

Modeling Gully Erosion Development Using Random Forest and Artificial Neural Network Models in the Mahurmilati Watershed of Fars Province

Seyed Masoud Soleimanpour^{1*}, Omid Rahmati², Samad Shadfar³ and Maryam Enayati¹

(Received: February 15-2025 ; Revised: June 28-2025 ; Accepted: November 15-2025)

1. 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
2. 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.
3. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

*Corresponding Author, Email: m.soleimanpour@areeo.ac.ir

Abstract

Gully erosion is one of the most important types of water erosion. Since the amount of soil loss due to this erosion is directly related to environmental factors, the amount of soil loss due to each gully can be modeled based on environmental conditions. According to the high ability of machine learning models based on artificial intelligence to analyze environmental information, in addition to determining soil loss due to gully erosion, modeling has been carried out using two random forest models, and artificial neural networks and evaluating their efficiency in the Mahurmilati watershed located in the southwest of Fars province in this study. The dimensional parameters of 70 gullies were measured over four years (2021-2024), and the volume and weight of soil lost were calculated. 15 environmental factors were selected as predictive variables, and modeling was performed with a cross-validation approach using these two models, and the accuracy of the models was evaluated using quantitative criteria. The amount of soil loss in gullies during the study period was 15300.94 tons. The accuracy evaluation of the models showed that the random forest model had better performance based on the coefficient of determination ($R^2=0.66-0.73$). Also, this model had the lowest value in terms of the RSR error index evaluation criterion ($RSR=0.66-1.03$) and the highest accuracy. In terms of the fit evaluation index (D), the random forest model also had the highest fit between the observational and forecast data and had the highest value of this index ($D=0.83$), and therefore, it was introduced as the superior model for predicting soil loss due to gully erosion in this watershed.

Keywords: Gully, Environmental factors, Artificial intelligence, Machine learning

How to cite this article: Soleimanpour, S.M., Rahmati, O., Shadfar, S. and Enayati, M. 2026. Modeling Gully Erosion Development Using Random Forest and Artificial Neural Network Models in the Mahurmilati Watershed of Fars Province. *J. Water and Soil Sci.* 30(1): 49-64. DOI: [10.47176/jwss.30.1.44122](https://doi.org/10.47176/jwss.30.1.44122)

Copyright © 2026 Soleimanpour 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.

مدل‌سازی گسترش فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های جنگل تصادفی و شبکه عصبی مصنوعی در حوزه آبخیز ماهورمیلانی استان فارس

سید مسعود سلیمان‌پور^{۱*}، امید رحمتی^۲، صمد شادفر^۳ و مریم عنایتی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۴/۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۸/۲۴)

۱. بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران.
 ۲. بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سنندج، ایران.
 ۳. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.
- *: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: m.soleimanpour@areeo.ac.ir

چکیده

فرسایش خندقی، یکی از مهم‌ترین انواع فرسایش آبی است. از آنجایی که میزان هدررفت خاک ناشی از این فرسایش، ارتباط مستقیمی با عوامل محیطی دارد؛ بنابراین می‌توان بر اساس شرایط محیطی، میزان هدررفت خاک ناشی از هر خندق را مدل‌سازی کرد. با توجه به اینکه مدل‌های یادگیری ماشین، مبتنی بر هوش مصنوعی، قابلیت زیادی در تجزیه و تحلیل اطلاعات محیطی دارند، در این پژوهش علاوه بر تعیین هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی، اقدام به مدل‌سازی با استفاده از دو مدل جنگل تصادفی و شبکه عصبی مصنوعی و ارزیابی کارایی آنها در حوزه آبخیز ماهورمیلانی واقع در جنوب غرب استان فارس شده است. به این منظور، اندازه‌گیری پارامترهای ابعادی ۷۰ خندق، طی چهار سال (۱۳۹۹-۱۴۰۲) انجام و حجم و وزن خاک از دست‌رفته محاسبه شد. ۱۵ عامل محیطی، به عنوان متغیرهای پیش‌بینی‌کننده انتخاب و مدل‌سازی با رویکرد اعتبارسنجی متقاطع، توسط این دو مدل انجام شد و دقت مدل‌ها با استفاده از معیارهای کمی بررسی شد. میزان هدررفت خاک خندق‌ها در دوره مورد مطالعه ۱۵۳۰۰/۹۴ تن بود. ارزیابی دقت مدل‌ها نشان داد مدل جنگل تصادفی بر اساس معیار ارزیابی ضریب تبیین $R^2=0.66-0.73$ از عملکرد بهتری برخوردار است. همچنین این مدل از نظر معیار ارزیابی شاخص خطای RSR، دارای کمترین مقدار بوده $(RSR=0.66-1.03)$ و بیشترین دقت را به خود اختصاص داده است. از نظر شاخص ارزیابی تطابق (D)، نیز مدل جنگل تصادفی دارای بیشترین تطابق، میان داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی بوده و بیشترین مقدار این شاخص $(D=0.83)$ را به خود اختصاص داد و بنابراین به عنوان مدل برتر برای پیش‌بینی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی در این حوزه آبخیز معرفی شد.

واژه‌های کلیدی: خندق، عوامل محیطی، هوش مصنوعی، یادگیری ماشین

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

در بین انواع فرسایش های آبی، فرسایش خندقی یکی از بارزترین آنهاست. این نوع فرسایش به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک کره زمین و در مواردی که بهره برداری از منابع آب و خاک، مبتنی بر اصول صحیح و متناسب با توان طبیعی و شرایط محیطی نباشد، موجب تغییرات چشمگیری در اراضی می شود (۳). در ایران نیز این نوع فرسایش، باعث تخریب اراضی بسیاری شده و با جاری شدن رواناب و سیل، حجم قابل توجهی از رسوبات را به دنبال دارد که این امر باعث غیر قابل استفاده شدن اراضی می شود (۱۸)؛ به طوری که که میزان هدررفت خاک ناشی از این نوع فرسایش در اراضی کشاورزی، بین ۴۰ تا ۷۰ درصد از کل بار رسوبات تولید شده در مخازن سدها است و می تواند به عنوان یک عامل اصلی منبع تولید کننده رسوب باشد (۵). با عنایت به موارد یاد شده و با توجه به شرایط اقلیمی خشک و نیمه خشک ایران و بروز مشکلات زیادی مانند: فرسایش، سیل، پر شدن مخازن سدها و سایر موارد، ضروری است با بهره گیری از مدل های نوین، نسبت به تعیین میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی (که اندازه گیری آن بسیار هزینه بر و زمان بر است) اقدام کرد. از آنجایی که میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی، ارتباط مستقیمی با عوامل محیطی دارد؛ بنابراین می توان بر اساس شرایط محیطی، میزان هدررفت خاک ناشی از هر خندق را مدل سازی کرد. مدل سازی کمک می کند تا در زمان و هزینه اندازه گیری مشخصات و ویژگی های خندق ها صرفه جویی شود. به دلیل اینکه مدل های یادگیری ماشین، مبتنی بر هوش مصنوعی، قابلیت زیادی در تجزیه و تحلیل اطلاعات محیطی دارند و قادرند روابط غیر خطی و پیچیده بین متغیرها را شناسایی کنند، در این پژوهش از آنها برای مدل سازی استفاده شد. همچنین یکی دیگر از ویژگی های مفید این مدل ها آن است که برای تجزیه و تحلیل اطلاعات و مدل سازی، نیازمند پیش فرض های آماری نیستند (۱۷). با عنایت به موارد یاد شده، این پژوهش در حوزه آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس که دارای فرسایش

خندقی است و مشکلات متعددی در این راستا دارند، انجام شد تا بتواند نسبت به برآورد دقیقی از میزان هدررفت خاک توسط این نوع فرسایش اقدام کند. از طرف دیگر، اندازه گیری میدانی میزان هدررفت خاک ناشی از این نوع از فرسایش، بسیار زمان بر و هزینه بر است که اندازه گیری مستقیم فرسایش خندقی در سطوح وسیع امکان پذیر نیست. به این منظور، پژوهش حاضر، برای اولین بار در ایران، علاوه بر اندازه گیری مستقیم، نسبت به مدل سازی و ارزیابی کارایی مدل های جنگل تصادفی (Random Forest) و شبکه عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network) در هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی اقدام کرد.

جعفری و همکاران (۱۰) به بررسی تخریب زمین ناشی از فرسایش خندقی از دیدگاه عوامل مختلف ژئومحیطی در حوزه آبخیز کندوران اقدام کردند. آنها ۱۷ عامل ژئومحیطی را با استفاده از سه مدل یادگیری ماشین، اقدام به بررسی احتمال وقوع فرسایش خندقی کردند. نتایج نشان داد مدل جنگل تصادفی، بیشترین توانایی را در پیش بینی احتمال وقوع فرسایش خندقی از خود نشان داد. همچنین اسدی نیلوان و همکاران (۱) اقدام به پهنه بندی حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از مدل های شبکه عصبی مصنوعی و جنگل تصادفی در حوزه آبخیز واقع در شمال شرق استان گلستان کردند. نتایج نشان داد دقت این مدل ها در برآورد مناطق دارای حساسیت فرسایش خندقی در مرحله آزمون، عالی و در مرحله آزمون و اعتبارسنجی، خیلی خوب بود. همچنین هن و همکاران (۸) در پژوهشی اقدام به تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از مدل های یادگیری ماشین در منطقه جفرسون ایالت ایلینوی ایالات متحده آمریکا کردند. نتایج آنها نشان داد مدل شبکه عصبی عمیق (Deep Neural Network)، بیشترین دقت را در پیش بینی مناطق مستعد به ایجاد خندق دارد. لیو و همکاران (۱۲) نیز با استفاده از الگوریتم های یادگیری ماشین اقدام به پیش بینی حساسیت وقوع فرسایش خندقی در حوضه سد گلستان ایران کردند. به این منظور از چهار مدل یادگیری ماشین استفاده شد. نتایج نشان داد به ترتیب مدل های جنگل

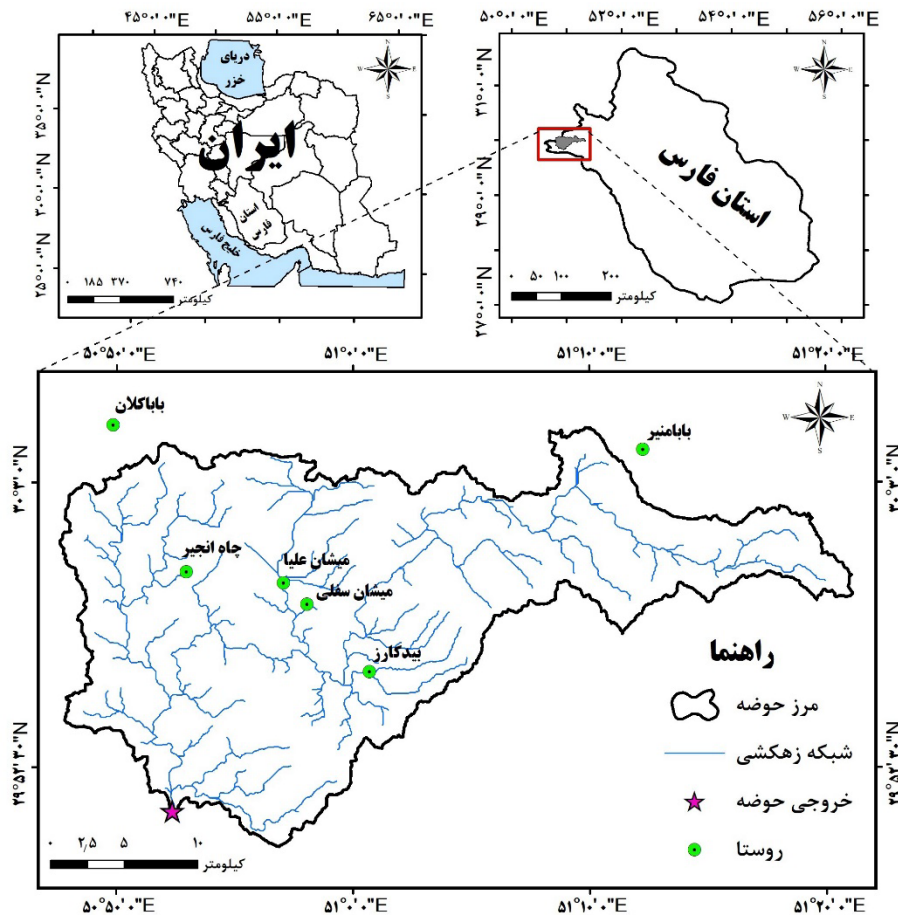
تصادفی، XGBoost، K نزدیک‌ترین همسایه (K-Nearest Neighbor) و پرسپترون چند لایه شبکه‌های عصبی مصنوعی (Multi-layer perceptron of artificial neural networks) اقدام به تعیین خطر فرسایش خندقی در شمال‌شرقی چین کردند. نتایج نشان داد که مدل XGBoost بهترین عملکرد را در این خصوص داشت. مؤمنی‌دامنه و همکاران (۱۴) نیز با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین اقدام به تهیه نقشه حساسیت به فرسایش خندقی در حوزه آبخیز مختاران استان خراسان جنوبی کردند. نتایج نشان داد مدل جنگل تصادفی، بیشترین دقت را در پیش‌بینی حساسیت به فرسایش خندقی از خود نشان داد. آنها پتانسیل مدل‌های یادگیری ماشین در تولید نقشه‌های دقیق حساسیت به فرسایش خندقی را مورد تأکید قرار دادند. در جمع‌بندی پیشنهادی پژوهش، بیان این نکته ضروری است که نتایج پژوهش‌های مختلف نشان‌دهنده آن است که تاکنون، میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی با استفاده از رویکرد "مدل‌های یادگیری ماشین" تعیین نشده و در این پژوهش، برای اولین بار، به ارزیابی کارایی مدل‌های یادگیری ماشین در این زمینه پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز ماهورمیلاتی با مساحت ۷۲۷/۶ کیلومتر مربع، در جنوب غربی استان فارس و در محدوده طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۳ دقیقه و ۳۰ ثانیه تا ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه و ۰ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۹ درجه و ۵۹ دقیقه و ۲۲ ثانیه تا ۳۰ درجه و ۰۳ دقیقه و ۲۹ ثانیه شمالی واقع شده است (شکل ۱). سازند زمین‌شناسی منطقه، آبرفت‌های دوره میوسن، میشان و گچساران است. تیپ اراضی تپه‌ماهور و ارتفاع متوسط از سطح دریا ۶۲۰ متر است. اقلیم منطقه بر اساس روش دومارتن گسترده، نیمه‌خشک معتدل است (۱۹). متوسط بارندگی سالانه این منطقه، بر اساس آمار ۱۸ ساله ایستگاه آبدگاه، برابر با ۶۴۵

تصادفی، شبکه عصبی مصنوعی، ماشین‌بردار پشتیبان (Support Vector Machine) و حداکثر آنتروپی (Maximum Entropy)، به عنوان دقیق‌ترین مدل‌ها به منظور پیش‌بینی حساسیت وقوع فرسایش خندقی در این منطقه معرفی شدند. فینزی و سابو (۱۶) با استفاده از شش مدل یادگیری ماشین، اقدام به بررسی حساسیت فرسایش خندقی کردند. یافته‌ها نشان داد به ترتیب مدل ماشین‌بردار پشتیبان، جنگل تصادفی و شبکه عصبی مصنوعی، از دقت بیشتری در پیش‌بینی حساسیت وقوع فرسایش خندقی برخوردار بودند. گلت و همکاران (۶) نیز با استفاده از چهار مدل یادگیری ماشین اقدام به پیش‌بینی حساسیت به فرسایش خندقی در حوزه آبخیز ارر (Erer) اتیوپی کردند. آنها با توجه به نتایج و دقت پیش‌بینی، به ترتیب، مدل شبکه عصبی مصنوعی، مدل جنگل تصادفی، ماشین‌بردار پشتیبان و تقویت گرادیان شدید (Extreme Gradient Boosting) را معرفی کردند. لی و همکاران (۱۱) از ۱۲ مدل یادگیری ماشین برای پیش‌بینی حساسیت فرسایش خندقی در شمال شرق چین استفاده کردند. نتایج نشان داد مدل XGBOOST بهینه‌شده به عنوان دقیق‌ترین مدل در پیش‌بینی حساسیت فرسایش خندقی معرفی شد. همچنین ژانگ و همکاران (۲۱) به بررسی و تقسیم‌بندی خندق‌های واقع در شمال شرقی چین با استفاده از مدل شبکه عصبی عمیق اقدام کردند. نتایج نشان داد این مدل قادر است به طور مؤثر و دقیق، فرسایش خندقی را در مزارع کشاورزی طبقه‌بندی کند. همچنین استفاده از این مدل را به عنوان راه‌حلی برای پایش فرسایش خندقی معرفی کردند. هن و همکاران (۹) نیز با استفاده از مدل‌های جنگل تصادفی، ماشین تقویت گرادیان (Gradient Boosting Machine)، رگرسیون لجستیک (Logistic Regression) و شبکه‌های عصبی عمیق، اقدام به پیش‌بینی حساسیت فرسایش خندقی کردند. یافته‌های آنها نشان داد مدل‌های جنگل تصادفی، ماشین تقویت گرادیان و رگرسیون لجستیک، نتایج قابل قبولی در پیش‌بینی حساسیت فرسایش خندقی از خود نشان دادند. همچنین لیو و همکاران (۱۳) با استفاده از با چهار مدل یادگیری ماشین شامل: جنگل



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس

میلی متر است (۴). روستاهای اصلی این حوزه آبخیز عبارتند از: میشان علیا، میشان سفلی، چاه انجیر و بیدگارز.

روش پژوهش

در بازدیدهای میدانی، موقعیت جغرافیایی تمام خندق‌های واقع در حوزه آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس، با استفاده از دستگاه GPS ثبت شد و پس از تطبیق با تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث، این نقاط به محیط GIS منتقل و نقشه پراکنش خندق‌ها ترسیم شد. سپس اندازه‌گیری پارامترهای ابعادی خندق‌ها طی چهار سال (۱۳۹۹ لغایت ۱۴۰۲)، شامل: طول خندق، عرض بالا، عرض پایین و عمق خندق (شکل ۲)، با مبنای قرار دادن پژوهش کازالی و همکاران (۲)، اندازه‌گیری شدند. گفتنی است به سبب

رعایت هم‌زمانی اندازه‌گیری‌ها، تمام اندازه‌گیری‌های میدانی در انتهای هر سال (اسفند)، انجام شد.

در اندازه‌گیری‌های میدانی، از دیواره‌های چپ، راست، پیشانی و خروجی هر خندق، نمونه‌های خاک توسط استوانه‌های فلزی استاندارد (کور) برداشت شد (شکل ۳) و پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه تخصصی فرسایش و رسوب، جرم مخصوص ظاهری نمونه‌ها اندازه‌گیری و سپس میانگین آنها محاسبه شد.

سطح مقطع عرضی خندق، با استفاده از معادله ۱ (۲۰) در سه مقطع زمانی مختلف (سال اول، سال دوم و سال سوم)، برای هر خندق محاسبه شد:

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



شکل ۲. اندازه‌گیری عرض بالا، پایین و عمق خندق‌ها



شکل ۳. نمونه‌برداری خاک از پیشانی خندق توسط استوانه فلزی استاندارد

از ابتدای شکل‌گیری خندق تا سال ۱۳۹۹ محاسبه شد و اطلاعات هندسی اندازه‌گیری‌شده خندق‌ها در سال ۱۳۹۹ مبنای محاسبه میزان هدررفت خاک در سال‌های بعدی (۱۴۰۰، ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲) بود و به این صورت، امکان تعیین میزان هدررفت خالص سالانه فراهم شد؛ به‌طوری که برای نمونه، مقادیر حجم خندق و وزن هدررفت خاک به‌دست‌آمده از ابعاد اندازه‌گیری‌شده در سال ۱۴۰۰ به‌صورت تجمعی بود و مقدار خالص میزان هدررفت خاک مربوط به سال ۱۴۰۰ با استفاده از تفاضل مقادیر سال ۱۴۰۰ و سال قبل (۱۳۹۹) به‌دست آمد و برای سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ نیز به همین ترتیب انجام شد. سپس اقدام به تعیین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده برآورد فرسایش خندقی شد.

تاکنون چارچوب دقیقی برای تعیین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده تعیین نشده است. به این منظور، در این پژوهش بر مبنای مطالعات گذشته، ۱۵ عامل محیطی، به‌عنوان متغیرهای مستقل (متغیرهای پیش‌بینی‌کننده) به‌منظور فرایند مدل‌سازی انتخاب شدند. این عوامل عبارت بودند از: ارتفاع، درجه شیب، جهت دامنه، سنگ‌شناسی، فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی، شاخص رطوبت توپوگرافی، کاربری اراضی، فاصله از جاده، انحنای

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. پس از آن، محاسبه حجم خاک از دست‌رفته ناشی از فرسایش خندقی، طبق معادله ۲ (۲۰)، برای هر خندق محاسبه شد:

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

در این معادله؛ V : حجم خاک از دست‌رفته 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. در ادامه، وزن خاک فرسایش‌یافته ناشی از فرسایش خندقی محاسبه شد. به این صورت که مقدار حجم خاک از دست‌رفته در هر خندق، در جرم مخصوص ظاهری خاک هر خندق ضرب شد و پس از جمع مقادیر خندق‌ها، وزن خاک فرسایش‌یافته ناشی از فرسایش خندقی در این حوزه آبخیز محاسبه شد. گفتنی است که مقدار وزن هدررفت خاک به‌دست‌آمده در سال اول اندازه‌گیری (۱۳۹۹)، مربوط به تاریخیچه عمر خندق است. به‌عبارتی دیگر، وزن هدررفت خاک

مربعات (RMSE)، شاخص تبیین (R^2)، شاخص خطای RSR و شاخص تطابق (d) بررسی شد.

نتایج

نقشه موقعیت مکانی خندق ها در حوزه آبخیز ماهورمیلانی استان فارس در شکل ۴ ارائه شده است. در این حوضه، بر اساس بازدیدهای متعدد میدانی و تطبیق با تصاویر ماهواره ای گوگل ارث، ۷۰ خندق شناسایی شدند که مبنای اندازه گیری ها و انجام پژوهش شد.

نقشه ۱۵ عامل محیطی که به عنوان متغیرهای مستقل (متغیرهای پیش بینی کننده) در فرایند مدل سازی از آنها استفاده شد، در شکل ۵ ارائه شده است.

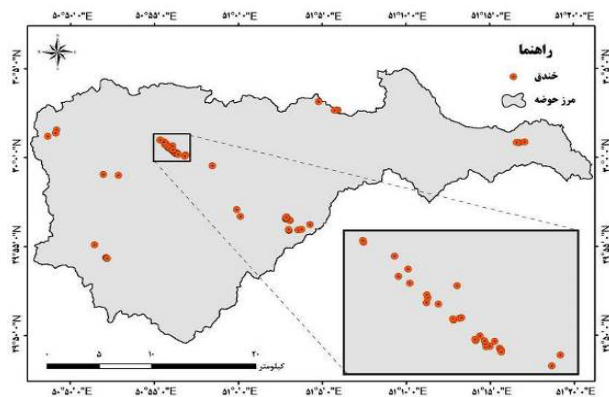
میزان هدررفت خاک سالانه خندق های مورد مطالعه در حوزه آبخیز ماهورمیلانی استان فارس، در بازه زمانی سال ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲، در جدول ۲ ارائه شده است. بر اساس این نتایج، میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی در این حوزه آبخیز طی دوره مورد مطالعه ۱۵۳۰۰/۹۴ تن بوده است. نتایج ارزیابی دقت پیش بینی مدل های جنگل تصادفی و شبکه عصبی مصنوعی، در رویکردهای مختلف در مرحله آموزش (واسنجی) در جدول ۳ ارائه شده است. گفتنی است دقت مدل ها در این مرحله، فقط برای اطمینان از برازش داده ها و آموزش دیدن مدل ها بررسی شد. در صورتی که مدلی در این مرحله آموزش کافی ندیده باشد، امکان پیش بینی و تعمیم آن به داده هایی که در اختیار مدل قرار نگرفته است، از نظر علمی و فنی فراهم نیست. با توجه به این که داده های گروه آموزش در اختیار مدل قرار می گیرد، عملکرد مدل ها بر اساس دقت مدل در مرحله آموزش قابل قضاوت نیست. اما بر اساس نتایج به دست آمده، هر دو مدل مورد استفاده در این پژوهش، قابلیت ورود به مرحله بعدی را دارند و با در نظر گرفتن شرایط محیطی، می توانند به پیش بینی میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی بپردازند.

سطح، شاخص موقعیت شیب نسبی، بافت خاک، توزیع مکانی مقدار بارندگی (در سال های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲)، فراوانی بارش بیش از ۵ میلی متر (در سال های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲) و شاخص اختلاف نرمال شده پوشش گیاهی (در سال های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲). گفتنی است لایه های اطلاعاتی تمامی این متغیرها در سیستم اطلاعات جغرافیایی در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ تهیه شدند. در فرایند مدل سازی، عوامل محیطی به عنوان متغیرهای مستقل و میزان هدررفت خاک خندق ها به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شدند. تمام خندق های اندازه گیری شده به صورت تصادفی به دو گروه آموزش (۷۰ درصد) و اعتبارسنجی (۳۰ درصد) تقسیم شدند و مدل سازی با رویکرد اعتبارسنجی متقاطع انجام شد و داده ها به تعداد سه دسته یا گروه تقسیم شدند. با توجه به این که اندازه گیری های میدانی در چهار سال (۱۳۹۹-۱۴۰۲) اندازه گیری شد و سال اول اندازه گیری (۱۳۹۹)، به عنوان مبنا قرار گرفت؛ در نتیجه داده ای اندازه گیری سه سال بعدی (۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲)، برای مدل سازی انتخاب شدند. به این منظور، هر بار یکی از سال ها به عنوان داده های اعتبارسنجی کنار گذاشته شد و آموزش مدل ها با استفاده از دو سال باقی مانده صورت پذیرفت. جدول ۱ گروه داده های در نظر گرفته شده برای اعتبارسنجی مدل ها را نشان می دهد.

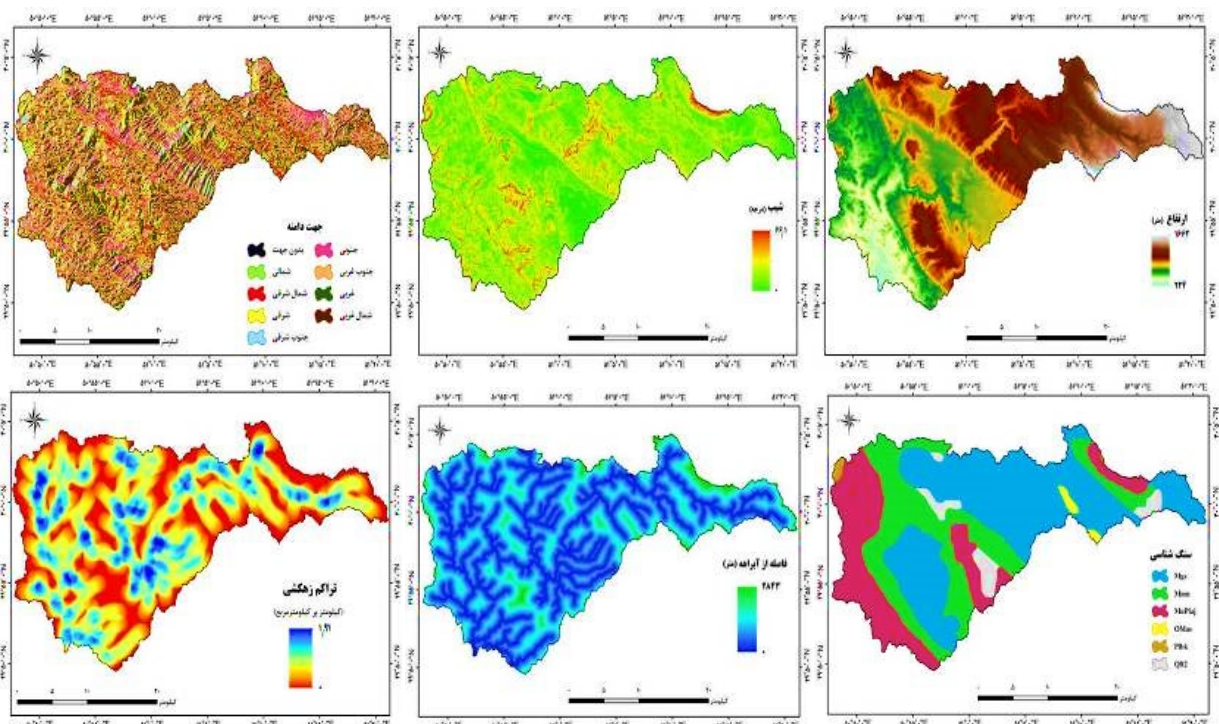
سپس از دو مدل مختلف یادگیری ماشینی شامل: جنگل تصادفی و شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. میزان دقت مدل ها برای پیش بینی بر اساس داده های گروه اعتبارسنجی (۳۰ درصد داده ها) بررسی شد که با عنوان صحت سنجی یا اعتبارسنجی مطرح می شود. از آنجایی که خندق های گروه اعتبارسنجی در آموزش مدل ها استفاده نشد، تعیین دقت پیش بینی مدل ها بر اساس آنها یک معیار مهم در ارزیابی دقت پیش بینی مدل ها بود. در نهایت، پس از تعیین دقت مدل های مختلف، شرایط برای مقایسه کمی مدل ها و تعیین مدل برتر برای پیش بینی هدررفت خاک فراهم شد. دقت مدل ها در این مرحله نیز با استفاده از معیارهای کمی خطای جذر میانگین

جدول ۱. رویکرد اعتبارسنجی مقاطع به‌منظور تفکیک داده‌ها

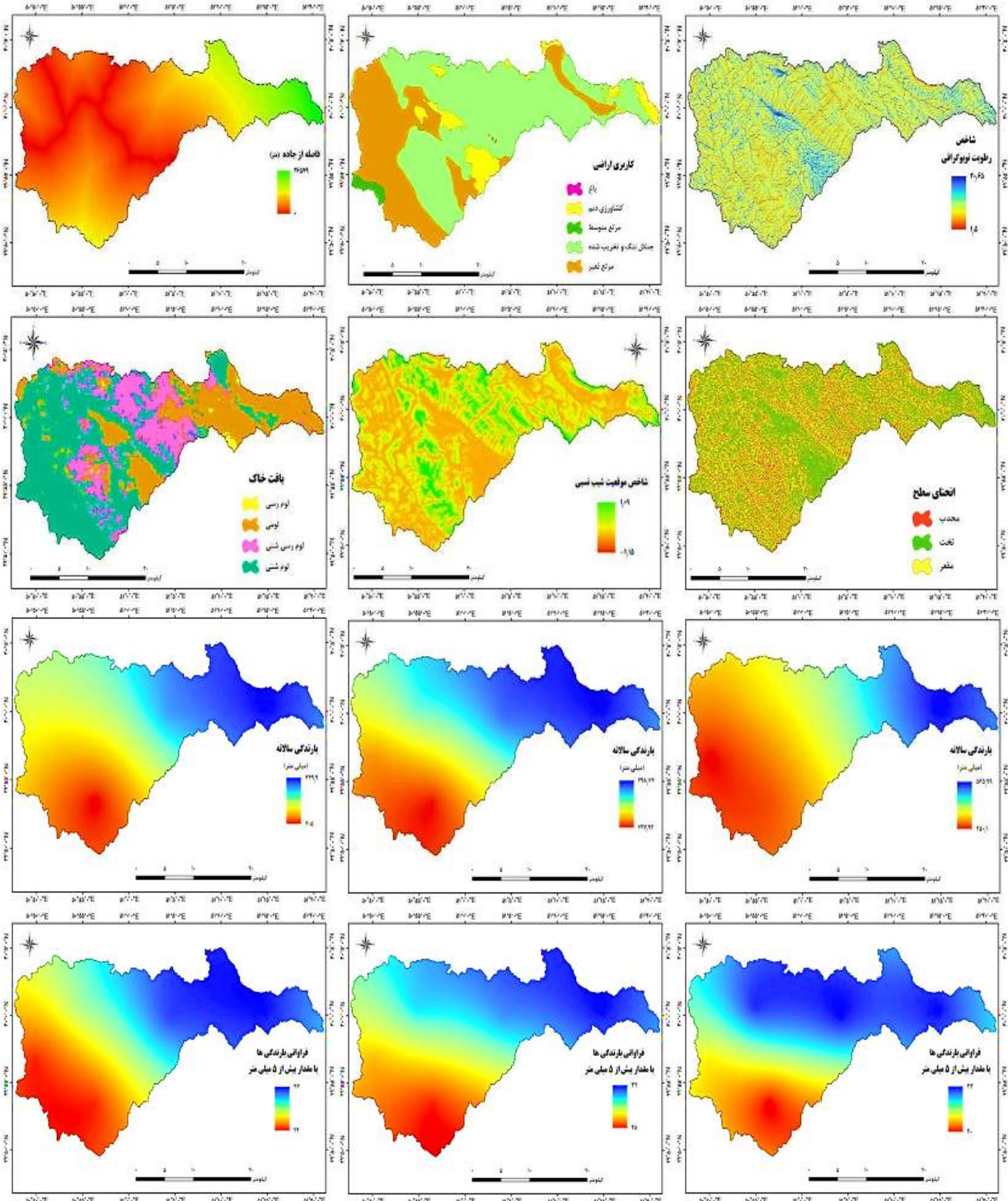
گروه	داده‌های آموزش	داده‌های اعتبارسنجی
اول (M_1)	۱۴۰۱ و ۱۴۰۰	۱۴۰۲
دوم (M_2)	۱۴۰۲ و ۱۴۰۰	۱۴۰۱
سوم (M_3)	۱۴۰۲ و ۱۴۰۱	۱۴۰۰



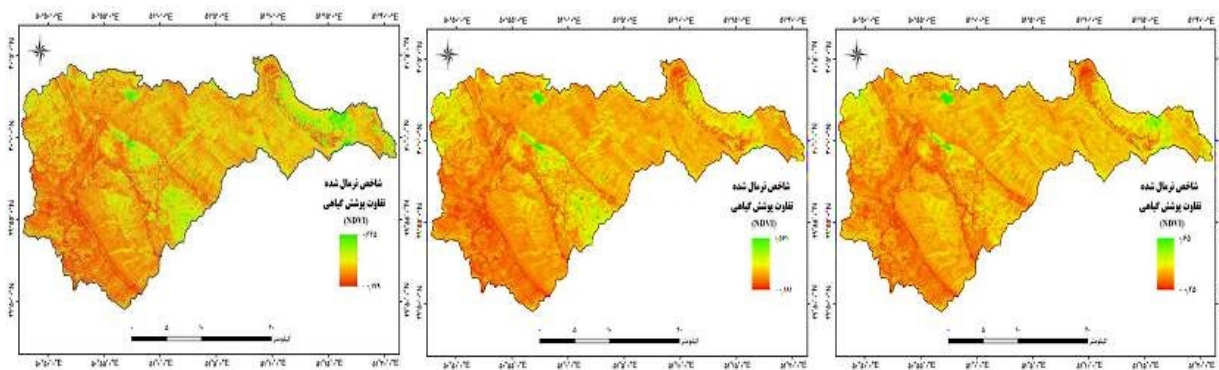
شکل ۴- نقشه موقعیت مکانی خندق‌های موجود در حوزه آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس



شکل ۵. نقشه‌های عوامل محیطی مؤثر بر هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی در حوزه آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس (از راست به چپ: نقشه ارتفاع، درجه شیب، جهت دامنه، سنگ‌شناسی، فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی، شاخص رطوبت توپوگرافی، کاربری اراضی، فاصله از جاده، انحنا سطح، شاخص موقعیت شیب نسبی، بافت خاک، توزیع مکانی مقدار بارندگی در سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲، فراوانی بارش بیش از ۵ میلی‌متر در سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲، شاخص اختلاف نرمال‌شده پوشش گیاهی در سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲)



شکل ۵. نقشه‌های عوامل محیطی مؤثر بر هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی در حوزه آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس (از راست به چپ: نقشه ارتفاع، درجه شیب، جهت دامنه، سنگ‌شناسی، فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی، شاخص رطوبت توپوگرافی، کاربری اراضی، فاصله از جاده، انحنای سطح، شاخص موقعیت شیب نسبی، بافت خاک، توزیع مکانی مقدار بارندگی در سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲، فراوانی بارش بیش از ۵ میلی‌متر در سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲، شاخص اختلاف نرمال‌شده پوشش گیاهی در سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲) (ادامه شکل ۵)



شکل ۵. نقشه‌های عوامل محیطی مؤثر بر هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی در حوزه آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس (از راست به چپ: نقشه ارتفاع، درجه شیب، جهت دامنه، سنگ‌شناسی، فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی، شاخص رطوبت توپوگرافی، کاربری اراضی، فاصله از جاده، انحنای سطح، شاخص موقعیت شیب نسبی، بافت خاک، توزیع مکانی مقدار بارندگی در سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲، فراوانی بارش بیش از ۵ میلی‌متر در سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲، شاخص اختلاف نرمال‌شده پوشش گیاهی در سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲) (ادامه شکل ۵)

پیش‌بینی بوده و بیشترین مقدار این شاخص را ($D=0/83$) به خود اختصاص داده است که به این منظور در جایگاه اول عملکردی قرار گرفته است. همچنین مدل شبکه عصبی مصنوعی با مقدار شاخص تطابق $0/63$ در جایگاه دوم عملکرد قرار گرفت؛ بنابراین، در این پژوهش، از آنجایی که مدل جنگل تصادفی از نظر معیارهای ارزیابی شاخص تبیین، شاخص خطای RSR و شاخص تطابق نسبت به مدل شبکه عصبی مصنوعی از عملکرد بهتری برخوردار بود، به‌عنوان مدل برتر برای پیش‌بینی میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی در حوزه آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس معرفی شد.

بحث

خندق‌های موجود در این حوزه آبخیز، عموماً خندق‌های بالغ و تکامل‌یافته بودند که میزان هدررفت خاک ناشی از آنها بسیار زیاد بود؛ به‌طوری که در مجموع، طی دوره مورد مطالعه، مقدار $15300/94$ تن هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی بود. این مقدار نشان داد که وضعیت هدررفت منابع خاک در این حوزه آبخیز، بسیار بحرانی است و از معروف‌ترین مناطق مستعد شکل‌گیری و رشد فرسایش خندقی در استان فارس است که مهار آن، نیازمند یک برنامه علمی - عملیاتی است.

ارزیابی 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 اعتبارسنجی اطلاعی ندارد. به این منظور، نتایج ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌ها در حوزه آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس برای رویکردهای مختلف تقسیم داده در مرحله اعتبارسنجی و بر اساس معیارهای ارزیابی مختلف در جدول ۴ ارائه شده است. از نظر معیار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، مدل شبکه عصبی مصنوعی کمترین مقدار خطا را داشته است. مدل جنگل تصادفی بر اساس معیار ارزیابی ضریب تبیین ($R^2=0/66-0/73$) بهترین عملکرد را نشان داده و پس از آن مدل شبکه عصبی مصنوعی ($R^2=0/0-21/34$) در جایگاه دوم قرار گرفت.

بر اساس نتایج اعتبارسنجی، حتی کمترین دقت پیش‌بینی مدل جنگل تصادفی در رویکردهای مختلف تقسیم داده، از بیشترین دقت پیش‌بینی مدل شبکه عصبی مصنوعی نیز بیشتر بوده است. از نظر معیار ارزیابی شاخص خطای RSR، مدل جنگل تصادفی دارای کمترین مقدار این شاخص ($RSR=0/66-1/03$) بوده و بیشترین دقت را به‌خود اختصاص داده است. مدل شبکه عصبی مصنوعی نیز از نظر شاخص خطای RSR، در جایگاه دوم قرار گرفته است. از نظر شاخص ارزیابی تطابق (D)، مدل جنگل تصادفی دارای بیشترین تطابق، میان داده‌های مشاهداتی و

جدول ۲. میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی در خندق های مورد مطالعه در حوزه آبخیز ماهورمیلانی استان فارس

شماره خندق	میزان هدررفت خاک (تن در سال)			شماره خندق	میزان هدررفت خاک (تن در سال)		
	۱۴۰۰	۱۴۰۱	۱۴۰۲		۱۴۰۰	۱۴۰۱	۱۴۰۲
۱	۹۲/۴۴	۱۳۲/۲۳	۱۴۰/۸۸	۳۶	۲۹/۵۸	۸/۵۸	۱۰/۴۸
۲	۶/۶۷	۳۴/۱۹	۱۶/۴۹	۳۷	۲۳/۵۳	۱۱/۲۶	۱۵/۲۱
۳	۶۷/۷۷	۱۷۵/۶	۷۵/۳۴	۳۸	۵۱/۹۷	۲۰/۹۶	۱۸/۰۸
۴	۶۱/۹۱	۱۱۹/۹۹	۴۰/۴۸	۳۹	۴۱/۸۷	۵۳/۰۲	۲۶/۰۸
۵	۳۰/۱۵	۸۳/۳۲	۲۵/۷۵	۴۰	۱۱۵/۶۴	۱۳۸/۶۱	۷۰/۴۱
۶	۹۴/۷۴	۳۸۵/۵	۷۱/۴۱	۴۱	۱۹۹/۶۷	۲۲۱/۴۸	۱۱۷/۴۸
۷	۷۴/۸۶	۱۴۰/۱۴	۶۸/۲۵	۴۲	۱۹۰/۵۵	۱۸۸/۵۸	۱۴۸/۰۵
۸	۱۳۷/۵۴	۳۷۶/۰۹	۱۱۵/۵۳	۴۳	۱۴۵/۱۴	۱۱۵/۲	۹۳/۷۵
۹	۹۵/۰۶	۱۸۲/۴۵	۴۵/۱۶	۴۴	۲۰۳/۹	۱۹۱/۱۸	۶۲/۶۵
۱۰	۱۸۴/۲	۲۷۳/۹۳	۱۱۸/۱۸	۴۵	۹۹/۲۷	۱۰۲/۹۷	۷۱/۵۸
۱۱	۲۵/۰۶	۶۰/۳۳	۲۷/۶۶	۴۶	۱۰۴/۶۱	۱۳۲/۷۱	۷۰/۱۵
۱۲	۳۱/۲۱	۵۶/۹۸	۴۲/۹۵	۴۷	۷۱/۲۸	۶۳/۴۶	۶۶/۴۸
۱۳	۱۰/۳۵	۱۷/۵۸	۸/۶۷	۴۸	۵۹/۰۳	۵۴/۲۸	۳۲/۲
۱۴	۴۷/۰۲	۹۴/۵۴	۴۵/۴۱	۴۹	۲۳/۶	۲۶/۴۴	۲۳/۳۹
۱۵	۲/۳	۳/۷۱	۳/۶۲	۵۰	۲۴/۰۸	۱۹/۲۶	۱۳/۰۷
۱۶	۵/۹۳	۴/۶۵	۴/۶۶	۵۱	۸۳/۴۴	۱۰۶/۸۵	۶۹/۱۵
۱۷	۱۱/۴۳	۱۰/۱۱	۷/۶۸	۵۲	۹۱/۹۶	۸۷/۶	۴۵/۷۲
۱۸	۲۲/۲۳	۲۹/۶۶	۳۲/۴۶	۵۳	۳/۷۶	۶/۱۷	۵/۲۳
۱۹	۳۴/۲۴	۴۱/۴۷	۳۱/۴۳	۵۴	۱۴/۸۲	۱۱/۱۸	۹/۴۲
۲۰	۴۳/۶۷	۴۲/۱۵	۲۸/۵۵	۵۵	۲۰/۶۸	۱۴/۸۳	۸/۸۸
۲۱	۵/۵۶	۸/۱۴	۶/۰۷	۵۶	۴۶/۱۴	۳۱/۹۶	۱۹/۱۸
۲۲	۷/۸۴	۱۲/۵۹	۱۱/۰۹	۵۷	۲۵/۶۲	۱۲/۶	۹/۷
۲۳	۲۳/۸۴	۲۹/۵۲	۲۲/۱۹	۵۸	۱۸/۵۹	۹/۴۶	۱۰/۵۶
۲۴	۵۹/۸۳	۶۸/۳۷	۴۹/۵۱	۵۹	۱۳/۱۴	۸/۸۹	۸/۵۴
۲۵	۳۸۳/۱۶	۲۳۲/۴۳	۱۷۳/۰۶	۶۰	۱۲/۲	۷/۳۳	۸/۹۹
۲۶	۲۲/۴۳	۱۸/۷۶	۱۷/۸۵	۶۱	۷۵/۷۲	۴۱/۶۲	۳۰/۵۸
۲۷	۲۲/۱۸	۱۰/۱۸	۱۳/۱۸	۶۲	۱۰۲/۷۹	۶۲/۰۶	۷۳/۵۶
۲۸	۳۲/۷۴	۲۰/۸۲	۱۹/۶۴	۶۳	۱۵۳/۹۹	۱۴۳/۷۵	۸۷/۴۹
۲۹	۲۴/۶۶	۳۴/۵۱	۲۴/۰۱	۶۴	۴۴۰/۵	۳۸۲/۷۶	۲۸۳/۳۷
۳۰	۵۵/۱۱	۴۵/۳۶	۴۵/۱۹	۶۵	۱۷۴/۶۲	۲۳۲/۷۵	۹۱/۱۳
۳۱	۱۳۸/۴۸	۱۲۹/۶۱	۷۵/۳۵	۶۶	۲۰۹/۹۱	۲۱۱/۷۳	۹۶/۳
۳۲	۱۳۹/۷۱	۱۲۷/۳۹	۸۵/۸۹	۶۷	۱۳۹/۵۷	۱۱۲/۰۱	۷۱/۴۷
۳۳	۷۳/۵۲	۱۳۹/۴۸	۴۲/۶۷	۶۸	۱۰۰/۷۶	۱۰۱/۰۶	۸۷/۷۶
۳۴	۲۳/۱۶	۱۲/۵۲	۱۴/۵۵	۶۹	۵۲/۱۷	۳۵/۶۹	۴۱/۸۳
۳۵	۳۲/۲	۱۹/۸۵	۱۲/۸	۷۰	۳۴۱/۱۴	۲۷۴/۱۷	۱۵۱/۱۳

جدول ۳. ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌های جنگل تصادفی و شبکه عصبی مصنوعی در مرحله آموزش در حوزه آبخیز ماهورمیلاتی استان

فارس

معیار ارزیابی	رویکرد تقسیم داده	مدل جنگل تصادفی	مدل شبکه عصبی مصنوعی
RMSE	M ₁	۲۶/۰۷	۷۱/۰۰
	M ₂	۲۴/۷۸	۵۵/۸۴
	M ₃	۲۴/۶۲	۶۳/۶۷
R ²	M ₁	۰/۹۳	۰/۴۱
	M ₂	۰/۹۰	۰/۴۲
	M ₃	۰/۹۳	۰/۳۶
RSR	M ₁	۰/۲۹	۰/۷۸
	M ₂	۰/۳۴	۰/۷۶
	M ₃	۰/۳۱	۰/۸۰
d	M ₁	۰/۹۸	۰/۷۵
	M ₂	۰/۹۶	۰/۷۵
	M ₃	۰/۹۷	۰/۶۸

جدول ۴. ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌های جنگل تصادفی و شبکه عصبی مصنوعی در مرحله اعتبارسنجی در حوزه آبخیز ماهورمیلاتی

استان فارس

معیار ارزیابی	رویکرد تقسیم داده	مدل جنگل تصادفی	مدل شبکه عصبی مصنوعی
RMSE	M ₁	۵۶/۹۲	۷۶/۸۴
	M ₂	۶۲/۱۸	۹۲/۱۱
	M ₃	۵۶/۹۷	۷۹/۰۵
R ²	M ₁	۰/۷۳	۰/۳۴
	M ₂	۰/۶۶	۰/۳۰
	M ₃	۰/۶۹	۰/۲۱
RSR	M ₁	۱/۰۳	۱/۳۹
	M ₂	۰/۶۵	۰/۹۷
	M ₃	۰/۶۶	۰/۹۱
D	M ₁	۰/۸۲	۰/۶۳
	M ₂	۰/۸۳	۰/۵۶
	M ₃	۰/۸۱	۰/۶۰

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

پژوهش است. به این سبب، در این پژوهش، از دو مدل جنگل تصادفی و شبکه عصبی مصنوعی برای مدل‌سازی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی استفاده شد. مدل‌های یادگیری

ماشین، به منظور مدل سازی استعداد شکل گیری فرسایش خندقی در گذشته مورد استفاده قرار گرفته بودند؛ اما کارایی آنها در زمینه مدل سازی هدررفت خاک و به عبارتی، هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی که ماهیت زمانی - مکانی دارد، تاکنون مشخص نشده بود که در این پژوهش، به این مهم، پرداخته شد.

یافته های این پژوهش نشان داد مدل سازی میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی در حوزه آبخیز ماهورمیلانی استان فارس نشان داد که مدل جنگل تصادفی، عملکرد بهتری از مدل شبکه عصبی مصنوعی داشته است. با توجه به اینکه مدل سازی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی با استفاده از مدل های یادگیری ماشین تا کنون انجام نشده است، امکان مقایسه مستقیم در این خصوص وجود نداشت. با این حال، در پژوهش های پیشین مانند: اسدی نیلوان و همکاران (۱)، جعفری و همکاران (۱۰) و لیو و همکاران (۱۲)، فینزی و سابو (۱۶)، هن و همکاران (۹) و مؤمنی دامنه و همکاران (۱۴) عملکرد بهتر مدل جنگل تصادفی نسبت به سایر مدل ها در شناسایی مناطق مستعد فرسایش خندقی تأیید شده است. برتری مدل جنگل تصادفی نسبت به مدل شبکه عصبی مصنوعی در مدل سازی و شبیه سازی را می توان به عوامل متعددی نسبت داد که در پژوهش ها و مقالات مختلف مورد بحث قرار گرفته اند. برای نمونه: به گفته جنیور و همکاران (۷)، مدل جنگل تصادفی به دلیل توانایی در مدیریت داده ها با ابعاد زیاد و مقاومت در برابر بیش برآزش، عملکرد بهتری را نشان می دهد. علاوه بر آن، این مدل می تواند به طور مؤثری روابط غیرخطی بین متغیرها را مدیریت کنند؛ بنابراین، مدل جنگل تصادفی، رویکرد کارآمدتر و مؤثرتری در مقایسه با مدل شبکه عصبی مصنوعی برای مدل سازی و شبیه سازی ارائه می کند؛ زیرا می تواند روابط پیچیده را مدیریت کند و بیش برآزش را کاهش دهد و در سناریوهای مختلف عملکرد خوبی داشته باشد. همچنین با توجه به اینکه طول دوره پایش طولانی نبوده و در این شرایط که کفایت داده در کمترین حالت قرار داشته، مدل جنگل

تصادفی توانست عملکرد مناسبی برای پیش بینی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی ارائه دهد؛ بنابراین مدل جنگل تصادفی، در مناطق خندقی که با کمبود داده فرسایش مواجه هستند، دارای قابلیت آموزش روابط بین متغیرها و تجزیه و تحلیل داده های مکانی - زمانی و پیش بینی میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی است. در صورتی که فراوانی داده مربوط به سال های پایش طولانی تر باشد، امکان تغییر جایگاه مدل ها از نظر کارایی وجود دارد که قضاوت در چنین شرایطی نیازمند بررسی و مطالعه جدید خواهد بود.

دلایل مختلفی برای عملکرد مناسب تر مدل جنگل تصادفی در این پژوهش وجود دارد. استفاده از ساختار درخت های تصمیم گیری بسیار زیاد و تصمیم گیری بر اساس میانگین درخت های تجزیه و تحلیل داده ها، موجب شده تا امکان خطای مدل کاهش یابد. ساختار مدل جنگل تصادفی از نگاهی دیگر موجب شده که مدل تحت تأثیر داده های پرت و ناسازگار قرار نگیرد؛ بنابراین، هنگام استفاده از مدل جنگل تصادفی، نیازی به استفاده از روش های پیش پردازش برای تعیین داده های پرت و فرایند حذف آنها از مجموعه داده ها وجود ندارد. همچنین این مدل، قابلیت پردازش داده های مربوط به پدیده هایی با ماهیت غیرخطی را نیز دارد و به دلیل ماهیت پدیده فرسایش خندقی و پیچیدگی رشد آن در شرایط زمانی و مکانی مختلف، توانسته است که درک مناسبی از رابطه متغیرهای مستقل و وابسته پیدا نموده و به پیش بینی آن بر اساس شرایط جدید بپردازد. اگر چه بیشتر مدل های هوش مصنوعی به تعیین اهمیت عوامل محیطی در شبیه سازی پدیده مد نظر می پردازند، مدل جنگل تصادفی نیز علاوه بر انجام این موضوع مهم، قابلیت کاهش ابعاد و حذف متغیرهای با درجه اهمیت کمتر را دارد که در این صورت حجم پردازش داده کاهش یافته و نتایج مدل سازی در مدت زمان کمتری نسبت به مدل های دیگر ارائه می شود. در نهایت، باید به این نکته اشاره کرد که امکان به کارگیری هر دو نوع داده کیفی (اسمی و رتبه ای) و کمی در مدل سازی رشد فرسایش خندقی، از دیگر مزیت های مدل جنگل تصادفی است که در این پژوهش

سامانی و همکاران (۱۵) نیز مؤید این موضوع بوده است که عوامل محیطی متعدد توپوگرافی، فیزیکی و شیمیایی خاک و مورفولوژی خندق تأثیر زیادی بر گسترش طولی خندق‌ها دارند.

پیشنهاد می‌شود 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. همچنین پیشنهاد می‌شود در شروع پژوهش‌هایی با محتوای "مدل‌سازی"، چند ایستگاه باران‌نگار در بخش‌های مختلف حوزه (های) آبخیز مد نظر نصب شود تا اطلاعات دقیقی از شدت بارندگی ثبت شود. علاوه بر این، اندازه پیکسل لایه‌های رستری مورد استفاده در این پژوهش و مقیاس مطالعه، بر اساس اطلاعات موجود انتخاب شد. بدیهی است که هرچه قدرت تفکیک مکانی لایه‌های رقومی بیشتر باشد، دقت پیش‌بینی مدل‌ها بیشتر خواهد بود. متأسفانه موجودیت لایه‌های با قدرت تفکیک مکانی زیاد در کشور، به عنوان یک مشکل و عامل محدودکننده در تحقیقات علوم محیطی مطرح است و حوزه آبخیز مورد مطالعه در این پژوهش نیز از این قاعده مستثنی نیست؛ بنابراین بخشی از خطای موجود در مرحله ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌ها ناشی از خطای لایه‌های رقومی متغیرهای محیطی پیش‌بینی‌کننده فرسایش خندقی است. به این سبب، افزایش قدرت تفکیک مکانی اطلاعات توپوگرافی، کاربری اراضی، خاک‌شناسی و سنگ‌شناسی در کشور، یکی از نیازمندی‌های اساسی در پژوهش‌های علوم منابع طبیعی است که باید به‌عنوان یکی از اولویت‌های مطالعاتی در آینده مد نظر برنامه‌ریزان قرار گیرد.

سپاسگزاری

این مقاله برگرفته از بخشی از نتایج پروژه تحقیقاتی ملی با عنوان "تخمین هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشینی و معرفی مناسب‌ترین

با عنایت به طیف وسیع متغیرهای پیش‌بینی‌کننده، کمک شایانی به شبیه‌سازی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی کرد؛ بنابراین مدل جنگل تصادفی در مقایسه با مدل شبکه عصبی مصنوعی، به‌عنوان مدل برتر در زمینه پیش‌بینی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی معرفی شد.

از مزیت‌های مهم این پژوهش آن است که در نظر گرفتن فاکتورهایی که در "زمان"، تغییرپذیر هستند شرایط پیش‌بینی در آینده را فراهم می‌کنند و در سال‌های آتی نیازی به اندازه‌گیری مجدد صحرایی در این حوزه آبخیز نیست. به این صورت که در سال‌های آینده (۱۴۰۴ و بعد از آن)، نیاز است که تنها مقدار بارندگی سالانه، تعداد بارندگی‌های بیشتر از ۵ میلی‌متر و نقشه پوشش گیاهی را برای پیش‌بینی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندق‌ها تهیه شود. عوامل مربوط به "بارندگی"، از ایستگاه‌های هواشناسی و عامل "پوشش گیاهی" از تصاویر ماهواره‌ای لندست تهیه می‌شوند. سایر متغیرهای مستقل، نیازی به اندازه‌گیری مجدد بعد از اجرای این پژوهش ندارند؛ زیرا در گذر زمان، تغییرات زیادی ندارند (مانند: ارتفاع، شیب، بافت خاک و ...). همچنین، میزان هدررفت خاک نیز نیازی به اندازه‌گیری مجدد صحرایی ندارد. در حقیقت، دو مدل مورد استفاده و آموزش دیده‌شده، در سال‌های آینده می‌توانند بر اساس یادگیری‌های کسب‌شده در مرحله آموزش، با در نظر گرفتن اطلاعات بارندگی و پوشش گیاهی جدید، میزان هدررفت خاک ناشی از خندق‌ها را پیش‌بینی کنند. این مسأله مهم‌ترین وجه تمایز این پژوهش محسوب می‌شود و نشان می‌دهد که "مدل‌سازی" می‌تواند در صرفه‌جویی وقت و هزینه، خدمات ارزنده‌ای به مدیریت حفاظت آب و خاک کشور ارائه دهد.

نتایج این پژوهش نشان داد که عوامل محیطی مختلفی در شکل‌گیری و رشد فرسایش خندقی نقش دارند؛ بنابراین بر اساس یک عامل محیطی به‌تنهایی نمی‌توان رشد فرسایش خندقی را مدل‌سازی و پیش‌بینی کرد. این یافته علمی مهم با نتایج ژائو و همکاران (۲۲) که در زمینه پیش‌بینی رشد فرسایش خندقی است، مطابقت دارد. در این راستا، نتایج مطالعه نظری

مدل"، با کد مصوب ۵۱۴-۹۹۰-۲۴-۲۹-۵۰-۰ در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری است. نویسندگان بر خود فرض می دانند سپاسگزاری خود را از حمایت های آن پژوهشکده و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس اعلام دارند.

References

منابع مورد استفاده

- Asadi Nilvan, O., A. Rabet, F. Vakilitajareh, M. Ramezani, M. Momeni and K. Heydari. 2023. Zoning gully erosion susceptibility using ANN, CART and RF models. *Journal of Watershed Engineering and Management* 15(2): 155-171 (in Farsi). <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2022.356379.1920>
- Casali, J., J. Loizu, MA. Campo, LM. De Santisteban and J. Alvarez-Mozos. 2006. Accuracy of methods for field assessment of rill and ephemeral gully erosion. *Catena* 67(2): 128-138. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.03.005>
- De Luna, E., K. Vanderlinden, J.M. De haro, A. Laguna, J. Poesen and J.V. Giraldez. 2000. Monitoring of long term gully head advance in south-east Spain using GIS. International Symposium on Gully Erosion under Global Change.
- Fars Province Meteorological Department website. 2024. Reporting meteorological statistics of Fars Province cities. <https://www.farsmet.ir/ReportAmar.aspx> (in Farsi).
- Fox, G., A. Sheshukov, R. Cruse, R. Kolar, L. Guertault, K. Gesch and R. Dutnell. 2016. Reservoir sedimentation and upstream sediment sources: perspectives and future research needs on streambank and gully erosion. *Environmental Management* 57: 945-955. <https://doi.org/10.1007/s00267-016-0671-9>
- Gelete, T.B., P. Pasala, N.G. Abay, G.W. Woldemariam, K.H. Yasin, E. Kebede and I. Aliyi. 2024. Integrated machine learning and geospatial analysis enhanced gully erosion susceptibility modeling in the Erer watershed in Eastern Ethiopia. *Frontiers in Environmental Science* 12:1410741. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1410741>
- Genuer, R., J.M. Poggi and C. Tuleau-Malot. 2010. Variable selection using random forests. *Pattern Recognition Letters* 31(14): 2225-2236. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2010.03.014>
- Han, J., J.A. Guzman and M.L. Chu. 2023. Gully erosion susceptibility mapping using the stacking ensemble machine learning method. American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting, Michigan, United States. <https://doi.org/10.13031/aim.202300154>
- Han, J., J.A. Guzman and M.L. Chu. 2025. Prediction of gully erosion susceptibility through the lens of the SHapley Additive exPlanations (SHAP) method using a stacking ensemble model. *Journal of Environmental Management* 383: 125478. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125478>
- Jaafari, A., S. Janizadeh, H. Ghassan Abdo, D. Mafi-Gholami and B. Adeli. 2022. Understanding land degradation induced by gully erosion from the perspective of different geoenvironmental factors. *Journal of Environmental Management* 315: 115181. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115181>
- Li, H., J. Jin, F. Dong, J. Zhang, L. Li and Y. Zhang. 2024. Gully Erosion Susceptibility Prediction Using High-Resolution Data: Evaluation, Comparison, and Improvement of Multiple Machine Learning Models. *Remote Sensing* 16(24): 4742. <https://doi.org/10.3390/rs16244742>
- Liu, G., A. Arabameri, M. Santosh and O. Asadi Nalivan. 2023. Optimizing machine learning algorithms for spatial prediction of gully erosion susceptibility with four training scenarios. *Environmental Science and Pollution Research* 30(16): 46979-46996. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-25090-2>
- Liu, X., D. Wang, M. Guo, X. Zhang, Zh. Chen, Zh. Wan and J. Liu. 2025. Determination of future gully erosion risk and its spatially quantitative interpretability of driving factors in regional scale using machine learning algorithms. *Geoderma* 459: 117396. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117396>
- Momeni Damaneh, J., H. Memarian and A.A. Safdari. 2025. Machine Learning Techniques for Gully Erosion Susceptibility Mapping (Case Study: Mukhtaran Watershed, South Khorasan Province, Iran). *Sustainable Earth Trends* 5(3): 63-75. <https://doi.org/10.48308/SET.2025.237956.1093>
- Nazari Samani, A.A., F. Avazadeh Tavakoli, H. Ahmadi and Gh.R. Rahi. 2014. Determining of Effective Factors on Gully Longitudinal Advancement (Case study: Dareh Koreh Watershed). *Journal of Range and Watershed Management* 67(1): 117-126 (in Farsi). <https://doi.org/10.22059/jrwm.2014.50833>

16. Phinzi, K., and S. Szabó. 2024. Predictive machine learning for gully susceptibility modeling with geo-environmental covariates: main drivers, model performance, and computational efficiency. *Natural Hazards* 120: 7211-7244. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06481-9>
17. 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. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.09.006>
18. Soleimanpour, S.M., M. Soufi, M.J. Roustae, S. Shadfar, L. Jowkar and H. Keshavarzi. 2018. Investigation the Effectiveness of Influencing Factors on Extension of Gully Erosion. Final Report of the Research Project, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute Publications (in Farsi).
19. Soufi, M. 2004. Investigation of morphoclimatic characteristics of gullies in Fars province. Final report of the research project, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute Publications (in Farsi).
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 Discussions* 7(4): 2207-2217. <https://doi.org/10.5194/hessd-7-5235-2010>
21. Zhang, X., Sh. Zhang, X. Meng, G. Zhang, D. Zang, Y. Han, H. Ai and H. Liu. 2024. Remote sensing image segmentation of gully erosion in a typical black soil area in Northeast China based on improved DeepLabV3+ model. *Ecological Informatics* 84: 102929. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102929>
22. Zhou, X., Y. Wei, J. He and C. Cai. 2023. Estimation of gully erosion rate and its determinants in a granite area of southeast China. *Geoderma* 429: 116223. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116223>