

Flood Hazard Zoning Using Hydrogeomorphological Data and Machine Learning Models in the Gorganrud Watershed

Narges Javidan^{1*}, Ataollah Kavian²

Received: 02-05-2026, Revised 19-05-2026, Accepted: 20-05-2026, Published: 23-05-26

<https://doi.org/10.22034.20.72.1>

Extended Abstract

Introduction

Floods are among the most destructive natural hazards globally, and their frequency and intensity have increased significantly in Iran, particularly in Golestan Province. The Gorganrud watershed has experienced devastating floods due to extensive land-use changes, deforestation, and climatic variability. Accurate spatial prediction of flood-prone areas is essential for effective land-use planning and risk mitigation. While machine learning (ML) models such as Random Forest (RF) and Maximum Entropy (ME) have been widely used for flood susceptibility mapping, most previous studies have evaluated model performance using a single random split of flood inventory data. This approach fails to assess model robustness the stability of predictions under different training/validation datasets. A model may achieve high accuracy on one split but perform poorly on another, rendering it unreliable for operational decision-making. The novelty of this study lies in: (1) systematically evaluating both predictive accuracy and robustness of RF and ME models using three distinct random data splits; (2) introducing a robustness index based on AUC variability where lower values indicate higher stability; and (3) producing a final flood susceptibility map for the Gorganrud watershed from the average of three model runs. The specific objectives are to: (i) zone flood probability using RF and ME; (ii) compare model accuracy and robustness; and (iii) identify key environmental drivers of flooding. This multi-split framework addresses a critical gap in flood susceptibility literature and provides a more reliable approach for watershed management in data-sparse regions.

Methodology

The Gorganrud watershed (10,197 km²) is located in Golestan Province, northeastern Iran, with elevations ranging from -20 to 3652 m and mean annual rainfall between 348–810 mm. A flood inventory map was prepared using 127 flood occurrence points derived from field surveys, local reports, and regional water authority data. To assess model robustness, three independent datasets (S1, S2, and S3) were randomly created, each containing 70% of points for training and 30% for validation. Nineteen predictive environmental factors were selected based on a comprehensive literature review: distance to stream, lithology, slope percentage, soil texture, aspect, land use, profile curvature, plan curvature, topographic wetness index (TWI), stream power index (SPI),

1.*Corresponding Author, Narges javidan: Ph.D. of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University. Iran, Narges.javidan20@gmail.com.

2. Ataollah Kavian: Professor, Department of Watershed Management, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Address: Sari, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Faculty of Natural Resources, Watershed Management Department, Sari, Iran.

drainage density, annual rainfall, and elevation (DEM). All layers were rasterized at 30×30 m resolution in ArcGIS 10.5 and SAGA GIS. Multicollinearity was checked using Tolerance and Variance Inflation Factor (VIF) indices in SPSS, confirming no significant collinearity among predictors (Tolerance > 0.1, VIF < 10). The Random Forest model was implemented in R using the random Forest package with 500 trees and default **mtry** parameters. The Maximum Entropy model was run in MaxEnt software with default settings and 10,000 background points. Model performance was evaluated using the Area Under the Receiver Operating Characteristic curve (AUC-ROC). Robustness was quantified across the three datasets as the standard deviation of AUC values, where lower values indicate higher stability. Variable importance was assessed using the Jackknife test in MaxEnt.

Results and discussion

Both models demonstrated excellent predictive performance. In the validation phase, RF achieved AUC values of 0.95, 0.97, and 0.98 for S1, S2, and S3, respectively, with a mean AUC of 0.967. ME achieved AUC values of 0.936, 0.955, and 0.935, with a mean AUC of 0.942. While both models exceeded the excellent threshold (AUC > 0.90), RF consistently outperformed ME across all three data splits. The robustness index, calculated as the standard deviation of AUC values across the three splits, was 0.001 for RF (values: 0.95, 0.97, 0.98) compared to 0.008 for ME (values: 0.936, 0.955, 0.935). This substantially lower value indicates that RF provides significantly more stable predictions regardless of the random data split used for training. The final mean flood susceptibility map, classified using the natural breaks method, showed that approximately 15% (RF) and 22.7% (ME) of the watershed fell into high and very high flood hazard classes. High-risk areas were predominantly located in low-slope regions near river networks. Variable importance analysis revealed that distance to stream (49.4%), drainage density (15.2%), and lithology (10.8%) were the most influential factors. Response curves showed that flood probability increases sharply when distance to stream decreases below 500 m and drainage density exceeds 2.5 km/km². The lithological analysis identified Quaternary alluvial formations (Qsw) as the most susceptible due to low cohesion and permeability.

Conclusion

The superior robustness of RF (robustness index = 0.001) compared to ME (0.008) represents a critical advantage for operational flood mapping where training data composition may vary due to incomplete historical inventories or sampling biases. This study demonstrates that evaluating models using a single data split can mask substantial instability; ME's AUC ranged from 0.935 to 0.955 across splits, a variation that could change management decisions. The systematic evaluation using three independent splits confirmed that RF predictions are less sensitive to training data variations, a critical property for real-world applications with incomplete flood records. The key environmental drivers identified distance to streams (49.4% contribution), drainage density (15.2%), and lithology (10.8%) imply that flood mitigation efforts should prioritize regulating construction near river networks (especially within 500 m buffers) and managing surface runoff in areas with drainage density exceeding 2.5 km/km². Approximately 15–23% of the watershed is classified as high to very high flood hazard, requiring immediate attention from land-use planners and civil defense authorities. This study confirms that both models are highly effective (AUC > 0.93), but RF is recommended as the superior method due to its higher accuracy (up to 98% validation AUC) and substantially greater robustness. The final ensemble map provides a reliable decision-support tool for sustainable development, infrastructure planning, and natural resource conservation in Golestan Province. Future work should incorporate hydrological time-series data and climate change scenarios to enhance dynamic flood forecasting under non-stationary conditions.

Keywords: *Flood susceptibility, Random Forest, Maximum Entropy, Model robustness, Gorganrud watershed, Golestan Province, GIS-based modeling*

Article Type: Research Article

Acknowledgement:

We gratefully acknowledge the Iranian Water Resources Research Organization (IWRO) and the Golestan Province Regional Water Authority for their valuable cooperation and for providing essential data and facilities. We also extend our sincere appreciation to the University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, and Shiraz University for their technical support. The authors thank the journal's editors and anonymous reviewers for their constructive feedback, which significantly improved the quality of this article.

Conflicts of interest:

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data Availability Statement:

The datasets generated and/or analyzed during the current study, including flood inventory points and environmental factor layers, are available from the corresponding author upon reasonable request.

Authors' contribution:

All authors reviewed and approved the final manuscript. Individual contributions were as follows:

Narges Javidan: Conceptualization, Methodology, Data curation, Formal analysis, Investigation, Software, Writing – original draft, Writing – review & editing.

Ataollah Kavian: Supervision, Validation, Project administration, Resources, Writing – review & editing.

Citation: Javidan N, Kavian A. Flood Hazard Zoning Using Hydrogeomorphological Data and Machine Learning Models in the Gorganrud Watershed. jwmseir 2026; 20 (72) : 1-12

Iran-Watershed Management Science & Engineering, Year 2026, , Vol 20, No 72, PP 1-12

Publisher: Watershed Management Society of Iran



پهنه‌بندی خطر سیلاب با استفاده از داده‌های هیدروژئومورفولوژی و مدل‌های یادگیری ماشین در حوزه آبخیز گرگانرود

نرگس جاویدان^{۱*}، عطاءاله کاویان^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۲، تاریخ داوری: ۱۴۰۵/۰۲/۲۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۳۰، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۰۲

<https://doi.org/10.22034.20.72.1>

چکیده

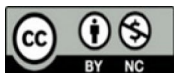
هدف از پژوهش حاضر، پهنه‌بندی احتمال وقوع سیلاب در حوزه آبخیز گرگانرود واقع در استان گلستان با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین است. پهنه‌بندی دقیق مناطق پرخطر سیلاب با روش‌های نوینی همچون یادگیری ماشین، می‌تواند به مدیریت بهینه ریسک و کاهش خسارات ناشی از سیل کمک شایانی نماید. بدین منظور، دو مدل شناخته‌شده و پرکاربرد جنگل تصادفی و بیشینه آنتروپی به عنوان روش‌های بنچمارک با قابلیت محاسباتی بالا برای ارزیابی فرآیند وقوع سیلاب انتخاب شدند. نقشه پراکنش سیلاب با استفاده از بازبینی میدانی، گزارش‌های سازمانی و ثبت ۱۲۷ نقطه وقوع سیل در سامانه اطلاعات جغرافیایی تهیه شد. همچنین بر اساس مرور جامع منابع، تعداد ۱۹ عامل محیطی مؤثر شامل فاصله از آبراهه، سنگ‌شناسی، درصد شیب، بافت خاک، جهت شیب، کاربری اراضی، انحنا طولی و عرضی دامنه، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص قدرت جریان، تراکم زهکشی، بارندگی سالانه و طبقات ارتفاعی انتخاب و لایه‌های اطلاعاتی مربوطه در سامانه اطلاعات جغرافیایی آماده شدند. به منظور ارزیابی دقت و پایداری مدل‌ها، سه مجموعه داده متفاوت از نقاط وقوع سیل (S1، S2، S3) شامل ۷۰ درصد نقاط برای آموزش و ۳۰ درصد برای اعتبارسنجی به صورت تصادفی تهیه شد. ارزیابی نتایج مدل‌ها با استفاده از سطح زیر منحنی مشخصه عملکرد نسبی انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد که نقشه میانگین حاصل از مدل جنگل تصادفی در مرحله اعتبارسنجی با سطح زیر منحنی ۹۶ درصد و مقدار پایداری ۰/۰۰۱، از کارایی عالی در پهنه‌بندی سیلاب حوضه مورد مطالعه برخوردار است. در مقابل، مدل بیشینه آنتروپی دقت ۹۴ درصد و پایداری ۰/۰۰۸ را نشان داد. همچنین تحلیل درجه اهمیت متغیرها نشان داد که عوامل فاصله از جریان (حدود ۴۹ درصد اهمیت) و تراکم زهکشی (حدود ۱۵ درصد اهمیت) به عنوان مهم‌ترین عوامل محیطی مؤثر بر سیل‌گیری منطقه مورد مطالعه شناسایی شدند. به طور کلی، مدل جنگل تصادفی به دلیل دقت بالاتر و پایداری بیشتر، به عنوان مدل برتر در پهنه‌بندی سیلاب حوضه آبخیز گرگانرود معرفی می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: استان گلستان، جنگل تصادفی، سیل، پایداری مدل

نوع مقاله: پژوهشی

استناد: جاویدان نرگس، کاویان عطاءاله. پهنه‌بندی خطر سیلاب با استفاده از داده‌های هیدروژئومورفولوژی و مدل‌های یادگیری ماشین در حوزه آبخیز گرگانرود. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۱۴۰۵؛ ۷۲(۲۰): ۱-۱۲

علوم و مهندسی آبخیزداری ایران سال ۱۴۰۵، دوره ۲۰، شماره ۷۲، ۱-۱۲



ناشر: انجمن آبخیزداری ایران

*۱- نویسنده مسئول و دانش‌آموخته دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران، مسئول مکاتبات، ایمیل: Narges.javidan20@gmail.com
۲- استاد گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری نشانی: ساری - دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری - دانشکده منابع طبیعی - گروه آبخیزداری، ساری، ایران

مقدمه

سیل به عنوان یکی از مخرب‌ترین بلایای طبیعی در دهه‌های اخیر، خسارات فراوانی به ویژه در مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب ایران وارد کرده است. آمارها نشان می‌دهد که تعداد وقوع سیل در دهه ۸۰ نسبت به دهه ۴۰ حدود ۱۰ برابر افزایش یافته است [۲]. پیش‌بینی مکانی رخداد سیلاب از طریق مدل‌سازی داده‌محور و تهیه نقشه‌های حساسیت‌پذیری، مناسب‌ترین راهکار برای برنامه‌ریزی مدیریت اراضی در حوزه‌های آبخیز به منظور پیشگیری و کاهش خسارات محسوب می‌شود [۱۶].

اخیراً، مدل‌های یادگیری ماشین به دلیل توانایی بالا در شناسایی الگوهای پیچیده بین متغیرهای محیطی و وقوع سیل، به طور گسترده مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. مطالعات متعددی در داخل و خارج از ایران با استفاده از مدل‌های مختلف از جمله جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان، بیشینه‌ی آنتروپی، رگرسیون لجستیک و روش‌های مبتنی بر فراوانی نسبی انجام شده است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات [۳، ۶، ۸، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۱، ۲۲] اشاره می‌شود.

مرور دقیق پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که اگرچه مدل‌های جنگل تصادفی (RF) و بیشینه آنتروپی (ME) به عنوان روش‌های کارآمد برای مدل‌سازی خطر سیل شناخته شده‌اند، اما بیشتر این مطالعات صرفاً به ارزیابی دقت مدل با استفاده از یک مجموعه داده ثابت از نقاط وقوع سیل اکتفا کرده و کمتر به ارزیابی پایداری و صداقت^۱ مدل در برابر تغییرات مجموعه داده‌های ورودی پرداخته‌اند. به عبارت دیگر، در بسیاری از پژوهش‌های قبلی، تأثیر تغییر نقاط آموزش و اعتبارسنجی بر عملکرد نهایی مدل به طور سیستماتیک بررسی نشده است. نوآوری و تمایز این پژوهش نسبت به مطالعات پیشین در چند جنبه کلیدی نهفته است، بر خلاف اکثر مطالعات پیشین که تنها یک بار تقسیم‌بندی تصادفی نقاط وقوع را انجام داده‌اند، در این پژوهش سه سری متفاوت از نقاط سیل با نسبت ۷۰ درصد آموزش و ۳۰ درصد اعتبارسنجی به صورت تصادفی آماده شد. این رویکرد امکان ارزیابی دقیق‌تر و واقع‌بینانه‌تر عملکرد مدل‌ها را فراهم می‌آورد. در حالی که اغلب تحقیقات قبلی صرفاً بر شاخص سطح زیر منحنی (AUC) برای سنجش دقت مدل تأکید داشته‌اند، مطالعه حاضر علاوه بر AUC، معیار پایداری مدل را نیز با استفاده از اختلاف حداکثر و حداقل مقایسه عادلانه‌تر مدل‌ها از نظر حساسیت به تغییرات داده‌های ورودی را فراهم می‌سازد. همچنین، حوزه آبخیز گرگانرود در استان گلستان به دلیل تغییرات گسترده کاربری اراضی (به ویژه جنگل‌زدایی و توسعه شهری) و تغییرات اقلیمی، یکی از مناطق بسیار مستعد وقوع سیلاب در کشور محسوب می‌شود. با وجود این، مطالعه جامعی که با رویکرد ارزیابی پایداری مدل در این حوزه انجام شده باشد، تاکنون گزارش نشده

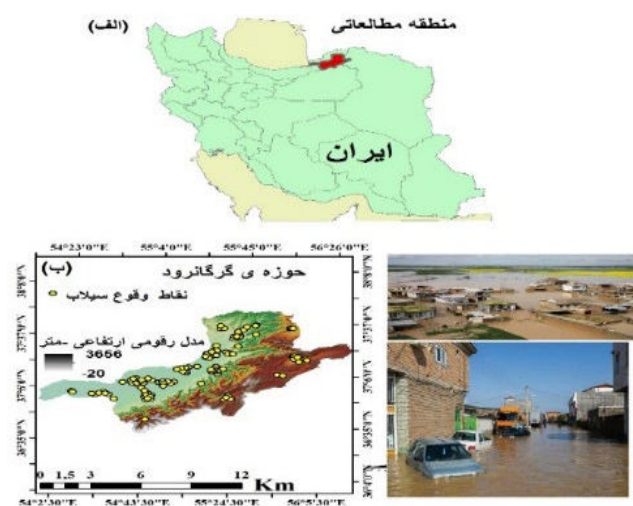
است. از طرفی، در این پژوهش، نقشه نهایی حساسیت به سیلاب از میانگین سه نقشه حاصل از سه مجموعه داده متفاوت محاسبه شده است که این روش نسبت به استفاده از یک مجموعه داده تصادفی، نتایج قابل اعتمادتری ارائه می‌دهد.

با توجه به موارد فوق، اهداف اصلی پژوهش حاضر عبارتند از: (۱) پهنه‌بندی احتمال وقوع سیلاب در حوزه آبخیز گرگانرود با استفاده از مدل‌های جنگل تصادفی و بیشینه آنتروپی (۲) ارزیابی دقت و پایداری دو مدل مذکور با استفاده از سه مجموعه داده متفاوت و (۳) تعیین مهم‌ترین عوامل محیطی مؤثر بر وقوع سیلاب در منطقه مورد مطالعه به منظور ارائه راهکارهای مدیریتی مؤثر.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز گرگانرود در استان گلستان در بخش شمال شرقی ایران واقع شده است. مساحت این منطقه ۱۰۱۹۷ کیلومترمربع است که در محدوده عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۱۵ دقیقه شرقی و طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۵ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۸ دقیقه شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). منطقه مورد مطالعه به دلیل تغییرات کاربری اراضی از جمله جنگل‌زدایی و توسعه بی‌رویه، در سال‌های اخیر به شدت تحت تأثیر وقوع سیل قرار گرفته است. تسریع خطر سیل در این منطقه، عمدتاً ناشی از فعالیت‌های غیرمسئولانه انسانی مانند جنگل‌زدایی و توسعه بی‌رویه ایجاد شده است. از نظر توپوگرافیکی میانگین ارتفاع این منطقه بین ۲۰- تا ۳۶۵۲ متر است. میانگین میزان بارش سالانه تقریباً بین ۳۴۸- تا ۸۱۰ میلی متر است. متوسط حداقل و حداکثر دما به ترتیب ۱۱ و ۱۸/۵ درجه سانتی‌گراد است.



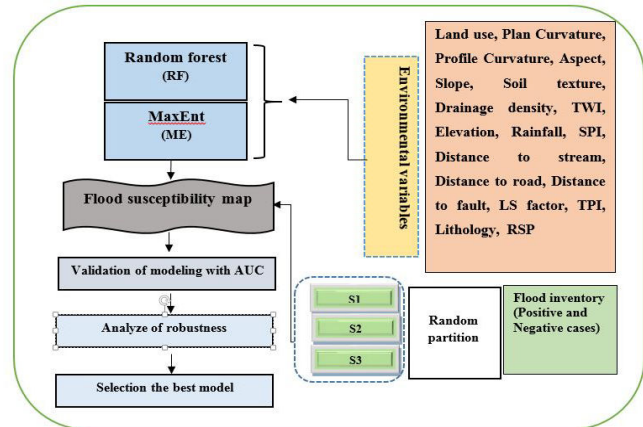
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Fig. 1. Geographical location of the study area

در این پژوهش، پس از تهیه نقشه پراکنش سیل و انتخاب ۱۹ عامل پیش‌بینی‌کننده، از مدل‌های جنگل تصادفی (RF) و بیشینه آنتروپی

1. Robustness

(ME) برای پهنه‌بندی استفاده شد. در نهایت، عملکرد مدل‌ها بر اساس شاخص AUC و معیار پایداری ارزیابی شد. نمودار جریانی مراحل انجام تحقیق در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲- نمودار جریانی مراحل تحقیق

Fig.2. Flowchart of the research steps

تهیه نقشه پراکنش سیلاب و عوامل کنترل کننده پیش‌بینی کننده خطر سیل

تعداد ۱۲۷ نقطه وقوع سیلاب با استفاده از بازدیدهای میدانی، گزارش‌های محلی و داده‌های اداره آب منطقه‌ای استان گلستان ثبت و در سامانه اطلاعات جغرافیایی آماده شد. قابلیت اطمینان این نقاط با تطابق متقابل سه منبع مستقل (بازدید میدانی، گزارش‌های اداره آب منطقه‌ای، و مطالعات پیشین معتبر) تأیید شد. این نقاط به روش تقسیم تصادفی به سه مجموعه مجزا (S1، S2، S3) تقسیم شدند که هر مجموعه شامل ۷۰ درصد نقاط برای آموزش مدل و ۳۰ درصد برای اعتبارسنجی است.

بر اساس مرور منابع، ۱۹ عامل محیطی مؤثر بر سیلاب انتخاب و به صورت لایه‌های رستری با اندازه سلول ۳۰×۳۰ متر در نرم‌افزارهای ArcGIS 10.5 و SAGA تهیه شدند. به منظور بررسی هم‌خطی میان متغیرهای محیطی، شاخص‌های تحمل (Tolerance) و عامل تورم واریانس (VIF) محاسبه شد. تمام متغیرها دارای مقادیر $Tolerance > 0.1$ و $VIF < 5$ بودند که نشان‌دهنده عدم وجود هم‌خطی معنادار بین متغیرها است بر این اساس، تمام ۱۹ متغیر برای مدل‌سازی استفاده شدند.

مدل رقومی ارتفاعی، درصد شیب، جهت شیب، کاربری اراضی، انحنای طولی دامنه، انحنای عرضی دامنه، بافت خاک، شاخص موقعیت توپوگرافی، شاخص رطوبت توپوگرافیکی، فاصله از شبکه آبراهه، تراکم زهکشی، بارش سالانه، شاخص قدرت جریان، موقعیت شیب نسبی، شاخص زبری سطح، سنگ‌شناسی، فاکتور طول شیب، فاصله از جاده، فاصله از گسل.

پیش از مدل‌سازی، آزمون هم‌خطی با استفاده از شاخص‌های

تحمل (Tolerance) و عامل تورم واریانس (VIF) در نرم‌افزار SPSS انجام شد که عدم وجود هم‌خطی بین متغیرها را تأیید نمود. نقشه‌های مربوط به فاکتورهای کنترل‌کننده (لایه‌های پیش‌بینی‌کننده) در شکل ۳ ارائه شده است.

مدل‌های مورد استفاده

مدل جنگل تصادفی^۲ (RF): یک روش مبتنی بر درخت تصمیم که با ترکیب نتایج درخت‌های مختلف، رابطه بین عوامل محیطی و وقوع سیل را برآورد می‌کند [۲۰]. اجرای مدل در نرم‌افزار R و با استفاده از پکیج randomForest انجام شد که در آن تعداد درختان (ntree) برابر ۵۰۰، تعداد متغیرهای امتحان شده در هر گره (mtry) برابر ریشه مربعی تعداد کل متغیرها، و حداقل اندازه گره نهایی (nodesize) برابر یک در نظر گرفته شد.

مدل بیشینه آنتروپی^۳ (ME): مدلی است که فقط به نقاط وقوع سیل نیاز داشته و نیازی به نقاط عدم وقوع ندارد. این مدل با اصل بیشینه آنتروپی، توزیع احتمال وقوع سیل را تخمین می‌زند [۱۰]. اجرای مدل در نرم‌افزار MaxEnt (نسخه ۳.۴.۴) با حداکثر ۵۰۰۰ تکرار، حداکثر ۱۰,۰۰۰ نقطه زمینه (اندراکنش)، و آستانه همگرایی 5-510-10 انجام شد. همچنین آزمون جک‌نایف^۴ برای تعیین میزان اهمیت و مشارکت هر یک از متغیرهای محیطی استفاده شد.

ارزیابی عملکرد پیش‌بینی

برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها از شاخص سطح زیر منحنی مشخصه عملکرد نسبی (AUC-ROC) استفاده شد. همچنین به منظور بررسی تأثیر تغییر مجموعه داده‌ها بر پایداری مدل، مقدار ربوستنس مدل از اختلاف بیشترین و کمترین AUC در سه مجموعه داده (S1، S2، S3) محاسبه شد.

$$R_{AUC-ROC} = AUC-ROC_{max} - AUC-ROC_{min} \quad (1)$$

که RAUC-ROC، پایداری و صحت مدل است که حاصل اختلاف بیشترین و کمترین مقدار RAUC-ROC است.

نتایج

اجرای مدل

پس از مدل‌سازی مکانی با استفاده از سه مجموعه داده آموزشی S1، S2 و S3، نقشه‌های پهنه‌بندی برای مدل‌های جنگل تصادفی (RF) و بیشینه آنتروپی (ME) تهیه شد (شکل ۴). نقشه نهایی با محاسبه میانگین سه نقشه حاصل از مجموعه‌های داده مختلف تهیه شد و سپس با استفاده از روش شکستن طبیعی^۵ به چهار کلاس کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شد [۴]. میانگین مقادیر احتمال وقوع سیل در مدل ME حدود ۲۴٪ تا ۲۵٪ و در مدل RF حدود

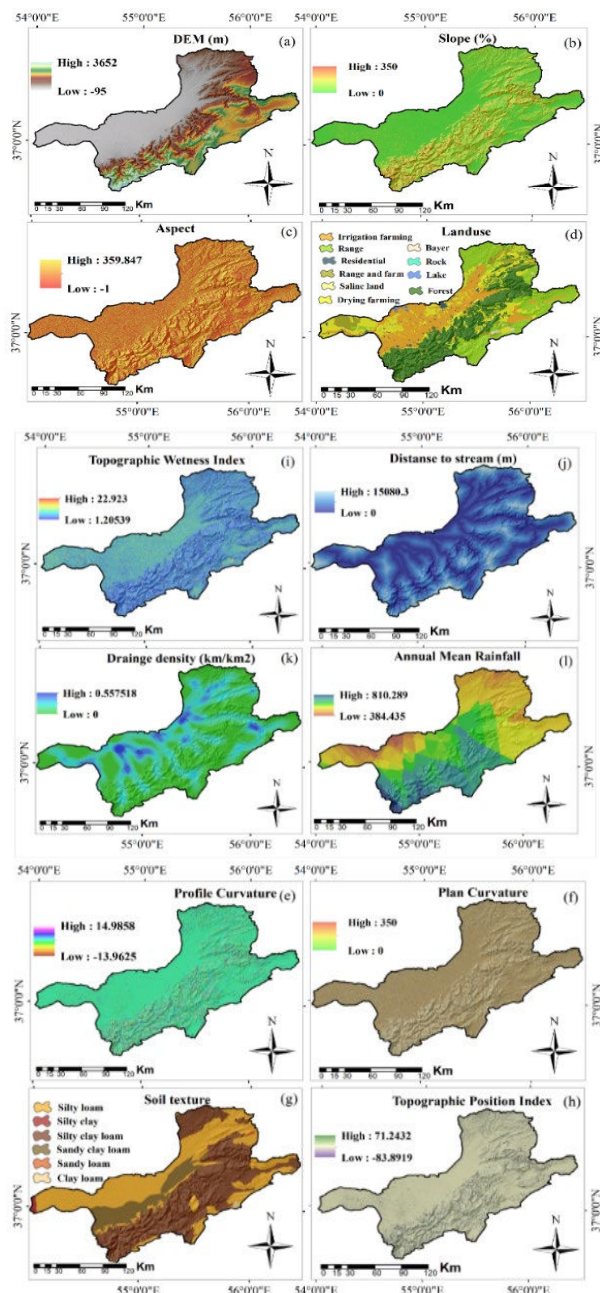
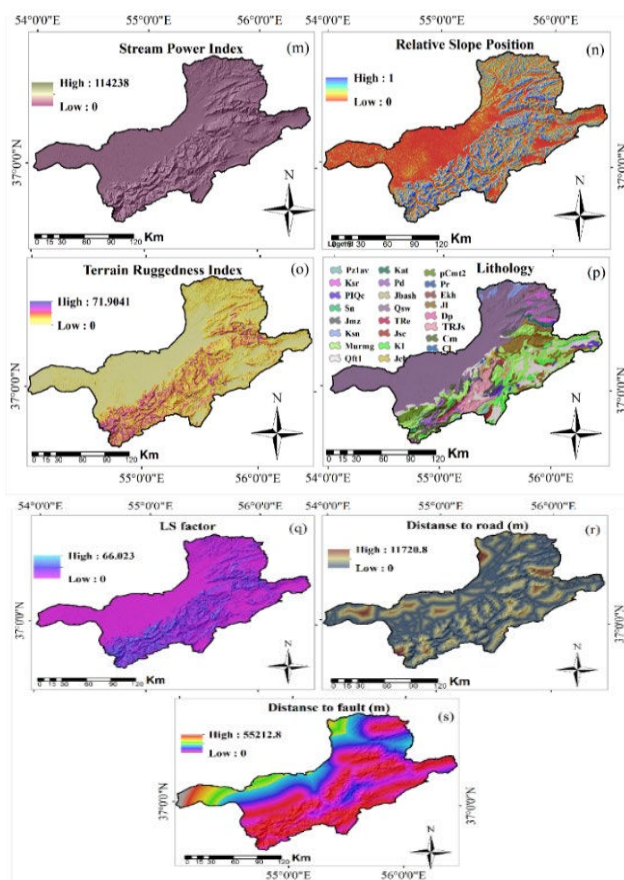
2. Random forest

3. Maximum entropy

4. Jackknife

5 Natural Break

1. Robustness



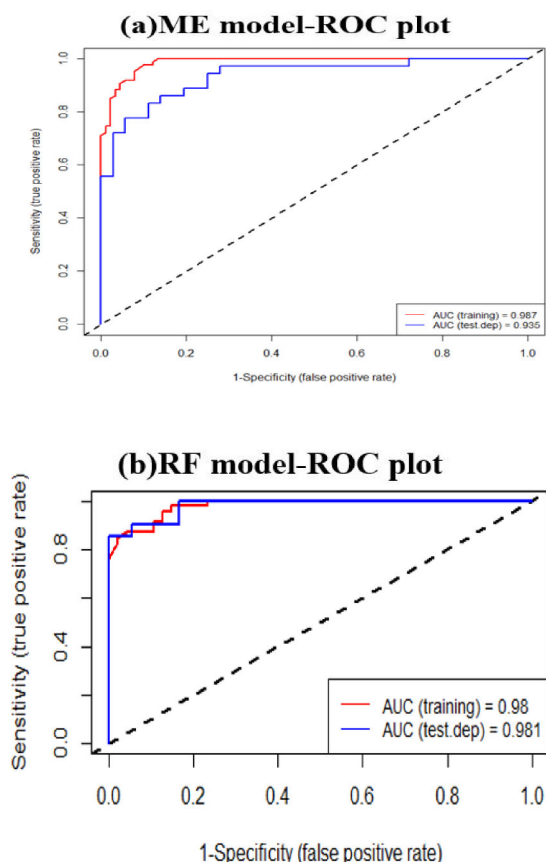
شکل ۳- لایه‌های پیش‌بینی کننده حساسیت پذیری: (الف) مدل رقومی ارتفاعی؛ (ب) درصد شیب؛ (پ) جهت شیب؛ (ت) کاربری اراضی؛ (ث) انحنای طولی دامنه؛ (ج) انحنای عرضی دامنه؛ (چ) بافت خاک؛ (ح) شاخص موقعیت توپوگرافی؛ (خ) شاخص رطوبت توپوگرافیکی؛ (د) فاصله از شبکه آبراهه؛ (ذ) تراکم زهکشی؛ (ر) بارش سالانه؛ (ز) شاخص قدرت جریان؛ (ژ) موقعیت شیب نسبی؛ (س) شاخص زبری سطح؛ (ش) سنگ‌شناسی؛ (ص) فاکتور طول شیب؛ (ض) فاصله از جاده؛ (ط) فاصله از گسل

Fig.3. Predictive layers for flood susceptibility mapping: (a) Digital Elevation Model (DEM); (b) Slope percentage; (c) Aspect; (d) Land use/land cover; (e) Profile curvature; (f) Plan curvature; (g) Soil texture; (h) Topographic Position Index (TPI); (i) Topographic Wetness Index (TWI); (j) Distance to drainage network; (k) Drainage density; (l) Annual rainfall; (m) Stream Power Index (SPI); (n) Relative slope position; (o) Surface Roughness Index; (p) Lithology; (q) Slope length factor (LS-Factor); (r) Distance to road; (s) Distance to fault.

حالی که مدل ME این میزان را ۲۲/۷ درصد برآورد کرد.

۰/۱۵ تا ۰/۱۸ به‌دست آمد (جدول ۱). بر اساس مدل RF، حدود ۱۵ درصد از منطقه در کلاس خطر زیاد و خیلی زیاد قرار گرفت، در

تا ۰/۹۸ و مدل ME با مقادیر بین ۰/۹۳۵ تا ۰/۹۵۵ عملکرد عالی داشت. تطابق خوب نقاط سیلاب مشاهداتی با نقشه‌های خروجی، صحت نتایج را تأیید می‌کند. شکل ۵ نمودار منحنی ROC را برای مجموعه S3 برای هر دو مدل نشان می‌دهد. مقدار پایداری در مدل RF (۰/۰۰۱) کمتر از مدل ME (۰/۰۰۸) به دست آمد که نشان‌دهنده پایداری بالاتر مدل RF در برابر تغییر مجموعه داده‌هاست (شکل ۶).

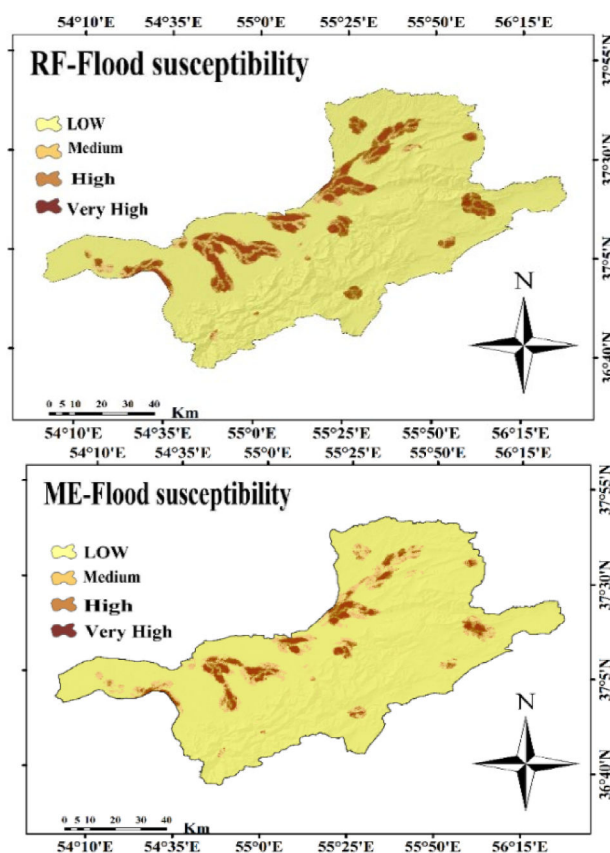


شکل ۵ - منحنی ROC برای نسبت S3 (الف) مدل پیشینه‌ی آنتروپی، (ب) مدل جنگل تصادفی

Fig.5. ROC curve for S3 ratio (a) Maximum Entropy model, (b) Random Forest model

جدول ۲ - نتایج ارزیابی مدل
Table 2 – Model evaluation results

AUC-ROC	Data set	مدل	ME
	مجموعه داده	RF	
Training آموزش	s1	0.997	0.970
	s2	0.998	0.971
	s3	0.988	0.987
	s1	0.95	0.936
Validation اعتبارسنجی	s2	0.97	0.955
	S3	0.98	0.935



شکل ۴ - نقشه پهنه‌بندی حساسیت به سیل و توزیع نسبی طبقات پهنه‌بندی

Fig.4. Flood susceptibility zoning map and relative distribution of zoning classes.

جدول ۱- ویژگی‌های آماری پیش‌بینی احتمالاتی

Table 1. Statistical features of the probabilistic forecasting

Models	Data set	probability values	
		مقادیر احتمال	
مدل‌ها	مجموعه داده	Mean	St. dev.
ME	S1	0.241	0.235
	S2	0.251	0.237
	S3	0.250	0.237
RF	S1	0.188	0.232
	S2	0.156	0.226
	S3	0.188	0.232

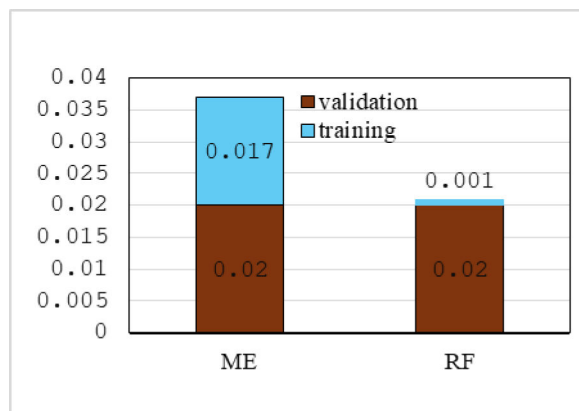
ارزیابی نقشه‌ی پهنه‌بندی احتمال وقوع سیل

ارزیابی مدل‌ها با منحنی ROC نشان داد که هر دو مدل دارای دقت بالای ۹۰ درصد هستند (جدول ۲). در مرحله آموزش، بیشترین مقدار AUC برای مدل RF برابر ۰/۹۹۸ و برای مدل ME برابر ۰/۹۸۷ بود. در مرحله اعتبارسنجی، مدل RF با مقادیر بین ۰/۹۵

تعیین میزان مشارکت فاکتورهای محیطی در پیش‌بینی مناطق

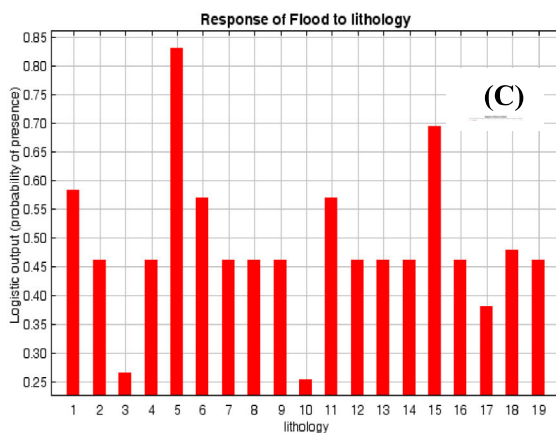
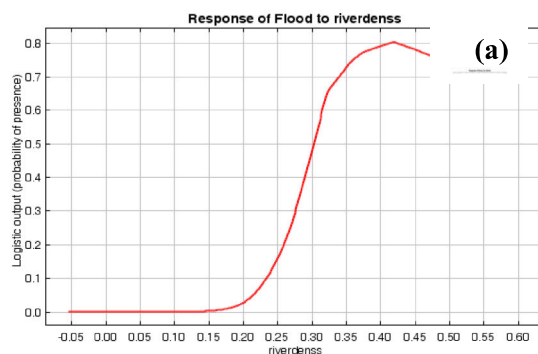
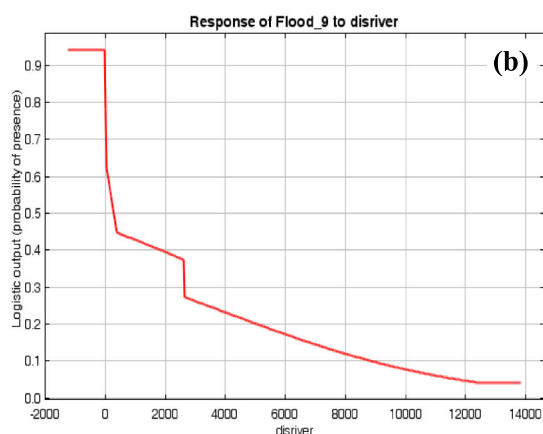
مستعد سیلاب

بر اساس آزمون جک‌نایف در مدل پیشینه آنتروپی، سه عامل فاصله از آبراهه (۴۹/۴ درصد)، تراکم زهکشی (۱۵/۲ درصد) و سنگ‌شناسی (۱۰/۸ درصد) به‌عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع سیلاب شناسایی شدند (جدول ۳). متغیرهای بارندگی سالانه (۵/۷ درصد)، ارتفاع (۴/۶ درصد) و شیب (۴/۵ درصد) دارای اهمیت متوسط بودند. منحنی‌های پاسخ (شکل ۷) نشان می‌دهند که با کاهش فاصله از آبراهه و افزایش تراکم زهکشی، احتمال وقوع سیل به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. تجزیه و تحلیل کلاس‌های سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد، که گروه QSW دارای سازند پادگانه آبرفتی است که بیشترین استعداد سیل‌گیری را دارد.



شکل ۶- نتایج ارزیابی پایداری مدل

Fig.6. Results of data robustness analysis



شکل ۷- منحنی‌های پاسخ فاکتورهای محیطی پیش‌بینی کننده اصلی الف- فاصله از آبراهه ؛ ب- تراکم زهکشی ؛ ج- سنگ‌شناسی

Fig.7. Response curves of the main predictive environmental factors: (a) Distance from stream; (b) Drainage density; (c)

Lithology

Table 3 - Contribution rate of predictive layers in the Maximum Entropy model

Variable متغیرها	Contribution percentage درصد مشارکت
Distance from river	49.4
Drainage density	15.2
Lithology	10.8
Rainfall	5.7
Elevation	4.6
Slope	3.6
Aspect	3.4
Land use	3.4
Distance to fault	2.8
Distance to road	1.9
Profile curvature	1.5
Soil texture	0.7
SPI	0.6
Plan curvature	0.3
Relative slope	0.2
position	0.2
Terrain Roughness	0.2
Index	0.1
Topographic	0.1
wetness index	0.1
LS-Factor	0.1
Topographic	0
Position Index	0

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، برای پهنه‌بندی حساسیت به وقوع سیل، از دو مدل یادگیری ماشین شامل جنگل تصادفی و بیشینه آنتروپی استفاده شد. منطقه مورد مطالعه، آبخیز گرگانرود استان گلستان است که به دلیل شرایط توپوگرافی، اقلیمی و نزدیکی به آبراهه‌ها، مستعد سیل‌گرفتگی است. مدل‌ها با استفاده از سه مجموعه داده آموزشی متفاوت (S1، S2 و S3) اجرا شدند و نتایج حاصل از میانگین‌گیری سه نقشه، مبنای تحلیل نهایی قرار گرفت.

نتایج این پژوهش نشان داد که مناطق با خطر سیلاب بالا عمدتاً در نواحی کم‌شیب و نزدیک به رودخانه‌ها قرار دارند. دلیل این امر احتمالاً تمرکز جریان‌های سطحی و زیرسطحی منطقه به سمت آبراهه‌ها و رودخانه‌هاست [۹]. این یافته با نتایج تهرانی و همکاران [۲۱] نیز همخوانی دارد. از نظر عملکرد مدل‌ها، میانگین مقادیر احتمال وقوع سیل در مدل ME حدود ۰/۲۴ تا ۰/۲۵ و در مدل RF حدود ۰/۱۵ تا ۱۸/۰ به‌دست آمد. مدل RF حدود ۱۵ درصد از منطقه را در کلاس خطر زیاد و خیلی زیاد قرار داد، در حالی که مدل ME این میزان را ۲۲/۷ درصد برآورد کرد. این اختلاف ناشی از ماهیت الگوریتمی متفاوت مدل‌ها و معیارهای طبقه‌بندی

است که در مطالعات چن و همکاران [۸] نیز مشاهده شده است. بنابراین بر اساس نقشه پهنه‌بندی نهایی، حدود ۱۵ تا ۲۳ درصد از حوزه آبخیز گرگانرود در کلاس خطر زیاد تا خیلی زیاد قرار دارد. این مناطق عمدتاً شامل شهرهای آق‌قلا (در پهنه خطر خیلی زیاد)، گمیشان (خطر زیاد) و بخش‌هایی از گنبد کاووس (خطر متوسط تا زیاد) و همچنین روستاهای خواجه‌نفس، گمیشان تپه و صیادآباد می‌شود. از نظر تأسیسات مهم، حدود ۴۳،۹۳۲ هکتار از اراضی کشاورزی (با کشت غالب گندم، برنج و جو)، سد گلستان، شبکه آبیاری پایین‌دست آن، و بخش‌هایی از جاده اصلی گرگان به آق‌قلا و گنبد کاووس در معرض سیلاب قرار دارند.

ارزیابی مدل‌ها با منحنی ROC نشان داد که هر دو مدل دارای دقت بالای ۹۰ درصد هستند. در مرحله اعتبارسنجی، مدل RF با مقادیر ۰/۹۵ تا ۰/۹۸ و مدل ME با مقادیر ۰/۹۳۵ تا ۰/۹۵۵ عملکرد عالی داشت. تطابق خوب نقاط سیلاب مشاهداتی با نقشه‌های خروجی، صحت نتایج را تأیید می‌کند. این یافته‌ها با نتایج مطالعات داوودی مقدم [۱۴]، سیاه‌کمری و همکاران [۱۹] و لی و همکاران [۱۳] که دقت بالای مدل‌های RF و ME را تأیید کرده‌اند، همخوانی کامل دارد.

مقدار پایداری و استحکام مدل در مدل RF (۰/۰۰۱) کمتر از مدل ME (۰/۰۰۸) به‌دست آمد که نشان‌دهنده پایداری بالاتر مدل RF در برابر تغییر مجموعه داده‌هاست. این یافته با بوجی و همکاران [۷] همخوانی کامل دارد.

در زمینه تعیین عوامل مؤثر بر وقوع سیل، آزمون جک‌نایف در مدل بیشینه آنتروپی نشان داد که سه عامل فاصله از آبراهه (۴۹/۴ درصد)، تراکم زهکشی (۱۵/۲ درصد) و سنگ‌شناسی (۱۰/۸ درصد) بیشترین نقش را در پیش‌بینی مناطق مستعد سیلاب دارند. متغیرهای بارندگی سالانه (۵/۷ درصد)، ارتفاع (۴/۶ درصد) و شیب (۴/۵ درصد) دارای اهمیت متوسط بودند. منحنی‌های پاسخ نشان دادند که با کاهش فاصله از آبراهه و افزایش تراکم زهکشی، احتمال وقوع سیل به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. همچنین گروه سنگ‌شناسی (QSW پادگانه آبرفتی) بیشترین استعداد سیل‌گیری را دارد، زیرا خاک‌های آبرفتی کواترنری معمولاً نفوذپذیری متغیری دارند و در شرایط بارش شدید، توانایی جذب آب رو از دست می‌دهند که منجر به افزایش رواناب سطحی می‌شود [۱]. این نتایج با مطالعات ییو و همکاران [۵]، تهرانی و همکاران [۲۱] و لی و همکاران [۱۲] همسو است. شایان ذکر است که اهمیت نسبی هر عامل بسته به شرایط توپوگرافی، اقلیمی و ژئومورفولوژیکی هر منطقه متفاوت است.

در نهایت، هر دو مدل جنگل تصادفی و بیشینه آنتروپی توانایی بالایی در پهنه‌بندی احتمال وقوع سیلاب در منطقه مورد مطالعه دارند. با این حال، مدل جنگل تصادفی به‌دلیل دقت بالاتر (۰/۹۵ تا ۰/۹۸) و پایداری بیشتر در برابر تغییر مجموعه داده‌ها، به‌عنوان مدل برتر این پژوهش معرفی می‌شود. عوامل فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی و

Committee. Technical workshop on coexistence with floods. (In Persian)

3. Albers, S. J. Déry, S. J. and Petticrew, E. L. 2016. Flooding in the Nechako River Basin of Canada: A random forest modeling approach to flood analysis in a regulated reservoir system. *Canadian Water Resources Journal/Revue canadienne des ressources hydriques*, 41(1-2), 250-260.

4. Akgün, A. and Bulut, F. 2007. GIS-based landslide susceptibility for Arsin-Yomra (Trabzon, North Turkey) region. *Environment Geology*, 51(8), 1377-1387.

5. Bui, D.T. Pradhan, B. Nampak, H. Bui, Q.T. Tran, Q.A. and Nguyen Q.P. 2016. Hybrid artificial intelligence approach based on neural fuzzy inference model and metaheuristic optimization for flood susceptibility modeling in a high-frequency tropical cyclone area using GIS. *Journal of Hydrology*, 540: 317-330.

6. Bui, D.T. Khosravi, K. Shahabi, H. Daggupati, P. Adamowski, J.F. Melesse, A. Pham, B.T. Pourghasemi, H.R. Mahmoodi, M. Bahrami, S. Pradhan, B. Shirzadi, A. Chapi, K. and Lee, S. 2019. Flood Spatial Modeling in Northern Iran Using Remote Sensing and GIS: A Comparison between Evidential Belief Functions and Its Ensemble with a Multivariate Logistic Regression Model. *Remote Sensing*, 11(13), 1589.

7. Bouj, E. El Hamdouni, R. and Himi, M. 2021. Flood susceptibility assessment using machine learning approaches in the Rheraya watershed, Morocco. *Journal of African Earth Sciences*, 182, 104271.

8. Chen, W. Li, Y. Xue, W. Shahabi, H. Li, S. Hong, H. and Ahmad, B.B. 2020. Modeling flood susceptibility using data-driven approaches of naïve bayes tree, alternating decision tree, and random forest methods. *Science of The Total Environment*, 701, 134.979-

9. Fernández, D.S. and Lutz, M.A. 2010. Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Eng Geol*, 111:90-98.

10. Felicísimo, Á. Cuartero, A. Remondo, J. and Quirós, E. 2013. Mapping landslide susceptibility with logistic regression, multiple adaptive regression splines, classification and regression trees, and maximum entropy methods: a comparative study. *Landslides*, 10, 175-189.

11. Javidan, N. and Kaviani, A. 2025. Evaluation of the Stability of the Maximum Entropy Algorithm for Modeling the Potential of Groundwater Springs in the Farahroud watershed, Tehran province. *Jwmseir*, 19 (69) : 2

12. Khosravi, K. Nohani, E. Maroufinia, E. and Pourghasemi,

سنگ‌شناسی مهم‌ترین نقش را در وقوع سیلاب ایفا می‌کنند. یافته‌های این پژوهش می‌تواند به عنوان ابزاری ارزشمند برای مدیریت خطرات طبیعی، حفاظت از منابع طبیعی و محیط‌زیست، برنامه‌ریزی پایدار کاربری اراضی، و اولویت‌بندی توسعه اقتصادی در مناطق مستعد سیلاب استان گلستان مورد استفاده قرار گیرد و برای سیاست‌گذاران در برنامه‌ریزی و اجرای پروژه‌های اصلی دولت حائز اهمیت است. یکی از محدودیت‌های اصلی این پژوهش، عدم بررسی کمی عدم قطعیت ناشی از داده‌های ورودی به ویژه نقشه بارندگی حاصل از درون‌یابی و سایر لایه‌های محیطی است. اگرچه مدل‌های مورد استفاده دارای دقت بالایی بودند، اما وجود عدم قطعیت در داده‌های مکانی می‌تواند بر صحت مطلق نقشه‌های حساسیت تأثیر بگذارد. بنابراین توصیه می‌شود در پژوهش‌های آینده، تأثیر روش‌های مختلف درون‌یابی و منابع مختلف داده بر خروجی مدل‌های یادگیری ماشین مورد ارزیابی قرار گیرد.

سپاسگزاری

نویسندگان مراتب سپاسگزاری خود را از سازمان تحقیقات منابع آب ایران و شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان به‌خاطر همکاری ارزشمندشان و تأمین داده‌ها و امکانات ضروری اعلام می‌دارند. همچنین از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری به‌خاطر پشتیبانی فنی‌شان صمیمانه تشکر می‌کنند.

تضاد منافع نویسندگان

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

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید و/یا تحلیل‌شده در مطالعه حاضر، شامل نقاط موجودی سیل و لایه‌های عوامل محیطی، در صورت درخواست معقول از نویسنده مسئول در دسترس است.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان نسخه نهایی مقاله را بررسی و تأیید کرده‌اند. نقش هر یک از نویسندگان به شرح زیر است:
نرگس جاویدان: مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، گردآوری داده‌ها، تحلیل رسمی، پژوهش، نرم‌افزار، پیش‌نویس اصلی، نوشتن بررسی و ویرایش. عطاالله کاویان: نظارت، اعتبارسنجی، مدیریت پروژه، منابع، نوشتن - بررسی و ویرایش.

منابع

1. Avni, Y. 2005. Gully incision as a key factor in desertification in an arid environment, the Negev highlands, Israel. *Catena*, 63: 185-220.
2. Abdi, P. 2006. Investigation of flood potential of Zanzan River basin by SCS method and GIS. *National Irrigation and Drainage*

18. Rahmati, O. and Pourghasemi, H. R. 2017. Identification of critical flood prone areas in data-scarce and ungauged regions: A comparison of three data mining models. *Water resources management*, 31(5), 1473-1487
19. Siahkamari, S. Haghizadeh, A. Zeinivand, H. Tahmasebipour, N. and Rahmati, O. 2018. Spatial prediction of flood-susceptible areas using frequency ratio and maximum entropy models. *Geocarto international*, 33(9), 927-941.
20. Servati, M.R. Ghahrodi Tali, M. Golkarami, A. and Njafi, E. 2014. Geomorphological thresholds for gully erosion in Kchick watershed, NE Golestan Province. *Applied researches in geographical sciences*, 32, 231-249 (in Persian).
21. Tehrany, M.S. Pradhan, B. Mansor, S. and Ahmad, N. 2015. Flood susceptibility assessment using GIS-based support vector machine model with different kernel types. *Catena*, 125, 91-101.
22. Woznicki, S.A. Baynes, J. Panlasigui, S. Mehaffey, M. and Neale, A. 2019. Development of a spatially complete floodplain map of the conterminous United States using random forest. *Science of the total environment*, 647, 942-953.
- H.R. 2016. A GIS-based flood susceptibility assessment and its mapping in Iran: a comparison between frequency ratio and weights-of-evidence bivariate statistical models with multi-criteria decision-making technique. *Natural Hazards*, 83(2), 947-987.
13. Lee, S. Kim, J.C. Jung, H.S. Lee, M.J. and Lee, S. 2017. Spatial prediction of flood susceptibility using random-forest and boosted-tree models in Seoul metropolitan city, Korea. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, p. 1-19
14. Moghaddam, D.D. Pourghasemi, H.R. 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 *Natural Hazards GIS-Based Spatial Modeling Using Data Mining Techniques*. Springer, Cham, p. 59-78.
15. Mojaddadi, H. Pradhan, B. Nampak, H. Ahmad, N. and Ghazali, A.H.B. 2017. Ensemble machine-learning-based geospatial approach for flood risk assessment using multi-sensor remote-sensing data and GIS. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 1080-1102.
16. Rahi, G.h. 2018. *Prediction of trench erosion sensitivity using spatial data mining methods*. PhD Thesis, Faculty of Natural Resources Engineering. Sari University of Agricultural, Sciences and Natural Resources. (In Persian).
17. Rahmati, O. Pourghasemi, H. R. and Zeinivand, H. 2015. Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golastan Province, Iran. *Geocarto International*, 31(1), 42-70/137, 360-372.