Physical Geography Research Quarterly

Online ISSN: 2423-7760

Journal Homepage: jphgr.ut.ac.ir

Institute of Geography

Flood Susceptibility Mapping in the Tajyar Sarab Watershed Using the Shannon Entropy Method and SAW and VIKOR Multi-Criteria Decision-Making Models

Sayyad Asghari Saraskanroud [1] ✉, Sina Khonkham [2], Fatemeh Samadi Shalveh Alia [3], Batool Zeinali [4]

1. (Corresponding Author) *Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran*
Email: s.asghari@uma.ac.ir
2. *Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran*
Email: sinakhonkham.rs@student.uma.ac.ir
3. *Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran*
Email: f.samadi@student.uma.ac.ir
4. *Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran*
Email: zeynali.b@uma.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article History:
Received:
11 June 2026
Revised:
29 August 2026
Accepted:
8 October 2026
Available online:
28 October 2026

Keywords:
Flood Susceptibility,
Entropy,
SAW,
VIKOR,
Multi-Criteria,
Decision-Making.

ABSTRACT

The aim of this study was to map flood susceptibility in the Tajyar-Sarab watershed, compare the results of the SAW and VIKOR models, and assess the sensitivity of the results to changes in criterion weights. Thirteen topographic, hydrological, climatic, and environmental factors were used. Elevation data were extracted from the 30 m resolution SRTM dataset, NDVI was derived from Sentinel-2 imagery, land use data were obtained from the ESA WorldCover product, and precipitation data were extracted from CHIRPS. All layers were converted into a 30 m raster format and standardized within the range of 0–1 according to the direction of influence of each criterion. Criterion weights were determined using Shannon entropy, and flood susceptibility maps were generated using the SAW and VIKOR methods. A combined map was also produced by averaging the continuous outputs of the two models. Model agreement was evaluated using Pearson correlation, and the robustness of the results was assessed by modifying criterion weights by ±10% and ±20%, resulting in 52 scenarios with 500 Monte Carlo simulations. The highest entropy weights were assigned to SPI and STI, indicating their close dependency. The Pearson correlation coefficient between the SAW and VIKOR rankings was 0.949. According to the final combined map, high and very high susceptibility zones covered 0.60 km², accounting for 0.094% of the watershed area, and were mainly located along flow paths. Sensitivity analysis showed that SPI, STI, and geology had the greatest influence on the final results. The mean correlation coefficient between the combined map and the initial map across Monte Carlo simulations was 0.998. The VIKOR model showed lower sensitivity to weight variations compared with SAW, and the spatial pattern of the susceptibility map remained stable. However, this stability should not be interpreted as resistance to observed flood events.

Cite this article: Asghari Saraskanroud, S., Khonkham, S., Samadi Shalveh Alia, Fatemeh, & Zeinali, B. (2026). Flood Susceptibility Mapping in the Tajyar Sarab Watershed Using the Shannon Entropy Method and SAW and VIKOR Multi-Criteria Decision-Making Models. *Physical Geography Research Quarterly*, 58 (3), 101-120.
http://doi.org/10.22059/jphgr.2026.416593.1007942

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

Flooding is among the most significant natural hazards worldwide, causing substantial annual damage to infrastructure, agriculture, communities, and natural resources (Rentschler, Salhab & Jafino, 2022). an issue particularly critical in mountainous watersheds, where steep slopes and short concentration times promote rapid hydrological responses and flash flooding (Khosravi et al., 2016).

Method

Thirteen flood conditioning factors were used: elevation, slope, curvature, distance from streams, drainage density, TWI, SPI, STI, NDVI, LULC, rainfall, geology, and soil. Terrain-related factors were derived from a hydrologically corrected 30 m SRTM DEM using standard GIS procedures; streams were extracted via the D8 algorithm (flow accumulation > 500), and distance from streams was computed using Euclidean distance. NDVI was derived from Sentinel-2 imagery, LULC from ESA WorldCover, and mean annual precipitation (2014–2023) from CHIRPS; soil and geological units were rasterized and scored based on their hydrological behavior. All layers were projected to WGS 1984 UTM Zone 38N at 30 m resolution, using bilinear resampling for continuous variables and nearest-neighbor for categorical ones. Criteria were classified into five susceptibility classes and standardized to a 0–1 scale (higher values indicating greater susceptibility), with inverse criteria (elevation, distance from streams, NDVI) standardized accordingly. Criterion weights were computed using the Shannon entropy method, treating each pixel as an alternative. Flood susceptibility was then modeled using entropy-weighted SAW and VIKOR (ideal/anti-ideal values of 1 and 0, v=0.5), with VIKOR output transformed as 1−Q for consistency with SAW. Both outputs were classified into five classes, compared via Pearson correlation and pixel-based spatial agreement, and combined into a final susceptibility map by averaging. Model robustness was evaluated through one-at-a-time sensitivity analysis and a 500-run Monte Carlo simulation, using Pearson correlation, MAE, RMSE, and pixel-wise standard deviation as stability indicators.

Result and discussion

Pearson correlation analysis showed weak to moderate relationships among most criteria, with the highest values between SPI and STI (r=0.963) and between rainfall and elevation (r=0.886), indicating some information overlap. Shannon entropy weighting assigned the highest weights to SPI (0.4686), STI (0.3108), geology (0.0839), and TWI (0.0375), reflecting the spatial variability and information content of each criterion. SAW and VIKOR outputs were strongly correlated (r=0.949), showing similar spatial susceptibility patterns, while pixel-based classification agreement reached 99.60%—largely driven by the dominance of the very-low susceptibility class rather than independent validation. In the combined susceptibility map, high and very high susceptibility zones covered about 0.60 km² (0.094% of the watershed), concentrated along flow-convergence and drainage-related areas. Sensitivity analysis identified SPI, STI, and geology as the most influential criteria, and Monte Carlo simulations confirmed the stability of spatial patterns under weight uncertainty, with mean correlations between simulated and baseline outputs of 0.998 for SAW, VIKOR, and the combined map.

Conclusions

The integration of remote sensing data, geomorphometric and environmental variables, Shannon entropy weighting, and SAW and VIKOR models provided a spatial assessment of flood susceptibility in the Tajyar–Sarab watershed. High and very high susceptibility zones were spatially limited (~0.60 km², 0.094% of the study area), mainly along flow-convergence pathways and drainage networks. The strong correlation between SAW and VIKOR outputs (r=0.949) reflected considerable agreement between the two approaches, though this should not be regarded as independent validation, since both models relied on identical criteria and weights. Sensitivity and Monte Carlo analyses confirmed the relative stability of susceptibility patterns under weight

uncertainty; however, the absence of reliable independent flood-event data remains a key limitation, and the final product should therefore be interpreted as a relative susceptibility map rather than a hazard, risk, or deterministic prediction map. From a management perspective, the proposed framework offers a preliminary decision-support tool for prioritizing areas for further field investigation, hydrological–hydraulic modeling, and improved land-use and runoff-management strategies.

Funding
This research was conducted with the financial and institutional support of the Vice-Chancellor for Research of the University of Mohaghegh Ardabili.

CRediT authorship contribution statement
All authors contributed equally to all stages of the study, including research design, data collection, statistical analysis, analysis and interpretation of the results, preparation of the original draft, verification of the results, revision, review, and finalization of the manuscript

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process
During the preparation of this work, the authors used QuillBot for text paraphrasing. After using this tool, the authors reviewed and edited the content as needed and take full responsibility for the content of the publication.

Conflict of interest
The authors declare that they have no conflict of interest.

Ethical considerations
The authors adhered to the principles of research ethics throughout the conduct and publication of this study, and all authors confirm compliance with these principles.

Data availability statement
The data used in this study are available from the authors upon reasonable request.

Acknowledgements
The authors would like to thank the anonymous reviewers for their constructive and scientific comments and suggestions.

فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی

شاپا الکترونیکی: 2423-7760

Journal Homepage: jphgr.ut.ac.ir

پهنه‌بندی حساسیت سیلاب در حوضه آبریز تاجیار سراب با استفاده از روش آنتروپی و مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره SAW و VIKOR

صیاد اصغری سراسکانرود [۱]، سینا خون خام [۲]، فاطمه صمدی شلوه علیا [۳]، بتول زینالی [۴]

۱- نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: s.asghari@uma.ac.ir

۲- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: sinakhonkham.rs@student.uma.ac.ir

۳- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: f.samadi@student.uma.ac.ir

۴- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: zeynali.b@uma.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۵/۰۳/۲۱

تاریخ بازنگری:
۱۴۰۵/۰۶/۰۷

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۵/۰۷/۱۶

تاریخ چاپ:
۱۴۰۵/۰۸/۰۶

واژگان کلیدی:
حساسیت سیلاب، آنتروپی، SAW، VIKOR، تصمیم‌گیری چندمعیاره.

چکیده

هدف این پژوهش پهنه‌بندی حساسیت سیلاب در حوضه آبخیز تاجیار سراب، مقایسه نتایج مدل‌های SAW و VIKOR و بررسی حساسیت نتایج به تغییر وزن معیارها انجام شد. ۱۳ عامل توپوگرافی، هیدرولوژیکی، اقلیمی و محیطی استفاده شد. داده‌های ارتفاعی از SRTM با وضوح ۳۰ متر، NDVI از تصاویر Sentinel-2، کاربری اراضی از محصول ESA WorldCover و داده‌های بارش از CHIRPS استخراج شدند. همه لایه‌ها به یک رستر ۳۰ متر تبدیل و بر اساس نوع تأثیر هر معیار در محدوده ۰_۱ استاندار شدند. وزن معیارها با آنتروپی شانون تعیین و نقشه‌های حساسیت با SAW و VIKOR تهیه شدند. نقشه ترکیبی نیز از میانگین خروجی پیوسته دو مدل تولید شد. توافق مدل‌ها با همبستگی پیرسون ارزیابی و استحکام نتایج با تغییر وزن معیارها ±۱۰ و ±۲۰ درصد، ۵۲ سناریو با ۵۰۰ اجرای مونت‌کارلو بررسی شد. بالاترین وزن آنتروپی به SPI و STI اختصاص یافت که وابستگی نزدیک آن‌ها را نشان می‌دهد. همبستگی پیرسون بین رتبه‌بندی‌های SAW و VIKOR برابر ۰/۹۴۹ است. طبق نقشه ترکیبی نهایی مناطق حساس و بسیار حساس در ۰/۶۰ کیلومتر، ۰/۰۹۴ درصد از منطقه را شامل می‌شود. و عمدتاً در مسیرهای جریان آب واقع‌اند. تحلیل حساسیت نشان داد SPI، STI و زمین‌شناسی بیشترین تأثیر را بر نتیجه نهایی دارند. میانگین ضریب همبستگی بین نقشه ترکیبی و نقشه اولیه در شبیه‌سازی مونت‌کارلو ۰/۹۹۸ بود. مدل VIKOR نسبت به SAW حساسیت کمتری به تغییر وزن‌ها نشان داد و الگوی مکانی نقشه پایدار بوده. بااین‌وجود این موضوع نباید با مقاوم بودن در برابر سیل‌های مشاهده‌شده اشتباه گرفته شود.

استناد: اصغری سراسکانرود، صیاد؛ خون خام، سینا؛ صمدی شلوه علیا، فاطمه و زینالی، بتول. (۱۴۰۵). پهنه‌بندی حساسیت سیلاب در حوضه آبریز تاجیار سراب با استفاده از روش آنتروپی و مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره SAW و VIKOR. *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۸ (۳)، ۱۲۰-۱۰۱.

http://doi.org/10.22059/jphgr.2026.416593.1007942

© نویسندگان

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

مقدمه

سیلاب یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی است که به زیرساخت‌ها، زمین‌های کشاورزی، جوامع و منابع طبیعی خسارت وارد می‌کند (Rentschler Salhab & Jafino, 2022). سیلاب در حوضه‌های کوهستانی و نیمه کوهستانی به دلیل شیب‌های تند و واکنش سریع به بارش اهمت بیشتری دارد. در ایران نیز سیل به دلیل آب‌وهوای خشک و نیمه‌خشک و تغییرپذیری بالای بارش یکی از مسائل اصلی زیست‌محیطی و مدیریتی است (Khosravi et al., 2016). همچنین تحلیل فراوانی سیل و تغییرات مکانی وقایع سیل از مهم‌ترین مسائل برای مدیریت حوزه آبخیز در شمال غربی ایران است (Ghorbani et al., 2025). فرآیندهای تولید و غلظت رواناب حوضه آبخیز توسط ترکیبی از عوامل توپوگرافی، هیدرولوژیکی، اقلیمی، زمین‌شناسی، خاک و پوشش زمین تعیین می‌شوند (Rahmati et al., 2016). پارامترهایی مانند ارتفاع، شیب، انحنای زمین، فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، شاخص قدرت جریان (SPI) و شاخص انتقال رسوب (STI) نقش مهمی در کنترل مسیر حرکت، سرعت و تجمع جریان سطحی دارند (Moore Grayson & Ladson, 1991; Rahmati et al., 2016). علاوه بر این عوامل بارندگی محرک اصلی سیل در هر منطقه است. پوشش گیاهی و پوشش زمین نیز با افزایش نفوذ و افزایش زبری می‌تواند تولید رواناب را کاهش دهد. از طرفی خواص خاک و زمین‌شناسی، نفوذپذیری کلی و ظرفیت نگهداری یک منطقه خاص را تعیین می‌کند (Funk et al., 2015; Patel et al., 2021). پهنه‌بندی حساسیت به سیل به‌عنوان یکی از رویکردهای تعیین منطقه‌ای با پتانسیل بالای تولید رواناب سطحی، تمرکز و عبور رواناب در حوزه آبخیز در نظر گرفته می‌شود (Khosravi et al., 2016). این مفهوم با خطر و ریسک سیلاب متفاوت است. این واقعیت با توانایی حساسیت به سیل در برجسته کردن منطقه بر اساس ویژگی‌های محیط محلی توضیح داده می‌شود. برخلاف خطر سیل که به ماهیت رویداد و ارتباط خطر سیل با میزان مواجهه و آسیب‌پذیری اشاره دارد (Khosravi et al., 2016; Costache et al., 2019).

در سال‌های اخیر تمایل به استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و سنجش‌ازدور همراه با تجزیه‌وتحلیل تصمیمات چندمعیاره در مطالعات حساسیت به سیل وجود داشته است. GIS امکان آماده‌سازی، استانداردسازی و تلفیق لایه‌های مکانی را فراهم می‌کند و پلتفرم Google Earth Engine نیز پردازش سریع داده‌های ماهواره‌ای و استخراج شاخص‌های موردنیاز را فراهم ساخته است (Gorelick et al., 2017). در روش‌های تصمیم‌گیری موضوع وزن دهی معیارها نقش مهمی را ایفا می‌کند. زیرا تأثیر آن‌ها بر تصمیم نهایی دقیقاً با وزن آن‌ها بیان می‌شود. روش‌های وزن دهی ذهنی نیازمند تصمیم‌گیرنده دانش گسترده و تجربه چندین ساله است. درحالی‌که روش آنتروپی امکان تعیین عینی وزن معیارها را بر اساس اطلاعات موجود در ماتریس تصمیم‌گیری می‌کند (Hafezalkotob, 2016). از بین رویکردهای چندمعیاره SAW و VIKOR از نظر منطق برای تجمیع و ارزیابی معیارها متفاوت هستند. رویکرد SAW برای حل مسائل چندمعیاره مناسب است زیرا ساختار ساده‌ای دارد. به‌راحتی تفسیر می‌شود و معیارها را با استفاده از تجمیع مجموع وزنی استاندارد می‌کند (Danso et al., 2025). در مقابل VIKOR که مبتنی بر ایده یک راه‌حل مصالحه آمیز است. یعنی با در نظر گرفتن مطلوبیت گروهی همه معیارها و پشیمانی‌های فردی که مربوط به نزدیکی به بهترین گزینه است. بنابراین برای مسائلی که شامل معیارهای متضاد یا متفاوت هستند مفید است (Opricovic & Tzeng, 2004).
درحالی‌که روش‌های یادگیری ماشین به‌طور گسترده در تحلیل حساسیت به سیل مورداستفاده قرارگرفته‌اند. استفاده و ارزیابی عملکرد آن‌ها نیاز به داده‌های مکانی قابل‌اعتماد در مورد وقایع سیل برای اهداف آموزشی و اعتبارسنجی دارد (Costache et al., 2019). چنین داده‌هایی در حوضه‌های کوچک و متوسط ممکن است در وضوح و سازگاری مکانی و زمانی در دسترس نباشند یا ناکافی باشند. در چنین مواردی می‌توان از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره استفاده کرد که

امکان ارزیابی نسبی حساسیت به سیل را بر اساس چندین عامل فراهم می‌کند (Kanani-Sadat et al.,2019). در همین راستا مطالعات متعددی در ایران و جهان با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و مدل‌های آماری یادگیری ماشین به ارزیابی حساسیت و خطر سیل پرداخته‌اند. حجازی و همکاران (۱۳۹۴) چن[1] و همکاران (۲۰۲۳) روش‌های چندمعیاره و روش‌های اعمال وزن را برای ارزیابی مکانی سیل موردبررسی قرار داده‌اند. در پژوهش عفیفی و محمدابراهیم (۱۴۰۳)، رضایی‌مقدم و همکاران (۱۴۰۴)، حقی‌زاده[2] و همکاران (۲۰۲۵) و کولی[3] و همکاران (۲۰۲۶) بارش، توپوگرافی و ویژگی‌های مورفولوژیک، فاصله تا شبکه‌های زهکشی و پوشش اراضی، معیارهای تأثیرگذار بر پهنه‌بندی سیل گزارش‌شده. هادیان و همکاران (۲۰۲۲) و اصغری و همکاران (۱۴۰۵) به ترتیب تکنیک‌های مدل‌سازی ترکیبی و ماهیت فصلی تغییرات کاربری اراضی و تأثیر آن بر وسعت مکانی سیل را بررسی کرده‌اند. در زمینه مدیریت حوضه‌های آبخیز ایکرام[4] و همکاران (۲۰۲۴) برای تحلیل راهبردها روش‌های TOPSIS، VIKOR و SAW را در ترکیب با وزن دهی معیارها بر اساس روش آنتروپی به کار گرفته‌اند.

حوزه آبخیز تاجیار–سراب واقع در شهرستان سراب، استان آذربایجان شرقی است که به دلیل تنوع ویژگی‌های توپوگرافی، ارتفاع، سیستم زهکشی، پوشش زمین و سنگ‌شناسی و همچنین ویژگی‌های زمین‌شناسی و خاک نقش مهمی در ارزیابی حساسیت به سیل دارد (قربانی و همکاران، ۱۴۰۴). بااین‌وجود اطلاعات مربوط به تاریخچه وقوع سیل و مناطق مستعد سیل و غیر سیل برای این حوضه در دسترس نبوده است. بنابراین هدف مطالعه حاضر تعیین مناطق مستعد سیل در حوضه تاجیار سراب با استفاده از وزن دهی آنتروپی عینی و مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیار SAW و VIKOR انجام شد. روش‌های SAW و VIKOR به دلیل تفاوت در منطق تجمیع معیارها انتخاب شدند. درحالی‌که روش SAW مبتنی بر جبران وزن بین معیارها است. VIKOR مبتنی بر مطلوبیت گروهی و حداکثر پشیمانی است. در نتیجه برای ارزیابی اینکه آیا امکان دستیابی به اجماع در مدل‌سازی حساسیت به سیل وجود دارد یا خیر نیاز به استفاده از روش‌های MCDA وجود دارد. ارزش تحقیق حاضر به کاربرد مدل‌های SAW و VIKOR محدود نمی‌شود. بلکه شامل کاربرد وزن دهی آنتروپی عینی به‌منظور تعیین وزن معیارها، مقایسه خروجی‌های پیوسته و دسته‌بندی‌شده این مدل‌ها، تطابق مکانی آن‌ها، تحلیل حساسیت نتایج نسبت به تغییر وزن معیارها، تحلیل عدم قطعیت وزن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو و تهیه نقشه ترکیبی از خروجی‌های پیوسته دو مدل نیز می‌شود. این رویکرد امکان ارزیابی پایداری نسبی نتایج در برابر تغییر وزن معیارها را فراهم می‌کند که باعث می‌شود نتیجه نهایی کمتر به نتیجه یک روش خاص وابسته باشد. ازآنجایی‌که هیچ مشاهده مستقلی از سیل برای اعتبارسنجی نتایج وجود نداشت نقشه نهایی را می‌توان به‌عنوان نقشه حساسیت به سیل در نظر گرفت و از آن برای اولویت‌بندی مکان‌ها برای تأیید میدانی، مدل‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی و مطالعه دقیق در زمینه مدیریت حوضه استفاده کرد.

روش پژوهش

با توجه به نبود داده‌های قابل‌اعتماد از رخدادهای تاریخی سیلاب و نقاط سیلابی و غیر سیلابی در این پژوهش از رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره برای پهنه‌بندی حساسیت بالقوه سیلاب استفاده شد. سیزده عامل برای پهنه‌بندی پتانسیل سیل در نظر گرفته شد: ارتفاع، شیب، انحنا، فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی، TWI، SPI، STI، NDVI،

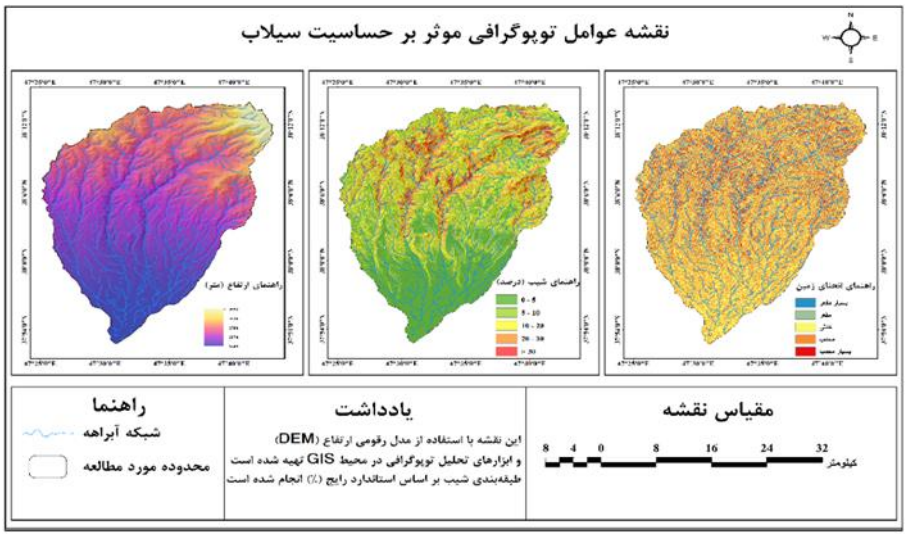
1Chen
2Haghizadeh
3Koley
4Ikram

کاربری اراضی، بارندگی، زمین‌شناسی و خاک. پارامترهای توپوگرافی: ارتفاع، شیب و انحنا از مدل رقومی ارتفاعی (DTM) استخراج شدند (شکل ۱). و پارامترهای هیدرولوژیکی از جمله فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی، TWI، SPI و STI از مشتقات هیدرولوژیکی مدل به دست آمدند (شکل ۲). شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) از حسگر ماهواره‌ای چند طیفی Sentinel-2 در الگوریتم موتور Engine Google Earth محاسبه شد. و کاربری اراضی به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر بر رواناب سطحی و فرآیندهای نفوذ طبقه‌بندی و ادغام شد. ازآنجایی‌که بارش اغلب یکی از مهم‌ترین پدیده‌ها در مناطق مختلف است. داده‌های بارش از پایگاه داده CHIRPS به دست آمد (شکل ۳). علاوه بر این لایه‌های زمین‌شناسی و خاک برای ارزیابی نفوذپذیری، فرسایش‌پذیری و ظرفیت نگهداری آب که در شکل ۴ زیر ارائه‌شده است.

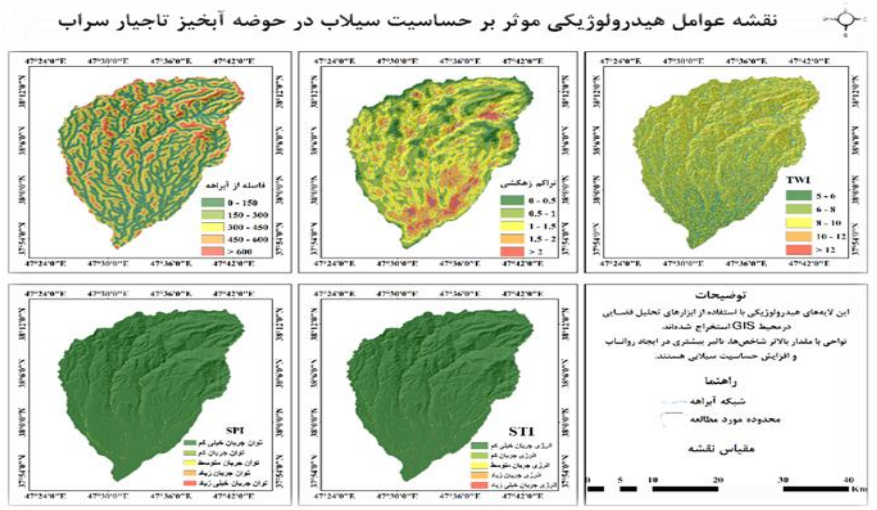
جدول ۱. مشخصات داده‌ها و معیارهای مورداستفاده در پهنه‌بندی حساسیت سیلاب

معیار	داده/ روش تهیه	سال/ دوره داده	تفکیک/ مقیاس اولیه	واحد/ جهت رابطه
ارتفاع	SRTM DEM	۲۰۰۰	۳۰ متر	متر: معکوس
شیب	مشتق DEM			درصد: معکوس
انحنا	مشتق DEM			شاخص: غیرخطی/وابسته به کلاس
فاصله از آبراهه	DEM؛ فاصله اقلیدسی			متر: معکوس
تراکم زهکشی	DEM؛ Line Density			km/km^2: مستقیم
TWI	مشتق DEM			بدون واحد: مستقیم
SPI	مشتق DEM			بدون واحد: مستقیم
STI	مشتق DEM			بدون واحد: مستقیم
NDVI	Sentinel-2	۲۰۲۴	۱۰ متر	بدون واحد: معکوس
کاربری اراضی	ESA WorldCover	۲۰۲۱	۱۰ متر	طبقه: وابسته به کلاس
بارش	CHIRPS	۲۰۱۴–۲۰۲۳	۰٫۰۵ درجه	میلی‌متر: مستقیم
خاک	نقشه خاک منطقه		۱:۲۵۰٬۰۰۰	طبقه: وابسته به کلاس و نفوذپذیری
زمین‌شناسی	نقشه زمین‌شناسی منطقه		۱:۱۰۰٬۰۰۰	لیتولوژی: وابسته به کلاس و نفوذپذیری

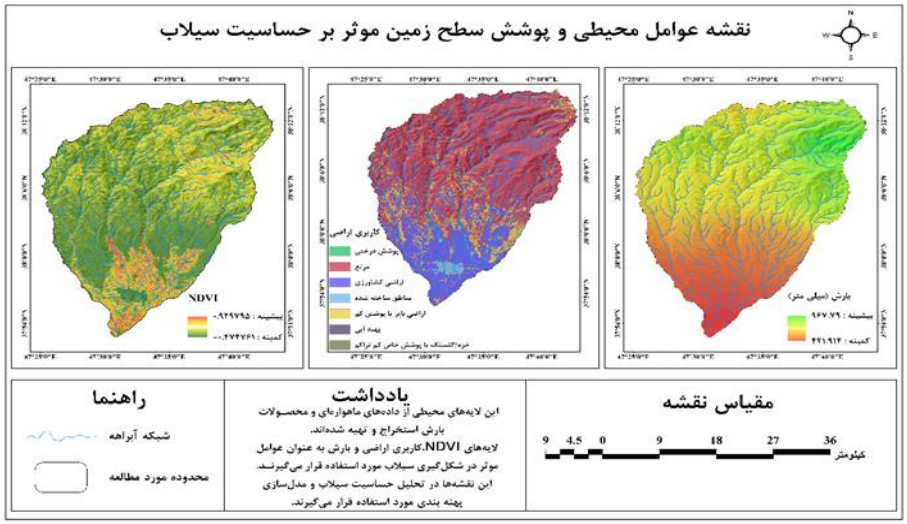
داده‌های SRTM، Sentinel-2، WorldCover و CHIRPS در گوگل ارث انجین و استخراج مشتقات DEM در نرم‌افزار ArcMap انجام شد.



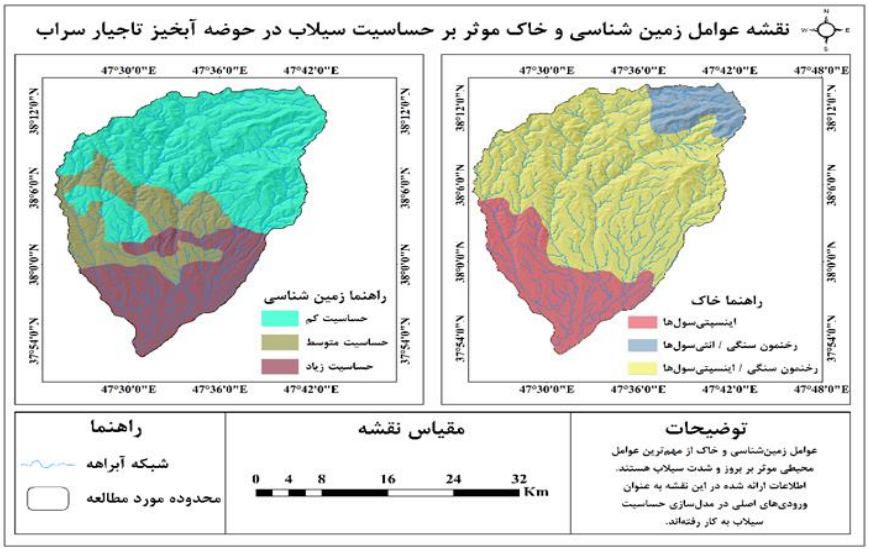
شکل ۱. نقشه عوامل توپوگرافی



شکل ۲. نقشه عوامل هیدرولوژیکی



شکل ۳. نقشه عوامل محیطی و پوشش سطح زمین



شکل ۵. نقشه عوامل زمین‌شناسی و خاک

استخراج و آماده‌سازی لایه‌ها

مدل رقومی ارتفاعی SRTM با تفکیک مکانی ۳۰ متر به‌عنوان داده پایه استفاده شد. و لایه‌های شیب، جهت و انحنا از آن استخراج شدند. شیب بر حسب درصد و انحنا با گزینه General Curvature ابزار Curvature محاسبه شد. با استفاده از ابزار Flow Direction و الگوریتم D8 و Flow Accumulation شبکه زهکشی با آستانه ۵۰۰ سلول تجمع جریان استخراج و فاصله آبراهه با ابزار فاصله اقلیدسی تعیین شد. با ابزار Line Density (اندازه سلول ۳۰ متر و شعاع جستجوی ۱۰۰۰ متر) تراکم زهکشی محاسبه شد. شاخص‌های TWI، SPI و STI از DEM اصلاح‌شده، تجمع جریان و شیب توسعه داده شدند. NDVI از تصاویر Sentinel-2، کاربری اراضی از ESA WorldCover و میانگین بارندگی سالانه (۲۰۱۴ تا ۲۰۲۳) از CHIRPS استخراج شدند. لایه‌های خاک و زمین‌شناسی نیز بر اساس ویژگی‌های نفوذپذیری و تولید رواناب امتیازدهی و به رستر تبدیل شدند. همه لایه‌ها به سیستم مختصات WGS 1984 UTM Zone 38N و اندازه سلول ۳۰ متری تطبیق داده شدند. با درون‌یابی دوخطی برای داده‌های پیوسته و نزدیک‌ترین همسایه برای داده‌های طبقه‌بندی‌شده استفاده شد. DEM اصلاح‌شده به‌عنوان رستر Snap و Extent و Mask بر اساس حوضه تاجیار–سراب انتخاب شدند.

بررسی همبستگی میان معیارها

قبل از طبقه‌بندی و استانداردسازی ماتریس همبستگی پیرسون بر اساس مقادیر اولیه معیارهای کمی محاسبه شد. پس از هم ترازی لایه‌ها ۵۰۰۰ نقطه تصادفی در حوضه ایجاد و مقادیر معیارها استخراج گردید. پس از حذف ۲۷ نقطه دارای NoData تجزیه‌وتحلیل با ۴۹۷۳ نقطه انجام شد. ضرایب پیرسون برای ۱۰ معیار کمی یعنی ارتفاع، شیب، انحنا، فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی، بارندگی، TWI، SPI، STI و NDVI محاسبه شد. معیارهای کیفی مانند کاربری اراضی، زمین‌شناسی و خاک به دلیل ماهیت طبقه‌ای اسمی از این تحلیل مستثنی شدند اما در مراحل بعدی مدل‌سازی حفظ شدند.

طبقه‌بندی و استانداردسازی معیارها

معیارها بر اساس مطالعات پیشین، اصول هیدرولیکی و شرایط محلی حوضه طبقه‌بندی و امتیازدهی شدند (Khosravi et al., 2016; Khosravi et al., 2019; Negese et al., 2022). معیارهای پیوسته (ارتفاع، شیب، انحنا، فاصله از آبراهه‌ها، تراکم زهکشی، TWI، SPI، STI، NDVI و بارندگی با روش Natural Breaks-Jenks به پنج دسته حساسیت (بسیار کم تا بسیار زیاد) تقسیم و بر اساس تأثیرشان بر تولید، غلظت و انتقال رواناب امتیاز ۱ تا ۵ به کلاس‌ها اختصاص داده شد. معیارهای طبقه‌ای (کاربری اراضی، زمین‌شناسی و خاک) نیز بر اساس ویژگی‌های هیدرولوژیکی (نفوذپذیری، پوشش سطحی، ظرفیت نگهداری آب و تولید رواناب) در همین بازه ۱ تا ۵ امتیازدهی شدند. برای استانداردسازی امتیازات ۱ تا ۵ به ترتیب به ۰، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ تبدیل شدند. به‌طوری‌که مقادیر نزدیک به ۰ و ۱ به ترتیب کمترین و بیشترین حساسیت را نشان می‌دهند. از لایه‌های استانداردشده نهایی برای محاسبه وزن هر معیار با استفاده از روش آنتروپی و اعمال مدل‌های SAW و VIKOR استفاده شد. محدوده کلاس‌ها، امتیازات در جدول ۲ ارائه‌شده است.

جدول ۲. طبقه‌بندی و امتیازدهی معیارهای مؤثر بر حساسیت سیلاب در حوضه آبریز تاجیار

معیار	طبقات / بازه‌ها	امتیاز متناظر
ارتفاع	۱۶۴۸_۱۹۲۷، ۱۹۲۷_۲۲۵۴، ۲۲۵۴_۲۶۰۲، ۲۶۰۲_۳۰۴۲، ۳۰۴۲_۳۷۵۲	۵، ۴، ۳، ۲، ۱
شیب	۰_۷۳۵/۵، ۷۳۵/۵_۹۲۸/۱۱، ۹۲۸/۱۱_۳۵۱/۱۸، ۳۵۱/۱۸_۶۹۲/۲۵، ۶۹۲/۲۵_۴۹۵/۵۸	۱، ۲، ۳، ۴، ۵
انحنا	-۶۶۷/۱۲_-۴۷۴/۱، -۴۷۴/۱_-۵۰۵/۰، -۵۰۵/۰_-۱۴۱/۰، -۱۴۱/۰_۲۱۷/۱، ۲۱۷/۱_۷۷۸/۱۴	۵، ۴، ۳، ۲، ۱
فاصله از آبراهه	۰_۶۹۸/۱۳۲، ۶۹۸/۱۳۲_۷۰۷/۲۸۰، ۷۰۷/۲۸۰_۸۲۰/۴۳۳، ۸۲۰/۴۳۳_۵۵۶/۶۱۷، ۵۵۶/۶۱۷_۴۶۱/۱۳۰۱	۵، ۴، ۳، ۲، ۱
تراکم زهکشی	۰_۵۶۳/۰، ۵۶۳/۰_۹۳۸/۰، ۹۳۸/۰_۲۹۱/۱، ۲۹۱/۱_۶۸۹/۱، ۶۸۹/۱_۸۱۴/۲	۱، ۲، ۳، ۴، ۵
TWI	۸۲۶/۵_۹۷۸/۶، ۹۷۸/۶_۴۹۶/۸، ۴۹۶/۸_۳۸۰/۱۰، ۳۸۰/۱۰_۴۹۶/۱۳، ۴۹۶/۱۳_۴۶۹/۱۳، ۱۷۵/۱۹	۱، ۲، ۳، ۴، ۵
SPI	۵۵۴/۰_۸۹۱/۴۰۹/۵۰، ۸۹۱/۴۰۹/۵۰_۹۰۱/۰۳۳/۱۸۰، ۹۰۱/۰۳۳/۱۸۰_۵۸۱/۶۶۴/۳۴۵، ۵۸۱/۶۶۴/۳۴۵_۵۹۹/۳۰۸/۵۸۳، ۶۲۵/۱۷۰/۹۱۸_۵۹۹/۳۰۸/۵۸۳	۱، ۲، ۳، ۴، ۵
STI	۱۵۴/۰_۸۷۲/۱۰۶، ۸۷۲/۱۰۶_۱۲۹/۴۵۶، ۱۲۹/۴۵۶_۰۱۶/۹۸۰، ۰۱۶/۹۸۰_۲۱۷/۱۵۹۱، ۲۱۷/۱۵۹۱_۰۶۳/۲۴۷۴	۱، ۲، ۳، ۴، ۵
NDVI	-۴۷۴/۰_۱۷۰/۰، ۱۷۰/۰_۲۸۰/۰، ۲۸۰/۰_۴۱۸/۰، ۴۱۸/۰_۶۰۵/۰، ۶۰۵/۰_۹۳۰/۰	۵، ۴، ۳، ۲، ۱
بارش	۹۱۴/۴۲۱_۹۶۳/۵۱۳، ۹۶۳/۵۱۳_۴۲۰/۶۲۷، ۴۲۰/۶۲۷_۳۱۴/۷۳۲، ۳۱۴/۷۳۲_۹۲۷/۸۳۲، ۹۲۷/۸۳۲_۷۹۰/۹۶۷	۱، ۲، ۳، ۴، ۵
کاربری اراضی	درخت، مرتع، کشاورزی، مسکونی، اراضی بایر/پوشش کم، پهنه آبی، خزه/گلسنگ یا پوشش‌های خاص کم تراکم	۱، ۲، ۴، ۵، ۴، ۵، ۲
زمین‌شناسی	سنگ‌های آتش‌فشانی و نیمه‌آتشفشانی آندزیتی–بازالتی، توف آندزیتی و رسوبات مخروط‌افکنه و تراس‌های مرتفع، رسوبات مخروط‌افکنه و تراس‌های پایین– فانگلومرای درشت‌دانه (لاهار) و مارن‌های گچ‌دار	۱، ۳، ۵
خاک	Inceptisols; Rock Outcrops–Entisols; Rock Outcrops–Inceptisols	۳، ۴، ۴

وزن دهی معیارها با روش آنتروپی

پس از استانداردسازی لایه‌ها وزن معیارهای مؤثر بر حساسیت به سیل با روش آنتروپی شانون محاسبه شد. هر پیکسل معتبر به‌عنوان یک گزینه و هر معیار به‌عنوان یک شاخص در نظر گرفته شد. با حذف سلول‌های NoData ماتریسی تصمیم‌گیری با اندازه ۷۱۱۰۱۶×۱۳ به دست آمد که در آن xij مقدار استانداردشده معیارj برای پیکسل i است:

$$X = [x_{ij}]_{m\times n} \quad (۱)$$

که m تعداد پیکسل‌های معتبر (m=711016) و n تعداد معیارها (n=13) است. در مرحله بعد سهم نسبی مقادیر آنتروپی هر معیار، درجه پراکندگی اطلاعات و وزن نهایی هر معیار بر اساس مراحل روش وزن دهی آنتروپی محاسبه شد (Hafezalkotob & Hafezalkotob, 2016; Li et al.,2025). ابتدا مقادیر ماتریس تصمیم‌گیری به سهم‌های نسبی تبدیل شدند.

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}} \quad (۲)$$

سپس مقدار آنتروپی برای هر معیار از رابطه زیر محاسبه شد:

$$E_j = -k\sum_{i=1}^{m} p_{ij}\ln(p_{ij}) \quad (۳)$$

که در آن

$$k = \frac{1}{\ln(m)} \quad (۴)$$

پس‌ازآن درجه پراکندگی اطلاعات یا میزان تنوع هر معیار از رابطه زیر به دست آمد:

$$D_j = 1 - E_j \quad (۵)$$

در نهایت وزن نهایی هر معیار از طریق نرمال‌سازی مقادیر Dj محاسبه شد:

$$W_j = \frac{D_j}{\sum_{j=1}^{n} D_j} \quad (۶)$$

در این رویکرد وزن بیشتر به این معنی است که این معیار دارای تغییرپذیری مکانی و محتوای اطلاعاتی بالاتری در منطقه موردمطالعه است که نمی‌تواند نشان‌دهنده نقش مهم‌تر این عامل در فرآیند سیل‌خیزی باشد.

تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM)

برای بررسی پایداری الگوی مکانی حساسیت سیلاب نسبت به تغییر در منطق تجمیع معیارها از دو روش SAW و VIKOR استفاده شد. SAW مبتنی بر تجمیع کاملاً جبرانی معیارهای وزنی است. درحالی‌که VIKOR بدون جبران و بر پایه حداکثر پشیمانی در چارچوب راه‌حل مصالحه عمل می‌کند. کاربرد هر دو روش امکان را داد تا میزان تطابق و پایداری الگوی مکانی حساسیت به سیل را با دو منطق تصمیم‌گیری مختلف تجزیه‌وتحلیل کنند. مقایسه نتایج به‌عنوان اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته نشد.

اجرای مدلSAW

در روش SAW امتیاز نهایی هر پیکسل از مجموع حاصل‌ضرب مقدار استانداردشده هر معیار در وزن متناظر آن محاسبه می‌شود (Danso, 2025).

$$SAW_i = \sum_{j=1}^{n} w_j r_{ij} \quad (۷)$$

که SAWi امتیاز حساسیت سیلاب در پیکسل i، wj وزن آنتروپی معیار j، rij مقدار استانداردشده معیار j و n=13 تعداد معیارها است. در ArcMap رسترهای استانداردشده در وزن آنتروپی مربوط ضرب و با Raster Calculator جمع شدند. پیش از اجرا جهت معیارها یکسان‌سازی شد به‌گونه‌ای که مقادیر بالاتر نشان‌دهنده حساسیت بیشتر به سیلاب بودند. بنابراین معیارهای معکوس (ارتفاع، فاصله از آبراهه و NDVI) پیش از ورود به مدل به‌صورت معکوس استاندارد شدند و نیازی به تفکیک مجدد سود و هزینه در مرحله SAW نبود. با توجه به استانداردسازی در بازه صفر تا یک و مجموع وزن‌های برابر با یک دامنه نظری شاخص SAW بین صفر و یک قرار داشت. دامنه واقعی خروجی در حوضه آبخیز تاجیار سراب از ۰/۰۲۳۳۵۵۷ تا ۰/۹۶۰۹۰۶ متغیر بود. به‌طوری‌که مقادیر بالاتر نشان‌دهنده حساسیت بیشتر به سیلاب بودند.

معیار بهینه‌سازی و ارزیابی ریسک (VIKOR)

پس از نرمال‌سازی معیارها به مقیاس صفر تا یک (مقادیر بالاتر= حساسیت بیشتر) و تعیین نقاط ایده‌آل و غیر ایده‌آل به ترتیب ۱ و ۰. روابط VIKOR طبق رویکرد نرمال‌سازی مطالعه حاضر (Mitra & Das, 2023). به روابط (۸) و (۹)

ساده‌سازی شدند. بر این اساس شاخص مطلوبیت گروهی Si و شاخص پشیمانی فردی Ri برای هر پیکسل از روابط زیر محاسبه شدند:

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} w_{j(1-r_{ij})} \quad (۸)$$

$$R_i = \max_j [w_j(1 - r_{ij})] \quad (۹)$$

که rij مقدار استانداردشده معیار j در پیکسل i، wj وزن آنتروپی معیار j و n=13 تعداد معیارها است. سپس شاخص سازشی Qi بر اساس رابطه زیر محاسبه شد:

$$\mathrm{Q_i} = v\frac{\mathrm{S_i} - \mathrm{S}_{min}}{\mathrm{S_{max}} - \mathrm{S_{min}}} + (1 - v)\frac{\mathrm{R_i} - \mathrm{R_{min}}}{\mathrm{R_{max}} - \mathrm{R_{min}}} \quad (۱۰)$$

که مقدار v = 0.5 برای متعادل کردن ضریب مطلوبیت گروهی S و ضریب حداکثر پشیمانی R انتخاب شد. ازآنجایی‌که در ساختار VIKOR موجود مقادیر کوچک‌تر Q مطلوب‌تر هستند. شاخص حساسیت نهایی برای راه‌حل مصالحه با اصلاح فرمول زیر محاسبه شد:

$$\mathrm{VIKOR_i} = 1 - \mathrm{Q_i} \quad (۱۱)$$

بنابراین در هر دو مدل مقادیر بالاتر نشان‌دهنده مناطق حساس‌تر به سیل‌خیزی بودند. دامنه VIKOR در منطقه موردمطالعه تقریباً از ۰ تا ۰/۹۹۹۷۸۸ متغیر بود. علاوه بر این طبقه‌بندی نهایی نتایج طبق قوانین کلی در بخش بعدی انجام شد.

طبقه‌بندی مشترک و ارزیابی تطابق خروجی‌های SAW و VIKOR

ازآنجاکه هر دو شاخص در بازه ۰ تا ۱ قرار داشتند. یک طرح طبقه‌بندی مشترک با گام ۰/۲۰ (آستانه‌های ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ گزینه Manual) برای تقسیم نتایج به پنج کلاس (بسیار کم تا بسیار زیاد) ایجاد شد. که مقایسه مساحت‌ها و درصد کلاس‌ها بین دو مدل را ممکن ساخت. ضریب همبستگی پیرسون برای ارزیابی شباهت پیکسلی بین خروجی‌های پیوسته دو مدل محاسبه شد. مساحت کلاس‌ها از جدول ویژگی‌های رستری استخراج شد.

نقشه توافق مکانی و نقشه نهایی ترکیبی

نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده دو مدل، پیکسل به پیکسل مقایسه شدند. هر جا هر دو مدل یک پیکسل را در یک کلاس حساسیت قرار می‌دادند توافق تلقی می‌شد و در ۵ دسته (خیلی کم تا خیلی زیاد) نقشه نمایش داده شد. کلاس‌های متفاوت به‌عنوان عدم توافق علامت‌گذاری شدند. این امر امکان تحلیل درجه و الگوهای مکانی همگرایی مدل‌ها را فراهم کرد. نقشه ترکیبی نهایی از میانگین‌گیری وزن‌های برابر خروجی‌های پیوسته دو مدل به دست آمد:

$$\mathrm{Fi}\frac{\mathrm{SAWi} + \mathrm{VIKORi}}{2} \quad (۱۲)$$

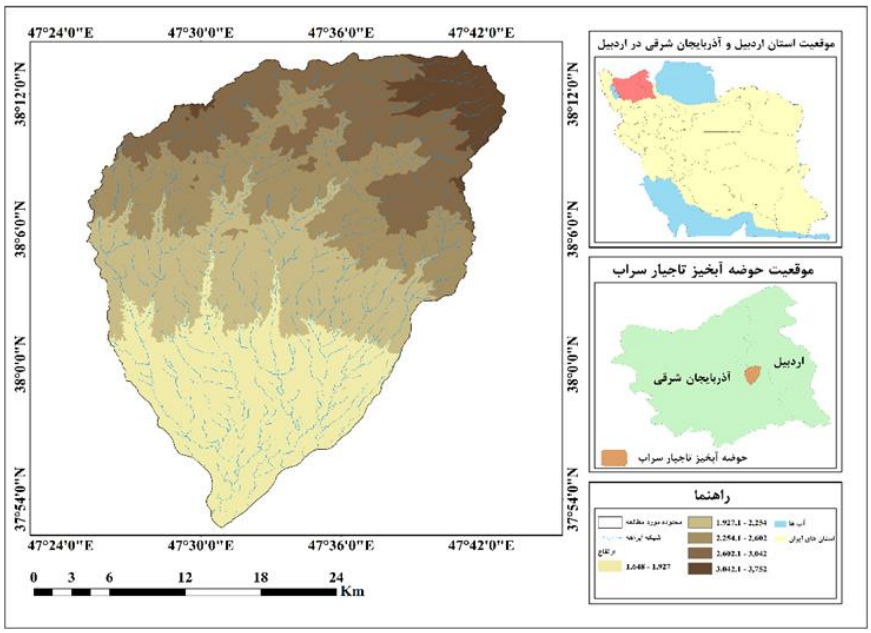
که Fi شاخص ترکیبی حساسیت پیکسل i. این میانگین‌گیری برای کاهش وابستگی نقشه نهایی به یک ساختار تصمیم‌گیری واحد استفاده شد. و خروجی نهایی نیز به پنج کلاس حساسیت تقسیم شد.

تحلیل حساسیت وزن‌ها و ارزیابی عدم قطعیت مدل‌ها

پایداری نتایج نسبت به تغییر وزن معیارها با روش تغییر یک معیار در هر زمان انجام شد. وزن هر یک از ۱۳ معیار با ٪۲۰ و ٪۱۰ کاهش و افزایش تغییر داده شد (در مجموع ۵۲ سناریو) وزن‌ها مجدداً نرمال‌سازی شدند. و نتایج هر سناریو با سری مرجع از طریق ضریب همبستگی پیرسون، MAE و RMSE مقایسه شد. برای بررسی عدم قطعیت هم‌زمان وزن‌ها، شبیه‌سازی Monte Carlo با ۵۰۰ تکرار انجام شد. در هر تکرار وزن پایه هر معیار در ضریبی تصادفی با توزیع یکنواخت بین ۰/۸ تا ۱/۲ ضرب و کل وزن‌ها دوباره نرمال‌سازی شد. بازه ±٪۲۰ صرفاً سناریوی آزمون بود و ارتباطی با خطای تجربی وزن‌های آنتروپی نداشت. نتایج SAW، VIKOR و نقشه ترکیبی هر تکرار با خروجی‌های پایه مقایسه و میانگین و انحراف معیار پیکسلی ۵۰۰ تکرار برای بررسی الگوی مکانی عدم قطعیت محاسبه شد. (انحراف معیار کمتر= پایداری بیشتر) همه محاسبات در محیط Python/Google Colab انجام شد.

منطقه موردمطالعه

حوزه آبخیز تاجیار سراب که در شهرستان سراب در استان آذربایجان شرقی واقع‌شده است. به دلیل توپوگرافی، تغییرات ارتفاعی، سیستم زهکشی، پوشش زمین، زمین‌شناسی و خواص خاک برای تعیین آسیب‌پذیری سیل اهمیت دارد. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی حوضه موردمطالعه را نشان می‌دهد. حوضه موردمطالعه در طول شرقی ۲۰ ′۲۸ °۴۷ تا ۳۰ ′۴۲ °۴۷ و عرض شمالی ۲۳ ′۵۵ °۳۷ تا ۴۷ ′ ۱۳ °۳۸ قرار دارد. ارتفاع حوضه از تقریباً ۱۶۴۸ تا ۳۷۵۲ متر و مساحت آن تقریباً ۶۳۹/۹۱۴۴ کیلومترمربع است. بر اساس روش طبقه‌بندی اقلیمی دومارتون حوضه آبریز تاجیار که میانگین دمای سالانه ۹/۳ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالانه ۳۵۲/۴ میلی‌متر دارد در یک منطقه اقلیمی نیمه‌خشک سرد واقع‌شده است. این حوضه در بخش‌های کوهستانی بالادست از مراتع نسبتاً مناسبی برخوردار است درحالی‌که بخش میانی آن عمدتاً شامل اراضی بایر بوده و بخش پایین‌دست آن نیز عمدتاً به کشاورزی دیم و آبی اختصاص دارد (عابدینی و همکاران، ۱۴۰۳:۱۹۹۱ ,.Moore et al).



شکل ۱. موقعیت منطقه موردمطالعه

یافته‌ها

بررسی همبستگی میان معیارها

نتایج ماتریس همبستگی پیرسون نشان داد اکثر معیارهای کمی روابط خطی ضعیف تا متوسط دارند. بیشترین همبستگی مثبت بین SPI و STI (r =۰/۹۶۲) به دست آمد که همپوشانی قابل‌توجه محتوای اطلاعاتی این دو شاخص در مقیاس حوضه را نشان می‌دهد. ارتفاع و بارندگی همبستگی بالایی r =۰/۸۸۵ داشتند. روابط بارندگی–شیب ۰/۵۹۶= r ارتفاع–شیب r =۰/۵۱۹ و TWI–STI r=۰/۴۶۱ در سطح متوسط و سایر روابط ضعیف بودند. همبستگی بسیار بالای SPI و STI بیانگر اشتراک بخشی از اطلاعات مکانی این دو متغیر است. و باید در تفسیر نتایج مدل به‌عنوان دو متغیر غیر کاملاً مستقل در نظر گرفته شود. معیارهای کاربری اراضی، زمین‌شناسی و خاک به دلیل ماهیت طبقه‌ای از این تحلیل حذف اما در وزن دهی و مدل‌سازی لحاظ شدند.

جدول ۳. ماتریس همبستگی پیرسون میان معیارهای کمی مؤثر بر حساسیت سیلاب

	فاصله از رودخانه	تراکم زهکشی	بارندگی	ارتفاع	TWI	STI	SPI	شیب	NDVI	انحنا
فاصله از رودخانه	۱	-۰/۴۶۶۷	۰/۱۲۱۹۹۳	۰/۲۳۷۷۱۹	-۰/۱۶۶۴۸	-۰/۱۲۶۹۶	-۰/۰۸۶۷۳	۰/۰۵۰۶۶۳	-۰/۱۰۱۲	۰/۰۷۲۳۶۹
تراکم زهکشی	-۰/۴۶۶۷	۱	-۰/۳۳۲۹۴	-۰/۴۴۷۹۸	-۰/۰۴۰۷۱	۰/۰۶۷۷۲۵	۰/۰۵۴۸۳	-۰/۱۹۰۰۳	۰/۰۶۸۴۰۹	-۰/۰۱۳۴۶
بارندگی	۰/۱۲۱۹۹۳	-۰/۳۳۲۹۴	۱	۰/۸۸۵۸۴۲	۰/۲۱۳۵۲۷	-۰/۰۶۴۶۸	-۰/۰۶۴۱۲	۰/۵۹۶۷۷۷	-۰/۰۲۲۸۹	-۰/۰۰۱۷۱
ارتفاع	۰/۲۳۷۷۱۹	-۰/۴۴۷۹۸	۰/۸۸۵۸۴۲	۱	۰/۱۶۱۴۹	-۰/۰۷۳۶۴	-۰/۰۶۴۲۹	۰/۵۱۹۳۱۷	۰/۰۱۴۹۲۱	۰/۰۲۵۱۸۱
TWI	-۰/۱۶۶۴۸	-۰/۰۴۰۷۱	۰/۲۱۳۵۲۷	۰/۱۶۱۴۹	۱	۰/۴۶۱۵۵۹	۰/۳۳۵۰۱	۰/۱۸۲۳۱۲	۰/۰۷۲۹۱۹	-۰/۴۰۳۶۲
STI	-۰/۱۲۶۹۶	۰/۰۶۷۷۲۵	-۰/۰۶۴۶۸	-۰/۰۷۳۶۴	۰/۴۶۱۵۵۹	۱	۰/۹۶۲۶۴۲	-۰/۱۰۷۵۴	۰/۰۸۴۶۹۳	-۰/۰۶۵۴۳
SPI	-۰/۰۸۶۷۳	۰/۰۵۴۸۳	-۰/۰۶۴۱۲	-۰/۰۶۴۲۹	۰/۳۳۵۰۱	۰/۹۶۲۶۴۲	۱	-۰/۰۷۴۶۵	۰/۰۶۱۵۷۹	-۰/۰۳۰۵
شیب	۰/۰۵۰۶۶۳	-۰/۱۹۰۰۳	۰/۵۹۶۷۷۷	۰/۵۱۹۳۱۷	۰/۱۸۲۳۱۲	-۰/۱۰۷۵۴	-۰/۰۷۴۶۵	۱	-۰/۱۷۶	۰/۰۲۹۱۵۱
NDVI	-۰/۱۰۱۲	۰/۰۶۸۴۰۹	-۰/۰۲۲۸۹	۰/۰۱۴۹۲۱	۰/۰۷۲۹۱۹	۰/۰۸۴۶۹۳	۰/۰۶۱۵۷۹	-۰/۱۷۶	۱	-۰/۰۵۶۴۷
انحنا	۰/۰۷۲۳۶۹	-۰/۰۱۳۴۶	-۰/۰۰۱۷۱	۰/۰۲۵۱۸۱	-۰/۴۰۳۶۲	-۰/۰۶۵۴۳	-۰/۰۳۰۵	۰/۰۲۹۱۵۱	-۰/۰۵۶۴۷	۱

نتایج وزن دهی معیارها با روش آنتروپی شانون

طبق جدول ۴ معیار SPI و STI با وزن‌های ۰/۴۶۸۶ و ۰/۳۱۰۸ بیشترین سهم وزنی را در بین ۱۳ معیار داشتند. و بعد زمین‌شناسی ۰/۰۸۳۹، TWI ۰/۰۳۷۵، بارندگی ۰/۰۱۹۲ و شیب ۰/۰۱۸۵ کمترین وزن‌ها به خاک ۰/۰۰۱۲، NDVI ۰/۰۰۴۳ و ارتفاع ۰/۰۰۵۱ اختصاص یافت. وزن بالای SPI و STI بیانگر پراکندگی نسبتاً بالای آن‌ها در مجموعه داده‌ها است. نه لزوماً اهمیت فیزیکی مطلق آن‌ها در وقوع سیل علاوه بر این همبستگی بالای این دو شاخص باید در تفسیر این وزن‌ها مدنظر قرار گیرد.

جدول ۴. مقادیر آنتروپی (Ej)، درجه پراکندگی (Dj) و وزن نهایی (Wj) معیارهای مؤثر بر حساسیت سیلاب

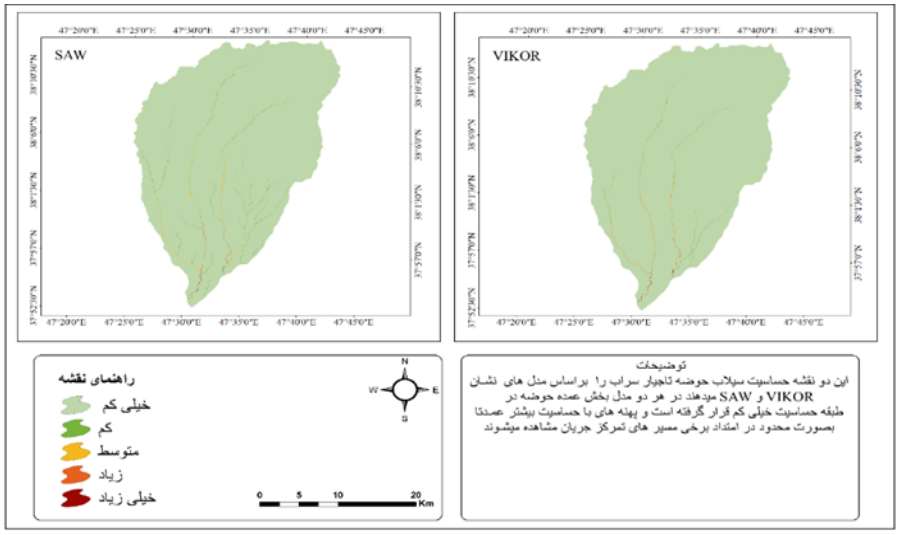
معیار	آنتروپی(E_j)	درجه پراکندگی(D_j)	وزن نهایی(W_j)
ارتفاع	۰/۹۹۶۲	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۵۱
شیب	۰/۹۸۶۱	۰/۰۱۳۹	۰/۰۱۸۵
انحنا	۰/۹۹۱۰	۰/۰۰۹۰	۰/۰۱۱۹
فاصله از رودخانه	۰/۹۸۹۱	۰/۰۱۰۹	۰/۰۱۴۴
تراکم زهکشی	۰/۹۹۳۲	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۹۰
TWI	۰/۹۷۱۷	۰/۰۲۸۳	۰/۰۳۷۵
SPI	۰/۶۴۶۰	۰/۳۵۴۰	۰/۴۶۸۶
STI	۰/۷۶۵۳	۰/۲۳۴۷	۰/۳۱۰۸
NDVI	۰/۹۹۶۷	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۴۳
کاربری اراضی	۰/۹۸۸۱	۰/۰۱۱۹	۰/۰۱۵۸
بارندگی	۰/۹۸۵۵	۰/۰۱۴۵	۰/۰۱۹۲
زمین‌شناسی	۰/۹۳۶۶	۰/۰۶۳۴	۰/۰۸۳۹
خاک	۰/۹۹۹۱	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۱۲

تحلیل خروجی‌های مدل SAW و VIKOR و ارزیابی همگرایی مکانی آن‌ها

با استفاده از حدود طبقه‌بندی مشترک خروجی هر دو مدل به پنج کلاس حساسیت (بسیار کم تا بسیار زیاد) تقسیم شد. در هر دو مدل بخش عمده مساحت حوضه در طبقه حساسیت خیلی کم قرار گرفت (SAW ۶۳۵/۱۵ کیلومترمربع و VIKOR ۶۳۷/۰۷ کیلومترمربع). طبقات کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد در SAW به ترتیب ۲/۹۳، ۱/۱۸، ۰/۴۵ و ۰/۲۱ کیلومترمربع و در VIKOR این کلاس‌ها به ترتیب برابر با ۱/۴۰، ۱، ۰/۲۳ و ۰/۲۱ کیلومترمربع است. یعنی با وجود توزیع کلی مشابه سهم کلاس‌های کم تا زیاد برای دو مدل به‌طور قابل‌توجهی متفاوت است.

جدول ۵. مساحت طبقات حساسیت سیلاب حاصل از مدل‌های SAW و VIKOR بر اساس چارچوب طبقه‌بندی مشترک

طبقه حساسیت	مساحت(km^2) SAW	مساحت(km^2) VIKOR
خیلی کم	۶۳۵/۱۵	۶۳۷/۰۷
کم	۲/۹۳	۱/۴۰
متوسط	۱/۱۸	۱/۰۰
زیاد	۰/۴۵	۰/۲۳
خیلی زیاد	۰/۲۱	۰/۲۱

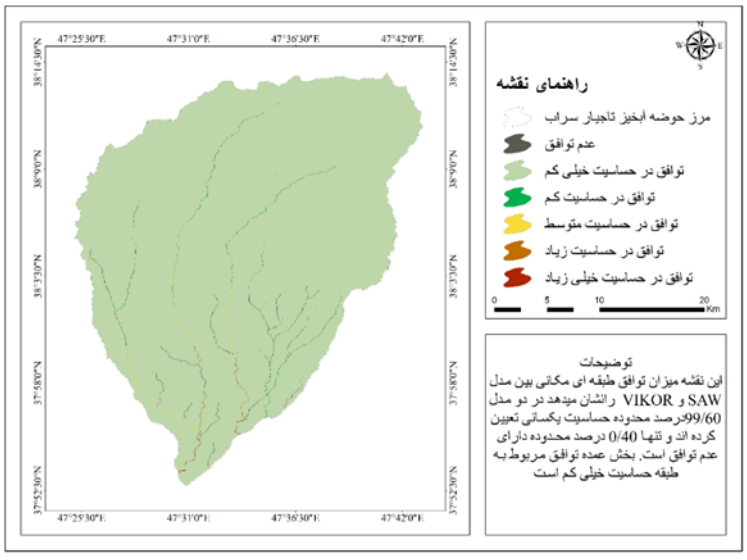


شکل ۷. نقشه‌های حساسیت سیلاب حوضه آبخیز تاجیار سراب حاصل از مدل‌های SAW و VIKOR

همبستگی پیرسون بین مقادیر پیکسلی دو مدل برابر با r=۰/۹۴۹ بود که همبستگی مثبت قوی و شباهت بالای ساختار مکانی دو مدل، باوجود تفاوت ساختاری آن‌ها را تأیید می‌کند. بااین‌وجود به دلیل اینکه ضریب تا حدودی کمتر از ۱ است می‌توان گفت که تفاوت‌های موضعی در مقادیر حساسیت تخمین‌زده شده توسط دو مدل وجود دارد.

تحلیل توافق مکانی خروجی‌های SAW و VIKOR

از تعداد کل ۷۱۱/۰۱۶ پیکسل معتبر ۷۰۸/۱۹۰ پیکسل (۶۳۷/۳۷ کیلومترمربع یا ٪ ۹۹/۶۰ از منطقه) در هر دو مدل‌های به یک کلاس اختصاص یافتند. از طرفی ۲/۸۲۶ پیکسل (۲/۵۴ کیلومترمربع، ٪۰/۴۰) در کلاس‌های مختلف قرار گرفتند. علاوه بر این تحلیل توافقات تخصیص کلاس نشان داد که بیشترین همگرایی مربوط به کلاس حساسیت خیلی کم است (۷۰۵/۷۱۸ پیکسل، ۶۳۵,۱۵ کیلومترمربع) همگرایی برای کلاس‌های کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد به ترتیب ۱، ۰/۷۹، ۰/۲۳ و ۰/۲۱ کیلومترمربع بود (شکل ۹).

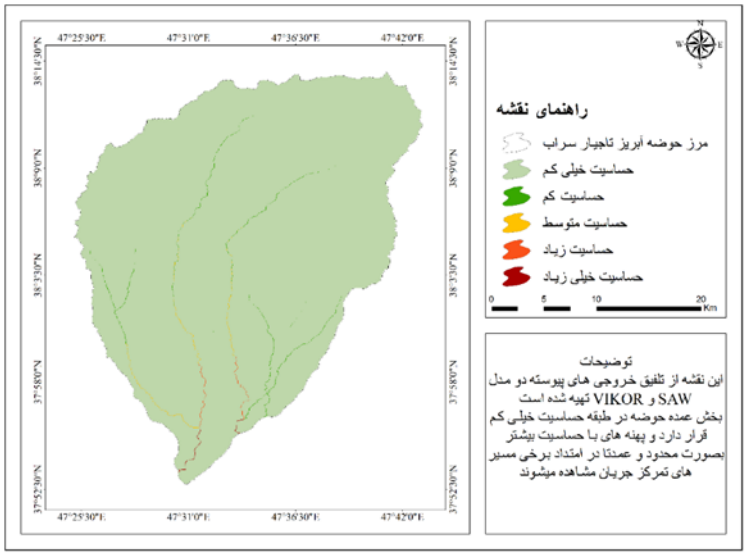


شکل ۹. نقشه توافق مکانی پهنه‌های حساس به سیلاب در مدل‌های SAW و VIKOR

توافق بالا عمدتاً ناشی از غلبه کلاس حساسیت بسیار کم در هر دو خروجی بود. و عنوان شاخصی دقت یا اعتبار مدل‌ها تفسیر شود بلکه نشان‌دهنده شباهت طبقه‌بندی مکانی است. این الگوی توافق طبقه‌ای با همبستگی مشاهده‌شده میان خروجی‌های پیوسته SAW و VIKOR (r=۰/۹۴۹) نیز همخوانی دارد.

نتایج نقشه نهایی ترکیبی حساسیت سیلاب

شکل ۱۰ نقشه ترکیبی حاصل میانگین‌گیری پیکسل به پیکسل خروجی SAW و VIKOR و طبقه‌بندی مجدد با استفاده از چارچوب طبقه‌بندی مشترک و مرزهای ثابت به پنج طبقه نشان داد بیشتر منطقه ۶۳۶/۶۲ کیلومترمربع (۴۸۵/۹۹٪) حساسیت بسیار کم است. ۱/۸۲ کیلومترمربع (۰/۲۸۴٪) از منطقه به‌عنوان حساسیت کم و تنها ۰/۸۷ کیلومترمربع (۰/۱۳۷٪) از قلمرو حساسیت متوسطی داشت. کلاس‌های حساسیت زیاد و بسیار زیاد پراکنده بودند و تنها ۰/۳۹ کیلومترمربع (۰/۰۶۱٪) و ۰/۲۱ کیلومترمربع (۰/۰۳۳٪) را پوشش می‌دادند. بنابراین در مجموع تنها ۰/۶۰ کیلومترمربع یا ۰/۰۹۴ درصد از منطقه موردمطالعه به‌عنوان بسیار حساس طبقه‌بندی شد.



شکل ۱۰. نقشه نهایی ترکیبی حساسیت سیلاب حوضه آبریز تاجیار سراب

نقشه کلی تحلیل حساسیت نشان داد که مناطقی با کلاس‌های حساسیت بالا و بسیار بالا محدود به مکان‌های خاصی، عمدتاً مسیرهای جریان متمرکز و برخی از مسیرهای شبکه زهکشی هستند و توزیع مکانی یکنواختی در منطقه موردمطالعه ندارند بلکه تمایل مکانی محلی در حوضه تاجیار سراب دارند.

نتایج تحلیل حساسیت و ارزیابی عدم قطعیت مدل‌ها

تحلیل حساسیت ثابت کرد که تغییر وزن معیارها در محدوده ±۱۰ و ±۲۰ درصد بر مقدار شاخص حساسیت اثر گذاشت اما روند کلی نتایج را تغییر نداد. حساس‌ترین معیارها SPI، STI و زمین‌شناسی بودند. سناریوی کاهش ۲۰٪ وزن SPI بیشترین تأثیر را بر مدل SAW داشت. ضریب همبستگی این مورد ۰/۹۹۹۰ بود درحالی‌که MAE و RMSE به ترتیب ۰/۰۰۸۸ و ۰/۰۰۹۷ به دست آمد. بالا باقی ماندن ضرایب همبستگی در سناریوهای مختلف بیانگر پایداری نسبی الگوی پیوسته حساسیت در برابر تغییر وزن معیارها است. نتایج شبیه‌سازی مونت‌کارلو متشکل از ۵۰۰ تکرار امکان تأیید پایداری

نتایج سه مدل موردبررسی را فراهم کرد. میانگین ضریب همبستگی نتایج شبیه‌سازی مونت‌کارلو با حالت پایه برای مدل SAW، VIKOR و نقشه ترکیبی به ترتیب ۰/۹۹۷۹۸۶، ۰/۹۹۸۳۳۹ و ۰/۹۹۷۹۹۶ به دست آمد. درعین‌حال حداقل ضریب همبستگی برای این سه مدل به ترتیب ۰/۹۸۷۱۶۶، ۰/۹۹۰۹۲۳ و ۰/۹۸۷۹۹۳ بود. تغییر در خطا نیز پایداری نسبی نتایج هر سه مدل را تأیید کرد. مقادیر خطا نیز نشان داد که VIKOR نسبت به SAW تغییرات کمتری در برابر عدم قطعیت وزن‌ها داشته است (جدول ۶).

جدول ۶. شاخص‌های آماری ارزیابی عدم قطعیت وزن معیارها بر اساس شبیه‌سازی Monte Carlo

مدل	میانگین r	کمترین r	میانگین MAE	بیشترین MAE	میانگین RMSE
SAW	۰/۹۹۷۹۸۶	۰/۹۸۷۱۶۶	۰/۰۰۵۶۰۴	۰/۰۱۹۷۸۱	۰/۰۰۶۷۶۶
VIKOR	۰/۹۹۸۳۳۹	۰/۹۹۰۹۲۳	۰/۰۰۲۵۲۹	۰/۰۰۸۵۲۸	۰/۰۰۳۲۴۲
نقشه ترکیبی	۰/۹۹۷۹۹۶	۰/۹۸۷۹۹۳	۰/۰۰۴۰۴۵	۰/۰۱۴۱۵۴	۰/۰۰۴۹۸۰

تحلیل انحراف معیار پیکسل برای ۵۰۰ اجرای Monte Carlo امکان ارزیابی توزیع مکانی عدم قطعیت را فراهم کرد. میانگین انحراف معیار (SD) برای SAW، VIKOR و نقشه ترکیبی به ترتیب ۰/۰۰۶۹۰۸، ۰/۰۰۳۱۱۸ و ۰/۰۰۴۹۸۹ به دست آمد. انحراف معیار صدک ۹۵ برای نقشه ترکیبی ۰/۰۰۹۷۱۷ به این معنی که در آن ۹۵٪ پیکسل‌های SD کمتر یا مساوی این مقدار بود. کمترین مقادیر میانگین، میانه، صدک ۹۵ و حداکثر SD برای VIKOR ثبت شد که نشان‌دهنده حساسیت کمتر آن به تغییرات وزن معیارها در چهارچوب سناریوهای عدم قطعیت در مقایسه با SAW است (جدول ۷).

جدول ۷. شاخص‌های آماری عدم قطعیت مکانی مبتنی بر انحراف معیار پیکسل‌ها در اجرا شبیه‌سازی Monte Carlo

مدل	میانگین SD	میانه SD	صدک ۹۵SD	بیشینه SD
SAW	۰/۰۰۶۹۰۸	۰/۰۰۵۱۲۵	۰/۰۱۲۸۷۲	۰/۰۱۴۲۷۹
VIKOR	۰/۰۰۳۱۱۸	۰/۰۰۲۰۰۰	۰/۰۰۶۵۸۲	۰/۰۰۷۴۰۶
نقشه ترکیبی	۰/۰۰۴۹۸۹	۰/۰۰۳۵۴۰	۰/۰۰۹۷۱۷	۰/۰۱۰۸۳۱

به‌طورکلی نتایج تحلیل حساسیت و شبیه‌سازی Monte Carlo نشان داد که نتایج مبتنی بر نقشه‌های SAW، VIKOR و ترکیبی تحت تغییرات وزن‌ها از پایداری نسبی بالایی برخوردارند. اما نتایج تحلیل حساسیت و شبیه‌سازی مونت‌کارلو اعتبارسنجی مستقلی از وقایع سیل ارائه نمی‌دهند.

بحث

الگوی حساسیت به سیل در حوضه تاجیار–سراب نشان داد مناطقی با بالاترین حساسیت عمدتاً محلی و مرتبط با مسیرهای تمرکز جریان و شبکه زهکشی هستند. این الگو با نقش عوامل توپوگرافی–هیدرولوژیکی در تمرکز رواناب با یافته‌های خسروی و همکاران (۲۰۱۶)، رحمتی و همکاران (۲۰۱۶) و اصغری–سراسکانرود و همکاران (۱۴۰۴) که تأثیر کاربری اراضی، شیب، تجمع جریان، زمین‌شناسی، انحنای شیب و خاک را بر سیل‌خیزی را نشان دادند همخوانی دارد. بااین‌وجود تطابق مناطق حساس و شبکه زهکشی نباید به‌عنوان تأیید مستقل مدل تلقی شود زیرا معیارهایی مانند: فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی، TWI، SPI و STI مستقیم یا غیرمستقیم با DEM و تجمع جریان مرتبط‌اند. وزن بالای SPI و STI در روش آنتروپی باید با توجه به ماهیت این روش تفسیر شود. زیرا وزن‌ها درجه پراکندگی و تمایزپذیری

اطلاعات معیارها هستند نه اهمیت فیزیکی مطلق آن در تعیین وقوع سیلاب همبستگی بسیار بالای این دو شاخص (r=0.962) نشان می‌دهد که همپوشانی اطلاعات این دو شاخص مبتنی بر DEM قابل‌توجه است. بنابراین سهم بالای آن‌ها در مدل حساسیت به سیل دو عامل کاملاً مستقل تعیین نمی‌شود. همبستگی بالای ارتفاع و بارندگی نیز نشان می‌دهد که بخشی از تغییرپذیری مکانی بارندگی توسط توپوگرافی کنترل می‌شود. اگرچه منطق تجمیع معیارها متفاوت بود. نتایج SAW و VIKOR همگرایی بالایی با هم داشتند. SAW یک روش جبرانی مبتنی بر مفهوم مجموع وزنی است. VIKOR علاوه بر مطلوبیت کلی بیشینه پشیمانی را نیز در چارچوب راه‌حل سازشی در نظر می‌گیرد. ضریب همبستگی r۰/۹۴۹= بین داده‌های پیوسته نزدیک به ۱ است که نشان می‌دهد الگوهای تولیدشده توسط SAW و VIKOR مشابه هستند. مطالعه خسروی و همکاران (۲۰۱۹) نیز از هر دو روش استفاده کرد. بااین‌حال به دلیل کاربرد معیارها و وزن‌های یکسان نباید آن را به‌عنوان تأیید اعتبار در نظر گرفت. اختلاف بین طبقات پایین‌تر می‌تواند ناشی از تفاوت ساختار محاسباتی آن‌ها و توزیع متفاوت مقادیر پیوسته باشد. اگرچه مقایسه مستقیم نتایج به دلیل استفاده از مرزهای یکسان انجام شد اما کلاس حساسیت بسیار پایین غالب بود زیرا مقادیر به‌طور ناهموار توزیع‌شده بودند. به همین دلیل است که توافق کلاس‌های بالاتر نشان‌دهندهٔ دقت مدل‌ها نیست. تحلیل حساسیت مونت‌کارلو نشان داد که همه خروجی‌ها نسبتاً پایدارند. SPI، STI و زمین‌شناسی حساس‌ترین معیارها نسبت به تغییر وزن بودند. مقادیر پایین‌تر MAE، RMSE و انحراف معیار پیکسل برای VIKOR در مقایسه با SAW نشان داد که نتایج VIKOR در محدوده عدم قطعیت انتخاب‌شده حساسیت کمتری دارند. این پایداری صرفاً بیانگر مقاومت نسبی خروجی‌ها در برابر تغییر وزن است و جایگزین اعتبارسنجی مستقل با داده‌های واقعی رخداد سیلاب نمی‌شود

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور، متغیرهای ژئومورفولوژیکی و محیطی، وزن‌های آنتروپی شانون و دو روش تصمیم‌گیری چندمعیاره VIKOR و SAW الگوی مکانی حساسیت به سیل را در حوزه آبخیز تاجیار–سراب بررسی کرد. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که نقاط با حساسیت بالاتر به‌صورت محلی و نزدیک به مکان‌های خاص تمرکز جریان و بخش‌هایی از شبکه زهکشی توزیع‌شده‌اند. در نقشه ترکیبی مجموع کلاس حساسیت بالا و بسیار بالا منطقه کوچکی به مساحت ۰/۶۰ کیلومترمربع یا ٪۰/۰۹۴ از حوضه را شامل می‌شود. تمرکز مکانی محدود این مناطق در سطح حوضه است. که نشان‌دهنده عدم وجود مکان‌های مستعد سیل قابل‌توجه برای منطقه موردنظر است. علاوه بر این هنگام مقایسه خروجی‌های پیوسته SAW و VIKOR هر دو بسیار همگرا بودند و ضریب همبستگی r=۰/۹۴۹ به دست آمد. تحلیل حساسیت و همچنین شبیه‌سازی مونت‌کارلو با ۵۰۰ تکرار نشان داد که تغییرات در وزن معیارها تأثیر محدودی بر نتایج نهایی دارد. به‌طوری‌که مقدار میانگین ضریب همبستگی نقشه ترکیبی با حالت پایه ۰/۹۹۸ است. طبق روش VIKOR در محدوده عدم قطعیت نسبت به SAW حساسیت کمتری به تغییرات وزن‌ها دارند. به‌طورکلی نتایج تحلیل حساسیت پایداری نسبی در برابر تغییر وزن‌ها را نشان داد. محدودیت اصلی این تحقیق نبود پایگاه داده مکانی مستقل و قابل‌اعتمادی از وقایع سیل‌های تاریخی برای اعتبارسنجی است. بنابراین نتیجه نهایی این مطالعه یک نقشه حساسیت به سیل است. که پهنه‌هایی با حساسیت کمتر و نسبتاً حساس‌تر حوضه را برجسته می‌کند. علاوه بر این ارتباطات قوی مشاهده‌شده بین چندین شاخص مشتق شده از DEM به‌ویژه SPI و STI نیاز به تفسیر محتاطانه‌ای از تأثیر آن‌ها بر مدل نهایی است. از دیدگاه مدیریتی نقشه ترکیبی حساسیت به سیلاب می‌تواند به‌عنوان ابزار غربالگری

اولیه برای شناسایی و اولویت‌بندی نواحی نیازمند بررسی بیشتر مورداستفاده قرار گیرد. پهنه‌های دارای حساسیت بیشتر می‌توانند در مراحل بعدی برای انجام مطالعات میدانی، مدل‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی و بررسی تفصیلی شرایط کاربری اراضی، خاک و شبکه زهکشی در اولویت قرار گیرند. اجرای اقداماتی با هدف ایمن‌سازی مسیرهای جریان را پیشنهاد کرد. ارزیابی حساسیت به سیل می‌تواند از مطالعات جداگانه روی کرانه‌های نقاط سیلابی، تأیید میدانی و تجزیه‌وتحلیل داده‌های مستند و Sentinel-1 SAR از سیل‌های گذشته بهره‌مند شود. چنین داده‌هایی همراه با ارزیابی عدم قطعیت عوامل مؤثر، اعتبارسنجی مستقل چارچوب فعلی و بهبود آن را تسهیل می‌کند.

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی انجام شد.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان به‌طور مساوی در کلیهٔ مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش‌نویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی سازی مقاله مشارکت داشتند.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

در طول آماده‌سازی این اثر، نویسندگان از [Quillbot] به‌منظور پارافریز متن استفاده کردند. پس از استفاده از این ابزار، نویسندگان مطالب را در صورت نیاز بررسی و ویرایش کرده و مسئولیت کامل محتوای نشریه را بر عهده می‌گیرند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل‌دسترسی است

سپاسگزاری

از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

منابع

اصغری سراسکانرود، صیاد؛ صمدی شلوه علیا، فاطمه و حزباوی، زینب (۱۴۰۴). بررسی تغییر کاربری اراضی بر پهنه‌بندی خطر وقوع سیل در حوضه آبخیز سامیان. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۱۲ (۳)، ۳۹-۶۴. https://doi.org/10.66224/jsaeh.12.3.6_

اصغری سراسکانرود، صیاد؛ صمدی شلوه علیا، فاطمه؛ زینالی، بتول و حزباوی، زینب (۱۴۰۵). ارزیابی سناریوهای فصلی تغییر کاربری اراضی و تأثیر آن‌ها بر پهنه‌بندی خطر سیل در حوضه آبخیز سامیان با بهره‌گیری از پلتفرم Google Earth Engine. *فضای جغرافیایی*، ۲۶ (۹۳)، ۱۹۷-۲۱۷. https://doi.org/10.83252/geospa.2026.1.4201

حجازی، اسدالله؛ اندریانی، صغری؛ الماس پور، فرهاد و ابوالفضل، مختاری اصل (۱۳۹۴). استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و سنجش‌ازدور در محیط GIS برای بررسی مناطق حساس به وقوع سیلاب در حوضه لیقوان چای. *هیدروژئومورفولوژی*، ۲(۳)، ۶۱-۸۰. Dor:20.1001.1.23833254.1394.2.3.4.5

راثی نظامی، سعید؛ ایزدی فرد، هادی؛ خاوریان، حسن و رئوف، مصطفی‌زاده (۱۴۰۲). تغییرات کاربری/پوشش اراضی حوضه سامیان و ارتباط آن با کیفیت منابع آب سطح. *محیط زیست و مهندسی آب*، ۹(۳)،۴۱۳-۴۲۶. https://doi.org/10.22034/jewe.2022.341548.1783

رضائی مقدم، محمدحسین و رحیم پور، توحید. (۱۴۰۴). ارزیابی و پهنه‌بندی خطر وقوع سیل در حوضه آبریز آجی‌چای با استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره و روش آماری SI. *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۱۶ (۱)، ۴۲-۲۷. https://doi.org/10.61882/jwmr.2024.1265

عفیفی، محمدابراهیم. (۱۴۰۳). تهیه نقشه حساسیت سیلاب و احتمال وقوع آن با استفاده از مدل آنتروپی شانون (مطالعه موردی حوضه آبخیز رودخانه فیروزآباد). *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۲۴(۷۵)، ۳۷۸-۳۹۱.

References

Abedini, M., Grachrlo, M., & Sadeghi, A. (2024). Estimation of erosion and sedimentation using EPM and MPSIAC models, Case study: Tajyar watershed. *Geography and Human Relationships, 7*(1), 223–245. https://doi.org/10.22034/gahr.2023.404226.1901 [In Persian]

Afifi, M. E. (2024). Preparation of flood susceptibility map and its occurrence probability using Shannon entropy model (Case study of Firoozabad river basin). *Applied Research in Geographical Sciences, 24*(75), 378–391. https://doi.org/10.61186/jgs.24.75.2 [In Persian]

Asghari Saraskanroud, S., Samadi Shalveh Alia, F., & Hazbavi, Z. (2025). Assessment of land use/land cover change impact on flood hazard zonation in the Samian Watershed. *Spatial Analysis of Environmental Hazards, 12*(3), 39–64. https://doi.org/10.66224/jsaeh.12.3.6 [In Persian]

Asghari Saraskanroud, S., Samadi Shalveh Alia, F., & Hazbavi, Z. (2026). Assessment of seasonal land-use change scenarios and their impact on flood hazard zonation in the Samian Watershed using the Google Earth Engine platform. *Geographic Space, 26*(93), 197–217. https://doi.org/10.83252/geospa.2026.1.4201 [In Persian]

Chen, Y., Wang, D., Zhang, L., Guo, H., Ma, J., & Gao, W. (2023). Flood risk assessment of Wuhan, China, using a multi-criteria analysis model with the improved AHP-Entropy method. *Environmental Science and Pollution Research, 30*(42), 96001–96018. https://doi.org/10.1007/s11356-023-29066-8

Chitsaz, N., & Banihabib, M. E. (2015). Comparison of different multi criteria decision-making models in prioritizing flood management alternatives. *Water Resources Management, 29*(8), 2503–2525. https://doi.org/10.1007/s11269-015-0954-6

Costache, R., Pham, Q. B., Sharifi, E., Linh, N. T. T., Abba, S. I., Vojtek, M., ... & Khoi, D. N. (2019). Flash-flood susceptibility assessment using multi-criteria decision making and machine learning supported by remote sensing and GIS techniques. *Remote Sensing, 12*(1), 106. https://doi.org/10.3390/rs12010106

Danso, S. Y. (2025). GIS-driven hybrid multicriteria model for flood susceptibility assessment in a coastal metropolis of Ghana. *Geosystems and Geoenvironment, 5*(1), 100462. https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2025.100462

Duckstein, L., & Opricovic, S. (1980). Multiobjective optimization in river basin development. *Water Resources Research, 16*(1), 14–20. https://doi.org/10.1029/WR016i001p00014

Fishburn, P. C. (1967). Additive utilities with incomplete product sets: Application to priorities and assignments. *Operations Research, 15*(3), 537–542. https://doi.org/10.1287/opre.15.3.537

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., ... & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data, 2*(1), 150066. https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66

Ghorbani, A., Zabihi, M., & Mostafazadeh, R. (2025). Determining the distribution pattern of spatial correlation of flood occurrence in Ardabil Province using Moran's index in GIS. *Journal of RS and GIS for Natural Resources, 16*(2), 69–87. https://doi.org/10.30495/girs.2023.1977963.2036

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment, 202*, 18–27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

Hafezalkotob, A., & Hafezalkotob, A. (2016). Extended MULTIMOORA method based on Shannon entropy weight for materials selection. *Journal of Industrial Engineering International, 12*(1), 1–13. https://doi.org/10.1007/s40092-015-0123-9

Haghizadeh, A., Fathiganji, R., Sohrabi, E., Lotfi, A., & Ghasemi, L. (2025). A framework for flood risk zoning and prioritization combining maximum entropy and game theory. *Scientific Reports*, *15*, 24153. https://doi.org/10.1038/s41598-025-08220-x

Hejazi, A., Andariani, S., Almaspour, F., & Mokhtari Asl, A. (2015). Using multi criteria decision making and remote sensing techniques in GIS environment for flood susceptible zones assessment in Lighvan Chai Catchment. *Journal of Hydrogeomorphology*, *2*(3), 61–80. https://doi.org/20.1001.1.23833254.1394.2.3.4.5 [In Persian]

Ikram, R. M. A., Meshram, S. G., Hasan, M. A., Cao, X., Alvandi, E., Meshram, C., & Islam, S. (2024). The application of multi-attribute decision making methods in integrated watershed management. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, *38*(1), 297–313. https://doi.org/10.1007/s00477-023-02557-3

Kanani-Sadat, Y., Arabsheibani, R., Karimipour, F., & Nasseri, M. (2019). A new approach to flood susceptibility assessment in data-scarce and ungauged regions based on GIS-based hybrid multi criteria decision-making method. *Journal of Hydrology*, *572*, 17–31. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.034

Khosravi, K., Nohani, E., Maroufinia, E., & Pourghasemi, H. R. (2016). A GIS-based flood susceptibility assessment and its mapping in Iran: A comparison between frequency ratio and weights-of-evidence bivariate statistical models with multi-criteria decision-making technique. *Natural Hazards*, *83*(2), 947–987. https://doi.org/10.1007/s11069-016-2357-2

Khosravi, K., Shahabi, H., Pham, B. T., Adamowski, J., Shirzadi, A., Pradhan, B., ... & Prakash, I. (2019). 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

Koley, S., Alam, M., & Kumar, S. N. (2026). Integrating statistical analysis and decision-making to assess flood susceptibility in Indian mountainous agroecosystems. *Journal of Earth System Science*, *135*(2), 77. https://doi.org/10.1007/s12040-026-02781-9

Li, H., Chen, C., Yuan, Y., Xia, X., Huang, Q., Ye, L., & Huang, Z. (2025). Equity analysis of bus network balance from the perspective of spatial morphology and service capability. *Scientific Reports*, *15*(1), 2339. https://doi.org/10.1038/s41598-025-86318-y

Mitra, R., & Das, J. (2023). A comparative assessment of flood susceptibility modelling of GIS-based TOPSIS, VIKOR, and EDAS techniques in the Sub-Himalayan foothills region of Eastern India. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(6), 16036–16067. https://doi.org/10.1007/s11356-022-23168-5

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

Negese, A., Worku, D., Shitaye, A., & Getnet, H. (2022). Potential flood-prone area identification and mapping using GIS-based multi-criteria decision-making and analytical hierarchy process in Dega Damot district, northwestern Ethiopia. *Applied Water Science*, *12*(12), 255. https://doi.org/10.1007/s13201-022-01772-7

Opricovic, S., & Tzeng, G. H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, *156*(2), 445–455. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1

Patel, K. F., Fansler, S. J., Campbell, T. P., Bond-Lamberty, B., Smith, A. P., RoyChowdhury, T., ... & Bailey, V. L. (2021). Soil texture and environmental conditions influence the biogeochemical responses of soils to drought and flooding. *Communications Earth & Environment*, *2*(1), 127. https://doi.org/10.1038/s43247-021-00198-4

Rahmati, O., Pourghasemi, H. R., & Zeinivand, H. (2016). Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golastan Province, Iran. *Geocarto International*, *31*(1), 42–70. https://doi.org/10.1080/10106049.2015.1041559

Rathi Nezamabadi, S. S., Izadifard, H., Khavarian, H., & Mostafazadeh, R. (2023). *Land use/land cover changes in the Samian watershed and their relationship with surface water quality*. https://doi.org/10.22034/jewe.2022.341548.1783 [In Persian]

Rezaei Moghaddam, M. H., & Rahimpour, T. (2025). Evaluation and zoning of flood hazard in the Aji Chai Basin using the multi-criteria decision-making technique and a statistical method (SI). *Journal of Watershed Management Research*, *16*(1), 27–42. https://doi.org/10.61882/jwmr.2024.1265 [In Persian]

Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, *27*(3), 379–423. https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x

Solaimani, K., & Mohseni, Be. (2024). Determining the priority of flood risk zoning using geographic information system in Babolrud watershed (Mazandaran Province). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, *15*(2), 28–53. https://doi.org/10.30495/girs.2022.697113

Tehrany, M. S., Pradhan, B., & Jebur, M. N. (2014). Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. *Journal of Hydrology*, *512*, 332–343. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.008