‌های دارای مسیر کوتاه جریان بیانگر ناهم‌زمانی جریان‌ها و عدم شکل‌گیری دبی اوج قابل توجه است	عمدتاً زیرحوضه‌های کوچک ارتفاعات و نواحی نزدیک به خط تقسیم آب	۱۷/۵۸	خطر بسیار کم
عدم انطباق این مناطق با واحدهای زهکشی فعال نشان می‌دهد که از نظر عملکرد هیدرولوژیکی نقشی در تولید یا انتقال سیلاب ندارند	بخش‌های مرتفع، خارج از مسیرهای جریان و حاشیه تقسیمات هیدرولوژیکی	۸/۳۵	بدون خطر

تحلیل تطبیقی خطر سیل و طبقات شیب

نتایج انطباق فضایی نقشه خطر سیلاب با نقشه طبقات شیب (شکل ۲ب) بیانگر وجود رابطه‌ای معکوس و قابل ملاحظه میان مقدار شیب و سطح خطر سیلاب در مقیاس حوضه است. بر اساس این تحلیل، بیشترین هم‌پوشانی پهنه‌های با خطر سیلاب زیاد و متوسط با طبقات شیب ۵-۰ درصد و ۱۲-۵ درصد مشاهده می‌شود که عمدتاً در بخش‌های مرکزی و پایین‌دست حوضه توسعه یافته‌اند. این نواحی به دلیل شیب کم، از سرعت جریان پایین‌تری برخوردار بوده و شرایط مناسبی برای تجمع رواناب و افزایش حجم جریان سطحی فراهم می‌کنند. در مقابل، مناطق دارای شیب‌های بالاتر (بیش از ۲۰ درصد) عمدتاً در کلاس‌های بدون خطر تا خطر کم سیلاب قرار دارند. اگرچه این نواحی از نظر ژئومورفولوژیکی مستعد فرسایش هستند، اما به دلیل تخلیه سریع رواناب و نبود شرایط تجمع جریان، سهم کمتری در شکل‌گیری سیلاب‌های گسترده دارند. این موضوع بیانگر آن است که افزایش شیب الزاماً به معنی افزایش خطر سیلاب نبوده و نقش آن بیشتر در تسریع انتقال رواناب به سمت نواحی پایین‌دست ظاهر می‌شود.

از دیدگاه هیدرولوژیکی، شیب‌های کم با کاهش گرادیان انرژی جریان، موجب افزایش زمان تمرکز (T_c) حوضه می‌شوند. بر اساس روابط تجربی مورد استفاده در محاسبه T_c (مانند معادلات Kirpich و SCS)، کاهش شیب منجر به افزایش زمان هم‌گرایی رواناب زیرحوضه‌ها شده و در نتیجه، دبی اوج سیلاب در خروجی حوضه افزایش می‌یابد. این سازوکار به‌خوبی توضیح‌دهنده تمرکز پهنه‌های با خطر بالا در نواحی کم‌شیب حوضه است.

به‌طور کلی، نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که مهم‌ترین مناطق مستعد وقوع سیلاب در حوضه مورد مطالعه، نواحی با شیب کمتر از ۱۲ درصد هستند که به‌عنوان پهنه‌های تجمع رواناب و افزایش دبی اوج عمل می‌کنند. این یافته تأکید می‌کند که شیب زمین، در تعامل با سایر ویژگی‌های مورفومتری، نقش کلیدی در کنترل الگوی فضایی خطر سیلاب ایفا کرده و باید به‌عنوان یکی از پارامترهای اصلی در برنامه‌ریزی و مدیریت سیلاب مورد توجه قرار گیرد.

تحلیل تطبیقی خطر وقوع سیلاب و کاربری اراضی

نتایج انطباق فضایی نقشه خطر وقوع سیلاب با نقشه کاربری اراضی (شکل ۲ت) نشان می‌دهد که توزیع مکانی پهنه‌های مختلف خطر سیلاب به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر نوع کاربری اراضی قرار دارد. بر اساس تحلیل انجام‌شده، بیشترین هم‌پوشانی کلاس‌های خطر سیلاب زیاد و متوسط با کاربری‌های مناطق توسعه‌یافته شهری، اراضی کشاورزی و اراضی کشاورزی-باغی ترکیبی مشاهده می‌شود که عمدتاً در بخش‌های مرکزی و پایین‌دست حوضه گسترش یافته‌اند.

مناطق شهری، به‌دلیل غلبه سطوح نفوذناپذیر، نقش مؤثری در کاهش ظرفیت نفوذ خاک و افزایش ضریب رواناب ایفا می‌کنند. این شرایط سبب افزایش حجم و سرعت رواناب سطحی و تمرکز جریان در مسیرهای زهکشی مصنوعی و طبیعی شده و در نتیجه، سطح خطر سیلاب در این کاربری‌ها به‌طور محسوسی افزایش یافته است. تمرکز شبکه راه‌ها و زیرساخت‌های شهری نیز با مختل کردن الگوی طبیعی زهکشی، شرایط مستعدتری برای وقوع سیلاب‌های ناگهانی فراهم می‌کند.

در کاربری‌های کشاورزی و باغی، هرچند سطح نفوذپذیری نسبت به محیط‌های شهری بالاتر است، اما دستکاری‌های انسانی نظیر تسطیح زمین، شخم‌کاری، حذف پوشش گیاهی طبیعی و توسعه شبکه‌های آبیاری

و زهکشی، موجب کاهش نفوذ مؤثر و افزایش تولید رواناب شده است. این وضعیت موجب شده است که بخش قابل توجهی از این اراضی در کلاس‌های خطر سیلاب متوسط تا زیاد قرار گیرند، به‌ویژه در نواحی کم‌شیب و پایین‌دست حوضه. در مقابل، کاربری‌های جنگل و اراضی جنگلی عمدتاً با کلاس‌های خطر سیلاب کم تا بدون خطر هم‌پوشانی دارند. وجود پوشش گیاهی متراکم در این مناطق با افزایش زبری سطح، تقویت نفوذپذیری خاک و کاهش سرعت جریان، نقش حفاظتی مؤثری در مهار رواناب و کاهش پتانسیل سیلاب ایفا می‌کند. این کاربری‌ها عمدتاً در نواحی بالادست و شیب‌دار حوضه متمرکز هستند و از همین‌رو سهم کمتری در شکل‌گیری مستقیم پهنه‌های پرخطر سیلاب دارند.

از منظر فرایندی، نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که کاربری اراضی با کنترل میزان نفوذ، زبری سطح و الگوی هدایت رواناب، نقش تعیین‌کننده‌ای در تعامل با ویژگی‌های مورفومتری و شیب حوضه ایفا می‌کند. کاربری‌های انسانی واقع در نواحی کم‌شیب، با افزایش زمان تمرکز (T_c) و هم‌زمانی جریان‌های سطحی، شرایط مناسبی برای افزایش دبی اوج سیلاب فراهم می‌کنند. این یافته‌ها بیانگر آن است که تغییرات کاربری اراضی، به‌ویژه گسترش مناطق شهری و کشاورزی، می‌تواند تأثیر اثرگذاری بر تشدید خطر وقوع سیلاب در سطح حوضه داشته باشد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و پهنه‌بندی خطر سیلاب در حوضه آبریز شهر بردسکن با استفاده از رویکرد تلفیقی سامانه اطلاعات جغرافیایی و فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی انجام شد. تحلیل نتایج نشان داد که الگوی فضایی خطر سیلاب در این حوضه بیش از هر عامل دیگری تحت تأثیر شرایط هیدرولوژیکی و هیدروکلیماتیک قرار دارد. برجستگی معیارهایی نظیر فاصله از آبراهه‌ها، بارش‌های کوتاه‌مدت و میزان بارندگی سالانه بیانگر آن است که در حوضه‌های واقع در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، تمرکز سریع رواناب در مجاورت شبکه زهکشی طبیعی و وقوع بارش‌های رگباری از مهم‌ترین سازوکارهای شکل‌گیری سیلاب‌های ناگهانی به شمار می‌روند.

الگوی فضایی حاصل از پهنه‌بندی نشان می‌دهد که مناطق با خطر زیاد سیلاب عمدتاً در بخش‌های پایین‌دست حوضه و در مجاورت آبراهه‌های اصلی متمرکز شده‌اند؛ نواحی‌ای که به دلیل شیب کمتر، گسترش فعالیت‌های انسانی و افزایش سطوح نفوذناپذیر، زمینه تجمع سریع رواناب را فراهم می‌کنند. در مقابل، مناطق مرتفع و بالادست حوضه به دلیل شیب بیشتر، پوشش طبیعی مناسب‌تر و پراکندگی بیشتر شبکه زهکشی، عمدتاً در طبقات خطر کم قرار گرفته‌اند. این الگوی مکانی نشان می‌دهد که تعامل میان ویژگی‌های طبیعی حوضه و نحوه بهره‌برداری از اراضی نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری و تشدید خطر سیلاب در منطقه مورد مطالعه دارد.

ارزیابی دقت مدل با استفاده از شاخص‌های آماری حاصل از ماتریس خطا و تحلیل منحنی ROC بیانگر عملکرد قابل قبول مدل در شناسایی مناطق سیلاب‌خیز است. مقدار شاخص AUC برابر با ۰/۷۸۲ نشان می‌دهد که مدل توانایی مناسبی در تفکیک مناطق سیلابی از سایر نواحی دارد. این نتیجه با یافته‌های پژوهش‌هایی که از رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی برای پهنه‌بندی

خطر سیلاب استفاده کرده‌اند همخوانی دارد (بویی^۱ و همکاران، ۲۰۱۸؛ فام^۲ و همکاران، ۲۰۲۰) و نشان می‌دهد که تلفیق GIS و روش AHP حتی در شرایط محدودیت داده‌های هیدرومتری نیز می‌تواند چارچوبی قابل اعتماد برای تحلیل فضایی خطر سیلاب فراهم کند.

مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین نیز نشان می‌دهد که نقش برجسته عواملی نظیر فاصله از آبراهه‌ها، بارش‌های شدید کوتاه‌مدت و شیب زمین در تعیین مناطق مستعد سیلاب با یافته‌های تحقیقات انجام‌شده در سایر مناطق خشک و نیمه‌خشک همخوانی دارد. برای نمونه، چن^۳ و همکاران (۲۰۱۷) و شفیع‌زاده مقدم و همکاران (۲۰۲۰) نیز نزدیکی به شبکه زهکشی و شدت بارش را از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده خطر سیلاب معرفی کرده‌اند. همچنین پورسعید و همکاران (۲۰۱۸) و کوستاچه^۴ و همکاران (۲۰۲۱) نشان داده‌اند که روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی می‌توانند با تلفیق هم‌زمان عوامل طبیعی و انسانی، چارچوب مناسبی برای تحلیل فضایی مخاطرات سیلاب فراهم کنند. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که رویکرد تلفیقی GIS-AHP با وجود سادگی نسبی، از توان تحلیلی مناسبی برای شناسایی مناطق مستعد سیلاب در حوضه‌هایی با محدودیت داده‌های هیدرومتری برخوردار است و می‌تواند به‌عنوان ابزاری کاربردی در برنامه‌ریزی شهری و مدیریت خطر سیلاب مورد استفاده قرار گیرد. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود در برنامه‌ریزی توسعه شهری بردسکن، حریم آبراهه‌ها و پهنه‌های با خطر زیاد سیلاب به‌عنوان مناطق با اولویت مدیریت خطر در نظر گرفته شوند و توسعه کاربری‌های جدید در این نواحی با لحاظ تمهیدات مناسب برای هدایت و کنترل رواناب انجام گیرد. همچنین بهره‌گیری از داده‌های دقیق‌تر بارش و ثبت منظم رخداد‌های سیلابی در مطالعات آینده می‌تواند به بهبود دقت مدل و ارتقای قابلیت پیش‌بینی خطر سیلاب کمک کند.

1 Bui
3 Chen

2 Pham
4 Costache

References

- Alaghmand, S., Beecham, S., & Mousavi, S. J. (2020). Flash flood mitigation in arid and semi-arid regions: A review. *Journal of Flood Risk Management*, 13(1), e12605. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12605>
- Asadi, H., Ghorbani, M., & Pourghasemi, H. R. (2017). Spatial modeling of flood hazard using GIS and multi-criteria decision analysis: A case study of the Haraz watershed, Iran. *Natural Hazards*, 87(2), 1185–1205.
- Bayati Khatibi, M., & Moghaddam, F. (2026). Modeling flood hazard sensitivity using multi-criteria spatial analysis: A case study of part of the Ghotor River basin, Khoy County. *Hydrogeomorphology*, 13(46), 41–58. <https://doi.org/10.22034/hyd.2025.67046.1791>
- Bui, D. T., Tsangaratos, P., Nguyen, V. T., Van Liem, N., & Trinh, P. T. (2018). Comparing the prediction performance of a deep learning neural network model with conventional machine learning models in landslide susceptibility mapping. *Catena*, 188, 104426. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104426>
- Chen, W., Pourghasemi, H. R., & Naghibi, S. A. (2017). Flood susceptibility mapping using data-driven models in GIS: A case study of the Poyang County, China. *Science of the Total Environment*, 579, 149–161. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.052>
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. New York: McGraw-Hill.
- Costache, R., Arabameri, A., Blaschke, T., Pham, Q. B., Pham, B. T., & Pandey, M. (2021). Flash flood potential mapping using deep learning, bivariate statistics and multi-criteria decision-making methods. *Journal of Hydrology*, 598, 126306. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126306>
- Feldman, A. D. (Ed.). (2000). *Hydrologic modeling system HEC-HMS: Technical reference manual*. U.S. Army Corps of Engineers.
- Fernández, P., Mourato, S., & Moreira, M. (2010). Social vulnerability assessment of flood risk using GIS-based multicriteria decision analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(1), 181–195.
- Khosravi, K., Shahabi, H., Pham, B. T., Adamowski, J., Shirzadi, A., Pradhan, B., Dou, J., Ly, H. B., Gróf, G., & Tien Bui, D. (2020). A comparative assessment of flood susceptibility modeling using multi-criteria decision-making analysis and machine learning methods. *Journal of Hydrology*, 573, 311–323. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.073>
- Knebl, M. R., Yang, Z. L., Hutchison, K., & Maidment, D. R. (2005). Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: A case study for the San Antonio River Basin summer 2002 storm event. *Journal of Environmental Management*, 75(4), 325–336. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.11.024>
- Kundzewicz, Z. W., et al. (2018). Flood risk and climate change: Global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, 63(1), 1–28. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1393147>
- Makhdoum, M. (2014). *Foundations of land use planning (regional planning)* [In Persian]. Tehran: University of Tehran Press.
- Merz, B., Thieken, A. H., & Gocht, M. (2007). Flood risk mapping at the local scale: Concepts and challenges. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7(4), 537–551.

- Moore, I. D., Grayson, R. B., & Ladson, A. R. (1991). Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, 5(1), 3–30. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>
- Mosavi, A., Ozturk, P., & Chau, K. W. (2018). Flood prediction using machine learning models: Literature review. *Water*, 10(11), 1536. <https://doi.org/10.3390/w10111536>
- Pham, B. T., Avand, M., Pourghasemi, H. R., Abbaspour, R. A., & Prakash, I. (2020). GIS-based ensemble soft computing models for flood susceptibility mapping. *Journal of Hydrology*, 587, 124954. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124954>
- Pourghasemi, H. R., Ghorbani, M., & Parvizi, Z. (2012). Flood hazard zonation using geographic information system and analytic hierarchy process (AHP). *Journal of Geographical Research*, 27(3), 1–16.
- Pourghasemi, H. R., Rahmati, O., Moradi, H. R., & Ghanbarian, G. (2018). Landslide and flood susceptibility mapping using machine learning and statistical models. *Science of the Total Environment*, 598, 431–448. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.307>
- Poursaeid, A., Pourghasemi, H. R., Pradhan, B., & Gokceoglu, C. (2018). Flood susceptibility mapping using a novel ensemble model of frequency ratio and support vector machine. *Journal of Hydrology*, 563, 476–488. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.06.037>
- Rahmati, O., Pourghasemi, H. R., & Melesse, A. M. (2016). Flood susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis: A comparison of decision tree, random forest, and analytic hierarchy process models. *Journal of Hydrology*, 538, 325–341. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.007>
- Rezaei Moghaddam, M. H., Mokhtari, D., Rahimpour, T., & Taghizadeh Timourlouei, V. (2025). Flood hazard modeling using the statistical Weight of Evidence (WOE) method in the Azarshahr Chay watershed. *Hydrogeomorphology*, 12(42), 20–37. <https://doi.org/10.22034/hyd.2024.60081.1723>
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill.
- Saaty, T. L. (2005). Theory and applications of the analytic network process. In *Decision making with the analytic network process* (pp. 1–26). RWS Publications.
- Saeidi, A., Pourghasemi, H. R., & Pradhan, B. (2021). Flood susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis: A case study of northern Iran. *Natural Hazards*, 106(1), 349–370. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04459-8>
- Shafizadeh Moghadam, H., Valavi, R., Shahabi, H., Chapi, K., & Shirzadi, A. (2020). Novel forecasting approaches using machine learning for flood susceptibility mapping. *Journal of Environmental Management*, 253, 109701. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109701>
- Soleimani, H., Kazemi, M., & Ahmadpour, F. (2019). The impact of urbanization on runoff regime changes and intensification of urban floods. *Journal of Geography and Planning*, 23(4), 97–116.
- Tehrany, M. S., Pradhan, B., & Jebur, M. N. (2013). Flood susceptibility mapping using GIS-based weighting methods. *Journal of Hydrology*, 527, 72–85. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.038>
- Zhao, G., Pang, B., Xu, Z., Yue, J., & Tu, T. (2021). Mapping flood susceptibility using machine learning models and GIS: A case study. *Science of the Total Environment*, 776, 145913. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145913>