

Spatial Prediction of Gully Erosion Susceptibility in the Talwar Watershed of Kurdistan Province Using Random Forest and Boosted Regression Trees Models and Evaluating their Accuracy

O. Rahmati^{1*}, S.M. Soleimanpour², S. Shadfar³, S. Zahedi¹

1- 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 (*- Corresponding Author Email: o.rahmati@areeo.ac.ir)

2- Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

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

Received: 12 February 2025

Revised: 01 July 2025

Accepted: 14 July 2025

Available Online: 14 July 2025

How to cite this article:

Rahmati, O., Soleimanpour, S.M., Shadfar, S., & Zahedi, S. (2025). Spatial prediction of gully erosion susceptibility in the Talwar watershed of Kurdistan province using random forest and boosted regression trees models and evaluating their accuracy. *Journal of Water and Soil*, 39(3), 243-258. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2025.92149.1465>

Introduction

Gully erosion is one of the most important factors affecting sediment production and land degradation, and predicting its occurrence is one of the practical solutions to prevent gully erosion. Since the occurrence of gully erosion is directly related to environmental factors and human activities, it is possible to identify areas prone to gully erosion using models based on artificial intelligence and data mining. Modeling helps to save time and cost of measuring gutters. Also, because artificial intelligence and data mining models have a high ability to analyze environmental information; they are able to identify nonlinear and complex relationships between variables, and for this reason, they have been widely accepted by researchers in various sciences worldwide. For this purpose, this study aimed to predict gully erosion susceptibility using random forest models and boosted regression trees in the Talwar watershed located in the southeast of Kurdistan province.

Materials and Methods

Initially, 99 gullies were identified during field visits, the location of the gully head-cut was recorded, and a map of the spatial distribution of the gullies was prepared. The recorded gullies were randomly divided into two groups: training and validation in a ratio of 70:30, such that 70% of the gullies were in the training group and the rest in the validation group. In addition, maps of factors affecting gully erosion including elevation, slope gradient, slope aspect, lithology, distance from the stream, topographic wetness index, land use, plan curvature, profile curvature, average annual rainfall, relative slope position, stream power index, distance from the road, soil order, and soil texture were prepared in geographic information system. Subsequently, in the modeling process, environmental factors were considered as independent variables and the creation of gullies as a dependent variable. In order to model gully erosion, the training group gullies were used in this stage to calibrate the models. In this study, Random Forest (RF) and Boosted Regression Trees (BRT) machine learning models were used to predict gully erosion. In these models, raster layers related to environmental factors affecting gully erosion were



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.92149.1465>

introduced as independent variables to the model. Also, the layer of gully front points, which were previously named after the training group, was introduced as a dependent variable to the model. The process of running the models was carried out in the R software environment. The prediction accuracy of the models was also evaluated using the area under the receiver operating characteristic curve (AUC) method.

Results and Discussion

The spatial pattern of gully erosion by these two models showed that in this basin, generally the middle, eastern and northern parts, which are adjacent to waterways and rivers, had a higher tendency to cause gully erosion. Since the prediction interval of gully erosion in artificial intelligence models varied between zero and one, it can be considered as the probability of gully erosion. The lowest and highest values of the probability of gully erosion by the random forest model were obtained as 0.006 and 0.996, respectively. The median value of the prediction of gully erosion in the prediction of the random forest model was also calculated as 0.322. Therefore, 50% of the pixels in this basin had a tendency to cause gully erosion greater than 0.322 and the other half of its tendency was less than 0.322. The spatial pattern of gully erosion prediction from the boosted regression tree model also varied from 0.011 to 0.799. This model generally introduced the adjacent sections of the drainage network in the middle, eastern, and northern parts as the most favorable lands for the creation and formation of gully erosion. The median predicted value from this model was 0.387. Prediction accuracy, measured by the area under the receiver operating characteristic curve, was 0.952 for the random forest model and 0.891 for the boosted regression tree model.

Conclusion

The findings showed that the random forest model had more accuracy in spatial prediction of gully erosion in the Talwar watershed. Also, based on the AUC criterion, the random forest model was placed in the excellent group ($AUC > 0.9$) and the boosted regression tree model was placed in the very good group ($AUC < 0.8$). According to the findings of this study, executive agencies can use artificial intelligence and data mining models, such as the random forest model, to prepare a gully erosion map and plan and prioritize areas for implementing soil conservation measures. Certainly, focusing soil conservation executive measures and management programs in areas prone to gully erosion in the country's watersheds will improve the performance and optimize the financial resources of natural resources and watershed management departments.

Keywords: Artificial intelligence, Modeling, Soil conservation, Spatial pattern

مقاله پژوهشی

جلد ۳۹، شماره ۳، مرداد-شهریور ۱۴۰۴، ص. ۲۴۳-۲۵۸

پیش‌بینی مکانی استعداد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان با استفاده از مدل‌های جنگل تصادفی و درختان رگرسیونی تقویت‌شده و ارزیابی دقت آن‌ها

امید رحمتی^{۱*} - سید مسعود سلیمان‌پور^۲ - صمد شادفر^۲ - صلاح‌الدین زاهدی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۳

چکیده

فرسایش خندقی به‌عنوان یکی از عوامل تخریب سرزمین شناخته شده و اثرات زیان‌باری در محل و همچنین مناطق پایین‌دست حوزه آبخیز به بار می‌آورد. به‌دلیل دشوار بودن کنترل توسعه فرسایش‌های خندقی، شناسایی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی و جلوگیری از تشکیل آن از اهمیت زیادی برخوردار است. این پژوهش با هدف پیش‌بینی مکانی استعداد فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های جنگل تصادفی و درختان رگرسیونی تقویت‌شده در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان انجام شده است. در ابتدا ۹۹ خندق در بازدیدهای میدانی تشخیص داده شد و موقعیت پیشانی خندق‌ها ثبت و نقشه پراکنش مکانی خندق‌ها تهیه شد. خندق‌ها به‌صورت تصادفی به دو گروه آموزش و اعتبارسنجی به نسبت ۷۰:۳۰ تقسیم شدند. همچنین نقشه عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، سنگ‌شناسی، فاصله از آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی، کاربری اراضی، انحنا سطح، انحنا مقطع، میانگین بارندگی سالانه، موقعیت شیب نسبی، شاخص توان جریان، فاصله از جاده، رده و بافت خاک در سامانه اطلاعات جغرافیایی تهیه شد. مقدار احتمال ایجاد فرسایش خندقی توسط مدل جنگل تصادفی بین ۰/۰۰۶ تا ۰/۹۹۶ و توسط مدل درختان رگرسیونی تقویت‌شده بین ۰/۰۱۱ تا ۰/۷۹۹ به‌دست آمد. خروجی الگوی مکانی ایجاد فرسایش خندقی توسط این دو مدل نشان داد بخش‌های میانی، شرقی و شمالی این حوضه که در مجاورت آبراهه‌ها و رودخانه‌ها هستند، از استعداد ایجاد فرسایش خندقی بیشتری برخوردار هستند. میزان دقت پیش‌بینی مدل‌ها بر اساس روش مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (AUC) ارزیابی شد. بر این اساس، مقدار مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده در مدل‌های جنگل تصادفی و درختان رگرسیونی تقویت‌شده به‌ترتیب ۰/۹۵۲ و ۰/۸۹۱ به‌دست آمد. بنابراین مدل جنگل تصادفی دقت بیشتری در پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی نشان داد. به این سبب، استفاده از مدل هوش مصنوعی جنگل تصادفی در مدیریت سرزمین و برنامه‌های حفاظت خاک حوزه‌های آبخیز مستعد ایجاد فرسایش خندقی پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: الگوی مکانی، حفاظت خاک، مدل‌سازی، هوش مصنوعی

مقدمه

مختلف کشور در معرض خطر ایجاد فرسایش خندقی هستند. هر ساله خسارت‌های زیادی در اثر ایجاد فرسایش خندقی به‌بار می‌آید. علاوه بر اثرات در محل فرسایش خندقی، خندق‌ها رسوبات زیادی را برای مناطق پایین‌دست تولید می‌کنند که اکوسیستم‌های آبی مناطق پایین‌دست اعم از رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، تأسیسات پرورش ماهی و مخازن سدها را با مشکل مواجه می‌کند (Refahi, 2017).

ایجاد و گسترش فرسایش خندقی موجب افزایش ناپایداری و تخریب سرزمین می‌شود (Igwe, Chinedu, Nlem, Nwezi, & Ezekwu, 2018). در حال حاضر بسیاری از اراضی کشاورزی، مناطق مسکونی روستایی، تأسیسات و جاده‌های احداث‌شده در استان‌های

۱- بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سنجند، ایران (* نویسنده مسئول: Email: o.rahmati@areeo.ac.ir)

۲- بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران

۳- پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

از آنجایی که ایجاد فرسایش خندقی ارتباط مستقیمی با عوامل محیطی و فعالیت‌های انسانی دارد، می‌توان با استفاده از مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و داده‌کاوی، مناطق مستعد ایجاد فرسایش خندقی را شناسایی کرد. مدل‌سازی کمک می‌کند تا در زمان و هزینه اندازه‌گیری خندق‌ها صرفه‌جویی شود. همچنین به دلیل این که مدل‌های هوش مصنوعی و داده‌کاوی، قابلیت بالایی در تجزیه و تحلیل اطلاعات محیطی دارند؛ قادرند روابط غیرخطی و پیچیده بین متغیرها را شناسایی کنند و به همین سبب، مورد اقبال عمومی پژوهشگران علوم مختلف در سطح جهان قرار گرفته‌اند (Rahmati, Soleimanpour, Shadfar, & Zahedi, 2023). اما یکی از مشکلات موجود در زمینه استفاده از این مدل‌ها، نبود اطلاعات ثبت شده مربوط به ایجاد فرسایش خندقی در بسیاری از حوزه‌های آبخیز کشور است. از طرفی دیگر، ممکن است منطقه‌ای مستعد ایجاد فرسایش خندقی باشد اما تاکنون شرایط به حد آستانه نرسیده و یا این که فرسایش خندقی در بدو وقوع باشد که براساس اصول حفاظت خاک بایستی این مناطق قبل از ایجاد فرسایش خندقی مدیریت شوند.

در پژوهش‌های مختلفی از مدل‌های هوش مصنوعی و داده‌کاوی در مطالعات فرسایش خندقی استفاده شده است. به عنوان مثال، کانوسنتی و همکاران (Conoscenti et al., 2014) با استفاده از رگرسیون لجستیک به مدل‌سازی ایجاد فرسایش خندقی پرداختند. در این پژوهش، ۲۷ متغیر محیطی به عنوان عوامل مؤثر بر ایجاد فرسایش خندقی در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد علی‌رغم وجود فرض‌های آماری برای مدل رگرسیون لجستیک، این مدل دقت مناسبی در پیش‌بینی مناطق مستعد ایجاد فرسایش خندقی دارد. جورچسکو و گرکو (Jurchescu & Grecu, 2015) نیز برای مدل‌سازی مکانی مناطق مستعد وقوع فرسایش‌های خندقی منطقه اولت رومانی از مدل درخت رگرسیون و طبقه‌بندی CART در دو مقیاس متفاوت منطقه‌ای (۱:۱۰۰۰۰۰ تا ۱:۲۰۰۰۰۰) و حدواسط (۱:۲۵۰۰۰ تا ۱:۵۰۰۰۰) استفاده کردند. نتایج نشان داد در حالتی که مطالعه با مقیاس منطقه‌ای انجام می‌گیرد، عوامل مختلفی بر روی عدم قطعیت نتایج تأثیر می‌گذارند و تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند در بهبود دقت مکانی موقعیت خندق‌ها و در نتیجه افزایش دقت مدل درخت رگرسیون و طبقه‌بندی بسیار مفید باشد. همچنین، رحمتی و همکاران (Rahmati, Tahmasebipour, Haghizadeh, Pourghasemi, & Feizizadeh, 2017) کارایی مدل‌های یادگیری ماشینی مختلف از جمله ماشین بردار پشتیبان، درختان رگرسیونی تقویت شده و جنگل تصادفی در زمینه شناسایی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی در منطقه پل دختر مورد ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش دوازده عامل محیطی مختلف برای مدل سازی پدیده شکل‌گیری فرسایش خندقی انتخاب شد. همچنین، اندازه نمونه‌های آموزشی مختلف از پایگاه داده موقعیت رخداد‌های فرسایش

خندقی نیز مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج به دست آمده، مدل‌های جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان (با کرنل تابع پایه شعاعی) بهترین عملکرد را از نظر دقت پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش خندقی داشتند و این مدل‌ها حساسیت کمتری نسبت به اندازه نمونه آموزشی داشتند. گروسی و همکاران (Garosi et al., 2018) نیز به بررسی اثر قدرت تفکیک مکانی و منبع تهیه لایه‌های محیطی بر کارایی مدل‌های هوش مصنوعی در زمینه پیش‌بینی رخداد فرسایش خندقی پرداختند. نتایج نشان داد مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و درختان رگرسیونی تقویت شده عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های خطوط رگرسیون افزودنی چند متغیره و مدل خطی تعمیم یافته داشتند. همچنین، گاین و همکاران (Gayen, Pourghasemi, Saha, Keesstra, & Bai, 2019) به منظور شناسایی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی، عملکرد مدل‌های تجزیه و تحلیل تفکیک انعطاف‌پذیر، خطوط رگرسیون افزودنی چند متغیره، جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان را باهم مقایسه کردند. در این مطالعه دوازده عامل محیطی مختلف و اثرگذار بر شکل‌گیری فرسایش خندقی در نظر گرفته شد. یافته‌های این پژوهش نشان داد که مدل جنگل تصادفی، بیش‌ترین دقت پیش‌بینی را به خود اختصاص داده است. در مطالعه‌ای دیگر، رحمتی و همکاران (Rahmati, Tahmasebipour, Haghizadeh, Pourghasemi, & Feizizadeh, 2019) کارایی مدل بیشینه آنتروپی در زمینه پیش‌بینی استعداد وقوع فرسایش آبکندی حوزه آبخیز کشکان-پل دختر استان لرستان را ارزیابی نموده و نتایج نشان داد که این مدل قابلیت بالایی برای شناسایی مناطق مستعد فرسایش خندقی داشته است.

براساس مطالعه‌ی گروسی و همکاران (Garosi, Sheklabadi, Conoscenti, Pourghasemi, & Van Oost, 2019) در مطالعه استعداد شکل‌گیری فرسایش خندقی حوضه سد اکباتان با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشینی مورد بررسی قرار گرفت. این پژوهش نیز نشان داد که مدل جنگل تصادفی، بهترین عملکرد را برای پیش‌بینی استعداد فرسایش خندقی داشته است. ویی و همکاران (Wei et al., 2022) نیز برای پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش خندقی در حوضه‌ای از کشور چین، از مدل نسبت فراوانی، الگوریتم Boruta و جنگل تصادفی استفاده کردند. نتایج بیانگر آن بود که میانگین بارندگی سالانه دارای بیش‌ترین اثرگذاری و بعد از آن عامل فرساینده باران و فاصله از جریان مهم‌ترین عوامل محیطی مؤثر بر رخداد فرسایش خندقی هستند. مدل‌سازی مکانی استعداد رخداد فرسایش خندقی انجام شده با استفاده از مدل جنگل تصادفی نیز مورد ارزیابی کمی قرار گرفت و دقت آن در تکرارهای مختلف ۹۶ تا ۹۹ درصد، به عنوان مناسب‌ترین مدل از نظر دقت پیش‌بینی معرفی شد. در پژوهشی دیگر، ور و همکاران (Were et al., 2023) به ارزیابی و مقایسه عملکرد مدل‌های ماشین بردار پشتیبان، درختان رگرسیونی تقویت‌شده، جنگل تصادفی و رگرسیون لجستیک، در پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی در یک منطقه

تقویت‌شده و تولید نقشه استعداد رخداد فرسایش خندقی در این حوزه آبخیز، انجام شد.

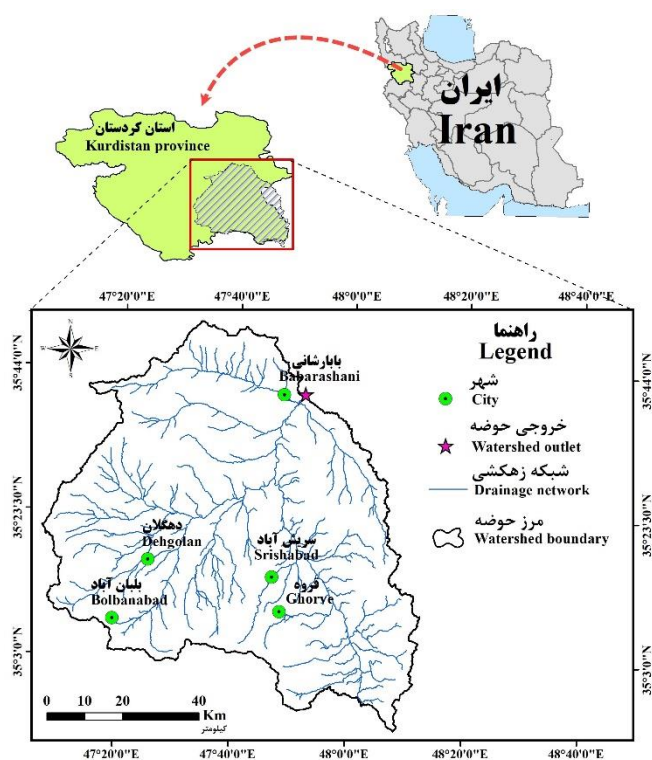
مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز تلوار، در محدوده مشترک بین استان‌های کردستان و همدان واقع شده است (۴۵ کیلومتری شهرستان بیجار) (شکل ۱). مساحت این حوضه $۶۴۶۸/۳$ کیلومتر مربع است. این حوضه حالت نسبتاً گرد داشته و شبکه زهکشی آن شاخه درختی است. یکی از دلایل ضروری بودن توجه به مسأله فرسایش خندقی این حوضه این است که سد تلوار در خروجی آن قرار دارد. متوسط بارندگی سالانه حوضه ۲۵۶ میلی‌متر است. براساس روش طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، اقلیم منطقه نیمه‌خشک است. کاربری غالب منطقه متشکل از کشاورزی آبی، کشاورزی دیم، باغات و مراتع است. از نظر سنگ‌شناسی، سازند کواترنری (نهشته‌های آبرفتی، رودخانه‌ای، رسوبات ریزدانه و مارن‌ها) بخش اعظم سنگ‌شناسی منطقه را تشکیل داده است (Rahmati et al., 2023).

نیمه‌خشک تخریب‌یافته در کشور کنیا اقدام کردند. در این پژوهش، از بررسی ۴۳۱ خندق، مطالعات میدانی و تفسیر تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا در گوگل‌ارث استفاده شد. نتایج نشان داد مدل جنگل تصادفی، از دقت بالاتری در پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی و مناطق مستعد برخورداری بود و پس از آن مدل‌های درختان رگرسیون تقویت‌شده، ماشین‌بردار پشتیبان و رگرسیون لجستیک قرار داشتند. به تازگی، باموو و همکاران (Bammou et al., 2024) نیز با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین اقدام به ارزیابی حساسیت فرسایش خندقی در حوزه آبریز تنسیفت واقع در کشور مراکش کردند. در این پژوهش، ۱۸ عامل مؤثر محیطی در مدل‌سازی استفاده شد و در نهایت، یافته‌ها نشان داد 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.

با درنظر گرفتن فواید به‌کارگیری مدل‌های یادگیری ماشین در مطالعات فرسایش خندقی و همچنین مشخص نبودن مناطق مستعد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان، این پژوهش با هدف مقایسه کارایی مدل‌های جنگل تصادفی و درختان رگرسیونی



شکل ۱- نقشه موقعیت جغرافیای حوزه آبخیز تلوار استان کردستان

Figure 1- Geographical location map of the Talwar watershed in Kurdistan province

مواد و روش‌ها

ثبت موقعیت مکانی رخدادهای فرسایش خندقی

در بازدیدهای میدانی، ۹۹ خندق موجود در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان شناسایی شدند و موقعیت پیشانی آن‌ها با استفاده از دستگاه GPS و تصاویر گوگل ارث ثبت شد. سپس، نقشه پراکنش مکانی خندق‌ها در سیستم اطلاعات جغرافیایی (نرم‌افزار ArcGIS 10.3) تهیه شد. از آنجایی که وقوع خندق‌ها تحت تأثیر دیگر عوامل محیطی است. در مدل‌سازی پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی، موقعیت مکانی پیشانی خندق‌ها (به‌صورت نقطه‌ای) به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد. سپس این داده‌ها به‌صورت تصادفی به دو گروه آموزش و اعتبارسنجی تقسیم شدند به گونه‌ای که گروه آموزش شامل ۷۰ درصد داده‌ها و گروه اعتبارسنجی شامل ۳۰ درصد داده‌ها بود. داده‌های گروه آموزش در مراحل ساخت، واسنجی و بهینه‌سازی مدل‌های هوش مصنوعی استفاده شد و داده‌های گروه اعتبارسنجی در مرحله نهایی و پس از ارائه پیش‌بینی‌ها، به‌منظور ارزیابی نتایج مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت.

عوامل مؤثر بر رخداد فرسایش خندقی

در ادامه نسبت به انتخاب متغیرهای محیطی اثرگذار بر ایجاد فرسایش خندقی اقدام شد. فرسایش خندقی یک فرایند زمین‌ریخت‌شناسی پیچیده است که عوامل محیطی مختلفی در شکل‌گیری آن نقش دارند. فرسایش خندقی در اثر دو فرایند مجزا می‌تواند به‌وجود آید. توسعه شیارها در اثر تنش برشی جریان‌های سطحی می‌تواند منجر به تشکیل فرسایش خندقی شود؛ از این‌رو در برخی منابع علمی به نام آب‌کند مطرح شده است (Soleimanpour, Soufi, & Ahmadi, 2009; Soleimani, Soufi, & Arsham, 2017). همچنین، فرسایش خندقی می‌تواند در اثر توسعه فرسایش تونلی (لانه‌روباهی) به‌وجود آید (Servati, Ghodosi, & Dadkhah, 2008). به همین دلیل پیش‌بینی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی نیازمند طیف وسیعی از متغیرهای محیطی است (Rahmati, Soleimanpour, & Shadfar, 2024). براساس مرور منابع انجام شده در زمینه شناسایی مناطق مستعد فرسایش خندقی و تعیین عوامل مؤثر بر وقوع آن (Emadodin, Omid, Arekhi, & Karam, 2021; Rangzan, Zaheri Abdehvand, & Mokarram, 2022; Shahabi, Amiri, & Shirzadi, 2022; Asadi Nalivan et al., 2023; Javidan, Kaviani, Rajabi, Pourghasemi, & Jafarian, 2023; Zakerinejad & Alvandi, 2023; Vosoghi, Zakerinejad, & Entezari, 2024)، ۱۵ متغیر محیطی شامل:

ارتفاع، درجه شیب، جهت شیب، سنگ‌شناسی، فاصله از آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی^۱ (TWI)، کاربری اراضی، انحنا^۲ سطح، انحنا^۳ مقطع، میانگین بارندگی سالانه، موقعیت شیب نسبی^۴ (RSP)، شاخص توان جریان^۵ (SPI)، فاصله از جاده، رده خاک و بافت خاک به‌عنوان متغیرهای اثرگذار در ایجاد فرسایش خندقی انتخاب شدند. این متغیرها در مدل‌سازی نقش پیش‌بینی‌کننده ایجاد فرسایش خندقی را خواهند داشت. شایان ذکر است که مدل‌های یادگیری ماشینی قادر هستند که از متغیرهای کمی (مانند ارتفاع، درجه شیب، فاصله از آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی، میانگین بارندگی سالانه، موقعیت شیب نسبی، شاخص توان جریان و فاصله از جاده) و کیفی (مانند جهت شیب، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، انحنا^۲ سطح، انحنا^۳ مقطع، رده خاک و بافت خاک) برای پیش‌بینی استعداد رخداد فرسایش خندقی استفاده نمایند (Ghorbanzadeh et al., 2020). لایه رستری تمام متغیرهای پیش‌بینی‌کننده در محیط ArcGIS 10.2 و SAGA-GIS با اندازه پیکسل ۳۰ متر و مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شد. نقشه رستری ارتفاع منطقه نیز از لایه مدل رقومی ارتفاع (قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر) تهیه شد. لایه‌های شیب زمین، جهت شیب و انحنا^۲ سطح با استفاده از لایه مدل رقومی ارتفاع ساخته شد. لایه سنگ‌شناسی منطقه با استفاده از زمین مرجع‌سازی و رقومی‌سازی نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه تهیه شد. لایه رستری متوسط بارندگی سالانه با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی اداره کل هواشناسی و شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان و روش‌های درون‌یابی مختلف تهیه شد. از آنجایی که ایستگاه‌های باران‌سنجی شرکت آب منطقه‌ای در مناطق غیرشهری و ایستگاه‌های هواشناسی در محدوده نزدیک شهرها قرار گرفته‌اند، استفاده همزمان از داده‌های بارندگی ثبت‌شده موجب افزایش دقت نقشه متوسط بارندگی سالانه می‌شود. در این پژوهش، از داده‌های شش ایستگاه‌های باران‌سنجی شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان شامل چنگیزقلعه، حسن‌خان، دهگلان، سلامت‌آباد، قروه و نورمحمدکندی و پنج ایستگاه‌های باران‌سنجی اداره کل هواشناسی استان کردستان شامل دهگلان، قروه، سنندج، یاسوئند و دیواندره استفاده شده است. در این مرحله، دقت روش‌های مختلف درون‌یابی (مانند روش وزنی عکس فاصله و کریجینگ) برای تهیه لایه رستری میانگین بارندگی سالانه مورد ارزیابی قرار گرفت و در نهایت روشی که دارای کم‌ترین جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) است، به‌عنوان روش مناسب استفاده شد. اگرچه عامل شدت بارندگی برای پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش مناسب‌تر است، به‌دلیل نبود ایستگاه

5- Stream power index

1- Topographic wetness index
2- Plan curvature
3- Profile curvature
4- Relative slope position

بافت خاک دریافت شده از سامانه گوگل‌ارث‌انجین برای حوزه آبخیز مورد مطالعه است. تمامی لایه‌های مربوط به متغیرهای پیش‌بینی‌کننده استانداردسازی شد تا دامنه تغییرات متغیرها یکسان شود. قبل از ورود لایه‌های متغیرهای مستقل به مدل، آزمون هم‌خطی‌چندگانه^۳ انجام شده تا از عدم وجود همبستگی بین متغیرها اطمینان حاصل گردد. بدین منظور از آماره عامل تحمل^۴ (TOL) استفاده شده و هنگامی که مقدار این آماره بیشتر از ۰/۱ باشد، هم‌خطی‌چندگانه بین متغیرهای مستقل مشاهده نشده است (Ghorbanzadeh et al., 2020). در این پژوهش، مقدار آماره عامل تحمل برای عوامل محیطی منتخب در نرم‌افزار R بیشتر از ۰/۱ به دست آمده و از اینرو امکان ورود متغیرهای مستقل در فرایند مدل‌سازی فراهم شد.

مدل‌سازی استعداد فرسایش خندقی

در ادامه و در فرایند مدل‌سازی، عوامل محیطی به‌عنوان متغیرهای مستقل و ایجاد خندق‌ها به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شدند. به‌منظور مدل‌سازی ایجاد فرسایش خندقی، خندق‌های گروه آموزش در این مرحله برای واسنجی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. در مرحله نخست مدل‌سازی، لایه موقعیت پیشانی خندق‌های گروه آموزش و لایه‌های رستری مربوط به متغیرهای پیش‌بینی‌کننده، روی هم‌گذاری شدند. سپس ارزش پیکسل‌های عوامل محیطی متناظر با ایجاد هر یک از فرسایش‌های خندقی تعیین و بر این اساس، روابط میان متغیرهای مستقل و وابسته برآورد شد و نهایتاً ایجاد فرسایش خندقی پیش‌بینی شد. اندازه پیکسل نقشه ایجاد فرسایش خندقی نیز با لایه‌های رستری متغیرهای پیش‌بینی‌کننده (۳۰ متر) برابر در نظر گرفته شد. در این پژوهش، مدل‌های یادگیری ماشینی جنگل تصادفی (RF) و درختان رگرسیونی تقویت‌شده (BRT) برای پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی استفاده شد. در این مدل‌ها، لایه‌های رستری مربوط به عوامل محیطی مؤثر بر ایجاد فرسایش خندقی به‌عنوان متغیرهای مستقل به مدل معرفی شدند. همچنین لایه نقاط پیشانی خندق‌ها که قبلاً به نام گروه آموزشی نام‌گذاری شده بودند، به‌عنوان متغیر وابسته به مدل معرفی شدند. فرایند اجرای مدل‌ها در محیط نرم‌افزار R انجام شد. پس از فرایند پردازش مدل‌ها، رابطه میان متغیرها توسط مدل‌های فوق‌الذکر شناسایی شد. این مدل‌ها قادر هستند که احتمال وقوع فرسایش خندقی را برای هر پیکسل پیش‌بینی کنند.

ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌های مورد استفاده

پس از تهیه نقشه پیش‌بینی هریک از مدل‌ها، میزان صحت پیش‌بینی آن‌ها براساس لایه نقاط پیشانی خندق‌ها، گروه اعتبارسنجی مورد

های باران‌نگار در منطقه، امکان دستیابی به داده‌های شدت بارندگی سال‌های گذشته وجود ندارد. نقشه کاربری اراضی حوزه تلوار با استفاده از تصاویر گوگل‌ارث تهیه شد. از آنجایی که تجمع جریان‌های سطحی نقش مهمی در فرایند کنش و شکل‌گیری فرسایش‌های خندقی دارند، بخش‌های مجاور آبراهه‌ها و رودخانه‌ها پتانسیل بالاتری برای تشکیل و رشد فرسایش‌های خندقی دارند. نقشه فاصله از جریان‌های سطحی نیز در همین نرم‌افزار با استفاده از ابزار فاصله اقلیدسی^۱ در نرم‌افزار ArcGIS 10.3 تهیه شد. این نقشه دارای ساختار رستری بوده و ارزش هر پیکسل، میزان فاصله آن پیکسل از نزدیک‌ترین جریان سطحی را نشان می‌دهد و در مطالعات تعیین استعداد رخداد فرسایش خندقی مورد استفاده قرار گرفته است (Conoscenti, Agnesi, Cama, Caraballo-Arias, & Rotigliano, 2018). شاخص رطوبت توپوگرافی با استفاده از دو لایه رستری مساحت بالادست (مساحت مشارکت‌کننده در تولید رواناب) و شیب در نرم‌افزار SAGA-GIS ساخته شد. جاده‌ها به دو صورت در فرایند شکل‌گیری فرسایش‌های خندقی مشارکت دارند. سطح نفوذناپذیر جاده‌ها موجب تجمع جریان‌های سطحی شده و در برخی مواقع فرسایش خندقی در حاشیه جاده و به موازات آن تشکیل می‌گردد. از سویی دیگر، جریان خروجی زیرگذر جاده‌ها نیز خروج شدید آب و تشکیل آبشار در پایین‌دست زیرگذر را به دنبال داشته که شرایط مناسب برای تشکیل فرسایش خندقی را به وجود می‌آورد. از اینرو فاصله از جاده به‌عنوان یکی از عوامل اصلی در مطالعات شکل‌گیری فرسایش خندقی مورد استفاده قرار گرفته است (Nyssen et al., 2002). پس از استخراج موقعیت مکانی جاده‌های منطقه از تصاویر گوگل‌ارث، نقشه فاصله از جاده نیز با ابزار فاصله اقلیدسی در نرم‌افزار ArcGIS 10.3 تهیه شد. نقشه رده خاک براساس اطلاعات موجود در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان تهیه شد. نقشه بافت خاک با استفاده از داده‌های خاک (پایگاه داده جهانی خاک) سامانه گوگل‌ارث‌انجین تهیه شد. اندازه پیکسل نقشه بافت خاک سامانه گوگل‌ارث‌انجین ۲۵۰ متر است که با استفاده از ابزار Resample در نرم‌افزار ArcGIS به اندازه پیکسل ۳۰ متر تبدیل شد تا امکان پردازش داده‌ها توسط مدل فراهم شود. به‌منظور اطمینان از نقشه بافت خاک تهیه شده در این پژوهش، نمونه‌های خاک از عمق صفر تا سی سانتی‌متری برداشت شد و به آزمایشگاه خاک‌شناسی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان منتقل شد. کلاس بافت خاک نمونه‌ها به روش هیدرومتری تعیین و با نقشه بافت خاک حاصل از سامانه گوگل‌ارث-انجین مقایسه شد. معیار ارزیابی دقت کلی^۲ (OA) برای نقشه بافت خاک ۹۵/۵۶ درصد به دست آمد که نشان‌دهنده دقت مناسب نقشه

3- Multicollinearity

4- Tolerance

1- Euclidean distance

2- Overall accuracy

شکل ۲ نشان داده شده است. اغلب خندق‌ها در بخش مرکزی، شمالی و شرقی حوزه آبخیز مورد مطالعه مشاهده می‌شود. همانگونه که ملاحظه می‌شود، تراکم رخدادهای فرسایش خندقی در سراسر حوزه آبخیز تلوار یکسان نیست.

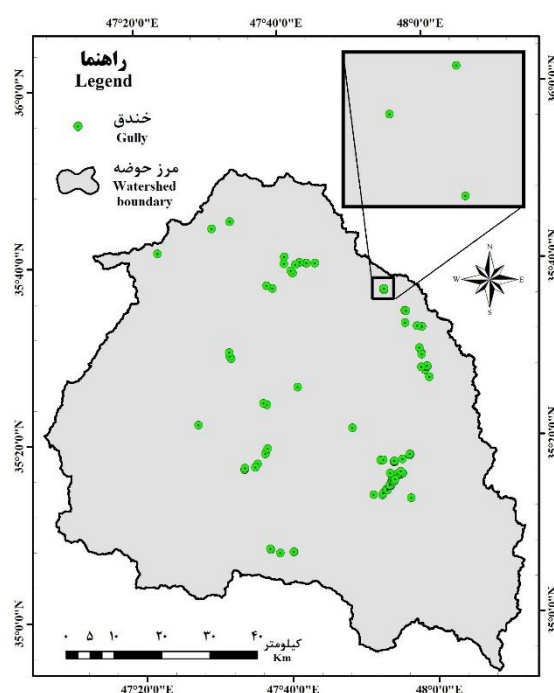
نقشه ۱۵ عامل محیطی در نظر گرفته شده به منظور مدل‌سازی پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی در شکل ۳ ارائه شده است. این عوامل عبارتند از: ارتفاع، جهت شیب، موقعیت شیب نسبی، انحنای سطح، انحنای مقطع، درجه شیب، شاخص توان جریان، شاخص ناهمواری توپوگرافی، شاخص رطوبت توپوگرافی، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، میانگین بارندگی سالانه، رده خاک، بافت خاک، فاصله از آبراهه و فاصله از جاده. ارتفاع زمین در این منطقه از ۱۶۱۲ تا ۳۱۸۴ متر متغیر بوده و روند تغییر ارتفاع زمین از جنوب به شمال منطقه کاهشی است. با توجه به وجود ناهمواری زیاد در بخش‌های مختلف این حوزه آبخیز، نه کلاس مختلف جهت شیب شامل شمالی، شمال شرقی، شرقی، جنوب شرقی، جنوبی، جنوب غربی، غربی، شمال غربی و بدون جهت شناسایی شده است.

ارزیابی قرار گرفت (Amiri, Pourghasemi, Ghanbarian, & Afzali, 2020). به این صورت که نتایج حاصل از مدل‌سازی ایجاد فرسایش خندقی، براساس داده‌های گروه اعتبارسنجی (۳۰ درصد داده-های موقعیت خندق‌ها) و روش مساحت زیرمنحنی مشخصه عملکرد گیرنده (AUC) ارزیابی شد (Rahmati et al., 2019). از آنجایی که داده‌های گروه اعتبارسنجی در مرحله مدل‌سازی به کار گرفته نشدند، لذا بررسی میزان صحت پیش‌بینی ایجاد خندق براساس آن‌ها (گروه اعتبارسنجی) به طور علمی و منطقی فراهم شد. پس از تعیین میزان صحت دو مدل مورد استفاده در این پژوهش، شرایط برای مقایسه کمی مدل‌ها و تعیین مدل برتر امکان‌پذیر شد. در صورتی که صحت مدل، بالاتر از هفتاد درصد باشد، صحت مدل به عنوان قابل قبول شناخته می‌شود. مقادیر صحت بیش از هفتاد درصد نیز قابل گروه‌بندی است: خوب (صحت بین هفتاد تا هشتاد درصد)، خیلی خوب (صحت بین هشتاد تا نود درصد) و عالی (صحت بیش از نود درصد) (Saha, Roy, Arabameri, Blaschke, & Tien Bui, 2020).

نتایج

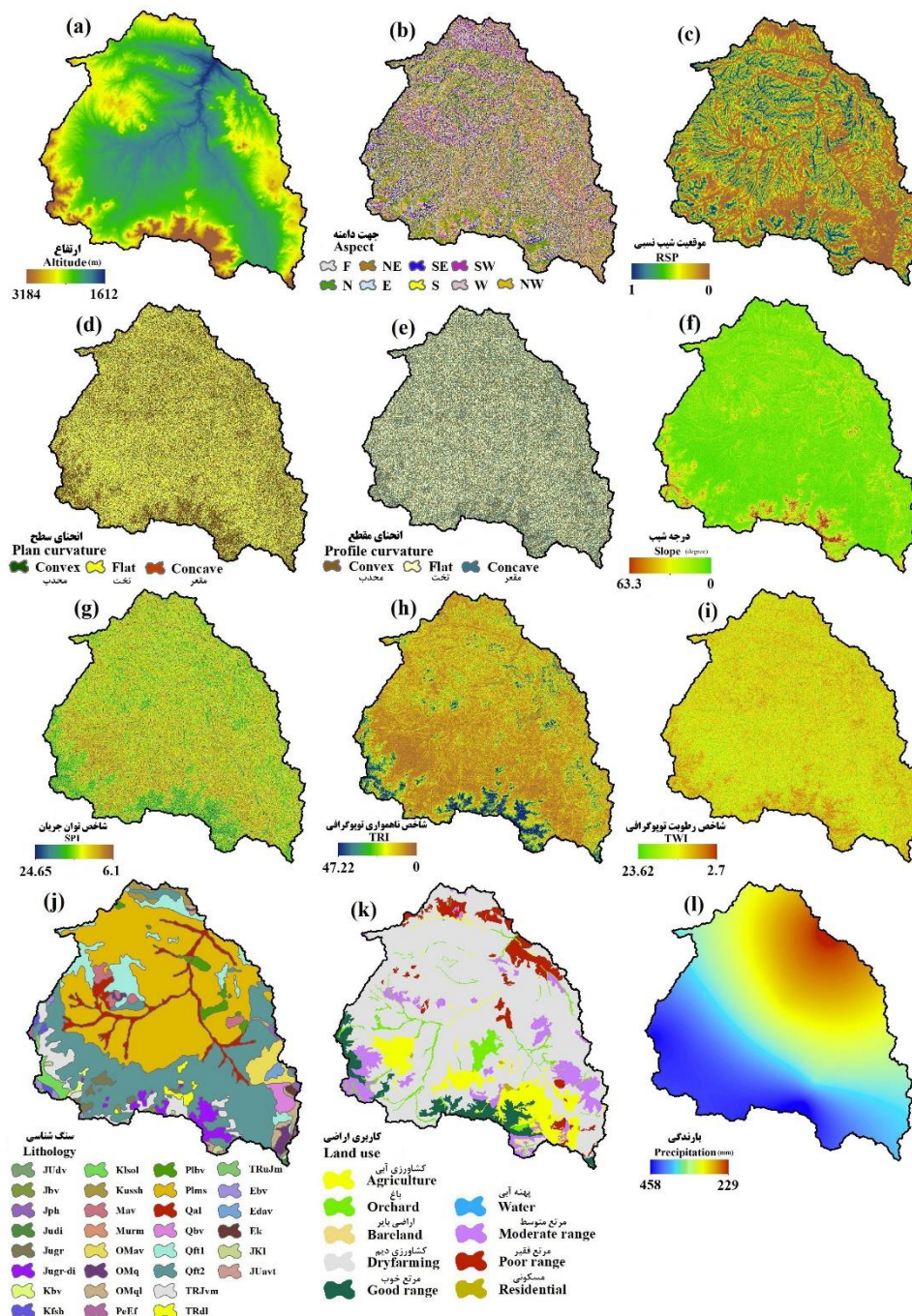
نقشه‌های عوامل مؤثر بر رخداد فرسایش خندقی

پراکنش خندق‌های موجود در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان در



شکل ۲- نقشه پراکنش خندق‌های واقع در حوزه آبخیز مورد مطالعه

Figure 2- Spatial distribution map of gullies in the studied watershed

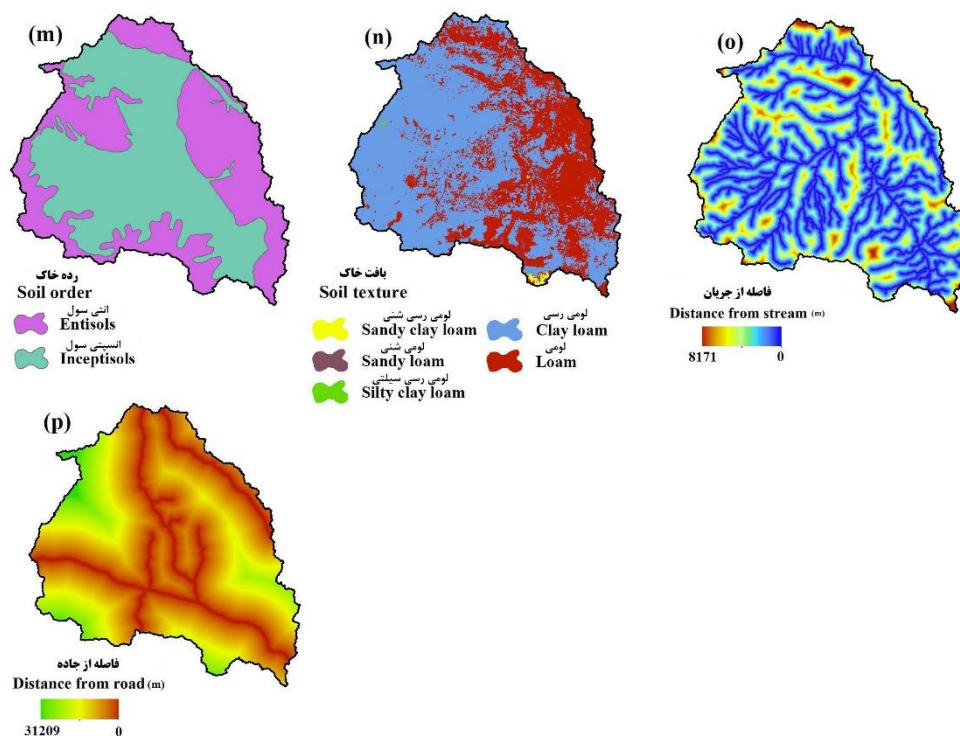


شکل ۳- نقشه عوامل مؤثر در ایجاد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار

(به‌ترتیب از چپ به راست): نقشه‌های ارتفاع، جهت شیب، موقعیت شیب نسبی، انحناى سطح، انحناى مقطع، درجه شیب، شاخص توان جریان، شاخص ناهمواری توپوگرافی، شاخص رطوبت توپوگرافی، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، میانگین بارندگی سالانه، رده خاک، بافت خاک، فاصله از آبراهه و فاصله از جاده.

Figure 3- Maps of gully-induced factors in the Talwar watershed

(From left to right): altitude, slope aspect, relative slope position, plan curvature, profile curvature, slope gradient, stream power index, topographic roughness index, topographic wetness index, lithology, land use, precipitation, soil order, soil texture, distance from stream, and distance from road.



شکل ۳ (ادامه) - نقشه عوامل مؤثر در ایجاد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار

(به ترتیب از چپ به راست): نقشه‌های ارتفاع، جهت شیب، موقعیت شیب نسبی، انحنای سطح، انحنای مقطع، درجه شیب، شاخص توان جریان، شاخص ناهمواری توپوگرافی، شاخص رطوبت توپوگرافی، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، میانگین بارندگی سالانه، رده خاک، بافت خاک، فاصله از آبراهه و فاصله از جاده.

Figure 3 (continued)- Maps of gully-induced factors in the Talwar watershed

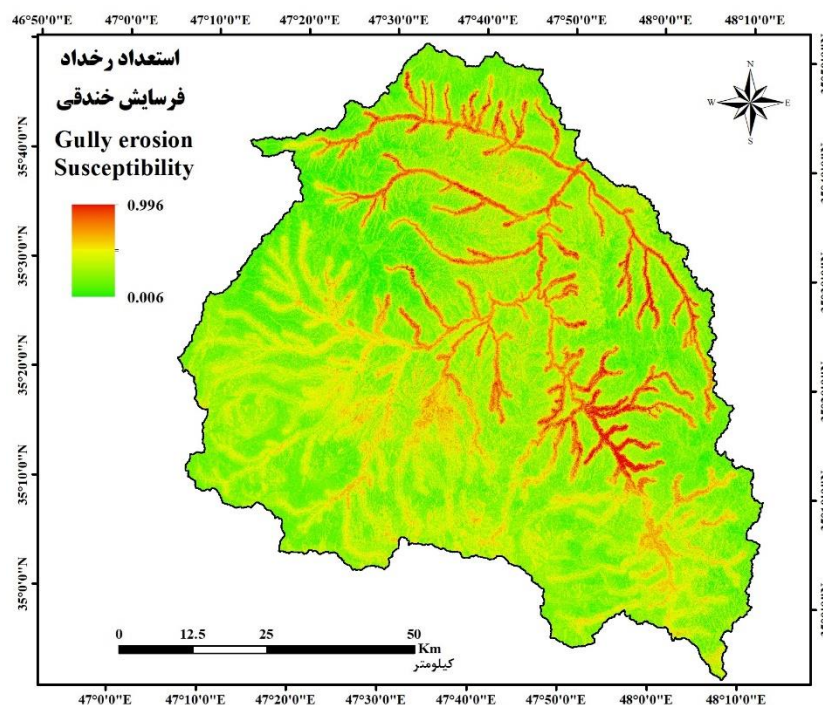
(From left to right): altitude, slope aspect, relative slope position, plan curvature, profile curvature, slope gradient, stream power index, topographic roughness index, topographic wetness index, lithology, land use, precipitation, soil order, soil texture, distance from stream, and distance from road.

مقطع، دامنه مقعر هستند، جریان زیرقشری تشکیل شده و شرایط زمینی برای فرایندهای خندق و زمین‌لغزش فراهم می‌گردد در حالی که در دامنه محدب فرآیند ریزش بیشتر مشاهده می‌شود. نقشه درجه شیب زمین در این منطقه نشان داد که مقدار شیب زمین از صفر تا ۶۳ درجه متغیر است. زمین‌های شیبدار عموماً در قسمت جنوبی قرار گرفته و برخی از بخش‌های داخلی نیز از شیب زیادی برخوردارند. شاخص توان جریان (SPI) نیز در این حوزه آبخیز از ۶/۱ تا ۲۴/۶۵ متغیر است. براساس نتایج به دست آمده، آبراهه‌هایی که در قسمت‌های جنوبی این حوزه آبخیز قرار دارند، بیشترین مقدار شاخص توان جریان را به خود اختصاص داده‌اند. دلیل این امر وجود شیب بستر زیاد در آبراهه‌های قسمت‌های جنوبی این منطقه است. شاخص ناهمواری توپوگرافی (TRI) در این حوزه آبخیز از صفر تا ۴۷/۲۲ متغیر است. این شاخص که نشان‌دهنده میزان ناهمواری زمین است، نشان داد که بخش‌های جنوبی و جنوب غربی دارای بیشترین میزان ناهمواری هستند. این درحالی است که قسمت‌های شمالی و شمال شرقی حوزه آبخیز تلوار از کم‌ترین ناهمواری برخوردارند. نقشه شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) نیز نشان داد که مقدار این شاخص در

شاخص موقعیت شیب نسبی (RSP) یک شاخص زمین ریخت‌شناسی است که مقدار آن در این حوزه آبخیز بین صفر تا یک متغیر است. شاخص موقعیت شیب نسبی بیانگر موقعیت یک نقطه (یا پیکسل) در یک دامنه است. نقاطی که دارای شاخص موقعیت شیب نسبی نزدیک به یک هستند، در قسمت قله (بال) دامنه قرار دارند در حالی که مقادیر نزدیک به صفر این شاخص بیانگر موقعیت پیکسل در پای دامنه است. مقادیر نزدیک به ۰/۵ در شاخص موقعیت شیب نسبی نشان‌دهنده قرارگیری پیکسل در حدوسط دامنه است. حوزه آبخیز تلوار از نظر شاخص موقعیت شیب نسبی متنوع است. از نظر انحنای سطح، دامنه‌های حوزه آبخیز مورد مطالعه به سه کلاس محدب، تخت و مقعر تقسیم شده‌اند. متغیر انحنای سطح وضعیت انحنای یک دامنه را از زاویه دید عمودی نشان می‌دهد و براساس آن می‌توان همگرایی یا واگرایی جریان در یک محدوده را تشخیص داد. از نظر انحنای مقطع، یک دامنه از زاویه دید جانبی به سه کلاس مختلف دامنه محدب، دامنه تخت و دامنه مقعر قابل کلاس‌بندی است. در حوزه آبخیز تلوار، تمامی دامنه‌ها با استفاده از متغیر انحنای مقطع به سه کلاس دامنه محدب، دامنه تخت و دامنه مقعر تقسیم شدند. محدوده‌هایی که از نظر متغیر انحنای

که رده خاک اینسپتی‌سولز بیشتر در قسمت‌های میانی منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود. نتایج همچنین نشان داد که در این حوزه آبخیز پنج کلاس بافت خاک شامل لوم رسی شنی، لوم رسی سیلتی، لوم رسی و لومی وجود دارند. بیشترین سطح این منطقه توسط کلاس‌های بافت خاک لومی و لومی رسی پوشیده شده است. نقشه فاصله از جریان در این حوزه آبخیز نیز نشان داد که فاصله هر نقطه تا نزدیکترین آبراهه بین صفر تا ۸۱۷۱ متر متغیر است. احتمال شکل‌گیری فرسایش خندقی در اراضی نزدیک به آبراهه‌ها که جریان‌های سطحی و زیرسطحی بیشتری نسبت به اراضی دور از شبکه زهکشی دارند، بیشتر است. نقشه فاصله از جاده نیز نشان داد که جاده‌های متعددی در این حوزه آبخیز در قسمت‌های جنوبی، میانی و شمال غربی وجود دارد. جاده‌ها به دو روش بر شکل‌گیری فرسایش خندقی تأثیر می‌گذارند. تجمع رواناب‌ها در سطح جاده‌ها و ایجاد جریان آب در کنارگذر جاده‌ها موجب شکل‌گیری فرسایش خندقی در حاشیه جاده‌ها می‌شود. همچنین، خروج شدید جریان آب در زیرگذر جاده‌ها دارای انرژی کنشی زیادی بوده و شرایط را برای تشکیل خندق در پایین‌دست زیرگذر جاده‌ها فراهم می‌کند.

بخش‌های شمالی این حوزه آبخیز بیشتر از بخش‌های جنوبی است. از آنجایی که در بخش شمالی حوزه آبخیز شیب رودخانه‌ها کم و جریان آب زیاد است، شاخص رطوبت توپوگرافی در بخش شمالی بیشتر از بخش‌های دیگر است. حوزه آبخیز تلوار از نظر سنگ‌شناسی متنوع بوده و ۳۰ واحد سنگ‌شناسی در این حوزه آبخیز شناسایی شده است. براساس نقشه کاربری زمین، ۹ کلاس کاربری زمین در این حوزه آبخیز شناسایی شده است. نقشه کاربری زمین نشان داد که شیوه‌های مختلف استفاده و مدیریت زمین در این حوزه آبخیز متنوع است. براساس نتایج به دست آمده، میزان بارندگی حوزه آبخیز تلوار از ۲۲۹ تا ۴۵۸ میلی‌متر متغیر است که بیانگر تغییرات مکانی بسیار زیاد در این منطقه است. روند تغییرات مکانی میانگین بارندگی سالانه از قسمت جنوب غربی این حوزه آبخیز به سمت شمال شرقی کاهشی است. براساس روش طبقه‌بندی رده خاک سازمان کشاورزی ایالات متحده آمریکا (USDA)، در حوزه آبخیز تلوار دو رده خاک شامل انتی‌سولز و اینسپتی‌سولز شناسایی شده است (Ghaderi, Ghodosi, Tabatabai, & Khaledian, 2000). همانگونه که در نقشه رده خاک قابل مشاهده است، رده انتی‌سولز عموماً در مناطق حاشیه‌ای حوزه آبخیز تلوار که از نظر توپوگرافی ناهموار هستند، قرار دارد. این در حالی است



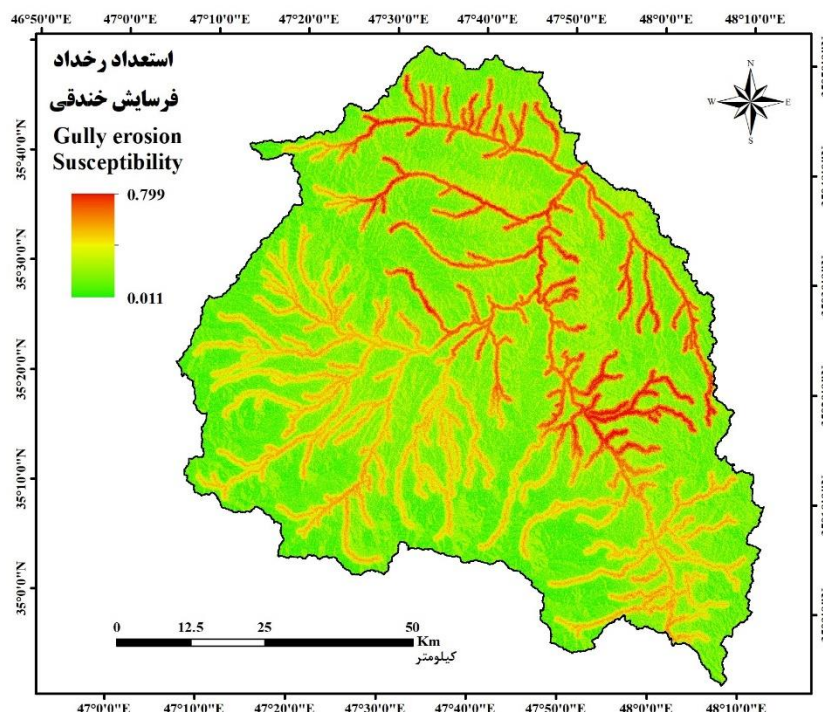
شکل ۴- نقشه پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار با استفاده از مدل جنگل تصادفی
Figure 4- Gully erosion susceptibility map using Random Forest model in the Talwar watershed

نقشه‌های استعداد رخداد فرسایش خندقی

نقشه پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی با استفاده از مدل جنگل تصادفی در شکل ۴ نشان داده شده است. از آنجایی که بازه پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی در مدل‌های هوش مصنوعی بین صفر تا یک متغیر است، می‌تواند به عنوان احتمال ایجاد فرسایش خندقی مطرح شود. کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار احتمال ایجاد فرسایش خندقی در این حوضه به ترتیب $0/006$ و $0/996$ به دست آمد. مقدار میانه پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی نیز در پیش‌بینی مدل جنگل تصادفی $0/322$ محاسبه شد. بنابراین، پنجاه درصد پیکسل‌های این حوضه دارای استعداد ایجاد فرسایش خندقی بیشتر از $0/322$ و استعداد نصف دیگر آن از $0/322$ کمتر است.

الگوی مکانی پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی حاصل از مدل درختان رگرسیونی تقویت‌شده در شکل ۵ نشان داده شده است. مقدار پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی توسط این مدل از $0/011$ تا $0/799$ متغیر است. این مدل عموماً بخش‌های مجاور شبکه زهکشی در قسمت‌های میانی، شرقی و شمالی را به عنوان مساعدترین اراضی برای ایجاد و شکل‌گیری فرسایش خندقی معرفی کرد. مقدار میانه در پیش‌بینی انجام‌شده با استفاده از این مدل، $0/387$ به دست آمد. براساس تحلیل نتایج مدل‌های جنگل تصادفی و درختان

رگرسیونی تقویت‌شده برای شناسایی الگوی مکانی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی در این حوضه، نتایج نشان داد که عوامل محیطی مختلفی در شکل‌گیری فرسایش خندقی نقش داشته و تفسیر تنها یک عامل نمی‌تواند پیش‌بینی مناسبی برای فرآیند رخداد فرسایش خندقی ارائه دهد. عموماً بخش‌های میانی، شرقی و شمالی این حوضه که در مجاورت آبراهه‌ها و رودخانه‌ها هستند، از استعداد ایجاد فرسایش خندقی بیشتری برخوردار هستند. بخش‌های نزدیک به آبراهه‌ها و رودخانه‌ها از فرصت تجمع و گذر جریان آب برخوردارند که اصلی‌ترین شرط برای شکل‌گیری فرسایش خندقی است. براساس انطباق مکانی نقشه استعداد رخداد فرسایش خندقی و عوامل محیطی دیگر می‌توان بیان نمود که مناطقی که در ارتفاع کمتری قرار دارند به دلیل تجمع جریان‌های سطحی و زیرسطحی حوزه آبخیز، استعداد بیشتری برای شکل‌گیری خندق دارند. از نظر شاخص موقعیت شیب نسبی نیز می‌توان ملاحظه نمود که مناطقی که مناطق نزدیک یال‌ها و قله‌ها (شاخص موقعیت شیب نسبی زیاد) دارای استعداد شکل‌گیری فرسایش خندقی کمتری نسبت به زمین‌های پای دامنه‌ها و زمین‌های دشتی (شاخص موقعیت شیب نسبی کم) دارند. مناطقی که نزدیک جاده‌ها هستند، بیشتر در معرض شکل‌گیری فرسایش خندقی هستند، زیرا جریان آب تجمع‌یافته در حاشیه جاده‌ها و همچنین جریان آبهاری شدید در پایین‌دست زیرگذر جاده‌ها شرایط مساعدی برای تشکیل فرسایش خندقی دارند.



شکل ۵- نقشه پیش‌بینی فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار با استفاده از مدل درختان رگرسیونی تقویت‌شده

Figure 5- Gully erosion susceptibility map using Boosted Regression Trees model in the Talwar watershed

مستعد فرسایش خندقی قادر می‌سازد.

ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌های مورد استفاده

دقت پیش‌بینی دو مدل جنگل تصادفی و درختان رگرسیونی تقویت‌شده براساس داده‌های گروه اعتبارسنجی (۳۰ درصد خندق‌های مورد مطالعه) و معیار ارزیابی مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (AUC) در جدول ۱ نشان داده شده است. از آنجایی که معیار مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده، یک روش مستقل از آستانه است، همواره به‌عنوان روش اصلی در ارزیابی دقت پیش‌بینی مکانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. براساس اعتبارسنجی انجام‌شده، مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده در مدل‌های جنگل تصادفی و درختان رگرسیونی تقویت‌شده و به‌ترتیب ۰/۹۵۲ و ۰/۸۹۱ به‌دست آمد. بنابراین، مدل جنگل تصادفی دقت بیشتری در پیش‌بینی مکانی ایجاد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار دارد. همچنین براساس میزان معیار AUC، مدل جنگل تصادفی از نظر دقت و کارایی، در گروه عالی (۰/۹ < AUC) و مدل درختان رگرسیونی تقویت‌شده در گروه خیلی خوب (۰/۸ < AUC < ۰/۹) قرار گرفتند.

یافته‌های پژوهش در کارایی بالاتر مدل جنگل تصادفی در پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی، با نتایج پژوهش‌های رحمتی و همکاران (Rahmati et al., 2017)، گاین و همکاران (Gayen et al., 2019)، گروسی و همکاران (Garosi et al., 2019)، ویی و همکاران (Wei et al., 2022) و ور و همکاران (Were et al., 2023) مطابقت و همخوانی دارد. دلیل برتر بودن عملکرد مدل جنگل تصادفی به ساختار و رویکرد مدل‌سازی آن ارتباط دارد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به عدم حساسیت مدل به تعداد داده، عدم حساسیت مدل به داده‌های پرت، توانایی مدل در پردازش داده‌های حجیم و همچنین جلوگیری از بیش‌برازش^۱ مدل اشاره کرد.

همچنین به‌عنوان یک موضوع قابل توجه، میزان بارندگی الزاماً رابطه مستقیمی با شکل‌گیری فرسایش خندقی ندارد. مناطق جنوبی حوزه آبخیز تلوار که بیشترین ارتفاع را به خود اختصاص داده‌اند، میانگین بارندگی سالانه بالاتری نسبت به دیگر قسمت‌های منطقه مورد مطالعه دارند، اما به دلیل فراهم نبودن سایر شرایط مورد نیاز برای شکل‌گیری فرسایش خندقی، استعداد رخداد این پدیده کمتر از دیگر قسمت‌های منطقه مورد مطالعه به دست آمد. نتایج نشان داد که تشکیل فرسایش خندقی الزاماً مشابه فرسایش‌های سطحی، شیاری و آبراهه‌ای نبوده و بارندگی تنها یکی از عوامل متنوع اثرگذار بر شکل‌گیری آن است. یافته‌های این پژوهش حاکی از آن است که اگرچه مناطق شمالی و شمال شرقی حوزه آبخیز تلوار میانگین بارندگی سالانه کمتری نسبت به دیگر قسمت‌های منطقه مورد مطالعه داشتند، تجمع رواناب‌ها و جریان شبکه زهکشی این حوزه آبخیز در این قسمت‌ها به‌دلیل فراهم بودن دیگر شرایط محیطی، نقش مهمی در تشکیل فرسایش خندقی داشته است. هنگامی که شاخص توان جریان افزایش می‌یابد، شرایط برای تبدیل شدن چاله‌ها، شیارها و حفره‌ها (فرسایش لانه روباهی) به خندق فراهم می‌شود. براساس ارتباط میان نقشه شاخص رطوبت توپوگرافی و نقشه‌های استعداد رخداد فرسایش خندقی، مناطقی که در پایین‌دست حوزه آبخیز قرار دارند به دلیل شیب کم اراضی و وجود سطح تولیدکننده رواناب بیشتر در بالادست، جریان آب عبوری از این مناطق به سمت خروجی، فرصت بیشتری برای نفوذ آب به داخل زمین، توسعه فرسایش‌های لانه روباهی و شکل‌گیری خندق‌ها ایجاد می‌نماید. همچنین نتایج نشان داد که کلاس بافت خاک لومی در صورت فراهم بودن شرایط محیطی دیگر، استعداد بیشتری برای شکل‌گیری فرسایش خندقی داشته است. درنهایت می‌توان بیان نمود که تشکیل فرسایش خندقی وابسته به عوامل محیطی متعددی است. مدل‌های یادگیری ماشینی قابلیت بالایی برای تحلیل مکانی ارتباط رخداد فرسایش خندقی و عوامل محیطی مختلف دارد که این مدل‌ها را برای شناسایی مناطق

جدول ۱- دقت مدل‌های استفاده‌شده برای پیش‌بینی مکانی ایجاد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار

Table 1- The accuracy of the applied models for gully erosion generation in the Talwar watershed

مدل Model	مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (AUC) Area under the ROC curve (AUC)
جنگل تصادفی Random Forest	0.952
درختان رگرسیونی تقویت‌شده Boosted Regression Trees	0.891

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با عنایت به محدودیت پایگاه داده اطلاعات مکانی از نظر ماهیت عوامل محیطی و قدرت تفکیک مکانی در کشور، در این پژوهش کارایی دو مدل یادگیری ماشینی جنگل تصادفی و درختان رگرسیونی تقویت‌شده در حوزه آبخیز تلوار براساس اطلاعات میدانی با یکدیگر مقایسه شدند. نقشه استعداد رخداد فرسایش خندقی حاصل از مدل جنگل تصادفی از دقت بالاتری نسبت به مدل درختان رگرسیونی تقویت‌شده برخوردار است. براساس نتایج این پژوهش، همه عوامل محیطی مختلف شامل ارتفاع، جهت شیب، موقعیت شیب نسبی، انحنای سطح، انحنای مقطع، درجه شیب، شاخص توان جریان، شاخص ناهمواری توپوگرافی، شاخص رطوبت توپوگرافی، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، میانگین بارندگی سالانه، رده خاک، بافت خاک، فاصله از آبراهه و فاصله از جاده در رخداد فرسایش خندقی اثرگذار بودند. در حوزه آبخیز تلوار، فاصله از جریان، انحنای مقطع، انحنای سطح، بافت خاک و سنگ‌شناسی نسبت به دیگر عوامل محیطی نقش مهمتری در شکل‌گیری فرسایش خندقی داشتند. نقشه استعداد رخداد فرسایش خندقی مناطقی ابزاری مناسب برای کارشناسان و مدیران منابع طبیعی و آبخیزداری است. قطعاً معطوف کردن اقدامات اجرایی حفاظت خاک و برنامه‌های مدیریتی در مناطق مستعد ایجاد فرسایش خندقی در حوزه‌های آبخیز کشور، موجب ارتقاء عملکرد و بهینه‌سازی اعتبارات مالی ادارات منابع طبیعی و آبخیزداری خواهد شد. بانک اطلاعات مکانی

خندق‌ها و همچنین لایه‌های عوامل محیطی حوزه‌های آبخیز، از مهمترین و ضروری‌ترین پیش‌نیازها به‌منظور پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی محسوب می‌شوند. بنابراین، پیشنهاد می‌شود دقت لایه‌های محیطی مؤثر در ایجاد فرسایش خندقی، در دستگاه‌های اجرایی افزایش یابد تا میزان کارایی و عملکرد مدل‌های هوش مصنوعی نیز ارتقاء یابد.

سپاسگزاری

این مقاله برگرفته از بخشی از نتایج پروژه تحقیقاتی مستقل با عنوان "مدل‌سازی استعداد وقوع خندق در حوضه تلوار استان کردستان و ارزیابی قابلیت تعمیم آن به حوضه بابا عرب استان فارس" با کد مصوب ۰۳۰۱۰۰۰۰۱۳-۲۹-۵۳-۲ در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری است. نویسندگان این اثر، بر خود فرض می‌دانند از حمایت‌های مادی و معنوی آن پژوهشکده و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان، تشکر و قدردانی کنند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

References

- Amiri, M., Pourghasemi, H.R., Ghanbarian, Gh.A., & Afzali, S.F. (2020). Spatial modeling of gully erosion in Maharlou Watershed using different scenarios and Weights-of-evidence algorithm. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 11(4), 1016-1032. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.1007/978-3-030-01440-7_59
- Asadi Nalivan, O., Rabet, A., Vakili tajareh, F., Ramezani, M., Momeni, M., & Heydari, K. (2023). Zoning gully erosion susceptibility using ANN, CART and RF models. *Watershed Engineering and Management*, 15(2), 155-171. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2022.356379.1920>
- 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(1), 105229. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2024.105229>
- Conoscenti, C., Agnesi, V., Cama, M., Caraballo- Arias, N.A., & Rotigliano, E. (2018). Assessment of gully erosion susceptibility using multivariate adaptive regression splines and accounting for terrain connectivity. *Land Degradation & Development*, 29(3), 724-736. <https://doi.org/10.1002/ldr.2772>
- Conoscenti, C., Angileri, S., Cappadonia, C., Rotigliano, E., Agnesi, V., & Märker, M. (2014). Gully erosion susceptibility assessment by means of GIS-based logistic regression: A case of Sicily (Italy). *Geomorphology*, 204(1), 399-411. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.08.021>
- Emadodin, S., Omid, M., Arekhi, S., & Karam, A. (2021). Assessment the Gully Erosion Risk in Quyjoq watershed. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 10(30), 17-34. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22111/jneh.2020.34212.1662>
- Garosi, Y., Sheklabadi, M., Conoscenti, C., Pourghasemi, H.R., & Van Oost, K. (2019). Assessing the performance of GIS-based machine learning models with different accuracy measures for determining susceptibility to gully erosion. *Science of the Total Environment*, 664(1), 1117-1132. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.093>

8. Garosi, Y., Sheklabadi, M., Pourghasemi, H.R., Besalatpour, A.A., Conoscenti, C., & Van Oost, K. (2018). Comparison of differences in resolution and sources of controlling factors for gully erosion susceptibility mapping. *Geoderma*, 330(1), 65-78. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.05.027>
9. Gayen, A., Pourghasemi, H.R., Saha, S., Keesstra, S., & Bai, S. (2019). Gully erosion susceptibility assessment and management of hazard-prone areas in India using different machine learning algorithms. *Science of the Total Environment*, 668(1), 124-138. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.436>
10. Ghaderi, N., Ghodosi, J., Tabatabai, M.R., & Khaledian, H. (2000). Zoning of gully erosion risk in the Talwar Chay watershed of Kurdistan province using GIS. Report of a Research Project in Soil Conservation and Watershed Management Research Institute. Identical Code 18781476, p. 139. (In Persian with English abstract). <http://fipak.areeo.ac.ir/site/catalogue/18781476>
11. Ghorbanzadeh, O., Shahabi, H., Mirchooli, F., Valizadeh Kamran, K., Lim, S., Aryal, J., Jarihani, B., & Blaschke, T. (2020). Gully erosion susceptibility mapping (GESM) using machine learning methods optimized by the multi-collinearity analysis and K-fold cross-validation. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), pp.1653-1678. <https://doi.org/10.52547/jwmr.12.24.298>
12. Igwe, P.U., Chinedu, O.C., Nlem E.U., Nwezi, C.C., & Ezekwu, J.C. (2018). A review of landscape design as a means of controlling gully erosion. *International Journal of Environment Agriculture and Biotechnology*, 3(1), 103-111. <https://doi.org/10.22161/ijeab/3.1.13>
13. Javidan, N., Kavian, A., Rajabi, S., Pourghasemi, H.R., & Jafarian, Z. (2023). Identification the areas prone to gully erosion and landslides in the form of two-hazards map using machine learning models in Gorganrood watershed. *Iranian Journal of Watershed Management Science*, 17(62), 75-85. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.1007/978-3-030-23243-6_29
14. Jurchescu, M., & Grecu, F. (2015). Modelling the occurrence of gullies at two spatial scales in the Olteț Drainage Basin (Romania). *Natural Hazards*, 79(1), 255-289. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1981-6>
15. Nyssen, J., Poesen, J., Moeyersons, J., Luyten, E., Veyret- Picot, M., Deckers, J., Haile, M., & Govers, G. (2002). Impact of road building on gully erosion risk: a case study from the northern Ethiopian highlands. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 27(12), 1267-1283. <https://doi.org/10.1002/esp.404>
16. Rahmati, O., Soleimanpour, S.M., Shadfar, S., & Zahedi, S. (2023). Modeling gully erosion susceptibility in Talwar watershed, Kurdistan province and evaluating the model transferability to Baba-arab watershed. Final Report of Research Project, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, 76pp. Project code: 2-53-29-013-000301. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.52547/jwmr.12.24.298>
17. 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(1), 118-137. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.09.006>
18. Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H.R., & Feizizadeh, B. (2019). Assessing the effectiveness of the maximum entropy model to gully erosion susceptibility prediction in the Kashkan-Poldokhtar Watershed. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 10(4), 727-738. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.09.006>
19. Rahmati, O., Soleimanpour, S.M., & Shadfar, S. (2024). Principles of spatial modeling of gully erosion using artificial intelligence models. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute Press, P. 158. (In Persian with English abstract).
20. Rangzan, K., Zaheri Abdehvand, Z., & Mokarram, M. (2022). Determining areas prone to gully erosion using fuzzy membership function (Case study: Mohr City in the south of Fars province). *Quantitative Geomorphological Researches*, 10(4), 56-74. (In Persian with English abstract). DOR: [20.1001.1.22519424.1401.10.4.4.9](https://doi.org/10.22519424.1401.10.4.4.9)
21. Refahi, H.Gh. (2017). Water Erosion and Its Control. Tehran University Press, 7th edition, 672 pages. (In Persian)
22. Saha, S., Roy, J., Arabameri, A., Blaschke, T., & Tien Bui, D. (2020). Machine learning-based gully erosion susceptibility mapping: A case study of Eastern India. *Sensors*, 20(5), p.1313. <https://doi.org/10.3390/s20051313>
23. Servati, M.R., Ghodosi, J., & Dadkhah, M. (2008). Factors affecting the formation and spread of gully erosion in loess. *Research and Construction*, 21(1), 20-33. (In Persian with English abstract).
24. Shahabi, H., Amiri, Z., & Shirzadi, A. (2022). Prediction of Gully Erosion Susceptibility and Its Hazards in Kloche Bijar Watershed Using Spatial Predictive Models. *Environmental Management Hazards*, 9(2), 89-107. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jhsci.2022.348010.742>
25. Soleimani, F., Soufi, M., & Arsham, A. (2017). Determination of Effective Factors in Gullies Development in Modares Watershed of Shushtar. *Water and Soil*, 31(5), 1432-1446. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v31i5.63329>
26. Soleimanpour, S., Soufi, M., & Ahmadi, H. (2009). Determining Effective Factors on Gully Development in Konartakhte Region, Fars Province. *Water and Soil*, 23(1), 131-141. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.1545>
27. Vosoghi, S., Zakerinejad, R., & Entezari, M. (2025). Prediction of Gully Erosion and identifying factors affecting

- it using the Maximum Entropy Model and BCC-CSM2-MR climate change models for the years 2020-2040 (case study: Alamarvdasht watershed). *Journal of Geography and Planning*, 28(90), 163-141. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22034/gp.2023.57572.3169>
28. Wei, Y., Liu, Z., Zhang, Y., Cui, T., Guo, Z., Cai, C., & Li, Z. (2022). Analysis of gully erosion susceptibility and spatial modelling using a GIS-based approach. *Geoderma*, 420(1), 115869. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115869>
29. Were, K., Kebeeny, 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>
30. Zakerinejad, R., & Alvandi, P. (2023). Spatial prediction of gully erosion using TanDEM-X data and maximum entropy model (A case study: Khasoyeh watershed, in Southeast of Fars Province). *Environmental Erosion Research*, 13(1), 96-113. (In Persian with English abstract). <http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-705-en.html>