



University of Tehran Press

Environmental

Hazards

Management



Iranian Hazardology Association

Online ISSN: 2383-0530

Home Page: <https://jhsci.ut.ac.ir>

Preparation of flood hazard potential map using two methods: Frequency Ratio and Statistical Index (Case study: Aji Chai Basin)

Mohammad Hossein Rezaei Moghaddam^{1*} | Tohid Rahimpour²

1. Corresponding Author, Professor of Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Email: rezmogh@tabrizu.ac.ir

2. Postdoctoral researcher in Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Email: t.rahimpour@tabrizu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received 05 December 2023
Revised 13 Jan 2024
Accepted 20 Jan 2024
Published 05 March 2024

Keywords:
Hazard,
Flood,
Statistical analysis,
Zoning,
Aji Chai basin.

ABSTRACT

Floods are considered one of the most important and abundant geomorphic hazards in the country, which cause a lot of damage every year. Aji Chai basin, located in East Azerbaijan province, witnesses devastating floods every year due to its large area and special topographical conditions. Therefore, the main aim of this study is to prepare a flood hazard potential map in this basin. To achieve this aim, 18 parameters effective in the occurrence of this hazard and two statistical methods of frequency ratio (FR) and statistical index (SI) have been used. The investigated parameters were Elevation, Slope, Aspect, Rainfall, Distance to the river, River density, Normalized Difference Vegetation Index, land use, Distance to bridge, Distance to dam, lithology, hydrological soil groups, Topographic wetness index, Sediment transport index, Stream power index, Drainage texture, Geomorphology and earth curvature. The location of the past flood points in the area was used to determine the parameters weight and implement the research models. The final maps were prepared from the product of the weights of each parameter class in their information layers and were classified into five classes using the Natural Breaks tool. Study the final maps showed that hazard zones spatial distribution patterns were similar in both models. In this way, the areas downstream of the basin and around the main streams of the area are the most dangerous zones. The accuracy evaluation of the results of both models with the ROC curve showed that the values of the area under the curve for SI and FR models were 0.945 and 0.919, respectively, which shows the excellent performance of both models in preparing flood hazard maps.

Cite this article: 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 Hazards Management*, 10 (4), 291-308. DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2024.369163.803>



© Mohammad Hossein Rezaei Moghaddam, Tohid Rahimpour.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2024.369163.803>

Publisher: University of Tehran Press.

Introduction

Flood hazard susceptibility maps are becoming more and more necessary due to the devastating floods that have occurred across the country in recent years, taking many lives and causing significant financial losses. Many settlements, agricultural lands, and gardens are located around the Aji Chai River and the main streams of the sub-basins. Every year, at the beginning of spring, these areas are threatened by the hazard of flooding. Therefore, the current study tries to provide a spatial model of flood hazard susceptibility distribution in the Aji Chai basin under the Geographic Information System (GIS) Platform. The results of this study will greatly help managers and planners in the area manage flood hazards as well as possible.

Study Area

One of the biggest sub-basins of the Urmia Lake basin is the Aji Chai basin, which is situated in northwest Iran. This basin is in the province of East Azerbaijan, which is divided politically. This basin is located east of Urmia Lake, and its area is about 10985.9 km². The elevation variations of the basin range from 1255 meters at the outlet of the basin to 3816 meters in Sabalan Mountain.

Methodology

This study prepared zoning maps using data on flood and non-flood points (274 flood points and 274 non-flood points) and 18 parameters that were effective in the occurrence of floods. The flood and non-flood point data were separated into two groups: training (70%) and validation (30%), in order to apply research models and assess their outcomes. The statistical methods used in this study were frequency ratio (FR) and statistical index (SI). Statistical indicators such as sensitivity, specificity, and accuracy, as well as the ROC curve and the area under the curve (AUC), were used to evaluate the accuracy of the results of the models.

Discussion and Results

Based on historical flood location data, the weighting results of the layers were analyzed using statistical index models and frequency ratios. The results showed that the elevation levels between 1255 and 1767 meters had the highest weight in both models, indicating the high potential for flood occurrence in these areas. The classes with a 0–10% slope parameter in both models had the biggest impact on local floods. After determining the weight of each class, the raster calculator tool in ArcGIS software was used to prepare flood hazard potential maps, and layers were overlapped. The final maps are classified into five classes using the Natural Breaks tool. The study of the final maps showed that hazard zone spatial distribution patterns were similar in both models.

Conclusion

According to the current study's findings, plains and other downstream areas of the basin are susceptible to flooding. The most hazardous places are the flood plains along the Aji Chai River, which frequently experience fatalities and severe financial losses during floods. Studying the area of each hazard class in both models showed that in the frequency ratio (FR) model, 4373 Km² (39.7%) of the area is in high and very high classes regarding flood hazard potential. In the statistical index (SI) model, 5085 Km² (46.2%) of the area is in high-hazard areas. The accuracy evaluation of the results of both models with the ROC curve showed that the area under the curve for the SI and FR models was 0.945 and 0.919, respectively.



تهیه نقشه پتانسیل خطر وقوع سیل با استفاده از دو روش نسبت فراوانی و شاخص آماری (مطالعه موردی: حوضه آبریز آجی چای)

محمدحسین رضائی مقدم^{۱*} | توحید رحیم پور^۲

۱. نویسنده مسئول، استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: rezmogh@tabrizu.ac.ir
۲. پژوهشگر پس‌دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: t.rahimpour@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۰/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۳۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۲/۱۵

کلیدواژه:

پهنه‌بندی،

تحلیل آماری،

حوضه آبریز آجی چای،

سیلاب،

مخاطره.

سیلاب‌ها از مهم‌ترین و فراوان‌ترین مخاطرات ژئومورفیک در کشور محسوب می‌شوند که همه‌ساله خسارت‌های زیادی را برجای می‌گذارند. حوضه آبریز آجی چای در استان آذربایجان شرقی نیز به دلیل گستردگی مساحت و دارا بودن شرایط خاص توپوگرافی همه‌ساله شاهد وقوع سیلاب‌های مخرب است. هدف اصلی این تحقیق تهیه نقشه پتانسیل خطر وقوع سیل در سطح این حوضه است. برای دستیابی به این هدف از هجده پارامتر مؤثر در وقوع این مخاطره و همچنین دو روش آماری نسبت فراوانی (FR) و شاخص آماری (SI) استفاده شد. پارامترهای بررسی شده عبارت بودند از: ارتفاع، شیب، جهت شیب، بارش، فاصله از آبراهه، تراکم آبراهه، شاخص پوشش گیاهی، کاربری اراضی، فاصله از پل، فاصله از سد، لیتولوژی، گروه‌های هیدرولوژیکی خاک، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص حمل رسوب، شاخص قدرت آبراهه، بافت زهکشی، ژئومورفولوژی و انحنای زمین. برای تعیین وزن پارامترها و اجرای مدل‌های تحقیق از موقعیت نقاط سیلاب‌های گذشته در منطقه استفاده شد. نقشه‌های نهایی از حاصل ضرب وزن‌های هر یک از طبقات پارامترها در لایه‌های اطلاعاتی آنها تهیه شد که با استفاده از ابزار Natural Breaks در پنج دسته طبقه‌بندی شدند. نتایج نشان داد که الگوی توزیع فضایی پهنه‌های خطر در هر دو مدل مشابه است. به این ترتیب که مناطق پایین‌دست حوضه و اطراف آبراهه‌های اصلی منطقه پرخطرترین پهنه‌ها هستند. ارزیابی دقت نتایج هر دو مدل با منحنی ROC نشان داد که مقادیر سطح زیر منحنی برای مدل‌های SI و FR به ترتیب ۰/۹۴۵ و ۰/۹۱۹ بوده است که عملکرد عالی هر دو مدل را در تهیه نقشه پتانسیل خطر وقوع سیل نشان می‌دهد.

استناد: رضائی مقدم، محمدحسین و رحیم پور، توحید (۱۴۰۲). تهیه نقشه پتانسیل خطر وقوع سیل با استفاده از دو روش نسبت فراوانی و شاخص آماری (مطالعه موردی: حوضه آبریز آجی چای). مدیریت مخاطرات محیطی، ۱۰ (۴)، ۳۰۸-۲۹۱.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2024.369163.803>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© محمدحسین رضائی مقدم، توحید رحیم پور.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2024.369163.803>



۱. مقدمه

سیلاب‌ها از مخاطرات طبیعی و انسانی به‌شمار می‌آیند که سبب خسارات جانی و مالی می‌شوند [۴۴]. سیلاب‌ها اغلب به‌طور ناگهانی شروع می‌شوند و در مدت زمان اندکی خسارت‌های جبران‌ناپذیری بر جای می‌گذارند [۷]. در طول دو دهه گذشته فراوانی وقوع سیل در سراسر جهان بیش از ۴۰ درصد افزایش داشته است [۲۲]. روند افزایشی وقوع حوادث سیل اغلب نتیجه تغییرات آب‌وهوایی و همچنین تغییرات کاربری زمین ناشی از فعالیت‌های انسانی است [۲۲، ۳۹]. مناطق آسیب‌پذیرتر در برابر سیل، مناطقی با تراکم زیاد جمعیت، زمین‌های کشاورزی و همچنین شبکه‌های رودخانه‌ای هستند که رواناب ناشی از رویدادهای بارندگی در آنها متمرکز می‌شود [۱۷]. جلوگیری از وقوع سیل امکان‌پذیر نیست، اما می‌توان آن را از طریق تجزیه‌وتحلیل‌های مناسب و روش‌های پیش‌بینی، کنترل کرد [۱۵]. مدل‌سازی حساسیت سیل در حوضه‌های آبریز و کاهش خسارت‌های ناشی از آن یکی از مؤلفه‌های مهم مدیریت زیست‌محیطی و آب است [۳۸]. برای پیش‌بینی احتمال وقوع سیل و کاهش و مدیریت سیلاب‌های آینده، تهیه نقشه حساسیت سیل گامی ضروری است [۲۴]. از نقشه پهنه‌بندی پتانسیل خطر وقوع سیلاب می‌توان به‌منزله ابزاری مفید و کارآمد در برنامه‌ریزی مسیر توسعه یک منطقه چه از لحاظ ساخت‌وساز و توسعه زمین‌های کشاورزی و باغ‌ها و چه از لحاظ مدیریت مخاطره سیل استفاده کرد.

حوضه آبریز آجی‌چای در استان آذربایجان شرقی، زمین‌های وسیعی را از دامنه‌های جنوبی کوهستان سیلان به‌سمت دریاچه ارومیه زهکشی می‌کند. این حوضه به‌دلیل گستردگی مساحت، دریافت بارش مناسب در طول سال و شرایط خاص توپوگرافی از پتانسیل زیادی برای وقوع سیل برخوردار است. ارتفاعات سیلان، قوشه‌داغ و سه‌دغ بارش‌های مناسبی را در طول فصول سرد به‌صورت برف دریافت می‌کنند. شروع بهار و آغاز بارش‌های موسوم به نیشان از یک طرف و گرم شدن تدریجی هوا و ذوب برف‌های ارتفاعات منطقه از سوی دیگر سبب می‌شود که آبراهه‌های فرعی منطقه همراه با رودخانه آجی‌چای پرآب شوند و حالت طغیان به خود بگیرند. سکونتگاه‌ها، زمین‌های کشاورزی و باغ‌های زیادی در اطراف رودخانه آجی‌چای و آبراهه‌های اصلی زیرحوضه‌ها قرار دارند. همه‌ساله با شروع فصل بهار این مناطق از نظر خطر وقوع سیلاب تهدید می‌شوند. تحقیق حاضر تلاش می‌کند تا الگویی فضایی از پراکنش پتانسیل خطر وقوع سیل را در سطح حوضه آبریز آجی‌چای تحت نرم‌افزارهای سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) ارائه دهد. نتایج این تحقیق به مدیران و برنامه‌ریزان منطقه برای مدیریت هرچه بهتر مخاطره سیلاب کمک شایانی می‌کند.

۲. پیشینه پژوهش

تحقیقات خوبی در زمینه تهیه نقشه‌های پتانسیل خطر وقوع سیل در داخل و خارج از کشور صورت گرفته است که در ادامه به برخی از تازه‌ترین آنها اشاره می‌شود. معروفی‌نیا و همکاران (۱۳۹۵) با استفاده از روش شاخص آماری نقشه خطر وقوع سیل در حوضه آبریز هراز واقع در استان مازندران را تهیه کردند. در این تحقیق از پارامترهای طبقات ارتفاعی، شیب، انحنای زمین، شاخص رطوبت توپوگرافی، توان آبراهه، میانگین بارندگی، فاصله از رودخانه، زمین‌شناسی و کاربری اراضی استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد که دقت مدل شاخص آماری در تهیه نقشه نهایی برای حوضه آبریز هراز ۹۰ درصد بوده است [۸]. آزدطلب و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده از مدل‌های ترکیبی شاخص آماری و تابع شواهد قطعی نقشه پهنه‌بندی خطر سیلاب در شهر سنج را تهیه کردند. در این تحقیق از فاکتورهای درصد شیب، جهت شیب، ارتفاع، فاصله از رودخانه، تراکم رودخانه، تجمع جریان، کاربری اراضی، انحنای شیب، لیتولوژی، فاصله از معابر، تراکم معابر، فاصله از ساختمان، تراکم ساختمان و میزان بارندگی استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد که تراکم ساختمانی و معابر شهری عوامل اصلی در وقوع سیلاب شهر سنج هستند. نتایج ارزیابی عملکرد مدل‌ها نیز نشان داد که مدل تابع شواهد قطعی نسبت به مدل شاخص آماری عملکرد بهتری دارد [۱]. رحیم‌پور و همکاران (۱۴۰۰) در تحقیقی به تحلیل تغییرات فضایی خطر وقوع سیل بر پایه نوعی مدل ترکیبی نوین (FURIA-GA-AdaBoost) پرداختند. منطقه این تحقیق حوضه آبریز ال‌ندچای واقع در شهرستان خوی بود. آنها از ۱۳ پارامتر استفاده کردند: لیتولوژی، گروه‌های هیدرولوژیکی خاک، شاخص پوشش گیاهی، کاربری اراضی، شیب، جهت شیب، ارتفاع، فاصله از آبراهه، تراکم آبراهه، بارش،

شاخص رطوبت توپوگرافیک، شاخص قدرت آبراهه و شاخص حمل رسوب. یافته‌های آنان نشان داد مناطقی که حساسیت زیادی از نظر خطر وقوع سیل دارند، اغلب در پایین دست حوضه قرار دارند که مناطق مسطح و کم‌ارتفاع را شامل می‌شوند [۶].

حجاریان (۱۴۰۲) با استفاده از دو روش یادگیری ماشین جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان به مدل‌سازی مناطق حساس به وقوع سیل در استان اصفهان پرداخت. در این تحقیق از چهار گروه عوامل اقلیمی، توپوگرافی، عوامل زیستی و انسان‌ساخت استفاده شد. نتایج ارزیابی دقت مدل‌ها نشان داد که هر دو مدل از دقت مناسبی برخوردارند. همچنین نتایج نشان داد که براساس مدل جنگل تصادفی، حدود ۴۱ درصد و براساس مدل ماشین بردار پشتیبان حدود ۲۹ درصد از مساحت منطقه در طبقه خطر قرار دارند [۵].

وانگ و همکاران (۲۰۲۱)، در تحقیقی با استفاده از روش‌های نسبت فراوانی و شاخص آنتروپی نقشه حساسیت خطر وقوع سیل را برای منطقه پویانگ واقع در کشور چین تهیه کردند. برای تهیه نقشه حساسیت خطر وقوع سیل دوازده پارامتر شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، انحنای پلان، انحنای پروفیل، شاخص قدرت آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص حمل رسوب، کاربری اراضی، لیتولوژی، خاک و بارش انتخاب شد. بررسی اهمیت پارامترها نشان داد که لایه‌های ارتفاع، شیب و خاک نقش مؤثری در وقوع سیل دارند. همچنین نتایج تحقیق نشان داد که بین ۲۰ تا ۵۰ درصد از مساحت منطقه در طبقات زیاد و خیلی زیاد از نظر حساسیت خطر وقوع سیل قرار دارد [۴۱].

ماجد و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از مدل‌های تحلیل سلسله‌مراتبی و نسبت فراوانی به تهیه نقشه حساسیت خطر وقوع سیل در بخش جلوم پاکستان پرداختند. شاخص‌های استفاده‌شده عبارت بودند از: ارتفاع، شیب، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، خاک و بارش. براساس نتایج وزن‌دهی عوامل، تراکم زهکشی بیشترین وزن را داشت. نتایج تحقیق نشان داد که حدود ۱۱ درصد منطقه در طبقات زیاد و خیلی زیاد از نظر حساسیت خطر وقوع سیل قرار دارد [۲۷].

۳. روش‌شناسی پژوهش

۳.۱. محدوده پژوهش

حوضه آبریز آجی‌چای در شمال غرب ایران از بزرگ‌ترین زیرحوضه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه محسوب می‌شود. این حوضه از نظر تقسیمات سیاسی در استان آذربایجان شرقی و از نظر موقعیت جغرافیایی بین $37^{\circ} 41' 03''$ تا $38^{\circ} 29' 07''$ عرض شمالی و $48^{\circ} 07' 07''$ تا $48^{\circ} 48' 07''$ طول شرقی قرار دارد (شکل ۱). این حوضه در شرق دریاچه ارومیه واقع شده و مساحت آن حدود $10985/9$ کیلومترمربع است. تغییرات ارتفاعی حوضه از 1255 متر در خروجی حوضه تا 3816 متر در دامنه‌های کوهستان سبلان است. مهم‌ترین رودخانه‌ای که آب‌های سطحی این حوضه را زهکشی می‌کند آجی‌چای نام دارد. بررسی اطلاعات ایستگاه‌های سینوپتیک (۴ ایستگاه تبریز، بستان‌آباد، سراب و هریس) و باران‌سنجی (۲۴ ایستگاه) موجود در سطح منطقه نشان می‌دهد که میانگین بارش سالانه حوضه آجی‌چای 315 میلی‌متر است. همچنین میانگین دمای منطقه نیز براساس داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک $11/08$ درجه سانتی‌گراد است.

۳.۲. مدل نسبت فراوانی (FR^1)

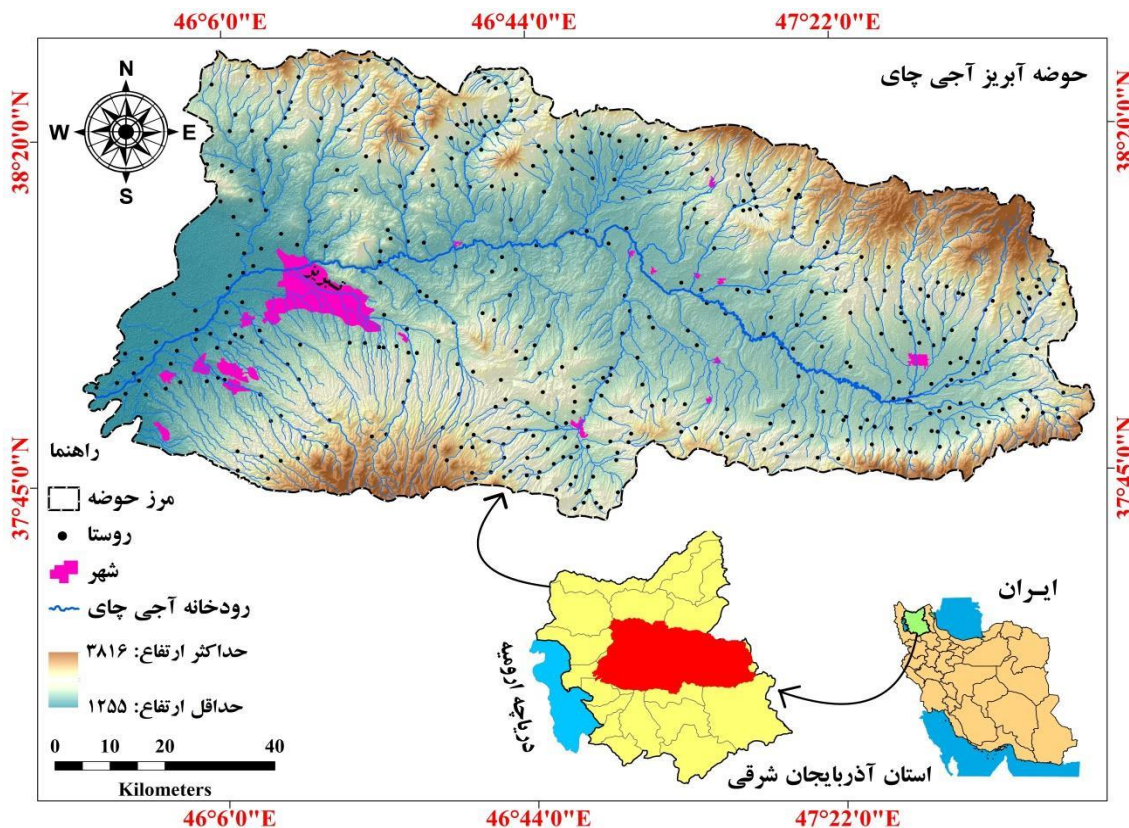
مدل نسبت فراوانی برای بررسی ارتباط احتمالی بین متغیرهای وابسته و مستقل و ارزیابی مقدار ضریب وزنی هر طبقه از متغیر مرتبط با سیل استفاده می‌شود [۲۵، ۱۴]. این رویکرد را می‌توان یک شاخص FR توصیف کرد که نشان‌دهنده رابطه کمی بین خطر وقوع سیل و شرایط مختلف شاخص‌هاست [۱۴]. این شاخص براساس رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$FFHSI = \sum FR \quad (1)$$

که در آن $FFHSI$ شاخص حساسیت خطر وقوع سیل و FR نسبت فراوانی برای هر پارامتر است. FR را می‌توان به‌عنوان نسبت منطقه‌ای که در آن خطر وقوع سیل ممکن است رخ دهد به کل منطقه پژوهش، یا نسبت احتمال خطر وقوع سیل به وقوع نیافتن آن تعریف کرد. برای محاسبه مقادیر ضریب وزنی در روش نسبت فراوانی از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$FRv_i = \frac{F_c_i}{\frac{F_s}{\frac{A_c_i}{A_s}}} \quad (2)$$

که در آن F_c_i تعداد پیکسل‌های سیلابی برای هر طبقه از متغیر i ؛ F_s تعداد کل پیکسل‌های سیلابی در منطقه پژوهش؛ A_c_i تعداد پیکسل‌های هر طبقه از متغیر i ؛ و A_s تعداد کل پیکسل‌ها در منطقه پژوهش است. در این تحلیل اگر مقدار FR بزرگ‌تر از ۱ باشد به معنای وجود همبستگی قوی‌تر و مقدار کمتر از ۱ به معنای وجود همبستگی ضعیف‌تر است [۱۴].



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه پژوهش در ایران و استان آذربایجان شرقی

۳.۳. مدل شاخص آماری (SI)

روش شاخص آماری توسط ون وستن در سال ۱۹۹۷ معرفی شد [۴۲]. این روش نوعی تحلیل آماری دومتغیره است که به‌طور گسترده در بسیاری از پژوهش‌ها استفاده شده است [۳۱، ۴۲]. 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 تحت بررسی تعریف می‌شود. این روش براساس توزیع خطر سیل در هر طبقه است [۱۴] و با استفاده از رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$W_{ij} = \ln \left(\frac{D_{ij}}{D} \right) = \ln \left[\left(\frac{N_{ij}}{M_{ij}} \right) / \left(\frac{N}{M} \right) \right] \quad (3)$$

در این رابطه W_{ij} وزن داده‌شده به طبقه i از پارامتر j است. D_{ij} تراکم خطر سیل در طبقه i از پارامتر j و D تراکم کلی خطر وقوع سیل در محدوده است. N_{ij} تعداد پیکسل‌های خطر وقوع سیل در طبقه i از پارامتر j و M_{ij} تعداد پیکسل‌ها در طبقه i از پارامتر j است. N تعداد کل پیکسل‌های خطر وقوع سیل در محدوده پژوهش و M تعداد کل پیکسل‌های محدوده است. از آنجا که لگاریتم طبیعی (\ln) تعریف نشده است، مقدار وزنی (W_{ij}) را فقط می‌توان برای طبقات حاوی خطرهای سیل ناگهانی محاسبه کرد.

$$FFHSI = \sum_{R=1}^{R=n} W_{ij} \quad (۴)$$

که در آن FFHSI، W_{ij} و n به ترتیب نشان دهنده شاخص حساسیت خطر وقوع سیل، مقادیر وزنی طبقه i از پارامتر Z با استفاده از مدل SI و تعداد پارامترها هستند [۱۴].

جدول ۱. منبع تهیه لایه‌های اطلاعاتی

قدردت تفکیک مکانی	منبع استخراج لایه	لایه‌های اطلاعاتی
۲۸ × ۲۸ متر	مدل رقومی ارتفاعی زمین (DEM)	ارتفاع، شیب، جهت شیب، انحنای زمین، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص حمل رسوب، شاخص قدرت آبراهه، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی
روش درون‌یابی با اندازه پیکسل ۳۰ متر	اطلاعات بارش ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی	بارش
۳۰ × ۳۰ متر	تصویر لندست ۸ سنجنده OLI	پوشش گیاهی
۱۰ × ۱۰ متر	تصویر سنتینل ۲	کاربری اراضی
۳۰ × ۳۰ متر	سامانه Google Earth	پل‌ها و سدها
۱:۱۰۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰۰	نقشه زمین‌شناسی	لیتولوژی
۱:۵۰۰۰۰ و ۱:۱۰۰۰۰۰	نقشه زمین‌شناسی، توپوگرافی، تصاویر لندست	ژئومورفولوژی
۳۰ × ۳۰ متر	داده‌های جهانی گروه‌های هیدرولوژیکی خاک	خاک

۳.۴. اعتبارسنجی مدل‌ها

در این پژوهش برای ارزیابی دقت نقشه‌های حساسیت خطر وقوع سیل از منحنی مشخصه عملیاتی دریافت‌کننده یا منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) و سطح زیر منحنی (AUC) استفاده شد. در منحنی ROC روی محور X مقدار تشخیص‌پذیری یا ویژگی Specificity (نسبت پیکسل‌های بدون سیل که به‌درستی به‌عنوان بدون سیل طبقه‌بندی شده‌اند) و روی محور Y مقدار حساسیت Sensitivity (نسبت پیکسل‌های سیل که به‌درستی به‌عنوان سیل طبقه‌بندی شده‌اند) مشخص است. مقادیر Specificity و Sensitivity با استفاده از رابطه‌های زیر محاسبه می‌شوند:

$$\text{specificity} = \frac{TN}{FP + TN} \quad (۵)$$

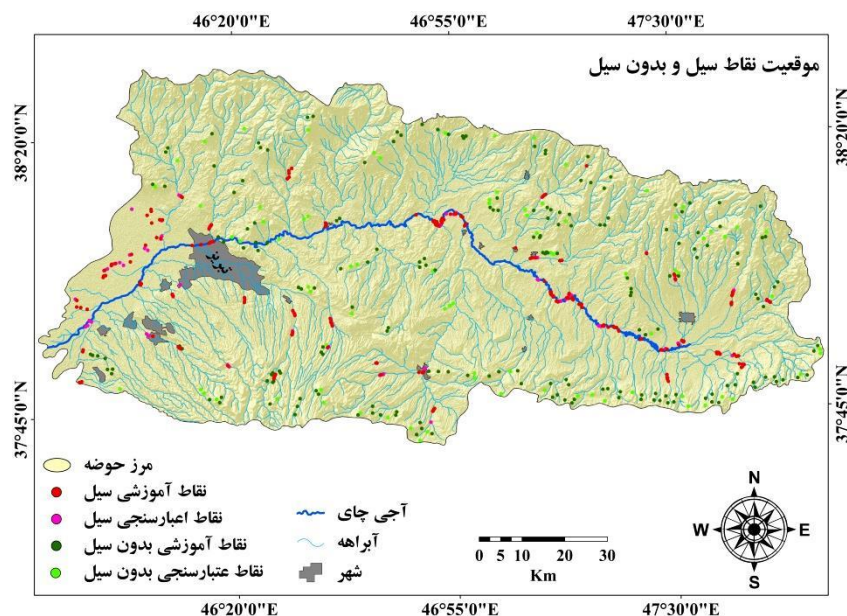
$$\text{sensitivity} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (۶)$$

TN تعداد مناطق بدون سیل که درست تشخیص داده شده‌اند؛ FP تعداد نقاط سیل که اشتباه تشخیص داده شده‌اند؛ TP تعداد نقاط سیل که درست تشخیص داده شده‌اند و FN تعداد نقاط بدون سیل که اشتباه تشخیص داده شده‌اند است. برای نشان دادن عملکرد هر یک از مدل‌ها از شاخص آماری صحت (Accuracy) نیز استفاده شد. این شاخص نسبت نقاط سیل‌گیر و بدون سیل را که به‌درستی طبقه‌بندی شده‌اند نشان می‌دهد.

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (۷)$$

۳.۵. تهیه نقشه نقاط سیلابی

نقشه نقاط سیل و بدون سیل که برای اجرای مدل‌ها و ارزیابی نتایج آنها استفاده می‌شود، 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 شد. پس از تهیه نقاط سیل و بدون سیل، ۷۰ درصد داده‌ها (۱۹۲ نقطه سیل‌گیر و ۱۹۲ نقطه بدون سیل) به‌عنوان داده‌های آموزشی و ۳۰ درصد داده‌ها (۸۲ نقطه سیل‌گیر و ۸۲ نقطه بدون سیل) به‌عنوان داده‌های اعتبارسنجی انتخاب شدند. به‌منظور انتخاب داده‌های آموزشی و اعتبارسنجی به‌صورت تصادفی از ابزار Geostatistical Analyst در نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد.



شکل ۲. پراکنش مکانی نقاط سیل و بدون سیل در سطح حوضه آبریز آجی‌چای

۳.۶. تهیه لایه‌های اطلاعاتی

در پژوهش حاضر با بررسی پژوهش‌های انجام‌گرفته در زمینه موضوع تحقیق و همچنین در دسترس بودن داده‌ها، هجده پارامتر مؤثر در وقوع سیل برای تهیه نقشه‌های پتانسیل خطر وقوع سیلاب در سطح حوضه آبریز آجی‌چای انتخاب شد. در ادامه به تحلیل نقش هر یک از پارامترها و نحوه تهیه نقشه آنها پرداخته شده است.

ارتفاع از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده سیل است [۱۸]. ارتفاع در مدل‌سازی سیلاب مهم است، زیرا بر شرایط بارش و جریان تأثیر می‌گذارد [۹]. برای تهیه نقشه طبقات ارتفاعی منطقه از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۲۸ متر استفاده شد. تغییرات ارتفاعی منطقه بین ۱۲۵۵ تا ۳۸۱۶ متر ارتفاع از سطح دریا متغیر است که ارتفاعات بالاتر، دامنه‌های کوهستان‌های سهند و سیلان را شامل می‌شود. شیب اثر مهمی در تنظیم رواناب سطحی، نفوذ و نگهداری آب دارد و در نتیجه بر حساسیت یک منطقه به سیل تأثیر می‌گذارد [۲۹]. نقشه شیب منطقه نشان می‌دهد که بیش از ۴۲ درصد از مساحت منطقه دارای شیب بین ۰ تا ۱۰ درصد است. از این رو می‌توان گفت که این مناطق مستعد خطر وقوع سیل هستند. جهت شیب رابطه مستقیمی با شرایط هیدرولوژیکی، آب‌وهوای محلی و الگوهای رطوبتی دارد [۳۵، ۳۶]. نقشه شیب منطقه در نه طبقه شامل چهار جهت اصلی، چهار جهت فرعی و مناطق مسطح با استفاده از لایه DEM تهیه شد. بارندگی از مهم‌ترین پارامترها در وقوع سیل است. منشأ و نحوه شکل‌گیری رویداد سیل ارتباط مستقیمی با بارندگی دارد [۱۶]. نقشه بارش منطقه با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی موجود در داخل محدوده حوضه آبریز آجی‌چای و روش درون‌یابی IDW در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. فاصله از آبراهه به دلیل تأثیر مستقیم آن بر رواناب، از مهم‌ترین عوامل در وقوع سیل است [۲۶، ۱۲]. نقشه فاصله از آبراهه با استفاده از ابزار فاصله اقلیدسی^۱ و در پنج طبقه در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. تراکم زهکشی حوضه آبریز تأثیر مهمی بر وسعت و شدت سیل دارد، زیرا شبکه رودخانه‌ای و مناطق اطراف آن برای بروز یک رویداد سیل بسیار حساس‌اند [۱۹، ۲۱]. نقشه تراکم زهکشی منطقه با استفاده از ابزار تراکم خطی و در پنج طبقه در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. شاخص پوشش گیاهی از عواملی است که به طور گسترده برای تعیین حساسیت به سیل استفاده می‌شود [۳۴]. به‌منظور تهیه نقشه شاخص پوشش گیاهی منطقه از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ مربوط به سال ۲۰۲۲ استفاده شده است. کاربری اراضی تأثیر مهمی در شناسایی مناطقی دارد که حساسیت زیادی نسبت به سیل نشان می‌دهند [۳۰]. در پژوهش

1. Euclidean Distance

حاضر از نقشه کاربری اراضی استخراج شده توسط شرکت Esri از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر و مربوط به سال ۲۰۲۲ استفاده شد. **پل‌ها** مهم‌ترین و پرکاربردترین سازه‌هایی هستند که از دیرباز توسط انسان‌ها روی رودخانه‌ها ایجاد و استفاده شده‌اند. برای تهیه نقشه موقعیت مکانی پل‌ها از سامانه Google Earth استفاده شد. پس از شناسایی و تعیین موقعیت پل‌ها روی رودخانه‌های منطقه، اطلاعات جمع‌آوری شده برای تهیه پایگاه داده وارد نرم‌افزار ArcGIS شد. در نهایت با استفاده از ابزار فاصله اقلیدسی نقشه فاصله از پل‌های منطقه در پنج طبقه تهیه شد. **سدها** با ذخیره آب در مخازن خود، احتمال وقوع سیل در پایین دست را کاهش می‌دهند [۳]. اما یک آبراهه دائمی در پایین دست سد با وقوع رگبارهای متناوب، سبب بالا آمدن سطح آب و طغیانی شدن رودخانه می‌شود و مسیرهای دسترسی را با چالش‌های بزرگی روبه‌رو می‌کند [۴]. از این رو در برنامه‌های مدیریت سیلاب در نظر گرفتن اثر سازه‌های انسان‌ساخت از قبیل سدها بر پهنه‌های سیل‌گیر اهمیت فراوانی دارد. در پژوهش حاضر موقعیت مکانی سدهای منطقه از طریق سامانه Google Earth مشخص شد و سپس به محیط نرم‌افزار ArcGIS انتقال داده شدند. تصور می‌شود که نوسان‌های زمانی و مکانی در هیدرولوژی حوضه زهکشی و تولید رسوب تحت تأثیر **لیتولوژی** قرار می‌گیرند [۱۱]. نقشه لیتولوژی منطقه با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰۰ (برگه‌های تبریز، سراب، بستان‌آباد، هریس، اسکو و خوجا) برگرفته از سازمان زمین‌شناسی کشور تهیه شد. **گروه‌های هیدرولوژیکی خاک** را به چهار گروه اصلی A، B، C و D طبقه‌بندی می‌کنند. خاک‌های گروه A از پتانسیل کمی برای تولید رواناب برخوردارند، در مقابل خاک‌های گروه D دارای حداکثر پتانسیل برای تشکیل رواناب هستند [۲۰]. در این پژوهش نقشه گروه‌های هیدرولوژیکی خاک حوضه آبریز آجی‌چای با استفاده از داده‌های جهانی گروه‌های هیدرولوژیکی خاک برگرفته از وب‌سایت ناسا، نقشه‌های زمین‌شناسی و همچنین لایه کاربری اراضی در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. **شاخص رطوبت توپوگرافی** (TWI^1) یکی از ویژگی‌های فیزیکی حوضه آبریز است که در حوادث سیل مؤثر بوده و شامل دو اندازه‌گیری موقعیت هیدروگرافی و زمین مسطح است [۳۲]. نقشه شاخص رطوبت توپوگرافی در نرم‌افزار SAGA تهیه شد. مقادیر این شاخص برای منطقه پژوهش بین ۵/۱۵ تا ۱۱/۷۷ متغیر بوده است. **شاخص قدرت آبراهه** (SPI^2) ظرفیت فرسایشی آب‌های سطحی را نشان می‌دهد که بر آسیب‌پذیری سیل نیز تأثیر می‌گذارد [۲۳، ۲۸]. توزیع فضایی مقادیر این شاخص در منطقه پژوهش بین ۰ تا ۶۹۸۰ متغیر بوده است. **شاخص حمل رسوب** (STI^3) شکل کلی رواناب را نشان می‌دهد. مناطقی که با رواناب بیشتر همراه هستند، انتقال رسوب بیشتری دارند و در نتیجه حساسیت کمتری را برای سیل نشان می‌دهند [۱۰]. **بافت زهکشی** یکی از جنبه‌های مهم ژئومورفولوژی بوده و به معنای فاصله نسبی بین آبراهه‌هاست [۱۳]. بیشتر بودن مقدار بافت زهکشی نشان‌دهنده ظرفیت نفوذپذیری کم و در نتیجه افزایش پتانسیل رواناب در حوضه آبریز است [۷]. سنگ‌های نرم و ضعیف بدون پوشش گیاهی، بافت ریز و نرمی را نشان می‌دهد، در حالی که سنگ‌های بزرگ و مقاوم بافتی درشت و خشن ایجاد می‌کنند [۴۰]. **ژئومورفولوژی** یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار در تهیه نقشه‌های پیش‌بینی سیل است که بر دبی آب و نرخ رواناب تأثیر می‌گذارد [۳۷]. دو لندفرم ژئومورفیک مهم‌ترین عوارض جغرافیایی حوضه آبریز آجی‌چای را شکل می‌دهند: ۱. واحد کوهستان‌های مرتفع در بخش‌های شمالی و جنوبی حوضه؛ ۲. سطوح هموار و دشتی در بین کوه‌ها که به صورت خط ممتدی از غرب به شرق کشیده شده‌اند. از آنجا که بخش‌های کوهستانی شیب‌های تند دارند، از دبی و رواناب بیشتری برخوردارند. در نتیجه همه رواناب‌های شکل‌گرفته در این بخش‌ها به سمت مناطق دشتی پایین دست خود جریان پیدا می‌کنند و موجب سیل و وارد آمدن خسارت‌های جانی و مالی زیادی در این قسمت‌ها می‌شوند. **انحنای زمین** عمود بر جهت شیب است و اثر مهمی در زمینه تحلیل حساسیت سیل دارد [۳۳]. سطوح محدب بیشتر مستعد شکل‌گیری رواناب هستند. در مقابل پتانسیل خطر وقوع سیل در سطوح مسطح و مقعر بسیار زیاد است. نقشه انحنای زمین با استفاده از لایه DEM در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد.

1. Topographic Wetness Index
2. Stream power index
3. Sediment transport index

۴. یافته‌های پژوهش

با تهیه لایه‌های اطلاعاتی هر یک از پارامترها و تعیین مقادیر پیکسل‌های هر طبقه، وزن هر یک از طبقه‌های لایه‌ها با استفاده از روش‌های نسبت فراوانی و شاخص آماری محاسبه شد. وزن هر یک از طبقات لایه‌ها با استفاده از موقعیت نقاط سیلاب‌های رخ داده در منطقه محاسبه شد. نتایج این بخش به صورت جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. وزن طبقات هر یک از لایه‌های اطلاعاتی

SI	FR	تعداد نقاط سیل	تعداد پیکسل	طبقه	پارامتر
۰/۴۸۶	۱/۶۲	۱۴۳	۶۴۲۰۰۱۸	۱۲۵۵ - ۱۷۶۷	ارتفاع
-۰/۳۹۰	۰/۶۷	۴۹	۵۲۸۱۴۷۴	۱۷۶۸ - ۲۲۷۹	
.	.	.	۱۸۶۳۷۸۱	۲۲۸۰ - ۲۷۹۱	
.	.	.	۳۹۸۱۷۲۸	۲۷۹۲ - ۳۳۰۳	
.	.	.	۵۳۰۸۱	۳۳۰۴ - ۳۸۱۶	
۰/۶۷۰	۱/۹۵	۱۵۸	۵۸۹۷۱۸۲	۰ - ۱۰	شیب
-۰/۵۳۹	۰/۵۸	۳۱	۳۸۷۹۰۹۲	۱۰ - ۲۱	
-۲/۷۹	۰/۰۶۱	۲	۲۳۷۹۳۴۲	۲۱ - ۳۵	
-۲/۹۵	۰/۰۵۲	۱	۱۳۹۸۳۲۲	۳۵ - ۵۵	
.	.	.	۴۵۷۷۵۱	> ۵۵	
۰/۴۶۶	۱/۶	۴	۱۸۳۰۵۷	مسطح	جهت شیب
۰/۳۱۷	۱/۳۶	۳۸	۲۰۱۹۰۲۶	شمال	
-۰/۲۳۷	۰/۷۹۰	۱۶	۱۴۸۰۵۵۶	شمال شرق	
۰/۲۵۰	۱/۲۷	۲۳	۱۳۰۶۰۹۷	شرق	
۰/۰۷۵	۱/۰۸	۲۴	۱۶۲۳۷۰۲	جنوب شرق	
-۰/۱۵۲	۰/۸۶	۲۴	۲۰۴۱۱۴۵	جنوب	
۰/۰۰۸۲	۱	۲۵	۱۸۰۹۵۵۳	جنوب غرب	
-۰/۲۳۶	۰/۷۸	۱۷	۱۵۷۱۱۱۸	غرب	
-۰/۲۵۵	۰/۷۷	۲۱	۱۹۷۸۵۲۳	شمال غرب	
۰/۴۵۲	۱/۵۷	۵۹	۲۳۸۲۶۹۱	۲۱۵ - ۲۷۰	بارش
۰/۳۱۸	۱/۳۸	۵۳	۲۴۵۱۴۲۶	۲۷۱ - ۲۹۸	
-۰/۰۴۹	۰/۹۵	۳۸	۲۵۳۸۷۷۵	۲۹۹ - ۳۲۰	
-۰/۵۳۳	۰/۵۸	۲۳	۲۴۹۳۲۱۵	۳۲۱ - ۳۴۴	
-۰/۶۶۱	۰/۵۱	۱۹	۲۳۴۰۴۹۱	۳۴۵ - ۴۸۳	
۱/۱۶۴	۳/۲۰	۱۴۸	۲۹۳۵۰۸۵	۰ - ۲۵۰	فاصله از آبراهه
-۰/۸۲۷	۰/۴۳	۱۷	۲۴۷۲۸۶۶	۲۵۰ - ۵۰۰	
-۱/۸۵	۰/۱۰۸	۵	۲۰۲۴۳۵۹	۵۰۰ - ۷۵۰	
-۲/۱۰	۰/۱۲۲	۳	۱۵۵۷۶۹۹	۷۵۰ - ۱۰۰۰	
-۰/۹۷۹	۰/۳۷۶	۱۹	۳۲۱۶۵۱۰	> ۱۰۰۰	
-۰/۱۶۷	۰/۸۴	۳۰	۲۲۵۴۸۹۳	۰ - ۰/۳۰	تراکم آبراهه
-۰/۴۴۵	۰/۶۴	۲۴	۲۳۸۱۲۹۰	۰/۳۱ - ۰/۴۲	
-۰/۷۲۲	۰/۴۸	۲۰	۲۶۱۷۶۴۸	۰/۴۳ - ۰/۵۲	
۰/۳۸۹	۱/۴۷	۸۵	۳۶۵۹۵۵۱	۰/۵۳ - ۰/۷۱	
۰/۵۰۳	۱/۶۲	۳۳	۱۲۹۳۱۳۷	۰/۷۲ - ۱/۳۱	
.	.	.	۱۵۳۳۹	-۰/۱۷ - ۰	شاخص پوشش گیاهی
-۰/۶۱۸	۰/۵۳	۷۹	۹۳۲۶۰۷۴	۰/۰۱ - ۰/۲۰	
۰/۴۶۴	۱/۵۹	۴۸	۱۹۱۷۱۴۶	۰/۲۱ - ۰/۳۰	
۱/۳۸۳	۴/۰۱	۴۱	۶۵۳۱۹۴	۰/۳۱ - ۰/۴۰	
۱/۶۴۳	۵/۲۰	۲۴	۲۹۴۹۰۰	۰/۴۱ - ۰/۶۱	
۲/۶۰	۱۳/۸	۳۲	۱۴۹۶۳۱	۰ - ۳۰۰	فاصله از یل
۱/۲۰۰	۳/۳۲	۱۸	۳۴۴۵۳۹	۳۰۰ - ۶۰۰	
۱/۱۸۲	۳/۳۳	۲۵	۴۸۷۲۴۴	۶۰۰ - ۹۰۰	
۰/۵۴۷	۱/۷۲	۱۶	۵۸۸۵۱۱	۹۰۰ - ۱۲۰۰	
-۰/۵۰۴	۰/۶۰	۱۰۱	۱۰۶۳۶۶۷۳	> ۱۲۰۰	

ادامه جدول ۲.

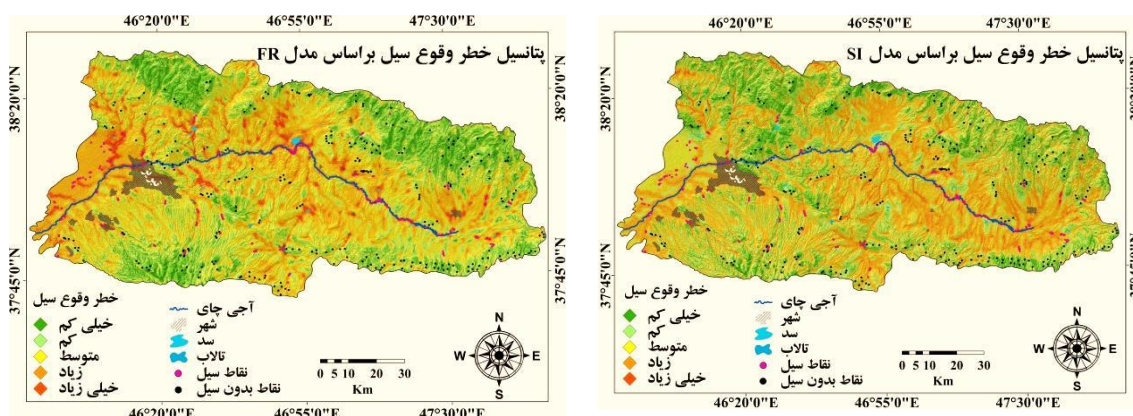
SI	FR	تعداد نقاط سیل	تعداد پیکسل	طبقه	پارامتر
.	.	.	۱۱۴۸۶۴	آب (تالاب و سد)	
۲/۳۶۱	۱۰/۲۵	۸	۴۳۱۶۷۱	باغ	
۰/۹۵۳	۲/۶	۱۰۰	۲۲۰۱۰۱۵۴	کشاورزی	کاربری اراضی
۱/۳۷۱	۰/۳۹	۵۲	۷۵۳۶۹۴۸۳	مرتع	
۱/۲۱۲	۳/۳۹	۳۰	۵۱۰۷۵۲۳	مناطق ساخته شده	
-۱/۷۸۹	۰/۱۶۷	۲	۶۸۲۶۱۵۸	مناطق سنگی یا خاکی	
.	.	.	۱۵۷۹۵۰	۰ - ۱۰۰۰	
۱/۰۳۸	۲/۹۱	۱۳	۲۹۲۶۷۸	۱۰۰۰ - ۲۰۰۰	
۱/۵۱۴	۴/۵۸	۳۰	۴۱۹۴۶۳	۲۰۰۰ - ۳۰۰۰	فاصله از سد
۰/۸۶۱	۲/۳۹	۱۹	۵۱۰۶۲۷	۳۰۰۰ - ۴۰۰۰	
-۰/۲۶۹	۰/۷۶	۱۳۰	۱۰۸۲۵۸۱۰	> ۴۰۰۰	
۳/۵۳	۳۳/۹	۳۸	۷۰۷۶۴	A	
۱/۰۳	۲/۸۱	۷۳	۱۶۵۱۰۲۳	B	گروه‌های
-۰/۷۲	۰/۴۸	۷۸	۱۰۱۸۹۰۰۸	C	هیدرولوژیکی خاک
-۰/۴۳	۰/۶۴	۳	۲۹۵۹۲۷	D	
-۳/۵۹	۰/۰۲۷	۱	۲۶۴۴۹۲۰	۵/۱۵ - ۶/۵۲	
-۱/۶۹	۰/۱۸	۹	۳۵۹۰۷۴۸	۶/۵۳ - ۷/۲۲	شاخص رطوبت
۰/۰۴۶	۱/۰۴	۵۲	۳۶۲۳۳۰۲	۷/۲۳ - ۷/۹۲	توپوگرافی
۰/۷۴۳	۲/۱۰	۸۵	۲۹۴۹۸۱۷۰	۷/۹۳ - ۸/۷۸	
۱	۲/۷۵	۴۵	۱۲۰۳۹۶۸	۸/۷۹ - ۱۱/۷۷	
۰/۶۹۱	۲	۱۵۶	۵۶۹۹۴۸۴	۰ - ۳۰۰	
-۰/۵۴۶	۰/۵۷	۳۰	۳۸۱۶۷۲۳	۳۰۱ - ۵۰۰	شاخص حمل
-۱/۸۸	۰/۱۵۲	۵	۲۳۹۸۴۴۲	۵۰۱ - ۷۰۰	رسوب
-۰/۷۱۱	۰/۰۴۹	۱	۱۴۸۵۲۴۹	۷۰۱ - ۹۰۰	
.	.	.	۶۱۱۷۱۱	> ۹۰۰	
۰/۶۷۸	۱/۹۷	۱۵۷	۵۸۱۱۳۰۷	۰ - ۱۴۰۰	
-۰/۵۴۶	۰/۵۸	۲۹	۳۶۵۳۸۷۳	۱۴۰۱ - ۲۷۹۰	شاخص قدرت
-۱/۸۷	۰/۱۵	۵	۲۳۸۹۳۰۱	۲۷۹۱ - ۴۲۰۰	آبراهه
-۳/۰۴	۰/۰۴۷	۱	۱۵۲۹۸۴۹	۴۲۰۱ - ۵۵۸۰	
.	.	.	۶۲۷۲۵۹	۵۵۸۱ - ۶۹۸۰	
۰/۰۷۱	۱/۷۳	۲۵	۱۴۱۹۳۲۰	۰/۳۳ - ۰/۴۰	
۰/۳۲۴	۱/۵۱	۷۴	۳۲۶۲۹۹۲	۰/۴۱ - ۰/۵۰	
-۰/۲۷۶	۰/۸۳	۴۷	۳۷۷۹۰۲۴	۰/۵۱ - ۰/۶۰	بافت زهکشی
-۰/۲۷۹	۰/۸۳	۲۸	۲۲۵۶۹۵۷	۰/۶۱ - ۰/۷۰	
-۲/۷۸	۰/۰۶۷	۱	۹۸۷۴۸۶	۰/۷۱ - ۰/۹۰	
۰/۰۶۸	۱/۰۷	۹۷	۶۶۰۹۹۱۵	مقعر	انحنای زمین
۱/۲۲	۳/۴۱	۴۶	۹۸۵۲۷۱	مسطح	
-۰/۵۸۴	۰/۵۵	۴۹	۶۴۱۸۶۳۷	محدب	
.	.	.	۶۱۶۰۸۳۲	مناطق کوهستانی	
.	.	.	۷۶۳۶۷۰	کوه‌های کم ارتفاع	ژئومورفولوژی
-۱	۰/۳۶	۷	۱۲۱۷۷۱۴	تپه ماهورها	
.	.	.	۲۶۶۲۲	مخروط‌های آتشفشانی	

ادامه جدول ۲.

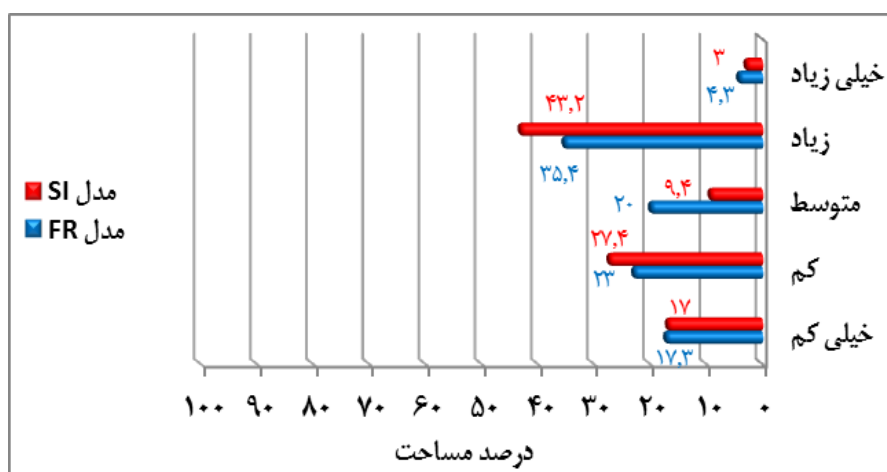
SI	FR	تعداد نقاط سیل	تعداد پیکسل	طبقه	پارامتر
۰/۸۲۱	۲/۲۷	۱۲۴	۳۴۶۵۴۳۰	سطوح دشتی	ژئومورفولوژی
۱/۸۱	۶/۱۸	۱۹	۱۹۵۸۱۵	دشت‌های میانکوهی	
۳/۴۱	۳۰/۸۴	۳۵	۷۲۹۸۰	بستر رودخانه	
.	.	.	۱۴۰۱	تالاب	
.	.	.	۱۳۹۱۷	سد	
۰/۴۳۷	۱/۵۴	۷	۲۸۷۴۱۳	شهر	
-۰/۳۰۳	-۰/۷۴	۱	۸۶۱۴۶	Qal	لیتولوژی
-۰/۰۹۸	۱/۰۹	۲۸	۱۶۱۲۷۵۵	Qt1	
-۰/۹۷۳	۲/۶۵	۶۷	۱۶۱۰۲۳۳	Qt2	
-۰/۷۳۷	۲/۰۸	۳	۹۲۱۷۳	Qsl	
-۰/۲۵۸	۱/۳	۱	۴۹۰۷۳	Qla	
.	.	.	۱۳۷۲۴۱	Qabv	
.	.	.	۱۰۰۷۸۶	Plqc	
.	.	.	۸۲۴۸۱	Pldvt	
.	.	.	۱۲۸۶۶۹	Plc	
۱/۱۴۵	۳/۱۵	۲	۴۰۴۴۶	Mure	
.	.	.	۱۹۵۴۹	Plms	
-۰/۲۴۵	-۰/۷۸	۱۶	۱۲۹۹۸۲۶	Murm	
-۰/۱۲۷	-۰/۸۷	۲۳	۱۶۶۱۹۹۸	Mur	
.	.	.	۲۲۵۷	Ogr	
.	.	.	۳۲۶۷۲۳	Ebv	
-۰/۲۰۷	۱/۲۳	۲	۱۰۳۳۰۸	Plqm	
.	.	.	۱۷۶۴۳	Omqm	
-۰/۸۷۵	-۰/۴۱	۶	۹۱۵۵۰۸	Plasv	
-۰/۲۱۶	۱/۲۴	۳۰	۱۵۳۶۵۲۲	Plmb1	
.	.	.	۱۱۶۸۳	Leof	
.	.	.	۲۰۸۶۲۴	Plmb3	
-۰/۹۶۲	-۰/۳۸	۷	۱۱۶۴۸۷۴	Eabv	
.	.	.	۱۴۰۲۷۹	Mdav	
.	.	.	۴۹۶۸۵	Pldsv	
.	.	.	۲۷۶۹۷	Egr	
.	.	.	۱۵۸۳۹	Edsv	
-۰/۳۳۳	۱/۳۹	۵	۲۲۷۷۱۷	Ku	
-۲/۰۳	-۰/۱۳	۱	۴۸۴۵۰۷	Kuft	
.	.	.	۴۲۳۹۳	Kav	
.	.	.	۱۰۷۵۷	TRe	

تجزیه و تحلیل نتایج وزن‌دهی لایه‌ها با استفاده از مدل‌های نسبت فراوانی و شاخص آماری براساس داده‌های موقعیت وقوع سیلاب‌های گذشته نشان می‌دهد که سطوح ارتفاعی بین ۱۷۶۷-۱۲۵۵ متر در هر دو مدل بیشترین وزن را دارند که نشان‌دهنده پتانسیل زیاد این مناطق از نظر وقوع سیل هستند. برای پارامتر شیب در هر دو مدل طبقه ۱۰-۰ درصد بیشترین تأثیر را در سیلاب‌های منطقه دارند. برای جهت شیب، سطوح مسطح و شمالی بیشترین تأثیر را در وقوع سیل نشان می‌دهند. در مورد فاصله از آبراهه، بیشترین وزن در هر دو مدل مربوط به طبقه ۲۵۰-۰ متر بوده است. طبقه ۱/۳۱ - ۰/۷۲ در تراکم زهکشی که بیشترین مقادیر را نشان می‌دهد، بیشترین وزن را در هر دو مدل داراست. درباره لایه انحنای زمین، سطوح مسطح بیشترین تأثیر را بر وقوع سیل نشان می‌دهد. در مورد پارامتر فاصله از پل، طبقه ۳۰۰-۰ متر که نزدیک‌ترین فاصله به پل‌ها محسوب می‌شود،

بیشترین وزن را در هر دو مدل به خود اختصاص داده است. نتایج تحلیل لایه ژئومورفولوژی نیز نشان می‌دهد که بستر رودخانه و دشت‌های میانکوهی در هر دو مدل وزن بیشتری داشته که نشان‌دهنده حساسیت زیاد این مناطق از نظر وقوع سیل است. پس از تعیین وزن هر یک از طبقات، برای تهیه نقشه‌های پتانسیل خطر وقوع سیل از ابزار تحلیل رستری در نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد و همپوشانی لایه‌ها انجام گرفت. نقشه‌های نهایی با استفاده از دستور شکست طبیعی در پنج دسته طبقه‌بندی شده‌اند (شکل ۳). بررسی نقشه‌های نهایی نشان می‌دهد که توزیع فضایی پهنه‌های خطر در هر دو مدل الگوی یکسانی دارند. خروجی هر دو مدل نشان می‌دهد که مناطق پایین‌دست حوضه که سطوح و هموار و جلگه‌ای را شامل می‌شوند مستعد خطر وقوع سیل هستند. دشت‌های سیلابی حاشیه رودخانه آجی‌چای پرخطرترین مناطق‌اند که همیشه با طغیانی شدن آجی‌چای متحمل خسارات مالی و جانی فراوان می‌شوند. شهرهای مهم منطقه نیز که اغلب در امتداد مسیر رودخانه‌های اصلی حوضه شکل گرفته‌اند در پهنه‌های با پتانسیل زیاد قرار گرفته‌اند که بیانگر آسیب‌پذیری این شهرها هنگام وقوع مخاطره سیلاب است. در مقابل پهنه‌هایی که در طبقات کم و خیلی کم از نظر وقوع سیل قرار دارند، ارتفاعات بالا و مناطق دور از آبراهه‌ها را شامل می‌شوند که احتمال آب‌گرفتگی این مناطق به هنگام وقوع سیل بسیار کمتر است. بررسی مساحت هر یک از طبقات خطر نشان می‌دهد که در مدل FR بیش از ۳۹ درصد و در مدل SI بیش از ۴۶ درصد از مساحت منطقه در پهنه‌های زیاد و خیلی زیاد قرار دارند (شکل ۴).



شکل ۳. نقشه‌های پتانسیل وقوع سیل با روش‌های نسبت فراوانی (FR) و شاخص آماری (SI)

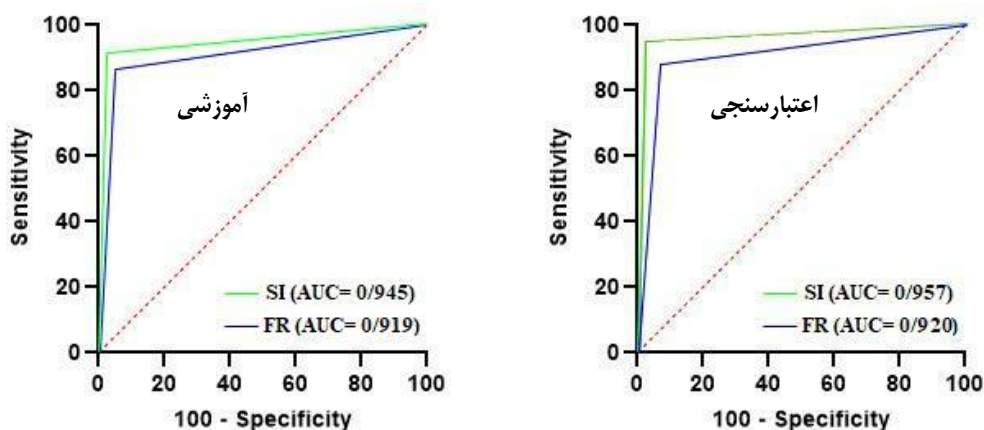


شکل ۴. درصد مساحت هر یک از طبقه‌های خطر در مدل‌های تحقیق

در ادامه تحقیق برای ارزیابی دقت نتایج هر دو مدل از شاخص‌های آماری از قبیل Sensitivity، Specificity و Accuracy و همچنین منحنی ROC و سطح زیر منحنی (AUC) استفاده شد. نتایج این بررسی نشان داد که هر دو مدل از عملکرد خوبی در تهیه نقشه‌های پتانسیل خطر وقوع سیل در منطقه برخوردارند و دقت نقشه‌های تهیه‌شده از هر دو مدل به نسبت یکسان است.

جدول ۳. ارزیابی دقت مدل تحقیق براساس داده‌های آموزشی و اعتبارسنجی

مدل	مدل FR		مدل SI	
	داده‌های آموزشی	داده‌های اعتبارسنجی	داده‌های آموزشی	داده‌های اعتبارسنجی
شاخص آماری				
True positive	۱۶۲	۷۰	۱۷۱	۷۵
True negative	۱۶۳	۷۱	۱۶۱	۶۷
False positive	۳۰	۱۲	۲۱	۷
False negative	۲۹	۱۱	۳۱	۱۵
Sensitivity (%)	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۴	۰/۸۳
Specificity (%)	۰/۸۴	۰/۸۶	۰/۸۸	۰/۹۰
Accuracy (%)	۰/۸۴	۰/۸۶	۰/۸۶	۰/۸۶



شکل ۵. منحنی ROC برای داده‌های آموزشی و اعتبارسنجی

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

سیلاب‌ها از مهم‌ترین مخاطرات ژئومورفیک محسوب می‌شوند که همه‌ساله خسارت‌های جانی و مالی فراوانی را در سطح کشور بر جای می‌گذارند. پژوهش حاضر تلاشی به‌منظور تهیه نقشه‌های پتانسیل خطر وقوع سیل در سطح حوضه آبریز آبی‌چای به‌منظور برنامه‌ریزی برای مدیریت این مخاطره بوده است. در این تحقیق از هجده پارامتر مؤثر در وقوع سیل به‌همراه داده‌های نقاط سیل و بدون سیل (۲۷۴ نقطه سیلابی و ۲۷۴ نقطه بدون سیل) برای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی استفاده شد. به‌منظور اجرای مدل‌های تحقیق و ارزیابی نتایج آنها، داده‌های نقاط سیل و بدون سیل به دو گروه آموزشی (۷۰ درصد) و اعتبارسنجی (۳۰ درصد) تقسیم شد. بررسی وزن نهایی پارامترها نشان داد که دشت‌های میانکوهی، سطوح هموار از نظر انحنای زمین، مناطق پایین‌دست حوضه به‌دلیل ارتفاع و شیب خیلی کم، پهنه‌های نزدیک آبراهه‌ها و پل‌ها بیشترین تأثیر بر وقوع سیل را در منطقه داشته‌اند. نقشه‌های نهایی از طریق همپوشانی و ضرب وزن نهایی هر یک از طبقه‌ها در لایه‌های اطلاعاتی خود در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه شدند. بررسی مساحت هر یک از طبقه‌های خطر در هر دو مدل نشان داد که در مدل نسبت فراوانی (FR)، ۴۳۷۳ کیلومتر مربع (۳۹/۷ درصد) از مساحت منطقه در طبقات زیاد و خیلی زیاد از نظر پتانسیل خطر وقوع سیل قرار دارند. در مدل شاخص آماری (SI) نیز ۵۰۸۵ کیلومتر مربع (۴۶/۲ درصد) از مساحت منطقه در پهنه‌های پرخطر قرار گرفته‌اند. اعتبارسنجی نقشه‌های نهایی با استفاده از منحنی ROC نشان داد که هر دو مدل عملکرد خوبی در شناسایی پهنه‌های سیلابی دارند. به این ترتیب که مقدار سطح زیر منحنی در مدل FR برابر با ۰/۹۱۹ و در مدل SI برابر با ۰/۹۴۵ بوده است. با توجه به نتایج هر دو مدل که بیانگر قرارگیری بیشتر شهرهای مهم حوضه در پهنه‌های با خطر زیاد است، توجه جدی مدیران و مسئولان مدیریت مخاطره سیلاب را ضرورت می‌بخشد. از جمله اقدامات ضروری برای مدیریت مخاطره سیلاب در سطح منطقه می‌توان به لایروبی مسیر آبراهه‌های اصلی و جلوگیری از تجاوز به حریم رودخانه‌ها اشاره کرد. نتایج این تحقیق با یافته‌های محققانی همچون آزادی و همکاران [۲] در حوضه آبریز کشکان و یاریان و همکاران [۴۳] در شهر سقز مطابقت دارد. محققان مذکور

استفاده از مدل‌های آماری را روش مناسبی برای پهنه‌بندی پتانسیل خطر وقوع سیل پیشنهاد کرده‌اند که نتایج این تحقیق نیز بیانگر آن است.

قدردانی

تحقیق حاضر بخشی از نتایج طرح پژوهشی دوره پسادکتری در دانشگاه تبریز است که با حمایت بنیاد ملی نخبگان در قالب طرح شهید دکتر چمران انجام گرفته است؛ بدین وسیله از آنها قدردانی می‌شود.

منابع

- [۱] آزادطلب، مهناز؛ شهابی، هیمین؛ شیرزادی، عطاله؛ و چپی، کامران (۱۳۹۹). پهنه‌بندی خطر سیلاب در شهر سندج با استفاده از مدل‌های ترکیبی شاخص آماری و تابع شواهد قطعی. *مطالعات شهری*، ۳۶، ۲۷-۴۰.
- [۲] آزادی، فهیمه؛ صدوق، سید حسن؛ قهرودی، منیژه؛ و شهابی، هیمین (۱۳۹۹). پهنه‌بندی حساسیت خطر سیل در حوضه آبخیز رودخانه کشکان با استفاده از دو مدل WOE و EBF. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۳۳، ۴۵-۶۰.
- [۳] پیرستانی، محمدرضا؛ و شفقتی، مهدی (۱۳۸۸). بررسی اثرات زیست‌محیطی احداث سد. *جغرافیای انسانی*، ۱(۳)، ۳۹-۵۰.
- [۴] حبیبی، محمدرضا؛ پاک‌باز، حمید؛ و صفایی کوچکسرای، علیرضا (۱۳۹۷). بررسی پارامترهای اساسی در ساخت سازه آگذر (پل) در مسیر رودخانه، مهندسی آب، ۶(۲)، ۱۲۴-۱۳۱.
- [۵] حجاریان، احمد (۱۴۰۲). مطالعه تطبیقی مدل‌سازی مناطق حساس به وقوع سیل (استان اصفهان). *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۱۰(۳)، ۱۹۹-۲۱۴. <https://doi.org/10.22059/jhsci.2023.362467.786>
- [۶] رحیم‌پور، توحید؛ رضائی‌مقدم، محمدحسین؛ حجازی، سید اسدالله؛ و ولیزاده کامران، خلیل (۱۴۰۰). تحلیل تغییرات فضایی حساسیت خطر وقوع سیل بر پایه نوعی مدل ترکیبی نوین (مطالعه موردی: حوضه آبریز الوندچای، شهرستان خوی). *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۸(۴)، ۳۷۱-۳۹۳. <https://doi.org/10.22059/jhsci.2022.335204.692>
- [۷] رضائی‌مقدم، محمدحسین؛ حجازی، سیداسدالله؛ ولیزاده کامران، خلیل؛ و رحیم‌پور، توحید (۱۳۹۹). بررسی حساسیت سیل‌خیزی حوضه‌های آبریز با استفاده از شاخص‌های هیدروژئومورفیک (مطالعه موردی: حوضه آبریز الوندچای، شمال غرب ایران). *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۹(۲)، ۱۹۵-۲۱۴. [10.22034/gmpj.2020.118241](https://doi.org/10.22034/gmpj.2020.118241)
- [۸] معروفی‌نیا، ادریس؛ نوحانی، ابراهیم؛ خسروی، خبات؛ و چپی، کامران (۱۳۹۵). ارزیابی روش شاخص آماری در تهیه نقشه حساسیت به وقوع سیل. *دانش آب‌و خاک*، ۲۶(۲)، ۲۰۱-۲۱۴.
- [9]. Ahmadlou, M., Karimi, M., Alizadeh, S., Shirzadi, A., Parvinnejhad, D., Shahabi, H., & Panahi, M. (2019). Flood susceptibility assessment using integration of adaptive network-based fuzzy inference system (ANFIS) and biogeography-based optimization (BBO) and BAT algorithms (BA). *Geocarto Int*, 34 (11), 1252–1272. <https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1474276>.
- [10]. Ajim Ali, Sk., Farhana Parvin, Bao Pham, Q., Vojtek, M., Vojteková, J., Costache, R., Thi Thuy Linh, N., Quan Nguyen, H., Ahmad, A., & Ghorbani, M.A. (2020). GIS-based comparative assessment of flood susceptibility mapping using hybrid multi-criteria decision-making approach, naïve Bayes tree, bivariate statistics and logistic regression: A case of Topľa basin, Slovakia. *Ecological Indicators*, 117. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106620>.
- [11]. 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>.
- [12]. Band, S.S., Janizadeh, S., Chandra Pal, S., Saha, A., Chakraborty, R., Melesse, A.M., & Mosavi, A. (2020). Flash Flood Susceptibility Modeling Using New Approaches of Hybrid and Ensemble Tree-Based Machine Learning Algorithms. *Remote Sensing*, 12 (21). <https://doi.org/10.3390/rs12213568>.
- [13]. 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>.
- [14]. 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>.
- [15]. Cloke, H.L., & Pappenberger, F. (2009). Ensemble flood forecasting: a review. *Journal of Hydrology*, 375(3), 613–626. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.005>.
- [16]. Costache, R. (2019). Flood susceptibility assessment by using bivariate statistics and machine learning models: a useful tool for flood risk management. *Water Resour Manage*, 33(9), 3239– 256. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02301-z>.
- [17]. Dankers, R., Arnell, N.W., Clark, D.B., Falloon, P.D., Fekete, B.M., Gosling, S.N., Heinke, J., Kim, H., Masaki, Y., Satoh, Y., Stacke, T., Wada, Y., & Wisser, D. (2014). First look at changes in flood hazard in the inter-sectoral impact model intercomparison project ensemble. *Proc. Natl. Acad. Sci*, 111, 3257–3261.
- [18]. Das, S. (2019). Geospatial mapping of flood susceptibility and hydro-geomorphic response to the floods in Ulhas basin, India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 14, 60-74. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.02.006>.

- [19]. Fernandez, D., & Lutz, M. (2010). Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Eng. Geol.*, 111(1), 90–98.
- [20]. Gittleman, M., Farmer, C.J., Kremer, P., & McPhearson, T. (2017). Estimating stormwater runoff for community gardens in New York City. *Urban Ecosyst.*, 20 (1), 129–139.
- [21]. Glenn, E., Morino, K., Nagler, P., Murray, R., Pearlstein, S., & Hultine, K. (2012). Roles of saltcedar (*Tamarix* spp.) and capillary rise in salinizing a non-flooding terrace on a flow-regulated desert river. *J. Arid Environ.*, 79, 56–65.
- [22]. Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., Kim, H., & Kanae, S. (2013). Global flood risk under climate change. *Nat. Clim. Chang.*, 3, 816.
- [23]. Kiss, R. (2004). Determination of drainage network in digital elevation model, utilities and limitations. *J. Hung.vGeo-Math.*, 2, 16–29.
- [24]. Kourgialas, N.N., & Karatzas, G.P. (2011). Flood management and a GIS modelling method to assess flood-hazard areas—a case study. *Hydrological Sciences Journal*, 56(2), 212–225. doi: <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.555836>.
- [25]. Lee, S., & Pradhan, B. (2006). Probabilistic landslide hazards and risk mapping on Penang Island, Malaysia. *Journal of Earth System Science*, 115(6), 661–672. <https://doi.org/10.1007/s12040-006-0004-0>.
- [26]. Lee, S., Kim, J. C., J, H. S., Lee, M.J., & Lee, S. (2017). Spatial prediction of flood susceptibility using random-forest and boosted-tree models in Seoul metropolitan city, Korea. *Geomatics, Nat. Hazards Risk*, 8, 1185–1203.
- [27]. Majeed, M., Lu, L., Anwar, M.M., Tariq, A., Qin, S., El-Hefnawy, M.E., El-Sharnouby, M., Li, Q., & Alasmari, A. (2023). Prediction of flash flood susceptibility using integrating analytic hierarchy process (AHP) and frequency ratio (FR) algorithms. *Front. Environ. Sci.*, 10, 1-14. doi: 10.3389/fenvs.2022.1037547.
- [28]. Moore, I.D., Grayson, R.B., & Ladson, A.R. (1991). Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrol. Process*, 5, 3–30.
- [29]. 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, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100445>.
- [30]. Norman, L., Huth, H., Levick, L., Shea Burns, I., Phillip Guertin, D., Lara-Valencia, F., & Semmens, D. (2010). Flood hazard awareness and hydrologic modelling at Ambos Nogales, United States–Mexico border. *Journal of Flood Risk Management*, 3(2), 151-165.
- [31]. Oztekin, B., & Topal, T. (2005). GIS-based detachment susceptibility analyses of a cut slope in Limestone, Ankara-Turkey. *Environ. Geol.*, 49, 124–132.
- [32]. Papaioannou, G., Vasiliades, L., & Loukas, A. (2015). Multi-criteria analysis framework for potential flood prone areas mapping. *Water Resour. Manag.*, 29, 399–418.
- [33]. Paul, G.C., Saha, S., & Hembram, T.K. (2019). Application of the GIS-Based Probabilistic Models for Mapping the Flood Susceptibility in Bansloi Sub-basin of Ganga-Bhagirathi River and Their Comparison. *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*, 2, 120–146. <https://doi.org/10.1007/s41976-019-00018-6>.
- [34]. Powell, S.J., Jakeman, A., & Croke, B. (2014). Can NDVI response indicate the effective flood extent in macrophyte dominated floodplain wetlands? *Ecological Indicators*, 45, 486–493. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.05.009>.
- [35]. 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, 42–70. <https://doi.org/10.1080/10106049.2015.1041559>.
- [36]. Saha, S., Arabameri, A., Saha, A., Blaschke, T., Ngo, P.T.T., Nhu, V.H., & Band, S.S. (2021). Prediction of landslide susceptibility in Rudraprayag, India using novel ensemble of conditional probability and boosted regression tree-based on cross-validation method. *Science of the total environment*, 764, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142928>.
- [37]. 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*, <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2023.05.004>.
- [38]. Siahkamari, S., Haghizadeh, A., Zeinivand, H., Tahmasebipour, N., & Rahmati, O. (2017). Spatial prediction of flood-susceptible areas using frequency ratio and maximum entropy models. *Geocarto International*, 1–15.
- [39]. Sofia, G., Roder, G., Dalla Fontana, G., & Tarolli, P. (2017). Flood dynamics in urbanised landscapes: 100 years of climate and humans' interaction. *Scientific Reports*, 7, 40527. <https://doi.org/10.1038/srep40527>.
- [40]. Sujatha, E.R., Selvakumar, R., Rajasimman, U.A.B., & Victor, R. (2015). Morphometric analysis of sub-watershed in parts of Western Ghats, South India using ASTER DEM. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 6(4), 326-341. <https://doi.org/10.1080/19475705.2013.845114>.

- [41]. Wang, Y., Fang, Z., Hong, H., Costache, R., & Tang, X. (2021). Flood susceptibility mapping by integrating frequency ratio and index of entropy with multilayer perceptron and classification and regression tree. *Journal of Environmental Management*, 289, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112449>.
- [42]. 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>.
- [43]. Yariyan, P., Avand, M., Abbaspour, R.A., Torabi Haghighi, A., Costache, R., Ghorbanzadeh, O., Janizadeh, S., & Blaschke, T. (2020). Flood susceptibility mapping using an improved analytic network process with statistical models. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), 2282–2314. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1836036>.
- [44]. Zwenzner, H., & Voigt, S. (2009). Improved estimation of flood parameters by combining space based SAR data with very high resolution digital elevation data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13:67–576. <https://doi.org/10.5194/hess-13-567-2009>.