






Evaluating the performance of the flexible discriminant analysis model in predicting the flooding potential of the Zarrineh-Rood Watershed

Omid Rahmati^{1*} , Aiding Kornejady² , Bahram Choubin³ , Abolfazl Jaafari⁴ , Ata Amini⁵ 

¹ Assistant Professor, Department of Soil Conservation and Watershed Management Research, Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sanandaj, Iran

² Assistant Professor, Research Department of Natural Resources, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, Iran

³ Assistant Professor, Department of Soil Conservation and Watershed Management Research, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran

⁴ Assistant Professor, Research Institute of Forests and Rangelands, AREEO, Tehran, Iran

⁵ Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sanandaj, Iran

Extended Abstract

Introduction

Floods cause financial losses and countless lives in the world every year. Identifying flood-prone areas is one of the basic steps in flood management. In the past, careful observation and note-taking of the mechanism of occurrence and the natural course of the cause and effect of the effective factors that led to the final occurrence of the phenomenon in a chain manner helped to understand the pattern and process of the occurrence to some extent. Because the processes of creating floods are numerous and affected by various factors and the flood phenomenon is multidimensional and dynamic, all-natural, human, and organizational-management factors affect the occurrence, intensity, extent, and continuity of floods. So far, many efforts have been made to use data-mining models and artificial intelligence in the spatial prediction of floods. The models try to better and more accurately estimate the distribution of the flood phenomenon by examining the relationships between each flood event (dependent factor) and the set of underlying and stimulating factors (independent factors) and fitting them to educational evidence. Since the applicability of the flexible discriminant analysis model has not been fully investigated in the field of flood susceptibility prediction, this research quantitatively evaluated its performance using real-world flood data.

Materials and Methods

Based on the availability of periodic history of flood events, the Zarrineh-Rood Watershed of Kurdistan Province, Iran, was chosen as the study area. It was tried to select the factors based on different criteria such as familiarity with the process of flood inundation, ease of data preparation, having the most spatial variability at the regional level (not uniform), and containing the most information for the model should be selected to separate areas with different levels of flood susceptibility. Thirteen diverse geo-environmental factors including elevation, aspect, slope percent, land use, drainage density, lithology, plan curvature, profile curvature, mean annual precipitation, soil texture, stream power index, distance from the stream, and topographic wetness index were used as independent variables. The maps of elevation, aspect, slope percent, plan and profile curvatures, stream power index, and topographic wetness index were produced using a digital elevation model. Hydrological layers including distance from the stream and drainage density were produced using the stream network layer. The location of the flooding events was also collected as the dependent variable. The spatial data of flooding were randomly divided into two groups of training and validation with a ratio of 70:30. After running the model (i.e., Flexible Discriminant Analysis) based on the training group, the flood susceptibility map was produced. The validation of the model results was conducted using the area under the receiver operating characteristic curve (AUROC) and the true skill statistic (TSS) metrics.

Results and Discussion

The results indicated that the FDA model with the value of AUROC= 0.96 and TSS= 0.86 efficiently and accurately produced the flood susceptibility map. The flexible nature of the model in the selection of regression equations, as well as the possibility of weighting, and determining the priority of the evidence of presence over the evidence of absence, are among the special capabilities of the FDA model, which many machine learning models lack. Using probability distribution estimation algorithms in the model is very important and can not only

extract the hidden spatial pattern of occurrence from a set of data but also help to predict flood-prone areas in data-scarce Watersheds. Based on the results, about 14% (62 thousand ha) of the study area was categorized in the high and very high flood susceptibility zones, which include the northern, northwestern, and southeastern areas. Spatial analysis of the flood susceptibility map showed that in total 25897 ha (18.12%) of agricultural lands, 343 ha (50.91%) of garden lands, and 2126 ha (39.93%) of residential areas located in high and very high susceptible zones. Considering the successfulness of the FDA model in goodness-of-fit and validation phases, the flood susceptibility map can be used as a basis for planning flood control and management measures.

Conclusion

The findings of this study proved that the flexible discriminant analysis model provides the possibility of processing diverse and big geo-environmental data to predict the flood susceptibility of Watersheds and it had a high efficiency in this context. There is a lot of spatial correspondence between the vegetation status map and the flood susceptibility map; in such a way that the places that had a high flood susceptibility degree, their upstream areas were generally destroyed in terms of vegetation. The results of this research showed that a significant area of the Zarineh-Rood Watershed had a high and very high flood potential, which was characterized by the interaction of low slope and flat areas, formations and soils with low penetration and dense drainage network, and more importantly, flood-prone areas located in the northern, northwestern and southeastern parts of the Watershed. The situation of the flood probability of the Zarineh-Rood Watershed has been determined and managers and decision-makers must put the critical areas in the priority of flood management programs. More flood-driver factors are suggested to be used as predictor variables in flood susceptibility modeling in future studies. On the other hand, it is very important to determine the role of predictor variables in the flood susceptibility degree at the Watershed scale, which can be investigated in future research.

Keywords: Flood management, Morphometric index, Machine learning, Receiver operating characteristic, True skill stat

Article Type: Research Article

Acknowledgment

This article was compiled based on part of the results of a research project approved by the Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (No. 24-53-29-043-000870) which was funded by the Iran National Science Foundation (INSF) under project number 99017443. We would like to express our sincere gratitude to the Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Natural Resources and Watershed Management Organization, Iran Road Maintenance and Transportation Organization, Governorate crisis management, and Kurdistan Red Crescent for providing flood data and conducting the current research project.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Omid Rahmati: Conceptualization, writing-original draft preparation, data collection, modeling; **Aiding Kornejady:** Writing-original draft preparation, manuscript editing; **Bahram Choubin:** Formal analysis, investigation, and manuscript editing, revising; **Abolfazl Jaafari:** Visualization, manuscript editing; **Ata Amini:** Manuscript editing.

*Corresponding Author, E-mail: o.rahmati@areeo.ac.ir

Citation: Rahmati, O., Kornejady, A., Choubin, B., Jaafari, A., & Amini, A. (2024). Evaluating the performance of the flexible discriminant analysis model in predicting the flooding potential of the Zarrineh-Rood Watershed. *Water and Soil Management and Modeling*, 4(3), 269-284.
DOI: 10.22098/mmws.2023.13102.1303

Received: 09 June 2023, Received in revised form: 22 June 2023, Accepted: 23 June 2023, Published online: 23 June 2023
Water and Soil Management and Modeling, Year 2024, Vol. 4, No. 3, pp. 269-284

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





ارزیابی قابلیت مدل تحلیل تفکیک کننده انعطاف پذیر در پیش بینی استعداد سیل گیری حوزه آبخیز زرینه رود

امید رحمتی^{۱*}، آیدینگ کرنژادی^۲، بهرام چوبین^۳، ابوالفضل جعفری^۴، عطا امینی^۵

^۱ استادیار، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کردستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سنندج، ایران
^۲ استادیار، بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران
^۳ استادیار، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران
^۴ استادیار، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران
^۵ استاد، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کردستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سنندج، ایران

چکیده

شناسایی مناطق مستعد سیل یکی از اقدامات اساسی در زمینه مدیریت سیل است. در این پژوهش عملکرد مدل تحلیل تفکیک کننده انعطاف پذیر در پیش بینی سیل گیری با استفاده از داده های واقعی ارزیابی شد. با توجه به سابقه ادواری رخداد های سیل در حوزه آبخیز زرینه رود استان کردستان، این آبخیز به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. حدود ۱۳ عامل محیطی مختلف که تأثیر زیادی بر رخداد سیل گیری دارند، به عنوان متغیرهای مستقل انتخاب شدند. این عوامل شامل ارتفاع، شیب، جهت دامنه، انحنای سطح، انحنای مقطع، شاخص توان جریان، شاخص رطوبت توپوگرافی، میانگین بارندگی سالانه، سنگ شناسی، فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی، کاربری اراضی و بافت خاک بوده است. موقعیت رخدادهای سیل گیری نیز از پایگاه اطلاعات سازمان های مربوطه دریافت شد. داده های مکانی سیل گیری به شکل تصادفی به دو گروه آموزش و اعتبارسنجی با نسبت ۷۰:۳۰ تقسیم شدند. پس از اجرای مدل بر اساس داده های گروه آموزش، نقشه استعداد سیل گیری تولید شد. اعتبارسنجی نتایج مدل با استفاده از دو شاخص سطح زیرمنحنی مشخصه عملکرد گیرنده (AUROC) و آماره مهارت صحیح (TSS) بررسی و آزمون شد. نتایج نشان داد که مدل تحلیل تفکیک کننده انعطاف پذیر با مقدار AUROC برابر با ۰/۹۶ و TSS برابر با ۰/۸۶ عملکرد بسیار خوبی در تولید نقشه استعداد سیل گیری داشت. بر اساس نتایج، حدود ۱۴ درصد (۶۲ هزار هکتار) از محدوده مطالعاتی در پهنه استعداد سیل گیری زیاد و خیلی زیاد قرار گرفت که شامل پهنه های شمالی، شمال غربی و جنوب شرقی آبخیز می شود. تحلیل های مکانی نقشه پهنه بندی استعداد سیل گیری نشان داد که در مجموع ۲۵۸۹۷ هکتار (۱۸/۱۲ درصد) از اراضی کشاورزی، ۳۴۳ هکتار (۵۰/۹۱ درصد) از اراضی باغی و ۲۱۲۶ هکتار (۳۹/۹۳ درصد) از مناطق مسکونی در کلاس های استعداد زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته اند. یافته های این پژوهش اثبات نمود که مدل تحلیل تفکیک کننده انعطاف پذیر امکان پردازش اطلاعات محیطی متنوع و حجیم را برای پیش بینی استعداد سیل گیری حوزه های آبخیز فراهم نموده و کارائی بالایی در این زمینه دارد. وضعیت استعداد سیل گیری حوزه آبخیز زرینه رود مشخص شده و لازم است قسمت های بحرانی توسط مدیران در اولویت اول برنامه های مدیریت سیلاب را شامل شوند.

واژه های کلیدی: آماره مهارت صحیح، شاخص مورفومتریک، مشخصه عملکرد گیرنده، مدیریت سیلاب، یادگیری ماشین

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: o.rahmati@areeo.ac.ir

استناد: رحمتی، امید، کرنژادی، آیدینگ، چوبین، بهرام، جعفری، ابوالفضل، و امینی، عطا (۱۴۰۳). ارزیابی قابلیت مدل تحلیل تفکیک کننده انعطاف پذیر در پیش بینی استعداد سیل گیری حوزه آبخیز زرینه رود. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۳)، ۲۶۹-۲۸۴.
DOI: 10.22098/mmws.2023.13102.1303

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۱۹، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۰۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۲، تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۴/۰۲

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۳، صفحه ۲۶۹ تا ۲۸۴

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی © نویسندگان



۱- مقدمه

افزایش جمعیت و توسعه ساخت و ساز به‌ویژه در کلان‌شهرها، موجب تغییر مورفولوژی حوزه‌های آبخیز، تشدید خسارت سیلاب‌های احتمالی و تهدید امنیت و آرامش روانی ساکنان این مناطق می‌شود. تجاوز به حریم رودخانه‌ها، مسیل‌ها و آبراهه‌ها، الگوی زهکشی طبیعی را تغییر و باعث جاری‌شدن جریان‌های مازاد بر ظرفیت آبراهه‌ها و مسیل‌های شهری می‌شود (Habibi et al., 2023).

عدم مدیریت صحیح دشت‌های سیلابی، عدم مدیریت صحیح مسیرهای انحراف آب به تالاب‌ها و گودی‌های طبیعی مجاور مسیر رودخانه، فقدان سند جامع راهبردی مخاطرات محیطی و برنامه اقدام جامع، فقدان ابزار تصمیم‌گیری (سامانه پشتیبان تصمیم) برای سناریوسازی و شبیه‌سازی شرایط پیشگویی شده، نبود فرماندهی واحد و متمرکز در مدیریت و نظارت امور مربوط به سیلاب بین دستگاه‌های دولتی متولی، نداشتن شیوه‌نامه‌های تفصیلی شامل فهرست عملیات‌های حین وقوع خطر، فقدان ادراک صحیح از ریسک سیل و وجود تفکر خطر محور به‌جای ریسک محور در بین بیش‌تر مدیران و کارشناسان و در نتیجه عدم توجه به عناصر ریسک سیل به‌ویژه آسیب‌پذیری و در معرض بودن در برنامه‌ریزی‌ها، توجه ناکافی به منشأ عوامل و تمرکز بر راه‌حل‌های مکانیکی و کوتاه‌مدت، توجه نکردن به رویکرد مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز برای بهبود فرآیندهای چرخه آبی مزید بر علت شده و سبب افزایش خسارات ناشی از سیل خواهد شد (Barati et al., 2012; Rajabizadeh et al., 2019; Vafaei et al., 2023).

مدل‌سازی پتانسیل سیل‌گیری در یک عرصه طبیعی شاید نخستین و مهم‌ترین گام در مسیر مدیریت ریسک سیل محسوب می‌شود که خود طی ادوار کهن تاکنون پیوسته در حال تغییر و تحول و پیشرفت بوده است. علت اصلی در پویایی این عرصه از علم را می‌توان در تلاش بی‌وقفه بشر در یافتن نظم و یک الگوی مشخص در پدیده‌های طبیعی و یافتن سؤال چه پدیده‌ای کجا رخ می‌دهد و یا پتانسیل رخ دادن دارد (ظهور مورفولوژیک)، یافتن (Newson et al., 2022). بنابراین، در گذشته، مشاهده دقیق و یادداشت‌برداری از سازوکار وقوع و سیر طبیعی علت و معلولی عوامل مؤثر که به شکل زنجیره‌ای به رخداد نهایی پدیده منجر می‌شدند، تا حدی به درک الگو و فرآیند وقوع کمک می‌کرد (Derex, 2022). به‌مرور، یافته‌های بصری و نوشتاری شکل مدون‌تری یافتند و جای خود را به روابط تجربی دادند که از تکرار زیاد مشاهدات اولیه نشأت می‌گرفت. با شکل‌گیری روابط آماری و احتمالاتی مبتنی بر داده‌های محیطی و شواهد میدانی، شکل جدیدتر مدل‌ها شامل مدل‌های آماری دومتغیره و چندمتغیره و

مدل‌های احتمالاتی منتج از نظریات علمی نظیر شبکه بیزین معرفی شدند. مدل‌های آماری دومتغیره نظیر ارزش اطلاعاتی (Moazzam et al., 2020; Wubalem et al., 2020)، نسبت فراوانی (Rahmati et al., 2016; Samanta et al., 2018)، و مدل‌های آماری چندمتغیره نظیر وزن واقعه (Shafapour Tehrany et al., 2017; Hong et al., 2018)، رگرسیون لجستیک (Chapi et al., 2017; Shafapour Tehrany and Kumar, 2018) و آنتروپی شانون (Arora et al., 2021) مثال‌هایی از مدل‌های آماری در ارزیابی پتانسیل سیل‌گیری به‌شمار می‌روند. این مدل‌ها، اغلب مبتنی بر فرضیات ساده‌ای هستند. در مقابل، مدل‌های احتمالاتی ماهیت ذاتی منطبق‌تری با پدیده‌های طبیعی و الگوی فکری و مدیریتی بشر داشتند؛ به‌طوری‌که پتانسیل‌یابی وقوع پدیده‌ها به‌دور از قطعیت و در قالب احتمال بیان شده و به مجموعه اقدامات پیشگیرانه ساختار منعطف‌تری می‌دادند. این مدل‌ها سعی در تخمین و برآزش توزیع‌های احتمالاتی به فراوانی و موقعیت رخدادها و ارتباط آن با توزیع‌های متناظر موجود در عوامل مؤثر در رخداد پدیده دارند.

دل‌های یادگیری ماشین با بهره‌گیری از روابط آماری و احتمالاتی و نیز الگوریتم‌های پیشرفته تخمین توزیع سعی در استخراج الگوی پنهان در داده‌ها را دارند. این نوع از مدل‌ها که ابتدا برای تشخیص الگو از بین کلان‌داده^۱ معرفی شدند، به‌سرعت توسط پژوهش‌گران در پژوهش‌های علوم محیطی استفاده شدند (Karim et al., 2023). با گذشت زمان، مدل‌های یادگیری ماشین نظارت شده و سپس مدل‌های نظارت نشده روی کار آمدند و نه تنها در استخراج الگوی پنهان، بلکه پیش‌بینی الگوی مکانی-زمانی مورد انتظار از رخداد پدیده‌ها در آینده نیز مهارت بالایی داشتند. از این بین، می‌توان به مدل‌های جنگل تصادفی (Abedi et al., 2023; Habibi et al., 2022)، بیشینه بی‌نظمی (Pourghasemi et al., 2023)، درختان رگرسیونی بهبود یافته (Prasad et al., 2022; Youssef et al., 2022)، ماشین بردار پشتیبان (Arabameri et al., 2022; Youssef et al., 2023) و شبکه عصبی مصنوعی (Seleem et al., 2022) یاد کرد. این مدل‌ها به‌صورت جداگانه یا تلفیقی به‌کرات در پژوهش‌های داخلی و خارجی در زمینه ارزیابی و پیش‌بینی استعداد وقوع مخاطرات طبیعی در مقیاس‌های مختلف مکانی اجرا شده‌اند. با وجود ارائه موفقیت‌های ارزنده توسط این مدل‌ها نظیر کارایی زیاد در مناطق دارای داده‌های محدود و توانایی کشف روابط غیرخطی، ضعف‌هایی نظیر بیش‌برآزش به داده‌های تعلیمی و توانایی ضعیف در تعمیم نتایج حاصل از یادگیری مدل برای پیش‌بینی الگوی جدیدتر و یا

^۱ Big data

این حوزه آبخیز با مساحت ۴۴۸۵ کیلومتر مربع از ارتفاعات چهل‌چشمه کردستان به ارتفاع ۳۱۴۸ سرچشمه گرفته و تا محل خروجی در ارتفاع ۱۳۶۳ امتداد می‌یابد. متوسط و حداکثر شیب حوزه آبخیز به ترتیب ۲۵/۶ و ۴۲۱ درصد است. طبق طبقه‌بندی دومارتن اصلاح شده، اقلیم سرد و خشک بر منطقه مطالعاتی سیطره یافته که با حداقل و حداکثر بارش معادل ۳۵۶ و ۶۸۱ میلی‌متر به ترتیب در شمال شرقی و جنوب غربی نزولات جوی حوزه آبخیز را تأمین می‌کند. سهم عمده حوزه آبخیز زربینه رود به کاربری‌های مرتع (۶۳/۷۴ درصد) و کشاورزی (۳۱/۸۵ درصد) اختصاص یافته، درحالی‌که کاربری‌های مسکونی، باغات، پهنه‌های آبی و اراضی بایر نیز در محدوده به چشم می‌خورد. بافت خاک لومی‌رسی با بیش‌ترین سهم مساحتی (۶۹/۷ درصد) در منطقه مشهود بوده و سایر مناطق به طبقه‌های بافت لومی، لومی‌شنی، لومی‌رسی‌شنی و لومی‌رسی‌سیلتی اختصاص یافته است. از دیدگاه زمین‌شناسی، مجموعه متنوعی از واحدهای سنگی در محدوده مطالعاتی به چشم می‌خورد؛ به طوری‌که بیش‌ترین و کم‌ترین مساحت به رخساره‌های آمفیبولیتی پرکامبرین (۳۴/۹۸ درصد) و گرانیت اولیگوسن (۰/۰۳ درصد) اختصاص یافته است.

در سطح عرصه‌های جدید نیز برای برخی از این مدل‌ها گزارش شده است. در این بین، کارائی مدل تحلیل تفکیک‌کننده انعطاف‌پذیر^۱ (FDA) تاکنون در زمینه پیش‌بینی استعداد سیل‌گیری حوزه‌های آبخیز ارزیابی نشده است. بنابراین، پژوهش پیش‌رو با استفاده از طیف وسیعی از داده‌های محیطی از جمله شاخص‌های مورفومتریک مشتق از مدل رقومی ارتفاع، شاخص‌های اقلیمی، سنگ‌شناسی، هیدرولوژیک، پدولوژیک و محیطی، سعی در پوشاندن شکاف پژوهش‌های مذکور و دست‌یابی به اهدافی نظیر تولید نقشه استعداد سیل‌گیری حوزه آبخیز زربینه رود کردستان با سابقه ثبت رخدادهای متعدد سیلاب با استفاده از مدل FDA، تعیین کارایی مدل با استفاده از یک غربال چندکارکردی متشکل از دو شاخص ارزیابی موفقیت یادگیری داشت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز زربینه رود در شمال غربی استان کردستان و غرب ایران بین طول‌های جغرافیایی ۴۶° ۴۵' تا ۴۸° ۴۶' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۴۲° ۳۵' تا ۳۶° ۲۳' شمالی واقع شده است (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز زربینه رود در کشور و استان کردستان

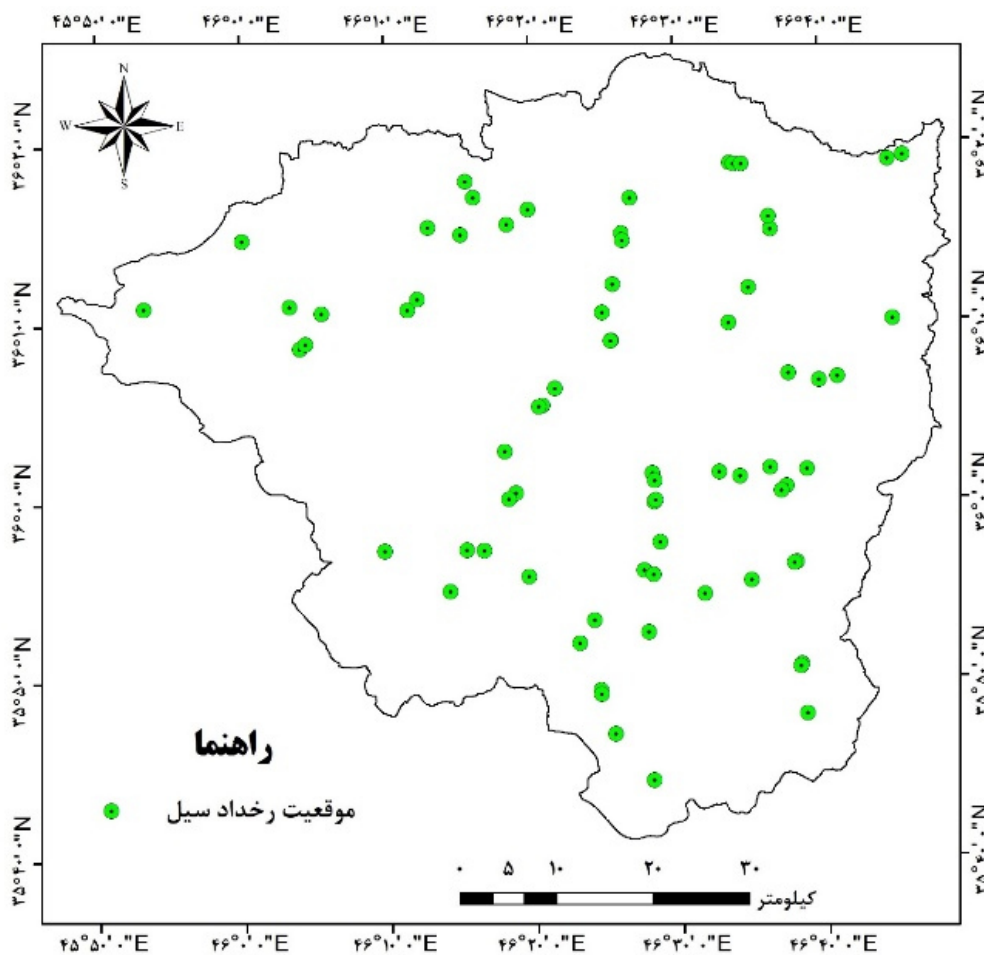
Figure 1- Geographical location of the Zarrineh-Rood Watershed in the country and Kurdistan Province

¹ Flexible discriminant analysis

۲-۲- داده‌های سیل‌گیری

موقعیت جغرافیایی کلیه رخدادهای سیلاب ثبت شده در بانک اطلاعات سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری، اداره کل راهداری و حمل و نقل جاده‌ای، ستاد بحران استانداری و جمعیت هلال احمر استان کردستان جمع‌آوری شد. سپس، بررسی‌های میدانی وقایع سیل‌گیری و مصاحبه با افراد بومی جهت تأیید صحت داده‌های

موقعیت سیل‌گیری انجام شد و پس از تأیید، لایه اطلاعاتی این نقاط در سامانه اطلاعات جغرافیایی تهیه شدند (شکل ۲). این نقاط که در مجموع ۷۲ موقعیت رخداد تاریخی سیل‌گیری را تشکیل می‌دادند، در شناسایی الگوی سیل‌گیری به مدل کمک شایان توجهی کردند.



شکل ۲- موقعیت رخدادهای سیل‌گیری در حوزه آبخیز زرینه‌رود

Figure 2- Location of flood inundation events at the Zarrineh-Rood Watershed

۲-۳- عوامل محیطی مؤثر بر رخداد سیل‌گیری

پس از تهیه شواهد زمینی رخدادهای سیل، انتخاب و تهیه نقشه عوامل مؤثر در وقوع سیل‌گیری دومین ورودی کلیدی به فرآیند مدل‌سازی است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، ارتباط غیرخطی بین رخدادها و عوامل مؤثر در وقوع و نیز ارتباط بینابینی عوامل با یکدیگر سبب استخراج الگوی سیل‌گیری توسط مدل خواهد شد. بدین‌منظور سعی شد که عوامل بر اساس معیارهایی نظیر سختی با سازوکار وقوع سیل و فرآیند سیل‌گیری، سهولت تهیه داده، دارای بیش‌ترین تغییرات در سطح منطقه (یکنواخت نباشد) و حاوی

بیش‌ترین اطلاعات برای مدل به‌منظور تفکیک عرصه‌های با پتانسیل زیاد و فاقد پتانسیل سیل‌گیری و جامعیت انتخاب شوند (Kazemi and Jafarpoor, 2022; Tajbakhsh and Chezgi, 2022). بنابراین، ۱۳ عامل مؤثر زمینه‌ساز و تحریکی از پنج دسته توپوگرافی، اقلیمی، زمین‌شناختی، پدولوژیک و محیطی انتخاب و برای مدل‌سازی پتانسیل سیل‌گیری حوزه آبخیز زرینه‌رود به‌عنوان ورودی به مدل معرفی شد. مقیاس مکانی، منبع و کارکرد هر عامل در جدول ۱ ارائه شده است.

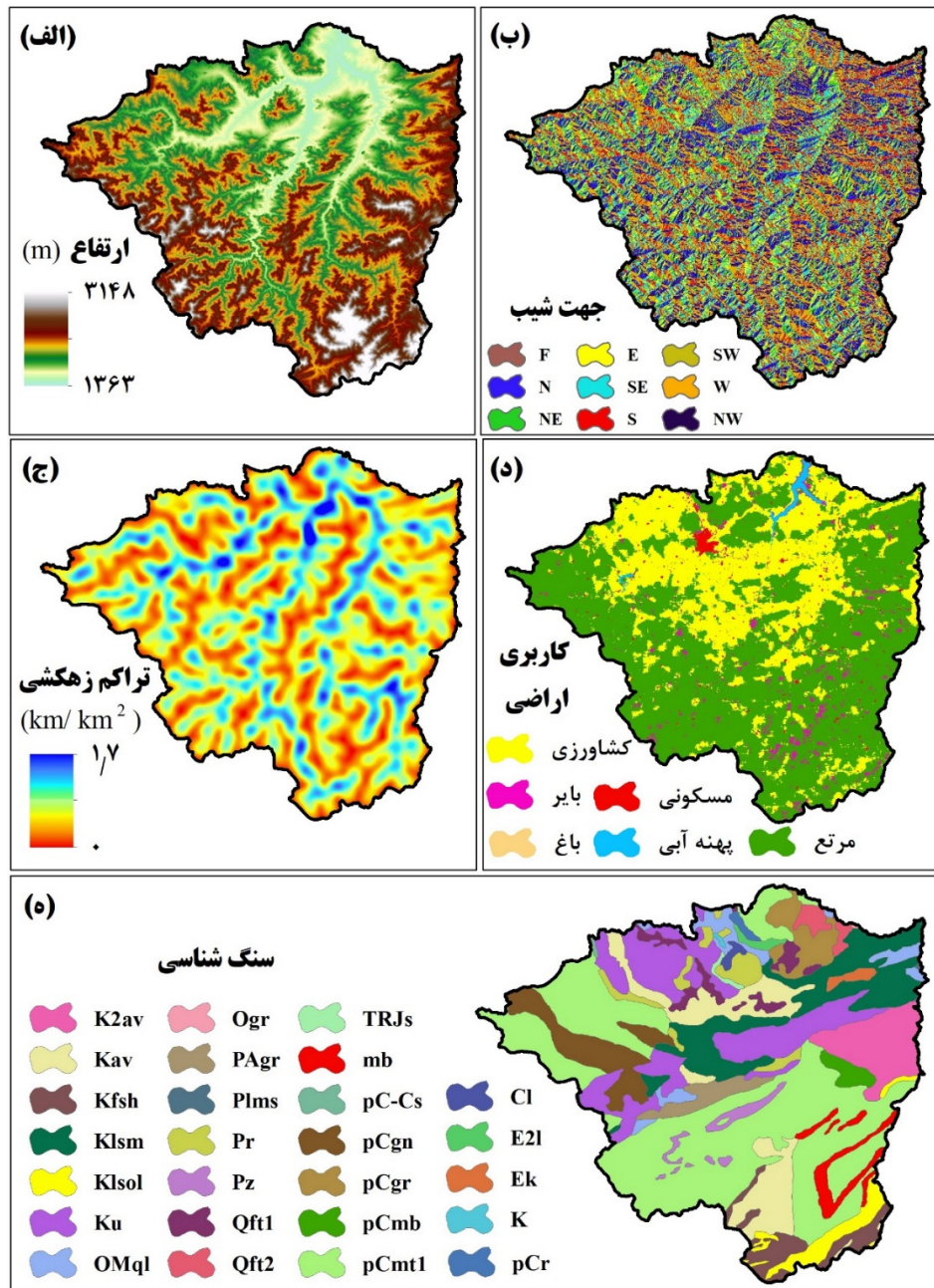
جدول ۱- منبع داده و کارکردهای عوامل مؤثر در سیل‌خیزی حوزه آبخیز زربینه‌رود
Table 1- Data source and functions of flood-conditioning factors at the Zarrineh-Rood Watershed

گروه	عامل	منبع داده	کارکرد*
توپوگرافی	ارتفاع	سازمان نقشه‌برداری کشور	تأثیر مستقیم بر الگو و نوع بارش و تأثیر غیرمستقیم بر تیپ پوشش گیاهی و گسترش سازندهای سنگی نفوذناپذیر
	شیب زمین جهت دامنه		تأثیر بر تراکم پوشش گیاهی و نرخ نفوذپذیری
توپوگرافی	انحنای سطح انحنای مقطع	سازمان نقشه‌برداری کشور	کنترل همگرایی و واگرایی جریان و در نتیجه تمرکز و حجم جریان
	شاخص توان جریان شاخص رطوبت		کنترل سرعت جریان
اقليمی	میانگین بارندگی سالانه	اداره کل هواشناسی	تأثیر بر نفوذپذیری و کنترل حجم و سرعت جریان
	زمین‌شناختی		سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی
محیطی	فاصله از جریان	اداره منابع طبیعی و آبخیزداری / تصاویر گوگل-ارث	تأثیر بر نفوذپذیری سازندها و در نتیجه حجم و سرعت جریان
	تراکم زهکشی	اداره منابع طبیعی و آبخیزداری / اعتبارسنجی توسط تصاویر گوگل‌ارث	تفکیک زون‌های پاسخ هیدرولوژیک اشباع با مکانسیم تولید رواناب اشباع و زون دامنه با مکانسیم تولید رواناب جریان زیرقشری سریع
پدولوژیک	کاربری اراضی	اداره منابع طبیعی و آبخیزداری / اعتبارسنجی توسط تصاویر گوگل‌ارث	تأثیر بر واکنش زیرحوزه‌های آبخیز به سیل و سرعت تخلیه جریان، زمان تمرکز و انتقال آب به خروجی
	بافت خاک	اداره منابع طبیعی و آبخیزداری	تأثیر بر نفوذپذیری، نگهداشت آب، رطوبت خاک و نتیجتاً سرعت جریان و حجم رواناب جاری شده

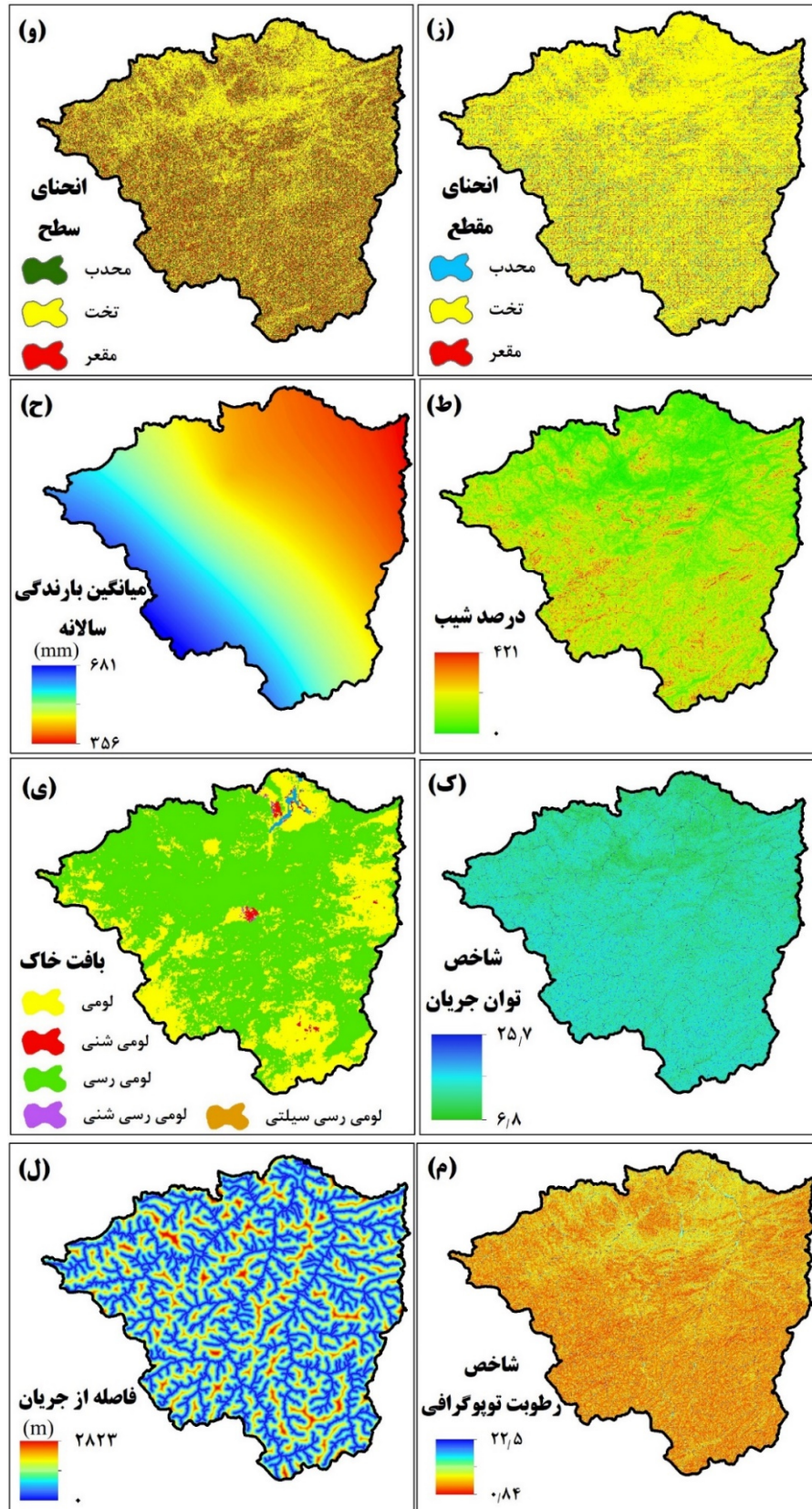
* برگرفته از پژوهش (Abedi et al. (2022) و Seleem et al. (2022)

و مراتع. اراضی مرتعی و کشاورزی به‌ترتیب بیش‌ترین سهم از سطح حوزه آبخیز را به خود اختصاص داده‌اند. اراضی مرتعی غالباً در بخش‌های جنوبی، غربی و شرقی حوزه آبخیز قرار داشته ولی اراضی کشاورزی عموماً در قسمت‌های شمالی آبخیز مشاهده می‌شوند. سنگ‌شناسی حوزه آبخیز از تغییرپذیری مکانی نسبتاً بالایی برخوردار بوده به‌گونه‌ای که در این حوزه آبخیز ۲۶ واحد سنگ‌شناسی ثبت شده است. رخساره‌های آمفیبولیتی پرکامبرین (pCmt1) با مساحت ۱۵۶۸۹۳ هکتار (حدود ۳۵ درصد) بیش‌ترین سطح را به خود اختصاص داده است. سنگ‌های کرتاسه بالا (Ku) و دولومیت و آهک شنی همراه با شیل و مارن (Klsm) نیز با مساحت‌های ۵۶۳۹۴ هکتار (۱۲/۵۷ درصد) و ۴۴۷۸۵ هکتار (حدود ۱۰ درصد) به‌ترتیب در جایگاه‌های دوم و سوم گسترش مکانی قرار گرفته‌اند.

در شکل ۳ نقشه عوامل اثرگذار بر سیلاب در حوزه آبخیز زربینه‌رود ارائه شده است. مقدار ارتفاع زمین در این آبخیز از ۱۳۶۳ تا ۳۱۴۸ متر متغیر است به‌گونه‌ای که اراضی مرتفع عموماً در قسمت‌های جنوبی، جنوب غربی و جنوب شرقی حوزه آبخیز قرار گرفته‌اند و کم ارتفاع‌ترین اراضی در بخش‌های جنوبی حوزه آبخیز مشاهده می‌شوند. میانه ارتفاعی این حوزه آبخیز ۱۸۷۹ متر به‌دست آمده است. از نظر جهت شیب، نه کلاس جهت شیب در این حوزه آبخیز قابل ملاحظه است. باتوجه به تغییرات توپوگرافی این حوزه آبخیز، توزیع نسبتاً یکسانی از نظر جهات شیب در بخش‌های مختلف مشاهده می‌شود. تراکم زهکشی حوزه آبخیز زربینه‌رود از صفر تا ۱/۷ کیلومتر بر کیلومتر مربع متغیر است. بخش‌های دارای تراکم زهکشی بالا عموماً در مناطق شرقی، شمال غربی و شمالی آبخیز قرار گرفته‌اند. براساس نقشه کاربری اراضی، شش طبقه کاربری اراضی در این حوزه آبخیز مشاهده شده که عبارتند از کشاورزی، اراضی بایر، باغ، مسکونی، پهنه آبی



شکل ۳- عوامل مؤثر در وقوع سیل گیری در حوزه آبخیز زرینه رود
 Figure 3- Flood-conditioning factors in the Zarrineh-Rood Watershed



ادامه شکل ۳- عوامل مؤثر در وقوع سیل‌گیری در حوزه آبخیز زرینه‌رود
 Figure 3- Flood-conditioning factors in the Zarrineh-Rood Watershed

طبقه‌ها استفاده می‌کند. این تغییر فضای حل مسئله با استفاده از فن رگرسیون انطباقی چندمتغیره اسپلاین (MARS^۲) انجام می‌شود که طی آن مدل قادر خواهد بود یک صفحه جداکننده^۳ بین طبقه‌های قابل تفکیک ترسیم کند (Hastie et al., 2009). بنابراین، موفقیت FDA بر این واقعیت است که احتمال خطاهای روش‌های قبلی توسط رگرسیون برطرف شده است. کارکرد این مدل مبتنی بر نقاط حضور و عدم حضور (یا شبه‌عدم حضور) شواهد سیل است. از قابلیت‌های مدل FDA می‌توان به مدل‌سازی تعداد زیادی از متغیرهای مستقل (عوامل مؤثر در سیل‌خیزی)، امکان بررسی و تشخیص خودکار روابط غیرخطی بین عوامل مستقل، دارا بودن الگوریتم محاسباتی بسیار سریع و کارآمد با وجود ماهیت ریاضی پیچیده مدل و ایمن بودن نسبت به داده‌های پرت اشاره نمود. در مقابل، مدل به متغیرهای ورودی حساس است و باید با دقت زیاد توسط کاربر تنظیم شوند. انتخاب وزن نقاط حضور و عدم حضور، تعداد جایگشت‌های مدل‌سازی به‌منظور تعیین اهمیت عوامل مؤثر و روش رگرسیونی مورد استفاده، سه متغیر اصلی مدل محسوب شده که باید پیش از مدل‌سازی به‌دقت توسط کاربر تعیین شود. از دیگر نقاط قوت مدل، عدم وابستگی مدل به هیچ نوع پیش‌فرضی به‌ویژه در مورد توزیع‌های احتمالاتی عوامل مستقل است. در حالی که برخی مدل‌ها بعضاً نرمال بودن توزیع احتمالاتی متغیرها را پیش‌فرض مدل‌سازی خود می‌دانند (Hallgren et al., 2019). در پژوهش (Hastie et al., 2009) و (Hallgren et al., 2019) جزئیات الگوریتم محاسباتی و روابط ریاضی و آماری مدل FDA آمده است.

۲-۵- ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل

در این پژوهش، از دو روش مساحت زیرمنحنی مشخصه عملکرد گیرنده (AUROC) به‌عنوان یک روش مستقل از تعیین حد آستانه و آماره مهارت صحیح (TSS) به‌عنوان یک روش وابسته به تعیین حد آستانه برای ارزیابی کارایی مدل در دو مرحله یادگیری و پیش‌بینی استفاده شده است. حد آستانه به‌منظور طبقه‌بندی نقشه نهایی استعداد سیل‌خیزی حاصل از مدل FDA استفاده می‌شود که اغلب عدد ۰/۵ به‌منظور تفکیک مقادیر احتمالاتی به اعداد صفر و یک استفاده می‌شود. شاخص AUROC یکی از پرکاربردترین آماره‌های ارزیابی موفقیت مدل است که از ترسیم مناطق مثبت کاذب^۴ (به اشتباه توسط مدل به‌عنوان رخداد سیل پیش‌بینی شده‌اند) روی محور X و مناطق مثبت واقعی^۵ (تعداد رخداد‌های سیل که به‌درستی توسط مدل

از سازندهای زمین‌شناسی مهم این حوزه آبخیز نیز می‌توان به سازند کرج، سازند لالون، سری ریزو، سازند شمشک و سازند سلطانیه اشاره کرد. از نظر زمانی نیز واحدهای سنگ‌شناسی حوزه آبخیز زربنه‌رود متعلق به زمان‌های پرکامبرین تا کواترنری هستند. دو متغیر انحنای سطح و انحنای مقطع در این حوزه آبخیز نشان می‌دهند که دامنه‌های این آبخیز از تنوع زیادی برخوردار هستند و سه طبقه محدب، مقعر و تخت در اکثر مناطق مشاهده می‌شوند. نقشه توزیع مکانی میانگین بارش سالانه در حوزه آبخیز زربنه‌رود بیان‌گر این است که مقدار میانگین بارندگی سالانه در این آبخیز از ۳۵۶ تا ۶۸۱ میلی‌متر متغیر است. میانه توزیع مکانی بارندگی ۴۸۹ میلی‌متر بوده که بیان‌گر این است که نیمی از سطح حوزه آبخیز دارای میانگین بارندگی سالانه کمتر از ۴۸۹ میلی‌متر و نیمه دیگر آن بیش‌تر از ۴۸۹ میلی‌متر است. بخش‌های جنوب غربی دارای بیش‌ترین مقدار بارندگی سالانه بوده ولی قسمت‌های شمال شرقی آبخیز کم‌ترین میانگین بارندگی سالانه را به خود اختصاص داده‌اند. مقدار شیب زمین در این آبخیز از صفر تا ۴۲۱ درصد متغیر است و اراضی شیب‌دار غالباً در نیمه جنوبی حوزه آبخیز قرار دارند. مقدار میانه شیب زمین حدود ۲۵ درصد به‌دست آمده است. نقشه بافت خاک نشان می‌دهد که پنج طبقه بافت خاک لومی، لومی‌شنی، لومی‌رسی، لومی‌رسی‌شنی و لومی‌رسی‌سیلیتی در این حوزه آبخیز ثبت شده است. بافت خاک لومی‌رسی با مساحت ۳۱۲۵۸۶ هکتار (حدود ۷۰ درصد) بیش‌ترین سطح را دربرگرفته است. شاخص توان جریان در حوزه آبخیز زربنه‌رود از ۶/۸ تا ۲۵/۷ متغیر است. مسیرهای جریان در نواحی جنوبی این حوزه آبخیز دارای بیش‌ترین مقدار شاخص توان جریان و قسمت‌های شمالی دارای کم‌ترین مقدار این شاخص هستند. براساس نقشه فاصله از جریان، اراضی عموماً نزدیک به مسیر جریان بوده و محدوده کمی از حوزه آبخیز در فاصله ۲۸۲۳ متری از آبراهه‌ها قرار گرفته‌اند. نقشه شاخص رطوبت توپوگرافی نیز نشان می‌دهد که مقدار این شاخص از ۰/۸۴ تا ۲۲/۵ متغیر است. کم‌ترین مقدار شاخص رطوبت توپوگرافی در قسمت‌های جنوبی حوزه آبخیز و بیش‌ترین مقدار آن در بخش‌های شمالی حوزه آبخیز مشاهده می‌شود.

۲-۴- مدل تحلیل تفکیک‌کننده انعطاف‌پذیر

روش تحلیل تفکیک‌کننده انعطاف‌پذیر (FDA) به‌عنوان یک مدل یادگیری ماشین از نوع طبقه‌بندی متشکل از چندین مدل رگرسیون خطی است که از یک روش تحت عنوان رتبه‌بندی بهینه^۱ برای انتقال متغیر وابسته به یک فضای قابل‌حل به‌منظور تفکیک خطی

⁴ False positive (FP)

⁵ True positive (TP)

¹ Optimal scoring

² Multivariate adaptive regression splines (MARS)

³ Discriminant surface

۳- نتایج و بحث

۳-۱- الگوی مکانی استعداد سیل‌گیری

با بررسی نقشه سیل‌گیری حاصل از مدل یادگیری ماشین (یعنی FDA) (شکل ۴)، تفسیر ارائه شده در بخش پیشین تأیید می‌شود؛ به طوری که لکه‌های پرخطر سیل‌گیری در پایین‌دست و مشرف به خروجی با رنگ قرمز مشخص شده‌اند. همچنین، شرایط مستعد سیل‌گیری در بالادست نیز به سبب اندرکنش شرایط مؤثر نظیر شیب‌های هموار محلی و آبراهه‌های متراکم فراهم شده است. اگرچه شایان ذکر است، مدل‌سازی صورت گرفته از سیل‌گیری در محدوده الزامی بوده و تنها با تفسیر اولیه عوامل مؤثر نمی‌توان به اولویت‌بندی دقیق مناطق مستعد سیل‌گیری ارائه شده در شکل ۴ دست یافت. هم‌راستا با این موضوع، نقشه اولویت‌بندی و طبقه‌بندی درجه‌های استعداد سیل‌گیری در حوزه آبخیز زرینه‌رود در شکل ۵ ارائه شد که به تبع آن، حدود ۶۲ هزار هکتار (۱۴ درصد) از عرصه‌های حوزه آبخیز زرینه‌رود تحت تأثیر طبقه‌های استعداد زیاد و خیلی‌زیاد سیل‌گیری قرار دارد (جدول ۲). طبقه‌بندی ارائه شده در جدول ۲ به سبب متوازن بودن (پنج طبقه) برای اختصاص اقدامات مدیریتی مناسب‌تر بود و دارای تفکیک مکانی بالاتری نیز هست. همچنین، روند کاهشی درصد مساحتی طبقه‌های استعداد از کم به زیاد نشان از انطباق بالای نتایج مدل FDA با ماهیت واقعی خطر سیل‌گیری در طبیعت دارد، به طوری که در واقعیت سطح اعظم عرصه‌های طبیعی اغلب فاقد یا دارای استعداد کمی به وقوع مخاطرات طبیعی بوده و خطرات در بخش خاص و متمرکز از محدوده به ظهور می‌رسند. طبقه‌های استعداد زیاد و خیلی‌زیاد در دو عرصه پرخطر شمال، شمال غربی و جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه واقع شده و در مجموع ۲۵۸۹۷ هکتار (۱۸/۱۲ درصد) از اراضی کشاورزی، ۳۴۳ هکتار (۵۰/۹۱ درصد) از اراضی باغی و ۲۱۲۶ هکتار (۳۹/۹۳ درصد) از مناطق مسکونی را تهدید می‌کند.

جدول ۲- مساحت طبقه‌های استعداد سیل‌گیری

Table 2- Area of flood susceptibility classes		
ردیف	طبقه استعداد سیل‌گیری	مساحت (هکتار)
1	خیلی کم	193787.2
2	کم	122331.5
3	متوسط	70462.7
4	زیاد	32696.3
5	خیلی زیاد	29244.7

پیش‌بینی شده‌اند) روی محور Y محاسبه می‌شود (Pontius and Schneider, 2001). مقدار سطح زیر این منحنی از مقادیر ۰/۵ به‌عنوان یک مدل خنثی با نتایج کاملاً تصادفی تا یک به‌عنوان یک مدل عالی متغیر است. در صورت استفاده از مجموعه داده‌های تعلیمی در الگوریتم محاسباتی شاخص AUROC، عدد حاصله بیان‌گر قدرت یادگیری و در صورت استفاده از داده‌های اعتبارسنجی، مبین قدرت پیش‌بینی و تعمیم مدل است. در مقابل شاخص TSS یکی از دقیق‌ترین شاخص‌ها در تعیین یک مدل کارا است که این دقت مرهون استفاده از تمامی چهار آماره ماتریس درهم‌ریختگی^۱ در الگوریتم محاسباتی خود شامل موفقیت حاصل از مثبت واقعی و منفی واقعی^۲ (تعداد رخدادها) فاقد شواهد سیل که به‌درستی توسط مدل پیش‌بینی شده‌اند) و خطای ناشی از مثبت کاذب و منفی کاذب^۳ (تعداد رخدادها) سیل که به اشتباه توسط مدل به‌عنوان فاقد سیل پیش‌بینی شده‌اند) است (Allouche et al., 2006) (رابطه ۱). مقادیر نزدیک به یک در شاخص TSS بیان‌گر یک مدل با توانایی فوق‌العاده تشخیص عرصه‌های دارای پتانسیل سیل‌گیری از مناطق فاقد پتانسیل است.

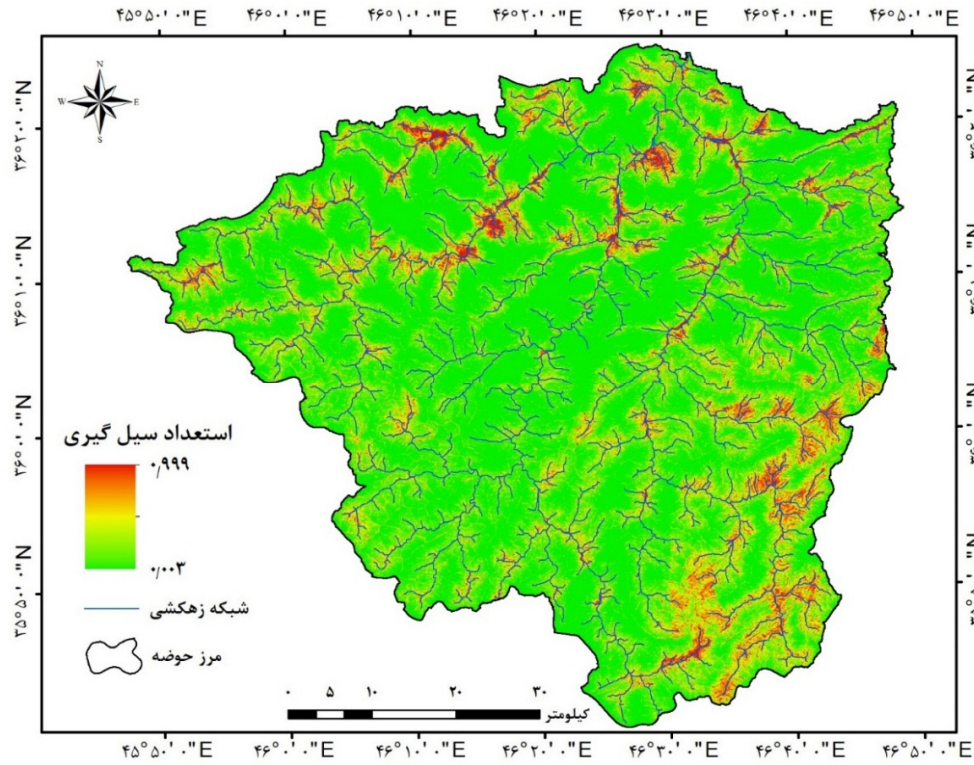
$$TSS = \frac{TP}{TP + FN} - \frac{FP}{FP + TN} \quad (1)$$

در رابطه فوق، TP تعداد موقعیت‌های سیل‌گیری در داده‌های مشاهداتی گروه اعتبارسنجی است که مدل به‌درستی در نقشه خروجی مدل آن پیکسل‌ها را به‌عنوان مناطق مستعد سیل‌گیری پیش‌بینی نموده است. متغیر TN نیز تعداد موقعیت‌های عدم سیل‌گیری در داده‌های مشاهداتی گروه اعتبارسنجی است که مدل نیز به‌درستی، مقادیر استعداد سیل‌گیری کمی را در نقشه به آن‌ها اختصاص داده است. متغیر FN بیان‌گر تعداد موقعیت‌های سیل‌گیری در داده‌های مشاهداتی گروه اعتبارسنجی است که مدل به‌صورت اشتباه به‌عنوان محدوده‌های فاقد استعداد سیل‌گیری پیش‌بینی کرده است. متغیر FP نیز بیان‌گر تعداد موقعیت‌های عدم سیل‌گیری در داده‌های مشاهداتی گروه اعتبارسنجی است که مدل به‌صورت اشتباه به‌عنوان پیکسل‌های دارای استعداد سیل‌گیری در نقشه خروجی ارائه نموده است.

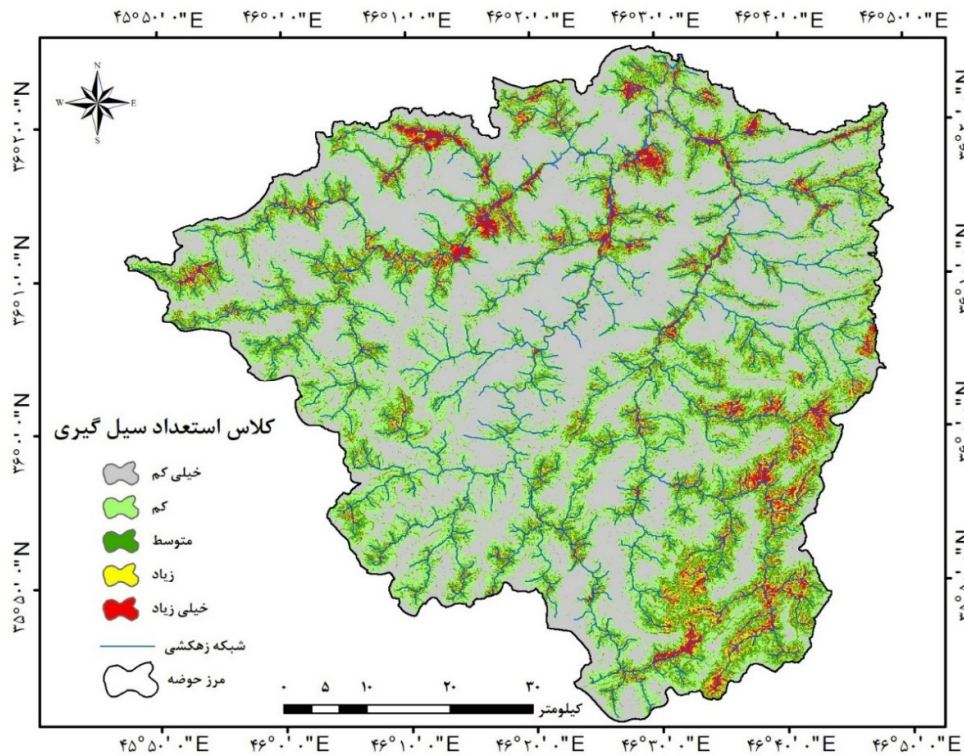
³ False negative (FN)

¹ Confusion matrix

² True negative (TN)



شکل ۴- نقشه استعداد سیل گیری حوزه آبخیز زرینه رود با استفاده از مدل تحلیل تفکیک کننده انعطاف پذیر
Figure 4- Flood susceptibility map using the FDA model at the Zarrineh-Rood Watershed



شکل ۵- نقشه طبقه های استعداد سیل گیری حوزه آبخیز زرینه رود با استفاده از مدل تحلیل تفکیک کننده انعطاف پذیر
Figure 5- Map of flood susceptibility classes using the FDA model at the Zarrineh-Rood Watershed

جدول ۳- نتایج اعتبارسنجی پیش‌بینی استعداد سیل‌گیری
Table 3- Validation results of flood susceptibility prediction

معیار ارزیابی		مدل
TSS	AUROC	
0.86	0.96	مدل تحلیل تفکیک‌کننده انعطاف‌پذیر

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با تکیه بر مجموعه‌ای از داده‌های اقلیمی، هیدرولوژیک، زمین‌شناختی، توپوگرافیک و محیطی و جمع‌آوری شواهد سیل در دوره گذشته، با استفاده از یک مدل یادگیری ماشین با بهره‌گیری از مجموعه‌ای از روابط غیرخطی و منعطف (FDA)، نقشه استعداد سیل‌گیری تهیه شد. دستاوردهای این پژوهش نشان داد که عرصه‌هایی از حوزه آبخیز زرينه‌رود که پتانسیل زیاد و خیلی زیاد سیل‌گیری دارند از اندرکنش عرصه‌های کم‌شیب و هموار، سازندها و خاک‌هایی با نفوذ پایین و شبکه زهکشی متراکم شکل گرفته‌اند و بخش‌های شمالی، شمال‌غربی و جنوب‌شرقی حوزه آبخیز را شامل می‌شوند. انتخاب بهینه عوامل مؤثر با توزیع مکانی نامتجانس و حاوی اطلاعات متغیر در سطح حوزه آبخیز برای مدل، انتخاب بهینه مقادیر متغیرهای ورودی از جمله درصد ارجحیت شواهد حضور بر عدم حضور و انتخاب صحیح روش رگرسیونی منتج به تولید نتایج مدل با قدرت پیش‌بینی و تعمیم نتایج فوق‌العاده و عاری از هرگونه شانس گشته که توسط دو شاخص AUROC و TSS تأیید شد. در نهایت، تخصیص اقدامات مدیریتی سخت از جمله برنامه‌های مهندسی و کنترلی (سازه‌ای) در مناطقی با استعداد سیل‌گیری زیاد و خیلی زیاد و اقدامات مدیریتی نرم نظیر برنامه‌های بیولوژیک و آموزشی در عرصه‌هایی با استعداد متوسط و کم پیشنهاد می‌شود. همچنین، استفاده از مدل FDA در مدیریت سیلاب حوزه آبخیز زرينه‌رود و مناطق با سازوکار تولید سیلاب مشابه پیشنهاد می‌شود.

سپاسگزاری

مقاله حاضر بر اساس بخشی از نتایج پروژه پژوهشی مصوب پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری (کد مصوب ۰۰۰۸۷۰-۰۴۳-۲۹-۵۳-۲۴) که از طرف صندوق حمایت از پژوهش‌گران و فناوران کشور (INSF) با شماره طرح ۹۹۰۱۷۴۴۳ تأمین اعتبار شده، تدوین گشته است. علاوه بر این، از حمایت‌های مرکز پژوهش و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی، سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری، اداره کل راهداری و حمل و نقل جاده‌ای، ستاد بحران استانداری و جمعیت هلال احمر استان کردستان برای در اختیار قرار دادن اطلاعات و داده‌های سیل و اجرای پروژه قدردانی می‌شود.

این عرصه‌ها به‌عنوان مناطق پرخطر باید در اولویت اول اقدامات مدیریتی جبرانی و مهندسی-کنترلی (سازه‌ای) باشد. در مقابل، طبقه‌های استعداد متوسط، کم و خیلی کم برای اختصاص اقدامات مدیریتی نرم، پیش‌گیرانه و بیولوژیک مناسب‌تر هستند. همچنین، پیش از رخداد وقایع تاریخی سیلاب، بایستی با تکیه بر شکل ۵، برای به‌گزینی و انتخاب گزینه‌های بعدی سکونت جوامع محلی از عرصه‌های کم‌خطر و با استعداد سیل‌گیری پایین استفاده نمود (گزینه جابه‌جایی یا Relocation).

۳-۲- ارزیابی کارایی مدل تحلیل تفکیک‌کننده انعطاف‌پذیر طبق طبقه‌بندی (Rahmati et al. (2017)، طبقه‌های عملکرد مدل بر اساس شاخص AUROC را می‌توان به پنج طبقه کیفی ضعیف (۰/۶ - ۰/۵)، متوسط (۰/۷ - ۰/۶)، خوب (۰/۸ - ۰/۷)، خیلی خوب (۰/۹ - ۰/۸) و عالی (۱ - ۰/۹) طبقه‌بندی نمود. طبقه‌بندی مشابهی برای شاخص TSS نیز قابل اعمال است. بر اساس جدول ۳، مدل FDA بر اساس شاخص AUROC عملکرد عالی و بر اساس شاخص TSS عملکرد خیلی خوب داشته که تفسیرهای پیشین بر کارایی زیاد مدل و قدرت پیش‌بینی و توانایی تعمیم نتایج فوق‌العاده توسط مدل بر عرصه‌های جدید تأیید می‌کند. مقدار بالای شاخص TSS در نتایج مدل نشان می‌دهد که موفقیت ارائه شده توسط شاخص AUROC تصادفی نیست و در نتیجه انتخاب مناسب ورودی‌های مدل و عوامل مؤثر از بین تعداد زیادی از شاخص‌های اقلیمی، هیدرولوژیک، محیطی و مورفومتریک موجود، بهینه‌یابی مقادیر متغیرهای ورودی مدل و الگوریتم محاسباتی قدرتمند و غیرخطی مدل است. انتخاب مدل‌های دارای روابط غیرخطی به لحاظ تطابق با ماهیت فیزیکی و سازوکار وقوع پیچیده یک پدیده طبیعی آشفته نظیر سیل بیش از پیش نمود یافته و حائز اهمیت است. همچنین، ماهیت انعطاف‌پذیر مدل در انتخاب روابط رگرسیونی و امکان وزن‌دهی و تعیین ارجحیت شواهد حضور نسبت به شواهد عدم حضور، از قابلیت‌های ویژه مدل FDA به‌شمار می‌شود که بسیاری از مدل‌های یادگیری ماشین/عمیق از آن بی‌بهره‌اند (Hallgren et al., 2019). بنابراین، بر اساس موارد نتایج حاصله می‌توان این مدل را به‌عنوان یک ابزار مدیریتی قدرتمند در شرایط تصمیم‌گیری پیش از بحران در حوزه آبخیز زرينه‌رود و عرصه‌های مشابه به‌ویژه مناطق فاقد آمار تفصیلی بارانسنجی و هیدرومتری معرفی نمود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش وجود ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

امید رحمتی: مفهوم‌سازی، نگارش مقاله، جمع‌آوری داده، مدل‌سازی؛ آیدینگ کرنزادی: نگارش مقاله، ویرایش و بازبینی مقاله؛ بهرام چوبین: تحلیل، بررسی متن مقاله، بازبینی؛ ابوالفضل جعفری: بصری، ویرایش و بازبینی مقاله؛ عطا امینی: ویرایش و بازبینی مقاله.

منابع

براتی، غلامرضا، بداق جمالی، جواد، و ملکی، ناصر (۱۳۹۱). نقش واچرخندها در رخداد بارش‌های سنگین دهه اخیر غرب ایران.

پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی (پژوهش‌های جغرافیایی)،

doi:10.22059/jphgr.2012.29208.98-85, (۲)۴۴

تاجبخش فخرآبادی، سیدمحمد، و چزگی، جواد (۱۴۰۱). تأثیر عوامل

مورفومتری در اولویت‌بندی سیل‌خیزی زیرحوزه‌های آبخیز

شمال دشت بیرجند. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۳)،

doi:10.22098/mmws.2022.11855.1179.255-240

دستورانی، محمدتقی، وفایی، مسعود، و رستمی‌خلج، محمد (۱۴۰۱).

ارزیابی خطر سیلاب در پردیس دانشگاه فردوسی مشهد و ارائه

سناریوهای مدیریتی مربوطه با استفاده از مدل HEC-RAS.

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۳(۳)، ۲۲۵-۲۳۹.

doi:10.22098/mmws.2022.11815.1173

رجبی‌زاده، یوسف، ایوب‌زاده، سیدعلی، و ظهیری، عبدالرضا (۱۳۹۸).

بررسی سیل استان گلستان در سال ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ و ارائه

راه‌کارهای کنترل و مدیریت آن در آینده. *اکوهیدرولوژی*، ۶(۴)،

doi:10.22059/ije.2019.283004.1137.942-921

کاظمی، محمد، و جعفرپور، عاطفه (۱۴۰۱). شناسایی آستانه متغیرهای

تأثیرگذار بر پهنه‌های سیلاب با استفاده از تکنیک یادگیری

ماشین (مطالعه موردی: حوزه انتهایی کارون بزرگ). *مدل‌سازی*

و مدیریت آب و خاک، ۴(۱)، ۲۱۴-۲۳۲.

doi:10.22098/mmws.2023.12285.1220

References

- Abedi, R., Costache, R., Shafizadeh-Moghadam, H., & Pham, Q.B. (2022). Flash-flood susceptibility mapping based on XGBoost, random forest and boosted regression trees. *Geocarto International*, 37(19), 5479-5496. doi:10.1080/10106049.2021.1920636
- Allouche, O., Tsoar, A., & Kadmon, R. (2006). Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, 43(6), 1223-1232. doi:10.1111/j.1365-2664.2006.01214.x
- Arabameri, A., Seyed Danesh, A., Santosh, M., Cerda, A., Chandra Pal, S., Ghorbanzadeh, O., & Chowdhuri, I. (2022). Flood susceptibility mapping using meta-heuristic algorithms. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 13(1), 949-974. doi:10.1080/19475705.2022.2060138
- Arora, A., Pandey, M., Siddiqui, M.A., Hong, H., & Mishra, V.N. (2021). Spatial flood susceptibility prediction in Middle Ganga Plain: comparison of frequency ratio and Shannon's entropy models. *Geocarto International*, 36(18), 2085-2116. doi:10.1080/10106049.2019.1687594

- Barati, Gh., Bodagh Jamali, J., & Maleki, N. (2012). Anticyclones and heavy rainfalls over Western Iran. *Physical Geography Research Quarterly*, 44(2), 85-98. doi:10.22059/jphgr.2012.29208. [In Persian]
- Chapi, K., Singh, V.P., Shirzadi, A., Shahabi, H., Tien Bui, D., Pham, B.T., & Khosravi, K. (2017). A novel hybrid artificial intelligence approach for flood susceptibility assessment. *Environmental Modelling & Software*, 95, 229-245. doi:10.1016/j.envsoft.2017.06.012
- Derex, M. (2022). Human cumulative culture and the exploitation of natural phenomena. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 377(1843), 20200311. doi:10.1098/rstb.2020.0311
- Habibi, A., Delavar, M.R., Sadeghian, M.S., & Nazari, B. (2023). Flood susceptibility mapping and assessment using regularized random forest and NAÏVE bayes algorithms. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 10, 241-248. doi:10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-241-2023
- Hallgren, W., Santana, F., Low-Choy, S., Zhao, Y., & Mackey, B. (2019). Species distribution models can be highly sensitive to algorithm

- configuration. *Ecological Modelling*, 408, 108719. doi:10.1016/j.ecolmodel.2019.108719
- Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J.H., & Friedman, J.H. (2009). The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction (Vol. 2, pp. 1-758). New York: springer. doi:10.1007/978-0-387-21606-5
- Hong, H., Tsangaratos, P., Ilija, I., Liu, J., Zhu, A.X., & Chen, W. (2018). Application of fuzzy weight of evidence and data mining techniques in construction of flood susceptibility map of Poyang County, China. *Science of the Total Environment*, 625, 575-588. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.12.256
- Karim, F., Armin, M.A., Ahmedt-Aristizabal, D., Tychsen-Smith, L., & Petersson, L. (2023). A review of hydrodynamic and machine learning approaches for flood inundation modeling. *Water*, 15(3), 566. doi:10.3390/w15030566
- Kazemi, M., & Jafarpour, A. (2022). Identifying the threshold of variables affecting flood zone using machine learning technique (Case study: Karun basin). *Water and Soil Management Modeling and* [In Persian] doi:10.22098/mmws.2023.12285.1220.
- Moazzam, M.F.U., Lee, B.G., Rahman, A.U., Farid, N., & Rahman, G. (2020). Spatio-statistical analysis of flood susceptibility assessment using bivariate model in the floodplain of river swat, district charsadda, Pakistan. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 8(5), 159. doi:10.4236/gep.2020.85010
- Newson, M., Lewin, J., & Raven, P. (2022). River science and flood risk management policy in England. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 46(1), 105-123. doi:10.1177/03091333211036384
- Pontius Jr, R.G., & Schneider, L.C. (2001). Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85(1-3), 239-248. doi:10.1016/S0167-8809(01)00187-6
- Pourghasemi, H.R., Pouyan, S., Bordbar, M., Golkar, F., & Clague, J.J. (2023). Flood, landslides, forest fire, and earthquake susceptibility maps using machine learning techniques and their combination. *Natural Hazards*, 1-20. doi:10.1007/s11069-023-05836-y
- Prasad, P., Loveson, V.J., Das, B., & Kotha, M. (2022). Novel ensemble machine learning models in flood susceptibility mapping. *Geocarto International*, 37(16), 4571-4593. doi:10.1080/10106049.2021.1892209
- 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. doi:10.1080/10106049.2015.1041559
- Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H.R., & Feizizadeh, B. (2017). Evaluation of different machine learning models for predicting and mapping the susceptibility of gully erosion. *Geomorphology*, 298, 118-137. doi:10.1016/j.geomorph.2017.09.006
- Rajabzadeh, Y., Ayyoubzadeh, S.A., & Zahiri, A. (2019). Flood survey of Golestan Province in 2018-2019 and providing solutions for its control and management in the future. *Ecohydrology*, 6(4), 921-942. doi:10.22059/ije.2019.283004.1137. [in Persian]
- Samanta, S., Pal, D.K., & Palsamanta, B. (2018). Flood susceptibility analysis through remote sensing, GIS and frequency ratio model. *Applied Water Science*, 8(2), 66. doi:10.1007/s13201-018-0710-1
- Seleem, O., Ayzel, G., de Souza, A.C.T., Bronstert, A., & Heistermann, M. (2022). Towards urban flood susceptibility mapping using data-driven models in Berlin, Germany. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 13(1), 1640-1662. doi:10.1080/19475705.2022.2097131
- Shafapour Tehrany, M., & Kumar, L. (2018). The application of a Dempster-Shafer-based evidential belief function in flood susceptibility mapping and comparison with frequency ratio and logistic regression methods. *Environmental Earth Sciences*, 77, 1-24. doi:10.1007/s12665-018-7667-0
- Shafapour Tehrany, M., Shabani, F., Neamah Jebur, M., Hong, H., Chen, W., & Xie, X. (2017). GIS-based spatial prediction of flood prone areas using standalone frequency ratio, logistic regression, weight of evidence and their ensemble techniques. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 1538-1561. doi:10.1080/19475705.2017.1362038
- Tajbakhsh, S.M., & Chezgi, J. (2022). Prioritization of flooding sub-basins in the north of the Birjand Plain using morphometric factors and VIKOR model. *Water and Soil Management Modeling and* [In Persian] doi:10.22098/mmws.2022.11855.1179.

- Vafaei, M., Dastorani, M.T., & Rostami Khalaj, M. (2023). Flood risk assessment in campus of Ferdowsi University of Mashhad and presentation management scenarios using HEC-RAS model. *Water and Soil Management and Modeling*, 3(3), 225-239. doi:10.22098/mmws.2022.11815.1173. [In Persian]
- Wubalem, A., Tesfaw, G., Dawit, Z., Getahun, B., Mekuria, T., & Jothimani, M. (2020). Comparison of statistical and analytical hierarchy process methods on flood susceptibility mapping: in a case study of Tana sub-basin in northwestern Ethiopia. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 1-43. doi:10.1515/geo-2020-0329
- Youssef, A.M., Pourghasemi, H.R., & El-Haddad, B. A. (2022). Advanced machine learning algorithms for flood susceptibility modeling—performance comparison: Red Sea, Egypt. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(44), 66768-66792. doi: 10.1007/s11356-022-20213-1
- Youssef, A.M., Pourghasemi, H.R., Mahdi, A.M., & Matar, S.S. (2023). Flood vulnerability mapping and urban sprawl suitability using FR, LR, and SVM models. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(6), 16081-16105. doi:10.1007/s11356-022-23140-3