Hydrogeomorphology Vol. 11, No. 41, 2025

Research Paper

Flood risk zoning in Jahrom urban basin using machine algorithm (Maxent)

Saeed Negahban[1*], Mehri Marhamat[2]

1. Associate Professor, Department of Geography. Shiraz University. Shiraz. Iran. Snegahban@shirazu.ac.ir
2. Ph.D Student in Geomorphology, Mohaghegh Ardabili University, Ardabi. Iran. meri.marhamat90@gmail.com

Keywords

Genetic Algorithm, flood sensitivity, Entropy Maxent, ROC, Jahrom, iran.

Received: 2024/06/12
Accepted: 2024/10/29
Published: 2025/01/19

ABSTRACT

Flood is one of the most destructive natural disasters with social, economic and environmental consequences. Therefore, comprehensive flood management is necessary to reduce the effects of floods on human life and livelihood. The main goal of this study is to investigate the application of the maximum entropy model (Entropy Maxent) in R software for flood susceptibility mapping in Fars province (Jahrom urban basin). First, by using the information of natural resources of Fars province and field visits, flood-prone points (50 points) were determined. In the next step, environmental variables such as altitude, slope, and distance from the river, drainage density, average annual rainfall, land use, soil type, and geology were selected by performing the multiple collinearity test, and vegetation cover and topographic humidity index were removed. Among the selected environmental variables, the three factors of height distance from the waterway and land use have had the greatest impact in the modeling process. After that, the receiver operating characteristic curve (ROC) was drawn for the flood sensitivity map, and the value of training data (0.943) and test data (0.932) was obtained. In the following, the model was optimized and upgraded using the genetic algorithm. As a result, this flood susceptibility map can be useful for researchers and planners in flood mitigation strategies.

Keywords: Genetic Algorithm, Jahrom, flood sensitivity, Entropy Maxent, ROC.

* Corresponding Author: Saeed Negahban E-mail: Snegahban@shirazu.ac.ir

How to cite this article: Negahban, S. Marhamat, M. (2024). Flood risk zoning in Jahrom urban basin using machine algorithm (Maxent). Hydrogeomorphology, 11(41): 27– 47

DOI:10.22034/hyd.2024.62069.1742

 Publisher: University of Tabriz

Introduction

Floods as one of the natural hazards every year around the world have led to many human and financial losses. (Bakhtiari et al., 2011). In Iran, like other parts of the world that are involved in the risk of flooding, in recent decades, the intensity of flooding and the amount of damage caused by it have grown significantly (Ismaili et al., 2017). The term flood can be defined in such a way that any surface flow of water, regardless of the factor causing it, is considered a flood if the water flow in a certain section of the river is higher than the normal flow, its duration is short and the water flow exceeds the bed. Sharifi Pichon et al., 2018). Floods occur when plants and soil cannot absorb the water caused by precipitation, as a result, the natural river channel does not have the elasticity to pass the generated runoff (Afifi, 2018). Regional floods, sudden floods, floods caused by ice masses, floods caused by dam and embankment failures, and floods caused by landslides can be classified as types of floods (Hampf et al., 2020).

Methodology

The study area of this study is Jahrom urban basin. This basin is located in the southern half of Fars province, which is limited to Khafar from the north, Zarin Dasht and Fasa from the east, Larestan, Qir and Karzin from the south, and Firouzabad city from the west. In terms of the shape of the basin: the studied basin has an area of 23965 hectares and its circumference is 121.3 kilometers. The research method includes library, statistical and field methods, in this way, first the map of flood points was prepared based on 50 points (flood catchers). These ditch points were identified based on field visits and information from the General Department of Natural Resources of Fars province. In addition, there is no specific instruction in choosing factors affecting floods; Therefore, based on the work method of previous researchers in this research, 10 variables including height, slope percentage, distance from waterways, drainage density, average annual rainfall (IDW), land use, soil type, lithology, topographic moisture index (TWI) and vegetation (NDVI). After that, the variance inflation factor (VIF) was used to determine the linear relationship between the variables. In the next step, modeling was done based on the maximum entropy algorithm (Maxent). Finally, the ROC curve was used to evaluate the accuracy of the model. One of the machine learning methods that is based on statistical algorithms with a simple and accurate mathematical formula is called Maxent (Phillips et al., 2006). This model expresses the sensitivity of each grid cell as a function of the environmental variables of that grid cell. In this way, it provides the possibility of predicting the areas affected by gully erosion and evaluating the sensitivity of the area. Also, in terms of performance, this model is better than other statistical algorithms.

Results and Discussion

Examining the collinearity test for preparing flood sensitivity map is very important. To estimate this test, the variance inflation index with a numerical value of 10 was used, so that for each of the variables used, if the value of this index was higher than 10, it was removed from the modeling process. Areas with low altitude (less than 1000 meters) that have the greatest potential for flooding. In other words, with the increase in altitude, the sensitivity of the watershed to flooding has decreased, but at lower altitudes, due to the accumulation of rainwater, the probability of flooding increases. The variable distance from the river is the second most effective factor, especially in the adjacent lands, on the flood of the studied area. In this way, the smaller the distance from the river (0 to 500 meters), the more likely it is to flood and vice versa. In relation to the land use variable, due to the high level of impervious land, it has the most runoff and as a result, floods in the region.

Conclusions

Using traditional approaches to predict flood susceptibility is often imprecise and has missing data. On the other hand, the traditional approach relies on specialized knowledge and field surveys, which can be time-consuming, costly, and error-prone. In contrast, machine algorithms such as the MaxEnt model can be trained on flood data, allowing efficient analysis of large datasets and leading to faster and more accurate flood forecasting. In this study, Maxent model was used to prepare flood sensitivity maps of Jahrom urban basin. A total of eight parameters including height, slope, distance from the river, drainage density, average annual rainfall, land use, soil type and lithology were used to predict

مقاله پژوهشی

پهنه‌بندی خطر سیل در حوضه آبریز شهری جهرم با استفاده از الگوریتم ماشینی (Maxent)

سعید نگهبان[1]* ، مهری مرحمت[2]

۱- دانشیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشکده اقتصاد، مدیریت و علوم اجتماعی، دانشگاه شیراز. شیراز. ایران. Snegahban@shirazu.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، گره جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل. ایران. meri.marhamat90@gmail.com

چکیده

سیل یکی از مخرب ترین بلایای طبیعی با پیامدهای اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی است که همه ساله تاثیرات بسیار مخربی بر سکونتگاه‌های انسانی و محیط طبیعی بر جای می‌گذارد، بنابراین؛ مدیریت جامع سیل برای کاهش اثرات سیل بر زندگی و معیشت انسان ضروری است. این پژوهش سعی دارد که به بررسی کاربرد مدل حداکثر آنتروپی (Entropy Maxent) در نرم‌افزار R برای نقشه‌برداری حساسیت سیل در استان فارس (حوضه شهری جهرم) بپردازد. روش تحقیق از نوع توصیفی – تحلیلی مبتنی بر روش‌های میدانی، آماری و مدل‌سازی است بدین صورت که ابتدا با استفاده از اطلاعات منابع طبیعی استان فارس و بازدیدهای میدانی نقاط سیل‌گیر (۵۰ نقطه) مشخص شد در مرحله بعد متغیرهای محیطی مانند ارتفاع، شیب، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی، متوسط بارندگی سالانه، کاربری اراضی، نوع خاک و زمین‌شناسی انتخاب شد. با اجرای آزمون هم خطی چندگانه متغیر پوشش گیاهی و شاخص رطوبت توپوگرافی حذف شد. نتایج نشان داد که از بین متغیرهای محیطی انتخاب شده، سه عامل ارتفاع، فاصله از آبراهه و کاربری اراضی بیشترین تأثیر را در فرآیند مدل سازی داشته‌اند. پس‌ازآن، منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (ROC) برای نقشه حساسیت به سیل ترسیم شد که مقدار داده‌های آموزشی (۰/۹۴۳) و داده‌های آزمایشی (۰/۹۳۲) به دست آمد. در ادامه با استفاده از الگوریتم ژنتیک مدل بهینه و ارتقا داده شد. در نتیجه این نقشه حساسیت به سیل می‌تواند برای محققین و برنامه ریزان در استراتژی‌های کاهش سیل مفید واقع شود.

کلید واژه ها: الگوریتم ژنتیک، حساسیت سیل، Entropy Maxent، حوضه شهری جهرم.

کلیدواژه‌ها

الگوریتم ژنتیک، حساسیت سیل، Entropy Maxent، حوضه شهری جهرم.ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۸
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰

* نویسنده مسئول: سعید نگهبان
رایانامه: Snegahban@shirazu.ac.ir

ارجاع این مقاله: نگهبان، سعید؛ مهری، مرحمت (۱۴۰۳). پهنه بندی خطر سیلاب در حوضه آبریز شهری‌جهرم با استفاده از الگوریتم ماشینی(Maxent). هیدروژئومورفولوژی، ۱۱(۴۱):47-27.

DOI:10.22034/hyd.2024.62069.1742

مقدمه

سیل به‌عنوان یکی از مخاطرات طبیعی هر ساله در سراسر جهان منجر به خسارات جانی و مالی فراوانی شده است(بختیاری و همکاران، ۱۳۹۱: ۳۸). در ایران نیز مانند سایر نقاط جهان که درگیر مخاطره سیل هستند، در دهه‌های اخیر شدت وقوع سیلاب و میزان خسارت‌های ناشی از آن رشد چشمگیری داشته است (اسماعیلی و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۶۵). واژه سیل را می‌توان این‌گونه تعریف کرد که هر جریان سطحی آب صرف‌نظر از عامل ایجادکننده آن در صورتی سیل به شمار می‌آید که جریان آب در مقطع خاصی از رودخانه بیشتر از جریان عادی باشد، تداوم زمانی آن کوتاه باشد و جریان آب از بستر تجاوز کند (شریفی پیچون و همکاران، ۱۳۹۸: ۷۸). سیلاب زمانی رخ می‌دهد که آب ناشی از بارش را گیاهان و خاک نتوانند جذب کنند درنتیجه کانال طبیعی رودخانه کشش گذردهی رواناب ایجاد شده را ندارد (عفیفی،۱۳۹۸: ۱۵۱). سیلاب‌های منطقه‌ای، سیلاب‌های ناگهانی، سیلاب‌های ناشی از وجود توده‌های یخ، سیلاب‌های ناشی از شکست سد و خاک‌ریز و سیلاب ناشی از زمین‌لغزش را می‌توان در گروه انواع سیل قرار داد (هامپف[1]و همکاران، ۲۰۲۰). عوامل مؤثر بر وقوع سیلاب شامل عوامل اقلیمی (باران‌های کوتاه‌مدت با شدت زیاد، ذوب سریع برف و ...)، عوامل حوضه‌ی (اندازه، شکل، شیب، شبکه زهکشی، وضعیت زمین شناسی و خاک شناسی، پوشش گیاهی و کاربری حوضه)، عوامل انسانی (روند روزافزون شهرنشینی و ایجاد سطوح غیرقابل نفوذ، از بین بردن مراتع جنگل‌ها و ...) است(حسین زاده و همکاران، ۱۴۰۲). افزایش جمعیت، گسترش صنایع، گسترش شهرنشینی و توسعه ساخت‌وساز شهری موجب شده تا تغییرات زیادی در مورفولوژی حوضه‌های آبریز ایجاد شود. همچنین تجاوز به حریم رودخانه و مسیل‌ها، منجر به تغییر الگوی زهکشی طبیعی و جاری شدن جریان آب در شهرها می‌گردد (ندرخانلو و همکاران، ۱۳۹۳). گسترش شهرها منجر به افزایش سطوح نفوذناپذیر، افزایش رواناب و سیلاب، کاهش زمان تمرکز و افزایش دبی شده است (قهرودی تالی، ۱۳۹۱: ۴).

پیش‌بینی وقوع خطر سیل به دلیل نقش عوامل مختلف (طبیعی و انسانی) در ایجاد و گسترش آن، مشکل است. یکی از موضوعات مهم پژوهشی در جوامع بین‌المللی، پهنه‌بندی میزان حساسیت مناطق ازنظر وقوع سیل با استفاده از الگوریتم‌های ماشینی است. یکی از انواع الگوریتم‌های ماشینی، مدل حداکثر آنتروپی است که به محققان اجازه می‌دهد نقشه حساسیت به سیل را تهیه و احتمال مکانی وقوع سیل را ارزیابی و پیش‌بینی کند. در داخل و خارج از کشور بررسی‌ها و مطالعات زیادی در مورد سیل انجام شده است که بیان‌کننده این موضوع است که متغیرهای محیطی مختلف می‌توانند بر سیل اثر بگذارند. علی‌رغم حساسیت بالای حوضه شهری جهرم به سیل و باتوجه به خطرات ناشی از آن برای زیرساخت‌های انسانی و منابع آب‌وخاک مطالعات کمی با استفاده از الگوریتم‌های ماشینی انجام شده است. مطالعات و بررسی‌های گوناگونی با استفاده از الگوریتم‌های ماشینی در بحث سیل در داخل و خارج از کشور صورت گرفته است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره شده است. عسگری و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی توان سیل‌خیزی با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS و روش آماری تحلیل عاملی در حوضه آبریز جعفرآباد در استان ایلام پرداختند و به این نتیجه رسیدند که زیر حوضه نقش اساسی و مهمی در سیل‌خیزی حوضه داشته است و در پایین‌دست زمین‌های کشاورزی تحت تأثیر سیل است. داوند و همکاران (۱۴۰۰) به پهنه‌بندی خطر سیلاب با استفاده از مدل تابع شواهد قطعی در شهر ایلام پرداختند و به این نتیجه رسیدند از عوامل محیطی تأثیرگذار می‌توان شیب و تغییر کاربری اراضی را نام برد همچنین در مناطق شرقی و شمالی شرقی شهر در محدوده کمتر خطر است. اسماعیلی و همکاران (۱۴۰۲) به تعیین مستعدترین مناطق وقوع سیلاب با استفاده از مدل پیشینه بی‌نظمی (Maxent) در حوزه آبخیز مرزداران در استان تهران پرداختند و به این نتیجه رسیدند که لایه‌های فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی و شاخص رطوبت توپوگرافی به ترتیب بیشترین تأثیر را بر وقوع سیلاب داشته است. میرچولی و همکاران (۱۴۰۲) به پهنه‌بندی حساسیت به سیل با

1-Hampf et al

ا ستفاده از الگوریتم‌های ما شینی (GLM,CART,MARS) در حو ضه آبریز فامنات، در ا ستان گیلان پرداختند و به این نتیجه ر سیدند که ارتفاع و فاصــله از رودخانه به‌عنوان مهم‌ترین عوامل محیطی تأثیرگذار اســت و در بین الگوریتم‌های اجراشــده مدل CART بهترین پیش‌بینی را انجام داده اســت. موبلی[1]و همکاران (۲۰۱۹) به تخمین میزان ســیل در طول طوفان هاروی با اســتفاده از مدل حداکثر آنتروپی (Maxent) در شهر Harris در تگزاس پرداختند و به این نتیجه ر سیدند که مدل حداکثر آنتروپی منطقه بسیار بزرگ‌تری که درگیر خطر ســیل اســت را پیش‌بینی می‌کند. کابررا و لی[2](۲۰۲۰) به ارزیابی خطر ســیل در منطقه Davao Oriental در فیلیپین با اســتفاده از تحلیل چندمعیاره (AHP) مبتنی بر ســیســتم اطلاعات جغرافیایی و مدل حداکثر آنتروپی (Maxent) پرداختند و به این نتیجه ر سیدند که دقت مدل AHP و Maxent به ترتیب ۸۱ و ۹۵/۶ در صد ا ست ن شان داد که هر دو رویکرد در ارزیابی خطر سیل و خطر قابل‌اعتماد ا ست. قا سمی و همکاران (۲۰۲۴) به‌پیش بینی ح سا سیت سیلاب با ا ستفاده از مدل حداکثر آنتروپی (Maxent) و نسبت فرکانس بر روی رودخانه کوکچه در افغانستان پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بارندگی، کاربری اراضی، فاصله از رودخانه و نوع خاک به‌عنوان مهم‌ترین پارامترهای سیلاب در منطقه موردمطالعه است.

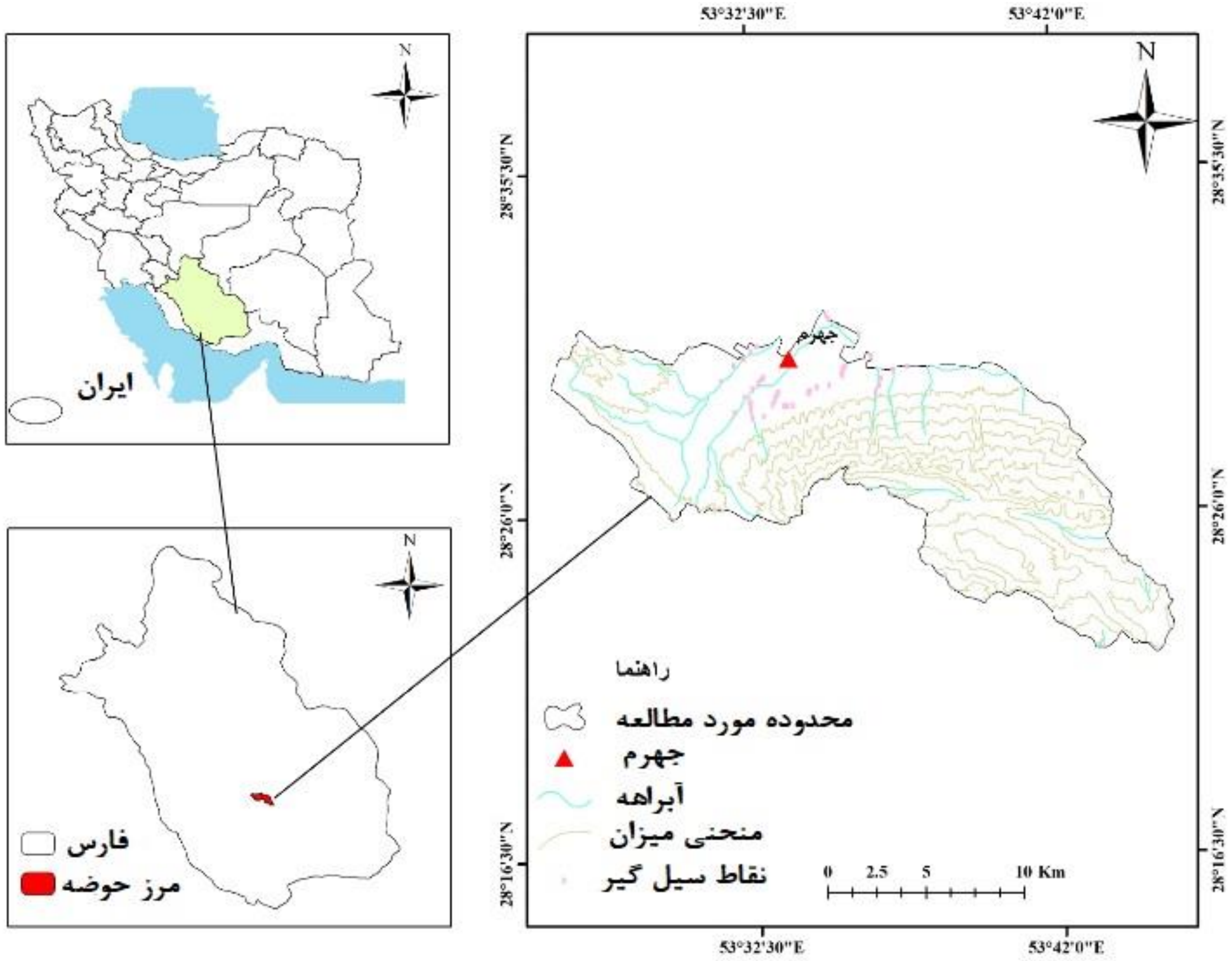
به‌منظور کاهش خســارت ناشــی از وقوع ســیل علاوه بر اجرای عملیات آبخیزداری برای کنترل ســیلاب باید شــناخت لازم از منطقه موردمطالعه صورت گیرد تا امکان مدیریت، آمادگی و برنامه‌ریزی لازم فراهم گردد؛ لذا انجام این برر سی باهدف تهیه نق شه پهنه‌بندی وقوع خطر سیل و شناخت عوامل مؤثر در ایجاد و گسترش آن در حوضه شهری جهرم از ضرورت تحقیق محسوب می‌گردد.

موقعیت منطقه موردمطالعه

منطقه مورد مطالعه این پژوهش حو ضه شهری جهرم ا ست. این حو ضه در نیمه جنوبی ا ستان فارس واقع شده ا ست که از شمال به خفر، از مشرق به زرین د شت و فسا، از جنوب به لار ستان و قیر و کارزین و از مغرب هم به شهر ستان فیروزآباد محدود شده ا ست. این منطقه در محدوده‌ی ۵۳ درجه و ۲۷ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۴۴ دقیقه و ۳۰ ثانیه طول شــرقی و ۲۸ درجه و ۲۱ دقیقه ۳۰ ثانیه تا ۲۸ درجه و ۳۲ دقیقه عرض شمالی گسترش یافته است. ازنظر شکل حوضه: حوضه موردمطالعه دارای مساحتی معادل ۲۳۹۶۵ هکتار و محیط آن برابر با ۱۲۱/۳کیلومتر ا ست. طول و عرض م ستطیل معادل در این حو ضه به ترتیب ۵۶/۴ و ۴/۲۶ ا ست و مقدار ضریب شکل حوضه موردمطالعه برابر با ۰/۰۸ است. ازنظر ضریب فشردگی برابر با ۲/۲ است که نشان‌دهنده‌ی انحراف شکل حوضه است. قطر دایره معادل ۱۷/۵ کیلومتر است. ارتفاع متوسط این حوضه ۱۵۹۰ متر از سطح دریای آزاد و شیب متوسط ۳۷/۶ درصد است که جزء حوضه‌های نسبتاً مرتفع و پرشیب محسوب می‌شود. شکل (۱) موقعیت منطقه موردمطالعه را نشان داده است.

1- Mobley et al

2- Cabrera &Lee



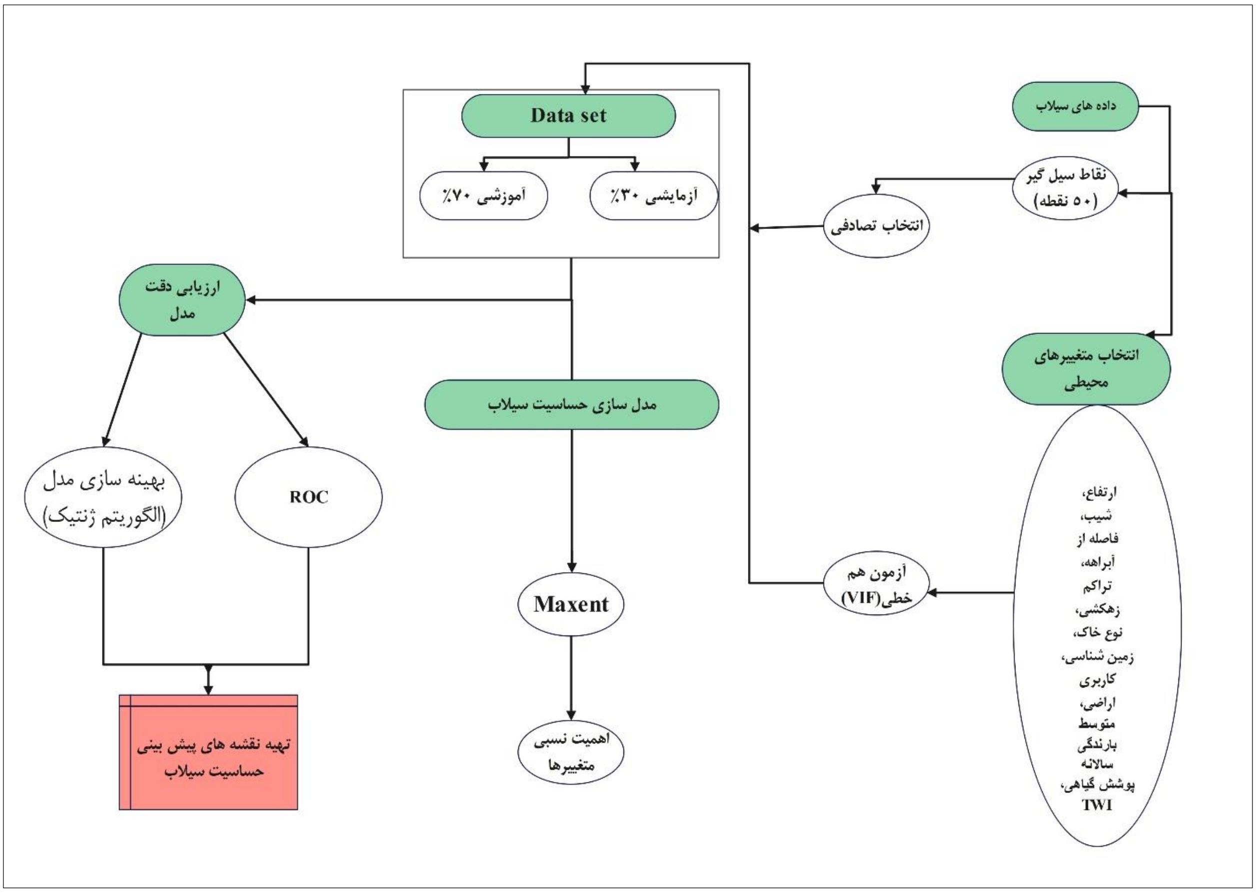
شکل (۱): موقعیت منطقه موردمطالعه (حوضه شهری جهرم)
Fig (1): Location of the studied area (Jahrom urban basin)

مواد و روش پژوهش

روش پژوهش شـامل روش‌های کتابخانه‌ای، آماری و میدانی اسـت، بدین صـورت که ابتدا نقشـه نقاط سـیلاب بر اسـاس ۵۰ نقطه (سیل‌گیر) تهیه شد. این نقاط خندقی بر ا ساس بازدیدهای میدانی و اطلاعات اداره کل منابع طبیعی ا ستان فارس شنا سایی شدند. علاوه بر این، در انتخاب عوامل مؤثر بر سـیلاب دسـتورالعمل خاصـی وجود ندارد؛ بنابراین بر اسـاس روش کار محققان قبلی در این تحقیق ۱۰ متغیر شامل ارتفاع، شیب، فا صله از آبراهه، تراکم زهک شی، متو سط بارندگی سالانه (IDW)، کاربری ارا ضی، نوع خاک، سنگ شنا سی، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)[1] و پو شش گیاهی (NDVI) ا ست. پس‌ازآن، برای تعیین رابطه خطی بین متغیرها از فاکتور تورم واریانس (VIF) ا ستفاده شد. در گام بعد مدل سازی بر ا ساس الگوریتم حداکثر آنتروپی (Maxent) انجام شد. سرانجام، از منحنی ROC برای ارزیابی دقت مدل استفاده گردید.

روش دقیق برای پیش‌بینی حساسیت سیلاب با استفاده از الگوریتم ماشینی (Maxent) در شکل ۲ نشان داده شده است.

1- Topographic Wetness Index



شکل (۲): نمودار جریانی تحقیق در منطقه موردمطالعه

Fig (2): Flow chart of research in the studied area

عوامل مؤثر بر سیلاب

یکی از عوامل مهمی که نقش مهمی در ایجاد و کنترل سیل دارد، توپوگرافی است. توپوگرافی با تغییرات مکانی شرایط هیدرولوژیکی و رطوبتی خاک نقش خود را در این مخاطره ایفا می‌کند (بوی[1]و همکاران،۲۰۲۰). ارتفاع بر روی پو شش گیاهی و ویژگی‌های بارش تأثیر دارد. این فاکتور نقش مهمی در ایجاد و گسترش سیل دارد. این پارامتر هم بر روی سیل‌خیزی و سیل‌گیری مناطق نقش مهمی دارد. به‌طوری‌که در مناطق با ارتفاع زیاد امکان سیل‌خیزی بیشتری نسبت به مناطق کم ارتفاع‌تر وجود دارد (زارعی و همکاران،۱۴۰۰) و در مناطق سیل گیر این امر بالعکس می‌شود بدین‌صورت که در مناطق کم ارتفاع میزان سیل‌گیر بیشتر است (میرچولی و همکاران،۱۴۰۲). نقشه ارتفاع حوضه آبریز موردمطالعه از تصاویر سنجنده ALOS با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر تهیه شد. دامنه ارتفاعی منطقه ۱۰۳۹ تا ۲۶۳۴ متر متغیر است و از شمال به جنوب ارتفاع افزایش می‌یابد.

شیب به دلیل تأثیر مستقیمی که بر فرصت نفوذ و رواناب سطحی به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر در وقوع سیل به شمار می‌آید (یوسف[2] و همکاران، ۲۰۱۶). این نق شه از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) تهیه شد. میزان شیب (در صد) در منطقه بین صفر تا ۱۷۲/۹۴ ست. رودخانه‌ها عموماً از طریق فر سایش و ا شباع بخش پایینی دامنه، پایداری و ثبات دامنه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند و به‌عنوان یکی از عوامل مهم در سیل گیری زمین‌های اطراف خود مح سوب می شوند (دای[3]و همکاران، ۲۰۰۱). به‌عبارت‌دیگر فا صله از آبراهه به‌عنوان یکی از عوامل محیطی ا ست که بر روی بزرگی و سرعت سیل، طغیان و جریان رودخانه اثر می‌گذارد (گوپتا[4]، ۲۰۲۰). برای تهیه نق شه

1- Bui et al
2- Youssef et al
3-Dai et al
1- Gupta

فاصله از رودخانه از تابع Euclidean distance در نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. فاصله از رودخانه در منطقه بین صفرتا۳۱۰۷/۴۳ متر متغیر است. تراکم زهکشی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عواملی که نقش اساسی در زمان تمرکز و اوج سیلاب دارد، به شمار می‌آید. به‌عبارت‌دیگر نقشه تراکم زهکشی نشان‌دهنده چگونگی جریان شبکه زهکشی حوضه است. برای تهیه نقشه تراکم زهکشی از نقشه DEM و تابع Line Density در نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. معادله هورتون (۱۹۳۲) برای محاسبه تراکم زهکشی استفاده شده است (رابطه ۱).

$$\mathrm{DD} = \frac{\sum_{i=1}^{n} S_i}{a} \qquad (۱)$$

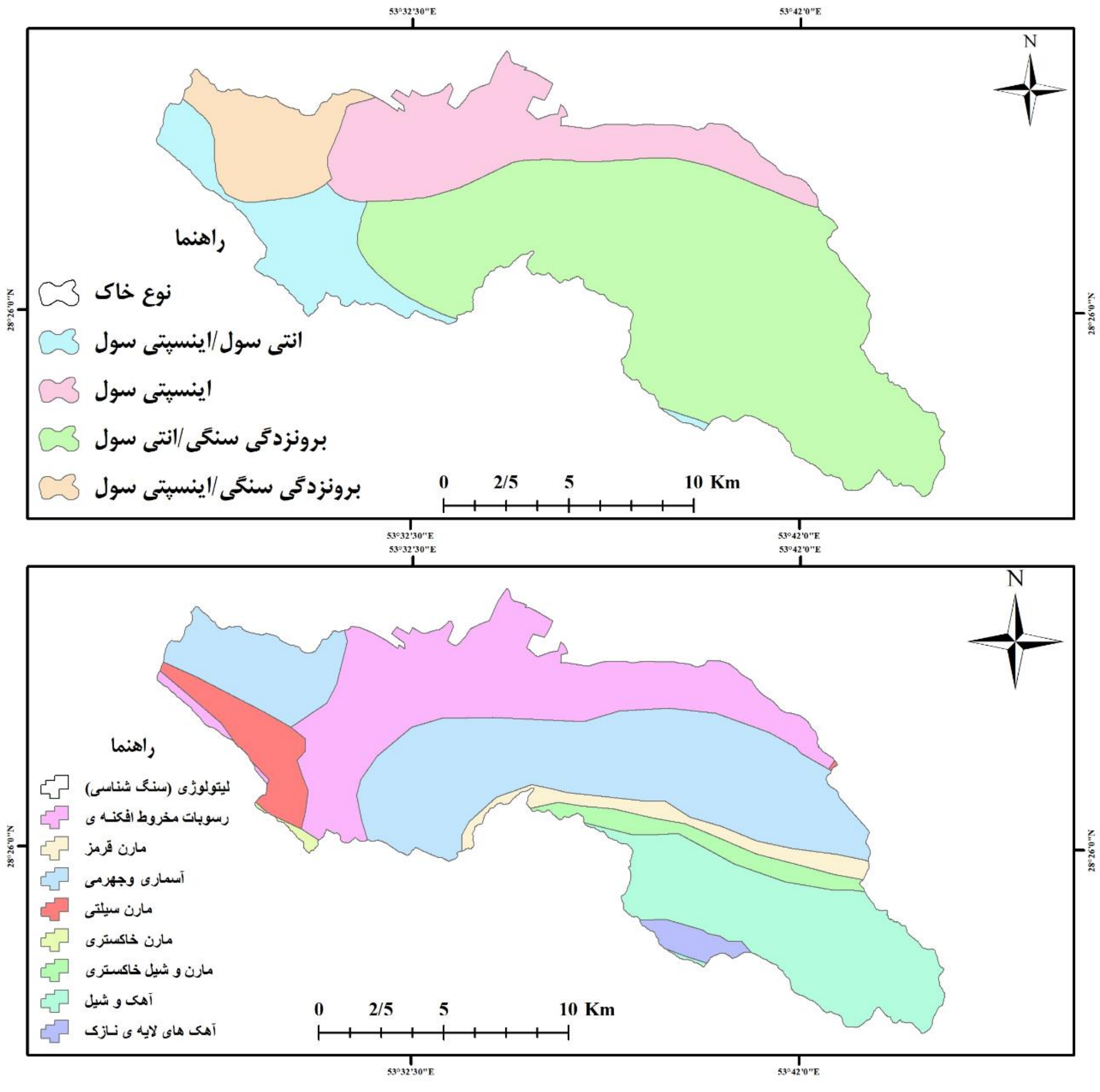
$\sum_{i=1}^{n} S_i$ طول زهکشی بر اساس کیلومتر و a مساحت کل حوضه زهکشی بر کیلومترمربع محاسبه می‌شود. مقدار تراکم زهکشی در منطقه بین صفر تا ۱/۵۱ کیلومتر در کیلومترمربع به دست آمد. بارندگی نه‌تنها به‌صورت مستقیم بر وقوع سیل مؤثر است بلکه به‌صورت غیرمستقیم نیز با اثرگذاری بر روی نوع و تراکم پوشش گیاهی آن را تحت تأثیر قرار داده است (سالیوان-ویلی[1]و همکاران، ۲۰۱۷). برای ایجاد نقشه بارندگی از داده‌های ۲۵ ساله (۱۴۰۰-۱۳۷۵) ایستگاه‌های هواشناسی داخل و خارج از منطقه موردمطالعه استفاده شد. در این بررسی از روش IDW برای تهیه نقشه متوسط بارندگی سالانه انتخاب شد. متوسط بارندگی سالانه در منطقه موردمطالعه بین ۱۶۹/۷۴۹ تا ۱۸۴/۹۶۳میلی‌متر است.یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در ایجاد و گسترش سیل، کاربری اراضی است. این نقشه بر اساس تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و با استفاده از الگوریتم حداکثر احتمال در محیط نرم‌افزار R به دست آمد. این لایه به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل در مدل سازی سیلاب است (پناهی و همکاران، ۲۰۲۱). لایه کاربری اراضی در منطقه موردمطالعه شامل پوشش گیاهی ضعیف، پوشش گیاهی خوب، مناطق مسکونی و پهنه آبی است. نوع خاک یک متغیر اساسی است که بر میزان بارندگی- رواناب تأثیر دارد و توانایی کنترل نفوذ آب را دارد (زی[2]و همکاران، ۲۰۱۹). نقشه خاک از اداره مرکز تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس تهیه گردید. منطقه موردمطالعه به چهار کلاس انتی سول/اینسپتی سول، اینسپتی سول، برونزدگی سنگی/انتی سول و برونزدگی سنگی/اینسپتی سول قرار گرفت. سنگ شناسی می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی مقدار نفوذ و آسیب‌پذیری ناگهانی سیل را افزایش یا کاهش دهد (محمود و رحمان ۲۰۱۹). رتبه‌بندی انواع سنگ‌ها برای ارزیابی آسیب‌پذیری سیل ضروری است. سنگ‌های مختلف در طول سیل به‌طور منحصربه‌فردی واکنش نشان می‌دهند و بر نفوذپذیری آب تأثیر می‌گذارند (خسروی و همکاران ۲۰۱۹). سنگ‌های نفوذناپذیر منجر به رواناب سریع و سیل می شوند، درحالی‌که سنگ‌های نفوذپذیر به آب اجازه می‌دهند تا آب فرو برود و سیل فوری را کاهش دهد (داوودی مقدم و همکاران ۲۰۱۹). رتبه‌بندی فرسایش سنگ نیز اهمیت دارد، زیرا سنگ‌هایی که به‌راحتی فرسوده می‌شوند می‌توانند با تغییر بستر و جریان رودخانه‌ها سیل را بدتر کنند. بررسی انواع سنگ برای ایجاد مدل آسیب‌پذیری سیل که منجر به‌پیش بینی دقیق‌تری شود، کمک بسیاری می‌کند. در منطقه موردمطالعه ۸ نوع از رده‌های سنگی از قدیم به جدید به ترتیب JKkgp، Kbgp، Kgu، MImmi، OMR، PeEsa،EOas-ja و Qft2 وجود دارد (جدول ۱).

2- Sullivan-Wiley et al
3- Xie et al

جدول (۱): تشریح سازند سنگ‌شناسی منطقه موردمطالعه

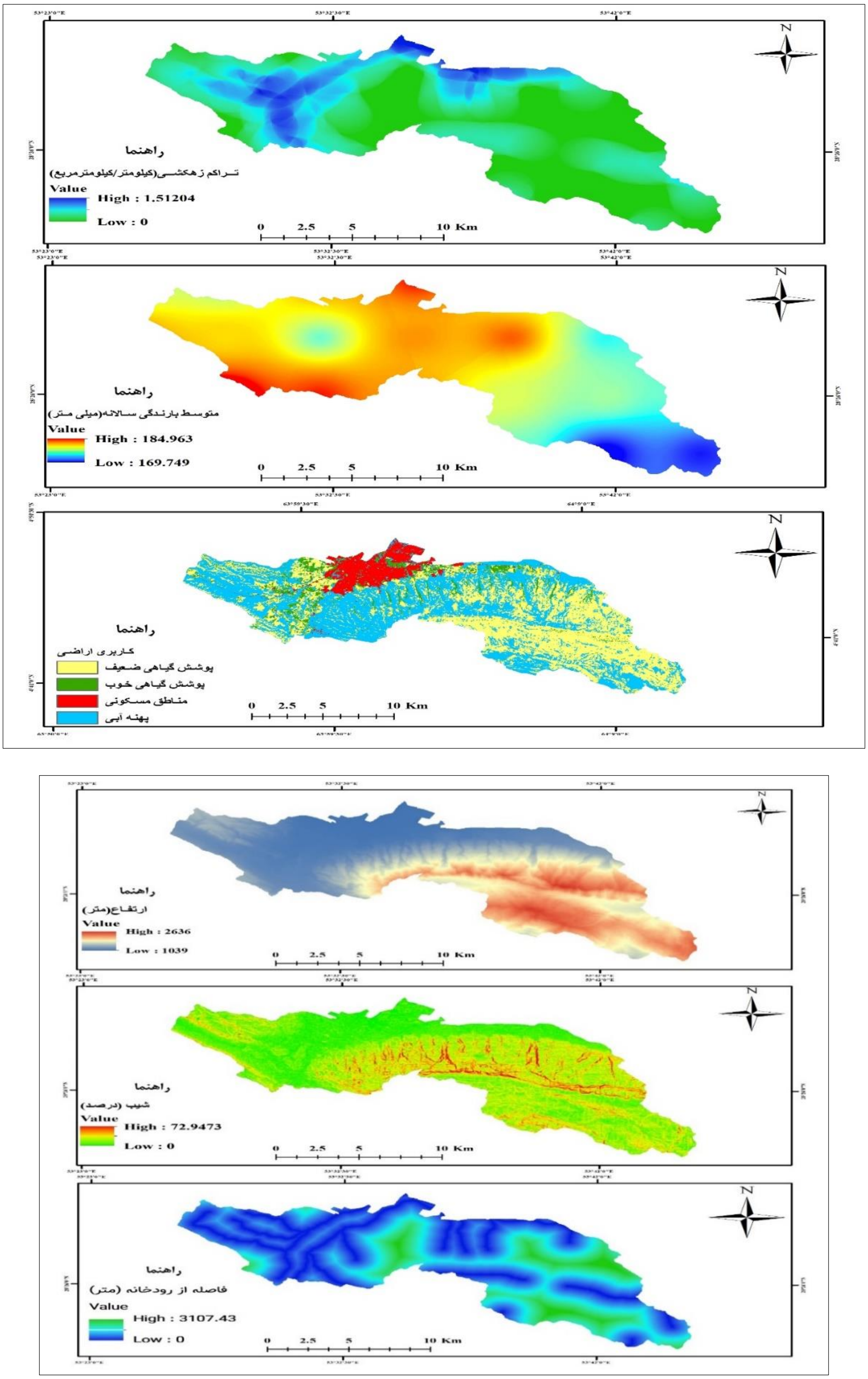
Table(1): Description of the lithological formation of the studied area

کد	سنگ‌شناسی	سن زمین‌شناسی
Qft2	سطح پایین مخروط افکنه‌های بابزنی / دره‌های تراس انباشته‌شده	سنوزوئیک
PeEsa	مارن قرمز کم‌رنگ، مارن، سنگ‌آهک، گچ و دولومیت	سنوزوئیک
EOas-ja	سازند نامشخص آسماری و جهرم	سنوزوئیک
OMR	مارن‌های سیلتی قرمز، خاکستری و سبز که در کنار هم قرارگرفته‌اند	سنوزوئیک
MImmi	مارن‌های خاکستری کم هوازدگی متناوب با نوارهایی از سنگ آهک صدفی مقاوم‌تر	سنوزوئیک
Kgu	مارن و شیل خاکستری مایل به آبی با سنگ آهکی نازک و لایه‌دار	مزوزوئیک
Kbgp	گروه بنگستان: عمدتاً سنگ‌آهک و شیل	مزوزوئیک
JKkgp	گروه تقسیم‌شده متشکل از سنگ‌آهک‌های لایه‌ای نازک عظیم شامل سازندهای سورمه، هیث انیدریت، فهلیان، گدوان و دریان است.	مزوزوئیک



شکل (۳): متغیرهای مؤثر بر سیل: نوع خاک، لیتولوژی

Fig (3): Variables affecting flood soil type, lithology



ادامه شکل (۳): متغیرهای مؤثر بر سیل: ارتفاع، شیب، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی، متوسط بارندگی و کاربری اراضی

Continuation of Fig (3): Variables affecting floods: height, slope, distance from the river, drainage density, average rainfall and land use

آزمون هم خطی چندگانه

قبل از به‌کارگیری متغیرها بر گسترش سیلاب، لازم است آزمون هم‌خطی چندگانه بین پارامترهای موردا ستفاده انجام گیرد. هم‌خطی بیان‌کننده این مو ضوع ا ست که آیا بین متغیرهای مستقل همبستگی وجود دارد یا خیر (نگوین-تین[1] و همکاران، ۲۰۱۵: ۱۱۲). بدین منظور از شاخص فاکتور تورم واریانس (Variance Inflation Factor) یا VIF استفاده شد. تا به امروز هیچ قانون مشخصی برای تعیین آستانه VIF در تحلیل و هم‌خطی چندگانه وجود ندارد و در پژوهش‌های پیشین این مقدار را ۵ و یا ۱۰ در نظر گرفته‌اند. به این صورت که اگر مقدار VIF کمتر از ۵ یا ۱۰ باشد بین پارامترها مشکل همپوشانی وجود ندارد (تسانگاراتوس[2] و همکاران، ۲۰۱۷: ۴۴۰). برای اجرای این آزمون در نرم‌افزار آماری R از بسته usdm و مقدار آستانه ۱۰ استفاده شد.

روش یادگیری ماشینی

یکی از روش یادگیری ما شینی که مبتنی بر الگوریتم‌های آماری با یک فرمول ریا ضی ساده و دقیق ا ست، Maxent نام دارد (فیلیپس[3] و همکاران، ۲۰۰۶: ۲۳۵). این مدل حسا سیت هر سلول شبکه را به‌عنوان تابعی از متغیرهای محیطی آن سلول شبکه بیان می‌کند. به‌این‌ترتیب، امکان پیش‌بینی مناطق تحت تأثیر سیل و ارزیابی حساسیت منطقه را فراهم می‌کند. همچنین ازنظر عملکرد این مدل بهتر از سایر الگوریتم‌های آماری است. برای اجرای این مدل فقط از داده‌های حضور استفاده می شود. اگر تعداد متغیرها بیش از تعداد مشاهدات باشد، باعث بروز مشکل می شود. برای مدل سازی در برخی از مطالعات ۵۰ تا ۱۰۰ مشاهده را در نظر گرفته‌اند (استاکول و پترسون[4]، ۲۰۰۳: ۲۱۷). این در حالی است که در برخی از مطالعات ۱۰۰ تا ۵۰۰ مشاهده را در نظر گرفته‌اند (فرانکلین[5]، ۲۰۱۳: ۱۲۱۸). آنچه مسلم است هرچقدر تعداد مشاهدات بیشتر باشد، اطلاعات کسب‌شده بیشتر خواهد بود و درنتیجه مدل‌سازی به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود. در این برر سی به علت کوچک بودن حو ضه مورد مطالعه ۵۰ مشاهده در نظر گرفته شد. از مزایای این الگوریتم می‌توان گفت که دقت پیش‌بینی این مدل همیشه پایدار و قابل‌اعتماد ا ست، حتی اگر داده‌های ناقص و حجم نمونه کوچک باشد. این روش فقط با داده‌های حضور سروکار دارد و از داده‌های محیطی که به‌صورت پیوسته و گسسته است، می‌توان استفاده کرد. معایب این مدل در این است که نتایج پیش‌بینی حاصل از الگوریتم حداکثر آنتروپی را نمی‌توان به سایر نقاط جغرافیای تعمیم داد و به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین ایرادات این الگوریتم محسوب می‌شود. مدل مذکور در نرم‌افزار R و با استفاده از پکیج SDMtune اجرا شد.

روش اعتبارسنجی و دقت مدل

مدل‌های به‌کارگیری شده بدون تأیید از اعتبار علمی برخوردار نیستند. برای ارزیابی کارایی مدل اجراشده در این بررسی (Maxent) از مقدار سطح زیر منحنی[6](AUC) در تحلیل ویژگی‌های عملیاتی پذیرنده[7](ROC) استفاده گرید. مقادیر پیش‌بینی دقت مدل‌هایی که از منحنی‌های AUC استفاده می‌کنند به شرح زیر تعیین می‌گردد: ۰/۶-۰/۵ (ضعیف)، ۰/۷- ۰/۶ (متوسط)، ۰/۸- ۰/۷ (خوب)، ۰/۹-۰/۸ (بسیار خوب)، ۱- ۰/۹ (عالی) است (عرب عامری، ۲۰۱۹: ۲۸۵).

1-Nguyen-Tien et al
2-Tsangaratos et al
3-Phillips et al
4- Stockwell&Peterson
5- Franklin
6- Area Under Curve
7- Receiver Operating Charactristic

الگوریتم ژنتیک (Genetic Algorithm)

الگوریتم ژنتیک (GA) دسته‌ای از الگوریتم‌های تکاملی هستند که توسط جان هالند و همکارانش در دهه ۱۹۷۰ گسترش یافت (هلند[1] ۱۹۷۵)، و برای یافتن راه‌حل‌های دقیق یا تقریبی برای مسائل بهینه‌سازی و جستجو به کار گرفته شد (گلدبرگ[2] ۱۹۸۹). به‌عبارت‌دیگر روشی برای جست‌وجوی تصادفی عددی است که از فرآیند ساده شده تکامل طبیعی تقلید می‌کند را الگوریتم ژنتیک می‌گویند. الگوریتم بر روی جمعیتی از پاسخ‌ها کار می‌کند و با استفاده از اصل بقای بهترین و تکامل، جواب‌های بهتر و مناسب‌تری را ایجاد می‌کند (مک کال[3] ۲۰۰۵: ۲۰۸). در این بررسی بعد از به دست آوردن مقدار ROC با اجرای الگوریتم ژنتیک مدل را بهینه کرده تا بهترین جواب به دست آید.

یافته ها و نتایج

با توجه به پارامترهای مختلف مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه، نتایج کارهای انجام شده به صورت متن، شکل و جدول در ادامه ارائه می‌گردد.

آزمون هم‌خطی چندگانه

بررسی آزمون هم‌خطی برای تهیه نقشه حساسیت سیلاب دارای اهمیت بسیاری است. برای برآورد این آزمون از شاخص تورم واریانس با مقدار عددی ۱۰ استفاده گردید بدین‌صورت که برای هرکدام از متغیرهای مورداستفاده اگر مقدار این شاخص بالای ۱۰ بود از فرآیند مدل‌سازی حذف شد. دلیل حذف شدن متغیرهای که شاخص تورم واریانس آن‌ها بالای ۱۰ است، مشکل همپوشانی بین متغیرها ایجاد نشود. نتایج نشان داد که بین متغیرهای ارتفاع (۱/۶۵)، شیب (۱/۳۴)، فاصله از آبراهه (۲/۲۳)، تراکم زهکشی (۱/۸۹)، متوسط بارندگی سالانه (۲/۵۴)، کاربری اراضی (۲/۹۴)، نوع خاک (۳/۵۷) و سنگ‌شناسی (۱/۳۲) هم خطی وجود ندارد اما متغیر پوشش گیاهی (۱۱/۳۲) و شاخص رطوبت توپوگرافی (۱۲/۴۲) به علت بالا بودن از مقدار ۱۰ از فرآیند مدل‌سازی حذف شدند.

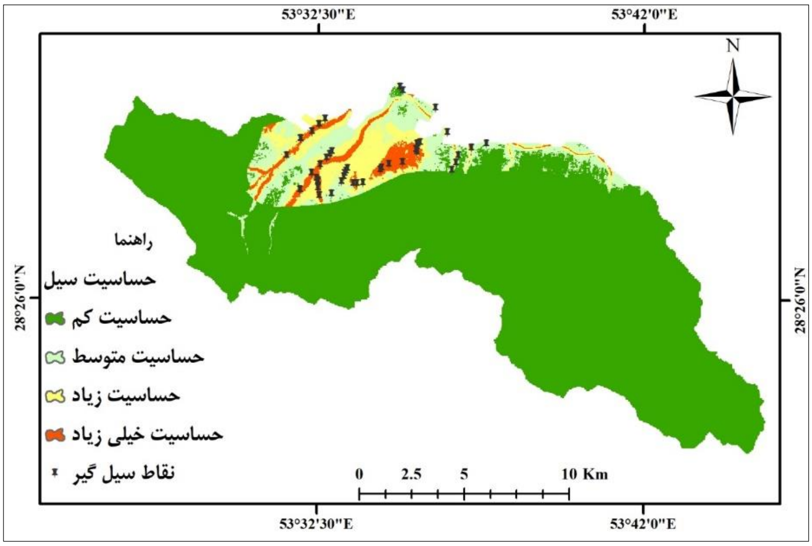
اجرای مدل

تهیه نقشه پیش‌بینی حساسیت مناطق مستعد سیلاب بر اساس لایه‌های اطلاعاتی تهیه شده (۸ متغیر) و نقاط وقوع سیل‌گیر (۵۰ نقطه) در مدل مکسنت اجرا شد. در این پهنه‌بندی از روش شکست طبیعی (Natural break) منطقه موردمطالعه در چهار کلاس کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد قرار گرفت (شکل ۴). بخش شمال حوضه دارای استعداد وقوع سیلاب بیشتری است. این در حالی است که بخش اعظم از حوضه در کلاسه کم‌خطر قرارگرفته است. ویژگی‌های آماری نقشه پیش‌بینی حساسیت سیلاب در جدول (۲) نشان داده‌شده است.

جدول (۲): ویژگی‌های آماری نقشه پیش‌بینی حساسیت سیلاب در منطقه
Table (2): Statistical characteristics of flood sensitivity prediction map in the region

مدل	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف استاندارد
Maxent	۰	۰/۸۹۹	۰/۴۴۲	۰/۱۳۹

1- Holland
2- Goldberg
3- McCall

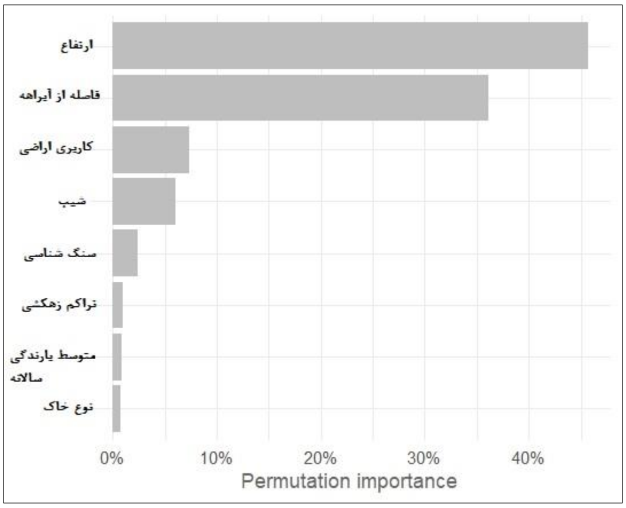


شکل (۴): نقشه پهنه‌بندی سیلاب با استفاده از مدل Maxent

Fig (4): Flood zoning map using Maxent model

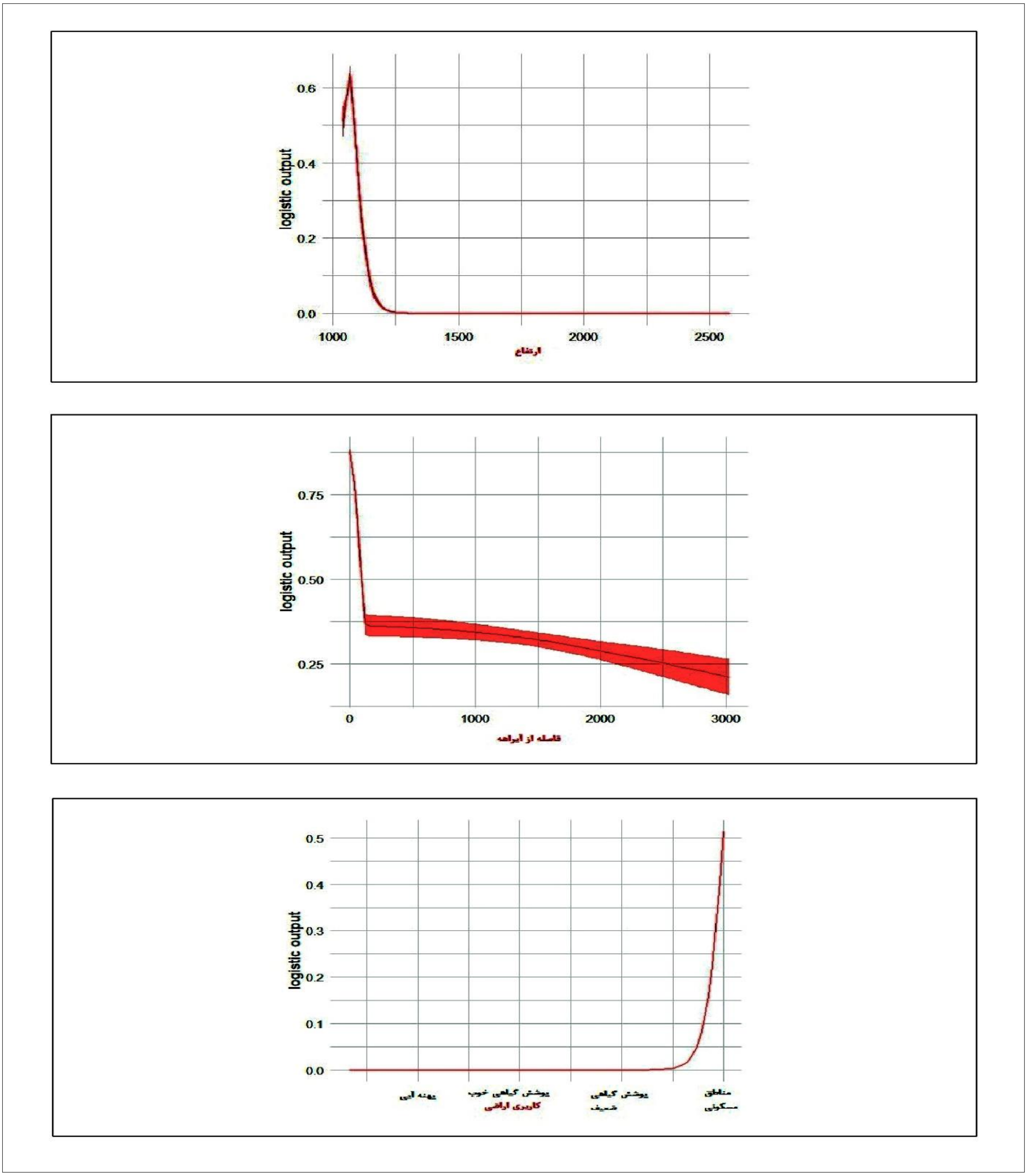
اهمیت نسبی متغیرها

اهمیت نسبی متغیرهای محیطی (ارتفاع، شیب، فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی، متوسط بارندگی سالانه، کاربری اراضی، نوع خاک و سنگ شناسی) در مدل سازی سیلاب در شکل (۵) نشان داده شده است. در این شکل به ترتیب متغیرهای ارتفاع، فاصله از آبراهه، کاربری اراضی، شیب، سنگ‌شناسی، تراکم زهکشی، متوسط بارندگی سالانه و نوع خاک دارای بیشترین اهمیت در فرآیند مدل‌سازی هستند. مناطق دارای ارتفاع کم (کمتر از ۱۰۰۰ متر) که دارای بیشترین استعداد وقوع سیلاب است. به‌عبارت‌دیگر با افزایش ارتفاع، حساسیت حوضه آبریز به وقوع سیلاب کاهش‌یافته است اما در ارتفاعات پایین‌تر، به دلیل تجمع آب باران، احتمال رخداد سیل افزایش می‌یابد. متغیر فاصله از رودخانه به‌عنوان دومین عامل اثرگذار بخصوص در اراضی مجاور خود بر روی سیل منطقه موردمطالعه است. بدین‌صورت که هرچقدر فاصله از رودخانه کم باشد (۰تا ۵۰۰ متر) امکان سیل بیشتر است و بالعکس. در رابطه با متغیر کاربری اراضی به دلیل بالا بودن اراضی غیرقابل نفوذ، دارای بیشترین رواناب و درنتیجه ایجاد سیل در منطقه می‌گردد. همچنین بررسی منحنی‌های پاسخ تغییرات سه متغیر اثرگذار (ارتفاع، فاصله از رودخانه و کاربری اراضی) بر سیلاب منطقه موردمطالعه در مدل مکسنت در شکل (۶) نمایش داده شده است.



شکل (۵): اهمیت نسبی متغیرهای مورداستفاده

Fig (5): The relative importance of the used variables

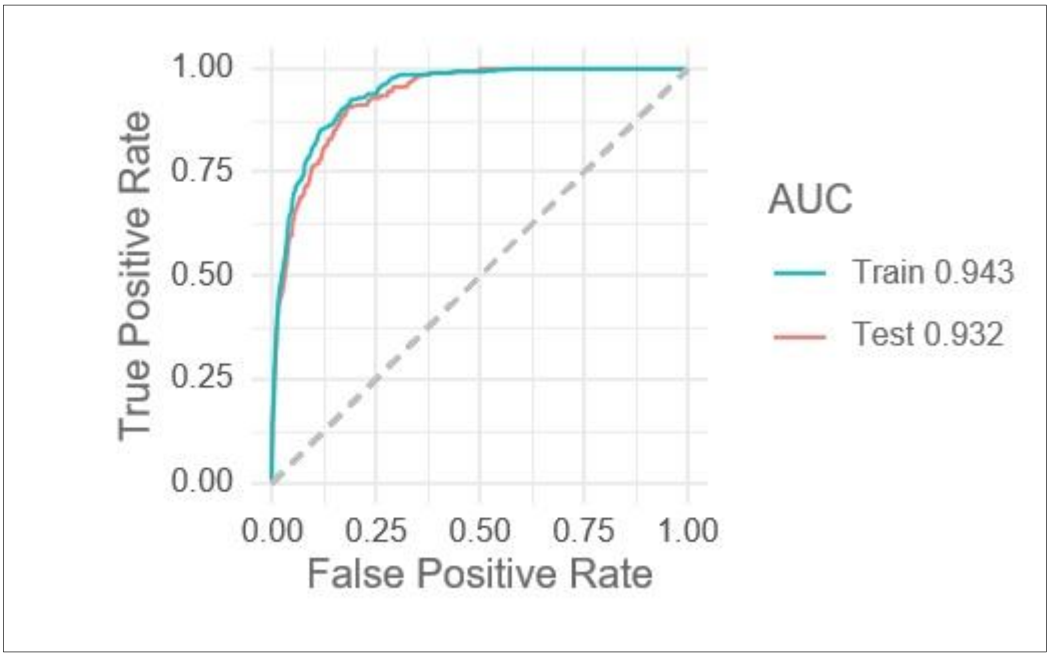


شکل (۶): منحنی پاسخ مربوط به سه عامل تأثیرگذار در فرآیند پیش‌بینی: ارتفاع، فاصله از آبراهه و کاربری اراضی

Fig (6): The response curve related to three influencing factors in the forecasting process: height, distance from waterways and land use

اعتبار سنجی مدل

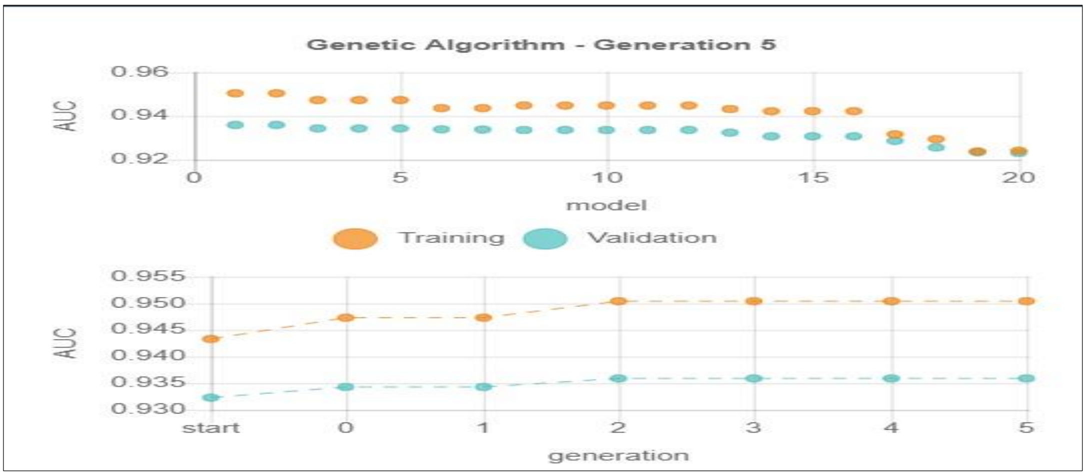
در مدل به کار گرفته‌شـده (Maxent) برای مجموعه داده‌های آموزشـی ۰/۹۴۳ و برای مجموعه داده‌های آزمایشـی ۰/۹۳۲ اسـت که نشان داد مدل از دقت بسیار بالای برخوردار بوده است (شکل ۶).



شکل (۷): اعتبارسنجی مدل با استفاده از ناحیه زیر منحنی
Fig (7): Validation of the model using the area under the curve

الگوریتم ژنتیک

بعد از اجرای مدل و به دست آوردن مقدار ROC برای بهینه‌سازی مدل ایجادشده از الگوریتم ژنتیک استفاده شد که این الگوریتم در ۵ مرحله بوده ا ست. همان‌طور که در شکل (۸) م شاهده می شود که در ابتدا مجموعه داده‌های آموز شی (۰/۹۴۳) و آزمای شی (۰/۹۳۲) بودند و با اجرای الگوریتم ژنتیک مقدار داده‌های آموزشی به (۰/۹۵۱) و داده‌های آزمایشی به (۰/۹۳۷) بهینه و ارتقا یافته‌اند.



شکل (۸): بهینه‌سازی مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک
Fig (8): Model optimization using genetic algorithm

بحث

سیل پدیده ای طبیعی است که جوامع بشری آنرا به عنوان یک واقعه اجتناب ناپذیر پذیرفته اند. دسته ای از حوادث طبیعی که انسان برآنها برچسب (بلایای طبیعی) زده است همواره و به خودی خود بلا نیستند و آنچه آنها را بلا گردانیده فعل و انفعالات اختراعی ماست. سیل یکی از مخرب‌ترین بلایای طبیعی در سرا سر جهان ا ست که در اغلب مناطق کشور ایران نیز رخ می‌دهد. برای کاهش خسارات جانی و مالی ناشی از وقوع این مخاطره باید بررسی‌های لازم جهت پهنه‌بندی و تعیین اراضی تحت تأثیر آن انجام گیرد. در این بررسی با استفاده از مدل Maxent به بررسی و ارزیابی پهنه‌های وقوع سیل در حوضه شهری جهرم پرداخته شد. جهت تعیین پهنه‌هایی وقوع خطر سیل منطقه موردمطالعه از معیارهای همچون ارتفاع، شیب، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی، متوسط بارندگی سالانه، کاربری اراضی، نوع خاک و زمین‌شناسی استفاده شد.

در منطقه مورد مطالعه سیلاب عموماً در ارتفاع کمتر از ۱۰۰۰ متر ایجاد شده است به این دلیل که در مناطق کم ارتفاع حوضه رواناب‌های ایجادشده براثر بارش در مناطق بالادست به سمت پایین‌ترین نقطه حوضه جریان و تجمع می‌یابد. بنابراین؛ مناطق کم ارتفاع‌تر بیشترین حساسیت را نسبت به وقوع خطر سیل دارند. به عبارت دیگر ارتفاع پایین و به دنبال آن کاهش شیب در منطقه مورد مطالعه باعث شده که از سرعت جریان آب کاسته شود و در نتیجه با سرعت کم به داخل زمین نفوذ کند و امکان تجمع آب در سطح زمین ایجاد گردد. این تجمع آب، پتانسیل بروز سیلاب را در منطقه فراهم کرده است. از طرف دیگر ارتفاع کم مانع از ایجاد شیب منا سب برای زهکشی آب‌های سطحی ا ست. در نتیجه، آب در سطح زمین باقی مانده و امکان نفوذ به زمین را پیدا نمی‌کند. این امر باعث افزایش حجم آب سطحی و بروز سیلاب در منطقه شده ا ست. این نتایج با نتایج داوند و همکاران (۱۴۰۰) همخوانی دارد به این صورت که با افزایش ارتفاع احتمال وقوع سیل غیرممکن است. این در حالی است که با نتایج زارعی و همکاران (۱۴۰۱) همخوانی ندارد به‌این‌علت که در ارتفاعات بالا پتانسیل سیل‌خیز بیشتر از ارتفاعات پایین است. شیب کم زمین نقش مهمی در ایجاد سیل ایفا می‌کند. در شرایطی که شیب زمین کم باشد، نیروی گرانش به اندازه کافی برای هدایت آب باران به سمت پایین و به سمت کانال‌های طبیعی (مانند رودخانه) عمل نمی‌کند. این کاهش شیب باعث می شود که سرعت جریان آب کاهش یابد و آب به‌جای نفوذ به خاک، در سطح زمین تجمع یابد. این تجمع آب، به ویژه در بارش‌های شدید، می‌تواند منجر به ا شباع خاک و افزایش سطح آب‌های سطحی شود. در نتیجه، با افزایش حجم آب، خطر بروز سیلاب به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد، به‌ویژه در مناطقی که دارای پوشش گیاهی ضعیف یا زیر ساخت‌های نامناسب برای مدیریت آب هستند. در شیب‌های کمتر از ۲۰ درصد مناطق عمده ایجاد سیلاب در منطقه بوده ا ست به این دلیل که در شیب‌های پایین سرعت آب کاهش‌یافته و تجمع سیلاب رخ‌داده ا ست. این در حالی ا ست که در شیب‌های بالاتر تولید رواناب افزایش می‌یابد و نفوذ کاهش پیدا می‌کند. این نتایج با نتایج فرناندز و لوتز[1] (۲۰۱۰) همخوانی دارد به این صورت که شیب کم به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد سیل در دو شهر آرژانتین (Yerba Buenaو Tucuman) به شمار می‌آید. این در حالی است که با نتایج ا صغری و همکاران (۱۳۹۴) همخوانی ندارد به این صورت که با افزایش شیب، زمان تأخیر حو ضه کم، میزان نفوذ آب در خاک کاهش و درنتیجه حجم سیلاب افزایش می‌یابد. کاهش فاصله از رودخانه می‌تواند خطر سیل را افزایش دهد. در مناطقی که به رودخانه نزدیک هستند، در زمان بارش‌های شدید و ذوب برف احتمال طغیان آب و سرریز شدن آن به زمین‌های اطراف بیشتر می‌شود. همچنین، فعالیت‌های انسان مانند ساخت و سازها، از بین بردن پوشش گیاهی در حریم رودخانه، می‌تواند جریان طبیعی آب را مختل کند و باعث تجمع آب در اطراف شود. به علاوه، در این مناطق سطح آب زیرزمینی معمولاً بالاتر ا ست و این مو ضوع می‌تواند نفوذ آب به خاک را کاهش دهد و باعث افزایش آب سطحی شود. در نهایت، موجب افزایش خطر سیلاب در نواحی نزدیک به رودخانه شود. در

1- Fernandez &Lutz

منطقه مورد مطالعه متغیر فاصله از رودخانه به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر در میزان و اندازه سیل است. بدین‌صورت که با کاهش فاصله از رودخانه احتمال وقوع سیل افزایش پیدا می‌کند. این نتایج با نتایج امیری و همکاران (۱۴۰۱) همخوانی دارد به این صورت که با افزایش فاصله از رودخانه احتمال وقوع سیل کاهش پیدا می‌کند. بالا بودن تراکم زهکشی می‌تواند به افزایش خطر سیل منجر شود. در مناطقی که تراکم زهکشی بالا است، آب سریع‌تر به سمت کانال‌های اصلی جریان پیدا می‌کند و این امر باعث افزایش سرعت جریان آب و کاهش زمان تمرکز می‌شود که خطر سیلاب را بالا می‌برد. همچنین، تراکم زهکشی بالا نشان‌دهنده وجود سطوح نفوذناپذیر بیشتر در منطقه است که این سطوح مانع از نفوذ آب به داخل خاک می‌شوند و باعث افزایش آب سطحی و خطر سیلاب می‌گردند. در این مناطق، آب به سرعت به سمت رودخانه‌ها و مسیل‌ها جریان پیدا می‌کند و این امر باعث افزایش دبی لحظه‌ی رودخانه‌ها و خطر طغیان آن‌ها می شود. بالا بودن مقدار تراکم زهکشی در بخش‌های از منطقه (غرب و قسمت‌های از شمال حوضه) نشان‌دهنده‌ی این موضوع است سطوح نفوذناپذیر (مانند ساخت و ساز) باعث شده است که سرعت تجمع رواناب بیشتر شده درنتیجه نفوذپذیری کاهش‌یافته و وقوع سیل بیشتر شده است. این نتایج با نتایج عسگری و همکاران (۱۳۹۷) همخوانی دارد به این صورت که با افزایش تراکم زهکشی میزان وقوع سیل نیز بیشتر می‌گردد. بارندگی می‌تواند به‌طور مستقیم باعث ایجاد سیل شود. وقتی باران با شدت و برای مدت طولانی ببارد، حجم آب جمع شده در سطح زمین ممکن است از حدی که خاک می‌تواند جذب کند، بیشتر شود. این موضوع به‌ویژه در خاک‌های اشباع یا در مناطق با سطوح نفوذناپذیر مانند آسفالت و بتن بیشتر دیده می شود. در این شرایط، آب نمی‌تواند به داخل زمین نفوذ کند و در سطح تجمع می‌یابد، که این امر منجر به ایجاد رواناب و سیلاب می‌شود. همچنین، اگر بارندگی شدید باعث طغیان رودخانه‌ها شود، آب به سرعت به سمت مناطق اطراف جریان پیدا کرده و خطر سیلاب را افزایش می‌دهد. بارندگی در منطقه موردمطالعه به صورت رگباری و در مدت‌زمان کوتاه رخ می‌دهد درنتیجه خطر سیل بیشتر است. از طرف دیگر منطقه موردمطالعه به خاطر بارندگی کمتر پوشش گیاهی ضعیف‌تر دارد و سرعت تشکیل رواناب به علت کاهش نفوذپذیری بیشتر شده است درنتیجه بارندگی به‌عنوان یکی از عوامل بر سیل گیری منطقه موردمطالعه تأثیر دارد. این نتایج با نتایج فرامرزی و همکاران (۱۳۹۸) همخوانی دارد به این صورت که بارندگی‌های ناگهانی و کمبود بارندگی منجر به ایجاد حجم بالایی از رواناب‌های سطحی می‌شود که به علت کاهش نفوذپذیری منجر به شکل‌گیری سیل در پارک ملی گلستان شده است. کاربری اراضی درنتیجه اثر قابل توجه سه عامل اجتماعی، اقتصادی و توان بالقوه زمین است. تغییر کاربری اراضی به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر در سیل‌گیری یک منطقه است (تهرانی[1] و همکاران، ۲۰۱۵). نوع کاربری اراضی می‌تواند بر روی نفوذ رواناب و تشدید آن سرعت آن تأثیر بگذارد. تغییر کاربری اراضی می‌تواند به افزایش خطر سیل منجر شود. وقتی زمین‌های طبیعی مانند جنگل‌ها و تالاب‌ها به مناطق شهری یا کشاورزی تبدیل می‌شوند، ظرفیت جذب آب باران کاهش می‌یابد. سطوح سخت مانند آسفالت و بتن مانع از نفوذ آب به خاک می‌شوند و باعث تجمع آب در سطح زمین می‌گردند. همچنین، کاهش پوشش گیاهی به فرسایش خاک و کاهش توانایی زمین در ذخیره آب منجر می شود، که این عوامل در مجموع خطر بروز سیلاب را افزایش می‌دهند. در منطقه مورد مطالعه کلاسه مناطق مسکونی در پهنه پرخطر قرارگرفته‌اند به این دلیل که سطوح نفوذناپذیر شهری موجب ایجاد سیل و آب‌گرفتگی معابر و مسیل‌های شهری شده است. از طرف دیگر با تصرف حریم رودخانه‌ها در مناطق شهری منجر به آب‌گرفتگی کانال‌ها و مسیل‌ها شده است که به دنبال آن سیل رخداده است. این نتایج با نتایج رستمی و کاظمی (۱۳۹۸) همخوانی دارد به این صورت که در مناطق شهری مکان‌های غیرقابل نفوذ مانند پشت‌بام، جاده و پارکینگ است که دارای ظرفیت نگهداری و نفوذ آبی کمی دارند. به همین علت سیل در مناطق شهری در سطوح صاف و غیرقابل نفوذ که با سیستم زهکشی مصنوعی به‌سرعت رخ می‌دهد.

1- Tehrany et al

در راهنما نقشه خاک جهان (FAO/UNESCO) بیشتر اینسپتی سول ها با زهکشی متوسط تحت عنوان Cambisols طبقه‌بندی شده است. بیشتر اینسپتی سول ها دارای افق کامبیک هستند به این صورت که اجزای تشکیل‌دهنده افق خاک شسته شده و شرایط لازم برای تشخیص آن وجود ندارد (فاس[1]و همکاران، ۱۹۸۳). به عبارت دیگر خاک‌های اینسپتی سول به دلیل ویژگی‌های خاص خود می‌توانند در بروز سیل نقش داشته باشند. این خاک‌ها به‌طور معمول دارای ساختاری متراکم هستند، اما در عین حال از نظر مواد آلی و نفوذپذیری محدودتر هستند. زمانی که باران‌های شدید رخ می‌دهد، این خاک‌ها ممکن است به سرعت اشباع شوند و توانایی جذب آب را از دست بدهند. به دلیل ساختار متراکم و نفوذپذیری پایین، آب باران نمی‌تواند به‌راحتی به داخل خاک نفوذ کند و در نتیجه در سطح زمین تجمع می‌یابد. این تجمع آب منجر به افزایش رواناب و در نهایت بروز سیلاب می‌شود. همچنین، در مناطقی که این خاک‌ها وجود دارند، ممکن است به دلیل عدم وجود پوشش گیاهی مناسب، فرسایش خاک و کاهش ظرفیت ذخیره آب نیز اتفاق بیفتد که این عوامل به تشدید خطر سیلاب کمک می‌کند. در منطقه مورد مطالعه باوجود زهکشی متوسط خاک به علت کم‌عمق بودن و کمبود مواد آلی، خاک پیوسته شسته شده و همراه آب حمل شده و باعث بالا رفتن چگالی و گل آلودگی آب می‌گردد. درنتیجه قدرت فرسایندگی و حمل آب بیشتر و منجر به ایجاد سیل شده است. این نتایج با نتایج داوند و همکاران (۱۴۰۰) همخوانی دارد به این صورت که از انواع خاک موجود در منطقه نوع اینسپتی سول (ورتی سول) با مقدار ۰/۹۴۰ بیشترین تأثیر را بر روی وقوع سیل داشته است.

به‌طورکلی زمین‌شناسی به دلیل حساسیت متفاوت واحدهای سنگ‌شناسی به فرآیندهای هیدرولوژیکی فعال، نقش غالبی در مطالعات حساسیت سیل دارد. سنگ‌شناسی به‌عنوان یک عامل حیاتی برای تغییرات مکانی و زمانی هیدرولوژی حوضه زهکشی و تولید رسوب در نظر گرفته می شود (میلر[2]و همکاران، ۱۹۹۰). سازندها گاهی شامل لایه‌های سخت و متراکم هستند که می‌توانند جریان طبیعی آب را مختل کرده و خطر بروز سیلاب را افزایش دهند. این لایه‌ها مانع از نفوذ آب به داخل خاک می‌شوند و باعث تجمع آب در سطح زمین می‌گردند. نتایج برای متغیر سنگ شناسی در منطقه موردمطالعه نشان داد که برای جدیدترین سازندهای سنگ شناسی که رودخانه از میان آن‌ها می‌گذرد (سازند Qft2 از سنوزوئیک)، وقوع سیل نیز افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر سازند Qft2 به‌طور کلی به عنوان یک سازند با نفوذپذیری پایین شناخته می‌شود، که این ویژگی می‌تواند در بروز سیلاب در منطقه مورد مطالعه نقش داشته باشد. اگرچه در طبقه‌بندی‌های سنگ‌شناسی، ممکن است برخی از لایه‌های سازند Qft2 شامل سنگ‌های با نفوذپذیری بالا باشند، اما در کل، وجود لایه‌های متراکم و سخت در این سازند، مانع از نفوذ آب به داخل خاک و به دنبال ان باعث وقوع سیل در منطقه شده است. این نتایج با نتایج رحمتی و همکاران (۲۰۱۶) همخوانی دارد به این صورت که از نظر متغیر سنگ‌شناسی مناطقی که دارای سازند Qft2 هستند، احتمال وقوع سیل بیشتر است.

نتیجه‌گیری

استفاده از رویکردهای سنتی برای پیش‌بینی حساسیت سیل اغلب نامشخص است و داده‌های گم‌شده وجود دارد. از طرف دیگر رویکرد سنتی به دانش تخصصی و بررسی‌های میدانی متکی است که می‌تواند زمان‌بر، پرهزینه و مستعد خطا باشد. در مقابل، الگوریتم‌های ماشینی مانند مدل MaxEnt را می‌توان بر روی داده‌های سیل آموزش داد، که امکان تجزیه‌وتحلیل کارآمد مجموعه داده‌های بزرگ را فراهم می‌کند و منجر به پیش‌بینی سریع‌تر و دقیق‌تر سیل می شود. در این بررسی از مدل Maxent برای تهیه نقشه‌های حساسیت سیلاب حوضه شهری جهرم استفاده شد. درمجموع هشت پارامتر شامل ارتفاع، شیب، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی، متوسط بارندگی سالانه، کاربری اراضی، نوع خاک و سنگ‌شناسی برای پیش‌بینی حساسیت سیل استفاده شد. از بین عوامل ذکرشده عامل

1- Foss et al
2- Miller et al

ارتفاع بیشترین تأثیر را بر روی سیلاب منطقه دارد. ۷۰ درصد از نقاط سیلابی برای آموزشی و ۳۰ درصد برای آزمایشی یا اعتبارسنجی استفاده شد. منحنی ROC نرخ پیش‌بینی سیل را با مدل به کار گرفته‌شده (Maxent) بالای ۰/۹۰ تخمین زده است. با افزایش ارتفاع، حساسیت حوضه آبریز به وقوع سیلاب کاهش‌یافته است اما در ارتفاعات پایین‌تر، به دلیل تجمع آب باران، احتمال رخداد سیل افزایش می‌یابد. متغیر فا صله از رودخانه به‌عنوان دومین عامل اثرگذار بخ صوص در ارا ضی مجاور خود بر روی سیل منطقه موردمطالعه ا ست. بدین‌صورت که هرچقدر فاصله از رودخانه کم باشد (۰تا ۵۰۰ متر) امکان سیل بیشتر است و بالعکس. در رابطه با متغیر کاربری اراضی به دلیل بالا بودن اراضی غیرقابل نفوذ، دارای بیشترین رواناب و درنتیجه ایجاد سیل در منطقه می‌گردد، بدین ترتیب مناطق دارای ارتفاع کم (کمتر از ۱۰۰۰ متر) که دارای بیشترین استعداد وقوع سیلاب است. به‌طورکلی، این مطالعات نیاز فوری به اقدامات مؤثر برای کاهش تأثیر سیلاب‌های ناگهانی در حو ضه شهری جهرم را به‌ویژه با توجه به افزایش فراوانی و شدت این خطر طبیعی نشان می‌دهد. نتایج این تحقیق پیامدهای قابل‌توجهی برای کاهش خطر بلایا و مدیریت آن در منطقه دارد. شناسایی مناطق سیل‌خیز می‌تواند به‌عنوان ورودی ارز شمند برای اطلاع‌ر سانی برنامه‌ریزی کاربری زمین و سیا ست‌های تو سعه شهری با شد. علاوه بر این، این یافته‌ها شناسایی مناطق مناسب برای ایجاد طرح‌های تخلیه و تدوین استراتژی‌های مؤثر واکنش اضطراری را امکان‌پذیر می‌سازد.

به منظور کاهش خطر سیلاب‌های شهری و مدیریت بهتر آب‌های سطحی، پیشنهادات زیر ارائه می‌شود:

استفاده از سیستم‌های زهکشی پایدار می‌تواند به طراحی و اجرای شبکه‌های زهکشی مؤثر کمک کند تا آب باران به‌طور سریع و کارآمد از سطح زمین خارج شود. ایجاد بام‌های سبز یا روف گاردن‌ها نیز می‌تواند به جذب آب باران و کاهش رواناب کمک کند؛ این بام‌ها با پوشش گیاهی خود، آب باران را جذب کرده و به تدریج آن را به زمین بازمی‌گردانند. جداسازی آب باران از سیستم فاضلاب یکی دیگر از راهکارهای مؤثر ا ست که با این کار می‌توان از بارگذاری بیش از حد سی ستم فا ضلاب جلوگیری کرده و آب باران را به‌طور م ستقل مدیریت نمود. همچنین، استفاده از موانع فیزیکی مانند دیوارهای سیل و کیسه‌های شن در مواقع بحران می‌تواند به جلوگیری از ورود آب به مناطق م سکونی کمک کند. در نهایت، آموزش و آگاهی‌ر سانی به ساکنان در مورد خطرات سیلاب و نحوه واکنش در زمان بروز آن، می‌تواند به کاهش آسیب‌ها و خسارات ناشی از سیلاب‌ها کمک کند.

References

- Afifi, Mohammad Ibrahim. (2018). Evaluation of factors affecting flood risks and preparation of a map of sensitivity and probability of its occurrence using Shanun entropy model (case study: Firozabad River watershed). Natural Hazards Management, 6(2): pp.167-149.(in persian).
- Amiri, Poua and Afifi, Mohammad Ebrahim and Moghli, Marzieh. (2022). Prospective research and flood risk assessment in Tehran using Support Vector Machine (SVM) algorithm. Natural Geography Quarterly, 14(55): pp. 77-93. (in persian).
- Arabameri, A., Pradhan, B., Rezaei, K., & Conoscenti, C. (2019). Gully erosion susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis techniques. *Catena*, *180*, 282-297.
- Asghari Saraskanroud, Sayad., Pirouzi, Elnaz., and Zainali, Betul. (2014). Flood risk zoning in Agh Lakhanchai watershed using Vicor model. Quantitative Geomorphology Research, 4(3), pp. 231-245. (in persian).
- Askari, Shams-oleh; Safari, Amir; Fathi, Hojjatullah. (2017). Investigating flood potential in Jafarabad watershed. Applied Research of Geographical Sciences, 50(17), pp. 77-90. (in persian).
- Bakhtiari, Morteza, Kashfipour, Seyed Mahmoud, and Asghari Pari, Seyedamin. (2013). Investigating the impact of transverse structures on the flood zone using the HEC-RAS hydraulic model in the GIS geographic information system environment. Irrigation Science and Engineering, 35(3): 46-37.

- Bui, Q.T., Q. H. Nguyen, X. L. Nguyen, V. D. Pham, H. D. Nguyen and V.M. Pham.(2020). Verification of novel integrations of swarm intelligence algorithms into deep learning neural network for flood susceptibility mapping. Journal of Hydrology 581: 124371-9.
- Cabrera, J. S., & Lee, H. S. (2020). Flood risk assessment for Davao Oriental in the Philippines using geographic information system-based multi-criteria analysis and the maximum entropy model. *Journal of Flood Risk Management*, *13*(2), e12607.
- Dai FC, Lee CF, Li JX, Xu ZW.(2001) .Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. Environmental Geology, 40(3):381-91.
- Davand, Khadijah, Shahabi, Hayman and Salari, Mamand. (2021) Flood risk zoning in the city of Ilam using the model based on definitive evidence, geography and environmental hazards. 38: pp. 1-20(in persian)..
- Davoudi Moghaddam D, Pourghasemi HR, and Rahmati O .(2019). Assessment of the contribution of geo-environmental factors to flood inundation in a semi-arid region of SW Iran: comparison of different advanced modeling approaches. In: Advances in Natural and Technological Hazards Research (Vol 48, pp 59–78). Springer Netherlands. https:// doi. org/ 10. 1007/ 978-3- 319- 73383–8.
- Esmaili, Reza, Qureshundi, Maryam, and Jokarsarhangi, Isa. (2017). Identification and ranking of areas under flood risk in the alluvial cones of North Izeh, Khuzestan province. Hydrogeomorphology, year 5, number 17, pp. 163-183. (in persian).
- Faramarzi, Hassan, Hosseini, Seyed Mohsen, Pourqasmi, Hamidreza, and Farnaghi, Mehdi. (2018). Evaluation and zoning of flood risk in Golestan National Park. Ecohydrology, 6(4): pp. 1068-1055.
- Fernández, D.S.; and M.A. Lutz. (2010). Urban flood hazard zoning in Tucumán Province Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. Engineering Geology, 111: 90–98.
- Foss, J. E., Moormann, F. R., & Rieger, S. (1983). Inceptisols. In *Developments in Soil Science* (Vol. 11, pp. 355-381). Elsevier.
- Franklin, J. (2013). Species distribution models in conservation biogeography: developments and challenges. *Diversity and distributions*, *19*(10), 1217-1223.
- Ghahrodi Tali, Manijeh. (2013). Vulnerability of the railway lines in the north of the Lut Plain against floods, Environmental Hazards, 1(2): pp. 1-18. (in persian).
- Goldberg D .(1989). Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison-Wesley, Boston.
- Gupta, K. (2020). Challenges in developing urban flood resilience in India. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, *378*(2168), 20190211.
- Hampf, A. C., T. Stella, M. Berg-Mohnicke, T. Kawohl, M. Kilian and C. Nendel. (2020). Future yields of double-cropping systems in the Southern Amazon, Brazil, under climate change and technological development. Agricultural Systems 177: 102707-16.
- Holland JH .(1975). Adaptation in Natural and Artificial Systems. The University of Michigan Press, Ann Arbor.
- Hosseinzadeh, Mohammad Mehdi, Salehipour, Alireza, Rezaian Zarandini, Fatemeh. (2023). Zoning of the sensitivity of sub-basins of the Nekarood basin to flooding, Neka-Mazandaran. Hydrogeomorphology. 10(34). pp. 75-100. (in persian).
- Ismaili Yusuf, Yusofund Fariborz, Shabanlou Saeed, Izadbakhsh Mohammad Ali. (2023). Determining the most prone areas of flooding using the irregular background model (Maxent) in Marzdaran watershed, Tehran province. Journal of Water and Soil Sciences. 27(2): pp. 51-33. (in persian).
- Khosravi K, Shahabi H, Pham BT, Adamowski J, Shirzadi A, Pradhan B, Prakash I .(2019). A comparative assessment of flood susceptibility modeling using multi-criteria decision-making analysis and machine learning methods. J Hydrol 573:311–323. https:// doi. org/ 10. 1016/j. jhydr ol. 2019. 03. 073.

- Mahmood S, and Rahman A ur .(2019). Flash flood susceptibility modeling using geo-morphometric and hydrological approaches in Panjkora Basin, Eastern Hindu Kush, Pakistan. Environ Earth Sci. https:// doi. org/ 10. 1007/ s12665- 018- 8041-y.
- McCall, J. (2005). Genetic algorithms for modelling and optimisation. *Journal of computational and Applied Mathematics*, *184*(1), 205-222.
- Miller JR, Ritter DF, Kochel RC. (1990). Morphometric assessment of lithologic controls on drainage basin evolution in the Crawford Upland, south-central Indiana. Am J Sci. 290:569– 599.
- Mircholi, Fahima and Gholami, Isa and Broghni, Mehdi. (2023). Flood susceptibility zoning in Famnat watershed, Gilan province. Water and soil magazine. 37(6): 853-841.
- Mobley, W., Sebastian, A., Highfield, W., & Brody, S. D. (2019). Estimating flood extent during Hurricane Harvey using maximum entropy to build a hazard distribution model. *Journal of Flood Risk Management*, *12*, e12549.
- Naderkhanlou, Vahid and Samadi Rahim, Ali and Mazaheri, Mehdi and Sepehari, Jalal. (2013). Numerical and laboratory simulation of flood caused by dam failure, 13th Iran Hydraulic Conference, Tabriz. (in persian).
- Nguyen-Tien, V., Elliott, R. J., & Strobl, E. A. (2018). Hydropower generation, flood control and dam cascades: A national assessment for Vietnam. *Journal of hydrology*, *560*, 109-126.
- Panahi M, Jaafari A, Shirzadi A, Shahabi H, Rahmati O, Omidvar E, Bui DT (2021) Deep learning neural networks for spatially explicit prediction of flash flood probability. Geosci Front 12(3):101076. https:// doi. org/ 10. 1016/j. gsf. 2020. 09. 007.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological modelling*, *190*(3-4), 231-259.
- Qasimi, A. B., Isazade, V., & Berndtsson, R. (2024). Flood susceptibility prediction using MaxEnt and frequency ratio modeling for Kokcha River in Afghanistan. *Natural Hazards*, *120*(2), 1367-1394.
- Rahmati, O., Pourghasemi, H. R., & Zeinivand, H. (2016). Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golastan Province, Iran. *Geocarto International*, *31*(1), 42-70.
- Rostami, Nuruddin, and Kazemi, Yunus. (2018). Flood risk zoning in Ilam city using AHP and GIS method. Spatial Analysis of Environmental Hazards, 6(1): pp. 179-193. (in persian).
- Sharifi Pichon, Mohammad, Omidret, Kamal, and Motzakar, Kausar. (2018). The use of cluster analysis and multivariate regression in the assessment of flood potential with emphasis on hydrogeomorphological parameters (case study: Maron watershed). Natural Environment Hazards, 8(21): pp. 75-92. (in persian).
- Stockwell, D., & Peterson, A. T. (2003). Comparison of resolution of methods used in mapping biodiversity patterns from point-occurrence data. *Ecological indicators*, *3*(3), 213-221.
- Sullivan -Wiley, K. A., & Gianotti, A. G. S.(2017). Risk Perception in a Multi-Hazard Environment. World Development, article in press, 115.
- Tehrany, M. S., Pradhan, B., Mansor, S., & Ahmad, N. (2015). Flood susceptibility assessment using GIS-based support vector machine model with different kernel types. *Catena*, *125*, 91-101.
- Tsangaratos, P., & Ilia, I. (2017). Applying machine learning algorithms in landslide susceptibility assessments. In *Handbook of neural computation* (pp. 433-457). Academic Press.
- Xie, S., Wu, W., Mooser, S., Wang, Q. J., Nathan, R., & Huang, Y. (2021). Artificial neural network based hybrid modeling approach for flood inundation modeling. *Journal of Hydrology*, *592*, 125605.
- Youssef, A. M., Pradhan, B., & Sefry, S. A. (2016). Flash flood susceptibility assessment in Jeddah city (Kingdom of Saudi Arabia) using bivariate and multivariate statistical models. Environmental Earth Sciences, 75(1), 12.
- Zarei, Mehdi, Zandi, Rahman, Naimi Tabar, Mahnaz. (2022). Evaluation of flood potential using data mining models of support vector machine, chaid and random forest (case study: Farizi area Watershed). Watershed Management Journal, 13(25): pp. 133-144. (in persian).