

(OPEN ACCESS)

The use of quantitative drainage network in the placement of check dams based on machine learning

Marziyeh Ramezani¹, Aliakbar Nazari Samani^{*2}, Omid Asadi Nalivan³,
Ali Shahbazi⁴

1. M.Sc. Student of Arid and Mountainous Areas Restoration, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: ramezani.marziye@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Arid and Mountainous Areas Restoration, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: aknazari@ut.ac.ir
3. Assistant Prof., Dept. of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran. E-mail: o.asadi@maragheh.ac.ir
4. Ph.D. Graduate in Watershed Management, Department of Arid and Mountainous Areas Restoration, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: ashahbazi@ut.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Full Paper	Background and Objectives: The loss of life and property damage caused by floods and the overflowing of water storage dams with sediment are causes for concern, especially in recent years, due to the unsustainable use of natural resources. In order to address these issues, soil and water conservation measures have been implemented in the form of various watershed management programs, including structural (biomechanical and mechanical), management, and biological measures, at the national level. The implementation of watershed management plans, as an infrastructure priority, plays an important role in reducing the damage caused by runoff and floods. One of the most important goals of implementing check dams along rivers, especially upstream of residential areas and watersheds leading to cities and villages, is flood and sediment control. The most essential step in implementing mechanical plans as check dam measures is to identify the locations needed to implement these plans correctly. The correct location of a check dam has a significant impact on reducing the cost of watershed management activities and increasing their effectiveness. In this study, a number of machine learning-based approaches, including artificial neural network (ANN) and maximum entropy (ME) models, were used with the aim of determining the best machine learning model for locating a check dam in the Quein watershed.
Article history: Received: 06.09.2025 Revised: 06.29.2025 Accepted: 07.14.2025	
Keywords: Machine Learning, Maximum Entropy, Site selection, Watershed Management	
	Materials and Methods: The Quein watershed is located in Alborz Province, north of Taleghan, and lies between the geographical coordinates (50°46' to 50°56' E and 36°10' to 36°18' N). In the present research, 11 effective indicators in the selection of check dam locations, including topographic, hydrological, geological, land use, and economic factors, were used to determine the appropriate areas for the construction of watershed structures. The points of the existing check dam were divided into two groups modeling data (training) and validation data (test) using a random method. The digital elevation model layer was prepared using elevation

points and contour lines with a resolution of 10×10 meters. The slope layer was prepared using the digital elevation model and the Slope function. The distance from the watercourse and watercourse density layers were prepared based on the watercourse map (extracted from SAGA GIS software) using the Euclidean distance and Line Density functions in ArcGIS software, respectively. The lithology layer was considered an essential factor in the spatial and temporal changes in drainage, permeability, hydrology, and sediment production of the watershed and was extracted from the geological map. The land use layer was obtained from the General Directorate of Natural Resources and Watershed Management of Alborz Province. The rainfall map was prepared using data from 15 rain gauges and meteorological stations over a statistical period of 18 years in the form of a rainfall gradient. The SPI factors, watercourse rank, and flow accumulation were prepared using the digital elevation model map in SAGA GIS software. The road density layer was prepared based on the road map using the Line Density function in ArcGIS software. In this study, two models, maximum entropy and artificial neural network, were used. Preprocessing of input factors was performed to check for the absence of multicollinearity using the variance inflation factor (VIF) and the tolerance index. The importance of each factor in explaining the model was determined using the maximum entropy model and the jackknife diagram, performed in MaxEnt software. The efficiency of the models in the training and validation stages was evaluated using the receiver operating characteristic (ROC) curve and the area under the curve (AUC).

Results: The results indicated that there was no collinearity between the factors; therefore, all factors were used in the modeling process. The results showed that the factors of distance from the watercourse, watercourse rank, flow accumulation, elevation, and average rainfall were the most critical factors affecting the placement of the check dam and were effective in predicting areas with potential for structure construction. The prediction accuracy of the maximum entropy model was excellent in both the training (0.994) and validation (0.993) phases. The prediction accuracy of the artificial neural network model was also excellent in both the training (1) and validation (1) phases. Considering the field reality in the Quein watershed, it seems that the artificial neural network model was overfitted, making the final potential map for the check dam subject to errors, whereas the results of the maximum entropy model provided more reasonable outputs. Field visits to verify the model results showed that in all the streams studied, the maximum entropy model correctly and with great accuracy identified critical streams in terms of flood and sediment load. A total of 47 km of critical streams were identified in terms of flood and sediment load. Therefore, during the subsequent visits, 22 check dams were installed in the studied streams.

Conclusion: The results of field reconnaissance showed that in all the streams studied, the maximum entropy model correctly and accurately identified critical streams in terms of flood and sediment load. This indicates the high capability of machine learning-based methods to integrate and analyze complex spatial data, thus increasing accuracy in locating check dam measures. The results of this study emphasize that using machine learning-based methods can significantly improve the accuracy of locating a check dam. Therefore, it is suggested that future studies combine machine learning models with optimization and

uncertainty analysis methods to improve location accuracy further. This research represents an important step toward using data-driven models to optimize check dam measures and can serve as a model for similar studies in other watersheds. This method not only increases the accuracy of decision-making but also reduces implementation costs and improves the efficiency of watershed management projects.

Cite this article: Ramezani, Marziyeh, Nazari Samani, Aliakbar, Asadi Nalivan, Omid, Shahbazi, Ali. 2025. The use of quantitative drainage network in the placement of check dams based on machine learning. *Journal of Water and Soil Conservation*, 32 (3), 63-88.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2026.23772.3813

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

کاربرد نمایه‌های کمی شبکه زهکشی در جانمایی سازه‌های آبخیزداری بر پایه یادگیری ماشینی

مرضیه رمضانی¹، علی اکبر نظری سامانی^{2*}، امید اسدی نلیوان³، علی شهبازی⁴

1. دانشجوی کارشناسی ارشد احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
رایانامه: ramezani.marziye@ut.ac.ir
2. نویسنده مسئول، دانشیار گروه احیا مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
رایانامه: aknazari@ut.ac.ir
3. استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران. رایانامه: o.asadi@maragheh.ac.ir
4. دانش‌آموخته دکتری آبخیزداری، گروه احیا مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
رایانامه: ashahbazi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی تاریخ دریافت: 04/03/19 تاریخ ویرایش: 04/04/08 تاریخ پذیرش: 04/04/23 واژه‌های کلیدی: اقدامات آبخیزداری، جانمایی، حداکثر آنتروپی، یادگیری ماشینی	سابقه و هدف: خسارت جانی و مالی ناشی از پدیده سیل و پر شدن سدهای ذخیره آب از رسوب، به‌ویژه در سالیان اخیر به‌علت استفاده غیراصولی از منابع طبیعی نگران‌کننده است. به‌منظور حل این مشکلات، اقدامات حفاظت خاک و آب در قالب برنامه‌های مختلف آبخیزداری شامل اقدامات سازه‌ای (بیومکانیکی و مکانیکی)، مدیریتی و بیولوژیکی در سطح کشور در حال انجام می‌باشد. اجرای طرح‌های آبخیزداری، به‌عنوان اولویتی زیرساختی، نقش مهمی در کاهش تخریب‌های ناشی از جاری شدن روان آب‌ها و سیلاب‌ها ایفا می‌کند. از مهم‌ترین اهداف اجرای سازه‌های کنترلی آبخیزداری در مسیر رودخانه‌ها و به‌ویژه در بالادست مناطق مسکونی و حوزه‌های آبخیز منتهی به حریم شهر و روستاها، کنترل سیل و رسوب به‌شمار می‌رود. مهم‌ترین مرحله اجرای طرح‌های مکانیکی به‌عنوان اقدامات سازه‌ای آبخیزداری، شناسایی درست مکان‌های موردنیاز جهت اجرای این طرح‌ها می‌باشد. مکان‌یابی صحیح سازه‌های آبخیزداری، تأثیر فراوانی در کاهش هزینه فعالیت‌های آبخیزداری و افزایش اثربخشی دارد. در این پژوهش تعدادی از مدل‌های رویکرد مبتنی بر یادگیری ماشینی شامل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و مدل حداکثر آنتروپی (ME) با هدف تعیین بهترین مدل رویکرد یادگیری ماشینی به‌منظور مکان‌یابی سازه‌های آبخیزداری در آبخیز کوئین استفاده می‌شود. مواد و روش‌ها: آبخیز کوئین در استان البرز و شمال طالقان و بین مختصات جغرافیایی (50 درجه و 46 دقیقه تا 50 درجه و 56 دقیقه طول شرقی و 36 درجه و 10 دقیقه تا 36 درجه و 18 دقیقه عرض شمالی) واقع شده است. در پژوهش حاضر جهت تعیین مناطق مناسب

احداث سازه‌های آبخیزداری از 11 شاخص موثر در جانمایی سازه‌ها شامل توپوگرافی، هیدرولوژی، زمین‌شناسی، کاربری اراضی و اقتصادی استفاده شده است. نقاط سازه‌های موجود، با استفاده از روش تصادفی به دو دسته داده‌های مدل‌سازی (آموزش) و داده‌های اعتبارسنجی (آزمون) تقسیم شدند. لایه مدل رقومی ارتفاعی با استفاده از نقاط ارتفاعی و خطوط تراز در ابعاد 10*10 متر تهیه شد. لایه شیب با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی و با استفاده از تابع Slope تهیه شده است. لایه فاصله از آبراهه و تراکم آبراهه بر اساس نقشه آبراهه‌ها (استخراج از نرم‌افزار SAGA GIS) و به ترتیب با استفاده از تابع Euclidean distance و Line Density در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شدند. لایه سنگ‌شناسی به عنوان یک عامل مهم در تغییرات مکانی و زمانی زهکشی، میزان نفوذپذیری، هیدرولوژی و تولید رسوب آبخیز در نظر گرفته می‌شود و از نقشه زمین‌شناسی استخراج گردید. لایه کاربری اراضی از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان البرز دریافت شده است. نقشه بارندگی با استفاده از اطلاعات 15 ایستگاه باران‌سنجی و هواشناسی در طی یک دوره آماری (18 ساله) به صورت گرادیان بارندگی تهیه شده است. عوامل SPI، رتبه آبراهه‌ها و تجمع جریان با استفاده از نقشه مدل رقومی ارتفاعی و در نرم‌افزار SAGA GIS تهیه شده است. لایه تراکم جاده بر اساس نقشه جاده‌ها و با استفاده از تابع Line Density در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. در این پژوهش از دو مدل حداکثر آنتروپی و شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. پیش‌پردازش عوامل ورودی به‌منظور بررسی عدم وجود هم‌خطی چندگانه با استفاده از عامل تورم واریانس (VIF) و شاخص ضریب تحمل (Tolerance) انجام شد. میزان اهمیت هر یک از عوامل به‌کار رفته در تبیین مدل با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی و با استفاده از نمودار جک‌نایف (Jackknife) تعیین شد و انجام این فرآیند در نرم‌افزار MaxEnt انجام می‌شود. در این پژوهش، کارایی مدل‌ها در مراحل آموزش و اعتبارسنجی با استفاده از منحنی تشخیص عملکرد گیرنده (ROC) و سطح زیر منحنی آن (AUC) ارزیابی شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که بین عوامل هم خطی وجود ندارد و بنابراین همه عوامل در روند مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان داد که به ترتیب عوامل فاصله از آبراهه، رتبه آبراهه، تجمع جریان، ارتفاع و میانگین بارندگی مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر جانمایی سازه‌های آبخیزداری هستند و در پیش‌بینی مناطق دارای پتانسیل احداث سازه تأثیرگذار بوده‌اند. میزان دقت پیش‌بینی مدل حداکثر آنتروپی در هر دو بخش آموزش (0/994) و اعتبارسنجی (0/993) عالی بوده است. میزان دقت پیش‌بینی مدل شبکه عصبی مصنوعی نیز در هر دو بخش آموزش (1) و اعتبارسنجی (1) عالی بوده است. با توجه به واقعیت میدانی موجود در آبخیز کوئین به‌نظر می‌رسد که مدل شبکه عصبی مصنوعی دچار بیش‌برازش شده است و نقشه نهایی پتانسیل سازه‌های آبخیزداری با خطا مواجه است و نتایج مدل حداکثر آنتروپی نتایج منطقی‌تری ارائه داده است. نتایج بازبینی‌های میدانی جهت صحت‌سنجی نتایج مدل نشان داد که در تمامی آبراهه‌های مورد بررسی، مدل حداکثر آنتروپی به درستی و با دقت بسیار زیاد آبراهه‌های بحرانی را به لحاظ آورد سیل و رسوب تشخیص داده است. در مجموع 47 کیلومتر آبراهه بحرانی به لحاظ آورد سیل و رسوبات تشخیص داده شد. بنابراین در ادامه و در طی بازدیدهای مختلف تعداد 22 سازه آبخیزداری در آبراهه‌های مورد بازدید جانمایی شد.

نتیجه‌گیری: نتایج بازدیدهای میدانی نشان داد که در تمامی آبراهه‌های مورد بررسی، مدل حداکثر آنتروپی به درستی و با دقت بسیار زیاد آبراهه‌های بحرانی را به لحاظ آورد سیل و رسوب تشخیص داده است. این امر بیانگر توانایی بالای روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین در تلفیق و تحلیل داده‌های مکانی پیچیده و افزایش دقت در مکان‌یابی اقدامات آبخیزداری است. نتایج این پژوهش تأکید دارد که استفاده از روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین می‌تواند بهبود قابل توجهی در دقت مکان‌یابی سازه‌های آبخیزداری ایجاد کند. از این رو، پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آینده، ترکیب مدل‌های یادگیری ماشین با روش‌های بهینه‌سازی و تحلیل عدم قطعیت برای افزایش دقت مکان‌یابی مورد بررسی قرار گیرد. این پژوهش گامی مهم در جهت استفاده از مدل‌های داده‌محور برای بهینه‌سازی اقدامات آبخیزداری بوده و می‌تواند به عنوان الگویی برای مطالعات مشابه در سایر حوزه‌های آبخیز مورد استفاده قرار گیرد. این روش نه تنها باعث افزایش دقت در تصمیم‌گیری می‌شود، بلکه هزینه‌های اجرایی را نیز کاهش داده و بهره‌وری پروژه‌های آبخیزداری را بهبود می‌بخشد.

استناد: رمضانی، مرضیه، نظری سامانی، علی‌اکبر، اسدی نلیوان، امید، شهبازی، علی (۱۴۰۴). کاربرد نمایه‌های کمی شبکه زهکشی در جانمایی سازه‌های آبخیزداری بر پایه یادگیری ماشینی. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۳۲ (۳)، ۸۸-۶۳.

DOI: 10.22069/jwsc.2026.23772.3813



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

حفظ آب‌وخاک برای هر کشور به‌عنوان سرمایه‌هایی بسیار ارزشمند اهمیت فراوان دارد. یکی از روش‌های بهره‌برداری بهینه از منابع آب‌وخاک، عملیات آبخیزداری است. آبخیزداری مؤثرترین اقدام برای کاهش آثار فرسایش و خسارات سیل است (1). خسارت جانی و مالی ناشی از پدیده سیل و پر شدن سدهای ذخیره آب از رسوب، به‌ویژه در سالیان اخیر به علت استفاده غیراصولی از منابع طبیعی نگران‌کننده است. به‌منظور حل این مشکلات، اقدامات حفاظت خاک و آب در قالب برنامه‌های مختلف آبخیزداری شامل اقدامات سازه‌ای (بیومکانیکی و مکانیکی)، مدیریتی و بیولوژیکی در سطح آبخیز کشور در حال انجام می‌باشد (1). در این بین، اقدامات سازه‌ای بیش از سایر برنامه‌ها در دستور کار قرار دارد. مهم‌ترین مرحله اجرای طرح‌های مکانیکی به‌عنوان اقدامات سازه‌ای آبخیزداری، شناسایی درست مکان‌های موردنیاز جهت اجرای این طرح‌ها می‌باشد. مکان‌یابی صحیح سازه‌های آبخیزداری، تأثیر فراوانی در کاهش هزینه فعالیت‌های آبخیزداری و افزایش اثربخشی دارد. مکان‌یابی با تکیه بر روش‌های سنتی با توجه به حجم لایه‌های اطلاعاتی و لزوم تلفیق و تحلیل آن‌ها، دشوار بوده و ضمن صرف وقت و هزینه زیاد، ممکن است موجب بروز خطا گردد (2). در حال حاضر شناسایی مکان‌های موردنیاز جهت احداث سازه‌های آبخیزداری به‌صورت سنتی و عمدتاً بر مبنای بازدیدهای صحرایی و وابسته به نظر کارشناسان مکان‌یابی بوده و کم‌تر به نتایج مطالعات پایه پروژه‌های تفصیلی - اجرایی آبخیزداری توجه می‌شود. این مسأله سبب می‌گردد که تصمیم‌گیری‌ها تا حدودی سلیقه‌ای و فاقد پشتوانه مطالعاتی باشد. نظر به این‌که معیارها و عوامل متعددی مانند عوامل توپوگرافی، هیدرولوژیکی، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی، وضعیت اداپیک و فرسایش خاک و

مسائل و مشکلات اقتصادی - اجتماعی در انتخاب مکان مناسب برای احداث سازه‌های آبخیزداری دخالت دارند، استفاده از روش‌های نوین و با کارایی زیاد به‌منظور مکان‌یابی سازه‌ها با استفاده از نتایج مطالعات پایه پروژه‌های تفصیلی - اجرایی آبخیزداری جهت افزایش دقت، صرفه‌جویی در وقت و هم‌چنین کاهش هزینه ناشی از بازدیدهای میدانی طولانی‌مدت، دارای اهمیت فراوان است (3، 4 و 5). از جمله روش‌های نوین و با کارایی زیاد می‌توان به روش‌های مدل‌سازی داده محور اشاره نمود. رویکردهای داده‌محور که شامل روش‌های داده‌کاوی مبتنی بر کیفیت و کمیت داده‌ها بوده و به دو گروه مبتنی بر آمار و مبتنی بر یادگیری ماشین¹ (ML) تقسیم می‌شوند (6). در این پژوهش تعدادی از مدل‌های رویکرد مبتنی بر یادگیری ماشین شامل شبکه عصبی مصنوعی² (ANN) و مدل حداکثر آنتروپی³ (ME) با هدف تعیین بهترین مدل رویکرد یادگیری ماشین به‌منظور مکان‌یابی سازه‌های آبخیزداری در آبخیز کوئین به‌عنوان یکی از حوزه‌های اصلی سد طالقان استان البرز استفاده می‌شود. جهت جانمایی سازه‌های آبخیزداری با استفاده از روش‌های یادگیری ماشینی مطالعاتی صورت گرفته است. پورقاسمی و همکاران (2020) پژوهشی را به‌منظور بررسی و بهینه کردن مکان‌های مناسب ساخت سازه‌های کنترل سیل و رسوب در آبخیز فیروزکوه انجام دادند. آن‌ها در این تحقیق از پنج مدل یادگیری ماشین شامل BRT⁴، MARS⁵، SVM⁶، RF⁷ و MDA⁸ استفاده کردند. برای دستیابی به اهداف پژوهش، 14 عامل در دسته‌های

1- Machine Learning

2- Artificial Neural Network

3- Maximum Entropy

4- Boosted Regression Tree

5- Multivariate Adaptive Regression Splines

6- Support Vector Machine

7- Random Forest

8- Discriminate Analysis

کلی توپوگرافی، هیدرولوژی، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی و اجتماعی انتخاب شد و مقادیر این عوامل برای 475 سازه کنترل رسوب موجود تعیین گردید. عدم هم‌خطی بین داده‌ها با استفاده از عامل تورم واریانس¹ (VIF) مورد بررسی قرار گرفت و میزان اهمیت هر یک از عوامل در تبیین مدل‌ها با استفاده از الگوریتم نت الاستیک² (ENET) تعیین شد. نتایج پژوهش نشان داد که عوامل فاصله از رودخانه و تراکم زهکشی، مؤثرترین عوامل در تعیین مکان‌های مناسب برای احداث سازه کنترل رسوب بودند. نتایج نشان داد که همه مدل‌های به کار گرفته شده از دقت بسیار خوبی برای پیش‌بینی مکان‌های مناسب احداث سازه برخوردار بوده به نحوی که مقدار AUC³ مدل‌های RF (0/966)، SVM (0/878)، MARS (0/878)، MDA (0/844) و BRT (0/843) به دست آمد. نتایج به دست آمده از تحلیل مدل (RF) نشان داد که مکان‌های نامناسب، تناسب متوسط، تناسب بالا و بسیار مناسب برای احداث سازه به ترتیب برابر 16/95، 35/55، 31/08 و 16/42 درصد سطح آبراهه‌های حوضه را شامل می‌شود (7). چن و همکاران (2023) در پژوهشی به مطالعه شناسایی حوزه‌های کوچک مناسب برای ساخت چکدم در ناحیه بالادست گانگویی حوضه رودخانه یانیه⁴ در فلات لس چین پرداختند. در این مطالعه، روش همپوشانی وزنی⁵ (WOM) از دسته تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره، جنگل تصادفی (RF) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) استفاده شد. ارزیابی دقت نشان داد که دقت هر سه مدل تقریباً بالا بود و RF بالاترین دقت را با 0/95 داشت و به دنبال آن SVM (0/87) و WOM (0/83) قرار گرفتند. در این میان، تأثیر عوامل

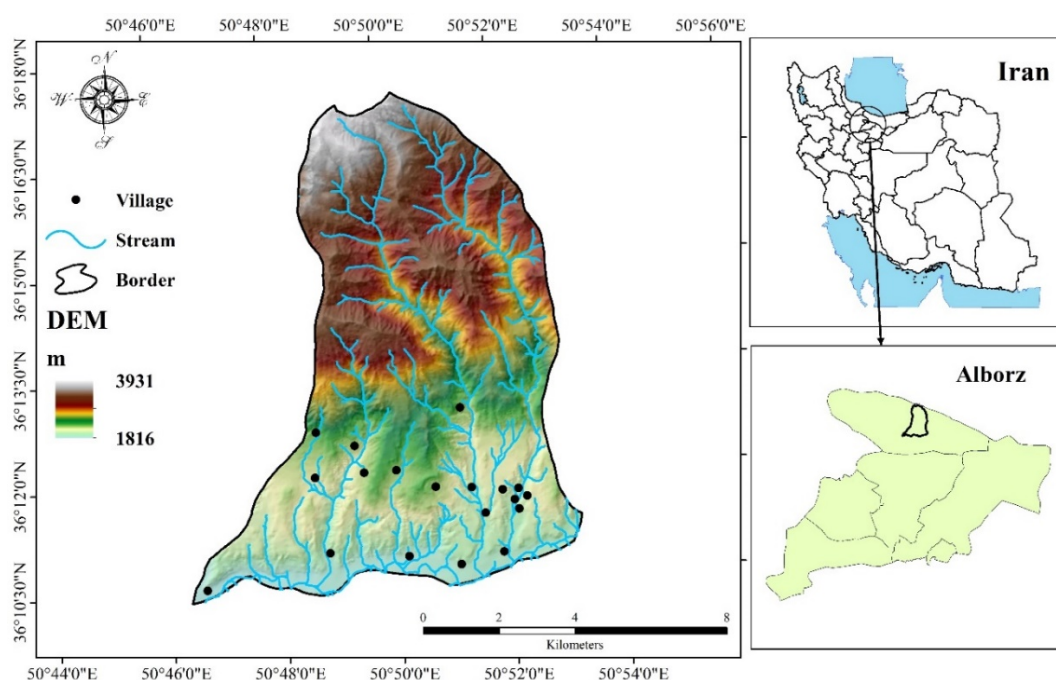
توپوگرافی و فرسایش‌پذیری خاک به طور کلی بیش‌تر از سایر عوامل بود و 56 درصد از حوزه‌های آبخیز کوچک دارای تناسب بالا و بسیار بالا برای ساخت سدهای کتتری (چکدم) بودند. در نهایت، در مجموع 108 حوزه آبخیز کوچک با در نظر گرفتن ویژگی‌های زیست‌محیطی آن‌ها در منطقه مورد مطالعه مناسب ساخت چکدم تشخیص داده شد (8). بررسی سوابق تحقیقاتی داخلی و خارجی بیانگر آن است که پژوهش‌های محدودی در زمینه مکان‌یابی سازه‌های آبخیزداری با به کارگیری رویکردهای نوین انجام شده است. در این پژوهش، با توجه به اهمیت و لزوم شناسایی و انتخاب مکان صحیح جهت احداث سازه‌های آبخیزداری و استفاده از روش‌های نوین به جای روش‌های سنتی، ضمن استفاده از رویکرد یادگیری ماشین به منظور مکان‌یابی سازه‌های آبخیزداری برای اولین بار در آبخیز کوئین، مدل‌های مختلف با یکدیگر مورد مقایسه قرار می‌گیرند تا مکان‌یابی احداث سازه‌های آبخیزداری بر اساس استفاده از نتایج همه مطالعات پایه تدوین و ارائه گردد. جانمایی نامناسب سازه‌های آبخیزداری می‌تواند منجر به کاهش کارایی سازه، افزایش هزینه‌های اجرایی و حتی ایجاد اثرات منفی بر محیط‌زیست شود. بنابراین، استفاده از روش‌های علمی و دقیق برای جانمایی این سازه‌ها ضروری است. روش‌های سنتی، به دلیل محدودیت در تحلیل داده‌های پیچیده و چندبعدی، قادر به ارائه راهکارهای بهینه در بسیاری از موارد نیستند. از این رو، استفاده از روش‌های یادگیری ماشین، با قابلیت تحلیل حجم بالای داده‌ها و استخراج الگوهای پنهان، می‌تواند گامی مؤثر در بهبود فرآیند جانمایی سازه‌های آبخیزداری باشد. بنابراین هدف اصلی این مطالعه ارائه یک رویکرد جدید جهت مکان‌یابی اقدامات سازه‌ای آبخیزداری بر اساس همه نتایج حاصل از مطالعات پایه می‌باشد.

- 1- Variance Inflation Factor
- 2- Elastic Net Algorithm
- 3- Area Under Curve
- 4- Yanhe
- 5- Weighted Overlay Method

مواد و روش‌ها

حوزه آبخیز کوئین در استان البرز و شمال طالقان و بین مختصات طول جغرافیایی 50 درجه و 46 دقیقه تا 50 درجه و 56 دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی 36 درجه و 10 دقیقه تا 36 درجه و 18 دقیقه شمالی واقع شده است. حوزه آبخیز مورد مطالعه از نظر توپوگرافی، کوهستانی بوده و از دامنه‌های پرشیب و قله مرتفع تشکیل شده است. ارتفاع از سطح دریا از

بلندترین نقطه با ارتفاع 3931 متر تا خروجی حوزه با ارتفاع 1816 متر متغیر است. بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار بارندگی متوسط سالانه به‌ترتیب معادل 908 و 484 میلی‌متر محاسبه شده است. تعداد 19 روستا با جمعیت معادل 3304 نفر در حوزه واقع شده‌اند. آبخیز کوئین 8044 هکتار مساحت دارد (شکل 1).



شکل 1- موقعیت حوزه آبخیز کوئین در ایران و استان البرز.

Figure 1. Geographical location of the Queen Watershed in the Iran and Alborz Province.

حوزه آبخیز مورد مطالعه، محل سازه‌های اجرا شده استخراج گردید. در مرحله بعد با انجام پیمایش صحرایی و به‌صورت تصادفی، موقعیت مکانی سازه‌های آبخیزداری اجرا شده با استفاده از دستگاه GPS ثبت گردید و اطلاعات سازه‌های منتخب (عملکرد مناسب) وارد نرم‌افزار ArcGIS 10.8 شده و نقشه موقعیت مکانی سازه‌های آبخیزداری اجرا شده تهیه شد (شکل 2).

در پژوهش حاضر جهت تعیین مناطق مناسب احداث سازه‌های آبخیزداری و بر اساس مرور منابع گسترده در این زمینه از 11 شاخص (جدول 1) مؤثر در جانمایی سازه‌ها شامل عوامل توپوگرافی، هیدرولوژی، زمین‌شناسی، کاربری اراضی و اقتصادی استفاده شده است (3، 7، 8، 22 و 37). ابتدا بر اساس بانک سازه‌های اجرا شده موجود در اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان البرز و کتابچه اجرایی

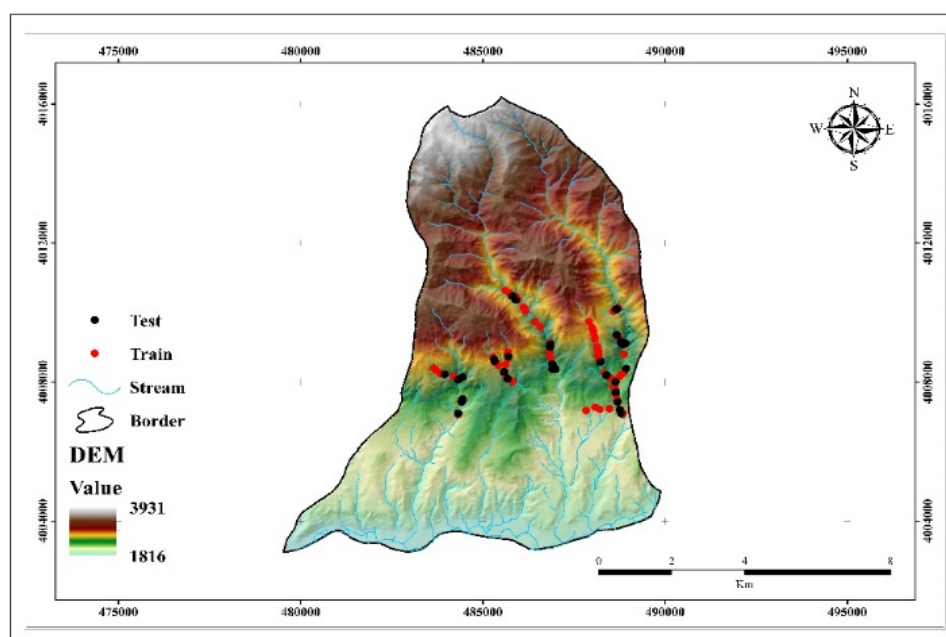
جدول 1- عوامل به کاررفته برای تعیین مناطق مناسب سازه‌های آبخیزداری.

Table 1. Factors used to determine suitable areas for check dams.

روش تهیه Methodology	عوامل Factors
بر اساس نقاط ارتفاعی و خطوط تراز (10*10 متر) Based on elevation points and contour lines (10*10)	ارتفاع DEM (m)
بر اساس مدل رقومی ارتفاعی Based on the DEM in ArcGIS	شیب Slope (%)
تابع فاصله اقلیدسی در ArcGIS Euclidean distance function in ArcGIS	فاصله از آبراهه Distance from stream (m)
تابع تراکم خط در ArcGIS Line Density function in ArcGIS	تراکم آبراهه و جاده Drainage density and Road density (km/km ²)
نقشه زمین‌شناسی Geological map	لیتولوژی Lithology (1/100000)
اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان البرز General Department of Natural Resources and Watershed Management of Alborz Province	کاربری اراضی Land use (1/100000)
بر اساس مدل رقومی ارتفاعی در SAGA GIS Based on DEM in SAGA GIS	رتبه آبراهه، تجمع جریان و SPI SPI, Stream Order, Flow Accumulation
بر اساس میانگین بارندگی و روش گرادیان در ArcGIS Based on average rainfall of stations and gradient method in ArcGIS	میانگین بارندگی Rainfall

در گذشته، به صورت تصادفی 33 سازه گابیونی (30 درصد) به عنوان داده‌های اعتبارسنجی و 77 سازه گابیونی (70 درصد) به عنوان داده‌های آزمون (آموزش) طبقه‌بندی شدند (شکل 2).

نقاط سازه‌های موجود، با استفاده از روش تصادفی به دو دسته داده‌های مدل‌سازی (آموزش) و داده‌های اعتبارسنجی (آزمون) تقسیم شدند (9). در این پژوهش از مجموع 110 سازه گابیونی اجرا شده



شکل 2- نقاط سازه موجود و تقسیم‌بندی تصادفی آن‌ها به دو بخش آموزش و اعتبارسنجی.

Figure 2. Existing check dam points and their random division into two training and test sections.

ابتدا لایه مدل رقومی ارتفاعی با استفاده از نقاط ارتفاعی و خطوط تراز در ابعاد 10×10 متر تهیه شد. ارتفاع یک عامل حیاتی برای مکان‌یابی سدهای کنترلی است، زیرا جریان و ظرفیت ذخیره‌سازی سد را کنترل می‌کند (9). لایه شیب با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی و با استفاده از تابع Slope تهیه شده است. در مناطق با شیب زیاد، سرعت رواناب افزایش می‌یابد که می‌تواند باعث فرسایش بیش‌تر خاک و کاهش زمان تمرکز آب شود (10). برای کاهش اثرات منفی، باید اقداماتی مانند حفظ پوشش گیاهی، کاهش شیب مؤثر زمین از طریق ترانس‌بندی و مدیریت مناسب رواناب اجرا شود (11). در شیب‌های زیاد، نیروی گرانش اثر بیش‌تری بر ذرات خاک اعمال می‌کند و این ذرات با بارندگی یا جریان آب به‌راحتی از سطح خاک جدا می‌شوند (12). لایه فاصله از آبراهه و تراکم آبراهه بر اساس نقشه آبراهه‌ها (استخراج از نرم‌افزار SAGA GIS) و به‌ترتیب با استفاده از تابع Euclidean distance و Line Density در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شدند. مناطق با تراکم زهکشی بالا معمولاً رواناب و رسوب بیش‌تری تولید می‌کنند، اما با مدیریت صحیح، می‌توان اثرات منفی این عامل را کاهش داد (13). تراکم زیاد زهکشی باعث می‌شود رسوبات سریع‌تر به خروجی سیستم منتقل شوند، زیرا زمان نگهداری رسوب در محل کاهش می‌یابد (14). شبکه‌های زهکشی متراکم‌تر تمایل دارند رواناب را سریع‌تر تخلیه کنند. این امر می‌تواند منجر به افزایش سرعت جریان و کاهش زمان تمرکز شود. همچنین در این مناطق، پتانسیل فرسایش خاک به دلیل جریان‌های متمرکز بیش‌تر است (15). فاصله از آبراهه می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بر مقدار و نحوه جابجایی رسوبات، شدت فرسایش و رواناب تأثیر بگذارد

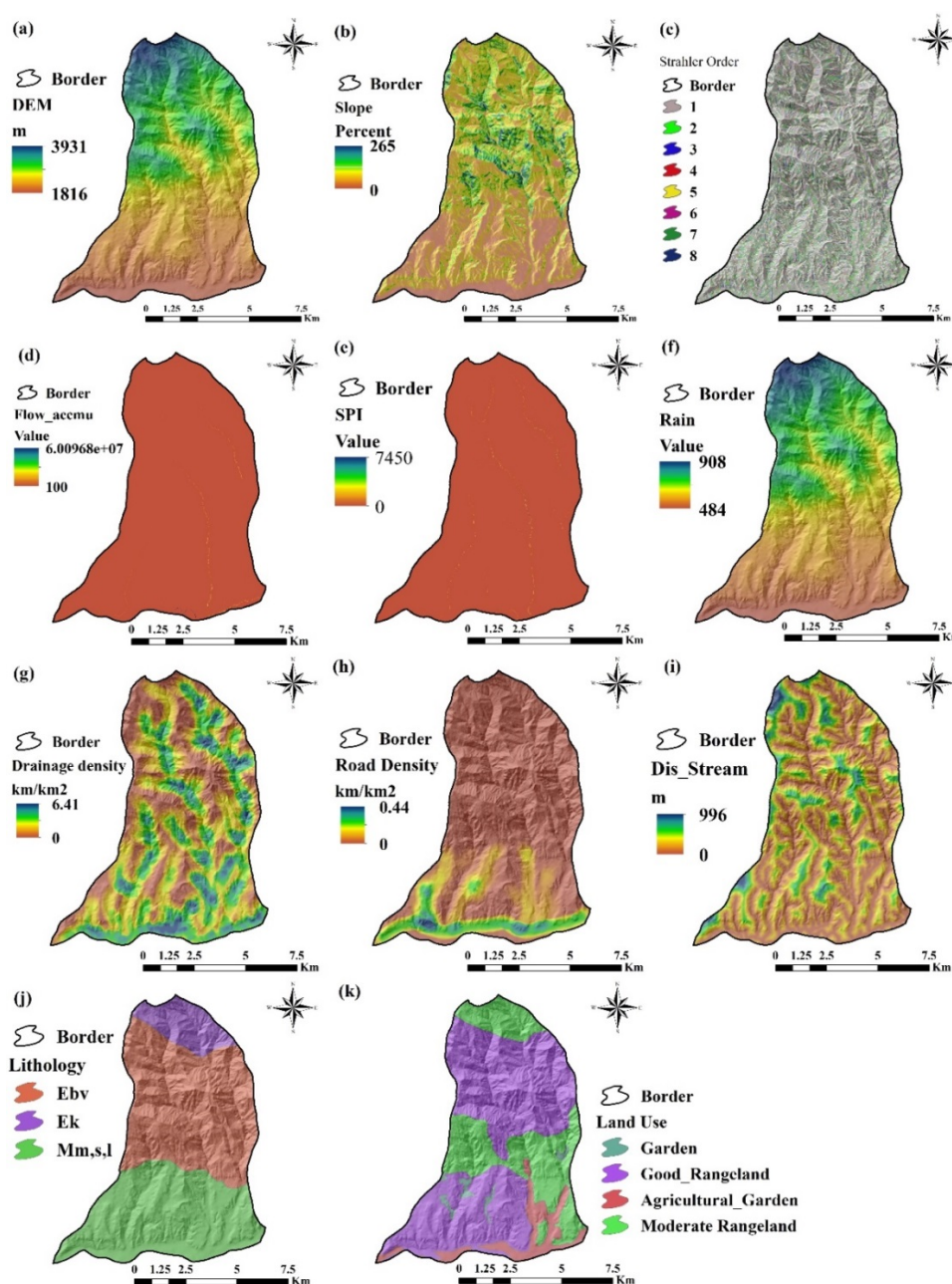
(7). مناطقی که به آبراهه نزدیک‌تر هستند، به دلیل رواناب متمرکز و سرعت جریان بالاتر، در معرض فرسایش شدیدتری قرار دارند (16). سنگ‌شناسی به‌عنوان یک عامل مهم در تغییرات مکانی و زمانی زهکشی، میزان نفوذپذیری، هیدرولوژی و تولید رسوب آبخیز در نظر گرفته می‌شود (17). این تأثیر از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سنگ‌ها و خاک‌های حاصل از آن‌ها نشأت می‌گیرد. در مناطقی با لیتولوژی متفاوت، ترکیب اثر سنگ‌شناسی با دیگر عوامل مانند اقلیم، شیب و پوشش گیاهی، می‌تواند تأثیرات پیچیده‌ای بر میزان فرسایش و تولید رسوب داشته باشد (18). کاربری اراضی و نوع استفاده از زمین و فعالیت‌های انسانی می‌تواند بر تولید رواناب، فرسایش خاک، کیفیت آب و عملکرد سازه‌های آبخیزداری تأثیر بگذارد (19). لایه کاربری اراضی از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان البرز دریافت شده است و به کمک کارشناسان مربوطه در برخی مناطق اصلاحاتی بر روی آن انجام شده است. کاربری اراضی جز شاخص‌های اکولوژیک دسته‌بندی می‌شود و به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم بر روی فرآیندهای هیدرولوژیک مثل نفوذپذیری، میزان تولید رسوب، میزان فرسایش، تبخیر و تعرق و تولید رواناب و سیل تأثیرگذار است (20). لایه شاخص قدرت آبراهه (جریان) با استفاده از نرم‌افزار SAGA GIS تهیه شد. شاخص SPI^1 نشان‌دهنده قدرت جریان آبراهه است و افزایش آن باعث کاهش نفوذ و افزایش گل‌آلودگی و افزایش تخریب و تولید رسوب می‌شود. شاخص قدرت آبراهه یکی از شاخص‌های هیدرولوژیکی است که برای ارزیابی قدرت جریان آب در آبراهه‌ها و تحلیل فرایندهای فرسایش خاک استفاده می‌شود (21). این شاخص به‌طور مستقیم نشان‌دهنده توانایی

آبراهه برای جابجایی رسوبات و تغییرات مورفولوژیکی در طول مسیر خود است. این شاخص نه تنها به شناسایی مناطق حساس کمک می‌کند، بلکه در بهینه‌سازی هزینه‌ها و افزایش پایداری سازه‌ها نیز مؤثر است (22). بارندگی یکی از مهم‌ترین عوامل طبیعی است که بر میزان تولید رسوب، فرسایش خاک و رواناب تأثیر می‌گذارد. بارندگی با شدت زیاد و طولانی‌مدت (اشباع خاک و افزایش رواناب) می‌تواند سبب ایجاد رواناب سطحی بیشتر شود، زیرا خاک فرصت جذب آب را پیدا نمی‌کند (23). در مناطقی با توزیع نامتوازن بارش، سازه‌ها باید در نقاط حساس‌تر و در مناطقی با بیش‌ترین جمع‌آوری رواناب طراحی و جانمایی شوند. بارندگی شدید ممکن است باعث افزایش فرسایش خاک و انتقال رسوبات به سازه شود که این موضوع در طراحی و مکان‌یابی باید لحاظ شود (24). نقشه بارندگی با استفاده از اطلاعات 15 ایستگاه باران‌سنجی و هواشناسی در طی یک دوره آماری (18 ساله) به‌صورت گرادیان بارندگی تهیه شده است. جهت تعیین بارندگی متوسط منطقه از رابطه زیر استفاده شده است:

$$Y = 0.2003X + 120.83 \quad (R^2: 8035)$$

که در آن، X ارتفاع (نقشه DEM) و Y میزان بارندگی در هر پیکسل (10 در 10 متر) است. رتبه آبراهه به دلیل ارتباط آن با دبی و رسوب نقش مهمی در تصمیم‌گیری برای مکان‌یابی و طراحی سازه‌های آبخیزداری دارد. آبراهه‌های رتبه پایین معمولاً منبع رسوب هستند، در حالی‌که آبراهه‌های

رتبه بالا محل تجمع رسوبات. در آبراهه‌های با رتبه پایین، سازه‌های کوچک‌تر و کم‌هزینه‌تر اجرا می‌شوند، اما در رتبه‌های بالاتر، سازه‌ها بزرگ‌تر و پرهزینه‌تر هستند (25). عامل رتبه آبراهه‌ها با استفاده از نقشه مدل رقومی ارتفاعی و در نرم‌افزار SAGA GIS تهیه شده است. تجمع جریان، به‌عنوان یک عامل کلیدی در تحلیل شبکه زهکشی، تأثیرات قابل‌توجهی بر رواناب، فرسایش و تولید رسوب دارد. در مناطق با تجمع جریان بالا، این فرآیندها معمولاً شدیدتر هستند و نیاز به مدیریت دقیق‌تر دارند (26). عامل تجمع جریان نیز با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی و در نرم‌افزار SAGA GIS تهیه شده است. تجمع جریان بیانگر مقدار زیاد رواناب و در نتیجه احتمال خطر زیاد سیلاب است (27). لایه تراکم جاده بر اساس نقشه جاده‌ها و با استفاده از تابع Line Density در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. جاده‌ها تغییرات قابل‌توجهی در هیدرولوژی، فرسایش خاک و پایداری اکوسیستم‌های آبخیز ایجاد می‌کنند و بنابراین یکی از عوامل تأثیرگذار در جانمایی و طراحی سازه‌های آبخیزداری هستند. جاده‌ها به دلیل سطح غیرقابل نفوذ میزان رواناب سطحی را افزایش می‌دهند و می‌توانند منجر به تغییر در الگوهای جریان آب شوند (28). این امر بر جانمایی سازه‌های آبخیزداری تأثیر می‌گذارد. بنابراین، سازه‌های کنترل سیلاب باید در مکان‌هایی که جاده‌ها تأثیر قابل‌توجهی بر جریان دارند، طراحی شوند (29). شکل 3 عوامل مورد استفاده در پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل 3- عوامل مورد استفاده در پژوهش حاضر.

Figure 3. Factors used in the current research.

داده‌های موجود، توزیعی است که بیش‌ترین آنتروپی را داشته باشد، با این فرض که محدودیت‌های مشخصی که از داده‌ها استخراج می‌شوند، رعایت شوند. این اصل بیان می‌کند که وقتی با اطلاعات ناکافی برای تعیین دقیق یک توزیع احتمال مواجه هستیم، باید توزیعی را انتخاب کنیم که بیش‌ترین

مدل‌های مورد استفاده

مدل حداکثر آنتروپی (MaxEnt): مدل حداکثر آنتروپی یک روش قدرتمند در آمار و یادگیری ماشین است که برای تخمین توزیع احتمال از داده‌ها به کار می‌رود. این مدل بر پایه اصل حداکثر آنتروپی بنا شده است که بیان می‌کند بهترین توزیع احتمال برای

آنتروپی را داشته باشد. این کار به این معنی است که تا حد امکان، کم‌ترین فرضیات را در مورد توزیع داده‌ها داشته باشیم و فقط به اطلاعات موجود اتکا کنیم. مدل حداکثر آنتروپی یکی از روش‌های یادگیری ماشینی است که به صورت گسترده در سال‌های اخیر برای پهنه‌بندی مخاطرات طبیعی مورد استفاده قرار گرفته است و مبتنی بر نقاط حضور می‌باشد. مزیت این روش آن است که برای پیش‌بینی رفتار یک گونه یا پدیده نیاز به نقاط عدم حضور آن گونه یا پدیده ندارد بلکه از یک سری عوامل تأثیرگذار (11 عامل مؤثر در جانمایی سازه‌های آبخیزداری) و همچنین نقاط حضور آن پدیده (نقاط سازه برای مدل‌سازی) استفاده می‌کند. استفاده از مدل‌هایی که تنها نیازمند داده‌های حضور (نقاط سازه) هستند، می‌تواند از خطاهای حاصل از به‌کارگیری داده‌های عدم حضور اشتباه، جلوگیری کند. یکی از مهم‌ترین مزایای مدل MaxEnt قابلیت این مدل در شناسایی مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار و تحلیل حساسیت متغیرها به روش جک‌نایف¹ می‌باشد که در این پژوهش این مهم انجام شده است. ارزیابی این مدل با استفاده از منحنی ROC² امکان‌پذیر است که سطح زیر نمودار AUC به‌دست آمده به عنوان معیاری از قدرت تفکیک مدل در تشخیص نقاط حضور و عدم حضور مورد توجه قرار می‌گیرد (30).

مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN): مدل شبکه عصبی مصنوعی یک مدل محاسباتی است که از ساختار و عملکرد شبکه‌های عصبی زیستی الهام گرفته شده است. این مدل‌ها از واحدهای پردازشی به نام نورون یا گره تشکیل شده‌اند که به صورت لایه‌ای و با وزن‌های قابل تنظیم به هم متصل شده‌اند. شبکه‌های عصبی مصنوعی قادر به یادگیری از داده‌ها،

تشخیص الگوها، طبقه‌بندی، پیش‌بینی و حل مسائل پیچیده هستند. شبکه عصبی مصنوعی یک سازوکار محاسباتی است که قادر است با گرفتن اطلاعات و محاسبه کردن آن‌ها، یک سری اطلاعات جدید را ارائه دهد. شبکه‌های عصبی مصنوعی انواع مختلفی دارند که هر کدام برای کاربردهای خاصی مناسب هستند. در این پژوهش از شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه به دلیل کارایی بهتر نسبت به دیگر انواع شبکه عصبی مصنوعی (31) استفاده شده است. الگوریتم‌های مختلفی جهت محاسبه وزن‌های بهینه ارائه شده است که در این میان الگوریتم پس‌انتشار خطا پرکاربردترین آن‌هاست. این شبکه‌ها به صورت پیشرو عمل نموده و در ساختار تمامی آن‌ها سعی شده تا حتی‌الامکان طراحی بهینه با یک لایه میانی صورت پذیرد. آموزش شبکه‌های پرسپترون چندلایه با استفاده از الگوریتم آموزش پس‌انتشار خطا انجام می‌شود. فرآیند عملکرد این شبکه‌ها بدین نحو است که لایه ورودی، نسبت به پذیرش داده‌ها اقدام نموده و لایه (لایه‌های) میانی عمل فرآوری داده‌ها را انجام می‌دهند. در نهایت، لایه خروجی نیز به نمایش خروجی‌های حاصل از کاربرد مدل اقدام می‌نماید. در طی مرحله مدل‌سازی، ضرایب مربوط به خطای موجود در گره‌ها به صورت سعی و خطا تصحیح می‌شود که در اغلب موارد از شاخص خطای متوسط داده‌ها بهره برده می‌شود. این امر از طریق مقایسه خروجی‌های مدل با داده‌های ورودی مشاهداتی انجام می‌پذیرد. اجرای روش شبکه عصبی مصنوعی در نرم‌افزار Modeco انجام شد.

پیش‌پردازش عوامل ورودی به منظور بررسی عدم وجود هم‌خطی چندگانه با استفاده از عامل تورم واریانس و شاخص ضریب تحمل³ انجام شد. این شاخص نشان می‌دهد که رفتار یک متغیر تا چه اندازه تحت تأثیر دیگر متغیرها تغییر می‌کند و به عبارتی دیگر،

1- Jackknife

2- Receiver Operating Characteristic

3- Tolerance coefficient index

خصوص توانایی مدل در پیش‌بینی فراهم می‌آورد (33). مقدار AUC حاصل از منحنی مشخصه عملکرد گیرنده، بین 0/5 تا 1 است و مقدار کم‌تر از 0/5 نشان‌دهنده آن است که مدل نمی‌تواند رویداد مدنظر را پیش‌بینی کند و ایده‌آل‌ترین مدل، بیشترین سطح زیر منحنی (مقدار 1) را دارد (9).

نتایج و بحث

همان‌طور که در بخش مواد و روش‌ها اشاره شد ابتدا تست هم‌خطی بین عوامل انجام گرفت (جدول 2). نتایج نشان داد که بین عوامل هم خطی وجود ندارد و بنابراین همه عوامل در روند مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند.

هم‌خطی بین فاکتورها دلالت بر آن دارد که فاکتورهای مرتبط می‌توانند به‌وسیله فاکتور دیگر پیش‌بینی شود و استفاده از عواملی با هم‌خطی بالا سبب بروز خطا در نقشه نهایی می‌گردد (32). در این پژوهش مقدار VIF و Tolerance در نرم‌افزار آماری SPSS 20 محاسبه شد. میزان اهمیت هر یک از عوامل به‌کار رفته در تبیین مدل با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی و با استفاده از نمودار جکنایف تعیین شد و انجام این فرآیند در نرم‌افزار MaxEnt انجام می‌شود (30). در این پژوهش، کارایی مدل‌ها در مراحل آموزش و اعتبارسنجی با استفاده از (ROC) و (AUC) ارزیابی شد. نتایج مرحله آموزش مدل دلالت بر مناسب بودن مدل داشته و نتایج مرحله اعتبارسنجی اطلاعاتی را در

جدول 2- نتایج آنالیز تست هم‌خطی بین عوامل مورد استفاده در پژوهش.

Table 2. The results of the collinearity test analysis between the factors used.

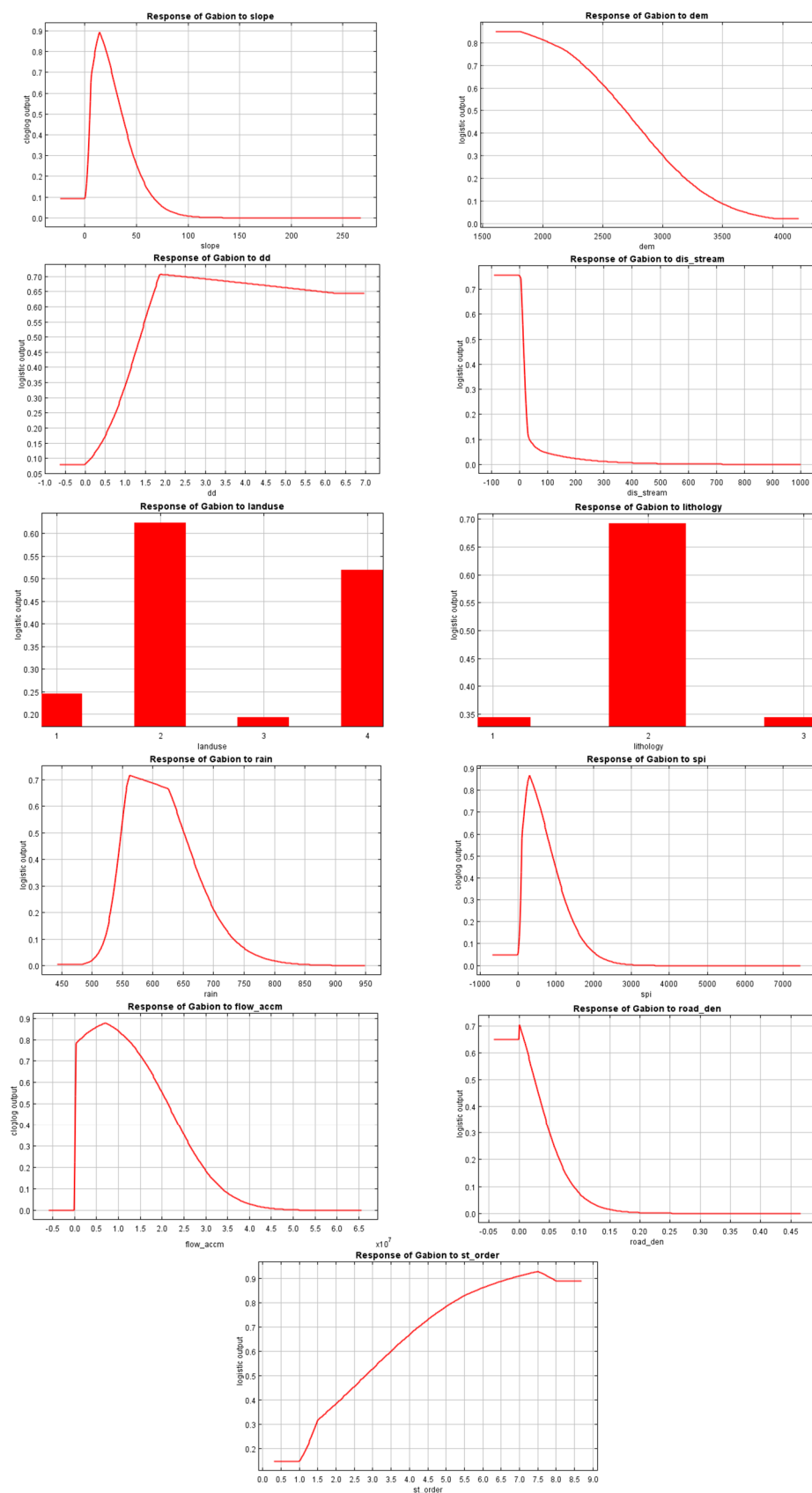
VIF	Tolerance	عوامل Factors
1.172	0.991	کاربری اراضی Land use
1.375	0.975	تراکم زهکشی Drainage density
1.453	0.937	فاصله از آبراهه Distance from stream
1.951	0.725	لیتولوژی Lithology
2.251	0.682	بارندگی Rainfall
2.382	0.562	شاخص قدرت آبراهه SPI
2.676	0.412	تراکم جاده Road density
3.315	0.381	رتبه آبراهه Stream order
3.517	0.341	شیب Slope
3.735	0.274	تجمع جریان Flow Accumulation
3.867	0.231	مدل رقومی ارتفاعی DEM

منحنی پاسخ تغییرات عوامل در مدل حداکثر آنروپی: منحنی پاسخ تغییرات ارتفاع نشان داد که با افزایش ارتفاع پتانسیل احداث سازه‌های آبخیزداری کاهش پیدا کرده است. از دلایل کاهش پتانسیل ایجاد سازه در ارتفاعات بالاتر آبخیز کوئین می‌توان به تغییر الگوی بارندگی از باران به برف اشاره کرد که برف به مرور زمان ذوب می‌شود و به یکباره تجمع جریان صورت نمی‌گیرد (34) و همچنین در ارتفاعات بالاتر رتبه آبراهه کاهش پیدا می‌کند و مناسب سازه‌های گابیون و سنگ و ملات نمی‌باشد. لازم به ذکر است که شرایط خاص توپوگرافی آبخیز کوئین و عدم دسترسی به ارتفاعات بالاتر نیز یکی از دلایل عدم پتانسیل احداث سازه در ارتفاعات بالاتر است. اهمیت نقش ارتفاع بر روی جانمایی سازه‌های آبخیزداری در مطالعات محققان دیگر از جمله (4، 35 و 36) نیز مورد تاکید قرار گرفته است. منحنی پاسخ تغییرات شیب نشان داد که با افزایش شیب پتانسیل احداث سازه‌های آبخیزداری کاهش پیدا کرده است. از دلایل کاهش پتانسیل احداث سازه‌های آبخیزداری در شیب‌های بالا عدم وجود مخزن نامناسب (37)، عدم ایمنی کافی جهت استقرار سازه به دلیل رانش و ریزش (38) و عدم دسترسی (راه دسترسی) مناسب می‌باشد. لازم به ذکر است که در شیب‌های تند و بالا بیش‌تر سازه‌های خشکه‌چین احداث می‌شوند. اهمیت بررسی شیب در ایجاد رسوب و رواناب و اثر آن بر پتانسیل احداث سازه در مطالعات (7، 10، 11، 12 و 29) نیز مورد تاکید ویژه قرار گرفته است. منحنی پاسخ فاصله از آبراهه نشان داد که با افزایش فاصله از آبراهه میزان پتانسیل احداث سازه‌های آبخیزداری کاهش پیدا می‌کند. به دلیل این‌که بیش‌ترین میزان تجمع جریان در آبراهه اتفاق می‌افتد (26) و به همین خاطر افزایش فاصله از آبراهه کاهش پتانسیل احداث سازه را به‌دنبال دارد. لازم به ذکر است با توجه به اهمیت

آبراهه‌ها در احداث سازه‌های آبخیزداری؛ عامل فاصله از آبراهه در مطالعات (4، 36 و 39) نیز مورد استفاده قرار گرفته است. منحنی پاسخ تراکم آبراهه نشان داد که با افزایش میزان تراکم آبراهه‌ها در سطح حوزه میزان پتانسیل احداث سازه آبخیزداری افزایش پیدا می‌کند. از دلایل افزایش پتانسیل احداث سازه‌ها می‌توان به کاهش زمان تمرکز در سطح حوزه اشاره کرد که هر چقدر تراکم آبراهه افزایش پیدا کند جریان‌های سطحی زودتر تجمع پیدا می‌کنند و باعث افزایش میزان تولید رواناب و افزایش رسوبات می‌شوند. پژوهش‌گران دیگر مثل (9، 22 و 29) نیز بر اهمیت تراکم آبراهه‌ها و بررسی آن جهت جانمایی سازه‌های آبخیزداری تاکید داشتند. منحنی پاسخ لیتولوژی نشان داد که واحد توف سبز و شیل توفی (سازند کرج) دارای بیش‌ترین پتانسیل احداث سازه آبخیزداری بوده‌اند. از دلایل این امر می‌توان به میزان فرسایش مکانیکی و تولید رسوب بیش‌تر در این واحدها اشاره کرد. لازم به ذکر است که واحد فوق بیش‌ترین میزان مساحت را در آبخیز کوئین دارد. پژوهش‌گرانی مانند (7، 35، 36 و 39) واحدهای لیتولوژی را با توجه به میزان تولید رسوب و فرسایش و همچنین توانایی ایجاد رواناب و میزان نفوذ به‌عنوان یک عامل مهم در جانمایی احداث سازه‌های آبخیزداری مورد بررسی قرار داده‌اند. منحنی پاسخ کاربری اراضی نشان داد که بیش‌ترین میزان پتانسیل احداث سازه‌های آبخیزداری در کاربری مراتع متوسط اتفاق افتاده است. از دلایل افزایش میزان پتانسیل احداث سازه‌های آبخیزداری در کاربری مراتع متوسط می‌توان به کاهش میزان پوشش گیاهی و افزایش میزان رواناب و فرسایش اشاره کرد. پژوهش‌گرانی مانند (4، 29 و 39) کاربری اراضی را با توجه به میزان تولید رسوب و فرسایش و همچنین توانایی ایجاد رواناب و میزان نفوذ به‌عنوان یک عامل مهم در

جانمایی احداث سازه‌های آبخیزداری مورد بررسی قرار داده‌اند. منحنی پاسخ شاخص قدرت آبراهه نشان داد که با افزایش میزان شاخص قدرت آبراهه میزان پتانسیل احداث سازه کاهش پیدا کرده است. مقادیر بالای SPI در آبخیز مورد مطالعه در مناطق بالادست و در ارتفاعات بالاتر است و به همین دلیل با افزایش مقادیر آن پتانسیل احداث سازه کاهش پیدا کرده است. همچنین در مناطق پایین‌دست شیب کاهش پیدا کرده است که یکی از عوامل کاهش SPI در این مناطق است. اهمیت این شاخص و اثر آن بر میزان تولید و رسوب و جانمایی سازه‌های آبخیزداری در مطالعات (3 و 22) نیز مورد تاکید بوده است. منحنی پاسخ میزان بارندگی نشان داد که با افزایش میزان بارندگی از 450 تا 600 میلی‌متر پتانسیل احداث سازه افزایش پیدا کرده است و در دامنه‌های پایین‌تر و بالاتر از مقدار مذکور پتانسیل احداث سازه کاهشی بوده است. از دلایل این امر می‌توان به افزایش میزان پوشش گیاهی در اثر افزایش میزان بارندگی در ارتفاعات بالا و تغییر الگوی بارندگی در این مناطق اشاره کرد. عامل پوشش گیاهی یکی از عوامل اصلی نفوذ آب و کاهش میزان رواناب و در نتیجه کاهش میزان فرسایش و رسوب می‌باشد (12). از طرف دیگر در ارتفاعات بالاتر بیش‌تر آبراهه‌های رتبه 1 وجود دارد که به دلیل شرایط خاص توپوگرافی پتانسیل احداث سازه گابیونی را ندارند. اهمیت عامل بارندگی به عنوان یک عامل مؤثر در جانمایی سازه‌های آبخیزداری در مطالعات (9 و 29) نیز بررسی شده است. منحنی پاسخ تراکم جاده نشان داد که با افزایش تراکم جاده پتانسیل احداث سازه کاهش پیدا کرده است که این نتیجه به دلیل نزدیکی آبراهه به جاده و خطرات تخریب سازه‌ها و در نتیجه تخریب جاده می‌تواند باشد. نقش جاده‌ها در جانمایی سازه‌های

آبخیزداری به جهت کاهش زمان و هزینه‌ها خیلی مهم است و از طرف دیگر نزدیکی سازه‌های حساس و مهم در نزدیکی جاده‌ها به دلیل ریسک شکست سازه‌ها، نقش دوگانه وجود و عدم وجود جاده را در جانمایی مناطق مناسب احداث سازه‌های آبخیزداری نشان می‌دهد. پژوهش‌گران دیگر از جمله (29 و 39) این نیز از عامل راه در جانمایی سازه‌های آبخیزداری بهره گرفته‌اند. همچنین پژوهش‌گران دیگر از جمله (28 و 40) نقش شبکه راه‌ها را به عنوان یک عامل مهم در تولید رسوب و فرسایش دارای اهمیت می‌دانند. منحنی پاسخ تجمع جریان نشان داد که با افزایش تجمع جریان پتانسیل احداث سازه کاهش پیدا کرده است. با توجه به این‌که هدف سازه‌های آبخیزداری کاهش دبی پیک سیلاب و کنترل رسوب در مناطق بالادست و قبل از رسیدن به آبراهه اصلی است، در مناطقی که در آبراهه‌های اصلی تجمع جریان افزایش پیدا می‌کند، مناسب احداث سازه نمی‌باشد و بنابراین مدل به خوبی این مورد را نشان داده است. پژوهش‌گران دیگر از جمله (35 و 37) نیز به نتایج مشابه دست پیدا کرده‌اند و بر اهمیت عامل تجمع جریان در جانمایی سازه‌های آبخیزداری تاکید کرده‌اند. منحنی پاسخ رتبه آبراهه نشان داد که با افزایش میزان رتبه آبراهه میزان پتانسیل احداث سازه‌های آبخیزداری افزایش پیدا کرده است که به دلیل افزایش میزان رواناب و همچنین توانایی تولید فرسایش و حمل رسوب بیش‌تر در رتبه‌های بالاتر است (16). پژوهش‌گرانی از جمله (4، 22، 29 و 36) نیز به اهمیت بررسی رتبه آبراهه و نقش آن در جانمایی سازه‌ها و نوع مورد استفاده تاکید کرده‌اند. شکل 4 منحنی پاسخ عوامل در مدل حداکثر آنتروپی را نشان می‌دهد.

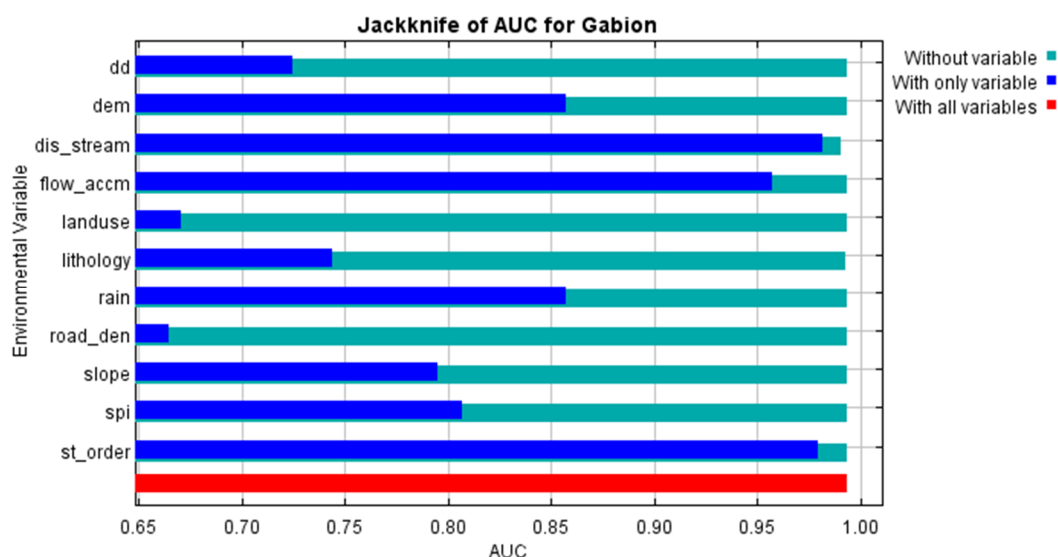


شکل 4- منحنی پاسخ پتانسیل احداث سازه بر اساس عوامل مورد استفاده.

Figure 4. Potential response curve of the construction of the check dam based on the factors used.

مناطق دارای پتانسیل احداث سازه تأثیرگذار بوده‌اند. این نتایج بیانگر این است که تمامی عوامل بر جانمایی سازه‌های آبخیزداری تأثیرگذار هستند و در هر منطقه‌ای با توجه به شرایط محیطی و نوع سازه اجرایی یک یا چندتا از عوامل نقش مهم‌تری ایفا می‌کنند که نشان‌دهنده پیچیدگی مکان‌یابی مناطق مناسب سازه‌های آبخیزداری و تأثیرپذیری از عوامل مختلف است.

شکل 5 نتایج حاصل از نمودار جکنایف جهت تعیین مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار و سهم هر یک از پارامترها را در پیش‌بینی مدل MaxEnt نشان می‌دهد. با توجه به شکل به ترتیب عوامل فاصله از آبراهه (7 و 39)، رتبه آبراهه (29)، تجمع جریان، ارتفاع (39)، میانگین بارندگی (9)، SPI، شیب (29 و 39)، لیتولوژی (5 و 39)، تراکم زهکشی (7 و 9)، کاربری اراضی و تراکم جاده مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر جانمایی سازه‌های گابیونی هستند و در پیش‌بینی

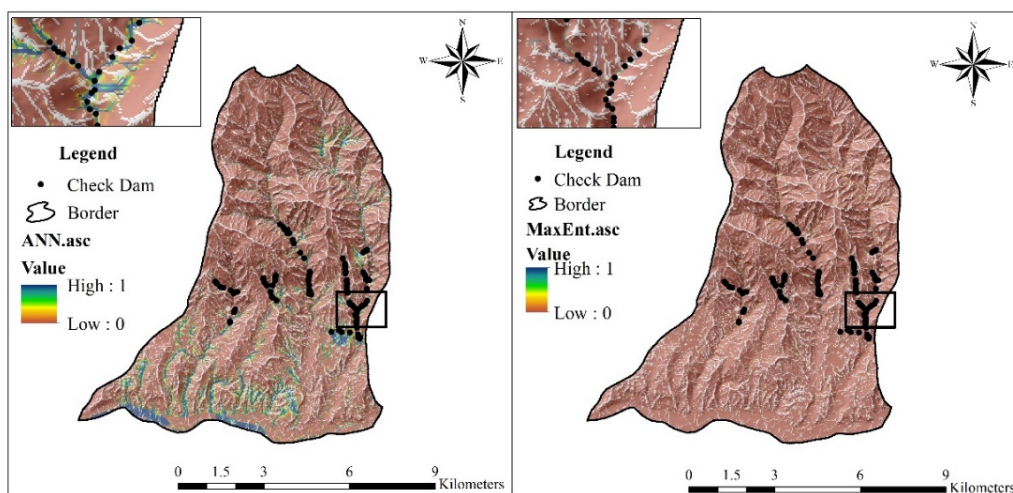


شکل 5- نتایج حاصل از آزمون جکنایف جهت تعیین مهم‌ترین عوامل.

Figure 5. Jackknife test results to determine the most important factors.

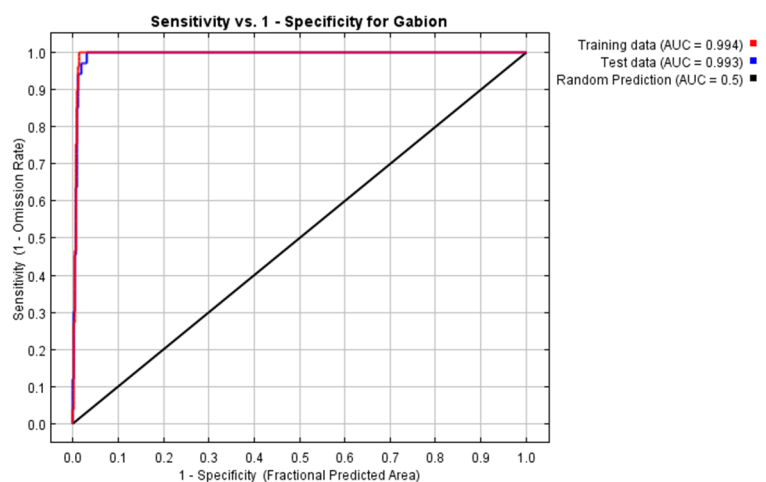
شکل 6 نقشه نهایی (نقشه رستری) مناطق دارای پتانسیل احداث سازه‌های آبخیزداری گابیونی را در آبخیز کوئین بر اساس مدل حداکثر آنتروپی و شبکه عصبی مصنوعی نشان می‌دهد. در این نقشه هر چقدر به سمت عدد 1 نزدیک می‌شویم، پتانسیل احداث سازه بیش‌تر است. شکل 7 نتایج حاصل از قدرت پیش‌بینی مدل بر اساس مقادیر ROC را در دو بخش آموزش و اعتبارسنجی در مدل حداکثر آنتروپی نشان می‌دهد. بر اساس این شکل میزان دقت پیش‌بینی مدل در هر دو بخش آموزش (0/994) و اعتبارسنجی (0/993) عالی بوده است. بنابراین با توجه به نتایج می‌توان به پیش‌بینی مدل حداکثر آنتروپی اعتماد کرد. شکل 8 نتایج حاصل از قدرت پیش‌بینی مدل بر اساس مقادیر ROC را در دو بخش آموزش و اعتبارسنجی در مدل شبکه عصبی مصنوعی برای سازه‌های گابیونی نشان می‌دهد. بر اساس این شکل میزان دقت پیش‌بینی مدل شبکه عصبی مصنوعی در هر دو بخش آموزش (1) و اعتبارسنجی (1) عالی بوده است.

شکل 6 نقشه نهایی (نقشه رستری) مناطق دارای پتانسیل احداث سازه‌های آبخیزداری گابیونی را در آبخیز کوئین بر اساس مدل حداکثر آنتروپی و شبکه عصبی مصنوعی نشان می‌دهد. در این نقشه هر چقدر به سمت عدد 1 نزدیک می‌شویم، پتانسیل احداث سازه بیش‌تر است. شکل 7 نتایج حاصل از قدرت پیش‌بینی مدل بر اساس مقادیر ROC را در دو بخش آموزش و اعتبارسنجی در مدل حداکثر آنتروپی نشان می‌دهد. بر اساس این شکل میزان دقت پیش‌بینی مدل در هر دو بخش آموزش (0/994) و اعتبارسنجی (0/993) عالی بوده است. بنابراین با توجه به نتایج می‌توان به پیش‌بینی مدل حداکثر آنتروپی اعتماد کرد. شکل 8 نتایج حاصل از قدرت پیش‌بینی مدل بر اساس مقادیر ROC را در دو بخش آموزش و اعتبارسنجی در مدل شبکه عصبی مصنوعی برای سازه‌های گابیونی نشان می‌دهد. بر اساس این شکل میزان دقت پیش‌بینی مدل شبکه عصبی مصنوعی در هر دو بخش آموزش (1) و اعتبارسنجی (1) عالی بوده است.



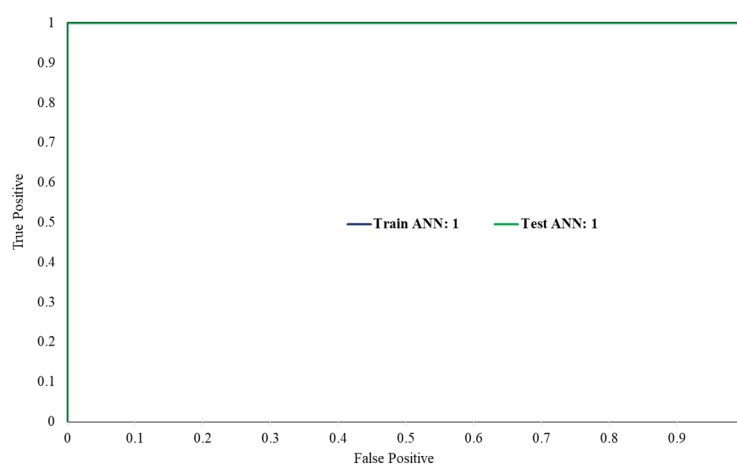
شکل 6- نقشه پتانسیل احداث سازه در آبخیز کوئین (مدل حداکثر آنتروپی و شبکه عصبی مصنوعی).

Figure 6. Potential map of construction of checkdam in the Queen watershed (MaxEnt model and ANN).



شکل 7- نتایج مقادیر ROC در بخش آموزش و اعتبارسنجی مدل حداکثر آنتروپی.

Figure 7. The results of ROC values in the training and validation section for MaxEnt model.

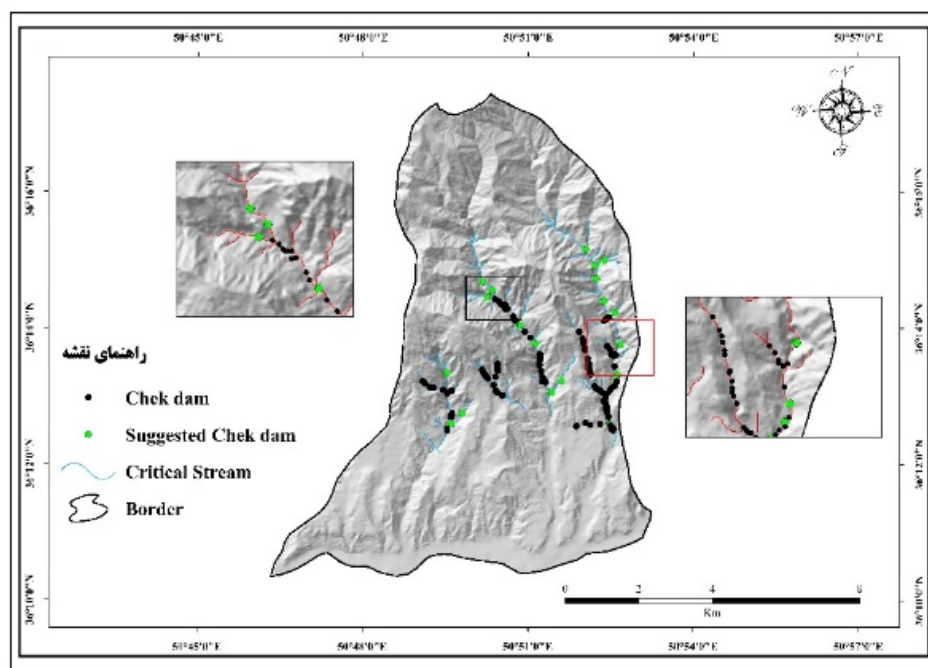


شکل 8- نتایج مقادیر ROC در بخش آموزش و اعتبارسنجی مدل شبکه عصبی مصنوعی.

Figure 8. The results of ROC values in the training and validation section for ANN model.

مدل برتر و شناسایی آبراهه‌های بحرانی بازدیدهای مختلفی از سطح آبخیز کوئین انجام گرفت. نتایج بازدیدهای میدانی نشان داد که در تمامی آبراهه‌های مورد بررسی، مدل به درستی و با دقت بسیار زیاد آبراهه‌های بحرانی را به لحاظ آورد سیل و رسوب تشخیص داده است. در مجموع 47 کیلومتر آبراهه بحرانی به لحاظ آورد سیل و رسوبات تشخیص داده شد. بنابراین در ادامه و در طی بازدیدهای مختلف تعداد 22 سازه آبخیزداری در آبراهه‌های مورد بازدید جانمایی شد (شکل 9).

بر اساس نتایج شاخص ROC مدل شبکه عصبی مصنوعی بهتر از مدل حداکثر آنتروپی عمل کرده است. هر چند مدل حداکثر آنتروپی نیز در هر دو بخش آموزش و اعتبارسنجی عالی بوده است. ولی با توجه به واقعیت میدانی موجود در آبخیز کوئین به نظر می‌رسد که مدل شبکه عصبی مصنوعی دچار بیش‌برازش شده است و نقشه نهایی پتانسیل سازه‌های آبخیزداری با خطا مواجه است و نتایج مدل حداکثر آنتروپی نتایج منطقی‌تری ارائه داده است. بعد از اجرای مدل‌های مورد استفاده در این مطالعه، جهت صحت‌سنجی نتایج مدل حداکثر آنتروپی به عنوان



شکل 9- آبراهه‌های بحرانی و نقاط پیشنهادی سازه در سطح آبخیز کوئین.

Figure 9. Critical streams and suggested checkdam points in the Queen watershed.

دارد. عدم وجود هم‌خطی بین عوامل مورد استفاده بیانگر آن است که تمامی متغیرهای انتخاب‌شده، اطلاعات منحصر به فردی را به مدل ارائه داده‌اند. نتایج نشان داد که مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار شامل فاصله از آبراهه، رتبه آبراهه، تجمع جریان، ارتفاع، میزان بارندگی و شیب بودند که هر یک به صورت مستقیم یا

نتیجه‌گیری کلی

این پژوهش به بررسی جانمایی بهینه سازه‌های آبخیزداری در حوزه آبخیز کوئین با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین پرداخته است. نتایج نشان داد که مدل حداکثر آنتروپی قابلیت بالایی در پیش‌بینی مکان‌های مناسب برای احداث سازه‌های آبخیزداری

در تحلیل‌ها ادغام شوند. در نهایت، بهره‌گیری از این فناوری در برنامه‌های اجرایی سازمان‌های مسئول می‌تواند باعث کاهش هزینه‌ها، افزایش دقت مکان‌یابی و بهبود مدیریت منابع آب و خاک در کشور شود. در نهایت، با توجه به اهمیت سازه‌های آبخیزداری در کاهش فرسایش خاک و کنترل سیلاب، به‌کارگیری مدل‌های داده‌محور به‌ویژه مدل حداکثر آنتروپی در مکان‌یابی بهینه این سازه‌ها پیشنهاد می‌شود. این روش نه تنها باعث افزایش دقت در تصمیم‌گیری می‌شود، بلکه هزینه‌های اجرایی را نیز کاهش داده و بهره‌وری پروژه‌های آبخیزداری را بهبود می‌بخشد. بنابراین، استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین به‌ویژه مدل حداکثر آنتروپی می‌تواند دقت مکان‌یابی را افزایش داده و در نتیجه منجر به بهینه‌سازی هزینه‌ها و کاهش اثرات منفی بر محیط‌زیست شود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان البرز به دلیل حمایت‌های بی‌دریغ آنان در بازدیدهای میدانی و داده‌ها تشکر و قدردانی می‌کند. نویسندگان از داوران این مقاله که با نظرات خود موجب بهبود متن حاضر شده‌اند تشکر می‌نمایند. نویسندگان از دانشگاه تهران که موجبات تسهیل انجام این پژوهش را فراهم نموده‌اند تشکر می‌نمایند.

داده‌ها، اطلاعات و دسترسی

مقاله حاضر، بخشی از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد نویسنده اول می‌باشد. کلیه اطلاعات تحقیق از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان البرز و بازدیدهای میدانی دریافت شده است.

غیرمستقیم بر پتانسیل احداث سازه‌ها تأثیرگذار بوده‌اند. این نتایج نشان‌دهنده آن است که ترکیبی از ویژگی‌های هیدرولوژیکی و توپوگرافیکی در انتخاب مکان مناسب برای سازه‌های آبخیزداری نقش کلیدی ایفا می‌کنند. نتایج نشان داد که مناطق دارای شیب زیاد و ارتفاع بالا به دلیل عدم وجود مخزن مناسب و مشکلات اجرایی، پتانسیل کم‌تری برای احداث سازه داشتند. هم‌چنین مدل‌های یادگیری ماشینی با تحلیل حجم بالای داده‌ها و در نظر گرفتن عوامل مختلف، دقت تصمیم‌گیری را بهبود بخشیدند. نتایج مدل MaxEnt در بازدیدهای میدانی تأیید شد و مناطق پیشنهادی آن برای احداث سازه‌ها، در 47 کیلومتر از آبراهه‌های بحرانی، مطابقت بالایی با واقعیت‌های محیطی داشت. در نهایت، تعداد 22 سازه آبخیزداری در آبراهه‌های موردبررسی جانمایی شدند که نشان‌دهنده دقت بالای مدل در انتخاب مناطق بحرانی برای کنترل رسوب و کاهش خسارات ناشی از سیلاب است. لازم به ذکر است که انتخاب نادرست محل احداث سازه‌های آبخیزداری می‌تواند منجر به کاهش اثربخشی سازه‌ها، افزایش هزینه‌های اجرایی و حتی بروز مشکلات زیست‌محیطی شود. نتایج بیانگر آن است که مکان‌یابی و جانمایی بهینه سازه‌های آبخیزداری با استفاده از روش‌های نوین یادگیری ماشینی امکان‌پذیر است و از دقت بالایی برخوردار است. این پژوهش نشان داد که استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین در مکان‌یابی سازه‌های آبخیزداری می‌تواند به افزایش دقت، کاهش هزینه‌ها و بهینه‌سازی تصمیم‌گیری‌ها منجر شود. پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آینده، از داده‌های سنجش‌ازدور، روش‌های ترکیبی یادگیری ماشین و تحلیل سود- هزینه برای بهینه‌سازی تصمیمات استفاده شود. پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آینده، مدل‌های پیشرفته‌تری مورد استفاده قرار گرفته و داده‌های سنجش‌ازدور نیز

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

مرضیه رمضانی (جمع‌آوری داده، پردازش و نوشتن نسخه اولیه مقاله)، علی‌اکبر نظری سامانی (مدیریت، بازخوانی مقاله و مسئول مکاتبات)، امید اسدی نلیوان (اجرای مدل و بررسی نتایج)، علی شهبازی (مشاوره در انجام تحقیق و بازبینی کلی مقاله).

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنها می‌باشد.

حمایت مالی

این پژوهش از حمایت معاونت آموزشی و پژوهشی دانشگاه تهران در قالب پژوهانه دانشجویی نویسنده اول برخوردار بوده است. هم‌چنین اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان البرز اطلاعات را رایگان در اختیار نویسنده قرار داده است و در بازدیدهای میدانی نیز مشارکت فعال داشته است.

منابع

1. Dehghan, M., Azari, M., & Sepehr, A. (2018). A GIS-based Decision Support System to Identify Potential Sites for Soil and Water Conservation Measures (Case Study: Kakhk Watershed). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 8(1), 65-82. <https://doi.org/10.22067/geo.v7i2.66301>. [In Persian]
2. Souri, M., Jafari, M., Azarnivand, H., Ghodousi, J., & Farahpour, M. (2013). Determining suitable locations for small dams using analytical hierarchy process and geographical information systems (Case study: Kermanshah Province). *Watershed Management Research (Pajouhesh & Sazandegi)*, 97, 83-91. [In Persian]
3. Ettazarini, S. (2021). GIS-based land suitability assessment for check dam site location, using topography and drainage information: a case study from Morocco. *Environmental Earth Sciences*, 80(17), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09881-3>.
4. Zada, N., Javed, M., Ahmad, S., & Waleed, M. (2023). Dam site selection using remote sensing techniques and geographical information system (GIS): A case study of Kurram Tangi North Waziristan. *Research Square*. doi.org/10.21203/rs.3.rs-2447939/v1.
5. Zare Bidaki, R., Moradi, B., & Bahrami, H. (2021). Locating susceptible areas for short earth fill dams (Case study: Beheshtabad Watershed). *Management of Natural Ecosystems*, 1(1), 37-48. <https://doi.org/10.22034/EMJ.2021.248949>.
6. Badhe, Y., Medhe, R., & Shelar, T. (2019). Site suitability analysis for water conservation using AHP and GIS techniques: a case study of Upper Sina River catchment, Ahmednagar (India). *Hydrospatial Analysis*, 3(2), 49-59. <https://doi.org/10.21523/GCJ3.19030201>.
7. Pourghasemi, H. R., Yousefi, S., Sadhasivam, N., & Eskandari, S. (2020). Assessing, mapping, and optimizing the locations of sediment control check dam's construction. *Science of the Total Environment*, 739, 139954. <https://doi.org/10.1016/j.scst.2020.03.005>.
8. Chen, Y., Bai, L., Jiao, J., Wang, N., Li, J., Xu, Q., Yan, X., & Tang, B. (2023). Recognition of suitable small watersheds for check dam construction on the Loess Plateau. *Land degradation and development*, 34(14), 4441-4455. <https://doi.org/10.1002/ldr.4788>.

9. Al-Ruzouq, R., Shanableh, A., Yilmaz, A. G., Idris, A., Mukherjee, S., Khalil, M. A., & Gibril, M. B. A. (2019). Dam site suitability mapping and analysis using an integrated GIS and machine learning approach. *Water*, 11(9), 1880. <https://doi.org/10.3390/w11091880>.
10. Wang, H., Pang, G., Yang Q., Long, Y., Wang, L., Chunmei Wang, C., Hu, S., Wang, Z., & Yang, A. (2024). Effects of slope shape on soil erosion and deposition patterns based on SfM-UAV photogrammetry. *Geoderma*, 451. doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.117076.
11. Chen, T., Shu, J., Han, L., Tian, G., Yang, G., & Jinxing Lv, J. (2022). Modeling the effects of topography and slope gradient of an artificially formed slope on runoff, sediment yield, water and soil loss of sandy soil. *Catena*, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106060>.
12. Deng, L., Sun, T., Fei, K., Zhang, L., Fan, X., Wu, Y., & Ni, L. (2020). Effects of erosion degree, rainfall intensity and slope gradient on runoff and sediment yield for the bare soils from the weathered granite slopes of SE China. *Geomorphology*, [doi:10.1016/j.geomorph.2019.106997](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106997).
13. Dragičević, N., Barbara Karleuša, B., & Ožanić, N. (2019). Different Approaches to Estimation of Drainage Density and Their Effect on the Erosion Potential Method. *Water*, 11(3), 593. <https://doi.org/10.3390/w11030593>.
14. Shi, Z. H., Ai, L., Li, X., Huang, X. D., Wu, G. L., & Liao, W. (2013). Partial least-squares regression for linking land-cover patterns to soil erosion and sediment yield in watersheds. *Journal of Hydrology*, 498, 165-17. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.031.
15. Strahler, A. N. (1964). *Chow's Handbook of Applied Hydrology*; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 439-476.
16. Ghosal, K., & Bhattachary, S. D. (2024). Impact of soil erosion and resultant sediment yield on different stream orders. *Modern Cartography Series*. Chapter 20(12), 513-536. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-23890-1.00020-7>.
17. Miller, J. R., Ritter, D. F., & Kochel, R. C. (1990). Morphometric assessment of lithologic controls on drainage basin evolution in the Crawford Upland, south-central Indiana. *American Journal Science*, 290, 569-599. <https://doi.org/10.2475/ajs.290.5.569>.
18. Li, Z., Xu, X., Zhu, J., Xu, C., & Wang, K. (2019). Effects of lithology and geomorphology on sediment yield in karst mountainous catchments. *Geomorphology*, 343, 119-128. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.07.001>.
19. Zhao, G., Kondolf, G. M., Mu, X., Han, M. W., He, Z., Rubin, Z., & Sun, W. Y. (2017). Sediment yield reduction associated with land use changes and check dams in a catchment of the Loess Plateau, China. *Catena*, 148, 126-137. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.05.010>.
20. Nachappa, T. G., Tavakkoli, S., Gholamnia, Kh., Ghorbanzadeh, O., Rahmati, O., & Blaschke, T. (2020). Flood susceptibility mapping with machine learning, multi-criteria decision analysis and ensemble using Dempster Shafer Theory. *Journal of Hydrology*, 590, 125275. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125275>.
21. Ghunow, K., MacVicar, B. J., & Ashmore, P. (2021). Stream power index for networks (SPIN) toolbox for decision support in urbanizing watersheds. *Environmental Modelling & Software*, 144, 105185. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105185>.
22. Rahmati, O., Kalantari, Z., Samadi, M., Uuemaai, E., Moghaddam, D., Asadi Nalivan, O., Destouni, G., & Tien Bui, D. (2019). GIS-Based Site Selection for Check Dams in Watersheds: Considering Geomorphometric and Topo-Hydrological Factors. *Sustainability*, 11, 5639; [doi: 10.3390/su11205639](https://doi.org/10.3390/su11205639).
23. Wang, L., Li, Y., Wu, J., An, Z., Suo, L., Ding, J., Li, S., Wei, D., & Jin, L.

- (2023). Effects of the Rainfall Intensity and Slope Gradient on Soil Erosion and Nitrogen Loss on the Sloping Fields of Miyun Reservoir. *Plants*, 12(3), 423. doi.org/10.3390/plants12030423.
24. Tokarčik, O., & Hofierka, J. (2024). Designing flash flood control measures for urban areas using the Monte Carlo water flow simulation. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 15(1). doi.org/10.1080/19475705.2024.2361806.
25. Mohammed, A., Pradhan, B., & Mahmood, Q. (2019). Dam site suitability assessment at the Greater Zab River in northern Iraq using remote sensing data and GIS. *Journal of Hydrology*, 574, 964-979, [doi:10.1016/j.jhydrol.2019.05.001](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.001).
26. Yi, Z., Dai, Q., Yan, Y., Yao, Y., Lu, Y., Zhang, Y., Zhu, L., Xu, X., Wang, Y., Zhang, Y., Du, Y., & Xu, Y. (2022). Effects of concentrated flow changes on runoff conversion and sediment yield in gently sloping farmland in a karst area of SW China. *CATENA*, 215. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106331>.
27. Tien Bui, D., Hoang, N. D., Martínez-Álvarez, F., Ngo, P. T. T., Hoa, P. V., Pham, T. D., Samui, P., & Costache, R. (2020). A novel deep learning neural network approach for predicting flash flood susceptibility: A case study at a high frequency tropical storm area. *Science of the Total Environment*, 701, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134413>.
28. Yousefi, S., Moradi, H., Boll, J., & Schönbrodt-Stitt, S. (2016). Effects of road construction on soil degradation and nutrient transport in Caspian Hyrcanian mixed forests. *Geoderma*, 284, 103-112. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.09.002>.
29. Hagos, Y., Andualem, T., Mengie, M., Ayele, W., & Malede, D. (2022). Suitable dam site identification using GIS-based MCDA: a case study of Chemoga watershed, Ethiopia. *Applied Water Science*, <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01592-9>.
30. Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological modelling*, 190(3-4), 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>.
31. Chen, W., Shirzadi, A., Shahabi, H., Ahmad, B. B., Zhang, S., Hong, H., & Zhang, N. (2017). A novel hybrid artificial intelligence approach based on the rotation forest ensemble and naïve Bayes tree classifiers for a landslide susceptibility assessment in Langao County, China. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 1955-1977. <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1401560>.
32. Khosravi, K., Shahabi, H., Pham, B. T., 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. *Journal of Hydrology*, 573, 311-323. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.073>.
33. Pham, B. T., & Prakash, I. (2018). Machine learning methods of kernel logistic regression and classification and regression trees for landslide susceptibility assessment at part of Himalayan area, India. *Indian Journal of Science and Technology*, 11(12), 1-10. DOI: 10.17485/ijst/2018/v11i12/99745.
34. Yuan, S., Li, Z., Chen, L., Li P., Zhang, Z., Zhang, J., Wang, A., & kunxia Yu, K. (2022). Effects of a check dam system on the runoff generation and concentration processes of a catchment on the Loess Plateau. *International Soil and Water Conservation Research*, 10(1), 86-98. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.06.007>.
35. Iftikhar, S., Hassan, Z., & Shabbir, R. (2016). Site Suitability Analysis for Small Multipurpose Dams Using Geospatial Technologies. *Journal of Remote Sensing & GIS*, 5(2). DOI: 10.4172/2469-4134.1000162.

36. Shao, Z., Jahangir, Z., Yasir, Q., Rahman, A., & Mahmood, S. 2020. Identification of Potential Sites for a Multi-Purpose Dam Using a Dam Suitability Stream Model. *Water*, 12, 3249; doi: **10.3390/w12113249**.
37. Rahmati, O., Ghasemiyeh, H., Samadi, M., Kalantari, Z., Tiefenbacher, J., Asadi Nalivan, O., Cerda, A., Ghiasi, S., Darabi, H., Haghighi, A., & Tien Bui, D. (2020). TET: An automated tool for evaluating suitable check-dam sites based on sediment trapping efficiency. *Journal of Cleaner Production*, 266, 122051. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122051>.
38. Zhang, Z., Chai, J., Li, Z., Xu, Z. G., & Yuan, S. L. (2021). Reconstruction and effects of a failure of a typical check dam system under an extreme rainstorm on the Loess Plateau, China. *Natural Hazards*, 111(2), 1401e1419. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05101-0>.
39. Bihon, Y., Meshesha, M., Melese, D., Beyene, T., Kifle, T., & Mihretu, E. (2022). Suitable Dam Site Selection with GIS-Based Sensitivity Analysis of Factors Weight Determination (In Birr River, Upper Blue Nile, Ethiopia). *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 7(8): 1366-1386. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7067751>.
40. Jing, Y., Zhao, Q., Lu, M., Wang, A., Yu, J., Liu, Y., & Ding, S. (2022). Effects of road and river networks on sediment connectivity in mountainous watersheds. *Science of the Total Environment*. 826. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154189>.