Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University

Journal of Watershed Management Research, Vol. 16, Issue 1, 2025 p: 27-42

OPEN ACCESS

Research Paper

Evaluation and Zoning of Flood Hazard in the Aji Chai Basin Using the Multi-Criteria Decision-Making Technique and a Statistical Method (SI)

Mohammad Hossein Rezaei Moghaddam[1] and Tohid Rahimpour[2]

1- Professor, Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran, (Corresponding author: rezmogh@tabrizu.ac.ir)
2- Postdoctoral Researcher, Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received: 28 April 2024 Revised: 19 Agusut 2024 Accepted: 12 September 2024

Extended Abstract

Background: Floods are one of the most important natural hazards that annually inflict irreparable devastation across the country. Spatial analysis of flood hazard sensitivity and the preparation of hazard maps are important approaches in flood management. The Aji Chai Basin's large area and special geographical conditions make it one of the basins with high flooding hazards. As a result, the current study mainly aims to use a statistical model and multi-criteria decision-making techniques to create a flood hazard map for this basin. For this reason, flood hazard maps were created using 18 parameters affecting the occurrence of floods. The investigated parameters were Elevation, Slope, Aspect, Topographic wetness index, Sediment transport index, Stream power index, Earth curvature, Drainage texture, Rainfall, Distance to the river, River density, Lithology, Hydrological soil groups, Geomorphology, Distance to bridge, Distance to dam, Normalized Difference Vegetation Index, and Land use.

Methods: The study area of this research is the Aji Chai Basin, which is located in East Azerbaijan Province in terms of political divisions. The Aji Chai Basin is located in an almost rectangular shape between the Sabalan Mountain and the Ghoshe Dagh mountain range in the north, the Boz Gosh mountain range in the south, and the Sahand Mountain in the southwest. The area of this basin is about 10985.9 km^2. The elevation changes of the basin are from 1255 m at the outlet of the basin to 3816 m on the slopes of Sabalan Mountain. In general, the Sabalan and Sahand mountains, with a height above 3600 m, are considered the most important topographic features in the region's roughness. The average annual rainfall of the Aji Chai Basin is about 315 mm based on the information from synoptic stations (Four stations, viz. Tabriz, Bostan Abad, Sarab, and Heris) and rain gauges (24 stations) available in the region.

To achieve the research aim, the Analytical Network Process (ANP) model was employed as a multi-criteria decision analysis method, and the Statistical Index (SI) model was utilized as a two-variable statistical method. The Analytical Network Process is one of the multi-criteria decision-making methods developed by Saaty in 1996. The statistical index (SI) method was introduced by Van Westen in 1997. The research models were implemented using the location of 274 flood points that happened in the past. The map of the location of flood points in the area was prepared through the information of the regional water company of East Azerbaijan Province, field survey, and the Landsat 8 satellite image of the OLI-TIRS sensor. The accuracy of the results was evaluated using three statistical indices, namely Sensitivity, Specificity, and Accuracy, along with the ROC curve and the area under the curve (AUC).

Results: The results of parameter weighting using the ANP model showed that the rainfall, geomorphology, and slope are the three parameters with the highest weight with coefficients of 0.137, 0.104, and 0.101, respectively, indicating the great influence of these factors on the occurrence of floods in the region. On the other hand, the sediment transport index and stream power index were the two parameters of the lowest weight. The evaluation of the importance of the parameters using the SI model also showed that areas near rivers and bridges and low-altitude and low-slope areas were susceptible to flood hazards. The final maps were prepared from the product of the weights of each of the parameters in their information layers and in five classes from very low to very high potential. Examining the final maps showed that the distribution pattern of hazard zones was similar in both models, and flat and plain surfaces were identified as areas with a high flooding hazard. The important cities of the basin, such as Tabriz, Sarab, and Bostanabad, are also in high and very high hazard classes, which shows the vulnerability of these cities when destructive floods occur. Since these cities are formed along the rivers, it shows the

Copyright ©2025 Rezaei Moghaddam et al. Published by Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 Unported License, which allows users to read, copy, distribute, and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1265]

need for authorities to pay serious attention to urban flood management. On the other hand, the heights and steep slopes have the lowest potential for flooding.

Conclusion: Examining the area of each flood hazard class in the research models showed that about 34% and 46% of the areas of the region in the ANP and SI models, respectively, were in high and very high areas in terms of flooding. Examining the maps shows that the metropolis of Tabriz, which is considered the most important population center in the basin, is located in high and very high classes in terms of flooding due to its development along the Mehranroud and Aji Chai rivers. This shows the need for the serious attention of the regional authorities to manage the flood hazard in the basin as best as possible. The results of evaluating the accuracy of the models showed that the performance of both models was good in preparing the maps of the flood hazard potential in the region. Nevertheless, the SI model with a coefficient of 0.945 has the highest value of the AUC, which indicates the greater accuracy of this model compared to the ANP model.

Keywords: Analytic Network Process, Aji Chai basin, Flood, Zoning, Statistical Index

How to Cite This Article: 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). *J Watershed Manage Res*, 16(1), 27-42. DOI: 10.61882/jwmr.2024.1265

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1265]

مقاله پژوهشی

ارزیابی و پهنه‌بندی خطر وقوع سیل در حوضه آبریز آجی‌چای با استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره و روش آماری SI

محمدحسین رضائی مقدم[1] و توحید رحیم‌پور[2]

۱- استاد، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، (نویسنده مسوول: rezmogh@tabrizu.ac.ir)
۲- پژوهشگر پسادکتری، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۹ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۲
صفحه۲۷ تا ۴۲

چکیده مبسوط

مقدمه: سیلاب‌ها از جمله مهم‌ترین مخاطرات محیطی محسوب می‌شوند که همه‌ساله خسارات جبران‌ناپذیری را در سراسر کشور بر جای می‌گذارند. تحلیل فضایی حساسیت خطر وقوع سیل و تهیه نقشه‌های خطر، یک رویکرد مهم در مدیریت سیلاب است. حوضه آبریز آجی‌چای به‌دلیل گستردگی مساحت و دارا بودن شرایط خاص جغرافیایی جزو حوضه‌های با پتانسیل بالای خطر وقوع سیل در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، هدف اصلی از تحقیق حاضر تهیه نقشه پتانسیل خطر وقوع سیل در این حوضه با استفاده از دو روش تصمیم‌گیری چند معیاره و مدل آماری است. به همین منظور، از ۱۸ پارامتر مؤثر در وقوع سیل جهت تهیه نقشه‌های پتانسیل خطر وقوع سیلاب استفاده گردید. پارامترهای مورد بررسی عبارت بودند از ارتفاع، شیب، جهت شیب، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص حمل رسوب، شاخص قدرت آبراهه، انحنای زمین، بارش، فاصله از آبراهه، تراکم آبراهه، لیتولوژی، گروه‌های هیدرولوژیکی خاک، ژئومورفولوژی، فاصله از پل، فاصله از سد، NDVI و کاربری اراضی.

مواد و روش‌ها: محدوده مورد مطالعه تحقیق حاضر حوضه آبریز آجی‌چای است که از نظر تقسیمات سیاسی در استان آذربایجان شرقی واقع شده است. حوضه آبریز آجی‌چای به شکل تقریباً مستطیلی بین کوهستان سبلان و رشته‌کوه قوشه داغ در شمال، رشته‌کوه بزقوش در جنوب و کوهستان سهند در جنوب غرب قرار گرفته است. مساحت این حوضه حدود ۱۰۹۸۵/۹ کیلومترمربع است. تغییرات ارتفاعی حوضه از ۱۲۵۵ متر در خروجی حوضه تا ۳۸۱۶ متر در دامنه‌های کوهستان سبلان هستند. به‌طور کلی، دامنه‌های سبلان و سهند با ارتفاع بالای ۳۶۰۰ متر به عنوان مهم‌ترین عوارض توپوگرافی در سیمای ناهمواری‌های منطقه محسوب می‌شوند. میانگین بارش سالانه حوضه آجی‌چای بر اساس اطلاعات ایستگاه‌های سینوپتیک (چهار ایستگاه تبریز، بستان‌آباد، سراب و هریس) و باران‌سنجی (۲۴ ایستگاه) موجود در سطح منطقه، حدود ۳۱۵ میلی‌متر است. در پژوهش حاضر، از مدل فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) به‌عنوان یک روش تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره و مدل شاخص آماری (SI) به عنوان یک روش آماری دو متغیره جهت دستیابی به هدف تحقیق استفاده گردید. فرآیند تحلیل شبکه‌ای یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که توسط توماس ال ساعتی در سال ۱۹۸۰ توسعه یافته است. روش شاخص آماری (SI) توسط ون وستن در سال ۱۹۹۷ معرفی شد، به‌منظور اجرای مدل‌های تحقیق از موقعیت ۲۷۴ نقطه سیلابی که در گذشته اتفاق افتاده‌اند، استفاده شد. نقشه موقعیت نقاط سیلاب‌های منطقه از طریق اطلاعات شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی، بازدیدهای میدانی و همچنین تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ سنجنده OLI-TIRS تهیه گردید. به‌منظور ارزیابی دقت نتایج هریک از مدل‌ها، از سه شاخص آماری Sensitivity، Specificity و Accuracy به‌همراه منحنی ROC و سطح زیر منحنی (AUC) استفاده گردید.

یافته‌ها: نتایج وزن‌دهی پارامترها با استفاده از مدل ANP نشان داد که سه پارامتر بارش، ژئومورفولوژی و شیب به‌ترتیب با ضرایب ۰/۱۳۷، ۰/۱۰۴ و ۰/۱۰۱ بیشترین وزن را داشتند که بیانگر تأثیر زیاد این عوامل در وقوع سیلاب‌های منطقه است. در مقابل، دو پارامتر شاخص حمل رسوب و شاخص قدرت آبراهه کمترین وزن را داشتند. ارزیابی اهمیت پارامترها با استفاده از مدل SI نیز نشان داد که مناطق نزدیک رودخانه‌ها و پل‌ها، سطوح کم‌ارتفاع و دارای شیب کم مستعد خطر وقوع سیل هستند. نقشه‌های نهایی از حاصل ضرب وزن هر کدام از پارامترها در لایه‌های اطلاعاتی آن‌ها و در پنج طبقه از پتانسیل خیلی کم تا خیلی زیاد تهیه شد. بررسی نقشه‌های نهایی نشان داد که الگوی پراکنش پهنه‌های خطر در هر دو مدل مشابه هم بودند و سطوح هموار و دشتی جزو مناطق با خطر بالای وقوع سیل شناسایی شدند. شهرهای مهم حوضه از قبیل تبریز، سراب و بستان‌آباد نیز در پهنه‌های با خطر زیاد و خیلی زیاد قرار دارند که آسیب‌پذیری این شهرها را به‌هنگام وقوع سیلاب‌های مخرب نشان می‌دهد. این شهرها در مسیر رودخانه‌ها شکل گرفته‌اند، بنابراین لزوم توجه جدی مسئولان به امر مدیریت سیلاب‌های شهری را دوچندان می‌کند. در مقابل، ارتفاعات و دامنه‌های شیب‌دار کم‌ترین پتانسیل را جهت وقوع سیل دارند.

نتیجه‌گیری: بررسی مساحت هریک کلاس‌های خطر وقوع سیل در مدل‌های تحقیق نشان داد که در مدل ANP حدود ۳۴ درصد و در مدل SI نیز ۴۶ درصد از مساحت منطقه در پهنه‌های زیاد و خیلی زیاد از نظر وقوع سیل قرار داشتند. بررسی نقشه‌ها نشان داد که کلان‌شهر تبریز، که مهم‌ترین مرکز جمعیتی داخل حوضه محسوب می‌شود، به‌دلیل توسعه در امتداد رودخانه‌های مهران‌رود و آجی‌چای در پهنه‌های زیاد و خیلی زیاد از نظر وقوع سیل قرار دارد. این امر لزوم توجه جدی مسئولان منطقه را جهت مدیریت هرچه بهتر مخاطره سیلاب در داخل حوضه نشان می‌دهد. نتایج ارزیابی دقت مدل‌ها نشان می‌دهند که عملکرد هر دو مدل در تهیه نقشه‌های پتانسیل خطر وقوع سیل در منطقه خوب بوده‌است. با این وجود، مدل SI با ضریب ۰/۹۴۵ بیشترین مقدار سطح زیر منحنی را دارد که بیانگر دقت بیشتر این مدل در مقایسه با مدل ANP است.

واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی، حوضه آبریز آجی‌چای، سیل، شاخص آماری، فرایند تحلیل شبکه‌ای

مقدمه

سیل جریان شدید آب است که بیش از ظرفیت کانال رودخانه است و باعث آب‌گرفتگی زمین‌های اطراف رودخانه و موجب خسارات جانی و مالی می‌شود. سیلاب‌ها در طول تاریخ زمین رخ داده‌اند و تا زمانی که چرخه هیدرولوژی ادامه دارد، اتفاق خواهند افتاد (Saeed, 2020). سیلاب‌ها بیش از سایر مخاطرات طبیعی مانند زمین‌لغزش، آتشفشان یا زلزله رخ می‌دهند و دامنه تأثیر آن‌ها وسیع‌تر است (Youssef *et al.,* 2011). این پدیده بیش از هر مخاطره طبیعی دیگری به مناطق شهری و غیرشهری آسیب می‌رساند (Khosravi *et al.,* 2016). سیل مخرب‌ترین فاجعه در سرتاسر جهان است و بیشترین تعداد کشته و زخمی را به‌همراه دارد (Nachappa *et al.,* 2020). طبق گزارش‌های سازمان بهداشت جهانی بین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۷ حدود ۲ میلیارد نفر در سرتاسر دنیا از

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1265]

سیلاب‌ها متأثر شده‌اند (WHO, 2022). در میان مخاطرات طبیعی مختلف، سیل به‌عنوان مخرب‌ترین مخاطره طبیعی در جهان شناخته می‌شود که خسارات زیادی به زندگی، دارایی و زیرساخت‌های انسان وارد می‌کند (Mishra & Sinha, 2020; Costache, 2019). سیلاب‌ها می‌توانند به‌طور طبیعی از طریق بارندگی طولانی‌مدت، بارش سنگین و ذوب برف یا غیرطبیعی مانند افزایش تخریب ناشی از رشد جمعیت، جنگل‌زدایی و شهرنشینی رخ دهند (Chan *et al.,* 2018; Van & Schwarz, 2020). در چند دهه اخیر به‌دلیل روند مداوم تغییرات آب‌وهوایی، فراوانی و شدت سیلاب‌ها به‌سرعت افزایش یافته است (Ghosh *et al.,* 2022). اگر بزرگی و شدت سیل در حد معینی باشد، برای اکوسیستم طبیعی می‌تواند مفید باشد. از جمله این مزیت‌ها می‌توان به تغذیه سطح آب زیرزمینی، افزایش حاصل‌خیزی خاک، افزودن مواد مغذی در سواحل رودخانه و افزایش بهره‌وری دشت سیلابی اشاره کرد (Zhang *et al.,* 2017; Kraus *et al.,* 2019). درصورتی‌که مقدار و بزرگی سیل از حد مجاز آستانه آن فراتر رود، می‌تواند جان‌ها و اموال عظیم، زمین‌های کشاورزی، منابع آب، مناطق مسکونی و زیستگاه طبیعی را از بین ببرد (Wu *et al.,* 2017). در شمال غرب ایران با شروع فصل بهار و آغاز بارندگی‌های بهاره سیلاب‌های متعددی اتفاق می‌افتد که در بیشتر موارد با خسارت‌های سنگینی همراه می‌شود (Rezaei Moghaddam *et al.,* 2020a). از وقوع این پدیده نمی‌توان جلوگیری کرد ولی با انجام اقداماتی می‌توان اثرات ناشی از آن را تا حدّ زیادی کاهش داد (Avand *et al.,* 2022). لذا، تحلیل فضایی حساسیت خطر وقوع سیل و تهیه نقشه‌های خطر، یک رویکرد مهم در مدیریت سیلاب است. حوضه آبریز آجی‌چای به‌دلیل گستردگی مساحت، دریافت بارش مناسب در طول سال و شرایط خاص توپوگرافی از پتانسیل بالایی جهت وقوع سیل برخوردار است. بنابر این، تحقیق حاضر با هدف تهیه نقشه‌های پتانسیل خطر وقوع سیل در این حوضه انجام شده است.

تحقیقات خوبی در رابطه با تهیه نقشه‌های پتانسیل خطر وقوع سیل در داخل و خارج از کشور انجام گرفته‌اند که در ادامه به برخی از تازه‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود.

عابدینی و بهشتی جاوید (Abedini & beheshti javid, 2016) خطر وقوع سیلاب را در حوضه آبریز لیقوان با استفاده از مدل فرآیند تحلیل شبکه و سیستم اطلاعات جغرافیایی پهنه‌بندی کردند. در این تحقیق، از ۱۰ پارامتر طبیعی و انسانی شامل شیب زمین، جهت شیب، انحنای پلان و پروفیل، کاربری زمین، بارش، جنس زمین، خاک‌شناسی، تراکم پوشش گیاهی و تراکم شبکه آبراهه استفاده گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که بخش‌های جنوبی حوضه با قرارگیری در پهنه‌های با پتانسیل خیلی زیاد و زیاد، به‌عنوان سیل‌خیزترین بخش‌های حوضه معرفی شده‌اند و به‌ترتیب ۱۱ و ۲۳/۶ درصد از مساحت حوضه را شامل می‌شوند.

مختاری و همکاران (Mokhtari *et al.,* 2020) اقدام به تهیه نقشه خطر وقوع سیلاب در حوضه آبریز گمناب‌چای با استفاده از مدل ANP و تکنیک GIS کردند. در این تحقیق، جهت تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع سیل از ۱۰ فاکتور مؤثر در وقوع این پدیده شامل بارش، لیتولوژی، کاربری اراضی، شیب، تراکم پوشش گیاهی، شاخص قدرت آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافیک، تراکم زهکشی، شاخص حمل رسوب و ضریب گراویلیوس استفاده شد. نتایج وزن‌دهی معیارها نشان دادند که پارامترهای بارش، لیتولوژی، کاربری اراضی و شیب بیشترین وزن را داشتند. همچنین ۲۱۰ کیلومترمربع (۵۰ درصد) از مساحت منطقه در معرض خطر وقوع سیلاب قرار داشت.

یاریان و همکاران (Yariyan *et al.,* 2020) با استفاده از فرآیند تحلیل شبکه‌ای و مدل‌های آماری نقشه حساسیت خطر وقوع سیل را در شهرستان سقز واقع در استان کردستان تهیه کردند. روش‌های نسبت فراوانی (FR)، تابع شواهد قطعی (EBF) و میانگین وزنی مرتب‌شده (OWA) از جمله روش‌های آماری مورد استفاده در این تحقیق بودند. در این تحقیق، از ۱۰ پارامتر مؤثر در وقوع سیل شامل شیب، بارش، طول شیب، شاخص رطوبت توپوگرافی، جهت شیب، ارتفاع، انحنا، فاصله از رودخانه، زمین‌شناسی و کاربری اراضی استفاده گردید. نتایج ارزیابی دقت مدل‌ها بر اساس منحنی ROC نشان دادند که مدل فرآیند تحلیل شبکه‌ای همراه با مدل تابع شواهد قطعی از دقت بیشتری برخوردار بودند.

اسفندیاری درآباد و همکاران (Esfandiary Darabad *et al.,* 2021) با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره ANP و WLC به پهنه‌بندی پتانسیل خطر وقوع سیل در حوضه آبریز قطورچای پرداختند. در این پژوهش، از عواملی همچون کاربری اراضی، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی، توپوگرافی، شیب و قابلیت اراضی استفاده گردید. نتایج تحقیق نشان داد که مناطق پایین‌دست حوضه که عمدتاً شیب‌های کمتر از ۳ درصد را شامل می‌شدند، از پتانسیل بسیار بالایی نسبت به وقوع سیل برخوردار بودند.

مسابی و ماکنیو (Msabi & Makonyo, 2021) نقشه حساسیت خطر سیل را با استفاده از تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره و GIS برای منطقه دودوما واقع در کشور تانزانیا تهیه نمودند. در این تحقیق، از ۷ پارامتر مؤثر در وقوع سیل، یعنی ارتفاع، شیب، زمین‌شناسی، تراکم زهکشی، جریان تجمعی، کاربری زمین و خاک، استفاده شد. جهت وزن دهی پارامترها از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) استفاده گردید. نتایج تحقیق نشان دادند که حدود ۴۰ درصد از مساحت منطقه در طبقات زیاد و خیلی زیاد از نظر حساسیت خطر وقوع سیل قرار داشتند. جهت ارزیابی نقشه نهایی از موقعیت سیلاب‌های تاریخی در هریک از طبقات حساسیت خطر استفاده گردید. نتایج ارزیابی نشان دادند که مدل فرآیند تحلیل سلسله مراتبی با سطح زیرمنحنی (AUC) برابر با ۸۷/۲۴ درصد از دقت خوبی در تهیه نقشه پهنه‌بندی برخوردار بوده است.

موسوی و همکاران (Mousavi *et al.,* 2022) به مقایسه روش‌های آماری و MCDM در تهیه نقشه حساسیت سیل پرداختند. منطقه مورد مطالعه این تحقیق حوضه آبریز محمدآباد واقع در استان گلستان بود. پارامترهای مورد استفاده در این پژوهش عبارت بودند از ارتفاع، شیب، جهت شیب، انحنای پلان، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص قدرت آبراهه، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی، NDVI، نوع خاک، زمین‌شناسی و

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1265]

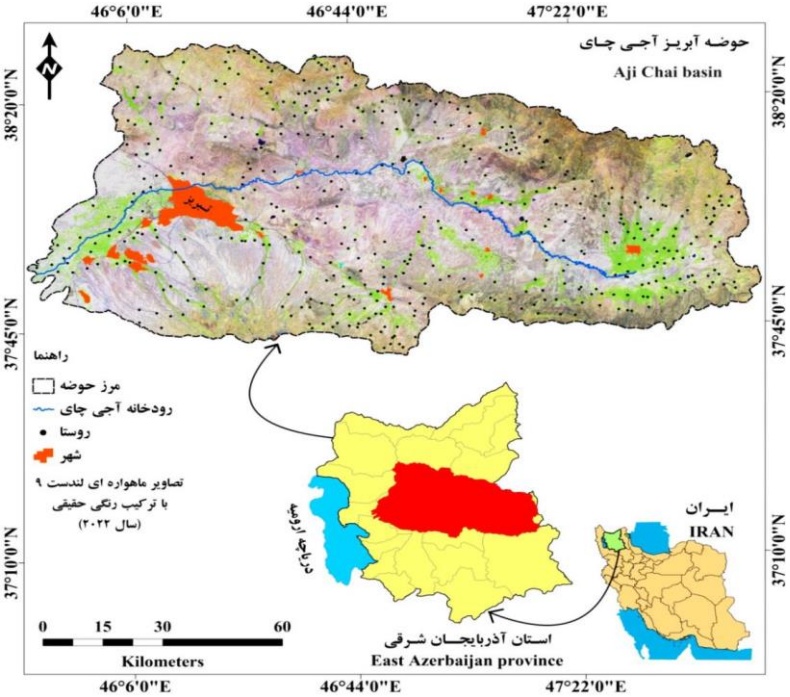
کاربری اراضی. در ادامه از دو روش آماری تبع شواهد قطعی (EBF) و وزن شواهد (WOE) و همچنین از روش تاپسیس به‌عنوان یک روش تصمیم‌گیری چند معیاره جهت تهیه نقشه خطر سیل استفاده گردید. نتایج تحقیق نشان دادند که پارامتر شیب با وزن ۰/۲۵ به‌عنوان مهم‌ترین عامل در شکل‌گیری سیلاب منطقه بود. همچنین ارزیابی عملکرد مدل‌ها نشان داد که روش تاپسیس با سطح زیر منحنی (AUC) برابر با ۰/۸۴۲۳ بالاترین کارایی را داشت.

جودی و همکاران (Jodi *et al.*, 2023) با استفاده از مدل نسبت فراوانی اقدام به تهیه نقشه حساسیت خطر وقوع سیل در حوزه آبخیز خیاوچای واقع در استان اردبیل کردند. در این پژوهش، از عواملی همچون طبقات ارتفاعی، شیب، انحنای زمین، شاخص رطوبت توپوگرافی، فاصله از رودخانه، جهت، تراکم زهکشی، گروه هیدرولوژیکی خاک، زمین‌شناسی و کاربری اراضی استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد که زیرحوضه‌های واقع در مجاورت خروجی حوزه بیشترین حساسیت به سیل را داشتند.

رحیم‌پور و همکاران (Rahimpour *et al.*, 2023) با استفاده از یک رویکرد طبقه‌بندی ترکیبی نوین به مدل‌سازی حساسیت خطر وقوع سیل در حوضه آبریز الندچای واقع در شهرستان خوی پرداختند. جهت انجام این تحقیق از ۱۳ پارامتر مؤثر در وقوع سیل استفاده گردید. مدل ترکیبی مورد استفاده در این تحقیق FURIA-GA-LogitBoost بود. نتایج این تحقیق نشان داد که مناطق پایین‌دست حوضه پتانسیل بالایی را از نظر وقوع سیل داشتند. همچنین، شهر خوی که در قسمت خروجی حوضه قرار دارد جزو مناطق با خطر سیل‌گیری بالا شناسایی شد. ارزیابی دقت مدل تحقیق با استفاده از منحنی ROC و سطح زیر منحنی (AUC) نشان داد که مدل تحقیق به‌ترتیب با ضرایب ۰/۸۶۱ و ۰/۸۹۵ از نظر داده‌های آموزشی و اعتبارسنجی، عملکرد خوبی را در تهیه نقشه خطر وقوع سیل داشت .

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه تحقیق حاضر حوضه آبریز آجی‌چای است که از نظر تقسیمات سیاسی در استان آذربایجان شرقی واقع شده است. حوضه آبریز آجی‌چای به شکل تقریباً مستطیلی بین کوهستان سبلان و رشته‌کوه قوشه داغ در شمال، رشته‌کوه بزقوش در جنوب و کوهستان سهند در جنوب غرب قرار گرفته است. این حوضه از نظر موقعیت جغرافیایی بین ″۰۳ ′۴۱ °۳۷ تا ″۰۷ ′۲۹ °۳۸ عرض شمالی و ″۰۷ ′۴۸ °۴۵ تا ″۴۸ ′۵۳ °۴۷ طول شرقی قرار دارد (شکل ۱). مساحت این حوضه حدود ۱۰۹۸۵/۹ کیلومترمربع است. تغییرات ارتفاعی حوضه از ۱۲۵۵ متر در خروجی حوضه تا ۳۸۱۶ متر در دامنه‌های کوهستان سبلان هستند. به طور کلی، دامنه‌های سبلان و سهند با ارتفاع بالای ۳۶۰۰ متر به عنوان مهم‌ترین عوارض توپوگرافی در سیمای ناهمواری‌های منطقه محسوب می‌شوند. حوضه آبریز آجی‌چای به‌دلیل گستردگی مساحت و کوهستانی بودن از تنوع آب و هوایی قابل توجهی برخوردار است. فصول زمستان و بهار به عنوان فصول بارندگی منطقه محسوب می‌شوند و بیشترین میزان بارندگی نیز در بهار مشاهده می‌شود. میانگین بارش سالانه حوضه آجی‌چای بر اساس اطلاعات ایستگاه‌های سینوپتیک (۴ ایستگاه تبریز، بستان‌آباد، سراب و هریس) و باران‌سنجی (۲۴ ایستگاه) موجود در سطح منطقه حدود ۳۱۵ میلی‌متر است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در استان آذربایجان شرقی، ایران
Figure 1. Geographical location of the study area in East Azerbaijan Province, Iran

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1265]

روش تحقیق

روش‌های کمی و کیفی متعددی توسط محققان مختلف به‌منظور مدل‌سازی و تهیه نقشه‌های پتانسیل خطر وقوع سیل ارائه شده‌است. از جمله این روش‌ها می‌توان به‌روش‌های تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره، روش‌های هیدرولوژیکی، مدل‌های آماری و الگوریتم‌های داده‌کاوی و یادگیری ماشین اشاره کرد. لذا در پژوهش حاضر از مدل فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) به‌عنوان یکی از شناخته شده‌ترین روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و همچنین روش شاخص آماری به‌عنوان یکی از مدل‌های آماری استفاده شده است.

مدل شاخص آماری (SI[1])

روش شاخص آماری (SI) توسط ون وستن در سال ۱۹۹۷ معرفی شد (Wu *et al.,* 2016). این روش یک تحلیل آماری دو متغیره است که به‌طور گسترده در بسیاری از مطالعات مورد استفاده قرار گرفته است (Wu *et al.,* 2016; Oztekin&Topal, 2005). در روش شاخص آماری، مقدار ضریب وزنی برای هر واحد طبقه‌بندی به‌عنوان لگاریتم طبیعی از تراکم خطر سیل در هر طبقه تقسیم بر تراکم خطر سیل برای کل محدوده مورد مطالعه تعریف می‌شود. این روش بر اساس توزیع خطر سیل در هر طبقه است (Cao *et al.,* 2016). این روش با استفاده از رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$W_{ij} = \ln\left(\frac{D_{ij}}{D}\right) = \ln\left[\left(\frac{N_{ij}}{M_{ij}} \Big/ \frac{N}{M}\right)\right] \qquad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه W_{ij} وزن داده شده به کلاس i از پارامتر j است. D_{ij} تراکم خطر سیل در کلاس i از پارامتر j و D تراکم کلی خطر وقوع سیل در محدوده مورد مطالعه هستند. N_{ij} تعداد پیکسل‌های خطر وقوع سیل در کلاس i از پارامتر j و M_{ij} تعداد پیکسل‌ها در کلاس i از پارامتر j هستند. N تعداد کل پیکسل‌های خطر وقوع سیل در محدوده مورد مطالعه و M تعداد کل پیکسل‌های محدوده مورد مطالعه هستند. ازآنجایی‌که لگاریتم طبیعی (ln) تعریف نشده‌است، مقدار وزنی (Wij) را فقط می‌توان برای کلاس‌هایی که حاوی خطرات سیل ناگهانی هستند محاسبه کرد.

$$FFHSI = \sum_{R=1}^{R=n} W_{ij} \qquad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن FFHSI، Wij و n به‌ترتیب نشان‌دهنده شاخص حساسیت خطر وقوع سیل، مقادیر وزنی کلاس i از پارامتر j با استفاده از مدل SI و تعداد پارامترها هستند (Cao *et al.,* 2016).

مدل فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP[2])

فرآیند تحلیل شبکه‌ای یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که توسط توماس ال ساعتی در سال ۱۹۸۰ توسعه یافته است. این مدل شبکه‌ای از ارتباطات بین عناصر خوشه‌های مختلف وابستگی (وابستگی خارجی) و نیز ارتباطات بین عناصر داخل یک خوشه (ارتباطات داخلی) است. در حقیقت، مدل ANP روابط متقابل بین مؤلفه‌ها را نیز نشان می‌دهد (Saaty & Vargas, 2006). مدل ANP به‌جای سلسله مراتب از ساختار شبکه‌ای بهره می‌برد و علاوه بر داشتن کلیه ویژگی‌های مدل AHP شامل سادگی، انعطاف‌پذیری، به‌کارگیری معیارهای کمی و کیفی به‌طور همزمان، انجام مقایسه‌های زوجی و بررسی سازگاری در قضاوت‌ها قادر به برقراری ارتباطات متقابل و دوسویه و وابستگی‌های داخلی علاوه بر روابط سلسله مراتبی در شبکه است (Garcia *et al.,* 2008). فرایند تحلیل شبکه‌ای در چهار مرحله قابل اجرا است. مرحله اول، تعیین مسئله تصمیم‌گیری و ارائه آن در یک مدل شبکه‌ای است. در این مرحله، پس از تعیین مسئله تصمیم‌گیری و عوامل مؤثر بر آن باید یک مدل شبکه‌ای ایجاد شود. این مدل شامل مسئله تصمیم‌گیری، خوشه‌ها، عناصر و وابستگی‌های داخلی و خارجی بین آن‌ها است. مرحله دوم، تشکیل ماتریس‌های مقایسه زوجی و تعیین بردارهای اولویت است. همانند مدل AHP، برای مقایسه‌ی زوجی پارامترها از اعداد ۱ تا ۹ و معکوس آن‌ها استفاده می‌شود.

پس از مشخص کردن مقادیر عددی در ماتریس‌های مقایسه‌ی زوجی، بردار اهمیت داخلی، که بیانگر اهمیت نسبی عناصر یا خوشه‌ها است، به‌دست می‌آید:

$$AW = \lambda_{max}. \qquad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن A ماتریس مقایسه‌ی زوجی پارامترها، W بردار ویژه (ضریب اهمیت) و λ_{max} بزرگ‌ترین مقدار ویژه‌ی عددی است. تعیین صحت ماتریس‌های مقایسه‌ی زوجی با محاسبه‌ی نسبت سازگاری (CR) انجام می‌گیرد.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \qquad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن CI نرخ سازگاری و n تعداد مؤلفه‌های مورد مقایسه در ماتریس هستند.

$$CR = \frac{CI}{RI} \qquad \text{رابطه (۵)}$$

در این رابطه، CR نسبت پایندگی یا نرخ سازگاری است و RI بیانگر شاخص تصادفی است که به تعداد عناصر مورد مقایسه بستگی دارد. مقایسه‌ی زوجی زمانی قابل قبول خواهد بود که نرخ سازگاری کمتر از ۰/۱ به‌دست آمده باشد. مرحله سوم شامل تشکیل سوپرماتریس و تبدیل آن به سوپرماتریس حد است. در مرحله چهارم وزن نهایی پارامترها محاسبه می‌گردد. لازم به ذکر است که این روش در کنار داشتن نقاط قوت در وزن‌دهی به‌دلیل برخورداری از ساختار شبکه‌ای به مقایسات زوجی بیشتری نیاز دارد.

تهیه لایه‌های مورد نیاز تحقیق

در پژوهش حاضر، با بررسی پیشینه تحقیق از ۱۸ پارامتر مؤثر در وقوع سیل جهت تهیه نقشه پتانسیل خطر وقوع سیلاب در حوضه آبریز جی‌چای استفاده شده است. در ادامه به بررسی نقش هریک از پارامترها در وقوع سیل و نحوه تهیه نقشه آن‌ها پرداخته شده‌است. رواناب‌های سطحی همیشه از نواحی با ارتفاع بالا به‌سمت مناطق کم ارتفاع جریان پیدا می‌کنند. بنا بر این، مناطق کم ارتفاع راحت‌تر و سریع‌تر دچار سیل گرفتگی

1. Statistical Index
2. Analytic Network Process

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1265]

می‌شوند (Dahri & Abida, 2017). نقشه طبقات ارتفاعی منطقه از لایه DEM با قدرت تفکیک مکانی ۲۸ متر و در پنج کلاس تهیه گردید. سیلاب‌ها در مناطق با شیب کم‌تر فراوان هستند درحالی‌که در مناطق با شیب تندتر، سرعت جریان بیشتر است (Kaur *et al.,* 2017). بررسی نقشه شیب منطقه نشان می‌دهد که بیش از ۴۲ درصد از مساحت منطقه دارای شیب بین ۰ تا ۱۰ درصد هستند. هنگامی‌که دامنه‌ها شدت کمی از نور خورشید را دریافت می‌کنند (که این به معنی رطوبت بیشتر خاک است)، شیب مرطوب احتمالاً رواناب را افزایش می‌دهد و منجربه افزایش خطر سیل می‌شود (Yariyan *et al.,* 2020). لذا می‌توان گفت که جهت شیب به‌طور غیرمستقیم بر پتانسیل انباشت آب تأثیر می‌گذارد. نقشه جهت شیب منطقه با استفاده از لایه DEM و در نه کلاس شامل چهار جهت اصلی، چهار جهت فرعی و مناطق مسطح تهیه شد. تغییرات در شدت و فراوانی بارش مهم‌ترین عواملی هستند که باعث ایجاد مخاطرات هیدرولوژیکی مانند سیل می‌شوند (Holting & Coldewey, 2019). در پژوهش حاضر، نقشه بارش منطقه با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی موجود در داخل محدوده حوضه آبریز آجی‌چای و روش درون‌یابی IDW[3] تهیه گردید. از آنجا که مناطق نزدیک به رودخانه‌ها آسیب‌پذیرترین مناطق در برابر سیل هستند، فاصله از رودخانه‌ها به‌عنوان یک عامل مهم شرطی‌سازی سیل در نظر گرفته می‌شود (Aydin & Iban, 2023). نقشه فاصله از آبراهه با استفاده از ابزار فاصله اقلیدسی[4] و در پنج کلاس در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه گردید. سیلاب‌های سنگین و زیاد در یک منطقه به‌شدت با درصد بالایی از تراکم زهکشی همراه است که نشان‌دهنده درصد بالایی از رواناب سطحی است (Kumar et al., 2007). نقشه تراکم زهکشی با استفاده از ابزار تراکم خطی و در پنج کلاس تهیه شده است. رابطه معکوسی بین تراکم پوشش گیاهی و سیل وجود دارد (Kumar & Acharya, 2016). به‌منظور تهیه نقشه شاخص پوشش گیاهی منطقه از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ با ردیف و گذرهای ۳۳-۱۶۸، ۳۴-۱۶۸، ۳۴-۱۶۷ و مربوط به سال ۲۰۲۲ استفاده شده است. هنگام بارندگی در یک حوضه، وقوع سیل رابطه مستقیمی با عوامل مهمی مانند توپوگرافی و نوع کاربری اراضی دارد (Avand *et al.,* 2021). در پژوهش حاضر، از نقشه کاربری اراضی که توسط شرکت Esri از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر و مربوط به سال ۲۰۲۲ استخراج گردید، استفاده شده است. احداث پل‌هایی با ابعاد نامناسب بر روی رودخانه‌ها باعث افزایش سطح آب در بالادست پل‌ها می‌شود. سدها یکی از مهم‌ترین سازه‌ها در سیستم‌های انتقال و منابع آب هستند. در این تحقیق، به منظور تعیین موقعیت پل‌ها و سدهای منطقه از امکانات سامانه Google Earth استفاده شد و لایه پل‌ها و سدها با فرمت وکتوری تهیه و سپس وارد محیط ArcGIS گردید. نقشه نهایی این دو پارامتر با استفاده از ابزار فاصله اقلیدسی و در پنج کلاس تهیه شده است.

اطلاعات سنگ‌شناسی در مورد نفوذپذیری سنگ‌ها جهت ارزیابی و مدل‌سازی خطر وقوع سیل بسیار ضروری است. جهت تهیه نقشه لیتولوژی منطقه از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰۰ (برگه‌های تبریز، سراب، بستان‌آباد، هریس، اسکو و خوجا) برگرفته از سازمان زمین‌شناسی کشور استفاده گردید. خصوصیات خاک به‌طور مستقیم بر نفوذ و رواناب تأثیر می‌گذارند و این‌ها شاخص اولیه حوادث سیل هستند (Xie *et al.,* 2019). در پژوهش حاضر، نقشه گروه‌های هیدرولوژیکی خاک منطقه با استفاده از داده‌های جهانی گروه‌های هیدرولوژیک خاک برگرفته از وب‌سایت ناسا، نقشه‌های زمین‌شناسی و لایه کاربری اراضی تهیه گردید. مقادیر بالای شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI[5]) مکان‌هایی را نشان می‌دهند که مستعد سطوح زمین اشباع‌شده و آن‌هایی که دارای ظرفیت ایجاد جریان زمینی هستند (Manfreda *et al.,* 2011). در این تحقیق نقشه شاخص رطوبت توپوگرافی در نرم‌افزار SAGA تهیه شد. شاخص قدرت آبراهه (SPI[6]) ظرفیت فرسایشی آب‌های سطحی را نشان می‌دهد که بر آسیب‌پذیری سیل نیز تأثیر می‌گذارد (Moore *et al.,* 1991; Kiss, 2004). جهت تهیه نقشه این شاخص از لایه DEM با قدرت تفکیک مکانی ۲۸ متر در نرم‌افزار ArcGIS استفاده گردید. مناطقی که مقادیر شاخص حمل رسوب (STI[7]) کمتری را نشان می‌دهند اکثرا در زمین‌های مسطح قرار دارند و بنابراین پتانسیل بالایی برای وقوع سیل دارند (Hong *et al.,* 2018). بافت زهکشی یکی از جنبه‌های مهم ژئومورفولوژی است و به‌معنای فاصله نسبی بین آبراهه‌ها است (Bisht *et al.,* 2018). هرچه مقدار بافت زهکشی بیشتر باشد نشان‌دهنده ظرفیت نفوذپذیری کم و در نتیجه افزایش پتانسیل رواناب در حوضه آبریز است (Rezaei Moghaddam *et al.,* 2020b). ژئومورفولوژی یکی از پارامترهای مهم در تهیه نقشه‌های پیش‌بینی سیل است که بر دبی آب و نرخ رواناب تأثیر می‌گذارد (Saikh & Mondal, 2023). در پژوهش حاضر، جهت شناسایی لندفرم‌های اصلی حوضه آبریز آجی‌چای از تلفیق عوامل جغرافیایی از قبیل توپوگرافی، زمین‌شناسی، شیب و شبکه آبراهه‌ای به‌همراه تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده است. انحنا بر جریان و همچنین بر وقوع سیلاب‌ها تأثیر می‌گذارد (Pradhan, 2010). انحنا نشان‌دهنده سطوح محدب، مقعر و مسطح است که به‌ترتیب مقادیر مثبت، منفی و صفر را نشان می‌دهند (Chapi *et al.,* 2017). نقشه انحنای زمین با استفاده از لایه DEM با قدرت تفکیک مکانی ۲۸ متر در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه گردید.

نتایج و بحث

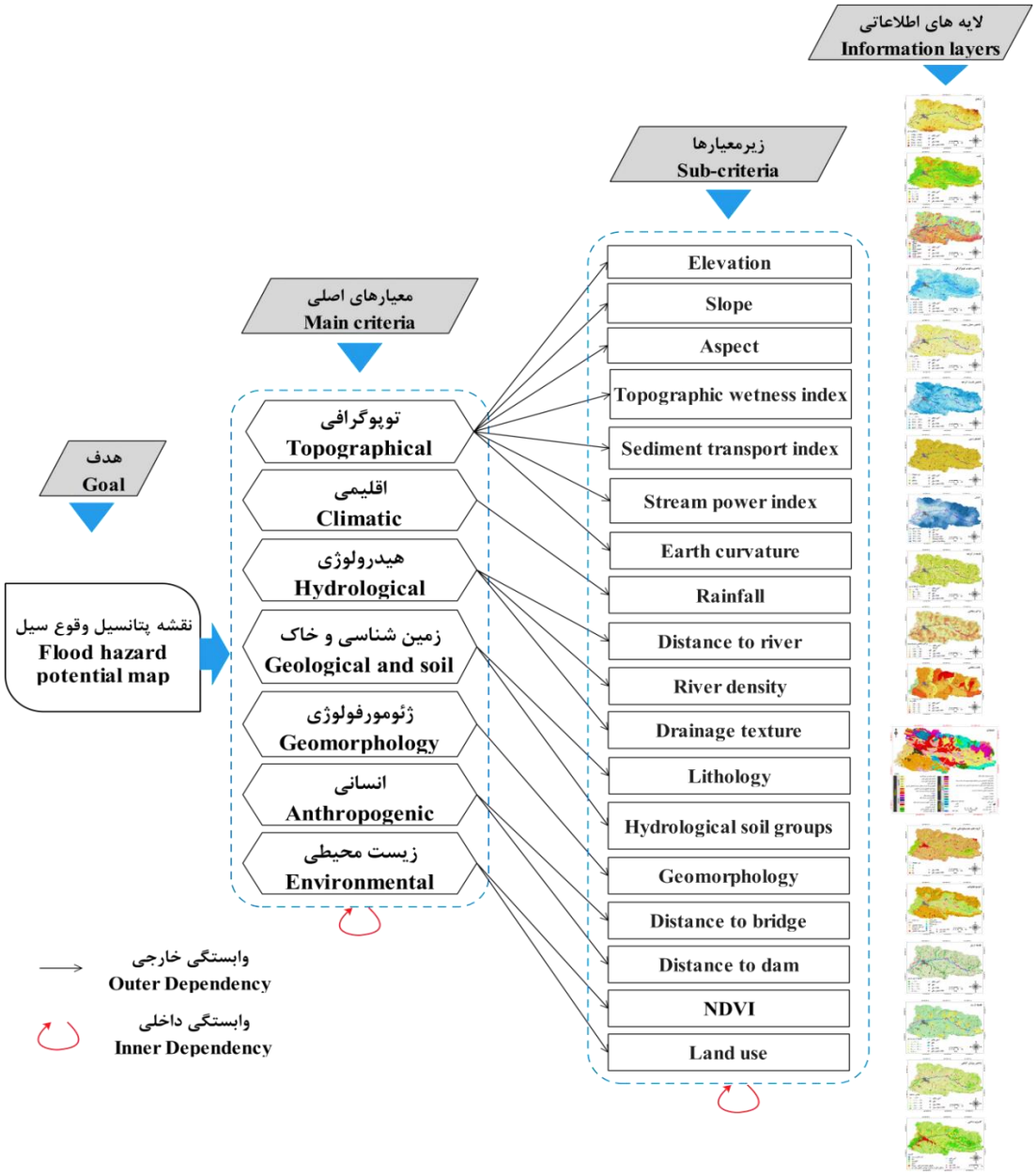
وزن‌دهی پارامترها و تهیه نقشه نهایی با مدل ANP

اولین مرحله در مدل ANP جهت وزن‌دهی پارامترها ساخت مدل شبکه‌ای است. شکل (۲) ساختار شبکه‌ای و وابستگی‌های داخلی و خارجی پارامترها را نشان می‌دهد. در

3. Inverse Distance Weighted
4. Euclidean Distance
5. Topographic Wetness Index
6 . Stream power index
7 . Sediment transport index

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1265]

مدل ANP، پارامتری که بیشترین تأثیر را در تعیین هدف داشته باشد، بالاترین وزن را خواهد داشت. با توجه به اینکه هدف تحقیق حاضر تهیه نقشه پتانسیل وقوع سیلاب است، پارامترهای مؤثر در شکل‌گیری رواناب‌های سطحی به‌عنوان مهم‌ترین عوامل در نظر گرفته شده‌اند. بنا بر این، برای پارامترهای بارش، ژئومورفولوژی، شیب و فاصله از آبراهه با توجه به تأثیر زیاد این عوامل در وقوع سیل، بیشترین وزن در نظر گرفته شده است. وزن‌دهی سایر پارامترها نسبت به کاهش تأثیرشان در وقوع سیل کمتر می‌شود (جدول ۱). جهت انجام مقایسات زوجی از نظرات کارشناسان و اساتید ژئومورفولوژی استفاده شده است.



شکل۲- مدل شبکه‌ای برای تهیه نقشه پتانسیل خطر وقوع سیل

Figure 2. The network model for the preparation of a flood hazard potential map

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1265]

جدول ۱- ماتریس مقایسه زوجی پارامترها

Table 1. The pairwise comparison matrix of parameters

parameter	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)
(۱) Elevation ارتفاع	1																	
(۲) Slope شیب	2	1																
(۳) Aspect جهت شیب	1/3	1/5	1															
(۴) Rainfall بارش	3	2	6	1														
فاصله از آبراهه (۵) Distance to river	3	1/2	2	1/2	1													
(۶) River density تراکم آبراهه	3	1/2	3	1/2	1/2	1												
(۷) NDVI پوشش گیاهی	1/2	1/4	3	1/4	1/4	1/2	1											
(۸) Land use کاربری اراضی	2	1/2	2	1/2	1/2	2	2	1										
فاصله از پل (۹) Distance to bridge	2	1	2	1/2	1/2	2	2	3	1									
فاصله از سد (۱۰) Distance to dam	1/2	1/5	1/2	1/3	1/3	1/2	1/2	1/2	1/2	1								
(۱۱) Lithology لیتولوژی	1/2	1/3	2	1/5	1/2	1/2	1/3	1/2	2	2	1							
گروه‌های هیدرولوژیکی خاک (۱۲) Hydrological soil groups	1/3	1/3	2	1/7	1/3	1/2	1/2	1/2	1/2	2	1/2	1						
شاخص رطوبت توپوگرافی (۱۳) Topographic wetness index	2	1/2	2	1/2	1/2	2	2	1/2	1/2	2	1/2	2	1					
شاخص حمل رسوب (۱۴) Sediment transport index	1/4	1/4	1/2	1/7	1/3	1/2	1/2	1/3	1/2	1/2	1/2	1/2	1/3	1				
شاخص قدرت آبراهه (۱۵) Stream power index	1/5	1/3	1/2	1/3	1/3	1/3	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	2	1			
(۱۶) Drainage texture بافت زهکشی	1/2	1/5	2	1/5	1/3	1/2	1/2	1/3	1/3	2	2	2	1/2	2	2	1		
(۱۷) Earth curvature انحنای زمین	1/2	1/3	3	1/5	1/3	1/2	2	1/3	1/2	3	4	3	1/2	3	3	3	1	
(۱۸) Geomorphology ژئومورفولوژی	3	1	5	1/2	1/2	1	2	2	3	5	1/2	3	4	5	5	3	5	1

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-06]

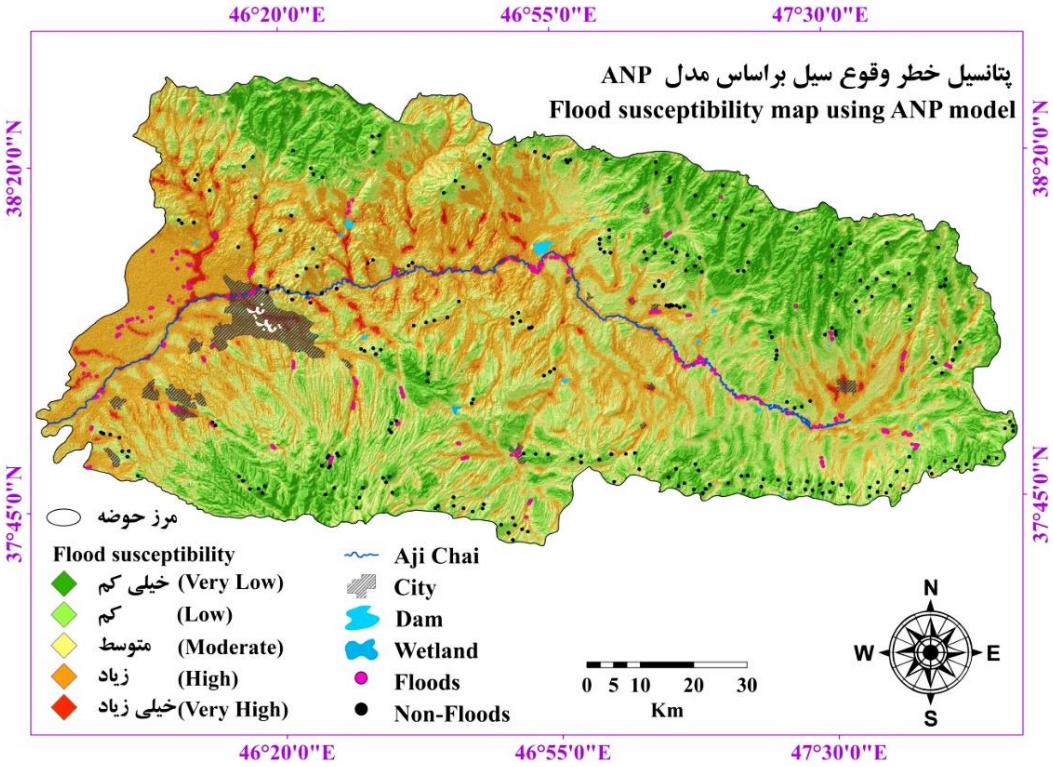
[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1265]

نتایج وزن‌دهی پارامترها نشان می‌دهند که عامل بارش با مقدار ۰/۱۳۷ بیشترین وزن را داشته است. پارامترهای ژئومورفولوژی و شیب نیز با مقادیر ۰/۱۰۴ و ۰/۱۰۱ به‌ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار دارند. در مقابل، پارامترهای شاخص حمل رسوب و شاخص قدرت آبراهه کمترین وزن را به خود اختصاص داده‌اند (جدول ۲). نرخ سازگاری مقایسات زوجی نیز ۰/۰۵۲ به‌دست آمد که نشان‌دهنده صحت وزن‌دهی پارامترها است. نقشه نهایی از حاصل ضرب وزن‌های هر یک از پارامترها در لایه‌های اطلاعاتی خود تهیه گردید. در ادامه، حوضه آبریز آجی‌چای از نظر پتانسیل وقوع مخاطره سیل با استفاده از دستور Natural Breaks به پنج طبقه از خطر خیلی کم تا خیلی زیاد تقسیم شد (شکل ۳).

جدول۲- وزن نهایی پارامترها و نرخ سازگاری

Table 2. Final weight of parameters and the inconsistency index

پارامتر Parameter	وزن Weight	پارامتر Parameter	وزن Weight	پارامتر Parameter	وزن Weight
Elevation	0.051	NDVI	0.039	Topographic wetness index	0.047
Slope	0.101	Land use	0.064	Sediment transport index	0.017
Aspect	0.023	Distance to dam	0.068	Stream power index	0.021
Rainfall	0.137	Distance to bridge	0.023	Drainage texture	0.031
Distance to river	0.093	Lithology	0.040	Earth curvature	0.049
River density	0.062	Hydrological soil groups	0.027	Geomorphology	0.104
Inconsistency index: 0.052					



شکل۳- نقشه پتانسیل خطر وقوع سیل با استفاده از مدل ANP

Figure 3. The flood hazard potential map using the ANP model

وزن‌دهی پارامترها و تهیه نقشه نهایی با مدل SI

به‌منظور وزن‌دهی پارامترها با روش شاخص آماری از موقعیت نقاط سیلاب‌های رخداده در منطقه استفاده گردید. موقعیت نقاط سیلاب‌های منطقه از طریق اطلاعات شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی، بازدیدهای میدانی و همچنین تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ سنجنده OLI-TIRS مربوط به تاریخ ۲۷ فروردین ۱۳۹۶ که یک روز بعد از سیل بزرگ تصویربرداری شده بود، تهیه گردید. نتایج وزن‌دهی پارامترها به‌صورت جدول ۳ ارائه شده‌اند.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1265]

جدول۳- وزن کلاس‌های هریک از لایه‌های اطلاعاتی

Table 3. The weight of classes of each information layer

پارامتر (Parameter)	کلاس (Class)	تعداد پیکسل (Number of pixels)	تعداد نقاط سیل (Number of flood points)	SI
ارتفاع (متر) Elevation (m)	1255-1767	6420018	143	0.486
	1768-2279	5281474	49	-0.390
	2280-2791	1863781	0	0
	2792-3303	0	0	0
	3304-3816	0	0	0
شیب (درصد) Slope (%)	0-10	5897182	158	0.670
	10-21	3879092	31	-0.539
	21-35	2379342	2	-2.79
	35-55	1398322	1	-2.95
	> 55	457751	0	0
جهت شیب Aspect	Flat مسطح	183057	4	0.466
	North شمال	2019026	38	0.317
	North east شمال شرق	1480556	16	-0.237
	East شرق	1306097	23	0.250
	South east جنوب شرق	1623702	24	0.075
	South جنوب	2041145	24	-0.152
	South west جنوب غرب	1809553	25	0.0082
	West غرب	1571118	17	-0.236
	North west شمال غرب	1978523	21	-0.255
میانگین بارش سالانه (میلی‌متر) Rainfall (mm)	215-270	2382691	59	0.453
	271-298	2451426	53	0.318
	299-320	2538775	38	-0.049
	321-344	2493215	23	-0.533
	345-483	2340491	19	-0.661
فاصله از آبراهه (متر) Distance to river (m)	0-250	2935085	148	1.164
	250-500	2472866	17	-0.827
	500-750	2024359	5	-1.85
	750-1000	1557699	3	-2.10
	> 1000	3216510	19	-0.979
تراکم آبراهه River density	0-0.30	2254893	30	-0.167
	0.31-0.42	2381290	24	-0.445
	0.43-0.52	2617648	20	-0.722
	0.53-0.71	3659551	85	0.389
	0.72-1.31	1293137	33	0.503
پوشش گیاهی NDVI	-0.17-0	15339	0	0
	0.01-0.20	9326074	79	-0.618
	0.21-0.30	1917146	48	0.464
	0.31-0.40	653194	41	1.383
	0.40-0.61	294900	24	1.643
کاربری اراضی Landuse	Water (wetland and dam) آب	114864	0	0
	Garden باغ	431671	8	2.361
	Agriculture کشاورزی	22010154	100	0.953
	Grassland مرتع	75369483	52	1.371
	Built up areas مناطق ساخته شده	5107523	30	1.212
	Rocky or earthy areas مناطق سنگی یا خاکی	6826158	2	-1.789
فاصله از پل (متر) Distance to Bridge (m)	0-300	149631	32	2.60
	300-600	344539	18	1.200
	600-900	487244	25	1.182
	900-1200	588511	16	0.547
	> 1200	10636673	101	-0.504
فاصله از سد (متر) Distance to Dam (m)	0-1000	157950	0	0
	1000-2000	292678	13	1.038
	2000-3000	419463	30	1.514
	3000-4000	510627	19	0.861
	> 4000	10825880	130	-0.269
خاک Hydrological soil groups	A	70764	38	3.53
	B	1651023	73	1.03
	C	10189008	78	-0.72
	D	295927	3	-0.43
شاخص رطوبت توپوگرافی Topographic wetness index	5.15-6.52	2644920	1	-3.59
	6.53-7.22	3590748	9	-1.69
	7.23-7.92	3623302	52	0.046
	7.93-8.78	2949870	85	0.743
	8.79-11.77	1203968	45	1
شاخص حمل رسوب Sediment transport index	0-300	5699484	156	0.691
	301-500	3816723	30	-0.546
	501-700	2398442	5	-1.88
	701-900	1485249	1	-0.711
	> 900	611711	0	0
شاخص قدرت آبراهه Stream power index	0-1400	5811307	157	0.678
	1401-2790	3653873	29	-0.546
	2791-4200	2389301	5	-1.87
	4201-5580	1529849	1	-3.04
	5581-6980	627259	0	0
بافت زهکشی Drainage texture	0.33-0.40	1419320	25	0.071
	0.41-0.50	3262992	74	0.324
	0.51-0.60	3779024	47	-0.276
	0.61-0.70	2256957	28	-0.279
	0.71-0.90	987486	1	-2.78

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1265]

ادامه جدول۳- وزن کلاس‌های هر یک از لایه‌های اطلاعاتی

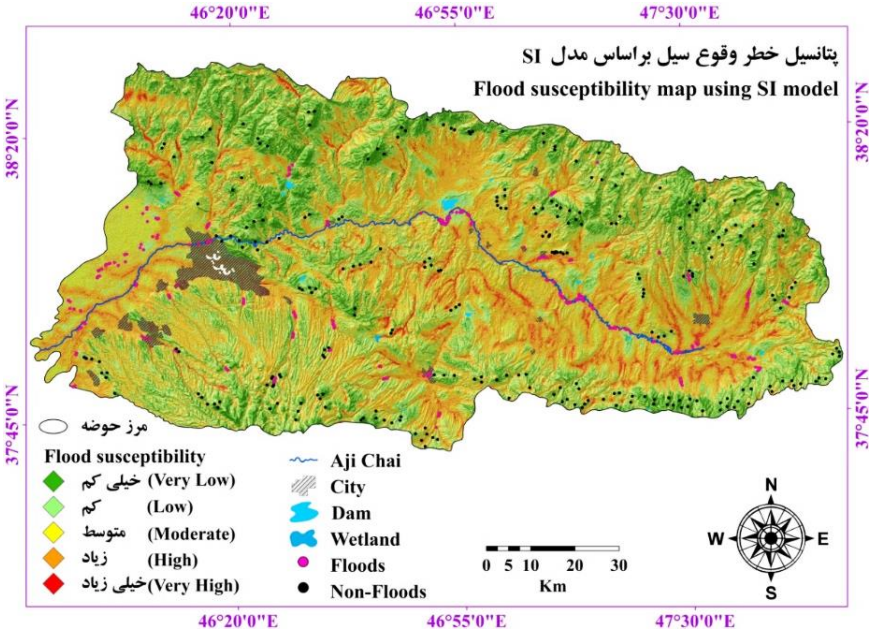
Table 3. The weight of classes of each information layer

پارامتر Parameter	کلاس Class	تعداد پیکسل Number of pixels	تعداد نقاط سیل Number of flood points	SI
انحنای زمین Earth curvature	مقعر Flat	6609915	97	0.068
	مسطح	985271	46	1.22
	محدب	6418637	49	-0.584
ژئومورفولوژی Geomorphology	مناطق کوهستانی Mountainous areas	6160832	0	0
	کوه‌های کم ارتفاع Low mountains	763670	0	0
	تپه ماهور Moorland	1217714	7	-1
	مخروط آتشفشانی Volcanic cones	26622	0	0
	سطوح دشتی Plain surfaces	3465430	124	0.821
	دشت‌های میان‌کوهی Intermountain plains	195815	19	1.81
	بستر رودخانه River bed	72980	35	3.41
	تالاب Wetland	1401	0	0
	سد Dam	13917	0	0
	شهر City	287413	7	0.437
لیتولوژی Lithology	Qal	86146	1	-0.303
	Qt1	1612755	28	0.098
	Qt2	1610233	67	0.973
	Qsl	92173	3	0.727
	Qla	49073	1	0.258
	Qabv	137241	0	0
	Plqc	100786	0	0
	Pldvt	82481	0	0
	Plc	128669	0	0
	Mure	40446	2	1.145
	Plms	19549	0	0
	Murm	1299826	16	-0.245
	Mur	1661998	23	-0.127
	Ogr	2257	0	0
	Ebv	326723	0	0
	Plqm	103308	2	0.207
	Omqm	17643	0	0
	Plasv	915508	6	-0.875
	Plmb1	1536522	30	0.216
	Leof	11683	0	0
	Plmb3	208624	0	0
	Eabv	1164874	7	-0.962
	Mdav	140279	0	0
	Pldsv	49685	0	0
	Egr	27697	0	0
	Edsv	15839	0	0
	Ku	227717	5	0.333
	Kuft	484507	1	-2.03
	Kav	42393	0	0
	TRe	10757	0	0

نتایج حاصل از ارتباط بین نقاط سیلاب‌های رخداده در منطقه با هریک از پارامترها با استفاده از مدل SI نشان می‌دهد که سطوح ارتفاعی ۱۷۶۷ –۱۲۵۵ متر، شیب‌های ۱۰ –۰ درصد، سطوح مسطح و جهت شیب شمالی، کاربری اراضی باغ و مناطق ساخته‌شده، فاصله ۲۵۰ –۰ متری از رودخانه، فاصله ۳۰۰ –۰ متری از پل‌ها، شاخص پوشش گیاهی ۰/۶۱ –۰/۴۱، تراکم آبراهه ۱/۳۱ –۰/۷۲، شاخص رطوبت توپوگرافی ۱۱/۷۷ –۸/۷۹، شاخص حمل رسوب ۳۰۰ –۰، شاخص قدرت آبراهه ۱۴۰۰ –۰، خاک‌های گروه A، لندفرم‌های ژئومورفیک بستر رودخانه، دشت‌های میانکوهی و سطوح دشتی بیشترین وزن‌ها را داشته‌اند. بنا بر این، این مناطق بیشترین پتانسیل را از نظر وقوع سیل دارا هستند. نقشه نهایی از تلفیق نقشه‌های لایه‌های اطلاعاتی با وزن‌های نهایی از یک از کلاس‌ها با استفاده از دستور Raster Calculator تهیه گردید (شکل ۳). بررسی نقشه‌های نهایی هر دو مدل نشان می‌دهد که الگوی تغییرات فضایی پهنه‌های خطر در هر دو نقشه مشابه هم است و مناطق پایین‌دست حوضه به‌دلیل داشتن سطوح هموار و جلگه‌ای مستعد خطر وقوع سیل هستند. شهرهای مهم حوضه از قبیل تبریز، سراب و بستان‌آباد نیز در پهنه‌های با خطر زیاد و خیلی زیاد قرار دارند که آسیب‌پذیری این شهرها را به‌هنگام وقوع سیلاب‌های مخرب نشان می‌دهد. این شهرها در مسیر رودخانه‌ها شکل گرفته‌اند، بنابراین لزوم توجه جدی مسئولان

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1265]

به امر مدیریت سیلاب‌های شهری را دوچندان می‌کند. در مقابل ارتفاعات و دامنه‌های شیب‌دار کم‌ترین پتانسیل را جهت وقوع سیل دارند.



شکل۴- نقشه پتانسیل خطر وقوع سیل با استفاده از مدل SI

Figure 4. The flood hazard potential map using the SI model

بررسی مساحت هر یک از کلاس‌های خطر در نقشه‌های نهایی نشان می‌دهد که در مدل ANP حدود ۳۴ درصد از مساحت منطقه در پهنه‌های با خطر زیاد و خیلی زیاد قرار دارند. در مدل SI نیز بیش از ۴۶ درصد از مساحت منطقه را کلاس‌های پرخطر به‌خود اختصاص داده‌اند (جدول ۴). در هر دو مدل، کلاس‌های کم و خیلی کم بیش از ۴۴ درصد از مساحت منطقه را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین نقاط سیل‌گیر ثبت شده بیشتر در نزدیکی رودخانه‌ها و سطوح هموار و کم ارتفاع قرار داشته‌اند که همپوشانی آن‌ها با نقشه‌های تهیه شده نشان می‌دهد که این نقاط منطبق بر مناطق پرخطر هستند.

جدول۴- مساحت هریک از کلاس‌های خطر وقوع سیل

Table 4. The area of each flood hazard class

کلاس Class	مدل ANP		مدل SI	
	درصد مساحت (%)	مساحت (کیلومترمربع) Area Km^2	درصد مساحت (%)	مساحت (کیلومترمربع) Area Km^2
خیلی کم Very Low	17.7	1941	17	1856
کم Low	27	2956	27.4	3010
متوسط Moderate	21.3	2341	9.4	1034.7
زیاد High	32	3526	43.2	4745
خیلی زیاد Very High	2	221	3	340

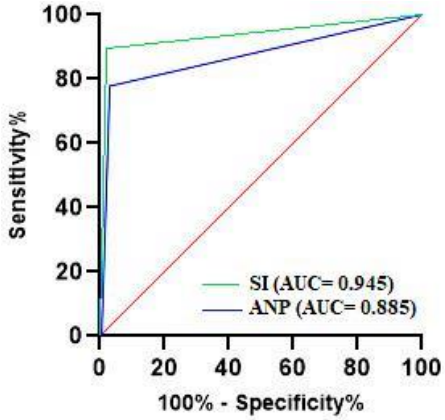
به‌منظور ارزیابی دقت نتایج هریک از مدل‌ها از سه شاخص آماری Sensitivity، Specificity و Accuracy به‌همراه منحنی ROC و سطح زیر منحنی (AUC) استفاده شد (شکل ۵). نتایج این بخش نشان می‌دهند که عملکرد هر دو مدل در تهیه نقشه‌های پتانسیل خطر وقوع سیل در منطقه خوب بوده است. با این وجود، مدل SI با ضریب ۰/۹۴۵ بیشترین مقدار سطح زیر منحنی را داشته است که بیانگر دقت بیشتر این مدل در مقایسه با مدل ANP است.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1265]

جدول۵- ارزیابی دقت مدل‌ها براساس داده‌های آموزشی و اعتبارسنجی

Table 5. Assessing the accuracy of models based on training and validation data

شاخص آماری Statistical index	مدل ANP		مدل SI	
	داده‌های آموزشی Training data	داده‌های اعتبارسنجی Validation data	داده‌های آموزشی Training data	داده‌های اعتبارسنجی Validation data
True positive	143	61	171	75
True negative	178	74	161	67
False positive	49	21	21	7
False negative	14	8	31	15
Sensitivity (%)	0.91	0.88	0.84	0.83
Specificity (%)	0.78	0.77	0.88	0.90
Accuracy (%)	0.83	0.82	0.86	0.86



شکل ۵- منحنی ROC بر اساس داده‌های آموزشی

Figure 5. The ROC curve based on training data

نتیجه‌گیری کلی

در پژوهش حاضر، تلاش شد تا با استفاده از مدل ANP و SI نقشه پهنه‌بندی پتانسیل خطر وقوع سیل در سطح حوضه آبریز آجی‌چای تهیه گردد. به همین منظور، از ۱۸ پارامتر مؤثر در وقوع مخاطره سیلاب استفاده گردید. جهت اجرای مدل‌ها از نقشه موقعیت مکانی سیلاب‌های رخ داده در سطح منطقه استفاده شد. از مجموع ۲۷۴ نقطه سیلابی، ۷۰ درصد نقاط به‌عنوان دادهای آموزشی (۱۹۲ نقطه) انتخاب شدند. نتایج وزن‌دهی پارامترها با مدل ANP نشان داد که پارامترهای بارش، ژئومورفولوژی و شیب بیشترین وزن را داشتند که بیانگر اهمیت بسیار زیاد این عوامل در وقوع سیلاب‌های منطقه است. نقشه‌های نهایی از حاصل ضرب وزن طبقات پارامترها در لایه‌های اطلاعاتی آن‌ها و با استفاده از دستور Natural Breaks در پنج طبقه تهیه گردید. نتایج نشان می‌دهند که در هر دو مدل، مناطق پایین‌دست حوضه و دشت‌های میانکوهی پتانسیل بالایی را از نظر وقوع سیل دارا هستند. هم‌چنین، بررسی نقشه‌ها نشان داد که کلان‌شهر تبریز، که مهم‌ترین مرکز جمعیتی داخل حوضه محسوب می‌شود، به‌دلیل توسعه در امتداد رودخانه‌های مهران‌رود و آجی‌چای در پهنه‌های زیاد و خیلی زیاد از نظر وقوع سیل قرار دارد. این امر لزوم توجه جدی مسئولان منطقه را جهت مدیریت هرچه بهتر مخاطره سیلاب در داخل حوضه نشان می‌دهد. ارزیابی دقت مدل‌ها براساس منحنی ROC و سطح زیر منحنی (AUC) نشان می‌دهد که هر دو مدل عملکرد خوبی در تهیه نقشه‌های پتانسیل خطر وقوع سیل داشته‌اند. نتایج به‌دست آمده از تحقیق حاضر با نتایج پژوهشگرانی همچون عابدینی و همکاران (Abedini *et al.,* 2016)، مختاری و همکاران (Mokhtari *et al.,* 2020)، اسفندیاری درآباد و همکاران (Esfandiary Darabad *et al.,* 2021)، و رضائی‌مقدم و رحیم‌پور (Rezaei Moghaddam & Rahimpour, 2024) مطابقت دارند. پژوهشگران نامبرده روش‌های ANP و SI را به‌عنوان مدل‌هایی کارآمد جهت تهیه نقشه پتانسیل خطر وقوع سیل پیشنهاد کردند که نتایج به‌دست آمده از تحقیق حاضر نیز نتایج محققین مذکور را تأیید می‌کنند.

تشکر و قدردانی

این پژوهش بخشی از یافته‌های طرح پژوهشی دوره پسادکتری در دانشگاه تبریز است که با حمایت بنیاد ملی نخبگان در قالب طرح شهید دکتر چمران انجام گرفته‌است. بدین‌وسیله از آن‌ها قدردانی می‌شود.

References

Abedini, M., & beheshti javid, E. (2016). Flood risk zoning of Liqvan Chai basin using Analytic Network Process model and geographic information system. *Geographic Space*, 16(55), 293-312.

Avand, M., Moradi, H., & Ramazanzadeh lasboyee, M. (2021). Spatial modeling of flood probability using geo-environmental variables and machine learning models, case study: Tajan watershed, Iran. *Advances in Space Research*, 67(10), 3169-3186. https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.02.011.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1265]

Avand, M., Moradi, H., & Ramazanzadeh Lasbuie, M. (2022). Vulnerability Assessment of Tajan Watershed in Terms of Flood using BWM Method. *Journal of Watershed Management Research*, 13(26), 10-20.

Aydin, H. E., & Iban, M.C. (2023). Predicting and analyzing flood susceptibility using boosting-based ensemble machine learning algorithms with SHapley Additive exPlanations. *Nat Hazards*, 116, 2957–2991. https://doi.org/10.1007/s11069-022-05793-y.

Bisht, S., Chaudhry, S., Sharma, S., & Soni, S. (2018). Assessment of flash flood vulnerability zonation through Geospatial technique in high altitude Himalayan watershed, Himachal Pradesh India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 12, 35-47. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.09.001.

Cao, C., Xu, P., Wang, Y., Chen, J., Zheng, L., & Niu, C. (2016). Flash Flood Hazard Susceptibility Mapping Using Frequency Ratio and Statistical Index Methods in Coalmine Subsidence Areas. *Sustainability*, 8(9), 948. https://doi.org/10.3390/su8090948.

Chan, F. K. S., Griffiths, J. A., Higgitt, D., Xu, S., Zhu, F., Tang, Y. T., & Thorne, C. R. (2018). Sponge city in China – a breakthrough of planning and flood risk management in the urban context. *Land use Policy*, 76, 772–778.

Chapi, K., Singh, V. P., Shirzadi, A., Shahabi, H., Bui, D. T., Pham, B. T., & Khosravi, K. (2017). A novel hybrid artificial intelligence approach for flood susceptibility assessment. *Environmental Modelling & Software*, *95*, 229-245. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.012.

Costache, R. (2019). Flash-flood Potential Index mapping using weights of evidence, decision Trees models and their novel hybrid integration. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 33(7), 1375–1402. https://doi.org/10.1007/s00477- 019-01689-9.

Dahri, N., & Abida, H. (2017). Monte Carlo simulation-aided analytical hierarchy process (AHP) for flood susceptibility mapping in Gabes Basin (southeastern Tunisia). *Environmental Earth Sciences*, 76(7), 302. https://doi.org/10.1007/s12665-017-6619-4.

Esfandiary Darabad, F., Layeghi, S., Mostafazadeh, R., & Haji, K. (2021). The zoning of flood risk potential in the Ghotorchay watershed with ANP and WLC multi-criteria decision making methods. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 8 (2), 135-150. [In Persian]

Garcia, M. M., Javier, F. O., Jeronimo, A. B., Pablo, A. B., & Rocio, P. B. (2008). Farmland appraisal based on the Analytic Network Process. *Journal of Global Optimization*, 42, 143-155.

Ghosh, S., Saha, S., & Bera, B. (2022). Flood susceptibility zonation using advanced ensemble machine learning models within Himalayan foreland basin. *Natural Hazard Research*, 2(4), 363-374. https://doi.org/10.1016/j.nhres.2022.06.003.

Hölting, B., & Coldewey, W. G. (2019). *Hydrogeology* (pp. 33-37). Münster, Germany: Springer.

Hong, H., Tsangaratos, P., Ilia, I., Liu, J., Zhu, A., & Chen, W. (2018). Application of fuzzy weight of evidence and data mining techniques in construction of flood susceptibility map of Poyang County, China. *Science of the Total Environment*, 625, 575–588. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.256.

Jodi, R., Esmali Ouri, A., Mostafazadeh, R., & Golshan, M. (2023). Flood Susceptibility Mapping using the Frequency Ratio Method in Khiav Chai Watershed, Ardabil. *Journal of Watershed Management Research*, 14(27), 1-14.

Kaur, H., Gupta, S., Parkash, S., Thapa, R., & Mandal, R. (2017). Geospatial modelling of flood susceptibility pattern in a subtropical area of West Bengal, India. *Environmental Earth Sciences*, *76*, 1-22. https://doi.org/10.1007/s12665-017-6667-9.

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*, 947-987.

Kiss, R. (2004). Determination of drainage network in digital elevation models, utilities and limitations. *Journal of Hungarian Geomathematics*, *2*, 17-29.

Kraus, C. N., Bonnet, M. P., de Souza Nogueira, I., Morais Pereira Souza Lobo, M. T., da Motta Marques, D., Garnier, J., & Cardoso Galli Vieira, L. (2019). Unraveling flooding dynamics and nutrients' controls upon phytoplankton functional dynamics in Amazonian floodplain lakes. *Water*, 11(1), 154. https://doi.org/10.3390/w11010154.

Kumar, D. P., Gopinath, G., & Seralathan, P. (2007). Application of remote sensing and GIS for the demarcation of groundwater potential zones of a river basin in Kerala, southwest coast of India. *International Journal of Remote Sensing*, 28(24), 5583-5601.

Kumar, R., & Acharya, P. (2016). Flood hazard and risk assessment of 2014 floods in Kashmir Valley: a space-based multisensor approach. *Natural Hazards*, 84(1), 437–464.

Manfreda, S., Di Leo, M., & Sole, A. (2011). Detection of flood-prone areas using digital elevation models. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(10), 781-790. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000367.

Mishra, K., & Sinha, R. (2020). Flood risk assessment in the Kosi megafan using multi-criteria decision analysis: A hydro-geomorphic approach. *Geomorphology*, 350, 106861. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106861.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1265]

Mokhtari, D., Rezaei Moghaddam, M. H., Rahimpour, T., & Moazzez, S. (2020). Preparing the Risk Map of Flood Occurrence in the Ghomnab Chai Basin Using ANP Model and GIS Technique. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 7(2), 497-509. doi: 10.22059/ije.2020.298759.1298. [In Persian]

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.

Mousavi, S. M., Ataie-Ashtiani, B., & Hosseini, S. M. (2022). Comparison of statistical and MCDM approaches for flood susceptibility mapping in northern Iran. *Journal of Hydrology,* 612. 128072. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128072.

Msabi, M. M., & Makonyo, M. (2021). Flood susceptibility mapping using GIS and multi-criteria decision analysis: A case of Dodoma region, central Tanzania. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 21(1), 100445. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100445.

Nachappa, T. G., Ghorbanzadeh, O., Gholamnia, K., & Blaschke, T. (2020). Multi-hazard exposure mapping using machine learning for the State of Salzburg, Austria. *Remote Sensing*, *12*(17), 2757.

Oztekin, B., & Topal, T. A. M. E. R. (2005). GIS-based detachment susceptibility analyses of a cut slope in limestone, Ankara—Turkey. *Environmental geology*, 49, 124-132.

Pradhan, B. (2010). remote sensing and GIS-based landslide hazard analysis and cross- validation using multivariate logistic regression model on three test areas in Malaysia. *Advances in Space Research*, 45(10), 1244–1256. https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.01.006.

Rahimpour, T., Rezaei Moghaddam, M.H., Hejazi, S.A., & Vlaizadeh Kamran, K. (2023). Flood Susceptibility Modeling in the Aland Chai Basin using New Ensemble Classification Approach (FURIA-GA-LogitBoost). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 12(1), 1-24. 10.22067/geoeh.2022.74170.1141. [In Persian]

Rezaei Moghaddam, M. H., & Rahimpour, T. (2024). Preparation of flood hazard potential map using two methods: Frequency Ratio and Statistical Index (Case study: Aji Chai Basin). *Environmental Management Hazards*, 10(4), 291-308. 10.22059/jhsci.2024.369163.803

Rezaei Moghaddam, M. H., hejazi, A., Valizadeh kamran, K., & Rahimpour, T. (2020a). Flood Analysis of Subbasins Using WASPAS Model (Case Study: Aland Chai Basin, Northwest of Iran). *Hydrogeomorphology*, 7(24), 83-106. 10.22034/hyd.2020.39815.1534. [In Persian]

Rezaei Moghaddam, M. H., Hejazi, A., Valizadeh Kamran, K., & Rahimpour, T. (2020b). Study of Hydrogeomorphic Indices in Flood Sensitivity (Case study: Aland Chai Basin, Northwest of Iran). *Quantitative Geomorphological Research*, 9(2), 195-214. 10.22034/gmpj.2020.118241. [In Persian]

Saaty, T.L., & Vargas, L.G. (2006). Decision Making with the Analytic Network Process. *New York. Springer Science*, 363 pp.

Saeed, M. (2020). Flood Hazard Assessment and Zonation Using Artificial Neural Network Model: A Study OF River Kabul, Peshawar Vale, Pakistan. Ph.D (Thesis), *University of Peshawar, Pakistan*. 140 pages.

Saikh, N.I., & Mondal, P. (2023). GIS-based machine learning algorithm for flood susceptibility analysis in the Pagla river basin, Eastern India. *Natural Hazards Research*, 3(3), 420-436. https://doi.org/10.1016/j.nhres.2023.05.004.

Van, E.T., Schwarz, A. (2020). Plastic debris in rivers. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 7(1), 1-24.

WHO (World Health Organization). (2022). Floods. 2017. Available online: https://www.who.int/health-topics/floods (accessed on 13 January 2022).

Wu, Q., Zhao, Z., Liu, L., Granger, D.E., Wang, H., Cohen, D.J., Wu, X., Ye, M., Bar- Yosef, O., Lu, B., & Zhang, J. (2017). Response to Comments on "Outburst flood at 1920 BCE supports historicity of China's Great Flood and the Xia dynasty. *Science*, 355(6332), 1382. https://doi.org/10.1126/science.aal1325.

Wu, Y. L., Li, W. P., Wang, Q. Q., Liu, Q. Q., Yang, D. D., Xing, M. L., Pei, Y. B., & Yan, S. S. (2016). Landslide susceptibility assessment using frequency ratio, statistical index and certainty factor models for the Gangu County, China. *Arabian Journal of Geosciences*, 9, 84. https://doi.org/10.1007/s12517-015-2112-0.

Xie, H., Dong, J., Shen, Z., Chen, L., Lai, X., Qiu, J., Wei, G., Peng, Y., & Chen, X. (2019). Intra-and inter-event characteristics and controlling factors of agricultural nonpoint source pollution under different types of rainfall-runoff events. *Catena*, 182, 104105. https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104105.

Yariyan, P., Janizadeh, S., Van Phong, T., Nguyen, H. D., Costache, R., Van Le, H., Thai Pham, B., Pradhan, B., & Tiefenbacher, J. P. (2020). Improvement of best first decision trees using bagging and dagging ensembles for flood probability mapping. *Water Resources Management*, 34, 3037-3053.

Youssef, A. M., Pradhan, B., & Hassan, A. M. (2011). Flash flood risk estimation along the St. Katherine road, southern Sinai, Egypt using GIS based morphometry and satellite imagery. *Environmental Earth Sciences*, 62(3), 611-623.

Zhang, G., Feng, G., Li, X., Xie, C., & Pi, X. (2017). Flood effect on groundwater recharge on a typical silt loam soil. *Water*, 9(7), 523. https://doi.org/10.3390/w9070523.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-12-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1265]