



Application of Support Vector Machine (SVM) and Boosted Regression Tree (BRT) to Model the Sensitivity of Gully Erosion in the Watershed of Shore River Moher City

Aghil Madadi ¹✉^{ID}, Sayyad Asghari Saraskanroud ², Saeed Negahban ³^{ID}, Mehri Marhammat ⁴^{ID}

1- (Corresponding Author) Department of Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardebil, Iran

Email: a_madadi@uma.ac.ir

2- Department of Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardebil, Iran

Email: s.asghari@uma.ac.ir

3- Department of Geomorphology, Faculty of Economics, Management and Social Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran

Email: Snegahban@shirazu.ac.ir

4- Department of Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardebil, Iran

Email: meri.marhamat90@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article History:

Received:

2 August 2023

Received in revised form:

27 October 2023

Accepted:

29 November 2023

Available online:

24 December 2023

Keywords:

Boosted Regression Tree,
Gully Erosion,
Support Vector Machine,
ROC,
Physical and chemical
properties.

ABSTRACT

The aim of this study is to develop sensitive gully erosion models by implementing a machine learning algorithm (Support Vector Machine and Boosted Regression Tree) in the Moher basin. First, gully areas are identified, and then 13 variables predisposing to gully erosion (Slope, Slope Direction, Topographic Wetness Index, Stream Power Index, Terrain Ruggedness Index, Distance from Waterway, Drainage Density, Distance from Road, Land use, NDVI, Avera annual Rainfall, Geology, and Soil Texture) were selected. The variance inflation coefficient was used to evaluate multicollinearity between variables. Finally, a gully erosion sensitivity map was prepared in the environment (R). Also, the effect of physical and chemical characteristics of soil on gully erosion was investigated using Multivariate Regression. Regarding the importance of variables, Geology has the most significant effect on gully erosion in the SVM model, Land use, and the BRT model. The predicted sensitivity map was validated with the help of the receiver operating characteristic (ROC) curve. The results showed that the area under the curve (AUC) in the Support Vector Machine and Boosted Regression Tree models were calculated as 0.92 and 0.94, respectively, which led to accurate prediction. Also, the results showed that the sand variable (9.299), sodium absorption ratio (7.967), and TNV (6.185) have the most significant effect on gully erosion.

Cite this article: Madadi, A., Asgharisara Skanroud, S., Negahban, S., & Marhammat, M. (2023). Application of Support Vector Machine (SVM) and Boosted Regression Tree (BRT) to Model the Sensitivity of Gully Erosion in the Watershed of Shore River Moher City. *Physical Geography Research Quarterly*, 55 (4), 83-101.

<http://doi.org/10.22059/JPHGR.2023.360424.1007775>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Pre

Extended abstract

Introduction

Currently, many countries are facing severe land degradation and soil erosion. Soil erosion caused by water is a major environmental concern, affecting approximately one billion hectares of land worldwide. Gully erosion is one of the most essential factors in land degradation in dry and semi-arid regions, causing significant soil losses and the transfer of sediments to low-altitude areas. Many researchers investigated gully erosion sensitivity using remote sensing (RS) and geographic information systems (GIS) techniques. Traditional data mining methods cannot establish the relationship between geoenvironmental factors and gully erosion processes. Therefore, machine learning models are highly efficient for evaluating areas sensitive to gully erosion. Support vector machines (SVM) and boosted regression trees (BRT) are machine-learning techniques to model gully erosion. In the lower reaches of a watershed or near agricultural lands, gully erosion caused sediment production and desertification of the region. Using SVM and BRT models, it is possible to prepare a map of gully erosion sensitivity and use zoning to reduce potential damage and manage crises.

Materials and methods

The study area covers approximately 101350 hectares and is located in southern Iran, with an elevation range of 387 to 1672 meters above sea level. The basin is situated between longitude 52°24'52" to 52°59'52"E and latitude 27°22'27" to 41°49'27"N. Initially, a gully erosion points map was created based on 200 gully and non-gully points, identified through field visits and data obtained from the Natural Resources Department of Fars province. Random non-gully points were also selected throughout the basin using a Geographic Information System (GIS). Furthermore, 13 variables were chosen for modeling based on the approach utilized by previous researchers. These variables encompassed slope, slope aspect, drainage density, distance from the stream, land use, geology, soil texture, stream power index (SPI), topographic wetness index (TWI),

topographic roughness index (TRI), average precipitation, distance from the road, and vegetation cover. Multicollinearity analysis employing the variance inflation factor (VIF) was conducted to determine the linear correlation between variables. Subsequently, machine learning algorithms, including Support Vector Machine (SVM) and Boosted Regression Trees (BRT), were employed for modeling. Finally, the accuracy of the models was evaluated using the ROC curve. Moreover, the effect of physical and chemical characteristics of soil on gully erosion was investigated using multivariate regression.

Results and discussion

Investigating the collinearity between the selected variables is crucial in creating gully erosion sensitivity maps. Among the 13 selected variables, no significant collinearity was observed in the SVM and BRT models. The areas with low sensitivity to gully erosion are mainly concentrated in the region's northern, northwestern, and southwestern parts. The moderately susceptible areas are in the middle of the basin, while the highly susceptible areas are in the southern and southeastern parts. The SVM model had an AUC value of 92.0% for the training dataset and 93.0% for the test dataset. The BRT model had an AUC value of 96.0% for the training dataset and 94.0% for the test dataset. Both models demonstrated high accuracy.

Soil erosion can cause severe environmental and human damage through natural or human-induced gully formation. In dry and semi-dry areas, the formation and development of gullies are mainly problematic and lead to a decrease in soil quantity and quality and a reduction in agricultural productivity. Additionally, the sediment resulting from soil erosion can accumulate at the basin outlet and create problems for the environment and humans. Therefore, it is essential to investigate the formation and development of gullies and determine their importance in environmental modeling and management. In the Mohr watershed, gully erosion has become a problem, and identifying vulnerable areas using SVM and BRT models is useful for sustainable land

management. Topography, slope, surface runoff, drainage density, soil erosion, soil moisture, vegetation cover, and geomorphological processes affect the formation and expansion of gullies. Most gullies are formed and expanded in the north, northeast, east, and northwest directions. Gully erosion has a positive relationship with drainage density, and gullies are formed in areas with low slopes and high moisture. Soil texture and land use are also important for controlling gully erosion. The type of relationship between erosion factors and surface cover of the region is determined based on land use. The presence of vegetation cover in this area is highly important and effective in controlling erosion. The absence of vegetation cover creates runoff and causes erosion and sedimentation on a large scale. Additionally, the impact of road networks is crucial in soil erosion. The results of geological variables show that Quaternary sediments play an important role in the formation of gully erosion. Quaternary sediments are effective in gully erosion formation due to high levels of gypsum and salt, fine-grained sediment deposits, loess instability, soil structure weakening, and lack of organic matter. Soil texture is also used as a controlling mechanism in gully erosion. The results of physical and chemical characteristics showed that the sand variable (9.299), sodium absorption ratio (7.967), and TNV (6.185) have the most significant effect on gully erosion.

Conclusion

A study was conducted to prepare a gully erosion sensitivity prediction map using machine learning algorithms (SVM and BRT) in the Shoor River watershed (Mohr county). This research investigated 13 gully erosion-sensitive variables and their performance in gully development. The entire dataset was randomly divided into 70/30 for training and validation. The area under the curve (AUC) values for SVM and BRT were 0.92 and 0.94, respectively. In both models, more than half of the watershed was classified as low to very low sensitivity (SVM: 89.22%, BRT: 92.84%), while 2.62% and 3.58% of the area were classified as highly sensitive in SVM and

BRT models, respectively. Also, the results of the physical and chemical characteristics of the soil showed that sand (9.299), sodium absorption ratio (7.967), and TNV (6.185) have the most significant effect on the expansion of gully erosion in the study area. Finally, the results showed that machine learning models can determine gully erosion boundaries, and the resulting susceptibility maps can be used as essential tools for protecting and sustainably managing gully erosion-prone areas in the study area.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

کاربرد ماشین بردار پشتیبان (SVM) و درخت رگرسیون تقویت شده (BRT) جهت مدل‌سازی حساسیت فرسایش خندقی در حوضه آبخیز رودخانه شور (شهرستان مهر)

عقیل مددی^۱ ✉، صیاد اصغری سراسکانرود^۲، سعید نگهبان^۳، مه‌ری مرحمت^۴

- ۱- نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: a_madadi@uma.ac.ir
- ۲- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران رایانامه: s.asghari@uma.ac.ir
- ۳- گروه جغرافیا، دانشکده اقتصاد، مدیریت و علوم اجتماعی، دانشگاه شیراز، ایران. رایانامه: Snegahban@shirazu.ac.ir
- ۴- گروه ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: meri.marhamat90@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف از این مطالعه توسعه مدل‌های حساس فرسایش خندقی با اجرای الگوریتم یادگیری ماشینی (ماشین بردار پشتیبان و درخت رگرسیون تقویت شده) در حوضه مهر است. ابتدا، مناطق خندقی شناسایی و پس از آن ۱۳ متغیر مستعد کننده فرسایش خندقی (شیب، جهت شیب، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص قدرت جریان، شاخص زبری سطح، فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی، فاصله از جاده، کاربری اراضی، پوشش گیاهی، متوسط بارندگی سالانه، زمین‌شناسی و بافت خاک) انتخاب شد. ضریب تورم واریانس برای ارزیابی چندخطی بین متغیرها استفاده شد. در نهایت نقشه حساسیت فرسایش خندقی در محیط (R) تهیه شد. همچنین تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بر فرسایش خندقی با استفاده از رگرسیون چند متغیره بررسی شد. از نظر اهمیت متغیرها، در مدل SVM کاربری اراضی و در مدل BRT زمین‌شناسی بیشترین تأثیر را بر فرسایش خندقی دارد. نقشه حساسیت پیش‌بینی شده با کمک منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (ROC) اعتبارسنجی شد. نتایج نشان داد که مساحت زیر منحنی (AUC) در مدل‌های ماشین بردار پشتیبان و درخت رگرسیون تقویت شده به ترتیب ۰/۹۲ و ۰/۹۴ محاسبه شد که منجر به پیش‌بینی دقیقی شد. همچنین نتایج نشان داد متغیر ماسه (۹/۲۹۹)، نسبت جذب سدیم (۷/۹۶۷) و مواد خنثی شونده (۶/۱۸۵) بیشترین تأثیر را بر فرسایش خندقی دارد.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۰۵/۱۱

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۲/۰۸/۰۵

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۰۹/۰۸

تاریخ چاپ:

۱۴۰۲/۱۰/۰۳

واژگان کلیدی:

درخت رگرسیون تقویت شده، فرسایش خندقی، ماشین بردار پشتیبان، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، R

استناد: مددی، عقیل؛ اصغری سراسکانرود، صیاد؛ نگهبان، سعید و مرحمت، مه‌ری. (۱۴۰۲). کاربرد ماشین بردار پشتیبان (SVM) و درخت رگرسیون تقویت شده (BRT) جهت مدل‌سازی حساسیت فرسایش خندقی در حوضه آبخیز رودخانه شور (شهرستان مهر). *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۵ (۴)، ۸۳-۱۰۱.

<http://doi.org/10.22059/JPHGR.2023.360424.1007775>

مقدمه

امروزه، اکثر کشورها با مشکلات ناشی از تخریب شدید زمین و فرسایش خاک مواجه هستند (Morgan, 2009). فرسایش خاک ناشی از آب به‌عنوان یک نگرانی زیست‌محیطی و منبع قابل توجهی برای انتقال رسوبات به رودخانه‌ها، به‌عنوان یک پدیده تهدیدکننده تخریب زمین است که حدود یک میلیارد هکتار در جهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. فرسایش آبی بر اساس تغییرات در ویژگی‌های مورفومتریک آن در دامنه‌های تپه‌ها به اشکال مختلف از جمله فرسایش بارانی یا پاشمانی، فرسایش ورقه‌ای یا سطحی، فرسایش شیاری یا آبراهه‌ی و فرسایش خندقی (بدلند) رخ می‌دهد. فرسایش خندقی یک فرآیند مهم تخریب زمین در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که منجر به تلفات زیاد خاک و منجر به انتقال رسوب به مناطق کم ارتفاع می‌گردد. بسیاری از محققان با استفاده از فناوری‌های RS و GIS نقشه‌برداری حساسیت فرسایش خندقی (GESM) را انجام داده‌اند. آن‌ها از روش‌های سنتی داده‌کاوی از جمله تحلیل شرطی (CA) (Conoscenti et al, 2014)، رگرسیون لجستیک (LR)، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، استفاده کرده‌اند. روش‌های سنتی داده‌کاوی نمی‌توانند رابطه بین عوامل ژئومحیطی و فرآیندهای فرسایش خندقی را ایجاد کنند. بنابراین، فناوری‌های مدل‌سازی جدیدی مورد نیاز است که از فناوری‌های داده‌کاوی سنتی فاصله می‌گیرد و عملکرد و دقت مدل را برای پیش‌بینی حساسیت فرسایش خندقی افزایش دهد. اخیراً مدل‌های یادگیری ماشینی^۱ (ML) نسبت به فناوری‌های سنتی داده‌کاوی محبوب‌تر شده‌اند.

یادگیری ماشینی یکی از فناوری‌های هوش مصنوعی است که از الگوریتم‌های کامپیوتری برای کاوش و پیش‌بینی اطلاعات با یادگیری از مجموعه داده‌های آموزشی استفاده می‌کند. مدل‌های یادگیری ماشینی برای ارزیابی نواحی حساس به فرسایش خندقی کارایی بالایی دارد (Hosseinalizadeh et al, 2019).

از جمله یادگیری‌های ماشینی که برای مدل‌سازی فرسایش خندقی (GESM) استفاده می‌شود، ماشین بردار پشتیبان^۲ (SVM) و درخت رگرسیون تقویت‌شده^۳ (BRT) است که در این تحقیق برای پیش‌بینی نقشه حساسیت فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه که احتمال توسعه خندق وجود دارد، اجرا شد.

در بخش انتهایی حوضه (جنوب و جنوب شرق) فرسایش خندقی رخ داده است. در این بخش از حوضه فرسایش خندقی را به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب اراضی کشاورزی، منشأ تولید رسوب و عامل اصلی بیابان‌زایی منطقه به شمار آورده‌اند. در این بخش از حوضه به تدریج که از شدت جریان آب و شیب زمین کاسته می‌شود و آبرفت‌ها از حرکت باز می‌ماند و در سطح زمین رسوب می‌کند. همچنین این بخش تحت تأثیر برخی عوامل طبیعی از جمله فصول مرطوب کوتاه‌مدت (بارندگی‌های ناگهانی و شدید)، فصول گرم و خشک طولانی، زمین‌شناسی، بافت خاک، شیب، ارتفاع کم منطقه و برخی عوامل مرتبط با انسان از جمله چرای بی‌رویه و اعمال نامناسب کشاورزی است، که منجر به ایجاد فرسایش خندقی در این بخش از حوضه شده است. برای کاهش خسارات احتمالی و مدیریت بحران اقداماتی مانند پهنه‌بندی می‌تواند مؤثر واقع شود. در این تحقیق با هدف اصلی تهیه نقشه‌ی حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از مدل SVM و BRT هدف‌گذاری شده است.

بررسی عوامل مؤثر بر شکل‌گیری و گسترش، مدل‌سازی و تغییرات ابعاد هندسی خندق‌ها با روش‌های مختلف اعم از سنتی و جدید صورت گرفته است که هر کدام دارای نتایج متفاوتی از یکدیگر بوده است. رشد خندق‌ها و تخریب خاک

1. Machine learning

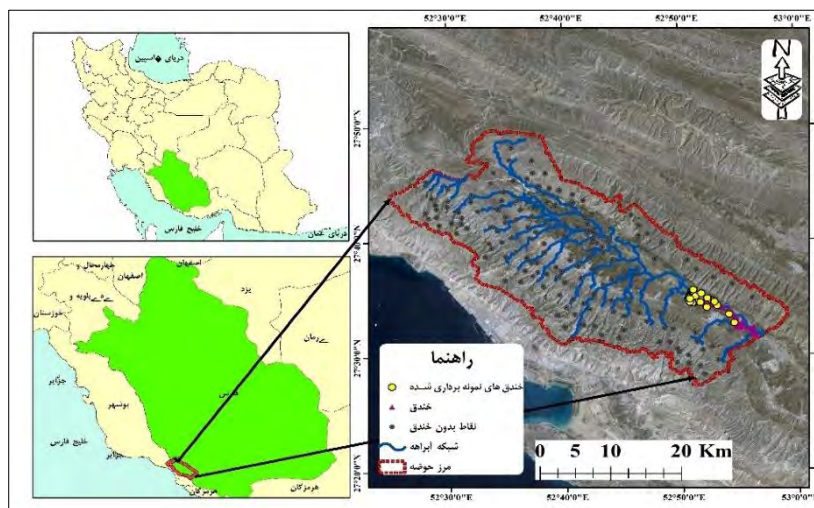
2. Support Vector Machine

3. Boosted Regression Tree

به‌عنوان نتایج مشترک بین این بررسی‌ها بوده است که به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. صفاری و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی تأثیر ویژگی‌های خاک بر مورفولوژی و گسترش فرسایش خندقی در حوضه رودخانه مهران لامرد، استان فارس با هدف ارتباط بین متغیرهای مؤثر در فرسایش خندقی با مورفولوژی خندق‌ها با استفاده از GIS و داده‌های سنجش از دور پرداختند و به این نتیجه رسیدند که خندق‌های U شکل با خندق‌های حد واسط U و V شکل از نظر ویژگی‌های TNV، OC، EC و SAR با هم تفاوت دارند. داودی‌راد و محمدی (۱۴۰۱) به بررسی دقت نقشه حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از روش‌های SVM و MARS و از منحنی تشخیص عملکرد نسبی و سطح زیر این منحنی برای ارزیابی دقت نقشه‌ها در حوضه آبخیز سازند پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که سطح زیر منحنی برای مدل‌های SVM و MARS به ترتیب ۰/۷۸۱ و ۰/۶۹۷ است. رحمتی و همکاران (۲۰۱۷) به ارزیابی مدل‌های مختلف یادگیری ماشین برای پیش‌بینی حساسیت به فرسایش خندقی با هدف مقایسه عملکرد هفت مدل پیشرفته یادگیری ماشین (SVM با چهار نوع هسته BP-ANN، RF و BRT) برای مدل‌سازی وقوع فرسایش خندقی در کشکان-پلدختر پرداختند و به این نتیجه رسیدند که از نظر دقت، مدل‌های RF، RBF-SVM، BRT و P-SVM هم در درجه برآزش و هم در عملکرد پیش‌بینی عملکرد عالی داشتند. پورقاسمی و همکاران (۲۰۲۰) به ارزیابی حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از الگوریتم ماشینی (SVM) در شهرستان کلاله، استان گلستان پرداختند. نتایج نشان داد که مساحت زیر منحنی (AUC) بر اساس اعتبارسنجی و مجموعه داده آموزشی به ترتیب ۹۴٫۳٪ و ۹۷٪ محاسبه شد. Wang و همکاران (۲۰۲۱) به پیش‌بینی فرسایش خندقی با استفاده از تأثیر نمونه‌گیری مجدد بر روی مدل‌های یادگیری ماشینی (درخت رگرسیون تقویت‌شده (BRT)، ماشین بردار پشتیبان (SVM) و مدل جنگل تصادفی (RF)) در حوضه آبخیز کندوران در استان هرمزگان پرداختند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از الگوریتم نمونه‌گیری مجدد کارایی مدل‌ها را افزایش داده است. به ترتیب مدل جنگل تصادفی، رگرسیون تقویت‌شده و ماشین بردار پشتیبان با مقدار سطح منحنی ۰/۸۵، ۰/۸۲ و ۰/۸۲ بوده است. محمدی و داودی‌راد (۲۰۲۳) به ارزیابی حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشینی (جنگل تصادفی (RF)، درخت رگرسیون تقویت‌شده (BRT)، تجزیه و تحلیل عملکردی (FDA)، مدل خطی تعمیم یافته (GLM)، تجزیه و تحلیل تفکیک مخلوط (MDA)) در حوضه آبخیز سازند پرداختند. نتایج نشان داد که مدل‌های جنگل تصادفی (RF) و درخت رگرسیون تقویت‌شده (BRT) بهترین طبقه‌بندی برای فرسایش خندقی را داشته است.

محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه با مساحتی حدود ۱۰۱۳۵۰ هکتار و با دامنه‌ی ارتفاعی بین ۳۸۷ تا ۱۶۷۲ متر از سطح دریا در بخش جنوبی ایران قرار گرفته است. این حوضه بین ۵۸° ۲۴' تا ۵۲° ۵۹' ۱۴" طول شرقی و ۲۳° ۲۷' ۲۷" تا ۴۱° ۴۹' عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). بیش از نیمی از حوضه دارای مورفولوژی دشت با شیب ملایم و بخشی از رشته‌کوه‌های زاگرس است. میانگین بارندگی سالانه از ۱۴۳ تا ۲۲۲ میلی‌متر متغیر است. متوسط درجه حرارت سالانه ۲۳ درجه سانتی‌گراد و متوسط تبخیر سالانه ۲۵۰۰ میلی‌متر است که در تعیین اقلیم به روش دومارتن اصلاح‌شده در اقلیم خشک بیابانی معتدل قرار می‌گیرد.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

روش پژوهش

ابتدا نقشه نقاط فرسایش خندقی بر اساس ۲۰۰ نقطه (خندق و غیر خندقی برای هر کدام) تهیه شد. این نقاط خندقی بر اساس بازدیدهای میدانی و اطلاعات اداره کل منابع طبیعی استان فارس شناسایی شدند. در کنار این، نقاط غیر خندقی با کمک محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به‌طور تصادفی در سراسر حوضه انتخاب شد. علاوه بر این، در مجموع ۱۳ متغیر برای مدل‌سازی بر اساس روش کار محققان قبلی انتخاب شد. این متغیرها شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، تراکم زهکشی، فاصله از آبراهه، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، بافت خاک، شاخص قدرت جریان^۱ (SPI)، شاخص رطوبت توپوگرافی^۲ (TWI)، شاخص زبری توپوگرافی^۳ (TRI)، متوسط بارندگی، فاصله از جاده و پوشش گیاهی است. پس از آن، تجزیه و تحلیل چندخطی فاکتور تورم واریانس (VIF) در میان متغیرهای مختلف برای تعیین رابطه خطی بین متغیرها استفاده شد. در مرحله بعد مدل‌سازی بر اساس الگوریتم یادگیری ماشینی (SVM) و (BRT) انجام شد. در نهایت، برای ارزیابی دقت مدل‌ها از منحنی ROC استفاده شد.

آماده‌سازی مجموعه داده برای مدل‌سازی

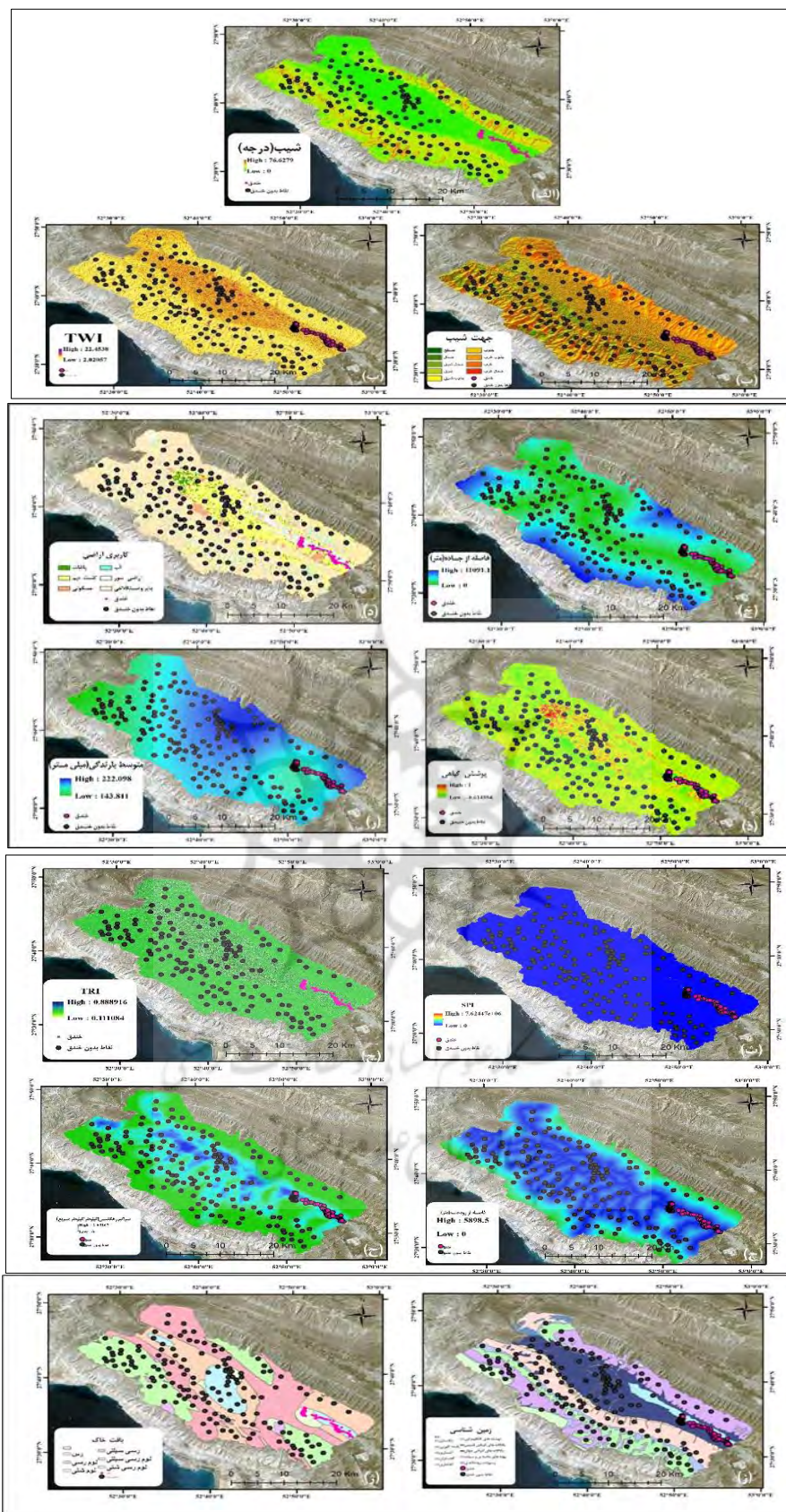
در این مطالعه، نقشه فرسایش خندقی (شکل ۱) بر اساس بازدیدهای میدانی و اطلاعات مدیریت منابع طبیعی استان فارس تهیه شد که در مجموع ۲۰۰ نقطه خندق به دست آمد. برای تعیین نقاط بدون خندق از نرم‌افزار GIS استفاده شد و ۲۰۰ نقطه به‌طور تصادفی انتخاب شد. نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM) با اندازه پیکسل ۱۲/۵ در ۱۲/۵ متر از تصاویر سنجنده ALOS به دست آمد. نقشه شیب، جهت شیب، شاخص قدرت جریان، شاخص رطوبت توپوگرافی و شاخص زبری توپوگرافی در نرم‌افزار R با استفاده از بسته Rsgacmd به دست آمد. نقشه فاصله از رودخانه و فاصله از جاده با استفاده از تابع Euclidean distance در نرم‌افزار ArcGIS به دست آمد. نقشه تراکم زهکشی با استفاده از نقشه DEM و تابع Line Density در نرم‌افزار ArcGIS به دست آمد. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ از سازمان نقشه‌برداری کشور تهیه شده است. نقشه‌های کاربری زمین بر اساس تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ با استفاده از الگوریتم حداکثر احتمال در محیط نرم‌افزار R تهیه شد. نقشه پوشش گیاهی نیز بر اساس تصاویر ماهواره لندست ۸ و در محیط نرم‌افزار R تهیه شد.

1. Stream Power Index

2. Topographic Wetness Index

3. Terrain Ruggedness Index

نقشه بافت خاک از اداره مرکز تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس تهیه شد. متوسط بارش سالانه حوضه، بر اساس آمار بارندگی استخراج شده با استفاده از ۸ ایستگاه باران سنجی و سینوپتیک و دوره آماری ۱۳۷۵-۱۴۰۰ استفاده شد. این داده‌ها با استفاده از تابع IDW در نرم‌افزار Arc GIS به نقشه تبدیل شد. شیب بر الگوی رواناب و نرخ نفوذپذیری خاک تأثیر می‌گذارد. بنابراین بسته به نوع شیب، نرخ فرسایش نیز در مکان‌ها متفاوت است به این صورت که در نواحی با شیب بالا، نرخ فرسایش بالا و برعکس. شیب منطقه مورد مطالعه از صفر تا ۷۶/۶۲ درجه متغیر است (شکل ۳ الف). جهت شیب را می‌توان به‌عنوان یکی از عواملی که به‌صورت غیرمستقیم بر ایجاد و گسترش فرسایش خندقی اثر می‌گذارد، در نظر گرفت. جهت شیب بر روی دریافت نور خورشید، پوشش گیاهی و رطوبت اثر بگذارد. نقشه جهت شیب منطقه مورد مطالعه در ۹ گروه تقسیم شده است (شکل ۳ ب). TWI ظرفیت انتقال همراه با سرعت جریان تعیین می‌کند و به‌عنوان یک عامل اساسی در شناسایی مناطق مستعد فرسایش خندقی است (Arabameri et al, 2019). از معادله زیر برای محاسبه مقدار TWI استفاده شد و از ۲/۰۲ تا ۲۲/۴۵ متغیر است (شکل ۳ پ). مقدار SPI با استفاده از معادلات و مقادیر زیر از صفر تا ۷/۶۲۴ در این کار محاسبه شد (شکل ۳ ث). در ژئومورفولوژی، زبری سطح زمین (TRI) به‌وسیله سطوح ارتفاعی توصیف داده می‌شود عموماً این شاخص برای تعیین خصوصیات لندفرم‌ها در مقیاس‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. شاخص زبری سطح برای اینکه بتواند لندفرم‌ها را به‌صورت پستی‌وبلندی توصیف کند، از نقشه ارتفاع استفاده می‌کند (Grohmann & Riccomini, 2009). در منطقه مورد مطالعه مقدار زبری سطح زمین بین ۰/۱۱ تا ۰/۸۸ است (شکل ۳ ج). خندق‌ها در درجه اول با سیستم زهکشی مرتبط هستند و یک رابطه مثبت قابل توجه بین فاصله از رودخانه و وقوع خندق‌ها وجود دارد. مقدار فاصله از رودخانه در منطقه از صفر تا ۵۸۹۸/۵ متر متغیر است (شکل ۳ چ). تراکم زهکشی به‌صورت مستقیم بر فرسایش خندقی اثر می‌گذارد. از معادله هورتون (۱۹۳۲) برای محاسبه تراکم زهکشی استفاده شد. مقدار تراکم زهکشی در منطقه بین صفر تا ۱/۶۹ کیلومتر در کیلومتر مربع است (شکل ۳ ح). جاده منجر به تمرکز رواناب سطحی، انحراف رواناب متمرکز به سایر حوضه‌ها و افزایش اندازه حوضه می‌شود که به‌عنوان دلایل اصلی توسعه خندق پس از ساخت جاده است. در منطقه مورد مطالعه فاصله از جاده بین صفر تا ۱۱۰۹۱/۱ متر است (شکل ۳ خ). تشکیل خندق و تخریب زمین تا حد زیادی به کاربری زمین بستگی دارد. در این مطالعه شش نوع کاربری زمین شامل باغات، کشت دیم، مسکونی، آب، اراضی شور و بایر و سنگلاخی شناسایی شد (شکل ۳ د). وضعیت پوشش گیاهی در مطالعات هیدرولوژیکی و خاک از اهمیت بالایی برخوردار است (Wang et al, 2021). در این تحقیق پوشش گیاهی در منطقه بین ۰/۶۱۴۵۹۴- تا ۱ است (شکل ۳ ذ). بارندگی به‌عنوان مهم‌ترین عامل شکل‌گیری فرسایش خندقی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. بارندگی با شدت بالا و مدت‌زمان کوتاه بیش‌ترین تأثیر را بر فرسایش خندقی می‌گذارند. در این تحقیق از ایستگاه‌های گله‌دار، بیرم، فداغ، لامرد (جهاد)، باغان (خنج)، جهادمهر، علامرودشت، لامرد، کاریان، عماده، فیشور و دیده‌بان در بازه زمانی ۱۴۰۰-۱۳۷۵ سازمان هواشناسی استان فارس استفاده شد. متوسط بارندگی در منطقه بین ۱۴۳/۸۱ تا ۲۲۹/۰۹ است (شکل ۳ ر). فرآیند سطح زمین منطقه به‌شدت تحت تأثیر ویژگی‌های زمین‌شناسی و یکی از مهم‌ترین عوامل برای فرسایش در مقیاس بزرگ، مانند ایجاد و توسعه خندق‌ها است. حوضه مورد مطالعه دارای ۹ سازند زمین‌شناسی (بنگستان، پابده_گورپی، آسماری، گچساران، آغاچاری، نهشته‌های کنگلومرایی، پادگانه‌های آبرفتی قدیمی، پادگانه‌های آبرفتی جوان، پهنه‌های ماسه‌ای و سیلتی و رسوبات رودخانه‌ای) است (شکل ۳ ز). بافت خاک در منطقه مورد مطالعه به شش نوع لوم رسی، رسی، لوم رسی سیلتی، لوم شنی، لوم رسی شنی و رس سیلتی طبقه‌بندی شده است (شکل ۳ ژ).



شکل ۳. متغیرهای مؤثر بر فرسایش خندقی: شیب، جهت شیب، TWI، SPI، TRI، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی، فاصله از جاده، کاربری اراضی، پوشش گیاهی، متوسط بارندگی، زمین‌شناسی، بافت خاک

تجزیه و تحلیل چندخطی

تجزیه و تحلیل چندخطی همیشه نتیجه عالی را برای ارزیابی وابستگی خطی بین عوامل محیطی مختلف در مدل یادگیری ماشینی (ML) می‌دهد (Saha et al, 2020). این یک تحلیل آماری است که می‌تواند دو تغییری که همبستگی بالایی در رگرسیون چندگانه داشته باشد را نشان دهد (Wang et al, 2020). چندین محقق در سراسر جهان از تجزیه و تحلیل چندخطی در زمینه‌های مختلف مانند سیل و حساسیت زمین لغزش استفاده کرده‌اند. چندخطی را می‌توان از طریق عامل تورم واریانس (VIF) و ضریب تحمل (TOL) تجزیه و تحلیل کرد. به‌عنوان یک قاعده کلی، اگر مقدار VIF بیش از ۱۰ باشد نشان‌دهنده چندخطی بودن بالا در بین متغیرها است. از معادله زیر برای محاسبه VIF در مجموعه داده‌ها استفاده شد.

روش‌های یادگیری ماشینی مورد استفاده در مدل‌سازی فرسایش خندقی

-ماشین بردار پشتیبانی (SVM)

SVM یک الگوریتم یادگیری ماشین بسیار محبوب است و توسط Vapnik و Chervonenkis در سال ۱۹۶۳ معرفی شد. Vapin (۱۹۹۵) بیان کرد که SVM بر اساس اصل کمینه‌سازی ریسک ساختاری و یادگیری آماری است و به‌عنوان یک مدل یادگیری ماشینی نظارت‌شده است. SVM به دلیل قابلیت کار با داده‌های غیرخطی و به حداقل رساندن پیچیدگی روشی قدرتمند است. این مدل در هر دو زمینه (طبقه‌بندی و رگرسیون) می‌تواند برای حل داده‌های آماری استفاده شود. اساساً، برای تنوع توابع طبقه‌بندی در کنار تجزیه و تحلیل و تعمیم عملکرد کلی استفاده می‌شود. در مدل‌سازی SVM می‌توان دو کلاس را به‌طور گسسته توسط یک ابر سطح بهینه تولید کرد، که در آن یک کلاس نشان داده شده در بالای ابر سطح به‌عنوان یک و دیگری که در زیر ابر سطح قرار دارد، به‌عنوان صفر اختصاص داده می‌شود در این مورد، مجموعه داده خندقی و غیر خندقی در نظر گرفته شده است (Pradhan, 2013). ابر سطح بهینه و مجموعه داده آموزشی که به یکدیگر نزدیک‌تر هستند، بردارهای پشتیبانی نامیده می‌شوند. دو مفهوم در مدل‌سازی SVM بر روی مسائل القا شده از نظر آماری استفاده می‌شود. اولین مورد جداسازی الگوهای داده‌های آماری با استفاده از جداسازی ابر سطح خطی است. دوم تبدیل الگوهای داده غیرخطی به الگوهای داده قابل جداسازی خطی با استفاده از توابع هسته است. SVM یک تئوری یادگیری آماری را اعمال می‌کند و از یک فرآیند ریاضی برای به‌دست آوردن یک ابر سطح بهینه استفاده می‌کند که حداکثر حاشیه را بین دو کلاس جدا از هم ایجاد می‌کند. معادله بهینه‌سازی زیر برای یافتن ابر سطح بهینه استفاده شده است. به‌طور معمول، زمانی که SVM با داده‌های خطی سروکار دارد، از فناوری‌های به نام توابع هسته (kernel) استفاده می‌کند. توابع هسته می‌توانند داده‌ها را از فضایی با ابعاد کمتر به فضایی با ابعاد بالاتر انتقال دهند. اگرچه توابع هسته مختلفی پیشنهاد شده است، اما بر اساس ادبیات، چهار نوع هسته (تابع پایه شعاعی (RBF)، توابع خطی، چندجمله‌ای و سیگموئیدی) پرکاربردترین توابع هستند (Bui et al, 2012).

-درخت رگرسیون تقویت شده (BRT)

مدل درخت رگرسیون تقویت شده (BRT) به‌عنوان یک الگوریتم یادگیری ماشینی بر اساس درخت‌های طبقه‌بندی و رگرسیون همراه با الگوریتم تقویت طرح‌بندی شده است (Arabameri et al, 2019). این مدل برخلاف الگوریتم‌هایی که میانگین را پیش‌بینی می‌کنند، از روش پیش‌رونده مرحله‌ای (تحلیل و تطبیق بین متغیرها و داده‌های گروه آموزشی) و آمارهای ناپارامتریک بیشتری استفاده می‌کند. این مدل می‌تواند برای پیش‌بینی کمی (درخت رگرسیون) یا نتایج طبقه‌بندی (درخت طبقه‌بندی) استفاده شود. در این مدل، نتایج حاصل از طبقه‌بندی‌های ضعیف را برای ایجاد یک

طبقه‌بندی قوی‌تر باهم ادغام می‌کنند. دو پارامتر اصلی این مدل شامل نرخ تقسیم و نرخ کاهش است. نرخ تقسیم این پارامتر درصد داده‌های آموزشی در هر تکرار که به‌وسیله‌ی کاربر تعیین می‌گردد، مشخص می‌کند. نرخ کاهش نیز بیان‌کننده میزان سهم هر درخت در مدل‌سازی است. ازجمله مهم‌ترین مزیت‌های این مدل می‌توان به تحلیل داده‌ها حجم زیاد و با سرعت بالا را دارد، همچنین حساسیت کمتری به همپوشانی نسبت به مدل‌های دیگر دارد و مهم‌ترین عوامل را در طبقه‌بندی تعیین می‌کند، اشاره کرد (westreich et al, 2010).

روش اعتبارسنجی و ارزیابی دقت

نقشه حساسیت فرسایش خندقی بر اساس عملکرد پیش‌بینی مجموعه داده‌های آموزشی و اعتبارسنجی با استفاده از مدل یادگیری ماشینی (SVM) تهیه شد. بنابراین، ارزیابی عملکرد مدل برای اطمینان از اعتبار نتایج ضروری است. در کار پژوهشی حاضر، از مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (ROC-AUC) برای پیش‌بینی دقت مدل یادگیری ماشینی (ML) استفاده شد. منحنی ROC یکی از پرکاربردترین ابزارها برای تحلیل اعتبارسنجی عملکرد مدل ML است. برای به‌دست آوردن ROC، دو بردار مورد نیاز است، که در آن یک بردار شرایط باینری حضور-غیاب یک مسئله معین را نشان می‌دهد و دیگری تخمین احتمالات مربوطه را نشان می‌دهد. شکل منحنی ROC می‌تواند برای ارزیابی توانایی مدل برای پیش‌بینی استفاده شود، جایی که عملکرد بالاتری دارد در نزدیکی قسمت سمت چپ بالای منحنی است. علاوه بر شکل، دقت را می‌توان با استفاده از سطح زیر منحنی (AUC) محاسبه کرد، که به‌طور گسترده به‌عنوان معیاری برای کمی کردن عملکرد مدل‌های پیش‌بینی استفاده شده است. مقدار ROC-AUC از ۰/۵ تا ۱ است که در آن ۰/۵ نشان‌دهنده عملکرد ضعیف و ۱ نشان‌دهنده عملکرد بسیار خوب است. علاوه بر این با توجه به ادبیات، مقادیر AUC برای ارزیابی دقت مدل‌ها را می‌توان به‌صورت زیر طبقه‌بندی کرد: ضعیف (۰/۵-۰/۶)، متوسط (۰/۶-۰/۷)، خوب (۰/۷-۰/۸)، بسیار خوب (۰/۸-۰/۹) و عالی (۰/۹-۱).

ویژگی‌های خاک

با حضور در منطقه ۱۵ خندق به صورت تصادفی انتخاب شد سپس موقعیت هر کدام به وسیله GPS ثبت شد. ویژگی ژئومتری مربوط به هر خندق (طول) اندازه‌گیری شد. برای نمونه‌برداری از دو عمق ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متر انجام شد سپس نمونه‌ها به آزمایشگاه جهت آنالیز ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ارسال شد. تحلیل‌های آماری این بخش کار به وسیله نرم‌افزار SPSS انجام شد و از رگرسیون چند متغیره استفاده شد. به طوری که طول به عنوان متغیر وابسته و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد.

یافته‌ها

تجزیه و تحلیل چندخطی

برای تهیه نقشه‌های حساسیت فرسایش خندقی، بررسی آزمون هم خطی بین متغیرها دارای اهمیت بسیاری است. برای بررسی این آزمون از شاخص تورم واریانس با مقدار ۱۰ استفاده شد. اگر مقدار این شاخص برای هر کدام از متغیرها بالای ۱۰ باشد، آن متغیر از فرآیند مدل‌سازی حذف می‌شود. نتایج نشان داد که بین عوامل شیب (۱/۸۱)، جهت شیب (۱/۰۴)، فاصله از آبراهه (۳/۴۹)، تراکم زهکشی (۲/۵۹)، شاخص رطوبت توپوگرافی (۱/۴۶)، شاخص قدرت جریان (۱/۰۶)، شاخص زبری سطح زمین (۱)، فاصله از جاده (۱/۸۱)، کاربری اراضی (۱/۵۴)، پوشش گیاهی (۱/۲۳)، زمین-

شناسی (۱/۴۹)، بافت خاک (۱/۰۳) و متوسط بارندگی (۱/۲۴) هیچ گونه هم خطی وجود ندارد.

مدل سازی حساسیت فرسایش خندقی

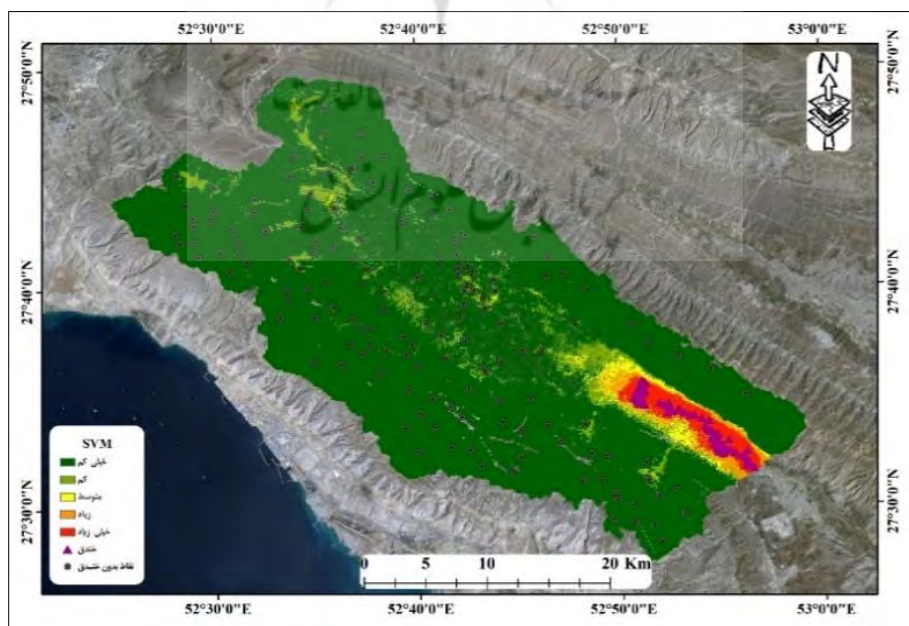
پس از بررسی هم خطی بین متغیرها، ۱۳ متغیر بدون وجود همبستگی وارد محیط R (۴,۳,۰) شدند. در نهایت، مدل های حساسیت فرسایش خندقی بر اساس سطح پیکسل برای کل منطقه مورد مطالعه توسعه داده شد. در نهایت، در مدل سازی (SVM) از روش طبقه بندی شکست طبیعی (Naghibi et al, 2016) و در (BRT) از روش طبقه بندی رگرسیون یا پیش بینی پیوسته برای طبقه بندی استفاده شد.

پس از اجرای مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM)، استعداد وقوع فرسایش خندقی منطقه مورد مطالعه شناسایی و مدل سازی شد. شکل (۴) نقشه استعداد وقوع فرسایش خندقی را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود بخش جنوبی منطقه دارای استعداد وقوع فرسایش خندقی بیشتری است.

درصد فراوانی نسبی و مساحت استعداد وقوع فرسایش خندقی در جدول (۲) نشان داده شده است. بر اساس این نتایج مناطق حساس به فرسایش خندقی بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد به ترتیب ۹۱۱۱۲۳۳۴۷/۶۴ (۸۹/۲۲ درصد)، ۵۳۳۴۹۵۵۰/۲۹ (۵/۶ درصد)، ۱۲۶۳۹۱۸۹/۳۴ (۱/۳۳ درصد)، ۱۱۴۶۰۲۶۰/۹۰ (۱/۲۰ درصد) و ۲۴۹۲۷۶۵۱/۸۱ (۲/۶۲ درصد) است.

جدول ۱. توزیع میزان حساسیت فرسایش خندقی در مدل SVM در منطقه مورد مطالعه

طبقه حساسیت	مساحت (مترمربع)	مساحت (درصد)
بسیار کم	۹۱۱۱۲۳۳۴۷/۶۴	۸۹/۲۲
کم	۵۳۳۴۹۵۵۰/۲۹	۵/۶
متوسط	۱۲۶۳۹۱۸۹/۳۴	۱/۳۳
زیاد	۱۱۴۶۰۲۶۰/۹۰	۱/۲۰
خیلی زیاد	۲۴۹۲۷۶۵۱/۸۱	۲/۶۲

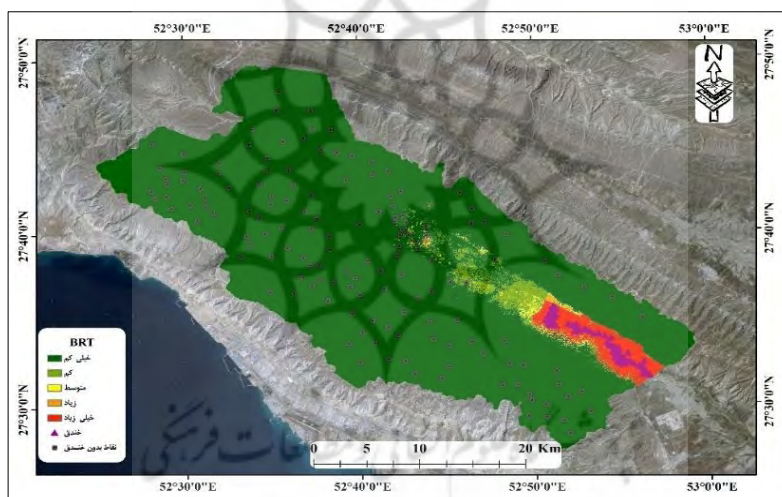


شکل ۴. نقشه پهنه بندی فرسایش خندقی با استفاده از مدل SVM

نقشه پیش‌بینی فرسایش خندقی با استفاده از مدل درخت رگرسیون تقویت‌شده (BRT) در شکل (۵) به نمایش در آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در مناطق با ارتفاع زیاد، شیب زیاد، فاصله بسیار از رودخانه، جاده و تراکم زهکشی پایین فرسایش خندقی کمتری رخ داده است در حالی که در بخش خروجی حوضه در ارتفاع پایین‌تر و شیب کم، فاصله کم نسبت به جاده و رودخانه و تراکم زهکشی بالا خندق‌های بیشتری در منطقه رخ داده است. در این مدل مناطق حساس به فرسایش خندقی بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد به ترتیب $۹۴۲۱۰۵۳۷۸/۶۴$ ($۹۲/۸۴$ درصد)، $۲۶۸۷۲۳۷۶/۰۴$ ($۲/۶۹$ درصد)، $۶۶۹۵۰۶۳/۴۱$ ($۰/۶۷$ درصد)، $۲۰۵۹۲۱۸/۱۵$ ($۰/۲۰$ درصد)، $۳۵۷۶۸۰۶۳/۷۸$ ($۳/۵۸$ درصد) است (جدول ۳).

جدول ۲. توزیع میزان حساسیت فرسایش خندقی در مدل BRT در منطقه مورد مطالعه

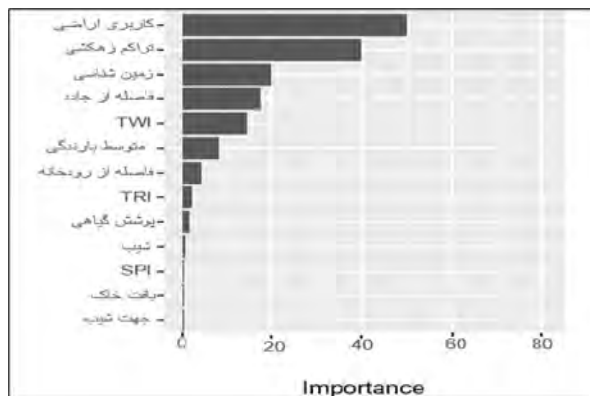
طبقه حساسیت	مساحت (مترمربع)	مساحت (درصد)
بسیار کم	۹۴۲۱۰۵۳۷۸/۶۴	۹۲/۸۴
کم	۲۶۸۷۲۳۷۶/۰۴	۲/۶۹
متوسط	۶۶۹۵۰۶۳/۴۱	۰/۶۷
زیاد	۲۰۵۹۲۱۸/۱۵	۰/۲۰
خیلی زیاد	۳۵۷۶۸۰۶۳/۷۸	۳/۵۸



شکل ۵. نقشه پهنه‌بندی فرسایش خندقی با استفاده از مدل BRT

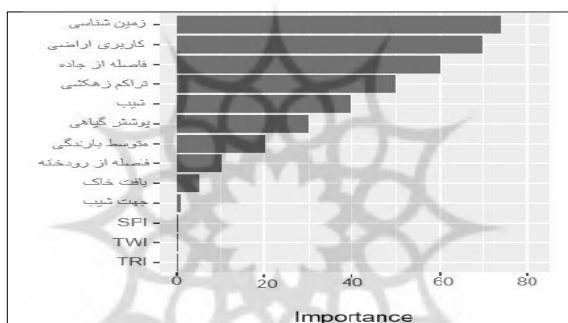
اهمیت متغیرها

اهمیت نسبی متغیرهای ورودی در مدل‌سازی فرسایش خندقی با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان در شکل (۶) نشان داده شده است. بر اساس این شکل به ترتیب متغیرهای کاربری اراضی، تراکم زهکشی، زمین‌شناسی، فاصله از جاده، TWI، متوسط بارندگی، فاصله از رودخانه، TRI، پوشش گیاهی، شیب، SPI، بافت خاک و جهت شیب دارای بیشترین اهمیت در فرآیند مدل‌سازی هستند.



شکل ۶. اهمیت نسبی متغیرها در منطقه مورد مطالعه (مدل SVM)

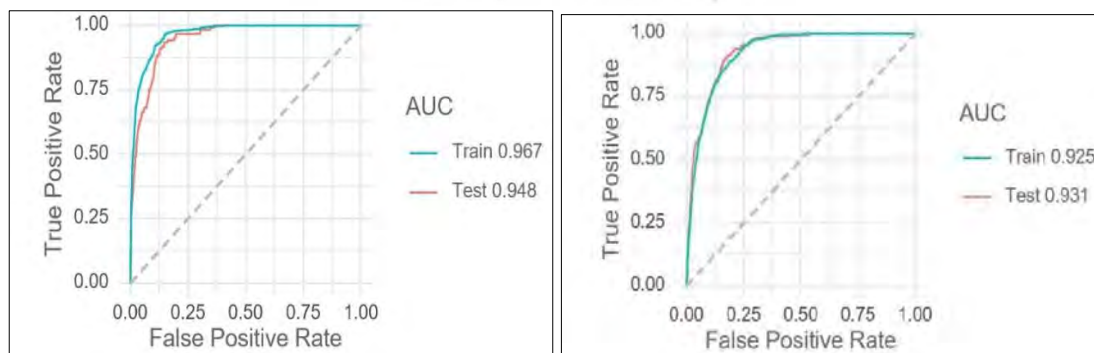
این در حالی است که اهمیت نسبی متغیرهای ورودی در مدل سازی وقوع فرسایش خندقی با استفاده از مدل درخت رگرسیون تقویت شده به ترتیب زمین شناسی، کاربری اراضی، فاصله از جاده، تراکم زهکشی، شیب، پوشش گیاهی، متوسط بارندگی، فاصله از رودخانه، بافت خاک، جهت شیب، SPI، TWI و TRI است (شکل ۷).



شکل ۷. اهمیت نسبی متغیرها در منطقه مورد مطالعه (مدل BRT)

اعتبارسنجی مدل

در مدل SVM مقدار AUC با در نظر گرفتن مجموعه داده های آموزشی ۰/۹۲ درصد و برای مجموعه داده های آزمایشی ۰/۹۳ درصد است و در مدل BRT برای مجموعه داده های آموزشی ۰/۹۶ و برای مجموعه آموزشی ۰/۹۴ است. هر دو این مدل با دقت بسیار بالایی همراه است (شکل ۸).



شکل ۸. اعتبارسنجی مدل و ناحیه زیر منحنی

نتایج حاصل از ویژگی‌های خاک

طبق نتایج آزمایشگاهی چون مقادیر به دست آمده از دو عمق تفاوت چندانی با یکدیگر نداشت در قسمت تجزیه و تحلیل فقط به داده‌های عمق ۳۰-۰ سانتی متری اکتفا شد. شاخص پراکندگی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و همچنین طول ۱۵ خندق در جدول (۴) ذکر شده است.

جدول ۳. شاخص‌های پراکندگی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و ویژگی ژئومتری در ۱۵ خندق

L	SAR	OC	Na	Ca	Mg	K	TNV	EC	PH	Clay	Silt	Sand	
۱۱۹/۲	۲۹/۲۸	/۲۹۶	۴۲۸/۵	۱۹۹/۳	۲۲۸	۲۵۶/۴	۶۶	۱۶۸	۷/۵۱	۱۱/۴۶	۲۷/۱۳	۶۱/۴	میانگین
۵	۲۳/۲۳	/۲۱	۳۴۵	۱۶۳	۱۹۰	۱۷۹	۵۹	۱۲۰	۷/۲۲	۸	۲۴	۵۹	حداقل
۳۱۰	۳۳/۶۱	/۴۵	۴۹۹	۲۳۸	۲۸۳	۳۹۵	۷۸	۲۶۰	۸/۰۱	۱۵	۳۱	۶۵	حداکثر
۳۳/۵۵	/۸۷۵	/۰۲	۱۴/۰۷	۵/۸۸	۷/۶۲	۱۷/۴۲	۱/۳۸	۳۸/۱	/۰۷	/۴۹۸	/۵۷	/۴۶۳	انحراف از معیار
/۷۶	/۱۱	/۲۶	/۱۲	/۱۱	/۱۲	/۲۶	/۰۸	/۰۸	/۰۳	/۱۶	/۰۸	/۰۲	ضریب تغییرات

L: طول خندق (متر)، Sand: درصد شن، Clay: درصد رس، Silt: درصد سیلت، PH: اسیدیته خاک، EC: هدایت الکتریکی، TNV: مواد خنثی شونده (درصد)، K: پتاسیم (میلی اکی والان بر کیلوگرم)، Mg: منیزیم (میلی اکی والان بر لیتر)، Ca: کلسیم (میلی اکی والان بر لیتر)، Na: سدیم محلول (میلی اکی والان بر لیتر)، OC: مواد آلی (درصد)، SAR: نسبت جذب سدیم.

سپس با استفاده از رگرسیون چند متغیره، رابطه بین متغیرهای مستقل با متغیر طول خندق در جدول (۵) مشخص شد. در رابطه با طول خندق، به ترتیب متغیرهای ماسه (۹/۲۹۹)، نسبت جذب سدیم (۷/۹۶۷) و مواد خنثی شونده (۶/۱۸۵)، سدیم (۳/۶۰۴)، منیزیم (۳/۵۴۰)، کلسیم (۲/۵۵۰)، سیلت (۴/۴۴۳)، هدایت الکتریکی (۴/۱۷)، پتاسیم (۴/۱۰-) و مواد آلی (۳/۰۵۸-) بیشترین نقش را در گسترش طولی خندق‌ها دارد.

جدول ۴. یافته‌های تحلیل رگرسیون استاندارد شده و استاندارد نشده برای متغیرهای ویژگی‌های خاک و گسترش طولی خندق

sig	t	ضرایب غیر استاندارد			مدل		R ²	R	متغیر
		Beta	Std. Error	B					
/۴۸۷	-/۷۹۰		۱۲۱۶/۱۹۴	-۲۰۰/۹۶۱	(C)				
/۲۸۲	-/۱۳۰۹	-/۲۲۷	۷/۱۰۳	۹/۲۹۹	Sand				
/۹۶۶	/۰۴۶	/۰۱۰	۹/۵۷۶	/۴۴۳	Silt				
/۶۵۸	-/۴۸۹	-/۱۰۸	۶/۳۵۵	-۲/۴۸۲	PH				
/۴۶۳	-/۸۴۰	-/۳۴۴	/۴۹۷	/۴۱۷	EC				
/۱۶۷	-/۱۸۱۷	-/۴۲۱	۳/۴۰۴	۶/۱۸۵	TNV	/۷۸۴	/۹۷۷	L	
/۲۸۵	-/۲۹۹	-/۳۵۰	/۳۱۵	-/۴۱۰	K				
/۳۱۹	۱/۵۵۰	۱/۳۲۵	۲/۲۸۵	۳/۵۴۰	Mg				
/۳۵۷	۱/۰۸۶	/۷۳۶	۲/۳۴۷	۲/۵۵۰	Ca				
/۴۶۲	-/۸۴۱	-۲/۴۸۷	۴/۲۸۶	۳/۶۰۴	Na				
/۵۴۳	/۶۸۴	/۱۶۳	۸/۵۲۳	-۳/۰۵۸	OC				
/۳۲۳	۱/۱۸۰	۳/۱۳۳	۶/۸۴۲	۷/۹۶۷	SAR				

Dependent Variable:L

با در نظر گرفتن نتایج حاصل از شگل‌گیری روابط رگرسیون بین طول و ویژگی‌های خاک نشان دهنده‌ی همبستگی معنی‌داری بین متغیر وابسته و متغیرهای مستقل است. این همبستگی بیانگر پراکندگی و تخریب خاک در محل ایجاد خندق در منطقه مورد مطالعه است و در نهایت مدل پیش‌بینی گسترش طولی با در نظر گرفتن ویژگی‌های خاک از روابط زیر قابل مقایسه می‌باشد.

$$L = 9.299 (\text{Sand}) + 4.443 (\text{Silt}) - 3.482 (\text{PH}) + 4.417 (\text{EC}) + 6.185 (\text{TNV}) - 0.410 (\text{K}) + 3.540 (\text{Mg}) + 2.550 (\text{Ca}) + 3.604 (\text{Na}) - 3.058 (\text{OM}) + 7.967 (\text{SAR}).$$

بحث

تخریب زمین از طریق اشکال مختلف فرسایش خاک می‌تواند باعث آسیب‌های گسترده و اثرات نامطلوب بر جامعه و زندگی مردم در سراسر جهان شود. فرسایش خندقی یکی از مسائل رایج زیست‌محیطی ناشی از محیط طبیعی است، اما مکانیسم تشکیل و توسعه خندق‌ها می‌تواند توسط فعالیت‌های انسانی تسریع شود. در محیط‌های خشک و نیمه‌خشک، تشکیل و توسعه خندق‌ها مشکل‌سازترین موضوع با نگرانی‌های جهانی است که با عدم تعادل اکولوژیکی محیط خاص مرتبط است. از دست دادن خاک حاصلخیز به دلیل فرسایش شدید نه تنها باعث کاهش مقدار خاک می‌شود بلکه حاصلخیزی خاک و بهره‌وری کشاورزی مرتبط را نیز کاهش می‌دهد. از سوی دیگر منجر به تجمع رسوب در خروجی حوضه می‌گردد. شکل‌گیری و توسعه خندق‌های ناشی از شرایط محیطی مختلف و اهمیت آن‌ها باید برای مدل‌سازی و اهداف مدیریتی مناسب تحلیل شود (Pourghasemi et al, 2020).

حوضه آبخیز مهر با فرسایش خندقی شدیدی مواجه است که عامل فرسایش در مقیاس بزرگ بوده و مانع اصلی در راه شیوه‌های مدیریت پایدار زمین است. بنابراین شناسایی مناطق آسیب‌پذیر با بهینه‌ترین مدل بسیار مفید است تا بتوان اقدامات مناسبی را برای حفظ آب و خاک انجام داد. برای این منظور مدل‌های SVM و BRT در نظر گرفته شد تا حساسیت فرسایش خندقی این منطقه را با حداکثر دقت ممکن برآورد گردد. فرسایش یک خندق توسط عوامل مختلف کنترل می‌شود. شیب یک عامل مهم در فرآیند فرسایش خندقی است زیرا بر رواناب سطحی و تراکم زهکشی تأثیر می‌گذارد و منجر به شروع و توسعه خندق می‌شود (Lucà et al, 2011). در شیب‌های کم از سرعت آب کاسته و سرعت نفوذپذیری بیشتر می‌گردد این در حالی است که در شیب‌های زیاد سرعت آب زیاد و مقدار نفوذپذیری کاهش می‌یابد. در منطقه مورد مطالعه در شیب‌های ملایم بیشترین حساسیت را نسبت به وقوع فرسایش خندقی دارند. این نتایج با نتایج (LeRoux et al, 2012) همخوانی دارد به این صورت که در شیب‌های کم رواناب فرصت تمرکز و نفوذ بیشتری دارند بنابراین احتمال ایجاد حفره و تبدیل شدن به فرسایش خندقی بیشتر است. جهت شیب همچنین بر هوازدگی، فرسایش خاک، رطوبت خاک، ساختار پوشش گیاهی و فرآیندهای ژئومورفولوژیکی تأثیر می‌گذارد و به‌عنوان یک پدیده غیرمستقیم در فرآیند شکل‌گیری و گسترش فرسایش خندقی به شمار می‌آید. عموماً بیشتر خندق‌ها در منطقه مورد مطالعه در جهت‌های شمال، شمال شرقی، شرق و شمال غربی ایجاد و گسترش یافته است. از نظر شاخص رطوبت توپوگرافی در منطقه مورد مطالعه در قسمت خروجی حوضه که دارای توپوگرافی پست است بیشترین ظرفیت در نگهداری و جذب رطوبت را دارد. به‌عبارت‌دیگر مناطق پست منطقه به علت ذخیره رطوبت بیشتر شرایط مساعدی را برای ایجاد و گسترش فرسایش خندقی فراهم آورده است. این نتایج با نتایج (Angileri et al, 2016) همخوانی دارد به این صورت که در منطقه هر چقدر مقدار رطوبت توپوگرافی بیشتر باشد مقدار رواناب نیز بیشتر است و در صورت مهیا بودن سایر عوامل امکان ایجاد و توسعه خندق وجود دارد. شاخص قدرت جریان گویای میزان قدرت فرساینده‌ی جریان آب است. جریان آب از قسمت‌های بالاتر حوضه به سمت پایین حرکت می‌کند و در این حین، مواد انتقالی را به حرکت در می‌آورد. در ابتدای مسیر، سرعت جریان بیشتر است و مواد انتقالی از جمله رسوبات و سایر ذرات، همراه با جریان به سمت پایین حرکت می‌کنند. در نقاط پایین‌تر حوضه، جریان آب با سرعت کمتری حرکت می‌کند. بر این اساس خندق‌ها در بخش انتهایی حوضه که از سرعت جریان کاسته و مواد انتقالی رسوب می‌کند، تشکیل شده است. از نظر شاخص زبری توپوگرافی عموماً خندق‌ها در منطقه مورد مطالعه در شیب‌های کم و ارتفاع پایین (توپوگرافی هموار) تشکیل شده‌اند. در مناطق با شیب کم، نیروی جریان آب کمتر است و نمی‌تواند ذرات خاک و سایر مواد را حمل کند و از طرف دیگر با کاهش ارتفاع میزان رواناب نیز بیشتر است.

این نتایج با نتایج (Saha et al, 2021) همخوانی ندارد به این صورت که خندق‌ها عموماً در مناطقی با شیب و ارتفاع بالا و به عبارتی در مناطقی با توپوگرافی ناهموار تشکیل شده است. فاصله از رودخانه یکی از عوامل مهم در ایجاد فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه است. با کاهش فاصله از رودخانه در منطقه مورد مطالعه، حجم آبی که به سمت فضاهای کناری در حال حرکت بود، افزایش یافت و این باعث افزایش شدت جریان و برخورد آن با خاک و سنگ شده است و در نتیجه، آن‌ها را از مسیر خود منحرف کرده و به سمت پایین حمل شده‌اند. این فرایند باعث جابجایی خاک و سنگ‌ها در مناطق نزدیک به رودخانه شده و در نهایت باعث تخریب و گسترش خندق شده است. به عبارت دیگر در منطقه مورد مطالعه، مناطقی که فاصله کمی از رودخانه داشته است، به علت آبشویی و فرسایش کناری تعادل دامنه شکسته شده و فرسایش خندقی رخ داده است. این نتایج با نتایج (Avand et al, 2019) همخوانی دارد به این صورت که کاهش فاصله از رودخانه به علت آب شویی و فرسایش کناری، تعادل دامنه به هم می‌خورد در نتیجه احتمال ایجاد فرسایش خندقی افزایش می‌یابد. از نظر تراکم زهکشی در منطقه مورد مطالعه به این صورت است که با افزایش تراکم زهکشی رخداد فرسایش خندقی نیز بیشتر شده است. در قسمت خروجی حوضه به علت بالا بودن تراکم زهکشی میزان نفوذپذیر کاهش و در نتیجه رواناب در محدوده‌ی کناری رودخانه افزایش پیدا کرده است که منجر به ایجاد فرسایش خندقی شده است. این نتایج با نتایج رحمتی و همکاران (۲۰۱۷) همخوانی دارد به این صورت که فرسایش خندقی با تراکم زهکشی دارای یک رابطه مثبت است به این صورت که افزایش تراکم زهکشی باعث کاهش نفوذپذیری و رواناب بیشتر و در نتیجه اثر آن بر فرسایش خندقی از طریق افزایش جریان است. رابطه فاصله از جاده و فرسایش خندقی معکوس است. به این صورت که در منطقه مورد مطالعه در مجاورت جاده‌ها و راه‌ها، فرسایش خندقی بیشتری رخ داده است. رخداد فرسایش خندقی در نزدیکی جاده‌ها به این دلیل است که در کنار جاده‌ها ضخامت زیادی از خاک‌های ریزبافت و همچنین شیب کم منطقه بوده است. به عبارت دیگر جاده‌ها منجر به ایجاد سطوح غیر قابل نفوذ در منطقه شده است که رواناب اطراف آن جمع کرده و منجر به فرسایش خاک در مقیاس بزرگ شده است در نهایت تأثیر شبکه جاده‌ها بر فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه به عنوان یکی از عوامل انسانی در رخداد فرسایش خندقی به شمار می‌آید. این نتایج با نتایج (Kutner et al, 2004) همخوانی دارد به این صورت که جاده‌ها ممکن است باعث افزایش جریان آب در خندق‌ها و کانال‌های آبی در نزدیکی آن شوند. فاصله کم از جاده باعث می‌شود که جریان آب از آسفالت جاده با سرعت بیشتری به سمت خندق‌ها و کانال‌های آبی جریان پیدا کند. با افزایش سرعت جریان آب، شدت برخورد آن با خاک و سنگ در محدوده‌های کناری خندق و کانال‌های آبی افزایش می‌یابد این باعث جابجایی خاک و سنگ‌ها در این فضاها شده و در نهایت می‌تواند به تخریب خندق و گسترش آن در منطقه منجر شود. جدا از ویژگی‌های توپوگرافی و هیدروژئومورفیک، کاربری اراضی مهم‌ترین متغیر برای فرسایش خندقی است که نشان‌دهنده تأثیر انسان بر شکل‌گیری و گسترش خندق‌ها است. این متغیر یک عنصر حیاتی است و مسئول فرسایش در مقیاس بزرگ است. در منطقه مورد مطالعه بیشترین تمرکز خندق‌ها در میان کاربری‌ها مراتع فقیر، کشت دیم و اراضی شور رخ داده است. در مراتع فقیر استفاده نامناسب از چراگاه‌ها و همچنین استفاده نامناسب از منابع آبی سطحی و زیرزمینی منجر به کاهش پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه و در نتیجه فرسایش خندقی ایجاد شده است. در رابطه با کاربری کشت دیم، استفاده از ماشین آلات سنگین و همچنین شخم زدن زمین در جهت شیب منطقه منجر شده است که در زمان بارندگی، آب به صورت رواناب‌های سطحی جاری شده که در نهایت منجر به فرسایش خندقی در منطقه شده است. در کاربری اراضی شور منطقه مورد مطالعه، به علت کمبود پوشش گیاهی در این نوع کاربری‌ها فرسایش خندقی بیشتر رخ داده است.

به عبارت دیگر با توجه به دست کاری و دخالت انسان در مناطقی که حساس به فرسایش خندقی هستند منجر به پیشروی این نوع فرسایش و تخریب و غیرقابل استفاده شدن اراضی می شود. این نتایج با نتایج شهبازی و همکاران (۱۴۰۰) همخوانی دارد. به این صورت که نوع استفاده از اراضی نقش مهمی در ایجاد فرسایش و تولید رسوب دارند. کمبود پوشش گیاهی در منطقه، باعث افزایش قدرت فرساینده‌ی رواناب‌های سطحی و پراکنده شدن ذرات خاک شده است و این کمبود پوشش گیاهی در منطقه منجر به افزایش حساسیت فرسایش خندقی شده است (شکل ۹). این نتایج با نتایج (Azedou et al, 2021) همخوانی دارد به این صورت که با کاهش پوشش گیاهی فرسایش خندقی بیشتر رخ داده است. به عبارت دیگر کمبود پوشش گیاهی به ایجاد رواناب کمک می کند که مستقیماً با فرسایش و رسوب گذاری مرتبط است. نتایج حاصل از بارندگی نشان داد که در فصل خشک ترک‌ها و شکاف‌های در سطح حوضه ایجاد می گردد و با ایجاد بارش‌های ناگهانی و با شدت زیاد، آب وارد این شکاف‌ها شده و به درون زمین نفوذ می کند و در جهت شیب زمین و با انحلال مواد محلول موجب شکل گیری پیه‌های زیرزمینی شده است که عامل مهمی در انتقال مواد انحلال پذیر و رسوب به شبکه‌های جاری در منطقه مورد مطالعه است. اهمیت این متغیر و تأثیر آن بر روی فرسایش خندقی در تحقیقاتی مانند امیری و همکاران (۱۳۹۸) مورد تأکید قرار گرفته است به این صورت که بارش‌های شدید در مناطق خشک و نیمه خشک معمولاً در طول مدت‌های زمانی کوتاه و شدید رخ می دهند. این بارش‌ها باعث شروع جریان‌های آبی شدید می شوند که به سمت پایین جریان می یابند. این جریان‌های آبی معمولاً در کنار هم متمرکز می شوند و با سرعت بالا در حرکت هستند. هنگامی که این جریان‌های آبی به سطح زمین می رسند، باعث حرکت خاک و سنگ در پایین خود می شوند و این حرکت خاک و سنگ باعث ایجاد شکاف‌هایی در سطح زمین می شود که در نهایت با تکرار این حرکت‌ها، فرسایش خندقی را ایجاد می کند. زمین شناسی همچنین نقش مهمی در تعیین حساسیت به فرسایش خندقی دارند، زیرا فرسایش خندقی به ویژه به ویژگی‌های مواد در معرض نزدیک به سطح زمین وابسته است. نتایج حاصل از متغیر زمین شناسی نشان داد که رسوبات کواترنر (پادگانه‌های آبرفتی جوان و پهنه‌های رسی و سیلتی) به دلیل وجود املاح زیاد گچ و نمک، وجود رسوبات ریزدانه رس و سیلت، ناپایداری لس‌ها، تضعیف ساختمان خاکدانه‌ها و کمبود مواد آلی بیشترین ارتباط را با فرسایش خندقی دارند. مشاهدات میدانی نشان داد که بیشتر خندق‌ها در رسوبات انحلال پذیر شکل گرفته است به این صورت که گسترش خندق‌ها در محدوده‌ی سر خندق‌ها به صورت حفره‌ی از ناحیه میانی تا زیرین انحلال و ریزش می کند و سر خندق به یک مرتبه فرو می ریزد و باعث گسترش خندق می گردد (شکل ۱۰). این نتایج با نتایج (Zucca et al, 2006) همخوانی دارد به این صورت که عمده خندق‌ها در رسوبات کواترنری رخ داده است که نشان دهنده رشد خندق‌ها در رسوبات سست و منفصل است.



شکل ۱۰. نمونه‌ی از خندق‌های ایجاد شده در منطقه مورد مطالعه



شکل ۹. کمبود پوشش گیاهی در مناطق فرسایش

بافت خاک معمولاً به‌عنوان یک مکانیسم کنترل‌کننده قابل‌توجه تولید رواناب، نفوذ و در نتیجه فرسایش خندقی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بافت خاک در منطقه مورد مطالعه عموماً ریزدانه بوده است و همین امر باعث کاهش چسبندگی ذرات شده است. کاهش چسبندگی ذرات خاک در منطقه باعث شده است که خاک به شکلی متراکم‌تر باشد و همین امر موجب کاهش نفوذپذیری خاک شده است. به‌عبارت‌دیگر با افزایش میزان بافت ریز در خاک منطقه، ذرات ریز خاکی به راحتی به وسیله جریان آب به مناطق پایین دست حوضه انتقال یافته‌اند و این امر منجر به ایجاد فرسایش خندقی در بخش خروجی حوضه شده است. این نتایج با نتایج (Saha et al, 2021) همخوانی دارد به این صورت که رابطه بین بافت خاک و فرسایش نشان‌دهنده‌ی وجود بافت ریز در نتیجه زیاد شدن ظرفیت نگهداری آب در خاک، کاهش چسبندگی ذرات و انتقال آن‌ها می‌گردد.

نتایج حاصل از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و نقش آن در گسترش خندقی‌ها نشان داد که از بین بافت خاک، ماسه بیشترین تأثیر را دارد. به این صورت که ذرات ماسه به علت چسبندگی کمتر در مقابل بارش‌های ناگهانی مقاومت زیادی در برابر فرسایش ندارند و همین امر موجب گسترش فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه شده است. در رابطه با نسبت جذب سدیم و گسترش فرسایش خندقی به این صورت است که با افزایش نمک‌های محلول در خاک، خاک حساسیت بیشتری نسبت به فرسایش خندقی پیدا می‌کند. با بالا بودن میزان مواد خنثی شونده (آهک) در خاک منطقه منجر به ایجاد فرسایش انحلالی می‌گردد. بالا بودن مقدار یون سدیم در خاک منطقه سرعت تخریب خاک افزایش می‌یابد به این صورت که این یون با کلسیم و پتاسیم موجود در خاک جایگزین و در نتیجه منجر به انحلال خاک و در دراز مدت باعث ایجاد فرسایش خندقی می‌گردد. در رابطه با منیزیم و کلسیم موجود در خاک بالا بودن این دو فاکتور موجب افزایش شدت انقباض و بزرگ شدن شکاف‌های موجود در خاک منطقه و در نتیجه فرسایش انحلالی به راحتی رخ می‌دهد. بالا بودن مقدار سیلت منجر می‌شود هنگام دریافت رطوبت ذرات خاک تخریب و در مدت زمان کمی فرسایش یابند. بالا بودن پارامتر شوری خاک باعث تخریب ساختمان خاک و فرسایش پذیری خاک‌های زیر سطحی و در نتیجه توسعه فرسایش خندقی در منطقه شده است. هنگام ایجاد بارش‌های ناگهانی پتاسیم موجود در خاک به وسیله ی آبشویی کاهش یافته و در دراز مدت پایداری خاک کم و در نتیجه فرسایش خندقی در منطقه رخ داده است. کاهش ماده آلی در منطقه مورد مطالعه بر اثر افزایش شوری خاک و تخریب زمین‌های کشاورزی بوده است. کاهش این فاکتور منجر می‌شود که خاک به راحتی توسط آب فرسایش یابد و در دراز مدت فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه رخ دهد.

نتیجه‌گیری

مطالعه فوق به‌منظور تهیه نقشه پیش‌بینی حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از الگوریتم‌های ماشینی (SVM و BRT) در حوضه آبخیز رودخانه شور (شهرستان مهر) انجام پذیرفت. در این تحقیق از ۱۳ متغیر حساس به فرسایش خندقی و عملکرد آن‌ها در توسعه خندق‌ها مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این اهمیت این متغیرهای مستقل نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. در اینجا، تمام مجموعه داده‌ها به‌صورت تصادفی با نسبت ۳۰/۷۰ به‌عنوان مجموعه داده‌های آموزشی و اعتبارسنجی تقسیم شدند. مقدار سطح زیر منحنی (AUC) برای SVM و BRT به ترتیب ۰/۹۲ و ۰/۹۴ به دست آمد. در هر دو مدل بیش از نیمی از حوضه در طبقه بسیار کم تا کم حساسیت (SVM = ۸۹/۲۲، BRT = ۹۲/۸۴) قرار گرفته است این در حالی است که در مدل SVM ۲/۶۲ درصد و در مدل BRT ۳/۵۸ درصد از مساحت منطقه با ناحیه حساس

بسیار بالا همراه است. همچنین نتایج حاصل از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نشان داد که ماسه (۹/۲۹۹)، نسبت جذب سدیم (۷/۹۶۷) و مواد خنثی شونده (۶/۱۸۵) بیشترین تأثیر را در گسترش فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه دارند. در نهایت، نتایج نشان داد حوضه آبخیز رودخانه شور نسبت به ایجاد و گسترش فرسایش خندقی بسیار مساعد است. تعداد زیاد خندق‌های موجود در منطقه و بررسی آن‌ها از نظر طول و حساسیت نسبتاً بالای بخش‌های از منطقه به فرسایش خندقی در نقشه‌های تهیه شده تأیید کننده این موضوع است. همچنین مدل‌های یادگیری ماشین به‌اندازه کافی قادر به تعیین مرزهای مناطق فرسایش خندقی هستند؛ بنابراین نقشه‌های مستعد فرسایش خندقی تهیه شده می‌تواند به‌عنوان ابزار مهمی برای حفاظت و برنامه‌ریزی پایدار مناطق مستعد فرسایش خندقی حوضه مورد مطالعه مورد استفاده قرار گیرد.

حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان در پژوهش

نویسندگان در تمام مراحل و بخش‌های انجام پژوهش سهم برابر داشتند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از همه کسانی که در انجام این پژوهش به ما یاری رساندند، به ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقالات را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

- امیری، مهدیس؛ پورقاسمی، حمیدرضا؛ قنبریان، غلام‌عباس و افزالی، سید فخرالدین. (۱۳۹۸). مدل‌سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از سناریوهای مختلف و الگوریتم وزن واقعه. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۱(۴)، ۱۰۳۲-۱۰۱۶.
[Doi:10.22092/IJWMSE.2018.120399.1435](https://doi.org/10.22092/IJWMSE.2018.120399.1435)
- داودی راد، علی اکبر و محمدی، مجید. (۱۴۰۱). بررسی دقت نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش آب‌کندی با استفاده از روش‌های SVM و MARS در حوزه آبخیز شازند. *علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، ۱۶(۵۹)، ۱۲-۲۲.
[DOR:20.1001.1.20089554.1401.16.59.1.4](https://doi.org/10.22092/IJWMSE.2018.120399.1435)
- شهبازی، علی؛ وکیلی تجره، فرزانه؛ الوندی، احسان؛ بیات، ا. و اسدی نلیوان، امید. (۱۴۰۰). ارزیابی مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و حداکثر آنتروپی در پهنه‌بندی حساسیت فرسایش آب‌کندی حوزه آبخیز سد گلستان. *مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، ۱۵، ۱۲-۲۳.
[DOR:20.1001.1.20089554.1400.15.52.4.6](https://doi.org/10.22092/IJWMSE.2018.120399.1435)
- صفاری، امیر؛ کرم، امیر؛ شادفر، صمد و احمدی، مهدی. (۱۳۹۸). تأثیر ویژگی‌های خاک بر مورفولوژی و گسترش فرسایش خندقی (مطالعه موردی: حوضه رودخانه مهران لامرد، فارس). *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۱(۱)، ۱۳۰-۱۴۶.

References

- Amiri, M., Pourqasmi, H., Ghanbarian, Gh-A., & Afzali, S. F. (2019). Spatial modeling of gully erosion using different scenarios and event weighting algorithm. *Watershed Engineering and Management*, 11(4), 1016-1032. [In Persian]
- Angileri, S.E., Conoscenti, Ch., Hochschild, V., Märker, M., Rotigliano, E., & Agnesi, V.

- (2016). Water erosion susceptibility mapping by applying stochastic gradient treeboost to the Imera Meridionale river basin (Sicily, Italy), *Geomorphology*, 262, 61-76. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.03.018>
- Arabameri, A., Pradhan, B., Rezaei, K., & Conoscenti, C. (2019). Gully erosion susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis techniques. *Catena*, 180, 282-297. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.04.032>
- Avand, M., S. Janizadeh, S.A. Naghibi, H.R. Pourghasemi, S. Khosrobeigi Bozchaloei, and Th Blaschke, (2019). A comparative assessment of random forest and k-nearest neighbor classifiers for gully erosion susceptibility mapping. *Water*, 11, 2076. <https://doi.org/10.3390/w11102076>
- Azedou, A., Lahssini, S., Khattabi, A., Meliho, M., & Rifai, N. (2021). A methodological comparison of three models for gully erosion susceptibility mapping in the rural municipality of El Faid (Morocco). *Sustainability*, 13, 682. <https://doi.org/10.3390/su13020682>
- Bui, D. T., Pradhan, B., Lofman, O., Revhaug, I., & Dick, O. B. (2012). Landslide susceptibility assessment in the Hoa Binh province of Vietnam: a comparison of the Levenberg–Marquardt and Bayesian regularized neural networks. *Geomorphology*, 171, 12-29. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.04.023>
- Davoudi Rad, A. A., & Mohammadi, M. (2022). Checking the accuracy of watershed erosion sensitivity map using SVM and MARS methods in Shazand watershed. *Iran Watershed Science and Engineering*, 16(59), 12-22. [In Persian].
- Grohmann, C. H., & Riccomini, C. (2009). Comparison of roving-window and search-window techniques for characterising landscape morphometry. *Computers & Geosciences*, 35(10), 2164-2169. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.12.014>
- Hosseinalizadeh, M., Kariminejad, N., Rahmati, O., Keesstra, S., Alinejad, M., & Behbahani, A. M. (2019). How can statistical and artificial intelligence approaches predict piping erosion susceptibility?. *Science of the Total Environment*, 646, 1554-1566. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.396>
- Kirkby, M., & Bracken, L. (2009). Gully processes and gully dynamics. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 34(14), 1841-1851. <https://doi.org/10.1002/esp.1866>
- Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J., & Li, W. (2004). Applied linear statistical models. *McGraw-hill*.
- LeRoux, J.J., & Sumner, P.D. (2012). Factors controlling gully development: comparing continuous and discontinuous gullies. *Land Degradation & Development*, 23, 440-49. <https://doi.org/10.1002/ldr.1083>
- Lucà, F., Conforti, M., & Robustelli, G. (2011). Comparison of GIS-based gully susceptibility mapping using bivariate and multivariate statistics: Northern Calabria, South Italy. *Geomorphology*, 134(3-4), 297-308. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.07.006>
- Mohammady, M., & Davudirad, A. (2023). Gully Erosion Susceptibility Assessment Using Different Machine Learning Algorithms: A Case Study of Shazand Watershed in Iran. *Environmental Modeling & Assessment*, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s10666-023-09910-4>
- Morgan, R. P. C. (2009). Soil erosion and conservation: *John Wiley & Sons*.
- Naghibi, S. A., Pourghasemi, H. R., & Dixon, B. (2016). GIS-based groundwater potential mapping using boosted regression tree, classification and regression tree, and random forest machine learning models in Iran. *Environmental monitoring and assessment*, 188, 1-27. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-5049-6>
- Pourghasemi, H. R., Gayen, A., Haque, S. M., & Bai, S. (2020). Gully erosion susceptibility assessment through the SVM machine learning algorithm (SVM-MLA). *Gully Erosion Studies from India and Surrounding Regions*, 415-425. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23243-6_28
- Pradhan, B. (2013). A comparative study on the predictive ability of the decision tree, support vector machine and neuro-fuzzy models in landslide susceptibility mapping using GIS. *Computers & Geosciences*, 51, 350-365. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.08.023>
- Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H. R., & Feizizadeh, B. (2017). Evaluation of different machine learning models for predicting and mapping the

- susceptibility of gully erosion. *Geomorphology*, 298, 118-137. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.09.006>
- Safari, A. Karam, A., Shadfar, S., & Ahmadi, M. (2019). The influence of soil characteristics on the morphology and spread of gully erosion (case study: Mehran Lamard River Basin, Fars). *Quantitative Geomorphology Research*, 8 (1), 130-146. [In Persian].
- Saha, A., S.Ch. Pal, A. Arabameri, I. Chowdhuri, F. Rezaie, R. Chakraborty, P. Roy, & M. Shit, (2021). Optimization modelling to establish false measures implemented with ex-situ plant species to control gully erosion in a monsoon-dominated region with novel in-situ measurements, *Journal of Environmental Management*, 287, 112284. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112284>
- Saha, S., Roy, J., Arabameri, A., Blaschke, T., & Tien Bui, D. (2020). Machine learning-based gully erosion susceptibility mapping: A case study of Eastern India. *Sensors*, 20(5), 1313. <https://doi.org/10.3390/s20051313>
- Shahbazi, A., Vakili Tejareh, F., Alwandi, E., Bayat, A., & Asadi Nelivan, O. (2021). Evaluation of artificial neural network models and maximum entropy in the zoning of hydrological erosion sensitivity of Golestan dam watershed. *Iranian Watershed Science and Engineering Journal*, 12-23, 15. [In Persian].
- Wang, F., Sahana, M., Pahlevanzadeh, B., Pal, S. C., Shit, P. K., Piran, M. J., . . . Mosavi, A. (2021). Applying different resampling strategies in machine learning models to predict head-cut gully erosion susceptibility. *Alexandria Engineering Journal*, 60(6), 5813-5829. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.04.026>
- Wang, G., Chen, X., & Chen, W. (2020). Spatial prediction of landslide susceptibility based on GIS and discriminant functions. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(3), 144. <https://doi.org/10.3390/ijgi9030144>
- Zucca, C., A. Canu, and R. D. Peruta, (2006). Effects of land use and landscape on spatial distribution and morphological features of gullies in an agropastoral area in Sardinia (Italy), *Catena*, 68, 87-95. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.03.01>