



Modeling soil loss due to gully erosion using random forest and support vector machine models and evaluating their efficiency

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

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

E-mail: m.soleimanpour@areeo.ac.ir

Article Info

Abstract

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 13 Feb. 2025

Revised: 10 Apr. 2025

Accepted: 16 Apr. 2025

Published online: 23 Sept. 2025

Keywords:

Artificial intelligence,

Gully erosion,

Machine learning,

Modeling,

Soil loss.

Field measurements of soil loss due to gully erosion are very time-consuming and costly, so direct measurement of gully erosion at large scales is a time-consuming, costly, and labor-intensive process. For this purpose, the present study attempted to accomplish this by modeling soil loss due to gully erosion using random forest and support vector machine learning models and evaluating their efficiency in the Mahurmilati watershed located in the southwest of Fars province. Field measurements of dimensional parameters of 70 gullies were conducted over four years (2021 to 2024). In the modeling process, 15 environmental factors were considered as independent variables and the rate of soil loss in ditches as the dependent variable, and modeling was performed with a cross-validation approach. The accuracy of the models was evaluated using quantitative criteria such as root mean square error (RMSE), coefficient of determination (R^2), root mean square error (RSR), and correlation coefficient (d). The rate of soil loss in gullies during the study period was 15300.94 tons. The results of the model prediction accuracy evaluation showed that the random forest model has better performance than the support vector machine model in terms of evaluation criteria and was introduced as the superior model for predicting the rate of soil loss due to gully erosion. The findings showed that "modeling" can provide valuable services to water and soil conservation management in saving time and money. For this purpose, it is suggested that the use of artificial intelligence-based models and machine learning structures be given more attention in future research.

Cite this article: Soleimanpour, S.M., Rahmati, O., Shadfar, S., Enayati, M. (2025). Modeling soil loss due to gully erosion using random forest and support vector machine models and evaluating their efficiency. *Journal of Range & Watershed Management*, 78 (3), 363-383. DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2025.390477.1804>





دوره ۷۸ (۳)

شاپا الکترونیکی: ۷۷۹۵-۲۴۲۳

نشریه مرتع و آبخیزداری



مدل سازی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی با استفاده از مدل های جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان و ارزیابی کارایی آن ها

سید مسعود سلیمان پور^{۱*} | امید رحمتی^۲ | صمد شادفر^۳ | مریم عنایتی^۱

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

رایانامه: m.soleimanpour@areco.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

اندازه گیری میدانی میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی، بسیار زمان بر و هزینه بر بوده بنابراین اندازه گیری مستقیم فرسایش خندقی در سطوح وسیع فرآیندی زمان بر، هزینه بردار و طاقت فرسا است. به این منظور، پژوهش حاضر، نسبت به انجام این مهم از طریق مدل سازی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی با استفاده از مدل های یادگیری ماشینی جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان و ارزیابی کارایی آنها در حوزه آبخیز ماهورمیلانی واقع در جنوب غرب استان فارس اقدام کرد. در طی چهار سال (۱۳۹۹ لغایت ۱۴۰۲)، اندازه گیری های میدانی پارامترهای ابعادی ۷۰ خندق انجام شد. در فرآیند مدل سازی، ۱۵ عامل محیطی، به عنوان متغیرهای مستقل و میزان هدررفت خاک خندق ها به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شدند و مدل سازی با رویکرد اعتبارسنجی متقاطع انجام شد. دقت مدل ها با استفاده از معیارهای کمی خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، ضریب تعیین (R^2)، ریشه مربعات خطا (RSR) و همبستگی تطابق (d) مورد بررسی قرار گرفت. میزان هدررفت خاک خندق ها در دوره مورد مطالعه ۱۵۳۰۰/۹۴ تن بود. نتایج ارزیابی دقت پیش بینی مدل ها نشان داد مدل جنگل تصادفی از نظر معیارهای ارزیابی، نسبت به مدل ماشین بردار پشتیبان از عملکرد بهتری برخوردار بود و به عنوان مدل برتر برای پیش بینی میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی معرفی شد. یافته ها نشان داد "مدل سازی" می تواند در صرفه جویی وقت و هزینه، خدمات ارزنده ای به مدیریت حفاظت آب و خاک ارائه دهد. به این منظور پیشنهاد می شود استفاده از مدل های مبتنی بر هوش مصنوعی و ساختار یادگیری ماشینی در پژوهش های آینده مورد توجه بیشتری قرار گیرد.

کلیدواژه ها:

فرسایش خندقی،
مدل سازی،
هدررفت خاک،
هوش مصنوعی،
یادگیری ماشینی.

استناد: سلیمان پور؛ سید مسعود، رحمتی؛ امید، شادفر؛ صمد، عنایتی؛ مریم (۱۴۰۴). مدل سازی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی با استفاده از مدل های جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان و ارزیابی کارایی آن ها. نشریه مرتع و آبخیزداری، ۷۸ (۳)، ۳۶۳-۳۸۳.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2025.390477.1804>



© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

امروزه کمتر منطقه‌ای را در سطح زمین می‌توان یافت که در معرض تخریب و فرسایش قرار نگرفته باشد و به همین دلیل، این پدیده در حال حاضر به یکی از مشکل‌سازترین و در عین حال حساس‌ترین چالش‌های امروز جامعه بشری تبدیل شده است (سلیمان پور، ۲۰۱۲). به این سبب، پایش و ارزیابی فرسایش خاک برای کاهش تخریب زمین و تضمین امنیت غذایی، ضروری است (ونگ^۱ و همکاران، ۲۰۲۵). در بین انواع فرسایش‌های آبی و بادی و به‌طور ویژه فرسایش آبی، فرسایش خندقی یکی از بارزترین انواع فرسایش‌ها است. این نوع فرسایش به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک کره زمین و در مواردی که بهره‌برداری از منابع آب و خاک، مبتنی بر اصول صحیح و متناسب با توان طبیعی و شرایط محیطی نباشد؛ موجب تغییرات قابل ملاحظه‌ای در اراضی می‌شود (دلونا^۲ و همکاران، ۲۰۰۰). در ایران نیز این نوع فرسایش، باعث تخریب اراضی بسیاری گردیده و با جاری شدن رواناب و سیل، حجم قابل توجهی از رسوبات را به‌دنبال دارد که این امر باعث غیر قابل استفاده شدن اراضی می‌شود (سلیمان پور و همکاران، ۲۰۱۸).

از آنجایی که میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی، ارتباط مستقیمی با عوامل محیطی دارد؛ بنابراین می‌توان بر اساس شرایط محیطی، میزان هدررفت خاک ناشی از هر خندق را مدل‌سازی کرد. مدل‌سازی کمک می‌کند تا در زمان و هزینه اندازه‌گیری مشخصات و ویژگی‌های خندق‌ها صرفه‌جویی شود. به دلیل این که مدل‌های یادگیری ماشینی، مبتنی بر هوش مصنوعی، قابلیت بالایی در تجزیه و تحلیل اطلاعات محیطی دارند و قادرند روابط غیرخطی و پیچیده بین متغیرها را شناسایی کنند، در این پژوهش از آن‌ها برای مدل‌سازی استفاده شد. همچنین یکی دیگر از ویژگی‌های مفید این مدل‌ها آن است که برای تجزیه و تحلیل اطلاعات و مدل‌سازی، نیازمند پیش‌فرض‌های آماری نیستند (رحمتی و همکاران، ۲۰۱۷).

با عنایت به موارد فوق، این پژوهش در حوزه آبخیز ماهورمیلانی استان فارس که دارای فرسایش خندقی است و مشکلات متعددی در این راستا دارد انجام شد تا بتواند نسبت به برآورد دقیقی از میزان هدررفت خاک توسط این نوع فرسایش اقدام کند. از طرفی دیگر، اندازه‌گیری میدانی میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی، بسیار زمان‌بر و هزینه‌بر بوده که اندازه‌گیری مستقیم فرسایش خندقی در سطوح وسیع امکان‌پذیر نیست. به این منظور، پژوهش حاضر، برای اولین بار در ایران، نسبت به انجام این مهم از طریق مدل‌سازی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های جنگل تصادفی^۳ و ماشین‌بردار پشتیبان^۴ اقدام کرد.

موسوی و همکاران (۲۰۲۲) اقدام به بررسی کاربرد مدل‌های یادگیری ماشین در برآورد مکانی فسفر و پتاسیم خاک در بخشی از اراضی دشت آبیک کردند. ایشان از مدل‌های جنگل تصادفی، کوپست و رگرسیون بردار پشتیبان استفاده کردند. نتایج مدل‌سازی نشان داد مدل جنگل تصادفی نسبت به سایر مدل‌ها دارای بیشترین میزان صحت و حداقل مقدار خطا بود. ابوتایب^۵ و همکاران (۲۰۲۳) اقدام به ارزیابی اثربخشی سه مدل یادگیری ماشینی جنگل تصادفی، ماشین‌بردار پشتیبان و رگرسیون لجستیک در پیش‌بینی حساسیت وقوع فرسایش خندقی کردند. یافته‌ها نشان داد که مدل جنگل تصادفی، بالاترین عملکرد را از خود نشان داد و پس از آن، مدل‌های ماشین‌بردار پشتیبان و رگرسیون لجستیک قرار داشتند. لیو^۶ و همکاران (۲۰۲۳) نیز با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین اقدام به پیش‌بینی حساسیت وقوع فرسایش خندقی در حوضه سد گلستان ایران کردند. یافته‌ها نشان داد به‌ترتیب مدل‌های جنگل تصادفی، شبکه عصبی مصنوعی، ماشین‌بردار پشتیبان و حداکثر آنتروپی، به‌عنوان دقیق‌ترین مدل‌ها به‌منظور پیش‌بینی حساسیت وقوع فرسایش خندقی در این منطقه می‌باشند. رحیمی و همکاران (۲۰۲۳) اقدام به مدل‌سازی پراکنش مکانی کلاس‌های خاک با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین در بخشی از اراضی استان زنجان کردند. مدل‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های جنگل تصادفی، درخت تصمیم توسعه‌یافته و رگرسیون لجستیک چندجمله‌ای در محیط نرم‌افزار R انجام شد. نتایج نشان داد مدل رگرسیون لجستیک چندجمله‌ای برآورد قابل قبولی

¹ Wang

² Deluna

³ Random forest

⁴ Support vector machine

⁵ Aboutaib

⁶ Liu

در پیش‌بینی مکانی زیرگروه‌های خاک ارائه کرده است. در پژوهشی دیگر، ور^۱ و همکاران (۲۰۲۳) به ارزیابی و مقایسه عملکرد مدل‌های ماشین‌بردار پشتیبان، درخت رگرسیون تقویت‌شده، جنگل تصادفی و رگرسیون لجستیک، در پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی در یک منطقه نیمه‌خشک تخریب‌یافته در کشور کنیا اقدام کردند. نتایج ایشان نشان داد مدل جنگل تصادفی، از دقت بالاتری در پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی و مناطق مستعد برخورداری بود و پس از آن مدل‌های درخت رگرسیون تقویت‌شده، ماشین‌بردار پشتیبان و رگرسیون لجستیک قرار داشتند. ارفونی^۲ و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین اقدام به بررسی خطر فرسایش خاک در حوزه آبخیز اوریکا مراکش کردند. نتایج نشان داد به‌ترتیب مدل‌های بیز ساده (NB)، تقویت‌گرادیان شدید (XGB)، جنگل تصادفی (RF) و K نزدیکترین همسایه (KNN)، بالاترین دقت را در پیش‌بینی حساسیت به فرسایش داشتند. بامو^۳ و همکاران (۲۰۲۴) نیز با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین اقدام به ارزیابی حساسیت فرسایش خندقی در حوزه آبریز تنسیف دشت هاوز واقع در کشور مراکش کردند. در این پژوهش، مدل‌های XGBoost و KNN، به‌عنوان مناسب‌ترین مدل‌ها به‌منظور ارزیابی حساسیت فرسایش خندقی معرفی شدند و مدل‌های جنگل تصادفی، ماشین‌بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی در رده‌های بعدی قرار گرفتند. همچنین کاردوسو^۴ و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین اقدام به ارائه طبقه‌بندی کیفی خطر فرسایش خاک در حوزه آبخیز آنجیکال برزیل کردند. ایشان استفاده از تکنیک‌های هوش مصنوعی را برای افزایش کارایی طبقه‌بندی‌های کیفی خطر فرسایش خاک، مؤثر دانستند. فیلو^۵ و همکاران (۲۰۲۴) نیز در پژوهشی به بررسی و مقایسه چهار مدل یادگیری ماشینی به‌منظور پیش‌بینی حساسیت وقوع فرسایش خندقی در حوزه آبخیز پیرای واقع در جنوب‌شرقی برزیل اقدام کردند. نتایج نشان داد مدل‌های تقویت‌گرادیان شدید و جنگل تصادفی، از دقت بالاتری نسبت به دو مدل دیگر برخوردار بودند. جلت^۶ و همکاران (۲۰۲۴) نیز با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشینی اقدام به پیش‌بینی حساسیت به فرسایش خندقی و شناسایی مناطق و عوامل زمینه‌ای وقوع آن در حوزه آبخیز ارر در کشور اتیوپی کردند. نتایج نشان داد مدل شبکه عصبی مصنوعی و پس از آن مدل جنگل تصادفی، ماشین‌بردار پشتیبان و تقویت‌گرادیان شدید، از مطلوبیت و دقت بیشتری در پیش‌بینی احتمال وقوع فرسایش خندقی برخوردار بودند. مکرم و پورقاسمی (۲۰۲۴) از مدل‌های ماشین‌بردار پشتیبان و جنگل تصادفی برای پیش‌بینی الگوهای فرسایش خاک استفاده کردند. نتایج نشان داد مدل ماشین‌بردار پشتیبان از دقت بالاتری در مقایسه با روش جنگل تصادفی در پیش‌بینی فرسایش خاک برخوردار بود. نیکا^۷ (۲۰۲۴) نیز با استفاده از مدل تجربی جهانی تلفات خاک (RUSLE) و مدل یادگیری ماشینی جنگل تصادفی (RF)، اقدام به ارزیابی خطر فرسایش خاک در منطقه تساجری گرجستان کردند. نتایج نشان داد مدل جنگل تصادفی، با ترکیب متغیرهای اضافی، پیش‌بینی دقیق‌تری ارائه می‌دهد. این یافته‌ها نشان داد ترکیب مدل RUSLE، با مدل‌های یادگیری ماشینی، ارزیابی خطر فرسایش خاک را بهبود می‌بخشد. همچنین نور^۸ و همکاران (۲۰۲۴) اقدام به کاربرد الگوریتم‌های یادگیری ماشینی برای تخمین حساسیت به فرسایش خاک در حوضه رودخانه گومانی واقع در شرق هند کردند. ایشان از دو مدل شبکه عصبی مصنوعی و ماشین‌بردار پشتیبان استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد مدل شبکه عصبی مصنوعی از دقت بالاتری در شبیه‌سازی مناطق فرسایشی برخوردار است. زیگمار^۹ و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از دو مدل جنگل تصادفی و درخت تصادفی اقدام به مدل‌سازی فرسایش خاک مبتنی بر (معادله جهانی بازنگری شده تلفات خاک) در حوزه آبخیز سد بنی‌هارون واقع در شمال‌شرقی الجزایر کردند. نتایج نشان داد معادله جهانی بازنگری شده تلفات خاک مبتنی بر درخت تصادفی، نتایج تقریباً یکسانی را در طبقه‌بندی شدت فرسایش ارائه کرد اما نتایج مدل جنگل تصادفی با میزان برآورد شده مقداری با معادله جهانی بازنگری شده تلفات خاک تفاوت داشت. بوعلی^{۱۰} و همکاران (۲۰۲۵) اقدام به ارزیابی خطر زمانی - مکانی فرسایش خاک در شمال‌شرق ایران کردند. نتایج نشان داد مدل ICONA، عملکرد مناسبی برای شناسایی مناطق در معرض خطر فرسایش خاک داشته است. ایشان بر اهمیت ادغام داده‌های ماهواره‌ای

¹ Were² Arfouni³ Bammou⁴ Cardoso⁵ Filho⁶ Gelete⁷ Nika⁸ Nur⁹ Zeghmar¹⁰ Boali

با اعتبارسنجی میدانی برای بهبود مدیریت خاک، حفاظت از تنوع زیستی و مدیریت راهبردهای کاهش فرسایش خاک، تأکید کردند. همچنین مالیک^۱ و همکاران (۲۰۲۵) به ارزیابی فرسایش خاک با رویکرد مدل های یادگیری ماشین در حوزه آبریز رودخانه کانگسباتی واقع در شرق هند پرداختند. در این پژوهش، از مدل های جنگل تصادفی، شبکه عصبی مصنوعی عمیق، شبکه عصبی مصنوعی پیچشی و مدل Meta استفاده شد. نتایج نشان داد مدل شبکه عصبی مصنوعی عمیق، دقت بالاتری در مقایسه با سایر مدل ها در پیش بینی مناطق حساس به فرسایش خاک در این منطقه داشت و به عنوان مدل، برتر معرفی شد. پریادهارشینی^۲ و همکاران (۲۰۲۵) نیز با استفاده از تکنیک های تحلیل مکانی و مدل های یادگیری ماشین، اقدام به ارزیابی فرسایش خاک و خطرات مرتبط با آن در منطقه کولیم مکزیک کردند. نتایج نشان داد مدل شبکه عصبی مصنوعی CNN، توانایی بهتری در پیش بینی و ارزیابی خطر فرسایش خاک در این منطقه دارد. در جمع بندی پژوهش های انجام شده، بیان این نکته ضروری است که نتایج پژوهش های مختلف نشان دهنده آن است که تاکنون، میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی با استفاده از مدل های یادگیری ماشین، تعیین نشده است. به همین سبب، هدف اصلی این پژوهش، برآورد هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی با استفاده از دو مدل یادگیری ماشین جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان و ارزیابی کارایی آن ها می باشد.

۲. مواد و روش ها

۲-۱. معرفی منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز ماهورمیلاتی در جنوب غربی استان فارس و در شهرستان ممسنی، 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). مساحت این حوزه آبخیز، ۷۲۷/۶ کیلومتر مربع می باشد. ماده مادری غالب خاک های حوزه آبخیز شامل آبرفت های دوره میوسن، میشان و گچساران است. شیب متوسط منطقه، ۳ درصد می باشد. تیپ اراضی، تپه ماهور و ارتفاع متوسط از سطح دریا ۶۲۰ متر است. اقلیم منطقه براساس روش دومارتن گسترده، نیمه خشک معتدل است (صوفی، ۱۳۸۳). متوسط بارندگی سالانه این منطقه، براساس آمار ۱۸ ساله ایستگاه آبدگاه، برابر با ۶۴۵ میلی متر است (تارنمای اداره کل هواشناسی استان فارس، ۱۴۰۳). پنج نوع کاربری مختلف در این آبخیز وجود دارد که عبارتند از: باغ، کشاورزی دیم، جنگل تنک و تخریب شده، مرتع متوسط و مرتع فقیر. روستاهای اصلی این حوزه آبخیز عبارتند از: میشان علیا، میشان سفلی، چاه انجیر و بیدگاز. خروجی هیدرولوژیکی این آبخیز در قسمت جنوب غربی قرار گرفته است و الگوی شبکه زهکشی آن شاخه درختی شکسته است (شکل ۱).

۲-۲. روش پژوهش

در بازدیدهای میدانی، موقعیت جغرافیایی تمامی خندق های واقع در حوزه آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس، با استفاده از دستگاه سامانه موقعیت یاب جهانی^۳ (GPS) ثبت شد (شکل ۲) و پس از تطبیق با تصاویر ماهواره ای گوگل ارث^۴، این نقاط به محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی^۵ (GIS) منتقل و نقشه پراکنش خندق ها ترسیم شد.

سپس اندازه گیری پارامترهای ابعادی خندق ها طی چهار سال (۱۳۹۹ لغایت ۱۴۰۲)، شامل: طول خندق، عرض بالا، عرض پایین، و عمق خندق (شکل های ۳ تا ۵)، با مبنا قرار دادن پژوهش کاسالی^۶ و همکاران (۲۰۰۶)، که مناسب ترین فاصله برای اندازه گیری ابعاد خندق ها را فاصله ۱۰ متری اعلام کردند؛ این اندازه گیری ها انجام شدند. شایان ذکر است به سبب رعایت هم زمانی اندازه گیری ها، تمام اندازه گیری های میدانی در انتهای هر سال (اسفند)، انجام پذیرفت.

¹ Mallick

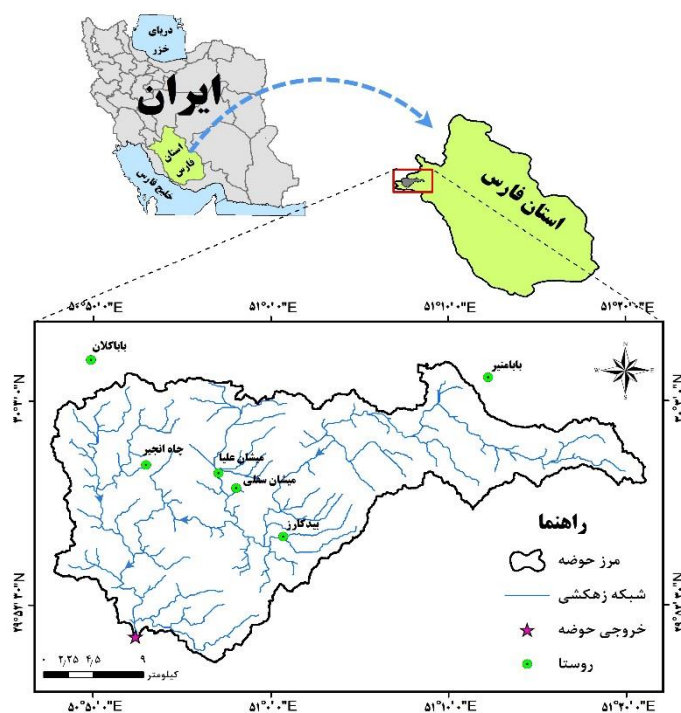
² Priyadharshini

³ Global Positioning System

⁴ Google Earth satellite images

⁵ Geographic Information System

⁶ Casali



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس



شکل ۳. اندازه‌گیری عرض بالای خندق‌ها



شکل ۲. ثبت موقعیت جغرافیایی خندق‌ها با استفاده از دستگاه GPS



شکل ۵. اندازه‌گیری عمق خندق‌ها



شکل ۴. اندازه‌گیری عرض پایین خندق‌ها

همچنین در اندازه گیری های میدانی، از دیواره های چپ، راست، پیشانی و خروجی هر خندق، نمونه های خاک توسط استوانه های فلزی استاندارد (کور) برداشت شد (شکل ۶) و پس از انتقال نمونه ها به آزمایشگاه تخصصی فرسایش و رسوب، جرم مخصوص ظاهری نمونه ها اندازه گیری و سپس میانگین آن ها محاسبه شد.



شکل ۶. نمونه برداری خاک از پیشانی خندق توسط استوانه فلزی استاندارد

در ادامه، سطح مقطع عرضی خندق^۱، با استفاده از رابطه زیر (تیبو^۲ و همکاران، ۲۰۱۰) در سه مقطع زمانی مختلف (سال اول، دوم و سوم)، برای هر خندق محاسبه شد:

$$CA = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{W_1 + W_2}{2} \right) D \right) \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه؛ CA: سطح مقطع عرضی خندق (متر مربع)، W_1 : عرض بالای خندق (متر)، W_2 : عرض پایین خندق (متر)، و D: عمق خندق (متر) می باشد. پس از آن، محاسبه حجم خاک از دست رفته ناشی از فرسایش خندقی، طبق رابطه زیر (تیبو و همکاران، ۲۰۱۰)، برای هر خندق محاسبه شد:

$$V = \sum_{i=1}^n L \left[\left(\left(\frac{W_1 + W_2}{2} \right) D \right) \right] \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این رابطه؛ V: حجم خاک از دست رفته ناشی از فرسایش خندقی (متر مکعب)، 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 فرسایش یافته ناشی از فرسایش خندقی محاسبه شد. به این صورت که مقدار حجم خاک از دست رفته در هر خندق، در جرم مخصوص ظاهری خاک هر خندق ضرب شد و پس از جمع مقادیر خندق ها، وزن خاک فرسایش یافته ناشی از فرسایش خندقی در این حوزه آبخیز محاسبه شد. لازم به ذکر است که مقدار وزن هدررفت خاک به دست آمده در سال اول اندازه گیری (۱۳۹۹)، مربوط به تاریخچه عمر خندق است. به عبارتی دیگر، وزن هدررفت خاک از ابتدای شکل گیری خندق تا سال ۱۳۹۹ محاسبه شد و اطلاعات هندسی اندازه گیری شده خندق ها در سال ۱۳۹۹ مبنای محاسبه میزان هدررفت خاک در سال های بعدی (۱۴۰۰، ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲) بود و به این صورت، امکان تعیین میزان هدررفت خالص سالانه فراهم شد؛ به طوری که به طور مثال، مقادیر حجم خندق و وزن هدررفت خاک به دست آمده از ابعاد اندازه گیری شده در سال ۱۴۰۰ به صورت تجمعی بود و مقدار خالص میزان هدررفت خاک مربوط به سال ۱۴۰۰ با استفاده از تفاضل مقادیر سال ۱۴۰۰ و سال قبل (۱۳۹۹) به دست آمد و برای سال های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ نیز به همین ترتیب انجام شد.

¹ Cross-sectional Area

² Tebebu

۲-۱-۲. متغیرهای محیطی

در این پژوهش بر مبنای مطالعات گذشته، ۱۵ عامل محیطی، به عنوان متغیرهای مستقل (متغیرهای پیش‌بینی کننده) به منظور فرآیند مدل سازی انتخاب شدند. این عوامل عبارت بودند از: ارتفاع، درجه شیب، جهت شیب، سنگ شناسی، 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 سال های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲)، فراوانی بارش بیش از ۵ میلی متر (در سال های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲)، شاخص نرمال شده پوشش گیاهی (در سال های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲).

به منظور تهیه لایه مدل رقومی ارتفاع زمین، از سنجنده SRTM با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر استفاده شد. مقیاس مکانی تهیه نقشه های ارتفاع، شیب، جهت، انحنا سطح، شاخص رطوبت توپوگرافی، تراکم زهکشی و فاصله از جریان، ۱:۵۰۰۰۰ بودند و براساس نقشه های پایه توپوگرافی تهیه شدند. مقیاس نقشه های خاک شناسی، زمین شناسی، پوشش گیاهی و بارندگی نیز در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ تهیه شدند. در عامل خاک شناسی، بافت خاک مدنظر بود. به این منظور، نمونه های خاک از بخش های مختلف حوزه های آبخیز مورد مطالعه جمع آوری و مورد آزمایش بافت به روش هیدرومتری، قرار گرفتند. همچنین نقشه بافت خاک با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین، پردازش و تهیه شد. به منظور اطمینان از نقشه تولید شده، کلاس های نقشه بافت خاک، با داده های بافت خاک آزمایشگاهی انطباق داده شد تا از صحت نقشه بافت خاک اطمینان حاصل شود. همچنین، در عامل زمین شناسی، واحدهای سنگ شناسی مد نظر بود. از لحاظ پوشش گیاهی، شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی^۱ (NDVI) استفاده شد. به این منظور، شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی براساس تصاویر سنتینل ۲ در سال های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲، برای حوزه آبخیز مورد مطالعه محاسبه شد. با عنایت به اهمیت تطابق زمانی بارندگی و حضور پوشش گیاهی در مطالعات فرسایش خاک و همچنین کاربرد بهینه شاخص های پوشش گیاهی در فصل بهار، تصاویر مربوط به زمان اسکن ماه آوریل (نیمه دوم فروردین تا نیمه اول اردیبهشت) سال های ۲۰۲۱، ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳ دریافت شد. تصاویر از طریق سامانه گوگل ارث انجین دریافت و مورد پردازش قرار گرفت. مقدار بارندگی سالانه و تعداد بارندگی های بیشتر از ۵ میلی متر نیز مورد استفاده قرار گرفت. دلیل انتخاب این عوامل به این سبب بود که: عوامل توپوگرافی از جمله: ارتفاع، شیب، جهت، انحنا سطح و شاخص موقعیت شیب نسبی، تأثیر به سزایی در فرآیندهای هیدرولوژیکی و فرسایش دارند و از این رو به عنوان متغیرهای پیش‌بینی کننده مورد استفاده قرار گرفتند. خاک شناسی نیز یکی از عوامل مهم در وقوع و گسترش فرسایش خندقی است؛ به گونه ای که سرعت رشد خندق ها در خاک های حساس بسیار بالاتر است (سلیمان پور، ۱۳۹۱). عامل سنگ شناسی نیز همواره میزان حساسیت واحد سنگ شناسی به فرسایش را مشخص می کند و می تواند اطلاعات مفیدی برای تخمین فرسایش خندقی را ارائه نماید. همچنین، از آنجایی که جریان ها (زهکش ها) جریان های سطحی و زیرسطحی محدوده های اطراف و بالادست خندق ها را جمع آوری می کنند؛ همگرایی جریان ها می تواند پتانسیل بالایی برای وقوع و رشد فرسایش خندقی داشته باشد؛ از این رو عامل فاصله از جریان، به عنوان یکی از متغیرهای پیش‌بینی کننده انتخاب شد. تراکم زهکشی نیز نشان دهنده میزان تراکم جریان ها در واحد سطح منطقه است و بر پتانسیل فرسایش خاک و فرایندهای هیدرولوژیکی تأثیر گذار است. شاخص رطوبت توپوگرافی نیز به عنوان یک شاخص ترکیبی توپوگرافی - هیدرولوژیکی، میزان جریان بالادست پیکسل و وضعیت شیب پیکسل را همزمان در نظر می گیرد تا میزان جریان بالقوه و شرایط نفوذ را نشان دهد. بارندگی نیز از عوامل اصلی وقوع فرسایش آبی است و به منظور تخمین هدررفت خاک، بایستی به عنوان یکی از عوامل مهم پیش‌بینی کننده در نظر گرفته شود (سلیمان پور و همکاران، ۱۴۰۳). شایان ذکر است لایه های اطلاعاتی تمامی این متغیرها در سیستم اطلاعات جغرافیایی در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ تهیه شدند.

در فرآیند 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. شایان ذکر است مدل سازی در این پژوهش با رویکرد اعتبارسنجی متقاطع انجام شد و داده ها به تعداد سه دسته یا گروه تقسیم شدند. با توجه به

^۱ Normalized Difference Vegetation Index

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 های اندازه گیری سه سال بعدی (۱۴۰۰-۱۴۰۲)، 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 دو سال باقی مانده صورت پذیرفت. جدول ۱ گروه داده های در نظر گرفته شده برای ساخت و اعتبارسنجی مدل ها را نشان می دهد.

جدول ۱. رویکرد اعتبارسنجی متقاطع به منظور تفکیک داده ها

گروه	داده های آموزش	داده های اعتبارسنجی
اول (M ₁)	۱۴۰۱ و ۱۴۰۰	۱۴۰۲
دوم (M ₂)	۱۴۰۲ و ۱۴۰۰	۱۴۰۱
سوم (M ₃)	۱۴۰۲ و ۱۴۰۱	۱۴۰۰

۲-۲-۲. مدل سازی مکانی

در این پژوهش، دو مدل مختلف یادگیری ماشینی شامل: جنگل تصادفی^۱ (RF) و ماشین بردار پشتیبان^۲ (SVM) در نظر گرفته شد که در ادامه چگونگی بکارگیری این مدل ها به منظور پیش بینی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی به صورت مختصر، ارائه شده است:

۲-۲-۳. مدل جنگل تصادفی

این مدل، یکی از روش های مدل سازی درخت تصمیم است (بريمن^۳، ۲۰۰۱). در مسائل مربوط به رگرسیون، مدل جنگل تصادفی، تعداد اختیاری از درختان (زیرمجموعه ای از متغیرهای مستقل) است که نتایج واکنش این درختان به صورت ترکیبی به منظور تخمین صحیح متغیرهای وابسته مورد استفاده قرار می گیرد. نمونه گیری تصادفی از اطلاعات و متغیرها، به صورت خودکار و تکرارشونده جهت تولید انبوهی از درختان رگرسیونی انجام می شود. برای تعیین تعداد بهینه درختان، ابتدا یک تعداد درخت اولیه جهت تولید گراف تغییرات میانگین مربعات خطا در مقابل تعداد خاص درختان نمونه آموزشی و ارزیابی است، مورد استفاده قرار می گیرد. این یک ابزار تحلیلی بسیار قدرتمند به منظور جستجوی اطلاعات و اصلاح تعداد بهینه درختان در مدل جنگل تصادفی است. تعداد درختان بهینه به گونه ای انتخاب می شود که نخست کم ترین مقدار میانگین مربعات خطا در مدل سازی به دست آید و همچنین تعداد درختان نباید آن قدر زیاد شود که تجزیه و تحلیل متغیرها نیازمند زمان و محاسبات کامپیوتری زیادی باشد. کلیه فرآیند اجرای مدل جنگل تصادفی برای برآورد فرسایش خندقی در محیط نرم افزار متن باز و آماری R و بسته Random Forest استفاده شد. مدل جنگل تصادفی این قابلیت را دارد که میزان خطای به وجود آمده در بهم پیوستن اطلاعات درختان ایجاد شده را برحسب شاخص OOB^۴ نشان دهد که براساس آن می توان تعداد درختان ساخته شده برای آنالیز داده های وارد شده به نرم افزار را بهینه سازی کرد. در این پژوهش، داده های اندازه گیری شده میزان هدررفت خاک خندق ها، به عنوان متغیر وابسته و همچنین اطلاعات مربوط به عوامل محیطی (فاکتورهای پیش بینی کننده) به عنوان متغیر مستقل، به مدل جنگل تصادفی معرفی شدند. سپس این مدل، میزان هدررفت خاک ناشی از هر خندق را برآورد کرد (سلیمان پور و همکاران، ۱۴۰۳).

۲-۲-۴. مدل ماشین بردار پشتیبان

این مدل، یکی از مدل های ماشینی یادگیری نظارت شده است که به منظور طبقه بندی تفکیک گروه ها به کار می رود. به منظور بکارگیری این مدل در مدل سازی هدررفت خاک ناشی از خندق ها، ابتدا تمام لایه های رقومی عوامل تأثیرگذار بر وقوع و رشد خندق که به عنوان

¹ Random Forest

² Support Vector Machine

³ Breiman

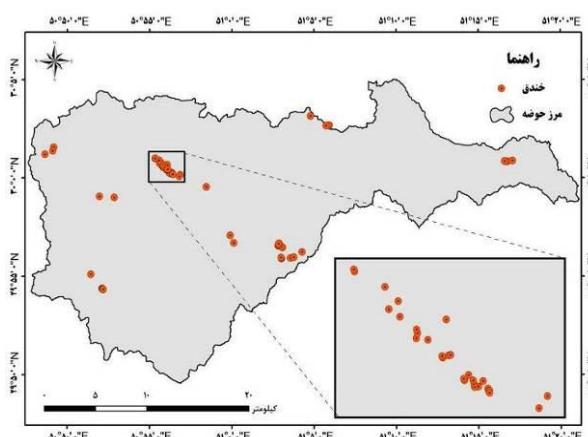
⁴ Out- Of- Bag

متغیرهای مستقل در مدل سازی انتخاب شده‌اند، به ساختار رستری (با اندازه پیکسل برابر) تبدیل شدند. سپس اطلاعات مکانی هدررفت خاک خندق‌های گروه آموزش (واسنجی) که در حقیقت به عنوان متغیر وابسته این پژوهش مدنظر قرار داشتند، نیز به صورت ساختار رستری در محیط GIS تهیه شد. سپس برای اجرای مدل ماشین بردار پشتیبان، تمام لایه‌های رستری ساخته شده وارد نرم افزار Matlab شد. پس از انجام بررسی‌های اولیه، اطلاعات متغیرهای مستقل و متغیر وابسته، مدل ماشین بردار پشتیبان برنامه نویسی شد و در محیط نرم افزار R اجرا گردید. مدل ماشین بردار پشتیبان دارای چهار نوع تابع کرنال مختلف، خطی^۱، چندجمله‌ای^۲، تابع پایه شعاعی^۳ (RBF) و هلالی^۴ می‌باشد که در این پژوهش، رایج‌ترین کرنال مدل ماشین بردار پشتیبان، یعنی تابع پایه‌ای شعاعی، استفاده شد.

در ادامه، میزان دقت مدل برای پیش‌بینی براساس داده‌های گروه اعتبارسنجی (۳۰ درصد داده‌ها) مورد بررسی قرار گرفت که با عنوان صحت‌سنجی یا اعتبارسنجی مطرح می‌شود. از آنجایی که خندق‌های گروه اعتبارسنجی در آموزش مدل‌ها استفاده نشد؛ تعیین دقت پیش‌بینی مدل‌ها براساس آن‌ها، یک معیار مهم در ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌ها بود. در نهایت، پس از تعیین دقت مدل‌های مختلف، شرایط برای مقایسه کمی مدل‌ها و تعیین مدل برتر برای پیش‌بینی هدررفت خاک فراهم شد. دقت مدل‌ها در این مرحله نیز با استفاده از معیارهای کمی خطای جذر میانگین مربعات^۵ (RMSE)، ضریب تعیین^۶ (R^2)، شاخص خطای RSR (نسبت RMSE به انحراف معیار داده‌های مشاهداتی) و شاخص تطابق^۷ (d) مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر کمتر خطای جذر میانگین مربعات، نشان از عملکرد بهتر مدل بوده و مقادیر بیشتر شاخص‌های تبیین، خطای RSR و تطابق، به منزله عملکرد بهتر مدل است.

۳. نتایج

نقشه موقعیت مکانی خندق‌ها در حوزه آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس در شکل ۷ ارائه شده است. در این حوضه، براساس بازدیدهای متعدد میدانی و تطبیق با تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث، ۷۰ خندق شناسایی شدند که مبنای اندازه‌گیری‌ها شد.



شکل ۷. نقشه موقعیت مکانی خندق‌های موجود در حوزه آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس

نقشه عوامل محیطی، به عنوان متغیرهای مستقل (پیش‌بینی‌کننده) در شکل ۸ ارائه شده است. با توجه به این شکل، طبق نقشه ارتفاع که با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی^۸ (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر تهیه شد تغییرات ارتفاعی در حوزه آبخیز ماهورمیلاتی استان

¹ Linear

² Polynomial

³ Radial basis function

⁴ Sigmoid

⁵ Root Mean Square Error

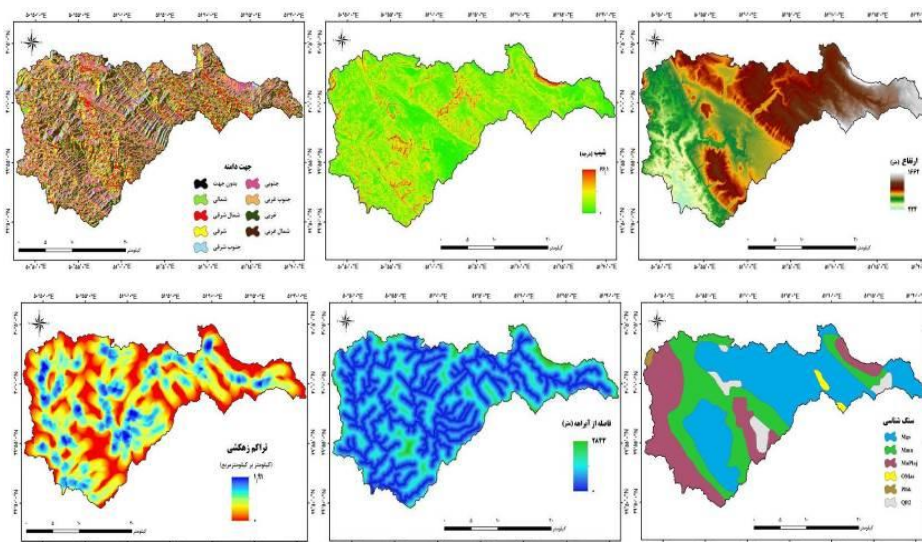
⁶ coefficient of determination

⁷ Compliance index

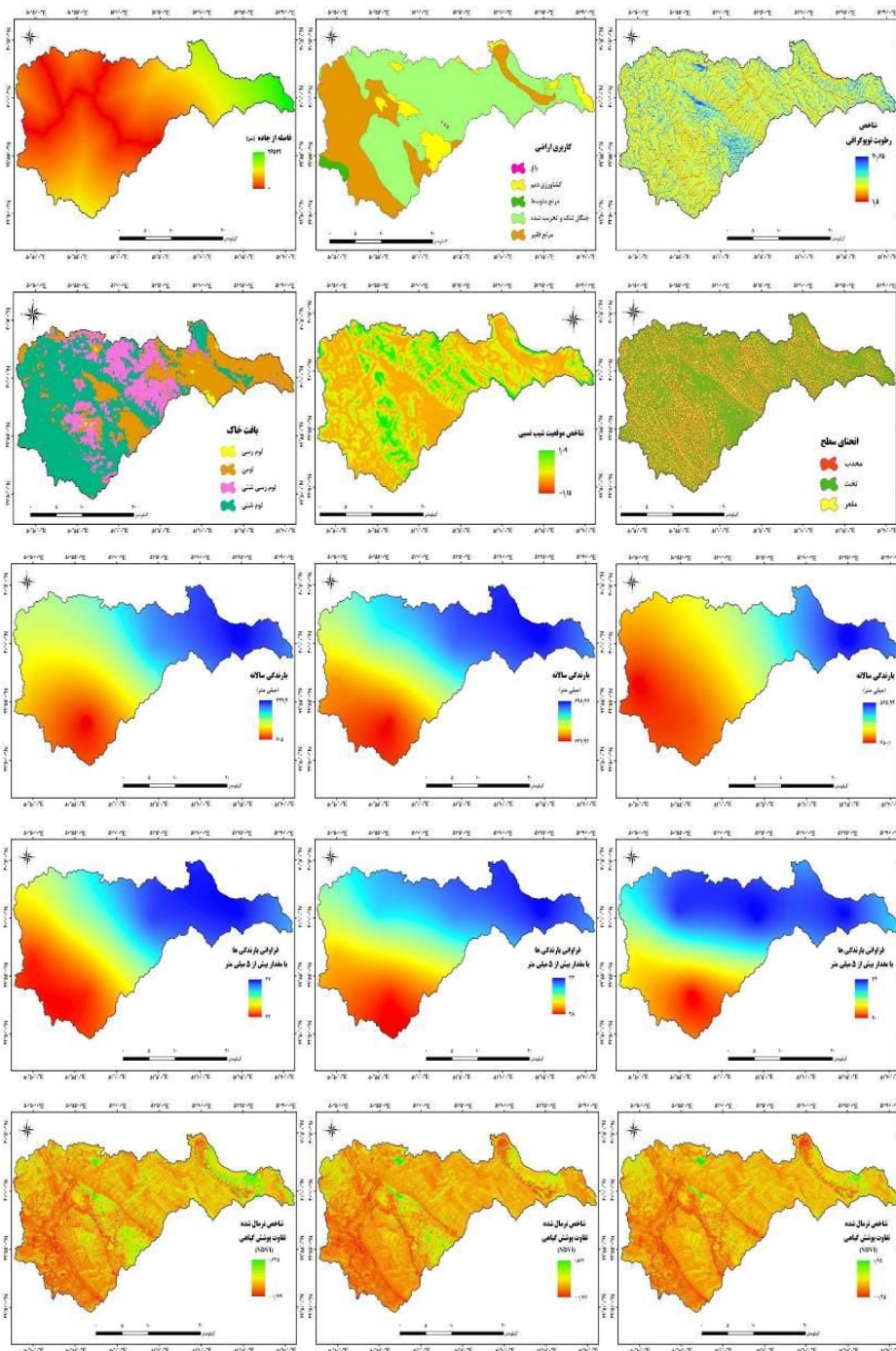
⁸ Digital Elevation Model

فارس نسبتاً زیاد بوده و از ۲۲۴ متر در قسمت جنوب غربی تا ۱۶۶۲ در قسمت شمالی متغیر است. همچنین ناهمواری‌های پراکنده‌ای نیز در قسمت‌های مرکزی و جنوبی دیده می‌شود. در نقشه درجه شیب، نیز کمترین شیب صفر درجه و در قسمت اعظم حوضه قابل مشاهده است در حالی که بیشترین شیب ۶۶/۱ درجه بوده و در قسمت‌های شمال شرقی، مرکزی و غربی قرار گرفته است. در نقشه جهت دامنه، تنوع و تغییرات مکانی زیادی در پراکنش دامنه‌های مختلف در سطح این آبخیز ملاحظه می‌شود. کلاس‌های جنوب غربی (۱۶/۳۵ درصد)، غربی (۱۴/۱ درصد) و جنوبی (۱۴ درصد)، بیشترین سطح را به خود اختصاص داده‌اند. نقشه سنگ‌شناسی نشان داد واحدهای mgs (مارن قرمز و خاکستری همراه با رگه‌های نمک و متناوب با سنگ آهک و انیدریت)، Mmn (مارن خاکستری کم هوازده متناوب با سنگ آهک و شیل) و MuPlaj (ماسه سنگ آهک‌دار قهوه‌ای و خاکستری، رگه‌های گچ، مارن‌های قرمز و سیلتستون)، OMas (آهک دارای شیل)، Plbk (کنگلوмера ضخیم و سخت همراه با ماسه سنگ کم هوازده) و Qft2 (رسوبات آبراهه‌ای و مخروط افکنه‌ای) سنگ‌شناسی این آبخیز را تشکیل داده‌اند. بنابراین این حوزه آبخیز، تنوع سنگ‌شناسی نسبتاً زیادی دارد که هر واحد گاهاً در چند قسمت از منطقه قابل مشاهده است. واحد سنگ‌شناسی Mgs، از سازند گچساران ۴۵/۸ درصد این آبخیز را به خود اختصاص داده است و واحدهای Mmn از سازند میشان و MuPlaj از سازند آغاچاری به ترتیب با ۲۵/۴۵ و ۲۳/۴ درصد، در رتبه‌های بعدی قرار دارند. در نقشه فاصله از آبراهه، فاصله پیکسل‌ها از نزدیک‌ترین آبراهه از صفر تا ۲۸۴۳ متر متغیر است؛ اما قسمت‌های نزدیک خروجی، دارای شبکه زهکشی متراکم‌تر بوده و فاصله پیکسل‌ها تا آبراهه‌ها (نسبت به بخش‌های بالادست) کمتر است. نقشه تراکم زهکشی نشان داد الگوی شبکه زهکشی این آبخیز به گونه‌ای است که در برخی از قسمت‌ها تراکم بالاتری وجود دارد. مقدار تراکم زهکشی در بخش‌های مختلف، از صفر تا ۱/۹۱ کیلومتر بر کیلومتر مربع متغیر است. مقادیر بالای تراکم زهکشی در بخش‌های مرکزی، غربی و شمال شرقی مشاهده می‌شود. در نقشه شاخص رطوبت توپوگرافی، بخش‌های مرکزی و شمالی، دارای بیشترین مقدار رطوبت توپوگرافی هستند. مقدار شاخص رطوبت توپوگرافی از ۱/۵ تا ۲۰/۶۵ متغیر است که نشان‌دهنده آن است که با توجه به ناهمواری نسبتاً زیاد این آبخیز، مقادیر شاخص رطوبت توپوگرافی مختلفی در هر بخش، قابل مشاهده است. طبق نقشه کاربری اراضی، بیشترین مساحت را جنگل‌های تنک و تخریب شده و مراتع فقیر به خود اختصاص داده که شرایط را برای وقوع انواع فرسایش‌ها مساعد کرده است. با توجه به نقشه فاصله از جاده، میزان فاصله از جاده در این آبخیز، بین صفر تا ۲۶۵۷۹ متر به دست آمد. بخش‌های شرقی، فاقد جاده اصلی هستند و فقط جاده‌های خاکی به صورت محدود، مشاهده می‌شود. طبق نقشه انحنای سطح، تغییرات مکانی قابل توجهی از نظر وضعیت انحنای سطح در این آبخیز وجود دارد. این آبخیز، به سه کلاس محدب، تخت و مقعر تقسیم‌بندی شده است. کلاس تخت، غالباً در بخش مرکزی و غربی ملاحظه می‌شود در حالی که دامنه‌های مقعر و محدب، به ترتیب در قسمت‌های جنوب غربی و شمال شرقی قرار گرفته‌اند. کلاس مسطح، با دارا بودن ۴۴ درصد از مساحت، در رتبه نخست از نظر گسترش مکانی قرار گرفته است. کلاس‌های مقعر و محدب نیز به ترتیب با مساحت‌های ۳۰ و ۲۶ درصد، در جایگاه‌های دوم و سوم قرار داشتند. طبق نقشه شاخص موقعیت شیب نسبی، تغییرات مکانی وضعیت موقعیت شیب نسبی، متغیر است؛ به گونه‌ای که قله‌ها در قسمت‌های میانی، کلاس‌های شیب فوقانی، شیب میانی و شیب تحتانی در بخش‌های میانی، شرقی و غربی قرار دارند. کلاس‌های پای شیب، در بخش‌های مجاور شبکه زهکشی و قسمت‌های دشتی و میانه این آبخیز مشاهده می‌شوند. با توجه به نقشه بافت خاک، چهار نوع کلاس بافت خاک در این آبخیز ثبت شد. بافت لوم‌شنی، ۵۰/۱۴ درصد از سطح این آبخیز را شامل می‌شود و به عنوان بافت غالب، معرفی می‌شود. پس از آن، بافت لومی با ۲۷/۵۲ درصد و بافت لوم‌رسی‌شنی با ۲۱/۳۶ درصد در رتبه‌های دوم و سوم قرار دارند و بافت لوم‌رسی، کمتر از یک درصد مساحت این آبخیز را در بر گرفته است. نقشه توزیع مکانی مقدار بارندگی سالانه در حوزه آبخیز ماهورمیلانی استان فارس در سال ۱۴۰۰ دارای تغییرات مکانی بوده؛ به گونه‌ای که کمترین مقدار بارندگی ۴۵۰/۱ میلی‌متر و بیشترین مقدار آن ۵۶۵/۹۹ میلی‌متر ثبت شده است. مقادیر کمتر بارندگی در نواحی جنوب و جنوب غربی و مقادیر بیشتر در نواحی شرق و شمال شرقی اتفاق افتاده است. توزیع مکانی مقدار بارندگی در سال ۱۴۰۱ نیز دارای تغییرات مکانی بوده؛ به گونه‌ای که مقدار بارندگی در این آبخیز بین ۶۲۷/۹۲ میلی‌متر تا ۶۹۸/۷۷ میلی‌متر متغیر بوده است. مقادیر کمتر بارندگی در نواحی جنوب و جنوب غربی و مقادیر بیشتر در نواحی شمال و شمال شرقی اتفاق افتاده است. همچنین توزیع مکانی مقدار بارندگی سالانه در

سال ۱۴۰۲ نیز نشان داد مقدار بارندگی در این حوزه آبخیز دارای تغییرات مکانی بوده؛ به گونه‌ای که کمترین مقدار بارندگی ۷۰۵ میلی‌متر و بیشترین مقدار آن ۷۴۹/۹ میلی‌متر بوده است. به‌طوری‌که کمترین مقدار بارندگی در سال ۱۴۰۲ در قسمت جنوبی و بیشترین مقدار آن در قسمت شمال شرقی و شمال این حوزه آبخیز ثبت شده است. نقشه فراوانی بارندگی‌های با مقدار بیشتر از ۵ میلی‌متر در سال ۱۴۰۰ نیز نشان داد بخش جنوبی این آبخیز با ۲۰ رخداده بارندگی بیشتر از ۵ میلی‌متر، کمترین فراوانی را به‌خود اختصاص داده است. از سویی دیگر، در بخش‌های شمالی این آبخیز مشاهده می‌شود که ۲۳ رخداده بارندگی با مقدار بیشتر از ۵ میلی‌متر در سال ۱۴۰۰ ثبت شده است. دیگر قسمت‌های این آبخیز مقادیر فراوانی حد واسط ۲۱ تا ۲۲ رخداده را تجربه کرده‌اند. براساس داده‌های ثبت شده می‌توان بیان داشت که تعداد رخدادهای نزدیک به هم بوده‌اند و بخش‌های جنوبی و مرکزی، بارش‌های سنگین کمتری را تجربه کرده‌اند. همچنین نقشه فراوانی بارندگی‌های با مقدار بیشتر از ۵ میلی‌متر در سال ۱۴۰۱ نیز نشان داد کمترین فراوانی رخدادهای این نوع بارندگی‌ها در قسمت جنوبی این آبخیز با ۲۸ رخداده، و بیشترین فراوانی آن در بخش‌های شمالی و شمال شرقی با ۳۲ رخداده ثبت شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، در این حوزه آبخیز، فراوانی رخدادهای بارش‌های با مقدار بیشتر از ۵ میلی‌متر در سال ۱۴۰۱ نسبت به سال ۱۴۰۰ افزایش یافته است. نقشه فراوانی بارندگی‌های با مقدار بیشتر از ۵ میلی‌متر در سال ۱۴۰۲ نیز نشان داد کمترین و بیشترین فراوانی بارش‌های با مقدار بیش از ۵ میلی‌متر بارندگی، به‌ترتیب ۲۴ و ۲۷ رخداده گزارش شده است. در سال ۱۴۰۲، کمترین فراوانی این نوع بارش‌ها در قسمت جنوب غربی و بیشترین فراوانی در قسمت شمالی این آبخیز رخ داده است. نتایج مستخرج از نقشه شاخص تفاضلی پوشش گیاهی نرمال شده در سال ۱۴۰۰ نشان داد مقدار این شاخص در سال ۱۴۰۰ از ۰/۲۷- تا ۰/۶۵+ متغیر است. مقدار میانه این شاخص ۰/۱۳۷ و مقدار انحراف معیار آن ۰/۰۵۲ به‌دست آمده است. به‌سبب شرایط محیطی (از جمله خاک‌شناسی و هواشناسی)، پوشش گیاهی ضعیفی در اکثر قسمت‌های این آبخیز، به‌ویژه نواحی جنوبی و جنوب غربی، مشاهده می‌شود. این مقدار در سال ۱۴۰۱ بین ۰/۱۸۱- و ۰/۵۶۱+ متغیر است؛ به گونه‌ای که کمترین مقادیر در جنوب و جنوب غربی این آبخیز مشاهده می‌شود. مقادیر میانه و انحراف معیار نمودار توزیع فراوانی به‌ترتیب ۰/۱۱۷ و ۰/۰۴۷ به‌دست آمد. همچنین مقدار این شاخص در سال ۱۴۰۲ از ۰/۱۷۹- تا ۰/۶۳۵+ متغیر بوده؛ به گونه‌ای که کمترین مقادیر در جنوب و جنوب غرب و بیشترین مقادیر در شمال شرق این آبخیز ثبت شده است. مقادیر میانه و انحراف معیار نمودار توزیع فراوانی، به‌ترتیب ۰/۱۹ و ۰/۰۸ بوده است.



شکل ۸. نقشه‌های عوامل محیطی مؤثر بر هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی در حوزه آبخیز ماهورمیلانی استان فارس (از راست به چپ: نقشه ارتفاع، درجه شیب، جهت شیب، 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 نرمال شده پوشش گیاهی در سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲)



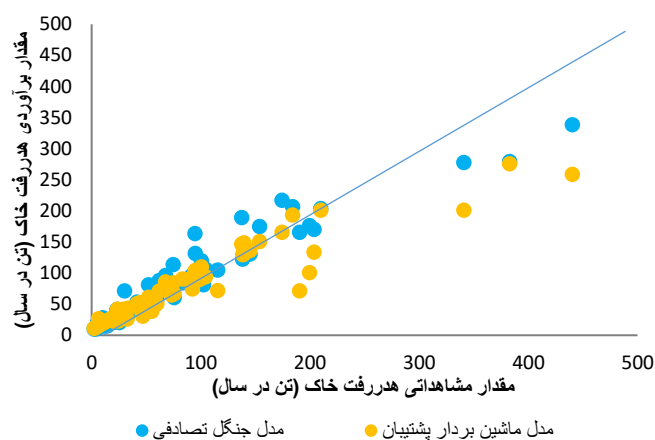
ادامه شکل ۸.

نتایج میزان هدررفت خاک سالانه خندق های واقع در حوزه آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس، در بازه زمانی سال ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲، در جدول ۲ ارائه شده است. براساس این نتایج، میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی در این حوزه آبخیز در طی دوره مورد مطالعه ۱۵۳۰۰/۹۴ تن بوده است.

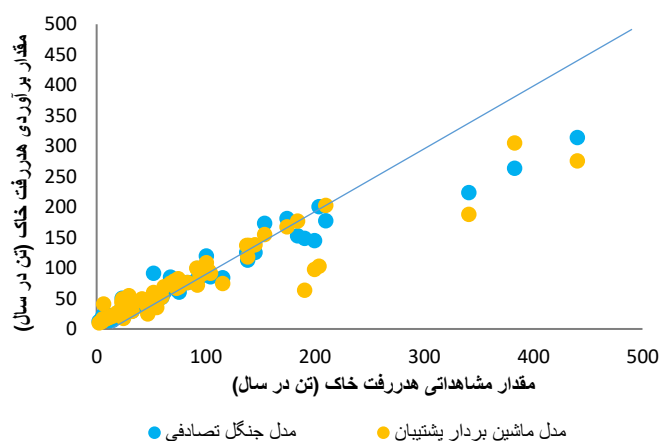
جدول ۲. میزان هدررفت خاک خندق‌های واقع در حوزه آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس

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

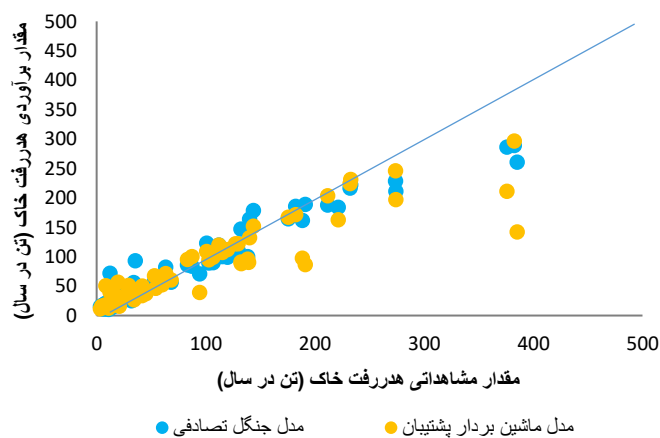
نمودارهای پراکنش داده‌های مشاهداتی و برآوردی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی در مرحله آموزش و با رویکردهای تقسیم داده اول (M_1) دوم (M_2) و سوم (M_3) در حوزه آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس انجام گرفت که نتایج آن در شکل‌های ۹ تا ۱۱ ارائه شده است.



شکل ۹. نمودار مقادیر مشاهداتی و پیش بینی هدررفت خاک در مرحله آموزش با رویکرد تقسیم داده M_1 در حوزه آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس



شکل ۱۰. نمودار مقادیر مشاهداتی و پیش بینی هدررفت خاک در مرحله آموزش با رویکرد تقسیم داده M_2 در حوزه آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس



شکل ۱۱. نمودار مقادیر مشاهداتی و پیش بینی هدررفت خاک در مرحله آموزش با رویکرد تقسیم داده M_3 در حوزه آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس

نتایج ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌های جنگل تصادفی و ماشین‌بردار پشتیبان، در رویکردهای مختلف در مرحله آموزش (واسنجی) در جدول ۳ ارائه شده است. در این خصوص، بیان این نکته ضروری است که دقت مدل‌ها در این مرحله، صرفاً برای اطمینان از برازش داده‌ها و آموزش‌دیدن مدل‌ها مورد بررسی قرار گرفته 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 این که داده‌های گروه آموزش در اختیار مدل قرار می‌گیرد، عملکرد مدل‌ها براساس دقت مدل در مرحله آموزش قابل قضاوت نیست. اما براساس نتایج به‌دست آمده، هر دو 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 فرسایش خندقی بپردازند.

جدول ۳. ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌ها در مرحله آموزش در حوزه آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس

معیار ارزیابی	رویکرد تقسیم داده	جنگل تصادفی	ماشین‌بردار پشتیبان
RMSE	M ₁	۲۶/۰۷	۴۱/۳۱
	M ₂	۲۴/۷۸	۳۴/۱۳
	M ₃	۲۴/۶۲	۳۷/۳۷
R ²	M ₁	۰/۹۳	۰/۸۵
	M ₂	۰/۹۰	۰/۸۴
	M ₃	۰/۹۳	۰/۸۳
RSR	M ₁	۰/۲۹	۰/۴۶
	M ₂	۰/۳۴	۰/۴۶
	M ₃	۰/۳۱	۰/۴۷
d	M ₁	۰/۹۸	۰/۹۳
	M ₂	۰/۹۶	۰/۹۲
	M ₃	۰/۹۷	۰/۹۲

ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌ها تنها براساس 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. نتایج ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌ها در حوزه آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس برای رویکردهای مختلف تقسیم داده در مرحله اعتبارسنجی (صحت‌سنجی) و براساس معیارهای ارزیابی مختلف در جدول ۴ ارائه شده است. از نظر معیار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، مدل ماشین‌بردار پشتیبان، خطای کمتری در مقایسه با مدل جنگل تصادفی داشته و مدل جنگل تصادفی در جایگاه دوم قرار گرفته است. مدل جنگل تصادفی براساس معیار ارزیابی ضریب تبیین ($R^2=0.66/73$) بهترین عملکرد را نشان داده و پس از آن مدل ماشین‌بردار پشتیبان ($R^2=0.41-0.59$) در جایگاه دوم قرار گرفت. نکته قابل توجه آن بود که براساس نتایج اعتبارسنجی، حتی کمترین دقت پیش‌بینی مدل جنگل تصادفی در رویکردهای مختلف تقسیم داده، از بالاترین دقت پیش‌بینی مدل ماشین‌بردار پشتیبان نیز بیشتر بوده است. از نظر معیار ارزیابی شاخص خطای RSR، مدل جنگل تصادفی دارای کمترین مقدار این شاخص بوده و بالاترین دقت را به‌خود اختصاص داد و مدل ماشین‌بردار پشتیبان در جایگاه دوم قرار گرفت. از نظر شاخص ارزیابی تطابق (d)، مدل جنگل تصادفی دارای بیشترین تطابق، میان داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی بوده و بیشترین مقدار این شاخص را به‌خود اختصاص داد که به این منظور در جایگاه اول عملکردی را به‌خود اختصاص داد و مدل ماشین‌بردار پشتیبان با مقدار شاخص تطابق ۰/۸۱، 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 ماشین‌بردار پشتیبان از عملکرد بهتری برخوردار بود؛ به‌عنوان مدل برتر برای پیش‌بینی میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی در حوزه آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس معرفی می‌شود.

جدول ۴. ارزیابی دقت پیش بینی مدل ها در مرحله اعتبارسنجی در حوزه آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس

معیار ارزیابی	رویکرد تقسیم داده	جنگل تصادفی	ماشین بردار پشتیبان
RMSE	M ₁	۵۶/۹۲	۴۶/۷۰
	M ₂	۶۲/۱۸	۸۸/۸۶
	M ₃	۵۶/۹۷	۸۷/۳۵
R ²	M ₁	۰/۷۳	۰/۵۹
	M ₂	۰/۶۶	۰/۵۵
	M ₃	۰/۶۹	۰/۴۱
RSR	M ₁	۱/۰۳	۰/۸۴
	M ₂	۰/۶۵	۰/۹۳
	M ₃	۰/۶۶	۱/۰۱
d	M ₁	۰/۸۲	۰/۸۱
	M ₂	۰/۸۳	۰/۵۸
	M ₃	۰/۸۱	۰/۳۴

۴. نتیجه گیری

حوزه آبخیز ماهورمیلاتی، از معروف ترین مناطق مستعد شکل گیری و رشد فرسایش خندقی در استان فارس می باشد. به طوری که براساس پایش های سالانه انجام شده در این پژوهش، تغییرات ابعاد هندسی خندق ها در این حوزه آبخیز مشهود بود. افزایش ابعاد هندسی خندق ها، نشان دهنده رشد فرسایش خندقی است و یک متغیر بسیار پیچیده می باشد که عوامل مختلفی در آن نقش ایفا می کنند. علاوه بر خصوصیات محیطی، توپوگرافی، خاک شناسی، سنگ شناسی، پوشش گیاهی، بارندگی و غیره، درجه بلوغ و تکامل فرسایش خندقی نیز یکی از عوامل مؤثر در پیش روی و میزان هدررفت خاک است. به عبارت دیگر، درجه بلوغ و تکامل، یک ویژگی ذاتی مربوط به خندق بوده که حساسیت و پتانسیل رشد یک خندق را تحت تأثیر قرار می دهد. خندق های موجود در این حوزه آبخیز، عموماً خندق های بالغ و تکامل یافته بودند که میزان هدررفت خاک ناشی از آن ها بسیار زیاد است. عمده این خندق ها طول زیادی داشتند و با در نظر گرفتن عمق و عرض آن ها، تغییرات کوچک در ابعاد آن ها موجب هدررفت بسیار زیاد خاک شده است. به طوری که در مجموع، در طی دوره مورد مطالعه، مقدار ۱۵۳۰۰/۹۴ تن هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی بوده است. این مقدار نشان داد که وضعیت هدررفت منابع خاک در این حوزه آبخیز، بسیار بحرانی است و مهار آن، نیازمند یک برنامه علمی - عملیاتی است.

مدل های یادگیری ماشینی مختلف، براساس ساختار و رویکرد مدل سازی، دارای قابلیت های متفاوتی هستند. تعیین عملکرد این مدل ها برای هر یک از پدیده های محیطی نیازمند مطالعه و پژوهش است. به این سبب، در این پژوهش، از دو مدل جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان که از معروف ترین و کارآمدترین مدل های هوش مصنوعی نیز هستند برای مدل سازی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی استفاده شد. مدل های یادگیری ماشینی، به منظور مدل سازی استعداد شکل گیری فرسایش خندقی در گذشته مورد استفاده قرار گرفته بودند (رحمتی^۱ و همکاران، ۲۰۱۷)؛ اما کارایی آن ها در زمینه مدل سازی هدررفت خاک و به عبارتی، رشد فرسایش خندقی، که ماهیت زمانی - مکانی دارد، تاکنون مشخص نشده بود که در این پژوهش، به این مهم، پرداخته شد.

نتایج مدل سازی میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی در حوزه آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس نشان داد که مدل جنگل تصادفی، عملکرد بهتری از مدل ماشین بردار پشتیبان داشته است. با توجه به این که مدل سازی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی با استفاده از مدل های یادگیری ماشینی تا کنون انجام نشده است؛ امکان مقایسه مستقیم در این خصوص وجود نداشت. با این حال، در

¹ Rahmati

پژوهش‌های پیشین مانند: موسوی و همکاران (۲۰۲۲)، ابوتایب^۱ و همکاران (۲۰۲۳)، لیو^۲ و همکاران (۲۰۲۳)، ور^۳ و همکاران (۲۰۲۳) و فیلو^۴ و همکاران (۲۰۲۴)، عملکرد بهتر مدل جنگل تصادفی نسبت به سایر مدل‌ها در شناسایی مناطق مستعد فرسایش خندقی تأیید شده است. برتری مدل جنگل تصادفی نسبت به مدل ماشین‌بردار پشتیبان در مدل‌سازی و شبیه‌سازی را می‌توان به عوامل متعددی نسبت داد که در پژوهش‌ها و مقالات مختلف مورد بحث قرار گرفته‌اند. به‌عنوان مثال، به‌گفته جنیر^۵ و همکاران (۲۰۱۰)، مدل جنگل تصادفی به دلیل توانایی در مدیریت داده‌ها با ابعاد بالا و مقاومت در برابر بیش‌برازش، عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. علاوه بر آن، این مدل می‌تواند به‌طور مؤثری روابط غیرخطی بین متغیرها را مدیریت کنند. از سوی دیگر، مدل ماشین‌بردار پشتیبان، با داده‌های با ابعاد زیاد مشکل دارند و همچنین ممکن است دچار برازش بیش از حد شوند. اما مدل جنگل تصادفی، رویکرد کارآمدتر و مؤثرتری برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی ارائه می‌کند؛ زیرا می‌تواند روابط پیچیده را مدیریت کند و بیش‌برازش را کاهش دهد و در سناریوهای مختلف، عملکرد خوبی داشته باشد.

باید توجه داشت هنگامی که عملکرد یک مدل برای شبیه‌سازی یک پدیده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، موارد متعددی در این موضوع دخیل هستند که توجه به آن‌ها الزامی است. با توجه به این که در این پژوهش، از ۱۵ متغیر محیطی برای پیش‌بینی هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی استفاده شد؛ این موارد نیز توانستند اطلاعات بسیار مهمی از نظر تغییرات مکانی و زمانی و خصوصیات آبخیز، برای مدل فراهم کنند. از سوی دیگر، متغیر وابسته مدل‌سازی، محدود به سه سال ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲ بود که داده‌های دو سال آن برای آموزش (واسنجی) مدل و داده‌های یک سال آن برای اعتبارسنجی (صحت‌سنجی) مورد استفاده قرار گرفت. همچنین بیان این نکته ضروری است که با توجه به کوتاه بودن دوره پایش، و کفایت حداقل داده‌ها، مدل جنگل تصادفی توانسته عملکرد مناسبی برای پیش‌بینی 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 داده‌های مکانی-زمانی و پیش‌بینی میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی است. در صورتی که فراوانی داده مربوط به سال‌های پایش طولانی‌تر باشد، امکان تغییر جایگاه مدل‌ها از نظر کارایی وجود دارد که قضاوت در چنین شرایطی نیازمند بررسی و مطالعه جدید خواهد بود.

دلایلی مختلفی برای عملکرد مناسب مدل جنگل تصادفی در این پژوهش وجود دارد. به‌عنوان مثال: استفاده از ساختار درخت‌های تصمیم‌گیری بسیار زیاد، و تصمیم‌گیری براساس میانگین درخت‌های تجزیه و تحلیل داده‌ها، موجب شده تا امکان خطای مدل کاهش یابد. بنابراین ساختار مدل جنگل تصادفی از نگاهی دیگر موجب شده که مدل تحت تأثیر داده‌های پرت^۶ (ناسازگار) قرار نگیرد. از آنجایی که میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی بسته به درجه بلوغ خندق و شرایط محیطی، دامنه وسیعی را در بر گرفته است، امکان این که 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. به این سبب، مدل جنگل تصادفی به‌دلیل بهره‌گیری از ساختار درختان تصمیم بسیار زیاد، به‌خوبی توانسته است که این مسأله مهم را دریابد و پیش‌بینی‌ها 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 فرآیند حذف آن‌ها از مجموعه داده‌ها وجود ندارد.

همچنین به‌عنوان یکی دیگر از مزیت‌ها و توانمندی‌های مدل جنگل تصادفی، بیان این نکته ضروری است که این مدل قابلیت پردازش داده‌های مربوط به پدیده‌هایی با ماهیت غیرخطی را نیز دارد و به‌دلیل 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 نموده و به پیش‌بینی آن براساس شرایط جدید بپردازد. اگر چه اکثر 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 اهمیت کمتر

¹ Aboutaib² Liu³ Were⁴ Filho⁵ Genuer⁶ Noisy data

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، باید به این نکته اشاره کرد که امکان بکارگیری هر دو نوع داده کیفی (اسمی و رتبه‌ای) و کمی در مدل‌سازی رشد فرسایش خندقی، از دیگر 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.

از مزیت‌های مهم این پژوهش آن است که در نظر گرفتن فاکتورهایی که در "زمان"، تغییرپذیر می‌باشند 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 می‌باشد 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، مدل‌های آموزش دیده شده، در سال‌های آینده می‌توانند براساس یادگیری‌های کسب شده 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.

براساس یافته‌های این پژوهش، پیشنهادهای اجرایی و پژوهشی زیر، ارائه می‌شود:

- میزان رشد خندق‌ها در حوزه آبخیز مورد مطالعه زیاد بوده و در صورت عدم توجه به مهار آن‌ها، دائماً ابعاد خندق‌ها رشد بیشتری خواهند داشت و منابع ارزشمند خاک و اراضی بالادست و همچنین حاشیه خندق‌ها از بین می‌رود. از سویی دیگر، میزان رسوب بسیار زیاد ناشی از فرسایش خندقی به خروجی این آبخیز منتقل شده و باعث خسارت‌های زیادی خواهد شد. به این منظور، پیشنهاد می‌شود که دستگاه‌های اجرایی مربوطه با استفاده از روش‌های مبتنی بر طبیعت، و با کمک روش‌های مهندسی نرم، شامل: استقرار پوشش گیاهی بومی و سازگار (به‌عنوان یکی از روش‌های بسیار مؤثر و کم‌هزینه در حفاظت خاک)، افزایش ماده آلی خاک، اصلاح خاک‌های شور و سدیمی با کاربرد اصلاح‌کننده‌ها و همچنین در صورت لزوم، انحراف رواناب‌ها از پیشانی خندق‌ها با استفاده از عملیات سازه‌ای، نسبت به مهار میزان پیشروی و رشد خندق‌ها اقدام کنند.

- یکی از محدودیت‌های موجود در این پژوهش که در دیگر پژوهشگران در کشورهای مختلف نیز عموماً با آن مواجه هستند، نبود ایستگاه‌های باران‌نگار در بخش‌های مختلف حوزه‌های آبخیز و عدم دسترسی به اطلاعات شدت بارندگی است. از سویی دیگر، با توجه به پراکنش مکانی خندق‌ها در یک حوزه آبخیز وسیع، امکان تعمیم داده‌های شدت بارندگی از یک ایستگاه به بخش‌های مختلف آن آبخیز وجود ندارد و استفاده از این اطلاعات کمک شایانی به مدل‌سازی نمی‌کند. به این منظور، پیشنهاد می‌شود در شروع پژوهش‌هایی با محتوای "مدل‌سازی"، چند ایستگاه باران‌نگار در بخش‌های مختلف حوزه(های) آبخیز مورد نظر نصب شود تا اطلاعات دقیقی از خصوصیات بارندگی ثبت شود.

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 مدل"، با کد مصوب ۹۹۰۵۱۴-۹۹۰۰۲۴-۰۰۲۹-۵۰-۰ در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری می‌باشد. نویسندگان این اثر بر خود فرض می‌دانند سپاسگزاری خود را از حمایت‌های آن پژوهشکده و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، اعلام دارند.

References

- Aboutaib, F., Krimissa, S., Pradhan, B., Elaloui, A., Ismaili, M., Abdelrahman, K., Eloudi, H., Ouayah, M., Ourribane, M., & Namous, M. (2023). Evaluating the effectiveness and robustness of machine learning models with varied geo-environmental factors for determining vulnerability to water flow-induced gully erosion. *Sec. Environmental Informatics and Remote Sensing*, 11, 3389. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1207027>
- Arfouni, I., Algouti, A., Algouti, A.A., & Es-Sadiq, R. (2024). Analysis of Soil Water Erosion Risk Using Machine Learning Techniques – A Case Study of Ourika Watershed in Morocco. *Ecological Engineering & Environmental Technology (EEET)*, 25(10): 324-338. <https://doi.org/10.12912/27197050/191903>
- Bammou, Y., Benzougagh, B., Abdessalam, O., Brahim, I., Kader, Sh., Spalevic, V., Sestras, P., & Ercişli, S. (2024). Machine learning models for gully erosion susceptibility assessment in the Tensift catchment, Haouz Plain, Morocco for sustainable development. *Journal of African Earth Sciences*, 213, 105229. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2024.105229>
- Boali, A., Hosseinalizadeh, M., Kariminejad, N., Asgari, H.R., Behbahani, A.M., Naimi, B., Shafaie, V., & Movahedi Rad, M. (2025). Evaluation of early warning signals for soil erosion using remote sensing indices in northeastern Iran. *Scientific Reports*, 15, 9742. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94926-x>
- Breiman, L. (2001). *Random forests*. Machine Learning, 45(1), 5-32. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Casali, J., Loizu, J., Campo, MA., De Santisteban, LM., & Alvarez-Mozos, J. (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>
- Cardoso, D.P., Ossani, P.C., Cirillo, M.A., Silva, M.L.N., & Avanzi, J.C. (2024). Using Machine Learning to Propose a Qualitative Classification of Risk of Soil Erosion. *AgriEngineering*, 6(4), 4280-4293. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6040241>
- De Luna, E., Vanderlinden, K., De haro, J.M., Laguna, A., Poesen, J., & Giraldez, J.V. (2000). *Monitoring of long term gully head advance in south-east Spain using GIS*. International Symposium on Gully Erosion under Global Change, 53.
- Fars Province Meteorological Department website. (2024). *Reporting meteorological statistics of Fars Province cities* (<https://www.farsmet.ir/ReportAmar.aspx>)
- Filho, J.P.M., Guerra, A.J.T., Cruz, C.B.M., Jorge, M.C.O., & Booth, C.A. (2024). Machine Learning Models for the Spatial Prediction of Gully Erosion Susceptibility in the Pirai Drainage Basin, Paraíba Do Sul Middle Valley, Southeast Brazil. *Land*, 13(10), 1-21. <https://doi.org/10.3390/land13101665>
- Gelete, T.B., Pasala, P., Abay, N.G., Woldemariam, G.W., Yasin, K.H., Kebede, E., & Aliyi, I. (2024). Integrated machine learning and geospatial analysis enhanced gully erosion susceptibility modeling in the Erer watershed in Eastern Ethiopia. *Sec. Environmental Informatics and Remote Sensing*, 12, 1410741. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1410741>
- Genuer, R., Poggi, J.M., & Tuleau-Malot, C. (2010). Variable selection using random forests. *Pattern recognition letters*, 31(14), 2225-2236. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2010.03.014>
- Liu, G., Arabameri, A., Santosh, M., & Asadi Nalivan, O. (2023). Optimizing machine learning algorithms for spatial prediction of gully erosion susceptibility with four training scenarios. *Environ Sci Pollut Res*, 30(16), 46979-46996. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-25090-2>
- Mallick, J., Alqadhi, S., Talukdar, S., Sarif, M.N., Nasrin, T., & Abdo, H.Gh. (2025). Evaluating soil erosion zones in the Kangsabati River basin using a stacking framework and SHAP model: a comparative study of machine learning approaches. *Environmental Sciences Europe*, 37, 34. <https://doi.org/10.1186/s12302-025-01079-9>
- Mokarram, M., & Pourghasemi, H.R. (2024). Prediction of soil erosion using machine learning. Chapter 18. *Advanced Tools for Studying Soil Erosion Processes*, 307-322. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-22262-7.00030-8>
- Mousavi, S.R., Sarmadian, F., Omid, M., & Bogaert, P. (2022). Application of Machine Learning Models in Spatial Estimation of Soil Phosphorus and Potassium in Some Parts of Abyek Plain. *Journal of Soil Research*, 35(4): 397-411. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/IJSR.2022.355198.618>
- Nika, T. (2024). Empirical and Machine Learning Models for Soil Erosion Risk Assessment: A Case Study of Tsageri Municipality, Georgia. *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, 28(11): 148-162. <https://doi.org/10.9734/jgeesi/2024/v28i11843>
- Nur, I.S., Debabrata, S., Sunil, S., & Prolay, M. (2024). Application of Machine Learning Algorithms for Soil Erosion Susceptibility Estimation in Gumani River Basin, Eastern India. *Journal of the Geological Society of India*, 100(3): 320-334. <https://doi.org/10.17491/jgsi/2024/173839>

- Priyadharshini, V.M., Aldehim, Gh., Negm, N., & Subathradevi, S. (2025). Integrating geospatial techniques and machine learning for assessing soil erosion and associated geomorphic risks. *Journal of South American Earth Sciences*, 156(1), 105463. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105463>
- Rahimi, M., Amirdelavar, M., Jamshidi, M., & Sharififar, A. (2023). Modeling Spatial Distribution of Soil Classes Using Machine Learning Algorithms in Some Parts of Zanzan Provice. *Journal of Soil Research*, 37(2): 147-165. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/IJSR.2023.361649.698>
- 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>
- Soleimanpour, S.M. (2012). *Investigation and comparison of the thresholds controlling gully erosion in different climates of Fars province*. Ph.D. Thesis, Science and Watershed Engineering, Islamic Azad University, Tehran Science and Research Branch. Faculty of Agriculture and Natural Resources. 594 pp. (In Persian)
- Soleimanpour, S.M., Rahmati, O., Shadfar, S., & Enayati, M. (2025). Estimation of soil volume loss due to gully erosion using machine learning models and introduction of the most appropriate model (Case study: Fars province). Final report of the research project. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute. 75 pp. (In Persian)
- Soleimanpour, S.M., Soufi, M., Roustae, M.J., Shadfar, S., Jowkar, L., & Keshavarzi, H. (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. 59 pp. (In Persian)
- 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, 130 pp. (In Persian)
- Tebebu, T., Abiy, A., Dahlke, H., Easton, Z., Tilahun, S., Collick, A., Kidnau, S., Moges, S., & Dadgari, F. (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>
- Wang, J., Yang, J., Li, Z., Ke, L., Li, Q., Fan, J., & Wang, X. (2025). Research on Soil Erosion Based on Remote Sensing Technology: A Review. *Agriculture*, 15(1), 18. <https://doi.org/10.3390/agriculture15010018>
- Were, K., Keeney, S., Churu, H., Mumo Mutio, J., Njoroge, R., Mugaa, D., Alkamoi, B., Ng'etich, W., & Ram Singh, B. (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. <https://doi.org/10.3390/land12040890>
- Zeghmar, A., Mokhtari, E., & Marouf, N. (2024). A machine learning approach for RUSLE-based soil erosion modeling in Beni Haroun dam Watershed, Northeast Algeria. *Earth Science Informatics*, 17(4): 2921-2936. <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01305-7>