Natural Disasters

Homepage: https://disaster.ndri.ac.ir/

Assessment of gully erosion-prone areas in the Aleshtar basin using machine learning models

Ali Davoudi[1]✉, **Amir Karam**[2], **Parviz Zeaiean Firouzabadi**[3], and **Ali Ahmadabadi**[4]

1. Corresponding author, Ph.D. Student, Department of Geomorphology, Faculty of Geography, Kharazmi University, Tehran, Iran. E-mail: davoodi@khu.ac.ir
2. Associate Professor, Department of Geomorphology, Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran. E-mail: karam@khu.ac.ir
3. Professor, Department of Remote Sensing and Geographic Information Systems, Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran. E-mail: zeaiean@khu.ac.ir
4. Associate Professor, Department of Geomorphology, Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran. E-mail: ahmadabadi@khu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 20 February 2025
Received in revised form 09 March 2025
Accepted 25 March 2025
Available online 29 March 2025

Keywords:
Gully erosion,
Machine learning model,
Aleshtar watershed,
Geographic Information,
System GIS,
Land management,
BLM model.

ABSTRACT

Objective: Gully erosion is one of the most prominent forms of water erosion, with significant impacts on land degradation, reduced soil fertility, and increased sedimentation in water resources.

Method: In this study, to identify and map areas susceptible to gully erosion in the Aleshtar watershed, Generalized Linear Models (GLM), Boosted Regression Trees (BRT), and Boosted Linear Models (BLM) were used, along with spatial-environmental parameters influencing the occurrence of gully erosion, and the R software. The variables examined included topographic, climatic, hydrological, vegetation cover, land use, and physical and chemical soil characteristics, which were extracted using Geographic Information Systems (GIS) and remote sensing data.

Results: Spatial distribution assessment of gully-prone areas by all three models showed that the marginal areas of the Aleshtar plain, including the central, southern, and western parts of the watershed, have the highest susceptibility to gully erosion. Model accuracy evaluation using the ROC curve indicated that the BLM model (AUC = 0.84) performed better at identifying high-risk gully erosion areas than the GLM and BRT models. Based on the BLM model, 39% of the watershed falls into the very high and high susceptibility classes, 22% into the moderate class, and 39% into the low and very low susceptibility classes. Analysis of the importance of variables used in modeling showed that distance from rivers, Topographic Wetness Index (TWI), geological units, Terrain Ruggedness Index (TRI), and precipitation are the most influential factors in the occurrence of this phenomenon.

Conclusion: The results of this study can serve as an effective tool in land management and erosion mitigation planning. It is recommended that future studies use advanced hybrid models and higher-resolution data to improve prediction accuracy and provide more optimal solutions.

Cite this article: Davoudi, A., Karam, A., Zeaiean Firouzabadi, P., & Ahmadabadi, A. (2025). Assessment of gully erosion-prone areas in the Aleshtar basin using machine learning models. *Natural Disasters*, *1* (1), 63-82.

© The Author(s).

Publisher: Natural Disasters Research Institute (NDRI).

سوانح طبیعی
Homepage: https://disaster.ndri.ac.ir/

ارزیابی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی در حوضه آبریز الشتر با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین

علی داودی[1]✉، امیر کرم[2]، پرویز ضیائیان فیروزآبادی[3]، علی احمدابادی[4]

۱. نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. رایانامه: davoodi@khu.ac.ir
۲. دانشیار، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. رایانامه: karam@khu.ac.ir
۳. استاد، گروه سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. رایانامه: zeaiean@khu.ac.ir
۴. دانشیار، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. رایانامه: ahmadabadi@khu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۰۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۰۵
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۹

کلیدواژه‌ها:
فرسایش خندقی،
مدل یادگیری ماشین،
حوضه آبریز الشتر،
سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)،
مدیریت اراضی.

چکیده

هدف: فرسایش خندقی یکی از بارزترین اشکال فرسایش آبی است که تأثیرات قابل‌توجهی بر تخریب اراضی، کاهش حاصلخیزی خاک و افزایش رسوب‌گذاری در منابع آبی دارد. در این پژوهش، به‌منظور شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مستعد فرسایش خندقی در حوضه آبریز الشتر از مدل‌های خطی تعمیم‌یافته (GLM)، درخت رگرسیون تقویت‌شده (BRT) و مدل خطی تقویت‌شده (BLM) استفاده شده است.

روش پژوهش: پارامترهای فضایی–محیطی مؤثر بر رخداد فرسایش خندقی زمین و نرم‌افزار R استفاده شده است. متغیرهای موردبررسی شامل عوامل توپوگرافی، اقلیمی، هیدرولوژیکی، پوشش گیاهی، کاربری اراضی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بودند که با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و داده‌های سنجش از دور استخراج شدند.

یافته‌ها: ارزیابی توزیع فضایی مناطق مستعد فرسایش خندقی توسط هر سه مدل نشان داد که مناطق حاشیه دشت الشتر که شامل مناطق مرکزی، جنوب و غرب حوضه هستند بیشترین استعداد رخداد فرسایش خندقی را دارند. ارزیابی دقت مدل‌ها با استفاده از منحنی راک نشان داد که مدل BLM با AUC=0.84 عملکرد بهتری در شناسایی مناطق پرخطر فرسایش خندقی نسبت به مدل‌های GLM و BRT دارد. بر اساس مدل BLM، ۳۹ درصد حوضه دارای استعداد خیلی زیاد و زیاد فرسایش خندقی، ۲۲ درصد از حوضه در کلاس متوسط و ۳۹ درصد نیز در کلاس‌های کم و خیلی کم استعداد فرسایش خندقی قرار می‌گیرد. تحلیل اهمیت متغیرهای مورداستفاده در مدل‌سازی نشان داد که فاصله از رودخانه، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، واحدهای زمین‌شناسی، شاخص زبری سطح (TRI) و میزان بارش، تأثیرگذارترین عوامل در وقوع این پدیده هستند.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر در مدیریت اراضی و تدوین برنامه‌های کاهش فرسایش مورداستفاده قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی از مدل‌های ترکیبی پیشرفته و داده‌های با وضوح بالاتر برای بهبود دقت پیش‌بینی و ارائه راهکارهای بهینه‌تر استفاده شود.

استناد: داودی، علی؛ کرم، امیر؛ ضیائیان فیروزآبادی، پرویز؛ احمدآبادی، علی. (۱۴۰۴). ارزیابی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی در حوضه آبریز الشتر با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین. *سوانح طبیعی*، ۱ (۱)، ۶۳-۸۲.

CC BY NC
© نویسندگان.

ناشر: پژوهشکده سوانح طبیعی.

مقدمه

فرسایش خاک به‌طور تقریبی عامل تخریب ۵۸ درصد از اراضی سطح جهان است (Arabameri et al., 2018). از میان انواع فرسایش، فرسایش خندقی به‌عنوان بارزترین نوع فرسایش آبی خاک شناخته می‌شود (Li et al., 2016). این نوع فرسایش یک فرایند آستانه‌ای است و معمولاً هنگامی رخ می‌دهد که شرایط از آستانه‌های خاصی فراتر رود (Poesen et al., 2003). این آستانه‌ها تحت تأثیر عوامل مختلف محیطی مانند شرایط آب و هوایی، ویژگی‌های توپوگرافی، بافت خاک، سنگ‌شناسی، رطوبت پیشین خاک و نوع کاربری زمین قرار می‌گیرند (Luffman et al., 2015; Slimane et al., 2018; Rong et al., 2019).

رواناب سطحی که پس از بارندگی آغاز می‌شود، ازجمله رواناب ناشی از ذوب برف و بارش، نقش اصلی در قدرت فرسایش خندقی دارد (Yu et al., 2019, Yuan et al., 2020). فرسایش خندقی به‌طورمعمول یک کانال عمیق ایجاد می‌کند که توسط آب‌های جاری سطحی شکل می‌گیرد و طی این فرایند ذرات خاک و دیگر مواد سطحی از بین می‌روند و منتقل می‌شوند (Martınez-Casasnovas, 2003). این نوع فرسایش مشکلات زیست‌محیطی متعددی ازجمله بیابان‌زایی، طغیان سیلاب و رسوب‌گذاری در دریاچه‌ها را به وجود می‌آورد (Martınez-Casasnovas, 2003: Arabameri et al., 2020). همچنین، کاهش حاصلخیزی خاک و افت بهره‌وری کشاورزی از دیگر پیامدهای آن است که آثار منفی بر اقتصاد جوامع و کشورها می‌گذارد (Seutloali et al., 2016: Conoscenti et al., 2014). گفته می‌شود خندق‌ها بین ۱۰ تا ۹۴ درصد از کل رسوبات را در حوضه‌های آبخیز دنیا تأمین می‌کنند (Poesen et al., 2003). به‌منظور شناسایی پهنه‌های مستعد فرسایش خندقی خاک، بررسی آثار زیست‌محیطی، شناخت عوامل مؤثر در فرسایش خندقی، مطالعات زیادی با استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS[1]) و سنجش از دور (RS[2]) انجام شده است. نقشه‌برداری مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی (GESM[3]) یکی از روش‌های مفیدی است که اطلاعات مفیدی را برای برنامه‌ریزی و مدیریت مخاطرات ناشی از فرسایش خندقی در اختیار متخصصان و مدیران قرار می‌دهد (Zabihi et al., 2018). روش‌های آماری زیادی مبتنی بر GIS و نمایش بصری مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی و یا بروز هر مخاطره طبیعی وجود دارد.

پیشینه پژوهش

هیتوری[4] و همکاران (۲۰۲۴) از چهار مدل یادگیری ماشین ترکیبی شامل: وزن شواهد – پرسپترون چندلایه[5] (MLP- WoE)، وزن شواهد –K نزدیک‌ترین همسایگان[6](KNN- WoE)، وزن شواهد – رگرسیون لجستیک[7] (LR- WoE) و وزن شواهد – جنگل تصادفی[8] (RF- WoE)، برای ارزیابی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی در حوضه آبخیز اوار در دشت سوس[9] در مراکش استفاده کردند. ارزیابی دقت نتایج آن‌ها با استفاده از منحنی ROC[10] و برآورد سطح زیر منحنی (AUC[11]) نشان داد که مدل RF-WoE دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها با میزان AUC=0.8 دارد. احمدپور و همکاران (۲۰۲۱) ارزیابی حساسیت فرسایش خندقی در حوضه آبخیز کندوران را با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و الگوریتم بوروتا موردبررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل مجموعه بهترین عملکرد را نسبت به سایر مدل‌ها داشت، همچنین مؤثرترین عوامل در ترسیم نقشه مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی محدوده مطالعاتی، توپوگرافی، فعالیت‌های انسانی و زمین‌شناسی بود. آرابامری[12] و همکاران (۲۰۲۱) اقدام به پیش‌بینی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی با استفاده از الگوریتم‌های ترکیبی الگوریتم ژنتیک–

1. Geographic Information System
2. Remote Sensing
3. Gully-Erosion Susceptibility Mapping
4. Hitouri
5. Weight of Evidence -Multilayer Perceptron
6. Weight of Evidence eK Nearest neighbor's
7. Weight of Evidence - Logistic Regression
8. Weight of Evidence - Random Forest
9. Souss plain
10. Relative Operating Characteristic
11. Area under the ROC curve
12. Arabameri

افزایش گرادیان ناگهانی[۱۳] (GE-XGBoost) در حوضه سگزی ایران مرکزی کردند. نتایج اکتشافی نشان داد که مدل پیشنهادی GEXGBoost با دقت پیش‌بینی موردنظر (۸۹/۵۶ درصد) دقت بسیار مطلوبی برای ترسیم نقشه مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی در مقیاس‌های بزرگ دارد. دبانشی و پال[۱۴] (۲۰۲۰) ارزیابی حساسیت فرسایش خندقی در حوضه رودخانه مایوراکشی شرق هند را با استفاده از مدل ماتریس همبستگی و رگرسیون لجستیک موردمطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که مناطق مستعد به فرسایش خندقی شدید تقریباً ۱۶ درصد و مناطق با استعداد بالا تقریباً ۲۸ درصد از اراضی حوضه را شامل می‌شوند که این مناطق منطبق بر دشت‌های آبرفتی قدیمی‌تر و جدیدتر حوضه بودند. ایگو[۱۵] و همکاران (۲۰۲۰) از روش‌های نسبت فراوانی و روش تصمیم‌گیری سلسله مراتبی AHP در شهر گومبه و مناطق شمال شرقی نیجریه استفاده کردند به‌منظور شناسایی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی استفاده کردند. ارزیابی دقت مدل‌های آنان با داده‌های زمینی توسط شاخص AUC نشان داد که نسبت فراوانی با AUC:73 نسبت به مدل AHP با AUC:72 دقت بیشتری در شناسایی مناطق مستعد و ریسک فرسایش خندقی دارد. ذاکری نژاد و همکاران (۲۰۱۳) به‌منظور پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی در حوضه آبخیز خسویه از مدل CART استفاده کردند. آن‌ها نقشه نهایی را در ۵ کلاس؛ دارای خطر خیلی زیاد، خطر زیاد، خطر متوسط، کم‌خطر و خیلی کم‌خطر طبقه‌بندی که منطقه دارای خطر خیلی زیاد استعداد فرسایش خندقی ۱۰ درصد حوضه را شامل می‌شود. مددی و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از مدل‌های ماشین بردار پشتیبان[۱۶] (SVM) و درخت رگرسیون تقویت‌شده[۱۷] (BRT) اقدام به ارزیابی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی در حوضه مُهر استان فارس کردند. همچنین آن‌ها تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بر فرسایش خندقی با استفاده از رگرسیون چند متغیره بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ازنظر اهمیت متغیرها، در مدل SVM کاربری اراضی و در مدل BRT زمین‌شناسی بیشترین تأثیر را بر فرسایش خندقی دارد. ارزیابی دقت مدل‌های با استفاده منحنی ROC نشان داد که مدل BRT با AUC=94 بر مدل SVM با AUC=0/92 ارجحیت دارد. همچنین نتایج نشان داد متغیر میزان ماسه، نسبت جذب سدیم و مواد خنثی‌شونده بیشترین تأثیر را بر فرسایش خندقی دارد. رنگزن و همکاران (۲۰۲۲) به‌منظور تعیین مناطق مستعد فرسایش خندقی شهر مهر در جنوب استان فارس از توابع عضویت فازی و مدل تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مناطق واقع در مرکز حوضه (حدود ۱۵ درصد) دارای حساسیت بیشتری نسبت به فرسایش خندقی هستند و در مناطقی که مستعد فرسایش خندقی هستند خندق‌ها از وسعت و طول بیشتری برخوردار هستند. عمادالدین و همکاران (۲۰۰۰)، به‌منظور پهنه‌بندی خطر وقوع فرسایش خندقی در حوضه قویجق از روش شبکه عصبی پرسپترون چندلایه استفاده کردند. نتایج نشان داد که محدوده‌های با خطر بسیار زیاد شامل ۲۰ درصد اراضی حوضه، محدوده‌های با خطر زیاد ۳۰ درصد، مناطق با خطر متوسط ۲۴ درصد، مناطق با احتمال رخداد ضعیف ۱۶ و مناطق با احتمال رخداد خیلی ضعیف فرسایش خندقی ۱۰ درصد حوضه را در برمی‌گیرد همچنین مناطق دارای بیشترین احتمال رخداد فرسایش خندقی منطبق بر آبراهه و راه ارتباطی بود.

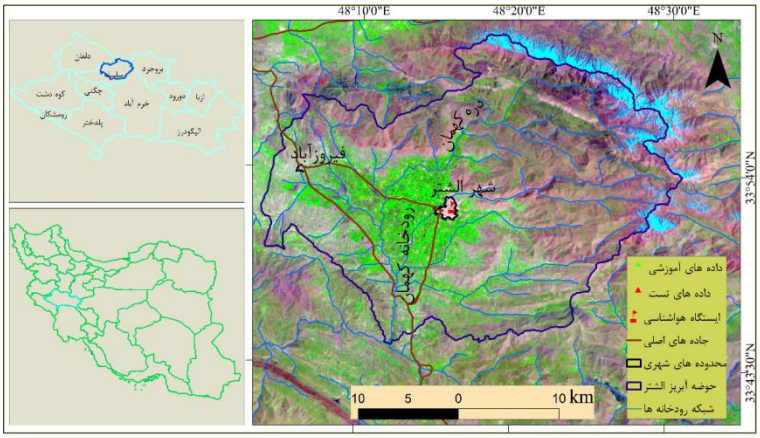
حدود ۶۰ درصد مساحت ایران در اقلیم نیمه‌خشک و خشک قرار دارد. تقریباً ۱۰۰ میلیون هکتار از این مناطق در برابر بیابان‌زایی آسیب‌پذیر هستند همچنین به‌طور تقریبی حدود ۱۲۵ میلیون هکتار از ۱۶۵ میلیون هکتار اراضی کشور دچار فرسایش آبی هستند (Refahi, 2009). ارزیابی توزیع نرخ فرسایش سالانه خاک با استفاده از مدل EPM نشان می‌دهد که مناطق زاگرس میانی و استان لرستان از محدوده‌های با نرخ نسبتاً بالای فرسایش خاک هستند که تلفات سالانه خاک آن‌ها بالاتر از ۹ تن در هکتار و اغلب بیشتر از ۱۸ تن در هکتار است (Mosafaei & Talebi, 2014). در لرستان به علت کوهستانی بودن، شیب بالا، سازندهای فرسایش پذیر و بارش بالا نسبت به میانگین کشوری میزان فرسایش خاک همواره نرخ بالایی را دارد (Bayat et al., 2011). بیشتر مساحت استان لرستان جزو مناطق سرآب حوضه‌های آبریز رودخانه دز و کرخه محسوب می‌شود که از منظر تولید

13. Extreme Gradient Boosting
14. Debanshi & Pal
15. Igwe
16. Support Vector Machines
17. Boosted Regression Tree

رسوب و انتقال آن به پشت سدهای قرار گرفته بر روی این رودخانه اهمیت و جایگاه ویژه‌ای دارد. حوضه آبریز الشتر جزو بالاترین بخش‌های حوضه آبریز کرخه بزرگ محسوب می‌شود که به دلیل داشتن دیم‌زارهای وسیع، جمعیت کوچ رو عشایری و بارش بالا نسبتاً بالا، نسبت به مسئله فرسایش و اشکال ناشی از آن حساسیت بالایی دارد که می‌تواند به‌عنوان یکی از منابع تولید رسوب در سرآب حوضه آبریز به‌طور بالقوه حجم زیادی از رسوب را به سرشاخه‌های کرخه و متعاقباً این رودخانه وارد کند (Karam et al., 2014). در بیشتر مراتع، تپه‌ماهورها و دیم‌زارهای این حوضه اغلب فرم‌های فرسایش آبی همچون فرسایش خندقی (شکل ۱) قابل‌مشاهده‌اند که این عامل می‌تواند نمایانگر فرسایش‌پذیری بالای حوضه آبریز و نرخ بالای تولید رسوب در آن باشد که تاکنون مطالعه‌ای پیرامون این مسئله در این حوضه انجام نگرفته است. ازآنجایی‌که بررسی میدانی و شناسایی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی و شناسایی عوامل مؤثر بر رخداد خندق‌ها ممکن است زمان‌بر، هزینه‌بر و مشکل باشد ترسیم نقشه GESM با استفاده از GIS و داده‌های فضایی راه‌حل بهینه‌ای به‌منظور شناسایی و توزیع فضایی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی و تدوین اولویت‌های حفاظتی در این حوضه باشد. هدف از این پژوهش برآورد سطوح مستعد رخداد فرسایش خندقی با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین در حوضه آبریز الشتر است.

موقعیت منطقه موردمطالعه

حوضه آبریز الشتر با وسعت ۸۰۳ کیلومترمربع در شمال استان لرستان و شهرستان سلسله واقع شده است (شکل ۱). ارتفاع این حوضه از حداقل ۱۵۰۰ متر تا حداکثر ۳۶۰۰ متر متغیر بوده و میانگین ارتفاع آن ۲۱۰۰ متر است. بر اساس روش دومارتن، اقلیم این منطقه مدیترانه‌ای است و میانگین بارندگی سالانه آن ۵۰۶ میلی‌متر گزارش شده است (Haseli & Jalalian, 2014). این حوضه دارای زمستان‌های نسبتاً سرد و تابستان‌های مرطوب و معتدل است (Lashnivand et al., 2011). عمده بارش‌های این منطقه از امواج مدیترانه‌ای تأمین می‌شود و مشابه ویژگی‌های اقلیمی زاگرس، فصل بارندگی از پاییز آغاز شده و تا اواخر بهار ادامه دارد. در زمستان، بارش‌ها غالباً به‌صورت برف بوده و در اوایل و اواخر فصل بارندگی به شکل باران رخ می‌دهد (Jafari et al., 2023). میزان بارندگی مفید این حوضه در دشت‌ها ۴۴/۵۴ و در ارتفاعات ۲۵۹/۶۹ میلیون مترمکعب برآورد شده است.



شکل ۱. موقعیت حوضه آبریز الشتر و نمونه‌های برداشت‌شده در استان لرستان و شهرستان سلسله

سهم رواناب در دشت و ارتفاعات این حوضه به ترتیب ۱۶/۹۱ و ۸۶/۸۰ میلیون مترمکعب برآورد شده است. همچنین میزان نفوذ از بارندگی مفید در دشت ۲۷/۶۳ و در ارتفاعات ۱۷۲/۸۹ میلیون مترمکعب تخمین زده می‌شود. سفره آب زیرزمینی در این منطقه از نوع آزاد بوده و تمامی چاه‌های موجود در این محدوده در سفره‌های آبرفتی آزاد قرار دارند (Regional Water Joint Stock Company of Lorestan Province, 2003). رودخانه کهمان، به‌عنوان مهم‌ترین رودخانه این حوضه، از جنوب ارتفاعات گرین سرچشمه می‌گیرد، دشت الشتر را آبیاری کرده و درنهایت به رودخانه سیمره و سپس رود کرخه می‌پیوندد (Asghari Saraskanroud et al., 2014). ازنظر ژئومورفولوژیکی، این حوضه بخشی از واحد زاگرس مرتفع یا رورانده است که با گسل‌ها و شکستگی‌های فراوان ناشی از فعالیت‌های تکتونیکی مشخص می‌شود (Baharvand et al., 2013).

شکل ۲. برخی از اشکال فرسایش خندقی آب در مراتع و دیم‌زارهای حوضه آبریز الشتر (خطوط سیاه‌رنگ)

چهره غالب این حوضه، کوهستانی است؛ به‌طوری‌که ۷۳/۴ درصد از اراضی را کوه‌ها، ۱٫۶ درصد را تپه‌ها، ۴/۶ درصد را فلات‌ها و تراس‌های فوقانی، ۱۸/۶ درصد را دشت‌های دامنه‌ای، ۱/۴ درصد را واریزه‌های بادبزنی شکل و ۰/۴ درصد را اراضی مسکونی تشکیل می‌دهند (Haseli & Palouj, 2017). مناطق تپه‌ماهوری عمدتاً شامل دیم‌زارها و مراتعی هستند که پس از برداشت محصول، به‌عنوان چراگاه دامداران استفاده می‌شوند. حدود ۶۰ درصد از اراضی این حوضه به مرتع اختصاص دارد، اما فشار ناشی از چرای بی‌رویه باعث افزایش تخریب مراتع و شدت فرسایش شده است (Sadough et al., 2014). این حوضه به دلیل وجود فرسایش‌پذیری بالا و فرم‌های فرسایشی مانند خندق‌ها، بسیار آسیب‌پذیر است و این پدیده‌ها در چشم‌انداز منطقه به‌وضوح مشاهده می‌شوند (شکل ۲). ازنظر خاک‌شناسی، خاک‌های این منطقه در گروه خاک‌های قهوه‌ای قرار دارند که دارای افق تمرکز رس هستند. این خاک‌ها معمولاً عمیق بوده و دارای رنگ قهوه‌ای تیره تا قهوه‌ای مایل به قرمز با بافت سنگین هستند. در لایه‌های سطحی، ۳ تا ۱۵ درصد سنگریزه‌های درشت و در لایه‌های زیرین مقادیر زیادی آهک به‌صورت دانه‌های سخت مشاهده می‌شود (سازمان تحقیقات کشاورزی، ۱۳۷۰). باتوجه‌به پراکندگی خاک‌های قهوه‌ای در سطح حوضه و حساسیت نسبتاً بالای آن‌ها به فرسایش (Karam et al., 2014)، این حوضه از استعداد فرسایش‌پذیری بالایی برخوردار است.

داده‌های پژوهش

برای تهیه نقشه مناطق مستعد فرسایش خندقی از منابع داده‌های گوناگون شامل داده‌های دورسنجی، داده‌های برداشت‌شده توسط محقق و داده‌های رقومی سازمان‌های مرتبط با مدیریت آب و خاک مطابق جدول ۱ استفاده شده است. داده شاخص‌های مرتبط با توپوگرافی شامل طبقات ارتفاعی، شیب، جهات شیب، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص زبری توپوگرافی، شاخص قدرت جریان، و انحنای دامنه با استفاده از DEM دارای رزولوشن مکانی ۳۰ متر تهیه شدند. شاخص‌های مرتبط با پوشش گیاهی و رطوبت سطح حوضه نیز با استفاده از یک فریم تصویر ماهواره‌ای سنتیل-۲ در زمان حداکثر رشد پوشش گیاهی و عدم وجود پوشش برف وسیع در سطح حوضه (تاریخ تصویر ۲۰۲۳/۰۶/۲۹) تهیه شدند. لایه‌های بارش، بافت خاک و کاربری اراضی نیز از داده‌های موجود در ادارات کل استان لرستان تهیه شدند. به دلیل عدم وجود داده‌های مرتبط با شیمی خاک، این داده‌ها با استفاده از دستگاه‌های پرتابل PH متر و EC متر در زمان برداشت نمونه‌های تعلیمی از مناطق رخداد خندق‌ها نیز برداشت شدند و با استفاده از روش درون‌یابی Kriging این لایه‌ها نیز تهیه شدند.

جدول ۱. مشخصات داده‌های مورداستفاده جهت مدل‌سازی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی

داده‌ها	کارکرد و کارایی	تفکیک مکانی	منبع دسترسی
لایه رقومی ارتفاع (سنجنده SRTM)	تهیه لایه شاخص‌های توپوگرافیکی	۳۰×۳۰	سازمان زمین‌شناسی ایالات‌متحده آمریکا earthexplorer.usgs.gov
تصاویر سنجنده Sentinel-2	تهیه لایه شاخص‌های NDMI&NDVI	۲۰×۲۰	آژانس فضایی اتحادیه اروپا dataspace.copernicus.eu
داده‌های بارش ماهانه	تهیه لایه میانگین بارش سالانه ۲۰۱۰-۲۰۲۳	نقطه‌ای	اداره کل هواشناسی استان لرستان
لایه رقومی بافت خاک	تهیه لایه درصد رس، سیلت و ماسه	۱:۲۵۰۰۰	اداره کل جهاد کشاورزی استان لرستان

داده‌ها	کارکرد و کارایی	تفکیک مکانی	منبع دسترسی
داده‌های شیمی خاک	تهیه لایه پارامترهای PH ،EC	نقطه‌ای	پیمایش زمینی
نقشه زمین‌شناسی	تهیه لایه واحدهای زمین‌شناسی	۱:۱۰۰۰۰۰	سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور
کاربری اراضی	تهیه لایه کاربری اراضی	۱:۲۵۰۰۰	اداره کل منابع طبیعی استان لرستان
لایه رقومی آبراهه‌ها و جاده‌ها	تهیه لایه فاصله از رودخانه‌ها و جاده‌ها	۱:۱۰۰۰۰	Google Earth
داده‌های زمینی مناطق رخداد خندق‌ها	تهیه داده‌های آموزشی و صحت سنجی مدل‌ها	نقطه‌ای	پیمایش زمینی

آماده پارامترهای مدل‌سازی

برای مدل‌سازی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی باتوجه‌به پیشینه پژوهش از پارامترهای متعدد شامل: مقادیر بارش سالانه، توپوگرافی، پوشش گیاهی و زمین، ژئوشیمی و بافت خاک و تراکم عوامل خطی استفاده شده است.

پارامترهای توپوگرافیکی

ویژگی‌های توپوگرافی، مانند سطح زهکشی و شیب، برخی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر فرسایش خندقی هستند؛ زیرا بر حجم متمرکز و انرژی فرسایشی رواناب تأثیر می‌گذارند (Tang et al., 2023). ویژگی‌های توپوگرافی به‌طورکلی به‌عنوان عوامل اولیه‌ای در تشریح فرسایش خندقی در نظر گرفته می‌شوند (Gómez-Gutiérrez et al., 2015) بااین‌حال، هیچ قانون جهانی برای انتخاب پارامترهای توپوگرافی در مدل‌سازی مناطق مستعد فرسایش خندقی وجود ندارد (Tang et al., 2023). در این پژوهش برخی از پارامترهای توپوگرافی پرکاربرد در پیشینه پژوهش برای مدل‌سازی انتخاب شدند. این پارامترهای شامل لایه طبقات ارتفاعی، شیب و جهات شیب به همراه شاخص‌های توپوگرافیکی هستند که بر اساس روش و فرمول (جدول ۲) در نرم‌افزار Arc GIS تهیه شدند (شکل ۳).

جدول ۲. توضیح پارامترها و شاخص‌های توپوگرافی مشتق‌شده از DEM (Habib, 2021)

فرمول	توضیح	فاکتور
$PC = q^2r - 2pq\beta + p^2t/(q^2+p^2)\sqrt{1+q^2} + p^2$	درجه تغییر خمش در یک نقطه معین. p و q به ترتیب میزان تغییر ارتفاع در جهت x و y هستند و r و t شعاع انحنای نقطه هستند.	انحنای پلان [18]
$TWI = ln\ (A_s/tan\ \beta)\ A_s$ catchment area	تمایل سلول به تجمع آب را تعریف می‌کند	شاخص رطوبت توپوگرافی[19]
$SPI = A_s tan\ \beta$	فرسایش جریان بالقوه را در نقطه مشخص‌شده اندازه‌گیری می‌کند	شاخص قدرت جریان[20]
$TRI=\sqrt{\lvert(Max\ DEM^2 - (Min\ DEM^2\rvert}$	تفاوت ارتفاع یک نقطه را با میانگین ارتفاع نقاط اطراف آن اندازه‌گیری می‌کند.	شاخص زبری سطح[21]

عامل بارش

رواناب سطحی پس از شروع بارش، منابع اصلی قدرت فرسایش برای توسعه خندق، ازجمله رواناب ذوب برف و رواناب بارندگی است و تأثیر زیادی در شکل‌گیری و توسعه فرسایش خندقی دارد (Yuan et al., 2020). ویژگی‌های بارندگی مانند مقدار، شدت، شاخص فرسایندگی و مدت بارندگی معمولاً برای توصیف تأثیر بارندگی بر فرایند توسعه خندق استفاده می‌شود (Tang et al., 2022a). در این پژوهش، برای ارزیابی مناطق مستعد فرسایش خطی توسط مدل‌های یادگیری ماشین از میانگین سالانه بارش حوضه الشتر طی سری زمانی ۲۰۲۳–۲۰۱۰ استفاده شده است، زیرا خندق‌ها به‌عنوان لندفرم‌های زمینی در دوره‌های زمانی بیشتر از یک سال شکل می‌گیرند؛ اگرچه از رخدادهای بارش فرین تأثیرپذیری بیشتری دارند (Tang et al., 2023). برای تهیه این

18. Plan curvature
19. Topographic Wetness Index
20. Stream Power Index
21. Train Roughness Index

لایه ابتدا آمار ماهانه بارش ایستگاه‌های درون و مجاور حوضه طی دوره زمانی (۲۰۱۰-۲۰۲۳) گردآوری شد، سپس میانگین بارش سالانه طی سری زمانی در سطح حوضه آبریز محاسبه و با استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ متناسب با ابعاد DEM درون‌یابی شد (شکل ۴ الف).

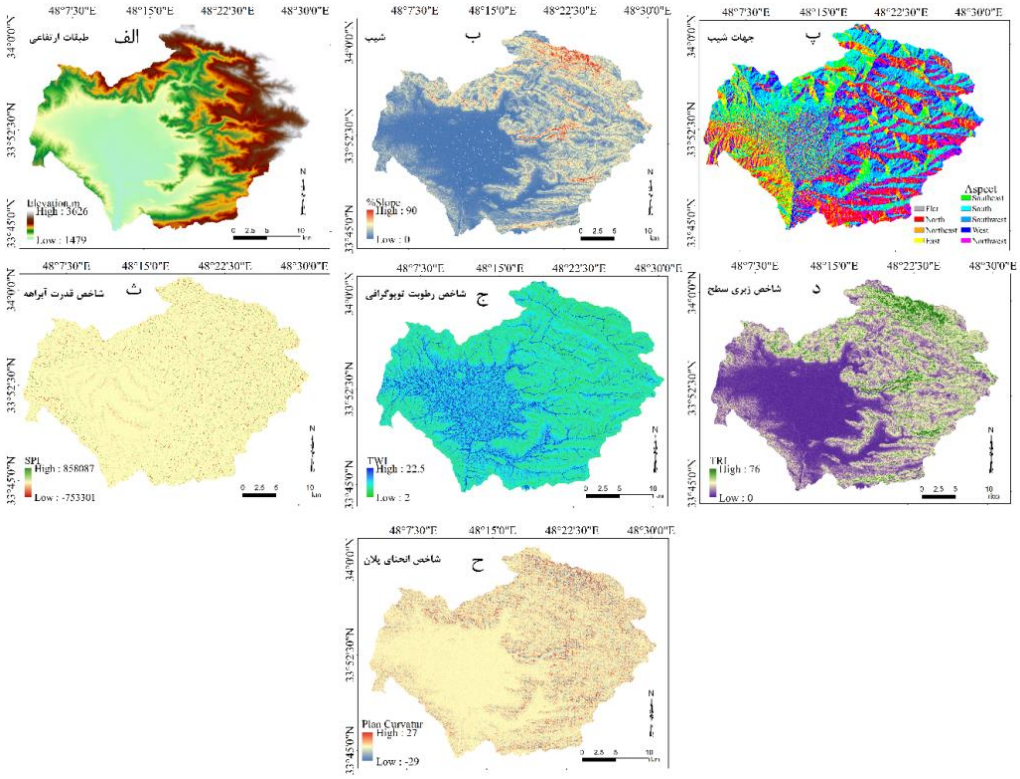
شاخص‌های طیفی

پوشش گیاهی با کاهش رواناب و بهبود مقاومت خاک در برابر فرسایش می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر فرسایش خندقی داشته باشد. این عامل باعث افزایش زبری و نفوذپذیری حوضه یا کف آبکند شده و از این طریق حجم و سرعت رواناب سطحی را کاهش دهد، همچنین می‌تواند آبشستگی رواناب را ضعیف کند و به کنترل عقب‌نشینی خندق کمک کند (Lou et al., 2023). توزیع فضایی پوشش گیاهی نیز در رخداد فرسایش خندقی مهم است، زیرا ساختار چشم‌انداز نحوه اتصال و قطع جریان آب و رسوب را کنترل می‌کند (Shi et al., 2022). در این پژوهش برای ارزیابی نقش پوشش گیاهی در فرسایش خندقی از شاخص نرمال شده اختلافی پوشش گیاهی (NDVI)[22] و شاخص نرمال‌شده اختلافی رطوبت (NDMI)[23] مطابق روابط ۱ و ۲ استفاده شده است.

$$NDVI = (B08 - B04) / (B08 + B04) \quad \text{رابطه ۱}$$

$$NDMI = (B08 - B11) / (B08 + B11) \quad \text{رابطه ۲}$$

باندهای مورداستفاده برای شاخص‌های طیفی شامل باند ۴، ۸ و ۱۱ سنجنده سنتیل-۲ هستند که در طول موج‌های قرمز (۶۶۵nm)، مادون قرمز (۸۴۲nm) و مادون قرمز کوتاه (۱۶۱۰nm) قرار دارند. پس از تهیه لایه اولیه شاخص‌های طیفی با استفاده از دستور نمونه‌گیری مجدد[24]، لایه‌های نهایی با ابعاد لایه DEM تهیه شدند (شکل ۴ ب و پ).



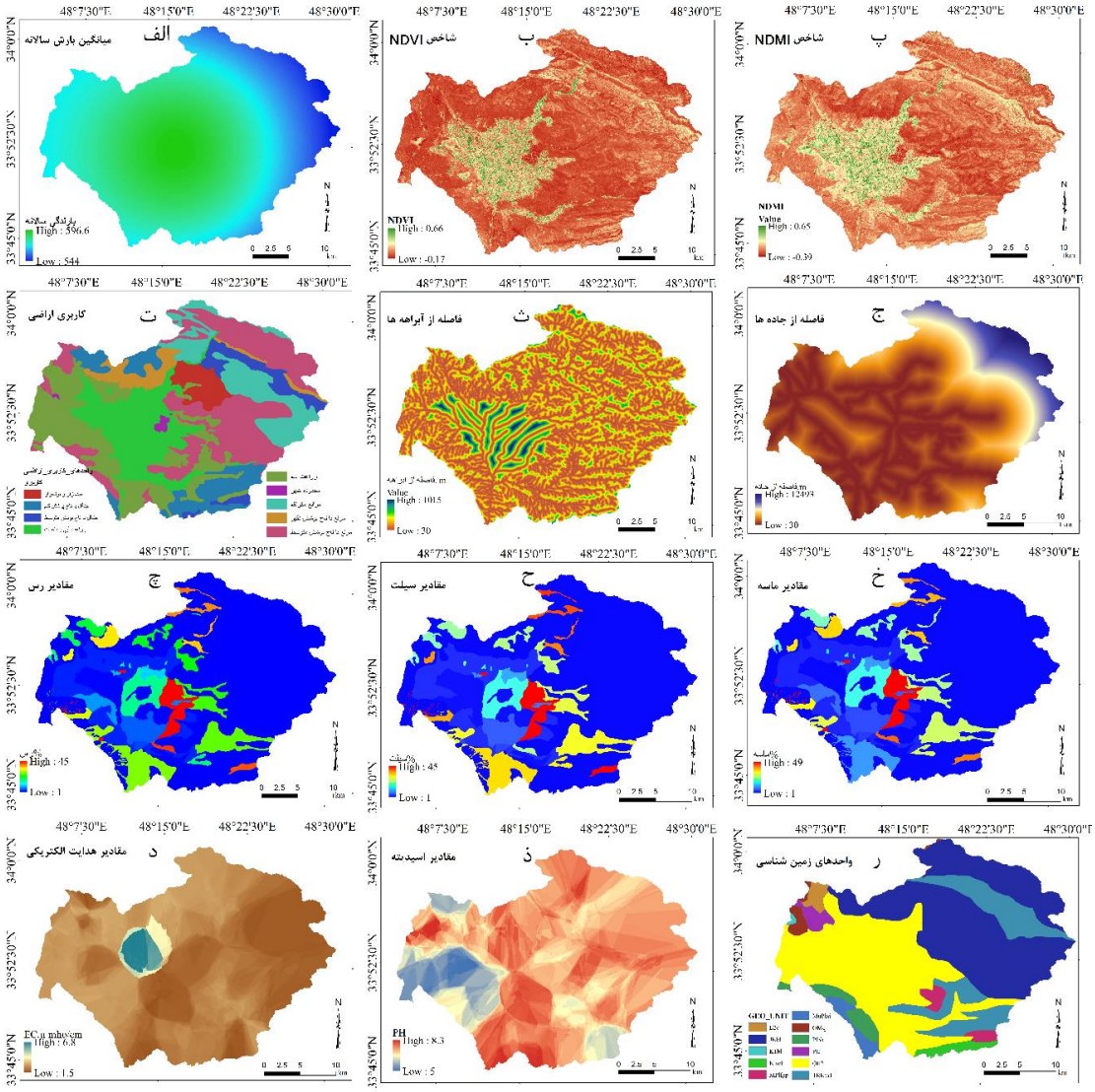
شکل ۳. پارامترهای توپوگرافی حوضه آبریز الشتر مشتق از DEM برای مدل‌سازی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی

کاربری اراضی

کاربری اراضی و نحوه فعالیت انسان در اراضی یکی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر نرخ و نوع فرسایش خاک است. در محیط‌های

22. Normalized Difference Vegetation Index
23. Normalized Difference Moisture Index
24. Resampling

انسان‌ساخت مانند شهر و روستاها به علت افزایش سطوح نفوذناپذیر و افزایش رواناب نرخ فرسایش در حاشیه این مناطق افزایش پیدا می‌کند. در اراضی تخریب‌شده در اثر فعالیت‌های انسانی همانند شخم در جهت شیب زمین، چرای بیش‌ازحد توان مرتع مناسب‌ترین شرایط برای توسعه فرسایش خندقی هستند. تغییرات کاربری اراضی می‌تواند سرعت فرسایش خندقی را افزایش دهد، به‌ویژه زمانی که کشت در شیب‌های بزرگ‌تر از ۴ درجه رخ می‌دهد. به‌عنوان‌مثال، تبدیل زمین‌های جنگلی به زمین‌های کشاورزی خشک می‌تواند میانگین سالانه افزایش سطح آبکند را در مقایسه با زمین‌های جنگلی بدون تغییر ۵/۵۶ برابر افزایش دهد (Li et al., 2021). لایه کاربری اراضی حوضه آبریز الشتر نیز با استفاده از نقشه کاربری ارضی مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ که از اداره کل منابع طبیعی اخذ شد به لایه رستر با ابعاد ۳۰ متر متناسب با مختصات دیگر لایه‌ها تهیه شد (شکل ۴ ت).



شکل ٤. پارامترهای آماده‌سازی‌شده برای مدل‌سازی فرسایش خندقی شامل پارامترهای پوشش زمین، بارش و ویژگی‌ها زمین و خاک

عوامل خطی

عوامل خطی در حوضه‌های آبریز که بر فرسایش خاک اثرگذار هستند عموماً جاده‌ها و عوامل طبیعی نیز خطوط آبراهه‌ها هستند. جاده‌ها به طرق مختلف می‌توانند تأثیر قابل‌توجهی بر فرسایش خندقی داشته باشند. به‌عنوان‌مثال، مطالعات در اتیوپی و ایران نشان داده است که ساخت جاده منجر به افزایش فرسایش خندقی شده است. جاده‌های آسفالت‌شده به دلیل نفوذناپذیری می‌توانند جریان آب‌های سطحی را تغییر دهند که می‌تواند منجر به تشکیل خندق روی شانه‌های جاده و تسریع فرسایش خاک شود. شبکه‌های جاده‌ای می‌توانند الگوهای زهکشی طبیعی حوضه‌های آبخیز را تغییر دهند که می‌تواند بر رسوب و تحویل

رواناب حاصل از بارندگی تأثیر بگذارد (Rahmati et al., 2022). آبراه‌های چمن‌دار، می‌توانند با کاهش سرعت آب و هدایت آن به خروجی پایدار با سرعت غیر فرسایشی، به کنترل فرسایش خندقی کمک کنند. آبراه‌های چمن‌دار کانال‌های طبیعی یا ساخته‌شده‌ای هستند که برای دستیابی به این اهداف با پوشش گیاهی مانند چمن دانه‌بندی و دانه‌بندی می‌شوند. آبراهه‌ها می‌توانند کیفیت آب را با کاهش بارهای رسوبی و جلوگیری از ورود مواد مغذی به بسترهای آب بهبود بخشند (https://www.qld.gov.au, 2020). در پیشینه پژوهش اغلب از فاصله آبراهه‌ها و فاصله خطوط ارتباطی برای ارزیابی مناطق مستعد فرسایش خندقی استفاده می‌شود. در این پژوهش خطوط ارتباطی اصلی و فرعی و شبکه آبراهه حوضه با استفاده از تصاویر گوگل ارث رقومی شدند سپس فاصله از هر پارامتر با استفاده از تابع فاصله[۲۵] در نرم‌افزار Arc GIS مطابق شکل ۴ ث و ج محاسبه شدند.

بافت خاک

بافت خاک، که نسبت ذرات رس، سیلت و ماسه در خاک است، می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر فرسایش خندقی داشته باشد. این عامل بر سرعت ورود آب به خاک تأثیر می‌گذارد. خاک‌های شنی دارای منافذ بزرگی هستند که به آب اجازه می‌دهد تا به‌سرعت خیسانده شود و درنتیجه رواناب کمتری دارد. خاک‌های رسی دارای منافذ کوچک‌تری هستند که اجازه نمی‌دهند آب به‌راحتی در آن خیسانده شود و درنتیجه حجم رواناب بیشتری به وجود می‌آید. نرخ رواناب بالا می‌تواند احتمال فرسایش خندقی را افزایش دهد. جدا شدن برخی از ذرات خاک راحت‌تر از بقیه است. ذرات رس در برابر فرسایش بهتر مقاومت می‌کنند زیرا کوچک‌تر و چسبنده‌تر از ذرات شن هستند. بافت‌های درشت خاک دارای سطح فعال کوچک‌تری هستند که باعث می‌شود خاک در برابر فرسایش مقاومت کمتری داشته باشد (Essington, 2015). نقشه میزان درصد ذرات خاک در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ پس از دریافت از اداره کل منابع طبیعی استان لرستان به تفکیک درصد سازنده میزان ذرات رس، سیلت و ماسه به لایه رستر در ابعاد DEM تبدیل شد (شکل ۴ ج، ح و خ).

شیمی خاک

در خاک‌هایی با EC بالا، پراکندگی ناشی از نمک‌ها می‌تواند منجر به تشکیل سطحی سخت و غیرقابل نفوذ شود که نفوذ آب را کاهش می‌دهد. کاهش نفوذ آب باعث افزایش رواناب سطحی می‌شود که خطر فرسایش آبی را افزایش می‌دهد. شوری بالا (مرتبط با EC بالا) می‌تواند به گیاهان آسیب برساند و رشد پوشش گیاهی و ریشه‌ها را کاهش دهد. با کاهش پوشش گیاهی، سطح خاک کمتر محافظت می‌شود و ریشه‌ها کمتر می‌توانند خاک را در محل خود نگه دارند که این امر حساسیت به فرسایش را افزایش می‌دهد (Bronick & Lal, 2005). PH خاک نقش مهمی در تعیین ساختار خاک، رشد پوشش گیاهی، نفوذپذیری و فعالیت میکروبی دارد که این موارد بر مقاومت خاک در برابر فرسایش آبی تأثیر می‌گذارند. هر دو PH بسیار پایین (اسیدی) PH بسیار بالا (PH بسیار بالا) می‌تواند منجر به تضعیف ساختار خاک شود، پوشش گیاهی را کاهش داده و میزان افزایش آب را کاهش دهد و همه این عوامل حساسیت خاک به فرسایش آبی را افزایش دهد (Matsumoto et al., 2018). پس از نمونه‌برداری میزان EC و PH خاک در برداشت‌های میدانی، مقادیر این دو پارامتر با استفاده از روش درون‌یابی Kriging به لایه رستری با ابعاد DEM حوضه تبدیل شدند (شکل ۴ د و ذ).

زمین‌شناسی

عامل زمین‌شناسی به‌طور قابل‌توجهی بر فرسایش خندقی تأثیر می‌گذارد، به این معنی که مناطقی با انواع سنگ‌های نرم‌تر و راحت‌تر در مقایسه با مناطق با سازندهای سنگی سخت‌تر و مقاوم‌تر، فرسایش خندقی شدیدتری را تجربه می‌کنند. اساساً، نوع سنگ به‌طور مستقیم بر سرعت و سهولت آب می‌تواند کانال‌هایی را در زمین کنده و منجر به توسعه خندق می‌شود. سنگ‌های رسوبی مانند شیل، گلسنگ و ماسه‌سنگ سست بیشتر مستعد فرسایش هستند که منجر به افزایش تشکیل خندق می‌شود. سنگ‌های آذرین مانند گرانیت و بازالت در برابر فرسایش مقاوم‌تر هستند و اغلب منجر به توسعه کمتر خندقی می‌شوند. سنگ‌هایی با شکاف‌ها و درزهای متعدد مسیرهایی را برای نفوذ و فرسایش آب فراهم می‌کنند و تشکیل آبکند را تسریع می‌کنند.

25. Distance

خاک حاصل از یک سنگ‌شناسی خاص بر بافت، نفوذپذیری و انسجام آن تأثیر می‌گذارد که همه این‌ها بر نرخ فرسایش تأثیر می‌گذارد (Zhao et al., 2022). برای تهیه لایه واحدهای زمین‌شناسی حوضه نیز از نقشه زمین‌شناسی حوضه در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ استفاده شد و پس از رقومی سازی به لایه رستری در ابعاد DEM حوضه تبدیل شد (شکل ۴ ر).

مدل‌های ارزیابی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی

برای ارزیابی و پهنه‌بندی پتانسیل رخداد فرسایش خندقی در حوضه آبریز الشتر از مدل‌های خطی تعمیم‌یافته[۲۶] (GLM)، درخت رگرسیون تقویت‌شده[۲۷] (BRT) و مدل خطی تقویت‌شده[۲۸] (BLM) که از مدل‌های نسبتاً جدید روش یادگیری عمیق محسوب می‌شوند، استفاده شده است.

مدل GLM

مدل GLM یک چارچوب آماری است که مدل رگرسیون خطی ساده را گسترش می‌دهد تا بتواند داده‌هایی را که توزیع‌های مختلف دارند (مانند نرمال، دوجمله‌ای، پواسون، و غیره) مدل‌سازی کند. این مدل برای تحلیل داده‌هایی که روابط پیچیده‌تری بین متغیرهای مستقل و وابسته دارند، بسیار مفید است. مزیت GLM نسبت به رگرسیون چندگانه ساده این است که با افزودن یک تابع لینک مناسب به مدل رگرسیون خطی معمولی، متغیرها می‌توانند پیوسته، دسته‌ای یا ترکیبی از هر دو نوع باشند. در وضعیت فعلی، متغیر وابسته یک متغیر دوتایی است که نمایانگر حضور یا عدم حضور فرسایش خندقی است (Atkinson et al., 1988). زمانی که متغیر وابسته دوتایی باشد، تابع لینک لجستیک (رابطه ۳) مناسب است.

$$logit\ (Pi = \log\left[\frac{P_i}{1-P_i}\right] \quad \text{رابطه ۳}$$

در این رابطه؛ Pi احتمالی است که با مشاهده مشخصی i مرتبط است. در این مورد خاص، Pi ها به معنای دقیق کلمه احتمال نیستند، زیرا مقیاس زمانی که در آن انتظار وقوع فرسایش خندقی وجود دارد به‌طور صریح در نظر گرفته نشده است. بلکه به‌عنوان احتمال‌های تخمینی برای وقوع فرسایش خندقی بر اساس ویژگی‌های ذاتی محاسبه می‌شوند، و این چیزی است که به آن «حساسیت به فرسایش خندقی» در مدل گفته می‌شود (Atkinson et al., 1988). رابطه ۴ حالتی از مدل لجستیک خطی را نشان می‌دهد که در آن سمت چپ تابع پیوند لجستیک و سمت راست پیش‌بینی خطی است:

$$logit\ (P_i) = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n} \beta_i x_i \quad \text{رابطه ۴}$$

در اینجا، β_0 عرض از مبدأ مدل است، βi ها ضرایب شیب مدل هستند و x_iها متغیرهای مستقل هستند. مدل خطی تشکیل‌شده، درواقع یک رگرسیون لجستیک است که رابطه حضور یا عدم فرسایش خندقی (شرایط فعلی) را با متغیرهای مستقل (شرایط قبل از شکست) بررسی می‌کند. در این مدل پس از انجام تست هم‌خطی و حذف لایه‌های درای هم‌خطی انحراف D برای داده‌های باینری ممکن است به‌صورت رابطه ۵ بیان شود.

$$D = -2\sum_{i=1}^{n}\{P_i logit\ (P_i + \log(1-P_i)\} \quad \text{رابطه ۵}$$

برای یک متغیر وابسته باینری، انحراف به‌دست‌آمده از GLM را نمی‌توان به‌عنوان شاخص خوبی برازش استفاده کرد، زیرا نمی‌توان مقایسه معناداری بین احتمالات برازش و مشاهدات باینری انجام داد (Collett, 1991). بااین‌حال، ازآنجایی‌که تفاوت در انحراف برای مدل‌های مختلف را می‌توان برای داشتن یک توزیع مجذور کای تقریبی کرد، این تفاوت می‌تواند به‌عنوان شاخصی از اهمیت یک عبارت اضافه‌شده به مدل استفاده شود (Dobson, 1990). در فرایند مدل‌سازی با استفاده از روش GLM با استفاده از تحلیل معیار اطلاعاتی آکایک[۲۹]، لایه‌ها به‌صورت گام‌به‌گام به مدل اضافه می‌شوند تا اهمیت هر متغیر در هر مرحله با جستجوی احتمال برای تعداد معینی از درجات آزادی و تفاوت در انحراف بررسی شود. معیار ارزیابی AIC میزان اطلاعات ازدست‌رفته توسط مدل را اندازه‌گیری می‌کند (رابطه ۶). باتوجه‌به این موضوع می‌توان گفت مدلی که توسط AIC

26. Generalized Linear Model
27. Boosted Regression Tree
28. Boosted Linear Model
29. Akaike information criterion

به‌عنوان مدل مناسب شناخته می‌شود، نه بیش‌ازحد برازش دارد و نه دچار کم برازش می‌شود و می‌توان آن را مدلی با برازش مناسب دانست (Burnham 2002).

$$AIC = 2K - 2\ln(L)$$ رابطه ۶

در این رابطه: k تعداد پارامترهای مدل آماری است و L مقدار حداکثر تابع درستنمایی برای مدل برآورد شده است. پس از انجام تست AIC تنها پارامترهایی می‌توانند وارد مدل شوند که دارای همبستگی معنادار با پارامتر وابسته (نقاط رخداد فرسایش خندقی) باشند.

مدل BRT

این روش یک روش ناپارامتریک است که ترکیبی از دو تکنیک روش تقویت[30] و الگوریتم درخت تصمیم[31] است (Breiman et al., 1984; Elith et al., 2008; Gu et al., 2019). BRT از روش تقویت خود به‌طور مکرر برای جا دادن داده‌های ورودی در درخت‌های آینده استفاده می‌کند که دقت مدل را افزایش می‌دهد. با استفاده از رویکرد متوالی در درخت‌های قبلی، وزن درخت‌های آینده را برای بهبود دقت و کاهش خطا اعمال می‌کند. این مدل متغیر هدف را با استفاده از متغیر مقسوم تقسیم می‌کند (Breiman et al., 1998). این روش تا زمانی ادامه می‌یابد که گره‌ها به همگنی برسند (Therneau et al., 2015). پیچیدگی درخت[32] (TC) و میزان یادگیری[33] (LR) مهم‌ترین معیارهای مدل BRT هستند (Naghibi et al., 2016). پیچیدگی درخت تعداد تقسیم هر درخت را کنترل می‌کند، یعنی مقدار TC 1 به این معنی است که درخت یک‌بار تقسیم‌شده است، و مقدار ۲ نشان می‌دهد که درخت دو بار تقسیم‌شده است. از سوی دیگر، نرخ یادگیری یک تکنیک انقباض است که سهم هر درخت از مدل BRT را نشان می‌دهد. تقویت توالی به دلیل نرخ کم یادگیری آن به تکرارهای زیادی نیاز دارد. این TC و LR تعداد درختان موردنیاز برای پیش‌بینی بهینه را تعیین می‌کند (Elith et al., 2008). BR با تکنیک انقباض خود خطا و واریانس طبقه‌بندی داده‌ها را کاهش می‌دهد. روش محاسبه کلی این مدل ازطریق رابطه ۷ است.

$$y = \sum_{m=1}^{M} ym.T_m(x)$$ رابطه ۷

در این رابطه: y^=مقدار پیش‌بینی‌شده یا متغیر پاسخ، M= تعداد کل درختان در مدل، ym= وزن یا نرخ یادگیری مرتبط با درخت شماره m. این پارامتر کنترل می‌کند که هر درخت چقدر به پیش‌بینی نهایی کمک می‌کند. یک نرخ یادگیری کمتر معمولاً نیاز به تعداد بیشتری درخت دارد و Tm(x) = پیش‌بینی ارائه‌شده توسط درخت m برای داده‌های ورودی x. هر درخت mT یک یادگیرنده ضعیف است که معمولاً یک درخت رگرسیون ساده است.

مدل BLM

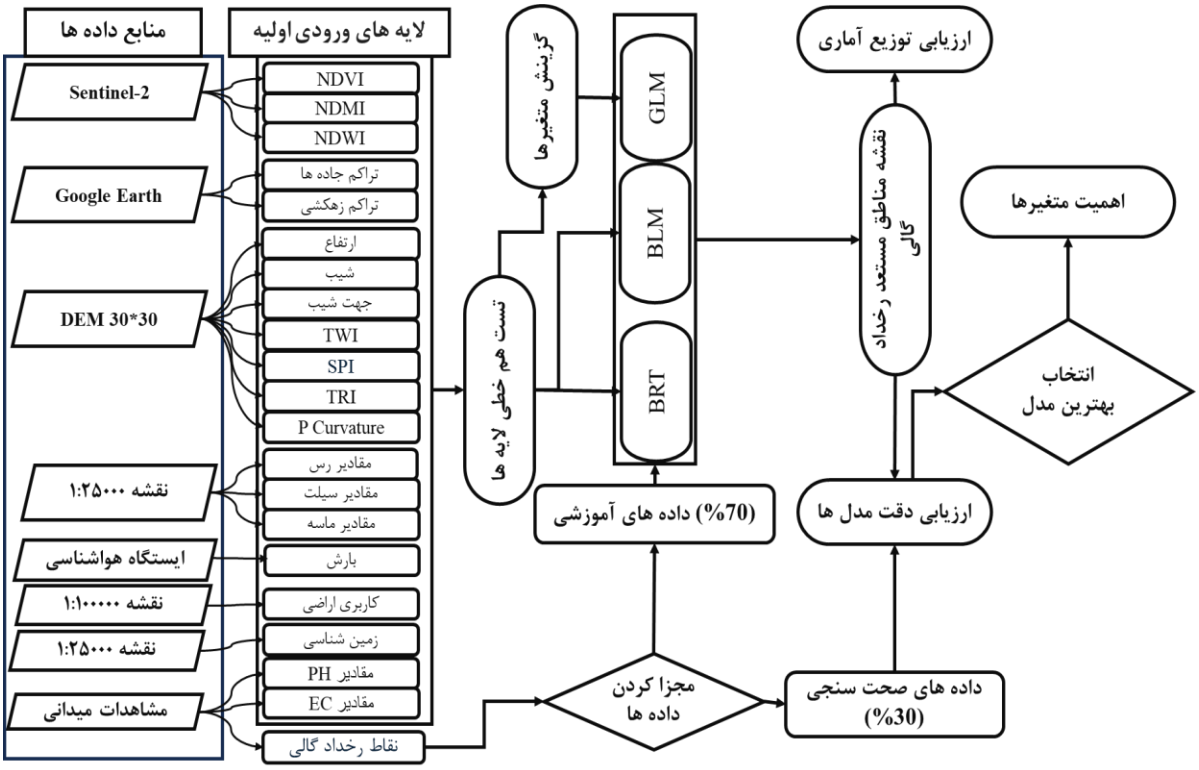
در این مدل الگوریتم تقویت به مدل رگرسیون خطی اضافه می‌شود. در اینجا حداکثر همبستگی مطلق با ویژگی‌ها و باقیمانده‌ها انجام می‌شود (Freund et al., 2017). سری‌های زمانی که از نوع غیرخطی هستند، برای مدل‌سازی و تحلیل داده‌ها پیچیدگی ایجاد می‌کنند. در BLM، با استفاده از سری‌های زمانی خطی روش تقویت، به‌صورت قطعه‌ای در درخت تصمیم‌گیری خطی گسترش می‌یابد. این چندین درخت خطی را ترکیب می‌کند که منجر به بهبود نتیجه برازش سری‌های زمانی می‌شود. BLM پایداری بیشتری در برابر نقاط داده تنوع نمونه‌گیری فراهم می‌کند که به پیش‌بینی دقیق‌تر کمک می‌کند. مجموعه داده‌ها ازطریق مدل آموخته‌شده برای تعیین خطای پیش‌بینی دقیق آزمایش می‌شوند. مجموعه داده‌ها ازطریق مدل آموخته‌شده برای تعیین خطای آزمون آزمایش می‌شوند (Friedman et al., 2000). مدل BLM از رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

$$\hat{y} = \sum_{m-1}^{M} \gamma m.\left(\beta 0, m + \sum_{j=1}^{p} \beta j, m^x j\right)$$ رابطه ۸

در این رابطه؛ y^: پیش‌بینی نهایی مدل، M: تعداد تکرارها (یا تعداد مدل‌های خطی در فرایند تقویت)، γm: نرخ یادگیری یا

30. Boosting method
31. Decision Tree Algorithm
32. Tree complexity
33. Learning rate

وزنی که هر مدل خطی به پیش‌بینی نهایی اضافه می‌کند، $\beta_{0,m}$: مدل خطی در تکرار عرض از مبدأ، $\sum_{j=1}^{p}\beta_{j,m}$: ضرایب مربوط به متغیرهای ورودی x_j در مدل خطی و x_j: متغیرهای ورودی یا ویژگی‌ها. برای انجام مدل‌سازی فرسایش خندقی به روش‌های GLM، BRT و BLM از دستورالعمل‌های آموزشی هر مدل در نرم‌افزار R و پکیج‌های gbm و blm در این نرم‌افزار مطابق چهارچوب عملیاتی شکل ۵ استفاده شده است.



شکل ۵. روندنمای مراحل مدل‌سازی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی با استفاده از پارامترهای محیطی و روش‌های یادگیری ماشین

ارزیابی دقت مدل‌ها

برای ارزیابی دقت مدل‌های و مقایسه عملکرد آن‌ها از نمودار «نمودار مشخصه عملکرد[۳۴]» یا به‌اختصار منحنی ROC استفاده شده است. این منحنی ترکیبی از شاخص‌های حساسیت[۳۵] و ویژگی[۳۶] را نمایش می‌دهد، که هر دو از شاخص‌های مهم در سنجش کارایی دسته‌بندهای دودویی هستند. منحنی ROC ابزاری قدرتمند در ارزیابی و مقایسه کارایی الگوریتم‌های دسته‌بندی و همچنین در تولید داده‌های دسته‌بندی‌شده است. منحنی ROC با ترسیم نرخ مثبت صحیح[۳۷] یا TPR بر حسب نرخ مثبت کاذب[۳۸] یا FPR ساخته می‌شود (Park et al., 2004). این نمودار به دلیل تغییرات آستانه‌ای که برای این مقادیر در نظر گرفته می‌شود، به‌صورت یک منحنی پیوسته نمایش داده می‌شود. TPR در یادگیری ماشین با نام حساسیت، و نرخ مثبت کاذب به‌عنوان «احتمال دریافت اخطار کاذب۳۹» نیز معروف است و بر اساس متمم ویژگی مطابق رابطه ۹ محاسبه می‌شود.

$$TPR = \frac{TP}{TP+FN}$$ رابطه ۹

در این رابطه، TPR: نرخ مثبت صحیح، TP: تعداد مواردی که به‌درستی به‌عنوان مثبت شناسایی شده‌اند و FN: تعداد مواردی که به اشتباه به‌عنوان منفی شناسایی شده‌اند. نرخ مثبت کاذب در منحنی راک نیز ازطریق رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود.

$$FPR = \frac{FP}{FP+TN}$$ رابطه ۱۰

34. Receiver Operating Characteristic
35. Sensitivity
36. Specificity
37. True Positive Rate
38. False Positive Rate
39. Probability False Alarm

در این رابطه، FPR: نرخ مثبت کاذب، FP: تعداد مواردی که به اشتباه به‌عنوان مثبت شناسایی شده‌اند و TN: تعداد مواردی که به‌درستی به‌عنوان منفی شناسایی شده‌اند (Marzban, 2004). به‌منظور ارزیابی دقت مدل‌های یادگیری ماشین ۳۷۰ نقطه از حوضه که دارای رخداد فرسایش خندقی است برای آموزش (۷۰ درصد) و صحت سنجی مدل‌ها (۳۰ درصد) با توزیع فضایی شکل ۱ برداشت گردید. برای آموزش مدل‌ها و صحت سنجی از پکیج yardstick در نرم‌افزار R استفاده شده است.

یافته‌های پژوهش

نتایج تست هم خطی

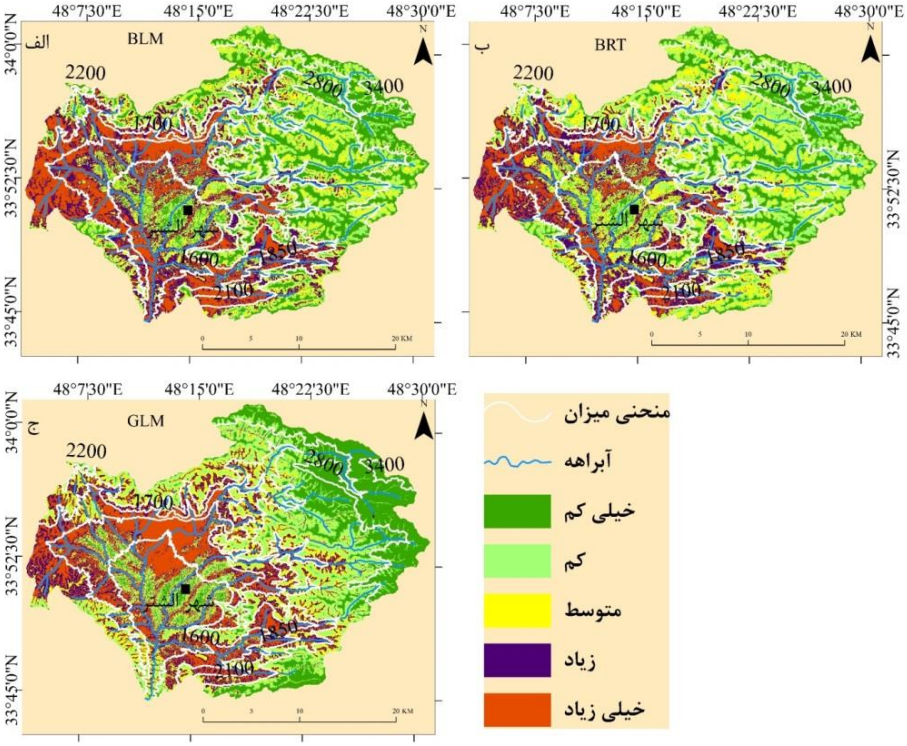
نتایج تحلیل هم‌خطی نشان داد که ۱۳ پارامتر نهایی برای مدل‌سازی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی باقی مانده‌اند که همگی دارای مقدار VIF زیر آستانه تعیین‌شده (جدول ۳) هستند. این پارامترها شامل جهت شیب، شاخص‌های TWI، SPI، TRI، عامل بارش، شاخص NDVI، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه، مقادیر EC و PH خاک، واحدهای زمین‌شناسی، کاربری اراضی و مقادیر ماسه بافت خاک هستند. مقدار VIF پایین این متغیرها نشان‌دهنده این است که هم‌خطی بالایی میان این پارامترها وجود ندارد و هرکدام به‌طور مستقل می‌توانند تأثیرات خود را در مدل‌سازی مناطق مستعد رخداد فرسایش اعمال کنند. پارامترهای توپوگرافی شامل جهت شیب، TWI، SPI و TRI به دلیل ماهیت منحصربه‌فرد هر یک از آن‌ها و ارتباط ضعیف با سایر پارامترها در مدل باقی مانده‌اند. این ویژگی‌ها نقش کلیدی در توصیف شرایط توپوگرافی منطقه دارند که به‌عنوان عوامل تأثیرگذار بر فرسایش خندقی عمل می‌کنند. پارامتر بارش به‌عنوان متغیری اقلیمی، نقش مهمی در تغذیه فرایندهای فرسایش ایفا می‌کند و مقدار پایین VIF آن نشان‌دهنده کمترین ارتباط هم‌خطی با سایر پارامترها است. پارامتر NDVI نیز که شاخصی برای سنجش پوشش گیاهی است، به دلیل ارتباط مستقیم با تغییرات کاربری اراضی و کنترل رواناب سطحی، در مدل نگه داشته شده است. علاوه بر این، متغیرهای فاصله از جاده و فاصله از رودخانه که بیانگر دسترس به جاده‌ها و رودخانه‌ها هستند، در ارزیابی تأثیرات فعالیت‌های انسانی و نقش شبکه زهکشی در هدایت آب و رسوبات، اهمیت بالایی دارند. ویژگی‌های خاک شامل مقادیر EC و PH و مقادیر ماسه نیز به دلیل تأثیرات شیمیایی و فیزیکی بر پایداری خاک و فرایندهای فرسایش به‌عنوان متغیرهای مهم در مدل باقی مانده‌اند. همچنین، پارامتر زمین‌شناسی که وضعیت واحدهای زمین‌شناسی و میزان فرسایش‌پذیری نقاط مختلف حوضه را توصیف می‌کند و عامل کاربری اراضی که نشان‌دهنده تأثیر کاربری اراضی مختلف بر شرایط هیدرولوژیکی و فرسایش است با مقادیر VIF ۱/۲ در فرایند مدل‌سازی باقی مانده‌اند. باتوجه‌به حذف پارامترهایی که دارای مقادیر VIF بالا بودند، مدل‌ها بهینه‌سازی شده و از هم‌خطی میان متغیرها جلوگیری شده است.

جدول ۳. نتایج تست هم خطی پارامترهای مدل‌سازی

پارامترها	مقادیر VIF
جهت شیب	۱
TWI	۱/۵
SPI	۱
TRI	۱/۵
بارش	۱/۳
NDVI	۱/۳
فاصله از جاده‌ها	۱/۵
فاصله از رودخانه‌ها	۱
EC	۱/۳
PH	۱
زمین‌شناسی	۱/۲
کاربری اراضی	۱/۲
مقادیر ماسه	۱/۳

ارزیابی مناطق مستعد فرسایش خندقی

ارزیابی توسعه فضایی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی با استفاده از مدل BLM نشان می‌دهد که مناطق حاشیه دشت الشتر، مرکز، جنوب و غرب حوضه عمدتاً دارای بیشترین استعداد رخداد فرسایش خندقی هستند (شکل ۶). بر اساس این مدل مناطق مرکزی دشت الشتر، مناطق کوهستانی حوضه در شمال، شمال‌شرق و شمال غرب حوضه نیز کمترین استعداد رخداد فرسایش خندقی را دارا هستند. توزیع فضایی ریسک فرسایش خندقی بر اساس مدل‌های BRT و GLM اغلب مشابه مدل BLM است و در مقادیر کلاس‌ها تنها اختلاف وجود دارد. در مدل GLM در اغلب مناطق شمالی حوضه، قسمت‌هایی از شرق و شمال شرق حوضه عمدتاً استعداد رخداد فرسایش خندقی در کلاس خیلی کم قرار دارد؛ اما در مدل BLM این پهنه‌ها در کلاس کم استعداد رخداد فرسایش خندقی قرار می‌گیرند. در مدل BRT توزیع فضایی نسبتاً متعادلی بین کلاس‌های خیلی کم و کم رخداد فرسایش خندقی در بخش‌های شمالی حوضه، مرکز دشت الشتر و غرب حوضه وجود دارد (شکل ۶).



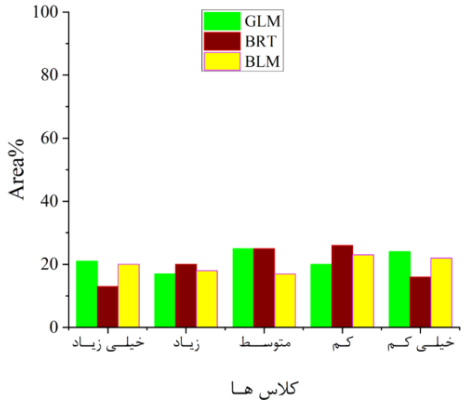
شکل ٦. نقشه مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی در حوضه آبریز الشتر بر اساس مدل‌های یادگیری ماشین

ارزیابی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی توسط مدل‌های سه‌گانه نشان می‌دهد که در مدل BLM درصد بالایی از حوضه آبریز الشتر در کلاس‌های زیاد و خیلی زیاد (۳۹ درصد) استعداد فرسایش خندقی قرار دارند. این مدل نسبت به دو مدل دیگر مناطق بیشتری را با ریسک بالای فرسایش خندقی شناسایی کرده است. مناطق با ریسک کم و خیلی کم مجموعاً ۳۹ درصد حوضه را بر اساس این مدل در برمی‌گیرد. در مدل BRT درصد بالاتری از مناطق را در کلاس کم (۲۶ درصد) و متوسط (۲۵ درصد) قرار داده است و مناطق با ریسک خیلی زیاد فرسایش خندقی نسبت به دو مدل دیگر کمتر است (۱۳ درصد). مدل BRT در شناسایی مناطق با خطر خیلی زیاد محافظه‌کارانه‌تر عمل کرده است. در مدل GLM توزیع نسبتاً متعادلی بین کلاس‌های مختلف نقشه استعداد فرسایش خندقی در سطح حوضه وجود دارد. در این مدل همانند مدل BLM، مناطق خیلی زیاد (۲۱ درصد) سهم بالاتری نسبت به دیگر کلاس‌های استعداد فرسایش خندقی خاک دارند. این مدل در شناسایی مناطق با استعداد خیلی کم و کم (مجموعاً ۳۹ درصد) مشابه BLM عمل کرده است. هر سه مدل مناطق مشابهی را در استعداد خیلی زیاد و خیلی کم شناسایی کرده‌اند. مدل BRT نسبت به BLM و GLM مناطق بیشتری را در کلاس‌های کم و متوسط دسته‌بندی کرده است. مدل BLM گستره بیشتری از مناطق با استعداد زیاد و خیلی زیاد را نشان می‌دهد، که ممکن است ناشی از حساسیت

بالاتر این مدل به متغیرها باشد. مدل BRT برای مطالعات محافظه‌کارانه‌تر مناسب است، زیرا مناطق کمتری را در ریسک‌های بالا دسته‌بندی می‌کند. مدل BLM برای شناسایی مناطق پرخطر (برای مدیریت فعال‌تر) مناسب‌تر است. مدل GLM عملکرد متعادلی داشته و می‌تواند بینابین این دو مدل باشد.

ارزیابی دقت مدل‌ها

بر اساس منحنی ROC مدل BLM با بالاترین دقت (AUC=0.84) برای شناسایی مناطق پرخطر رخداد فرسایش خندقی خاک مناسب‌تر است، به‌ویژه اگر هدف مدیریت فعال مناطق با حساسیت بالا باشد. این مدل بالاترین مقدار AUC را دارد که نشان‌دهنده دقت و توانایی بالای آن در شناسایی مناطق با ریسک‌های مختلف است. عملکرد مدل BLM در تفکیک مناطق پرخطر از کم‌خطر بسیار مناسب است و به همین دلیل می‌تواند به‌عنوان مدل برتر انتخاب شود. مدل BRT به‌طور قابل‌توجهی نزدیک به BLM عمل می‌کند، اما از مدل BLM دقیق‌تر نیست (Chen et al., 2022). مقدار AUC مدل BRT نشان می‌دهد که توانایی نسبتاً مناسبی در شناسایی ریسک فرسایش خندقی دارد. این مدل ممکن است برای تحلیل‌های محافظه‌کارانه‌تر مناسب‌تر باشد. بااین‌حال، به دلیل توانایی در پردازش سریع‌تر و مصرف منابع کمتر، در شرایطی که منابع محاسباتی محدود هستند یا زمان تحلیل محدود است، می‌تواند گزینه خوبی باشد. مدل GLM باوجوداینکه کمترین مقدار (AUC=0.73) AUC را دارد، هنوز هم می‌تواند در کاربردهای خاص یا در مقایسه با سایر مدل‌ها مفید باشد. این مدل کمترین مقدار AUC را دارد که نشان می‌دهد دقت کمتری در شناسایی مناطق با ریسک‌های مختلف دارد. بااین‌حال، عملکرد آن هنوز قابل‌قبول است و می‌تواند به‌عنوان یک مدل پایه برای مقایسه استفاده شود. همچنین می‌تواند به‌عنوان بخشی از یک تحلیل ترکیبی (Ensemble) استفاده شود.

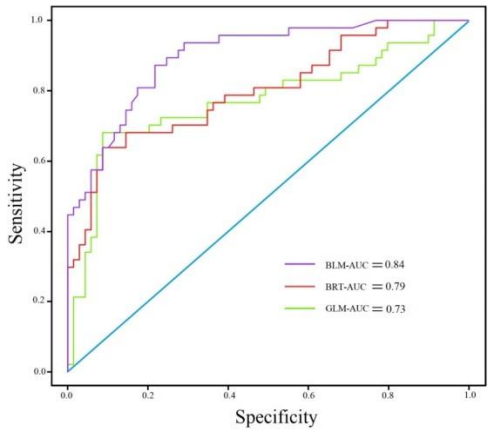


شکل ۷. درصد مساحت کلاسه‌های نقشه پهنه‌بندی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی بر اساس مدل‌های سه‌گانه

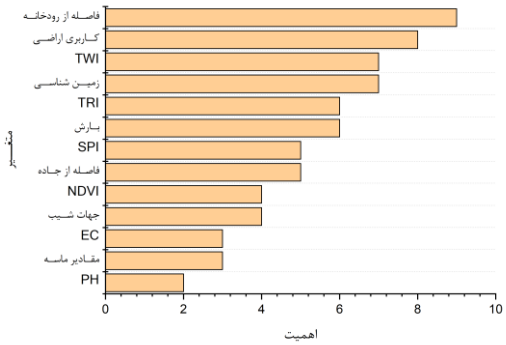
ارزیابی اهمیت متغیرها

نتایج تحلیل اهمیت متغیرها برای مدل‌سازی مناطق مستعد فرسایش خندقی توسط مدل BLM (بهترین مدل) نشان می‌دهند که برخی از ویژگی‌ها و متغیرهای محیطی نقش قابل‌توجهی در پیش‌بینی این پدیده دارند. بر اساس نمودار اهمیت متغیرها، فاصله از رودخانه به‌عنوان مهم‌ترین عامل در مدل شناخته شده است. این نتیجه نشان‌دهنده تأثیر مستقیم حضور یا نزدیکی به رودخانه‌ها در فرایندهای فرسایشی است. باتوجه‌به اینکه رودخانه‌ها اغلب در ایجاد فرسایش‌های آبی و خندقی نقش دارند، این یافته منطقی است. نزدیکی به رودخانه‌ها می‌تواند موجب تراکم بیشتر آب در سطح خاک و تسهیل فرایندهای فرسایش شود، که این امر موجب افزایش خطر فرسایش خندقی در این مناطق می‌گردد. پس از فاصله از رودخانه، پارامتر TWI به‌عنوان دومین متغیر مهم در شناسایی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی شناخته شده است. این شاخص که به تحلیل وضعیت پتانسیل رطوبت خاک در سطوح می‌پردازد، ارتباط مستقیمی با فرایندهای فرسایش دارد. در مناطق با رطوبت بالاتر، احتمال فرسایش‌های آبی بیشتر است، چراکه افزایش رطوبت خاک باعث کاهش چسبندگی ذرات خاک و درنتیجه تسهیل حرکت آن‌ها در امتداد شیب می‌شود. عامل واحدهای زمین‌شناسی پس از شاخص TWI بیشترین اهمیت را در فرایند مدل‌سازی دارد. در بخش‌های مرتفع حوضه که اغلب رخنمون‌های سنگی وجود دارد پتانسیل رخداد خندق‌ها ضعیف است اما در مناطق پست‌تر به دلیل تراکم رسوبات به‌خصوص

رسوبات کواترنری واحدهای زمین‌شناسی شرایط مستعدتری را برای رخداد خندق‌ها فراهم می‌کنند. پس از عامل زمین‌شناسی پارامترهای TRI و بارش به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار دارند. TRI که نشان‌دهنده میزان زبری و صافی سطوح در یک منطقه است، در فرسایش‌های خندقی نقش دارد، زیرا نواحی شیب‌دار بدون موانع طبیعی شرایط مساعدی برای رخداد فرسایش خندقی ایجاد می‌کند و بالعکس نواحی مسطح و با موانع طبیعی زیاد از استعداد رخداد فرسایش خندقی می‌کاهد. عامل بارش نیروی محرکه را برای فرسایش آبی خاک ایجاد می‌کند. ویژگی‌های این عامل ازجمله شدت و مدت آن تأثیر زیادی بر شدت و نوع فرسایش‌ها دارد. در رتبه هفتم شاخص SPI قرار دارد که مقدار بالاتر آن به معنای افزایش تمرکز جریان آب و افزایش انرژی جنبشی آن است که می‌تواند باعث ایجاد و توسعه خندق‌ها شود. فاصله از جاده و شاخص NDVI در رتبه‌های بعدی شاخص SPI قرار دارند که اگرچه همچنان اثرگذارند، اما تأثیر آن‌ها در مقایسه با سایر متغیرها کمتر است. فاصله از جاده علاوه بر بریدگی شیب و ایجاد خندق‌ها در حاشیه جاده‌ها و بریدگی شیب ممکن است به دلیل تسهیل دسترسی به مناطق، تأثیرات مستقیم فعالیت‌های انسانی را به همراه داشته باشد که می‌تواند باعث تغییرات در پوشش گیاهی و افزایش خطر فرسایش در مناطق اطراف جاده‌ها شود. NDVI از عوامل اصلی در کاهش فرسایش است؛ به‌طوری‌که مناطق با پوشش گیاهی بیشتر، مقاومت بیشتر خاک را در پی دارد و کاهش مقادیر آن به‌طور بالقوه خطر بیشتر فرسایش خاک را در پی دارد. در رتبه بعدی عامل جهت شیب قرار دارد. به‌طور بالقوه گفته می‌شود شیب‌های رو به آفتاب و عمدتاً در جهت جنوب به علت دریافت تابش بیشتر خورشید رطوبت کمتر و پوشش گیاهی ضعیف‌تری نسبت به دامنه‌های پشت به آفتاب دارند و تحت تأثیر این عوامل استعداد بیشتری برای فرسایش خاک دارا هستند. پارامتر EC و مقادیر ماسه خاک با ارزشی برابر در خاک در انتهای رتبه‌بندی قرار دارند. افزایش EC معمولاً با افزایش غلظت نمک‌ها در خاک همراه است که می‌تواند بر پایداری خاکدانه‌ها تأثیر بگذارد. مقادیر ماسه خاک نیز که یکی از عناصر اصلی بافت خاک محسوب می‌شود نسبت معکوسی با میزان فرسایش خاک دارد. در انتهای رتبه‌بندی متغیرها نیز مقادیر PH خاک قرار دارد که در پارامترهای EC و مقادیر ماسه نشان می‌دهد که سه پارامتر مهم شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک نقش اساسی در مدل‌سازی ریسک فرسایش خاک دارا هستند.



شکل ۸. منحنی راک و میزان سطح زیر منحنی هر یک از مدل‌های یادگیری ماشین



شکل ۹. نمودار اهمیت متغیرهای مورداستفاده در مدل‌سازی

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با بهره‌گیری از مدل‌های یادگیری ماشین شامل GLM، BRT و BLM، مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی در حوضه آبریز الشتر شناسایی و پهنه‌بندی شدند. نتایج نشان داد که مدل BLM با دقت بالاتر (AUC=0.84) عملکرد بهتری در تفکیک مناطق با ریسک بالای فرسایش خندقی داشته و توانایی بیشتری در شناسایی این نواحی نسبت به سایر مدل‌ها دارد. همچنین، تحلیل اهمیت متغیرها نشان داد که فاصله از رودخانه، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، واحدهای زمین‌شناسی، شاخص زبری سطح (TRI) و میزان بارش، مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش خندقی در این منطقه هستند. الگوی فضایی فرسایش خندقی در حوضه آبریز الشتر نشان داد که مناطق جنوب، غرب و حاشیه دشت الشتر بیشترین استعداد رخداد این نوع

فرسایش را دارند، درحالی‌که نواحی شمالی و مرتفع‌تر دارای کمترین حساسیت به این پدیده هستند. مقایسه مدل‌ها نیز حاکی از آن بود که مدل BLM بیشترین سطح مناطق با خطر زیاد را شناسایی کرده، درحالی‌که مدل BRT عملکرد محافظه‌کارانه‌تری داشته و مناطق بیشتری را در کلاس‌های کم و متوسط قرار داده است. نتایج این تحقیق می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای تدوین برنامه‌های مدیریت اراضی، کنترل فرسایش و کاهش خسارات ناشی از آن مورداستفاده قرار گیرد. همچنین، بهره‌گیری از فناوری‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در ترکیب با مدل‌های یادگیری ماشین، رویکردی کارآمد و دقیق برای شناسایی مناطق پرخطر فرسایش خندقی فراهم می‌کند. بنابراین، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از مدل‌های ترکیبی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین پیشرفته‌تر به‌منظور بهبود دقت پیش‌بینی و تعیین راهکارهای مناسب جهت مدیریت این پدیده استفاده شود.

تقدیر و تشکر

از اساتید محترم راهنما و مشاور کمال تشکر و قدردانی را دارم که بنده را در به نتیجه رساندن این پژوهش همراهی کرده و نتیجه این همکاری‌ها، خلق این اثر علمی شد.

مشارکت نویسندگان

علی داودی: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام تحقیقات و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش‌نویس مقاله

امیر کرم: طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

پرویز ضیائیان فیروزآبادی: مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

علی احمدآبادی: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

References

Ahmadpour, H., Bazrafshan, O., Rafiei-Sardooi, E., Zamani, H., & Panagopoulos, T. (2021). Gully erosion susceptibility assessment in the Kondoran watershed using machine learning algorithms and the Boruta feature selection. *Sustainability*, 13(18), 10110.

Arabameri, A., Chandra Pal, S., Costache, R., Saha, A., Rezaie, F., Seyed Danesh, A., ... & Hoang, N. D. (2021). Prediction of gully erosion susceptibility mapping using novel ensemble machine learning algorithms. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1), 469-498.

Arabameri, A., Pradhan, B., Pourghasemi, H. R., & Rezaei, K. (2018). Identification of erosion-prone areas using different multi-criteria decision-making techniques and GIS. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 9(1), 1129-1155.

Arabameri, Alireza, Omid Asadi Nalivan, Sunil Saha, Jagabandhu Roy, Biswajeet Pradhan, John P.(2020) Tiefenbacher, and Phuong Thao Thi Ngo. "Novel ensemble approaches of machine learning techniques in modeling the gully erosion susceptibility. *Remote Sensing* 12(11), 18-90.

Asghari Saraskanroud, S., Belvasi, M., Zeinali, B., Belvasi, I., Davoodi, A. (2014) Study of soil erosion risk in the Doab watershed of Lorestan using network analysis, remote sensing technologies and GIS. *Environmental Erosion Research*. 4 (2), 72-89 (in Persian).

Atkinson, P., Jiskoot, H., Massari, R., & Murray, T. (1998). Generalized linear modelling in geomorphology. Earth Surface Processes and Landforms: *The Journal of the British Geomorphological Group*, 23(13), 1185-1195.

Baharvand, C., Ebrahimi, B., Zivodar, M., & Haghi Abi, A.H. (2013). *Summary of the report on determining the hydraulic exchange rate of the river and groundwater aquifer of Dasht-e-Aleshtar using a flow network*, Khorramabad: Azad University of Khorramabad Branch (in Persian).

Bayat, R., Jafari Ardakani, A., & Shah Karami, A. (2011), Study of the erosion status in Lorestan province using RS and GIS, *Natural Ecosystems of Iran*, 2 (2), 37-44 (in Persian).

Breiman L, Friedman JH, Olshen RA, Stone CJ (1984), *Classification and Regression Trees* (Monterey, CA: Wadsworth and Brooks/Cole).

Breiman L, others. (1998). Arcing classifier (with discussion and a rejoinder by the author). *Ann Stat.* 26(3):801–849.

Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124(1-2), 3-22.

Burnham KP (2002) Model selection and inference: *a practical information-theoretic approach*, 2nd Edition, Springer-Verlag, New York.

Chen, Y., Chen, W, Janizadeh, S., Bhunia, G. S, Bera, A., Pham, Q. B. & Wang, X. (2022). Deep learning and boosting framework for piping erosion susceptibility modeling: spatial evaluation of agricultural areas in the semi-arid region. *Geocarto International*, 37(16), 4628-4654.

Collett D (1991) Modelling binary data, *Chapman & Hall*. London, UK. p 3.

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, 399-411.

Debanshi, S., & Pal, S. (2020). Assessing gully erosion susceptibility in Mayurakshi river basin of eastern India. Environment, *Development and Sustainability*, 22, 883-914.

Dobson AJ, Barnett AG (2018) An introduction to generalized linear models, Taylor & Francis. p 2.

Elith, J., Leathwick, J. R., & Hastie, T. (2008). A working guide to boosted regression trees. *Journal of animal ecology*, 77(4), 802-813.

Freund, M. C., Chen, R., Chen, G., & Braver, T. S. (2025). Complementary benefits of multivariate and hierarchical models for identifying individual differences in cognitive control. Imaging Neuroscience.

Emadaldin, S., Omidi, M., Arkhi, S., & Karam, A. (2000). Assessment of the risk of gully erosion in Qowijaq watershed, *Environmental Risk Management*, 10 (4), 17-34 (in Persian).

Friedman, J., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2000). Additive logistic regression: a statistical view of boosting (with discussion and a rejoinder by the authors). The annals of statistics, 28(2), 337-407.

Gómez-Gutiérrez, Á., Conoscenti, C., Angileri, S. E., Rotigliano, E., & Schnabel, S. (2015). Using topographical attributes to evaluate gully erosion proneness (susceptibility) in two mediterranean basins: Advantages and limitations. *Natural Hazards*, 79, 291-314.

Gu, H., Wang, J., Ma, L., Shang, Z., & Zhang, Q. (2019). Insights into the BRT (Boosted Regression Trees) method in the study of the climate-growth relationship of Masson pine in subtropical China. *Forests*, 10(3), 228.

Habib, M. (2021). Evaluation of DEM interpolation techniques for characterizing terrain roughness. *Catena*, 198, 105072.

Haseli, M., Jalalian, H. (2014). Soil erosion risk assessment and zoning in the Ashtar watershed. *Spatial analysis of environmental hazards*. 1 (4): 91-104 (in Persian).

Hassan Jafari G, Mohammadi-Ahmadi P, Ehteshami-Moinabadi M (2023) Effect of tectonic-climatic controllers on the transition of Endorheic to Exorheic Basins in the Zagros mountain range. *Journal of Mountain Science*, 20(12).

Essington, M. E. (2015). Soil and water chemistry: an integrative approach. CRC press.

Hitouri, S., Meriame, M., Ajim, A. S., Pacheco, Q. R., Nguyen-Huy, T., Bao, P. Q., ... & Varasano, A. (2024). Gully erosion mapping susceptibility in a Mediterranean environment: A hybrid decision-making model. *International Soil and Water Conservation Research*, 12(2), 279-297.

Igwe, O., John, U. I., Solomon, O., & Obinna, O. (2020). GIS-based gully erosion susceptibility modeling, adapting bivariate statistical method and AHP approach in Gombe town and environs Northeast Nigeria. *Geoenvironmental Disasters*, 7, 1-16.

Karam, A., Ziaian Firouzabadi, P., Ahmadabadi, A., Davoudi, A. (2014). Estimation of annual soil erosion rate in the Al-Shatar watershed of Lorestan province, *Quantitative Geomorphology Research*, 13 (3), 120-140 (in Persian).

Lashnivand, M., Parvaneh, B., & Beiranvand, F. (2011). Climatic zoning of Lorestan province using statistical methods and determining the most appropriate experimental method, *Physical Geography*, 4 (11), 89-106 (In Persian).

Li, H., Cruse, R. M., Bingner, R. L., Gesch, K. R., & Zhang, X. (2016). Evaluating ephemeral gully erosion impact on Zea mays L. yield and economics using AnnAGNPS. *Soil and Tillage Research*, 155, 157-165.

Li, M., Li, T., Zhu, L., Meadows, M. E., Zhu, W., & Zhang, S. (2021). Effect of land use change on gully erosion density in the black soil region of Northeast China from 1965 to 2015: a case study of the Kedong County. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 652933.

Lou, Y., Wang, W., Guo, M., Guo, W., Kang, H., Feng, L. & Yang, H. (2023). Vegetation affects gully headcut erosion processes by regulating runoff hydrodynamics in the Loess tableland region. *Journal of Hydrology*, 616, 128769.

Luffman, I. E., Nandi, A., & Spiegel, T. (2015). Gully morphology, hillslope erosion, and precipitation characteristics in the Appalachian Valley and Ridge province, southeastern USA. *Catena*, 133, 221-232.

Madadi, A., Asghari Saraskanroud, S., Negahban, S., & Merhamat, M. (2013). Application of Support Vector Machine (SVM) and Boosted Regression Tree (BRT) to Model Gully Erosion Sensitivity in the Shor River Watershed (Mehr County), *Physical Geography Research*, 55 (4), 28-44 (in Persian).

Martınez-Casasnovas, J. A. (2003). A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion. *Catena*, 50(2-4), 293-308.

Marzban, C. (2004). The ROC curve and the area under it as performance measures. *Weather and Forecasting*, 19(6), 1106-1114.

Matsumoto, S., Ogata, S., Shimada, H., Sasaoka, T., Hamanaka, A., & Kusuma, G. J. (2018). Effects of pH-induced changes in soil physical characteristics on the development of soil water erosion. *Geosciences*, 8(4), 134.

Mosafaei, J., & Talebi, A. (2014). A Statistical Look at the Status of Water Erosion in Iran, *Journal of Watershed Management Promotion and Development*, 2 (5), 9-16 (in Persian).

Naghibi, S. A., Pourghasemi, H. R., & Dixon, B. (2016). GIS-based groundwater potential mapping using boosted regression tree, classification and regression tree, and random forest machine learning models in Iran. *Environmental monitoring and assessment*, 188, 1-27.

Nesru, M (2024). Soil Erosion Assessment Using the RUSLE Model, Remote Sensing, and GIS in the Woybo Watershed, Ethiopia. *Agricultural Research*, 1-12.

Palouj, M., & Haseli, M. (2017). Agricultural development potential assessment in the Ashtar plain watershed using geographic information system (GIS), *Village and Development Quarterly*, 20 (1), pp. 123-146 (in Persian).

Park, S. H., Goo, J. M., & Jo, C. H. (2004). Receiver operating characteristic (ROC) curve: practical review for radiologists. *Korean journal of radiology*, 5(1), 11-18.

Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G., & Valentin, C. (2003). Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, 50(2-4), 91-133.

Porto, P., Walling, D. E., & Capra, A. (2014). Using 137Cs and 210Pbex measurements and conventional surveys to investigate the relative contributions of interrill/rill and gully erosion to soil loss from a small cultivated catchment in Sicily. *Soil and Tillage Research*, 135, 18-27.

Refahi, H. (2009). *Water Erosion and Its Control*, 6th Edition. Tehran: Tehran University Press (in Persian).

Rangzan, K., Zahiri Abdoh, Z., & Makram, M. (2022). Determination of areas prone to gully erosion using fuzzy membership function (case study: Mehr city in southern Fars province), *Quantitative Geomorphology Research*, 10 (4), 56-74 (in Persian).

Rahmati, O., Kalantari, Z., Ferreira, C. S., Chen, W., Soleimanpour, S. M., Kapović-Solomun, M., ... & Kazemabady, N. K. (2022). Contribution of physical and anthropogenic factors to gully erosion initiation. *Catena*, 210, 105925.

Regional Water Joint Stock Company of Lorestan Province (2003), Report on the Comprehensive Drought Management Plan of Lorestan Province, Tehran: Amir Kabir University of Technology.

Rong, L., Duan, X., Zhang, G., Gu, Z., & Feng, D. (2019). Impacts of tillage practices on ephemeral gully erosion in a dry-hot valley region in southwestern China. *Soil and tillage Research*, 187, 72-84.

Sadough, S. H., Hassanzadeh, M. M., & Azadi, F. (2014). Zoning of erosion in Kahman watershed using three models EPM, BLM and Fargas, 2 (2), 137-154 (in Persian).

Seutloali, K. E., Beckedahl, H. R., Dube, T., & Sibanda, M. (2016). An assessment of gully erosion along major armoured roads in south-eastern region of South Africa: a remote sensing and GIS approach. *Geocarto International*, 31(2), 225-239.

Shi, P., Bai, L., Zhao, Z., Dong, J., Li, Z., Min, Z & Li, P. (2023). Vegetation position impacts soil carbon losses on the slope of the Loess Plateau of China. *Catena*, 222, 106875.

Slimane, A. B., Raclot, D., Rebai, H., Le Bissonnais, Y., Planchon, O., & Bouksila, F. (2018). Combining field monitoring and aerial imagery to evaluate the role of gully erosion in a Mediterranean catchment (Tunisia). *Catena*, 170, 73-83.

Tang, J., Xie, Y., Wu, Y., & Liu, G. (2023). Influence of precipitation change and topography characteristics on the development of farmland gully in the black soil region of northeast China. *Catena*, 224, 106999.

Therneau, T., Atkinson, B., Ripley, B., & Ripley, M. B. (2015). Package 'rpart'. Available online: cran. ma. ic. ac. uk/web/packages/rpart/rpart. pdf (accessed on 20 April 2016).

https://www.qld.gov.au/health/contacts/advice/13health - 50k - 6 January 2020

Yu, Y., Wei, W., Chen, L., Feng, T., & Daryanto, S. (2019). Quantifying the effects of precipitation, vegetation, and land preparation techniques on runoff and soil erosion in a Loess watershed of China. *Science of the total environment*, 652, 755-764.

Yuan, M., Zhang, Y., Zhao, Y., & Deng, J. (2020). Effect of rainfall gradient and vegetation restoration on gully initiation under a large-scale extreme rainfall event on the hilly Loess Plateau: A case study from the Wuding River basin, China. *Science of the Total Environment*, 739, 140066.

Zabihi, M., Mirchooli, F., Motevalli, A., Darvishan, A. K., Pourghasemi, H. R., Zakeri, M. A., & Sadighi, F. (2018). Spatial modelling of gully erosion in Mazandaran Province, northern Iran. *Catena*, 161, 1-13.

Zakeri Nejad, R., Kahrani, A., & Entezari, M. (2013), Soil sensitivity assessment to ditch erosion using the CART model and geographic information system (GIS) (Study area: Khasweyeh watershed, Fars province), *Quantitative Geomorphology Research*, 12 (2), 72-90 (in Persian).

Zhao, J., Wang, Z., Dong, Y., Yang, Z., & Govers, G. (2022). How soil erosion and runoff are related to land use, topography and annual precipitation: Insights from a meta-analysis of erosion plots in China. *Science of the Total Environment*, 802, 149665.

Zhao, Y., Zhang, B., He, Y., Luo, J, Wang, L, Deng, Q., ... & Yang, D. (2022). Influence of geological conditions on gully distribution in the Dry–hot Valley, SW China. *Catena*, 214, 106274.