

Estimation of Soil Loss Volume Caused by Gully Erosion Using Machine Learning Models in Abgendi Watershed

Iman Saleh^{1*} , Seyed Masoud Soleimanpour², Majid Khazaei¹, Omid Rahmati³ and Samad Shadfar⁴

(Received: May 18-2025 ; Revised: October 14-2025 ; Accepted: November 1-2025)

1. Forests, Rangelands and Watershed Management Research Department, Kohgiluyeh & Boyer-Ahmad Agricultural and Natural Resources Research, and Education Center, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Yasuj, Iran.
2. Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran.
3. Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Sanandaj, Iran.
4. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

*: Corresponding author Email: salehiman61@gmail.com

Abstract

Soil loss and extensive degradation caused by gully erosion have always caused serious damage. Because direct field measurement and monitoring of gully erosion are costly and time-consuming, it is very difficult to determine the amount of soil loss caused by gully erosion. The present research was conducted to calculate the volume of soil loss due to gully erosion using machine learning models in the Abgendi watershed of Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad province based on field studies. Machine learning models include random forest, support vector machine, artificial neural network, and adaptive neural fuzzy inference system. The location of 68 gullies in the area was recorded. Hence, initially, digital layers of factors affecting the expansion of gullies, including topography, pedology, lithology, and hydrology, were prepared as independent variables to model soil loss caused by gullies. Then, representative gullies were selected in the studied watershed, and the volume of soil loss due to gully erosion was directly measured in the field as a dependent variable. The measured gullies were randomly divided into two training and validation groups. The results of the models were evaluated using root mean square error (RMSE) and R^2 , and the models were compared. According to the results, gully erosion in the Abgendi watershed of Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad province is increasing every year. Also, the amount of erosion and soil loss will increase when the amount of rainfall and the frequency of intense rainfall ($\geq 5\text{mm}$) are high. Among the machine learning models used in the present research, the random forest (RF) model was selected as the best model to predict soil loss generated by gully erosion.

Keywords: Abgendi, Random forest, Support vector machine, Artificial neural network, Gully erosion

How to cite this article: Saleh, I., Soleimanpour, S.M., Khazaei, M., Rahmati, O. and Shadfar, S. 2025. Estimation of Soil Loss Volume Caused by Gully Erosion Using Machine Learning Models in Abgendi Watershed. *J. Water and Soil Sci.* 29(4): 123-139. DOI: [10.47176/jwss.29.4.64692](https://doi.org/10.47176/jwss.29.4.64692)

Copyright © 2025 Saleh et al. Published by Isfahan University of Technology.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

تخمین هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشینی در حوزه آبخیز آبگندی

ایمان صالح^{۱*}، سید مسعود سلیمان‌پور^۲، مجید خزایی^۱، امید رحمتی^۳ و صمد شادفر^۴

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۲/۲۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۷/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۸/۱۰)

۱. بخش تحقیقات جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کهگیلویه و بویراحمد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یاسوج، ایران.
 ۲. بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران.
 ۳. بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سنندج، ایران.
 ۴. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.
- *: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: salehiman61@gmail.com

چکیده

هدررفت خاک و تخریب فراوان ناشی از فرسایش خندقی همواره خسارات فراوانی به همراه داشته است. به دلیل اینکه اندازه‌گیری مستقیم میدانی و پایش فرسایش خندقی امری هزینه‌بر و زمان‌بر است، امکان تعیین میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی بسیار مشکل است. این پژوهش با هدف محاسبه حجم خاک ازدست‌رفته ناشی از فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین در حوزه آبخیز آبگندی استان کهگیلویه و بویراحمد بر اساس مطالعات میدانی، انجام شده است. مدل‌های یادگیری ماشین عبارت‌اند از: جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان، شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنباط فازی عصبی تطبیقی. از این‌رو، موقعیت ۶۸ خندق در منطقه ثبت و به منظور مدل‌سازی هدررفت خاک ناشی از خندق‌ها، لایه‌های رقومی عوامل تأثیرگذار بر گسترش خندق‌ها از جمله عوامل توپوگرافی، خاک‌شناسی، سنگ‌شناسی و هیدرولوژیک به عنوان متغیرهای مستقل تهیه شد. سپس حجم خاک ازدست‌رفته ناشی از فرسایش خندقی منطقه در تعدادی خندق معرف به صورت مستقیم به عنوان متغیر وابسته در عرصه اندازه‌گیری شد. خندق‌های اندازه‌گیری‌شده، به صورت تصادفی به دو گروه آموزش و اعتبارسنجی تقسیم شدند. نتایج مدل‌ها با استفاده از خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و شاخص R^2 ارزیابی شده و مدل‌ها با یکدیگر مقایسه شدند. بر اساس نتایج این مطالعه، فرسایش خندقی در حوزه آبخیز استان کهگیلویه و بویراحمد هر ساله رو به افزایش است و در شرایطی که میزان بارندگی و همچنین فراوانی بارش‌های سنگین (بیشتر از مقدار پنج میلی‌متر یا بیشتر) و دارای شدت زیادی باشد، میزان فرسایش و هدررفت خاک به طور مستقیم افزایش چشمگیر خواهد داشت. از میان مدل‌های یادگیری ماشین مورد استفاده در این پژوهش، مدل جنگل تصادفی به عنوان مدل برتر در زمینه پیش‌بینی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی انتخاب شد.

واژه‌های کلیدی: آبگندی، جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان، شبکه عصبی مصنوعی، فرسایش خندقی

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. © ۱۴۰۴

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت

شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



مقدمه

فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین عوامل در کاهش عمق، حجم توده خاک و تخریب و کاهش حاصلخیزی است و به دلیل تخریب منابع زیست‌محیطی، یکی از مسائل مهم و بازدارنده در تحقق توسعه اقتصادی، اجتماعی و دستیابی به امنیت غذایی کشور است. نرخ سالانه فرسایش خاک در ایران ۳۳ تن در هکتار در سال گزارش شده است که ۶/۵ برابر حد مجاز است (۸)؛ به‌طوری که سالانه ۲ میلیارد تن از خاک حاصلخیز کشور در اثر فرسایش از دسترس خارج می‌شود. اشکال مختلفی از فرسایش آبی شناخته شده است که در این میان فرسایش خندقی یک شکل بسیار آشکار فرسایش خاک است که بهره‌وری خاک را تحت تأثیر قرار داده، استفاده از زمین را محدود می‌کند و می‌تواند برای جاده‌ها، ساختمان‌ها، اراضی کشاورزی و... تهدیدی جدی به شمار آید. یکی از موضوع‌های جالب توجه، تعیین سهم فرسایش خندقی به کل رسوب تولیدی در اکوسیستم‌های مختلف است. عوامل متعددی در تغییر سهم آن دخالت دارند که عبارت‌اند از: عوامل مکانی، زمانی، کنش‌های محیطی، نوع خاک، کاربری اراضی، توپوگرافی، آب‌وهوا و غیره. از آنجایی که میزان هدررفت خاک ناشی از خندق ارتباط مستقیمی با عوامل محیطی دارد، می‌توان بر اساس شرایط محیطی، میزان هدررفت خاک ناشی از هر خندق را مدل‌سازی کرد. مناطق با شیب ملایم، تراکم زیاد آبراهه، فقدان پوشش گیاهی و دارای رسوبات مارنی و آهکی، حساسیت بسیار زیادی نسبت به فرسایش خندقی دارند (۲۶). مدل‌سازی کمک می‌کند تا در زمان و هزینه اندازه‌گیری مشخصات خندق‌ها صرفه‌جویی شود. به‌طور کلی توصیه شده است که به منظور کاهش آثار مخرب بلایای طبیعی مانند فرسایش خندقی، مدل‌های مختلف یادگیری ماشین با در نظر گرفتن عوامل ورودی‌های متنوع بررسی و مقایسه شوند (۲۷).

پیشینه اقدامات انجام شده در خصوص مدل‌سازی فرسایش خندقی نشان می‌دهد که پژوهش‌های جدی در زمینه مدل‌سازی فرسایش‌های شیاری و خندقی عملاً از دهه ۱۹۷۰ در جهان آغاز شده و بیشتر مدل‌های ارائه‌شده نیز از نوع مدل‌های استوکاستیک

(Stochastic) و محدود به مناطق تحت تأثیر فرسایش هزاردره (Badland Erosion) بوده‌اند (۱، ۵، ۹، ۱۷ و ۱۹). نتایج حاصل از بررسی پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه فرسایش خندقی نشان داده است که در دهه ۱۹۸۰، اولین اقدامات درباره مبانی نظری نحوه شکل‌گیری فرسایش خندقی بر اساس قوانین فیزیکی آغاز شده است (۱۰، ۱۲، ۱۳ و ۱۵). اما از آنجا که نتایج پژوهش‌های انجام‌شده درباره فرسایش خندقی در دهه ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ منجر به دستیابی به کلیه اهداف و انتظارات مورد نیاز نشده و ابهامات زیادی در ابعاد مختلف آن وجود داشته است، در دهه ۱۹۹۰ پژوهش‌ها به صورت گسترده انجام گرفته و بر اساس نتایج حاصله اقدام به ارائه مدل‌هایی درباره روند شکل‌گیری و گسترش فرسایش خندقی به‌ویژه در دامنه‌های شیب‌دار و بستر دره‌های عریض شده است که امروزه پایه و اساس مطالعات تکمیلی درباره این نوع فرسایش محسوب می‌شود (۱۱، ۱۴ و ۲۴). در این زمینه رحمتی و همکاران (۱۶)، میزان کارایی هفت مدل یادگیری ماشین (جنگل تصادفی، درخت رگرسیونی پیشرفته، چهار کرنل مختلف مدل ماشین بردار پشتیبان) را برای پیش‌بینی مکانی حساسیت وقوع فرسایش خندقی با همدیگر مقایسه کردند. نتایج نشان داد که مدل‌های یادگیری ماشینی قابلیت زیادی در تجزیه و تحلیل روابط بین متغیرها دارند و به‌خوبی توانسته‌اند که نقشه حساسیت وقوع فرسایش خندقی مناسبی تولید کنند. همچنین گروسی و همکاران (۶) در حوزه آبخیز سد اکباتان به شناسایی مناطق مستعد وقوع فرسایش‌های خندقی با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین پرداختند. نتایج نشان داد که مدل درخت رگرسیونی پیشرفته و مدل شبکه عصبی مصنوعی کارایی زیادی در پیش‌بینی مناطق مستعد وقوع فرسایش خندقی دارند و میزان حساسیت این مدل‌ها به تغییرات تعداد نمونه‌ها کم و قابل چشم‌پوشی است. گاین و پورقاسمی (۷) نیز در یک حوزه آبخیز هند به مقایسه میزان دقت پیش‌بینی مدل‌های یادگیری ماشین شامل جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان، رگرسیون اسپلاین تطبیقی چندگانه (مارس) و آنالیز تشخیص انعطاف‌پذیر برای شناسایی مناطق مستعد خندق پرداختند. نتایج ثابت کرد که دقت

مستقیم فرسایش خندقی در سطوح وسیع امکان‌پذیر نیست. مدل‌سازی کمک می‌کند تا در زمان و هزینه اندازه‌گیری مشخصات خندق‌ها صرفه‌جویی شود. بدین منظور، این پژوهش در نظر دارد برای اولین بار در ایران، نسبت به انجام این مهم اقدام کند. سؤالاتی که این پژوهش به دنبال یافتن پاسخ برای آنهاست، عبارت‌اند از: ۱- حجم هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی در حوزه آبخیز آگندی استان کهگیلویه و بویراحمد چه مقدار است؟ ۲- کدام مدل یادگیری ماشین در تعیین حجم هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی در منطقه یاد شده دقیق‌تر است؟ همچنین هدف از انجام پژوهش حاضر، تعیین حجم هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندق و نیز معرفی مناسب‌ترین مدل پیش‌بینی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی در حوزه آبخیز آگندی استان کهگیلویه و بویراحمد است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

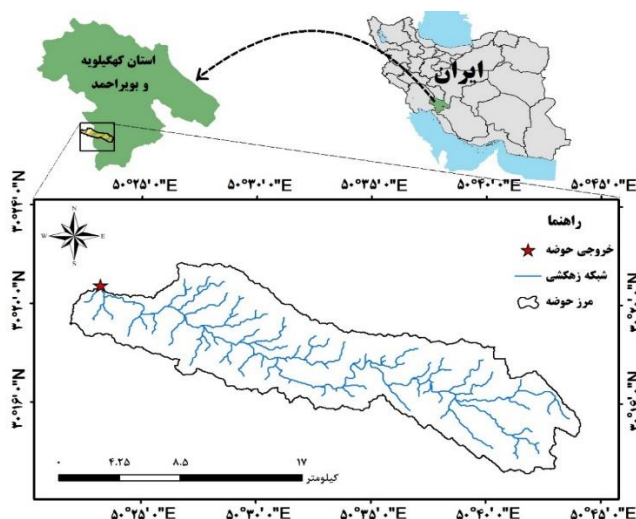
حوزه آبخیز آگندی در ۳۵ کیلومتری جنوب غربی شهرستان گچساران واقع در استان کهگیلویه و بویراحمد بین طول جغرافیایی ۴۵ درجه و ۲۱ دقیقه و ۲۵ ثانیه تا ۴۷ درجه و ۶۳ دقیقه و ۳۵ ثانیه و عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۳۸ دقیقه و ۲۶ ثانیه تا ۳۳ درجه و ۵۷ دقیقه و ۵۸ ثانیه قرار دارد. متوسط بارندگی سالانه محدوده مورد مطالعه ۳۸۶/۹ میلی‌متر، بیشینه میزان بارندگی ۲۴ ساعته ۷۶/۹ میلی‌متر، متوسط میزان تبخیر سالانه ۲۹۳۴ میلی‌متر و متوسط دمای روزانه ۲۱/۴ درجه سانتی‌گراد است. اقلیم منطقه طبق روش آمبرژه، نیمه‌خشک معتدل و طبق روش کوپن، مدیترانه‌ای با زمستان معتدل است. از نظر زمین‌شناسی نیز کل حوضه از سازندهای آغاجاری، گچساران، میشان و بختیاری تشکیل شده است (شکل ۱).

مواد و روش‌ها

بازدید میدانی و ثبت موقعیت تمام خندق‌های مناطق مورد مطالعه در این مرحله، حوضه آگندی که دارای مشکلات بیشتری در زمینه

تمام مدل‌ها خوب (معیار مساحت منحنی بیشتر از ۸۰ درصد) بوده و مدل جنگل تصادفی بیشترین دقت را به خود اختصاص داده است. نتایج پژوهش‌های مختلف نشان‌دهنده این است که تاکنون، میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش‌های خندقی با استفاده از رویکرد "مدل‌های یادگیری ماشین (Machine learning models)" تعیین نشده است که در این پژوهش برای اولین بار به ارزیابی کارایی مدل‌های یادگیری ماشین در این زمینه پرداخته می‌شود.

در دو دهه اخیر بیشترین نوع فرسایشی که در سطح استان کهگیلویه و بویراحمد ظاهر شده، فرسایش آبکندی بوده است؛ به‌طوری که ظهور پدیده فرسایش آبکندی در منطقه دریا (شهرستان گچساران) که یکی از مناطق گرمسیری استان است، مراتع و مزارع عشایری را به طور جدی مورد تهدید قرار داده است. همچنین در شهرستان دهدشت که بخش عمده حوزه آبخیز سد مارون در آنجا واقع شده است نیز از این پدیده به‌شدت متأثر شده و نه‌تنها باعث تخریب اراضی زراعی دیم منطقه شده، بلکه تهدیدی برای پر شدن سد مارون است. در منطقه آبکندی نیز شدیدترین اشکال فرسایش خندقی با تراکم بسیار زیاد به چشم می‌خورند که هر ساله رو به گسترش بوده و دارای هدررفت خاک زیاد ناشی از فرسایش خندقی است؛ به‌طوری که ۳۶/۶ درصد از سطح حوضه در طبقه شدید فرسایش خندقی قرار دارد (۱۸)؛ از این رو پایداری اکوسیستم در این منطقه بر اثر تخریب سرزمین، از بین رفتن اراضی و تولید رسوب نه‌تنها با مشکل روبرو شده است، بلکه وضعیت اقتصادی - اجتماعی ساکنان منطقه را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. با توجه به هدررفت و تخریب فراوان ناشی از فرسایش خندقی و اهمیت حفاظت از منابع خاک در منطقه مورد اشاره، ضروری است تا نسبت به انجام یک برآورد دقیق از میزان هدررفت خاک توسط این نوع فرسایش اقدام شود. از آنجا که میزان هدررفت خاک ناشی از خندق ارتباط مستقیمی با عوامل محیطی دارد، می‌توان بر اساس شرایط محیطی، میزان هدررفت خاک ناشی از هر خندق را مدل‌سازی کرد. از طرف دیگر، اندازه‌گیری میدانی میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی، بسیار زمان‌بر و هزینه‌بر بوده؛ به‌طوری که اندازه‌گیری



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز آبگندی

پژوهش کازالی و همکاران (۳)، در فواصل ۱۰ متری از سر هر خندق تا انتهای آن اندازه‌گیری شد.
- محاسبه سطح مقطع عرضی خندق (Cross-sectional area)، از معادله ۲ (۲۰) در سه مقطع زمانی مختلف (سال اول، سال دوم و سال سوم):

$$CA = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{W_1 + W_2}{2} \right) D \right) \quad (2)$$

در این معادله، CA: سطح مقطع عرضی خندق (مترمربع)، W_1 : عرض بالای خندق (متر)، W_2 : عرض پایین خندق (متر) و D: عمق خندق (متر) است.
- محاسبه حجم خاک ازدست‌رفته ناشی از فرسایش خندقی، طبق معادله ۳ (۲۰):

$$V = \sum_{i=1}^n L \left[\left(\left(\frac{W_1 + W_2}{2} \right) D \right) \right] \quad (3)$$

در این معادله، V: حجم خاک ازدست‌رفته ناشی از فرسایش خندقی (مترمکعب)، L: طول خندق (متر)، W_1 : عرض بالای خندق (متر)، W_2 : عرض پایین خندق (متر) و D: عمق خندق (متر) است.

نمونه‌برداری خاک خندق‌ها و تعیین جرم مخصوص

- اندازه‌گیری جرم مخصوص ظاهری خاک: به این منظور از دیواره‌های

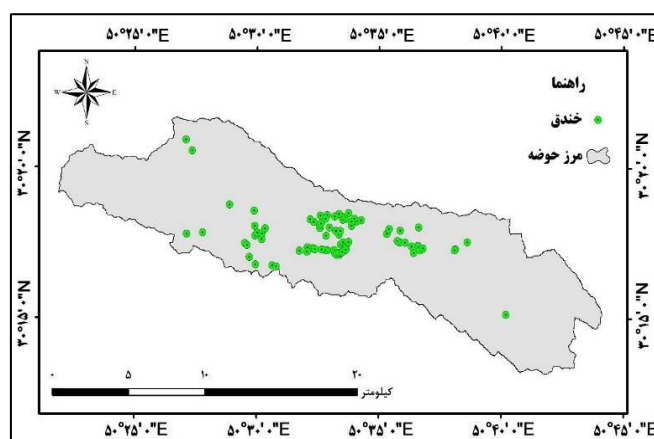
فرسایش خندقی است، به منظور انجام پژوهش انتخاب شد. موقعیت تمامی خندق‌های حوزه مورد مطالعه با استفاده از دستگاه GPS ثبت شد تا آمار دقیقی از تعداد و پراکنش خندق‌های حوزه مشخص شود (شکل ۲).

تعیین تعداد خندق‌ها برای اندازه‌گیری میدانی

تعداد خندق‌های موردنیاز برای اندازه‌گیری میدانی با استفاده از فرمول کوکران (معادله ۱) تعیین شد (۴).

$$n = \frac{\frac{Z^2 pq}{d^2}}{1 + \frac{1}{N} \left(\frac{Z^2 pq}{d^2} - 1 \right)} \quad (1)$$

که در آن n حجم نمونه آماری و N حجم جامعه آماری است. پارامتر d اشتباه مجاز است که معمولاً ۰/۰۵ در نظر گرفته می‌شود. پارامتر Z مقدار متغیر نرمال با سطح اطمینان a-1 است. در آزمون دو دامنه مقدار Z برای سطح اطمینان ۹۵ درصد برابر ۱/۹۶ و برای سطح ۹۹ درصد برابر ۲/۵۸ است. پارامتر p نسبت برخورداری از صفت مد نظر و پارامتر q نسبت عدم برخورداری از صفت مد نظر است. معمولاً مقدار p و q ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود. در این مرحله کفایت داده‌ها از لحاظ آماری مد نظر قرار می‌گیرد. اندازه‌گیری پارامترهای ابعادی خندق‌ها شامل: طول خندق، عرض بالا، عرض پایین و عمق خندق با مبنا قرار دادن



شکل ۲. نقشه موقعیت خندق‌های ثبت‌شده در حوزه آبخیز آبگندی

میزان هدررفت خاک خندق‌ها به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شده‌اند. خندق‌های معرف به صورت تصادفی به دو گروه آموزش (۷۰ درصد خندق‌های معرف) و اعتبارسنجی (۳۰ درصد خندق‌های معرف) تقسیم شدند. مدل‌ها بر اساس خندق‌های گروه آموزش، آموزش داده شده و روابط بین متغیرهای مستقل و وابسته شناسایی شد. در این پژوهش، سه مدل مختلف یادگیری ماشینی شامل ماشین بردار پشتیبان ((SVM(Support Vector)، جنگل تصادفی (RF (Random Forest)) و شبکه عصبی مصنوعی (Artificial ANN (Neural Network)) برای انجام این بخش در نظر گرفته شده است که در ادامه چگونگی به کارگیری مدل‌ها به منظور پیش‌بینی هدررفت خاک خندق‌ها به صورت مختصر بیان می‌شود.

الف) مدل ماشین بردار پشتیبان

مدل ماشین بردار پشتیبان یکی از مدل‌های ماشین یادگیری نظارت‌شده است که به منظور طبقه‌بندی تفکیک گروه‌ها به کار می‌رود. به منظور به کارگیری این مدل در مدل‌سازی هدررفت خاک ناشی از خندق‌ها، ابتدا تمام لایه‌های رقومی عوامل تأثیرگذار بر وقوع و رشد خندق که به عنوان متغیرهای مستقل در مدل‌سازی انتخاب شده‌اند، به ساختار رستری (با اندازه پیکسل برابر) تبدیل می‌شود. سپس اطلاعات مکانی هدررفت خاک خندق‌های گروه آموزش (واسنجی) که در حقیقت به عنوان متغیر وابسته این پژوهش مد نظر قرار دارند، نیز به صورت ساختار رستری در محیط جی.آی.اس تهیه می‌شود. سپس برای اجرای

چپ و راست، پیشانی و خروجی هر خندق نمونه‌های خاک توسط استوانه‌های فلزی استاندارد (کور) برداشت شد. پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، جرم مخصوص ظاهری اندازه‌گیری شده و سپس میانگین آنها محاسبه شد.

- محاسبه وزن خاک فرسایش‌یافته ناشی از فرسایش خندقی: به این منظور مقدار حجم خاک ازدست‌رفته در هر خندق (V)، در جرم مخصوص ظاهری خاک هر خندق ضرب شده و پس از جمع مقادیر خندق‌های منتخب، وزن خاک فرسایش‌یافته ناشی از فرسایش خندقی محاسبه شد.

تعیین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده برآورد فرسایش خندقی

از آنجایی که میزان هدررفت خاک ناشی از خندق‌ها تحت تأثیر عوامل متعددی است، تاکنون چارچوب دقیقی برای تعیین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده تعیین نشده است. بر اساس مطالعات گذشته، تعدادی از عوامل محیطی به عنوان متغیرهای مستقل (متغیرهای پیش‌بینی‌کننده) انتخاب شد. در این پژوهش، عوامل پیش‌بینی‌کننده عبارت‌اند از: ارتفاع، شیب، جهت، انحنا سطح و شاخص موقعیت شیب نسبی، خاک‌شناسی، سنگ‌شناسی، فاصله از جریان، تراکم زهکشی، شاخص رطوبت توپوگرافی و بارندگی.

آموزش و واسنجی مدل‌ها

در فرایند مدل‌سازی، عوامل محیطی به عنوان متغیرهای مستقل و

داده‌های اندازه‌گیری شده میزان هدررفت خندق‌ها به عنوان متغیر وابسته و همچنین اطلاعات مربوط به عوامل محیطی (فاکتورهای پیش‌بینی‌کننده) به عنوان متغیر مستقل به مدل جنگل تصادفی معرفی شدند. سپس این مدل میزان هدررفت خاک ناشی از هر خندق را برآورد کرد.

پ) مدل شبکه عصبی مصنوعی

مدل شبکه عصبی مصنوعی، یک روش مناسب برای حل مسائل پیچیده است که تاکنون روابط و قوانین مشخصی برای تحلیل آنها یافت نشده است. یکی از قابلیت‌های مهم شبکه‌های عصبی مصنوعی، درک و تحلیل رفتار غیرخطی یک سیستم است. شبکه‌های عصبی مانند شبکه عصبی طبیعی از اجزائی به نام سلول عصبی تشکیل شده‌اند. این سلول‌ها بسته به نوع مدل شبکه عصبی مصنوعی، با ساختار و ترتیب خاصی با یکدیگر ارتباط دارند. یکی از متداول‌ترین مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، مدل شبکه پرسپترون چندلایه است که در آن سلول‌های عصبی در لایه‌های موازی قرار گرفته‌اند. این ساختار چندلایه دارای لایه ورودی، یک یا چند لایه پنهان و یک لایه خروجی است. به منظور دستیابی به یک مدل کارتر، ساختارهای مختلف باید ارزیابی شود و از بهترین ساختار در مدل استفاده کرد. فرایندهای طبیعی مانند وقوع و گسترش فرسایش‌های خندقی نیز بسیار پیچیده هستند که شناخت روابط بین عوامل محیطی و این فرایندها دشوار است. در این پژوهش به منظور تخمین هدررفت خاک ناشی از خندق‌ها، از مدل شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه استفاده شده است.

گفتنی است در این مرحله بر اساس داده‌های گروه آموزش (۷۰ درصد داده‌ها)، آموزش مدل‌ها یا کالیبراسیون انجام می‌گیرد تا مدل‌ها بتوانند روابط بین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده و میزان هدررفت خاک خندق‌ها را شناسایی کنند. هر مدل دارای پارامترهایی است که در مرحله کالیبراسیون بایستی تنظیم شود. همچنین، دقت مدل‌ها در این مرحله نیز با استفاده از معیارهای کمی مانند خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، شاخص R^2 و شاخص میزان تطابق (d) بررسی شد. هرچه میزان شاخص

مدل ماشین بردار پشتیبان، تمام لایه‌های رستری ساخته شده وارد نرم‌افزار Matlab می‌شوند. پس از انجام آنالیزهای اولیه اطلاعات متغیرهای مستقل و متغیر وابسته، مدل ماشین بردار پشتیبان برنامه‌نویسی شده و در محیط نرم‌افزار R اجرا می‌شود. مدل ماشین بردار پشتیبان دارای چهار نوع تابع کرنال مختلف، خطی (Linear)، چندجمله‌ای (Polynomial)، تابع پایه شعاعی (RBF) یا Radial Basis Function و هلالی (Sigmoid) است. در این پژوهش رایج‌ترین کرنال مدل ماشین بردار پشتیبان، یعنی تابع پایه‌ای شعاعی استفاده شد.

ب) مدل جنگل تصادفی

مدل جنگل تصادفی یکی از روش‌های مدل‌سازی درخت تصمیم است (۲). در مسائل مربوط به رگرسیون، جنگل تصادفی تعداد اختیاری از درختان ناآزموده (زیرمجموعه‌ای از متغیرهای مستقل) است که نتایج واکنش این درختان به صورت ترکیبی برای تخمین صحیح متغیرهای وابسته مورد استفاده قرار می‌گیرد. نمونه‌گیری تصادفی از اطلاعات و متغیرها، به صورت خودکار و تکرارشونده به منظور تولید انبوهی از درختان رگرسیونی انجام می‌شود. برای تعیین تعداد بهینه درختان، ابتدا یک تعداد درخت اولیه به منظور تولید گراف تغییرات میانگین مربعات خطا در مقابل تعداد خاص درختان نمونه آموزشی و ارزیابی است، استفاده می‌شود. این یک ابزار تحلیلی بسیار قدرتمند برای جستجوی اطلاعات و اصلاح تعداد بهینه درختان در مدل جنگل تصادفی است. تعداد درختان بهینه به گونه‌ای انتخاب می‌شود که اولاً کمترین مقدار میانگین مربعات خطا در مدل‌سازی به دست آید و ثانیاً تعداد درختان نباید آنقدر زیاد شود که تجزیه و تحلیل متغیرها نیازمند زمان و محاسبات کامپیوتری زیادی باشد. به منظور به کارگیری این مدل برای برآورد فرسایش خندقی از نرم‌افزار R و پکیج Random Forest استفاده شد. مدل جنگل تصادفی این قابلیت را دارد که میزان خطای به وجود آمده در بهم‌پیوستن اطلاعات درختان ایجاد شده را برحسب شاخص OOB (Out-Of-Bag) نشان دهد که بر اساس آن می‌توان تعداد درختان ساخته شده برای آنالیز داده‌های وارد شده به نرم‌افزار را بهینه‌سازی کرد. در این پژوهش،

درصد سطح حوضه دارای شیب صفر تا ۲۰ درجه است. غالب شیب منطقه دارای جهت‌های جنوب غربی، غرب و شمال به ترتیب با ۱۷، ۱۴/۷ و ۱۴/۷ درصد سطح کل حوضه است. جهت‌های جنوب، شمال شرقی، شمال غربی، جنوب شرقی و شرق نیز در رتبه‌های بعد قرار دارند. فاصله از آبراهه در حوضه مورد مطالعه از صفر تا ۱۹۲۳ متر متغیر است و همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، میزان این فاصله به دلیل تراکم شبکه زهکشی در بیشتر نقاط حوضه ناچیز است. این حوضه دارای یک جاده اصلی است و همان‌طور که در شکل ۳ (نقشه فاصله از جاده) مشخص است، فاصله تا جاده در نقاط مختلف حوضه از صفر تا ۹۸۵۹ متر است. بخش عمده حوضه مورد مطالعه را (۵۸ درصد مساحت کل حوضه برابر با ۱۲۵/۵۶ کیلومترمربع) مراتع با پوشش فقیر تشکیل می‌دهند. مرتع خوب با ۷۱/۲۸ کیلومترمربع و زراعت دیم با ۱۹/۷۲ کیلومترمربع نیز در رده‌های بعدی قرار دارند. همچنین کمترین سطح مربوط به بیشه‌زار و بوت‌ه‌زار است.

مدل‌سازی رشد فرسایش خندقی در حوضه آبگندی

نمودارهای پراکنش داده‌های مشاهداتی و برآوردی هدررفت خاک ناشی از فرسایش‌های خندقی در مرحله آموزش و با رویکردهای تقسیم داده اول (M_1)، دوم (M_2) و سوم (M_3) در شکل ۴ نشان داده شده است. در این پژوهش سه مدل جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد.

دقت پیش‌بینی مدل‌های جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی در رویکردهای مختلف در مرحله آموزش (واسنجی) در جدول ۱ ارائه شده است. دقت مدل‌ها در این مرحله فقط برای اطمینان از برازش داده‌ها بوده و آموزش دیدن مدل‌ها بررسی شده است. در صورتی که مدلی در این مرحله آموزش کافی ندیده باشد، امکان پیش‌بینی و تعمیم آن به داده‌هایی که در اختیار مدل قرار نگرفته است، از نظر علمی و فنی فراهم نیست. با توجه به اینکه داده‌های گروه آموزش در اختیار مدل قرار می‌گیرد، عملکرد مدل‌ها بر اساس دقت مدل در

تطابق (d) به عدد یک نزدیک‌تر باشد، دقت مدل بیشتر خواهد بود. هنگامی که آموزش یک مدل در این مرحله به اندازه کافی انجام شده باشد، می‌تواند مدل به تعمیم نتایج و پیش‌بینی بپردازد.

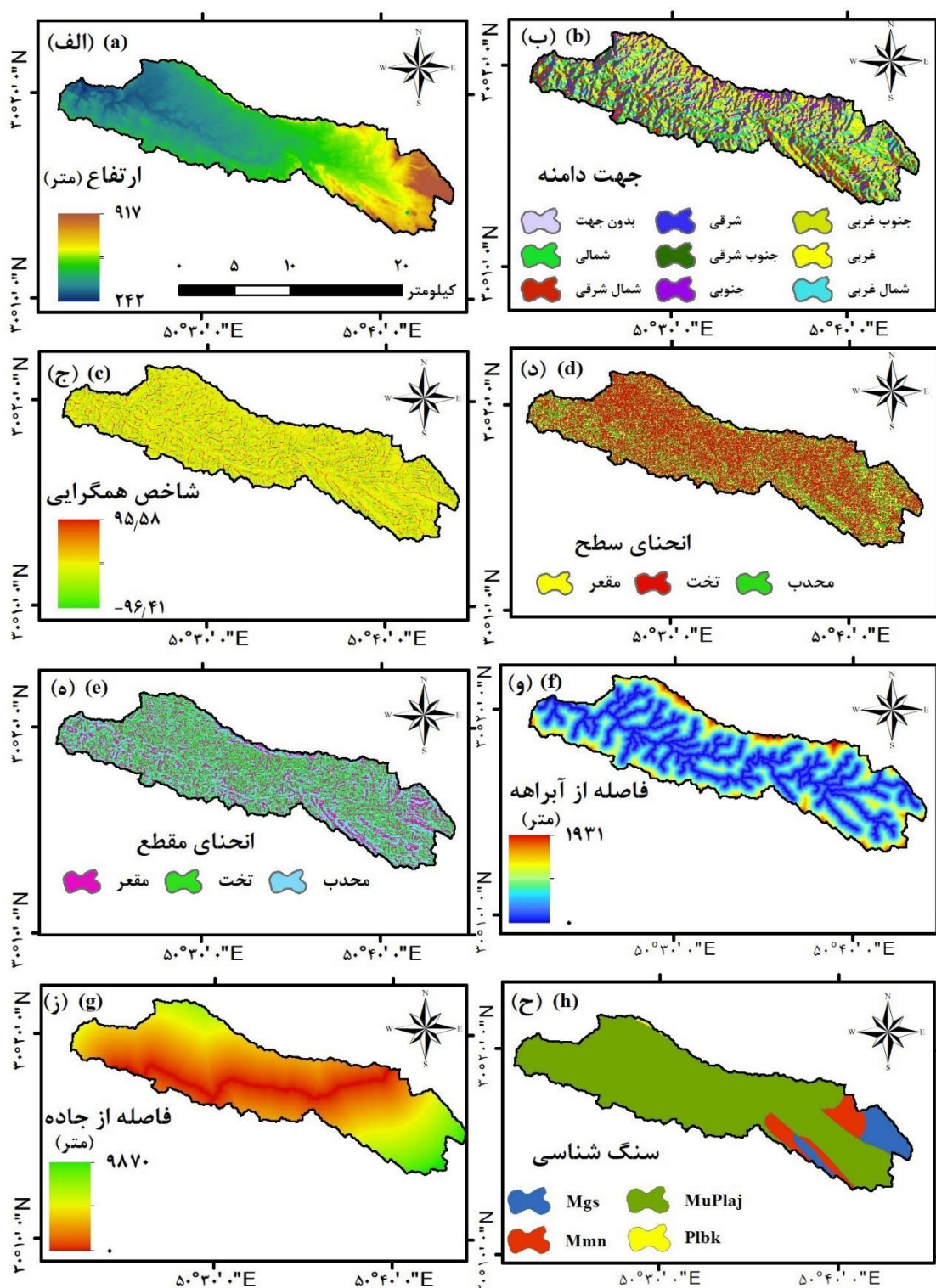
صحت‌سنجی مدل‌ها

در این مرحله میزان دقت مدل برای پیش‌بینی بر اساس داده‌های گروه اعتبارسنجی (۳۰ درصد داده‌ها) بررسی شد که با عنوان صحت‌سنجی یا اعتبارسنجی مطرح می‌شود. از آنجایی که خندق‌های گروه اعتبارسنجی در آموزش مدل‌ها استفاده نشده است، تعیین دقت پیش‌بینی مدل‌ها بر اساس آنها یک معیار مهم در ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌ها است. در نهایت، پس از تعیین دقت مدل‌های مختلف، شرایط برای مقایسه کمی مدل‌ها و تعیین مدل برتر برای پیش‌بینی هدررفت خاک فراهم است.

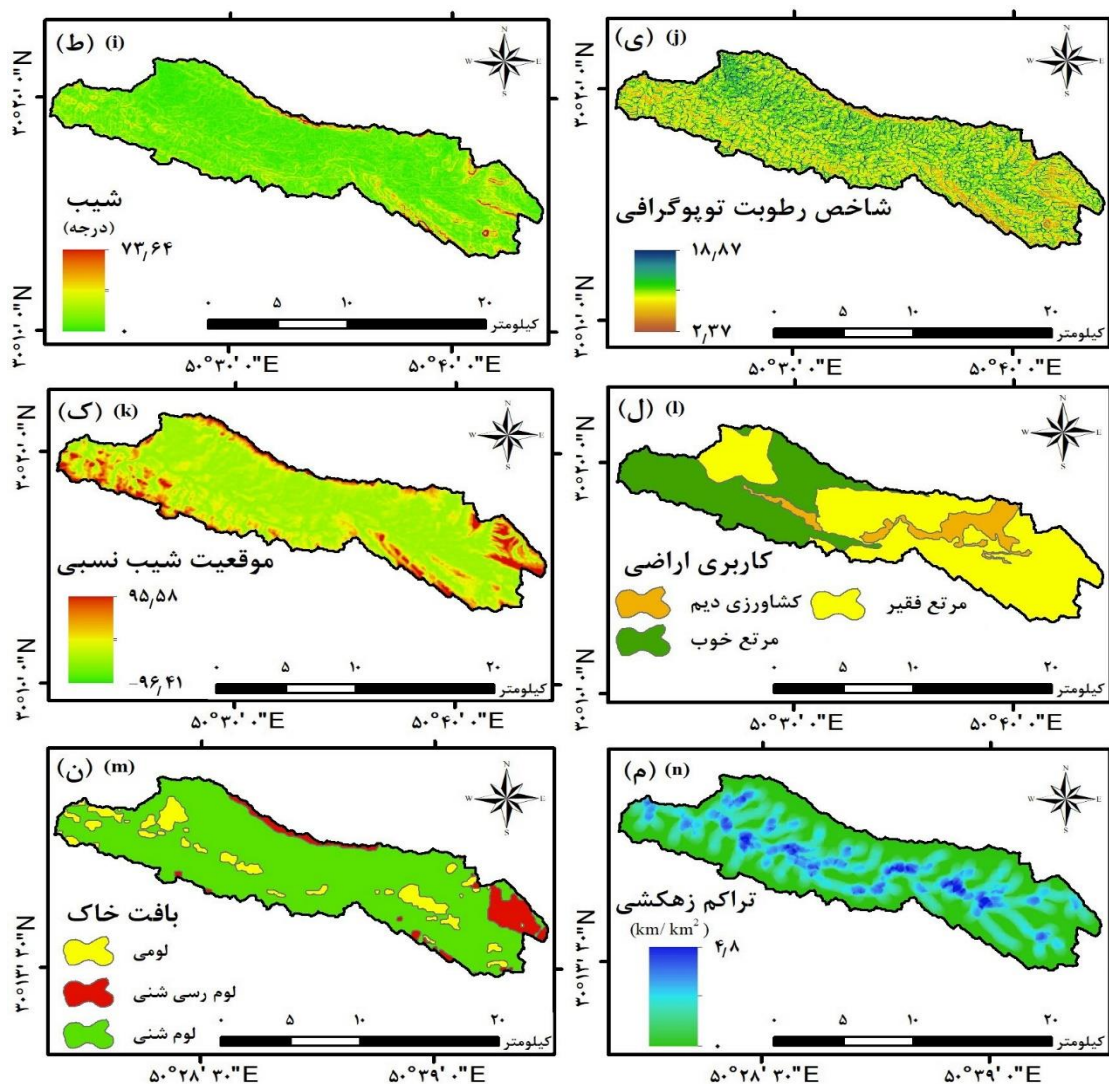
نتایج

در بازدیدهای انجام شده، موقعیت تمامی خندق‌ها در هر یک از حوزه‌های آبخیز منتخب با استفاده از دستگاه GPS ثبت شد و بر اساس فرمول کوکران تعداد ۶۸ خندق مورد پایش و مطالعه قرار گرفت.

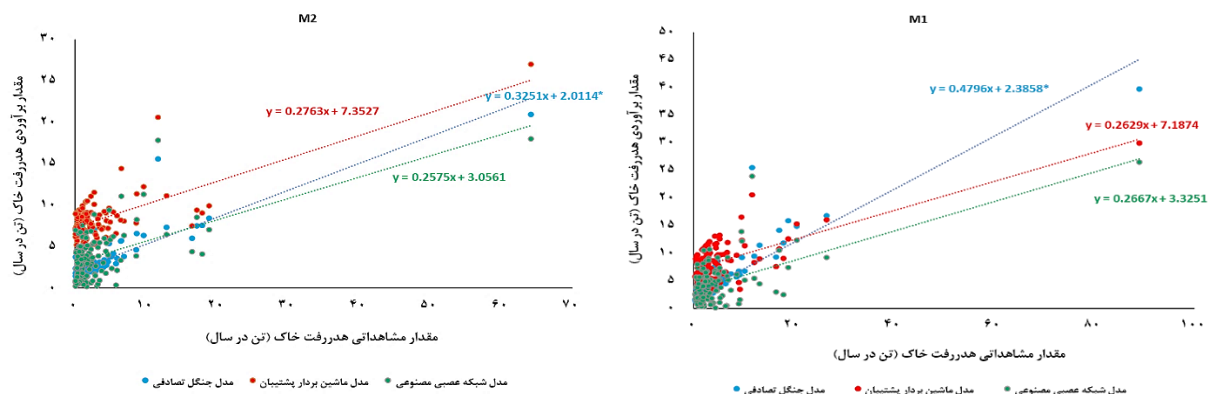
به‌منظور انجام دقیق‌تر این پژوهش، اقدام به تهیه و ترسیم نقشه‌های پایه و مورد نیاز در محیط ArcGIS شد (شکل ۳). عوامل محیطی در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی رشد فرسایش‌های خندقی عبارت‌اند از: ارتفاع، شیب، جهت شیب، سنگ‌شناسی، فاصله از آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی، کاربری اراضی، انحنا سطح، انحنا مقطع، بارندگی سالانه، موقعیت شیب نسبی، فاصله از جاده، تراکم زهکشی و بافت خاک. بر اساس نقشه ارتفاع، ارتفاع حوضه آبگندی از ۲۴۲ تا ۹۱۷ متر از سطح دریا متغیر است که حدود ۵۸ درصد از سطح حوضه در ارتفاع ۴۴۰-۴۴۰ متر از سطح دریا واقع شده و عمده خندق‌های موجود در منطقه نیز در همین محدوده ارتفاعی واقع شده‌اند. همچنین نقشه شیب نشان می‌دهد که شیب منطقه مورد مطالعه از صفر تا ۷۳/۶۴ درجه متغیر است و این در حالی است که بیش از ۹۵



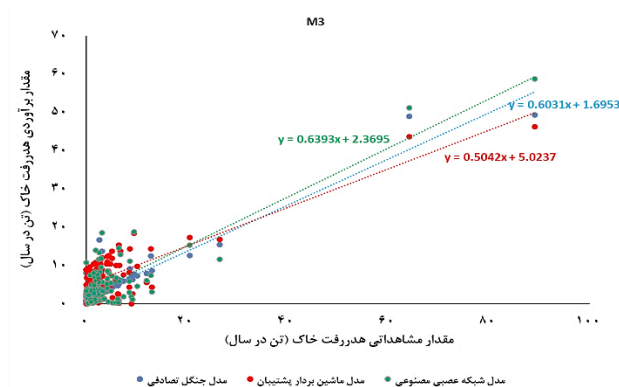
شکل ۳. نقشه عوامل محیطی موثر در وقوع فرسایش خندقی شامل (الف) ارتفاع، (ب) جهت دامنه، (ج) شاخص همگرایی، (د) انحنای سطح، (ه) انحنای مقطع، (و) فاصله از آبراهه، (ز) فاصله از جاده، (ح) سنگ شناسی، (ط) شیب، (ی) شاخص رطوبت توپوگرافی، (ک) موقعیت شیب نسبی، (ل) کاربری اراضی، (ن) بافت خاک، (م) تراکم زهکشی



شکل ۳. نقشه عوامل محیطی موثر در وقوع فرسایش خندقی شامل (الف) ارتفاع، (ب) جهت دامنه، (ج) شاخص همگرایی، (د) انحنای سطح، (ه) انحنای مقطع، (و) فاصله از آبراهه، (ز) فاصله از جاده، (ح) سنگ‌شناسی، (ط) شیب، (ی) شاخص رطوبت توپوگرافی، (ک) موقعیت شیب نسبی، (ل) کاربری اراضی، (ن) بافت خاک، (م) تراکم زهکشی (ادامه شکل ۳)



شکل ۴. مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی هدررفت خاک در مرحله آموزش با رویکرد تقسیم داده M_1 ، M_2 و M_3



شکل ۴. مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی هدررفت خاک در مرحله آموزش با رویکرد تقسیم داده M1، M2 و M3 (ادامه شکل ۴)

جدول ۱. ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌ها در مرحله آموزش در حوضه آبگندی

مدل مورد استفاده				
معیار ارزیابی	رویکرد تقسیم داده	جنگل تصادفی	ماشین بردار پشتیبان	شبکه عصبی مصنوعی
R ²	M ₁	*۰/۸۰	۰/۴۳	۰/۳۶
	M ₂	*۰/۷۶	۰/۵۱	۰/۳۳
	M ₃	*۰/۸۹	۰/۶۲	۰/۷۵
RMSE	M ₁	۴/۸۲	۷/۷۲	۶/۸۶
	M ₂	۴/۴۰	۷/۱۳	۵/۲۷
	M ₃	۴/۳۸	۶/۸۳	۵/۱۱
RMSE (%)	M ₁	۶/۴۵	۱۳/۲۶	۹/۱۲
	M ₂	۵/۶۲	۱۳/۳۶	۸/۸۹
	M ₃	۵/۷۳	۱۵/۴۲	۸/۷۷
RSR	M ₁	۰/۵۷	۰/۹۱	۰/۸۱
	M ₂	۰/۷۰	۱/۱۳	۰/۸۳
	M ₃	۰/۴۵	۰/۷	۰/۵۲
d	M ₁	۰/۸۵	۰/۶۲	۰/۶۴
	M ₂	۰/۷۳	۰/۵۸	۰/۶۲
	M ₃	۰/۹۲	۰/۸۲	۰/۹۱

مرحله آموزش قابل قضاوت نیست. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، هر سه مدل مورد استفاده در این پژوهش قابلیت ورود به مرحله بعدی را دارند و با در نظر گرفتن شرایط محیطی، می‌توانند به پیش‌بینی میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش‌های خندقی بپردازند.

ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌ها در حوضه آبگندی دقت پیش‌بینی مدل‌ها تنها بر اساس مقایسه داده‌های مشاهداتی گروه اعتبارسنجی و داده‌های برآوردی مدل‌ها قابل ارزیابی است؛ زیرا مدل در این مرحله از داده‌های میزان هدررفت خاک گروه

شاخص تطابق (D) نسبت به مدل‌های دیگر از عملکرد بهتری برخوردار بود، به عنوان مدل برتر برای پیش‌بینی میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش‌های خندقی در حوزه آبخیز آبگندی معرفی شد. این در حالی است که مدل ماشین بردار پشتیبان با تأیید شاخص‌های ارزیابی مورد اشاره، ضعیف‌ترین عملکرد را داشته است.

بحث

وضعیت هدررفت خاک ناشی از فرسایش‌های خندقی در حوزه آبخیز آبگندی

در منطقه آبگندی استان کهگیلویه و بویراحمد شدیدترین اشکال فرسایش خندقی با تراکم بسیار زیاد به چشم می‌خورند که هر ساله رو به گسترش بوده و دارای هدررفت خاک زیاد ناشی از فرسایش خندقی است؛ به طوری که ۳۶/۶ درصد از سطح حوزه در طبقه شدید فرسایش خندقی قرار دارد (۱۸). بر اساس پایش‌های سالانه ابعاد هندسی خندق‌های منتخب در این حوزه، تغییرات سالانه خندق‌ها مشهود است. بر اساس پایش‌های میدانی مستقیم و محاسبات انجام شده، مجموع هدررفت خاک ناشی از خندق‌های منتخب در این حوزه در سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲ به ترتیب ۲۳۱/۰۹، ۳۵۹/۰۴ و ۱۷۶/۲۷ تن به دست آمده است. در این حوزه تاکنون مطالعات دقیقی برای اندازه‌گیری یا تخمین میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش‌های خندقی در بازه زمانی مورد مطالعه یا گذشته انجام نشده است تا مورد مقایسه قرار گیرد. از آنجایی که عامل اصلی و محرک فرسایش‌های خندقی بارندگی است، میزان میانگین بارندگی سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲ نیز مؤید این تغییرات است؛ به گونه‌ای که میانگین بارندگی حوزه در این سال‌ها به ترتیب ۳۶۱/۴، ۵۴۱/۵ و ۱۰۹/۶ میلی‌متر بوده است. از طرف دیگر، فراوانی بارش‌های چشمگیر (مقدار بارندگی بیشتر از ۵ میلی‌متر) در این حوزه در سال‌های پایش با میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش‌های خندقی انطباق دارد؛ به گونه‌ای که میانگین فراوانی این نوع بارش‌ها برای خندق‌های منتخب در سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲ به ترتیب ۱۸، ۲۸ و ۷ بوده است. شهریور

اعتبارسنجی اطلاعاتی ندارد. نتایج ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌ها در حوزه آبگندی برای رویکردهای مختلف تقسیم داده در مرحله اعتبارسنجی و بر اساس معیارهای ارزیابی مختلف در جدول ۲ ارائه شده است. از نظر معیار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، مدل جنگل تصادفی مدل ماشین بردار پشتیبان کمترین مقدار خطا را داشته و پس از آن به ترتیب شبکه عصبی مصنوعی و مدل ماشین بردار پشتیبان قرار دارند. مدل جنگل تصادفی بر اساس معیار ارزیابی ضریب تبیین ($R^2=0.81-0.85$) بهترین عملکرد را نشان داده و پس از آن مدل شبکه عصبی مصنوعی ($R^2=0.54$) و مدل ماشین بردار پشتیبان ($R^2=0.50$) در جایگاه‌های دوم و سوم قرار گرفتند. از نظر معیار ارزیابی شاخص خطای RSR، مدل جنگل تصادفی دارای کمترین مقدار این شاخص ($RSR=0.59$) بوده و بیشترین دقت را به خود اختصاص داده است. مدل شبکه عصبی مصنوعی نیز از نظر شاخص خطای RSR در جایگاه دوم عملکرد و مدل ماشین بردار پشتیبان در جایگاه سوم قرار گرفته است. از نظر شاخص ارزیابی تطابق، مدل جنگل تصادفی دارای بیشترین تطابق میان داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی بوده و بیشترین مقدار این شاخص (0.73) را به خود اختصاص داده است که از منظر این شاخص در جایگاه اول عملکردی قرار گرفته است. همچنین مدل شبکه عصبی مصنوعی با مقدار شاخص تطابق 0.73 در جایگاه دوم عملکرد و مدل ماشین بردار پشتیبان با مقدار شاخص تطابق 0.55 در جایگاه سوم عملکرد قرار گرفتند. از یک نگاه جامع‌تر، مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش از میان خوش‌نام‌ترین و کارآمدترین مدل‌های هوش مصنوعی انتخاب شده‌اند و میزان دقت پیش‌بینی آنها از نظر معیارهای ارزیابی مختلف دارای تغییراتی است که معمولاً در چنین شرایطی یا یک معیار ارزیابی واحد برای تعیین اولویت‌بندی دقت پیش‌بینی مدل‌ها انتخاب شده و یا انتخاب مدل برتر بر اساس فراوانی موفقیت‌های یک مدل از نظر چند معیار ارزیابی انجام می‌گیرد؛ بنابراین، در این پژوهش از آنجایی که مدل جنگل تصادفی از نظر معیارهای جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ارزیابی شاخص ضریب تبیین (R^2)، شاخص خطای RSR و

جدول ۲. ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌ها در مرحله اعتبارسنجی در حوضه آبگندی

معیار ارزیابی	رویکرد تقسیم داده	مدل مورد استفاده		
		جنگل تصادفی	ماشین بردار پشتیبان	شبکه عصبی مصنوعی
R ²	M ₁	*۰/۸۱	۰/۴۰	۰/۵۴
	M ₂	*۰/۸۵	۰/۵۰	۰/۳۹
	M ₃	۰/۳۲	۰/۱۵	۰/۱۵
RMSE	M ₁	۴/۶۹	۷/۸۲	۵/۹۴
	M ₂	۹/۴۲	۱۰/۴۴	۹/۵۷
	M ₃	۴/۸۲	۶/۷۳	۶/۳۴
RMSE (%)	M ₁	۳/۹۴	۱۲/۲۸	۱۱/۱۲
	M ₂	۸/۳۹	۱۵/۱۳	۱۰/۵۶
	M ₃	۵/۴۱	۱۲/۰۲	۱۳/۲
RSR	M ₁	۰/۵۹	۰/۹۹	۰/۷۵
	M ₂	۰/۸۵	۰/۹۴	۰/۸۶
	M ₃	۱/۱۶	۱/۶۲	۱/۵۳
d	M ₁	۰/۸۶	۰/۴۱	۰/۷۳
	M ₂	۰/۵۱	۰/۳۵	۰/۴۸
	M ₃	۰/۶۸	۰/۵۵	۰/۵۴

خاک یادشده در این پژوهش قابل تعمیم به سطح کل حوضه نبوده و از نظر علمی صرفاً مربوط به خندق‌های منتخب در این حوضه است. به عبارت دیگر، انواع دیگر فرسایش خاک در این حوضه بایستی به طور مجزا اندازه‌گیری و محاسبه شوند. مقادیر فرسایش خاک ناشی از خندق‌ها نشان داد که وضعیت هدررفت منابع، به‌ویژه خاک و اراضی منطقه، قابل توجه بوده و کنترل آن نیازمند اجرای یک برنامه عملیاتی و علمی جدی توسط دستگاه‌های اجرایی است.

عملکرد مدل‌های یادگیری ماشینی

مدل‌های یادگیری ماشینی مختلف بر اساس ساختار و رویکرد مدل‌سازی دارای قابلیت‌های متفاوتی هستند. تعیین عملکرد این مدل‌ها برای هریک از پدیده‌های محیطی نیازمند مطالعه و

و همکاران (۱۸) نیز نتیجه مشابهی را در خصوص ارتباط میزان بارندگی‌های شدید و هدررفت خاک گزارش کردند؛ بنابراین، پویایی فرسایش‌های خندقی تابعی مستقیم از وضعیت بارندگی است و این مسئله مدل‌سازی زمانی - مکانی فرسایش‌های خندقی را میسر می‌کند. خندق‌های منتخب دارای رشدهای طولی، عمقی و عرضی بودند؛ اما تغییر ابعاد در خندق‌های بزرگ عموماً به صورت عرضی است. به عبارت دیگر، خندق‌های بزرگ دارای عمق نسبتاً زیادی هستند و عوامل مختلفی می‌توانند موجب ریزش دیواره‌ها شده که با ریزش یک دیواره، حجم بسیار زیادی از خاک در بستر خندق قرار گرفته تا در شرایط هیدرولوژیک مناسب، به صورت رسوب به بخش‌های پایین‌دست انتقال یابد. رشد عمقی خندق‌ها بستگی به نوع جنس خاک و مواد مادری و همچنین انرژی جریان در کف خندق‌ها دارد. مقادیر هدررفت

پژوهش است. در این پژوهش سه مدل جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی برای مدل‌سازی رشد فرسایش‌های خندقی استفاده شد. مدل‌های یادگیری ماشینی برای مدل‌سازی استعداد شکل‌گیری فرسایش خندقی در گذشته مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۶، ۷ و ۱۷)؛ اما کارایی آنها در زمینه مدل‌سازی رشد فرسایش خندقی که ماهیت زمانی - مکانی دارد، تاکنون مشخص نشده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش، مدل جنگل تصادفی دارای بیشترین دقت پیش‌بینی بوده و مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان به ترتیب در جایگاه‌های بعدی قرار گرفتند. با توجه به اینکه مدل‌سازی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشینی تاکنون انجام نشده است، امکان مقایسه مستقیم وجود ندارد. با این حال در پژوهش‌های پیشین مانند رحمتی و همکاران (۱۶)، جاین و پورقاسمی (۷)، و همکاران (۲۳)، وی و همکاران (۲۲) و ونگ و همکاران (۲۱)، عملکرد بهتر مدل جنگل تصادفی نسبت به سایر مدل‌ها در شناسایی مناطق مستعد فرسایش خندقی تأیید شده است.

هنگامی که عملکرد یک مدل برای شبیه‌سازی یک پدیده ارزیابی می‌شود، موارد متعددی در این موضوع دخیل هستند که بیان آنها الزامی است. در این مطالعه ۱۶ متغیر محیطی برای پیش‌بینی رشد فرسایش‌های خندقی مد نظر قرار گرفته که اطلاعات بسیار مهمی را از نظر تغییرات مکانی و زمانی خصوصیات حوضه برای مدل فراهم کردند. از سویی دیگر، متغیر وابسته مدل‌سازی محدود به سه سال ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲ بوده که مطابق استانداردهای مدل‌سازی، داده‌های دو سال آن برای آموزش (واسنجی) مدل و داده‌های یک سال آن برای اعتبارسنجی (صحت‌سنجی) استفاده شد. مدل جنگل تصادفی توانسته است عملکرد مناسبی برای پیش‌بینی رشد فرسایش‌های خندقی ارائه دهد؛ بنابراین، در مناطقی که با کمبود داده رشد فرسایش‌های خندقی مواجه هستند، مدل جنگل تصادفی دارای قابلیت آموزش روابط بین متغیرها، تجزیه و تحلیل داده‌های مکانی - زمانی و پیش‌بینی میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش‌های خندقی

است. در صورتی که فراوانی داده مربوط به سال‌های پیش طولانی‌تر شود، امکان تغییر جایگاه مدل‌ها از نظر کارایی وجود دارد که قضاوت در چنین شرایطی نیازمند بررسی و مطالعه جدید خواهد بود. دلایل مختلفی برای عملکرد مناسب مدل جنگل تصادفی در این مطالعه وجود دارد. استفاده از ساختار درخت‌های تصمیم‌گیری بسیار زیاد و تصمیم‌گیری بر اساس میانگین درخت‌های تجزیه و تحلیل داده‌ها موجب شده تا امکان خطای مدل کاهش یابد. ساختار مدل جنگل تصادفی از نگاهی دیگر موجب شده است که مدل تحت تأثیر داده‌های پرت و ناسازگار (Noisy data) قرار نگیرد. از آنجایی که میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش‌های خندقی در حوزه آبخیز آبگندی بسته به درجه بلوغ خندق و شرایط محیطی دامنه وسیعی را در بر گرفته است، امکان اینکه مدل‌ها تحت تأثیر داده‌های پرت و یا ناسازگار قرار گیرند، وجود دارد و در مرحله پیش‌بینی، مدل برای تعیین میزان هدررفت خاک خندق‌های با ابعاد متفاوت، کارآمد نخواهد بود. مدل جنگل تصادفی به دلیل بهره‌گیری از ساختار درختان تصمیم بسیار زیاد، به خوبی توانسته است که این مسئله مهم را دریابد و پیش‌بینی‌های آن تحت تأثیر داده‌های پرت و ناسازگار با مجموعه داده قرار نگیرد؛ بنابراین، هنگام استفاده از مدل جنگل تصادفی، نیازی به استفاده از روش‌های پیش‌پردازش برای تعیین داده‌های پرت و فرایند حذف آنها از مجموعه داده‌ها وجود ندارد. چنانچه گنور و همکاران (۲۵) نیز در پژوهش خود به این موضوع اشاره کرده‌اند. به عنوان یکی دیگر از مزیت‌ها و توانمندی‌های مدل جنگل تصادفی، این مدل قابلیت پردازش داده‌های مربوط به پدیده‌های با ماهیت غیرخطی را دارد و به دلیل ماهیت پدیده فرسایش خندقی و پیچیدگی رشد آن در شرایط زمانی و مکانی مختلف، مدل جنگل تصادفی توانسته است که درک مناسبی از رابطه متغیرهای مستقل و وابسته پیدا کرده و به پیش‌بینی آن بر اساس شرایط جدید بپردازد. اگرچه بیشتر مدل‌های هوش مصنوعی به تعیین اهمیت عوامل محیطی در شبیه‌سازی پدیده موردنظر می‌پردازند، مدل جنگل تصادفی نیز علاوه بر انجام این موضوع مهم، قابلیت کاهش ابعاد و حذف متغیرهای با درجه

این حوضه است. با توجه به اینکه تاکنون اقدام جدی در مهار و کاهش وقوع فرسایش خندقی در حوضه آبگندی صورت نگرفته، بیم آن می‌رود که با گسترش ابعاد خندق‌ها منابع خاک و اراضی بالادست و همچنین حاشیه خندق‌ها از بین رفته و میزان رسوب چشمگیری وارد رودخانه زهره و مخزن سد چمشیر شود و عمر مفید این سد را به شدت کاهش دهد. از این رو پیشنهاد می‌شود که دستگاه‌های اجرایی مربوطه با استفاده از روش‌های مبتنی بر طبیعت و با کمک روش‌های مهندسی نرم شامل استقرار پوشش گیاهی، به عنوان یکی از روش‌های سازگار و کم‌هزینه در امر حفاظت منابع خاک، افزایش ماده آلی خاک، اصلاح خاک‌های شور و سدیمی با کاربرد اصلاح‌کننده‌ها و همچنین در صورت لزوم، انحراف رواناب‌های پیشانی خندق‌ها با استفاده از عملیات سازه‌ای اقدام به کنترل میزان پیشروی و رشد خندق‌ها در حوضه آبگندی نمایند.

۲. با وجود اینکه در بازه زمانی سه ساله مدل جنگل تصادفی قابلیت زیادی در پیش‌بینی میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی نشان داده است، پیشنهاد می‌شود که با عنایت به زمان‌بر بودن شکل‌گیری و رشد خندق‌ها، سال‌های طولانی‌تری برای پایش و اندازه‌گیری مستقیم ابعاد خندق‌ها در نظر گرفته شود تا با ثبت داده‌های رشد فرسایش خندقی در سال‌های متوالی امکان آموزش بهتر مدل‌ها فراهم شود.

۳. یکی از محدودیت‌های موجود در این پروژه تحقیقاتی که در دیگر پروژه‌های پژوهشی نیز پژوهشگران عموماً با آن مواجه هستند، فقدان ایستگاه‌های باران‌نگار در بخش‌های مختلف حوزه آبخیز و عدم دسترسی به اطلاعات شدت بارندگی است. از سویی دیگر، با عنایت به پراکنش مکانی خندق‌ها در یک حوضه وسیع، امکان تعمیم داده‌های شدت بارندگی از یک ایستگاه به بخش‌های مختلف حوضه وجود نداشته و استفاده از این اطلاعات کمک شایانی به مدل‌سازی نمی‌کند. پیشنهاد می‌شود که در شروع پروژه‌های مدل‌سازی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی، چند ایستگاه باران‌نگار در بخش‌های

اهمیت کمتر را دارد که در این صورت حجم پردازش داده کاهش یافته و نتایج مدل‌سازی در مدت زمان کمتری نسبت به مدل‌های دیگر ارائه می‌شود. در نهایت، امکان به‌کارگیری هر دو نوع داده کیفی (اسمی و رتبه‌ای) و کمی در مدل‌سازی رشد فرسایش‌های خندقی یکی دیگر از مزیت‌های مدل جنگل تصادفی است که در این پژوهش با عنایت به طیف وسیع متغیرهای پیش‌بینی‌کننده، کمک شایانی به شبیه‌سازی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی کرد.

همان‌طور که اشاره شد، میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش‌های خندقی در حوزه آبخیز آبگندی بسته به درجه بلوغ خندق و شرایط محیطی، دامنه وسیعی را در بر گرفته است و همین موضوع می‌تواند علت عملکرد ضعیف مدل ماشین بردار پشتیبان در این مطالعه باشد؛ چرا که یکی از نقاط ضعف مدل ماشین بردار پشتیبان این است که وجود داده‌های پرت و ناسازگار، به طور قابل توجهی موجب تضعیف عملکرد و کاهش دقت آن می‌شود.

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج این مطالعه، فرسایش خندقی در حوضه آبگندی استان کهگیلویه و بویراحمد هر ساله رو به افزایش است و در شرایطی که میزان بارندگی و همچنین فراوانی بارش‌های سنگین (بیشتر از مقدار پنج میلی‌متر یا بیشتر) و دارای شدت زیادی باشد، میزان فرسایش و هدررفت خاک به طور مستقیم افزایش چشمگیر خواهد داشت. از میان مدل‌های یادگیری ماشین مورد استفاده در این پژوهش، مدل جنگل تصادفی به عنوان مدل برتر در زمینه پیش‌بینی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی انتخاب شد. همچنین مدل ماشین بردار پشتیبان ضعیف‌ترین عملکرد را داشت که مهر تأییدی بر حساس بودن این مدل نسبت به وجود داده‌های پرت است. بر اساس یافته‌های این پژوهش، در ادامه چند پیشنهاد اجرایی و پژوهشی ارائه می‌شود:

۱. اراضی منطقه آبگندی سال‌هاست که دچار فرسایش خندقی بوده و مطالعه حاضر نیز حاکی از گسترش میزان رشد خندق‌های

سیاسگزاری

این مقاله برگرفته از بخشی از نتایج طرح پژوهشی با کد مصوب ۰۵۰-۲۹-۰۲۴-۹۹۰۵۱۴ در سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (تات) است و بدین وسیله از مسئولین محترم پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کهگیلویه و بویراحمد و کلیه عزیزانی که نویسندگان مقاله را در راه انجام هرچه بهتر این پژوهش یاری کردند، قدردانی به عمل می‌آید.

مختلف حوضه نصب شود تا اطلاعات دقیقی از خصوصیات بارندگی ثبت شود.

۴. با توجه به اینکه آگاهی نسبت به عوامل کنترل‌کننده فرسایش برای جلوگیری از وقوع یا کاهش آثار مخرب این پدیده از اهمیت قابل توجهی برخوردار است، پیشنهاد می‌شود میزان حساسیت مدل‌های یادگیری ماشینی به عوامل مؤثر بر ایجاد فرسایش خندقی (متغیرهای ورودی) در منطقه آبگندی مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد.

References

منابع مورد استفاده

1. Ahnert, F. 1976. Brief description of a comprehensive three-dimensional process - response model of landform development. *Zeitschrift für Geomorphologie, NF, Supplementband* 25(29-49).
2. Breiman, L. 2001. Random forests. *Machine Learning* 45(1): 5-32.
3. Casali, J. J. Loizu, MA. Campo, LM. De and J. Alvarez-Mozos. 2006. Accuracy of methods for field assessment of rill and ephemeral gully erosion. *Catena* 67(2): 128-138.
4. Cochran, W. G. 1977. Sampling Techniques, 3rd edn, John Wiley & Sons, New York.
5. Freeze, R. A. 1972. Role of subsurface flow in generating surface runoff, 1. Base flow contributions to channel flow. *Water Resources Research* 8(3): 609-623.
6. Garosi, Y., M. Sheklabadi, H.R. Pourghasemi, A.A. Besalatpour, C. Conoscenti and K. Van Oost. 2018. Comparison of differences in resolution and sources of controlling factors for gully erosion susceptibility mapping. *Geoderma* 330: 65-78.
7. Gayen, A. and H.R. Pourghasemi. 2019. Spatial modeling of gully erosion: a new ensemble 697 of CART and GLM data-mining algorithms. PP. 653-669. In: H.R. Pourghasemi and C. Gokceoglu (Eds.). *Spatial Modeling in GIS and R for Earth and 698 Environmental Sciences*, Elsevier.
8. Hosseini, S.S. and M. Ghorbani. 2010. Economics of Soil Erosion. Second Edition. Ferdowsi University of Mashhad Publications, Mashhad.
9. Howard, A. D. 1971. Simulation stream networks by headward growth and branching. *Geographical Analysis* 3(1): 29-50.
10. Howard, A. D. 1988. Groundwater sapping experiments and modelling. PP. 71-83. In: A.D. Howard, R.C. Kochel, H.E. Holt (Eds.), *Sapping Features of Colorado Plateau, a Comparative Planetary Field Guide*. Scientific and Technical Information Office, National Aeronautics and Space Administration, Washington.
11. Howard, A. D. 1994. A detachment - limited model of drainage basin evolution. *Water Resources Research* 30(7): 2261-2285.
12. Howard, A.D. and C.G. Mac Lane. 1988. Erosion of cohesionless sediment by groundwater seepage. *Water Resources Research* 24(10): 1659-1674.

13. Hugus, M.K. and D.M. Mark. 1984. Spatial data processing of digital simulation of erosion. Technical Paper of the Fall Convention of the American Society of Photogrammetry / American Congress on Surveying and Mapping, 683-693.
14. Kirkby, M.J. 1994. Thresholds and instability in stream head hollows: a model of magnitude and frequency for wash processes. PP. 295-314. In: M.J. Kirkby (ed.), Process Models and Theoretical Geomorphology. Wiley, Chichester.
15. Kirkby, P.J. and G.R. Mehuys. 1987. Seasonal variation of soil erodibilities in southwestern Quebec. *Journal of Soil and Water Conservation* 42(3): 211-215.
16. Rahmati, O., N. Tahmasebipour, A. Haghizadeh, H.R. Pourghasemi and B. Feizizadeh. 2017. Evaluation of different machine learning models for predicting and mapping the susceptibility of gully erosion. *Geomorphology* 298: 118-137.
17. Scheideger. A. E. 1970. Theoretical Geomorphology. Prentice - Hall, London.
18. Shahrivar, A., S. Shadfar, M. khazae and B. Adeli. 2017. Assessment of Gully Erosion Zonation Methods (Case study: Abgendi Watershed). *Journal of Ecohydrology* 4(1): 119-132.
19. Smart, I. S. and V. L. Moruzzi. 1971. Computer simulation of Clinch Mountain drainage networks. *Journal of Geology* 79(5): 572-584.
20. Tebebu, T., A. Abiy, H. Dahlke, Z. Easton, S. Tilahun, A. Collick, S. Kidnau, S. Moges and F. Dadgari. 2010. Surface and subsurface flow effect on permanent gully formation and upland erosion near Lake Tana in the northern highlands of Ethiopia. *Hydrology and Earth System Sciences* 14(11): 2207-2217.
21. Wang, Z., G. Zhang, G. Ch. Wang and Sh. Xing. 2022. Assessment of the gully erosion susceptibility using three hybrid models in one small watershed on the Loess Plateau. *Soil and Tillage Research* 223: 105481.
22. Wei, Y., Z. Liu, Y. Zhang, T. Cui, Z. Guo, C. Cai and Z. Li. 2022. Analysis of gully erosion susceptibility and spatial modelling using a GIS-based approach. *Geoderma* 420: 115869.
23. Were, K., S. Keeney, H. Churu, J. Mumo Mutio, R. Njoroge, D. Mugaa, B. Alkamoi, W. Ng'etich and B. Ram Singh. 2023. Spatial Prediction and Mapping of Gully Erosion Susceptibility Using Machine Learning Techniques in a Degraded Semi-Arid Region of Kenya. *Land* 12(4): 1-19.
24. Willgoose, G., I. Bras, I. Rodriguz - Iturbe. 1994. Hydrogeomorphology modelling with a physically based river basin evolution model. PP. 3-22. In: M.J. Kirkby (Ed.), Process Models and Theoretical Geomorphology. Wiley, Chichester.
25. Genuer, R., J.M. Poggi and C. Tuleau-Malot. 2010. Variable selection using random forests. *Pattern Recognition Letters* 31(14): 2225-2236.
26. Shirani K. 2021. Gully Erosion Mapping and Susceptibility Assessment Using Statistical and Probabilistic Methods. *Journal of Water and Soil Science* 25 (2) :151-174.
27. Khajeh M, C.B. Komaki, M. Rezaei, V. Sheikh and L. Ebadi. 2024. Assessment and Spatial Modeling of Land Subsidence Hazard Using the LiCSBAS Model and Random Forest Algorithm (Case Study: Marvdasht Kharama Plain). *Journal of Water and Soil Science* 28 (2): 97-120.