Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University

Journal of Watershed Management Research, Vol. 17, Issue 1, 2026 ..... p: 48-68

OPEN ACCESS

Research Paper

Prediction of Gully Erosion in the Maroon Dam Watershed

Majid Khazaei[1], Korush Shirani[2] and Iman Saleh[3]

1- Assistant Professor, Forests, Rangelands and Watershed Management Engineering Department, Kohgiluyeh & Boyerahmad Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Kohgiluyeh & Boyerahmad, Iran, (Corresponding author: m.khazaei@areeo.ac.ir)
2- Associate Professor, Water and Soil Conservation Department, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran
3- Assistant Professor, Forests, Rangelands and Watershed Management Engineering Department, Kohgiluyeh & Boyerahmad Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Kohgiluyeh & Boyerahmad, Iran

Received: 05 August, 2025 Revised: 07 November, 2025 Accepted: 10 December, 2025

Extended Abstract

Background: Soil erosion is one of the most serious environmental threats to agricultural lands and natural areas. Among the various forms of soil erosion, gully erosion is the most dominant process of land degradation and an advanced form of soil erosion. Therefore, identifying effective factors and predicting areas susceptible to gully erosion are the key factors for land management and planning.

Spatial forecasting of gully erosion using models that are based on land sensitivity to gully erosion and their output leads to the preparation of gully erosion risk maps in the form of gully erosion is the most suitable strategy for land management planning in watersheds to prevent gully erosion. If there is a zoning map of gully erosion in watersheds, socioeconomic damage could be controlled through appropriate measures and strategies, in addition to preventing high costs to control gully erosion. According to the available models and relationships, it can be concluded that most efforts in gully erosion modeling have been focused on the location of gullies, as well as predicting the possibility or non-possibility of gully occurrence. As such, only a part of the effective factors have been investigated due to the variability of factors affecting the gully. The present research aims to determine the most important factors affecting the gully erosion and prioritize the factors, with final zoning of the gully points and sensitivity to the gully in the Maroon watershed.

Methods: Maroon watershed is located in the southern and southwestern slopes of the Middle Zagros. The area of the watershed is 3837 km2, the maximum height from the sea level is 3420.3 m, and the minimum is 372.8 m. The average annual rainfall is 815 mm, and the long-term average annual temperature in the representative stations of the plains and the stations located in the highlands are 19 and 16 ºC, respectively. According to the Dumarten system, the climate type is Mediterranean to semi-arid. In summary, the present research was carried out as follows: 1) Selecting the area, preparation of the distribution map of gully occurrence (dependent variable), and its random division into two training or calibration (70 percent) and experimental or forecasting (30 percent) categories, 2) preparation of the maps of 23 effective factors (independent variables), 3) selecting the affecting factors using alignment test between the affecting factors and the occurrence of gullies, 4) running the model, 5) validation and evaluation of the model, and 6) preparation of a zoning map of susceptibility to gully erosion.

In this study, the location of the gullies created in the Maroon Dam watershed was first recorded using a global positioning system and Google Earth images, which were converted to points based on gully polygons. Then, recorded points were divided into two groups of training data (70%) and experimental data (30%) for the purpose of calibration and validation of the models, respectively. Next, 23 factors affecting the occurrence of gully erosion were identified based on scientific sources and watershed conditions, followed by preparing a map of all factors. The weights of these factors were determined based on the frequency ratio (FR). Correlation relationships among factors were examined using the collinearity test. In the next step, three models of maximum entropy, Dempster-Schaffer, and the weight of evidence were calibrated and validated using the weighted data of the affecting factors and the training and experimental spatial data of ditch distribution. A ditch erosion zoning map was prepared for each model, and then the optimal model was selected based on the validation data. The jackknife test and

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1252]

Copyright ©2026. Khazaei et al. Published by Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 Unported License, which allows users to read, copy, distribute, and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

Operating Characteristic (ROC) curve were used to determine the thresholds of the factors affecting the occurrence of gully erosion and to evaluate the efficiency, respectively.
Results: The results showed that the ratio of gully frequency has the highest amount in the very high class based on the cell area index. The validation results in maximum entropy, Dempster-Shaffer, and the weight of evidence models based on the ROC index were 0.85, 0.81, and 0.78, respectively, indicating the higher accuracy of the maximum entropy model than the Dempster-Shaffer and the weight of evidence methods. Moreover, the weight of evidence method presented the lowest accuracy among the studied methods. In general, all three models had an acceptable percentage of ROC, which indicates the high performance of all three models. The results showed that land use and geological parameters had the highest contribution in the occurrence of gully erosion, with contributions of 24 and 18 percent, respectively.
Conclusion: Gully erosion is one of the most important natural hazards in the Maroon Dam watershed, which requires attention to soil conservation and gully erosion control issues. In this regard, one of the initial and required measures to determine sensitive areas and control and implement appropriate management measures is to prepare a gully erosion map. For this purpose, different methods and models, i.e., the weight of evidence, Dempster-Shaffer model, and entropy method, were used to prepare a gully erosion sensitivity map. In total, 23 parameters affecting gully erosion at the watershed level were identified and used as independent variables to predict gully erosion. The results of the factors affecting gully erosion showed that the lithological factor had the greatest impact on the ROC. Different parameters have different levels of participation in the occurrence of gully erosion, so that land use and geology parameters, with contributions of 24 and 18 percent, had the highest contribution to the occurrence of gully erosion. In general, the high accuracy of the gully erosion sensitivity map obtained from the maximum entropy model can be used to take appropriate management measures to prevent gully erosion in very sensitive areas.

Keywords: Entropy, Erosion, Kohgiluyeh & BoyerAhmad Province, Model, Takht Daraz Watershed, Zoning

How to Cite This Article: Khazaei, M., Shirani, K., & Saleh, I. (2026). Prediction of Gully Erosion in the Maroon Dam Watershed. *J Watershed Manage Res,* 17(1), 48-68. DOI: 10.61882/jwmr.2026.1252

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1252]

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

مقاله پژوهشی

پیش‌بینی مکانی فرسایش آبکندی در حوزه آبخیز سد مارون

مجید خزائی[۱]، کورش شیرانی[۲] و ایمان صالح[۳]

۱- استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کهگیلویه و بویراحمد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یاسوج، ایران، (نویسنده مسوول: m.khazaei@areeo.ac.ir)

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

۳- استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کهگیلویه و بویراحمد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یاسوج، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۴ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۹

صفحه: ۴۸ تا ۶۸

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: فرسایش خاک یکی از جدی‌ترین مسائل زیست‌محیطی و تهدید جدی برای اراضی کشاورزی و عرصه‌های طبیعی است. از میان انواع حالت‌های فرسایش خاک، فرسایش آبکندی غالب‌ترین فرآیند تخریب زمین و حالت پیشرفته فرسایش خاک است و به همین دلیل شناسایی عوامل مؤثر و پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش آبکندی از عوامل کلیدی جهت مدیریت و آمایش سرزمین هستند. پیش‌بینی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌هایی که مبتنی بر حساسیت به فرسایش خندقی هستند و منجر به تهیه نقشه‌های خطر فرسایش می‌شود، مناسب‌ترین راهکار برای برنامه‌ریزی مدیریت اراضی در حوزه‌های آبخیز برای جلوگیری از فرسایش خندقی است. در صورت وجود نقشه پهنه‌بندی فرسایش خندقی در حوزه‌های آبخیز، می‌توان علاوه بر جلوگیری از هزینه‌های بالا به منظور کنترل فرسایش خندقی، خسارات اقتصادی و اجتماعی را از طریق اقدامات و راهکارهای مناسب کنترل کرد. با توجه به مدل‌ها و روابط موجود، می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین تلاش‌ها در مدل‌سازی فرسایش خندقی بر مکان‌یابی خندق‌ها و همچنین پیش‌بینی احتمال یا عدم احتمال وقوع خندق متمرکز شده‌اند. به طوری که به دلیل متغیر بودن عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی، تنها بخشی از عوامل مؤثر بررسی شده‌اند. هدف از تحقیق حاضر، تعیین مهم‌ترین عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی و اولویت‌بندی عوامل و در نهایت پهنه‌بندی نقاط خندقی و حساسیت به خندق در حوزه آبخیز سد مارون است.

مواد و روش‌ها: حوزه آبخیز مارون در دامنه‌های جنوبی و جنوب غربی زاگرس میانی واقع شده است. مساحت این حوزه آبخیز ۳۸۳۷ کیلومتر مربع، حداکثر ارتفاع از سطح دریا ۳۴۲۰.۳ متر و حداقل آن ۳۷۲.۸ متر است. میانگین بارندگی سالانه ۸۱۵ میلی‌متر، میانگین دمای بلندمدت سالانه در ایستگاه‌های معرف دشت‌ها ۱۹ و ایستگاه‌های واقع در ارتفاعات ۱۶ درجه سانتی‌گراد است. بر اساس سیستم دومارتن، نوع آب و هوا مدیترانه‌ای تا نیمه‌خشک است. به‌طور خلاصه، تحقیق حاضر به شرح زیر انجام شد: ۱) انتخاب منطقه، تهیه نقشه پراکندگی وقوع خندق (متغیر وابسته) و تقسیم تصادفی آن به دو دسته آموزشی یا واسنجی (۷۰ درصد) و پیش‌بینی (۳۰ درصد)، ۲) تهیه نقشه‌های ۲۳ عامل مؤثر (متغیرهای مستقل)، ۳) انتخاب عوامل مؤثر با استفاده از آزمون همراستایی بین عوامل مؤثر و وقوع خندق‌ها، ۴) اجرای مدل، ۵) اعتبارسنجی و ارزیابی مدل و ۶) تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت به فرسایش خندقی.

در این پژوهش، ابتدا به‌وسیله سامانه موقعیت‌یاب جهانی، موقعیت‌های خندق‌های ایجاد شده در حوزه آبخیز سد مارون (تخت دراز) ثبت شدند و سپس با انتقال موقعیت‌های جغرافیایی، خندق‌ها به روی تصاویر گوگل ارث محدوده‌های آبکندی ترسیم شدند. بر اساس توابع تبدیل، محدوده‌های خندق به نقاط آبکندی تبدیل شدند و به‌منظور آماده‌سازی داده‌ها برای وورد به فرایند مدلسازی نقاط ثبت شده در قالب دو دسته داده‌های آموزشی (۷۰ درصد) و آزمایشی (۳۰ درصد) به‌ترتیب به‌منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌ها تقسیم شدند. بر اساس منابع علمی و شرایط حوزه آبخیز، ۲۳ عامل مؤثر بر وقوع فرسایش آبکندی براساس شناسایی شدند و نقشه هر کدام از عوامل تهیه شد. وزن این عوامل بر اساس نسبت فراوانی (FR) تعیین و همبستگی عوامل مؤثر با استفاده از آزمون هم‌خطی بررسی شد. در مرحله بعد، سه مدل حداکثر آنتروپی، دمپسترشفر و وزن شاهد با استفاده از داده‌های وزنی عوامل موثر و داده‌های آموزشی و آزمایشی مکانی پراکنش آبکندی مورد واسنجی و اعتبارسنجی قرار گرفتند. نقشه پهنه‌بندی فرسایش آبکندی برای هر کدام از مدل‌ها تهیه و سپس بر اساس داده‌های اعتبارسنجی مدل بهینه انتخاب شد. آزمون جک‌نایف و منحنی مشخصه عملکرد (ROC) به‌ترتیب برای تعیین آستانه‌های عوامل موثر در رخداد فرسایش خندقی و ارزیابی کارآمدی مدل‌های مورد بررسی استفاده شدند.

یافته‌ها: نسبت فراوانی خندق در طبقه متوسط تا خیلی زیاد بیشتر از دو روش دیگر بود و بر اساس شاخص سطح سلول هسته طبقات، طبقه خیلی کم تا کم بیشترین میزان را داشت. نتایج اعتبارسنجی هر سه مدل حداکثر آنتروپی، دمپستر شفر و وزن شاهد بر اساس شاخص سطح زیر منحنی نشان دادند که به‌ترتیب سطوح زیر منحنی در روش‌های ذکر شده به میزان ۰/۸۵، ۰/۸۱ و ۰/۷۸ بودند که دقت بالاتر مدل حداکثر آنتروپی نسبت به روش دمپسترشفر و وزن شاهد را نشان می‌دهد. همچنین، روش وزن شاهد کمترین دقت را میان روش‌های مورد بررسی داشت. به‌طور کلی، هر سه مدل دارای درصد قابل قبولی از مساحت زیر منحنی بودند که این مسئله نشان دهنده عملکرد بالای هر سه مدل در منطقه است. پارامترهای کاربری اراضی و زمین‌شناسی با سهم مشارکت ۲۴ و ۱۸ درصد بیشترین سهم مشارکت را در رخداد فرسایش آبکندی داشتند. سهم‌های عوامل فاصله از شبکه زهکشی، نوع خاک، فاصلی از آبراهه، ارتفاع از سطح دریا، مساحت حوضه، بارش، بافت سطحی، تراکم زهکشی، اقلیم، شیب، شاخص تفاوت پوشش گیاهی، طول شیب، سایه روشن، شاخص قدرت جریان، شاخص طبقه بندی انحناء، شاخص رطوبت توپوگرافی، وجه شیب، شاخص همگرایی، انحناء نیمرخ، انحناء دامنه و شاخص انحناء به ترتیب ۱۷، ۱۰، ۵/۲، ۵، ۴، ۳، ۲/۷، ۲، ۱/۳، ۱/۳، ۱/۱، ۰/۷۵، ۰/۶۴، ۰/۳۶، ۰/۲۷، ۰/۲۶، ۰/۰۹، ۰/۰۵، ۰/۰۳، ۰ درصد بودند.

نتیجه‌گیری: فرسایش آبکندی از مهمترین مخاطرات طبیعی در حوضه آبخیز سد مارون است که مستلزم توجه به مسائل حفاظت خاک و مهار فرسایش آبکندی است. در این راستا، یکی از اقدامات اولیه و مورد نیاز برای تعیین پهنه‌های حساس به فرسایش و مهار و اجرای اقدامات مدیریتی مناسب، تهیه نقشه فرسایش آبکندی است. به این منظور، از روش‌ها و مدل‌های مختلف وزن شاهد، مدل دمپسترشفر و روش آنتروپی به‌منظور تهیه نقشه حساسیت فرسایش آبکندی استفاده شد. در مجموع، ۲۳ پارامتر مؤثر در فرسایش آبکندی در سطح حوزه آبخیز شناسایی و به‌عنوان متغیر مستقل برای پیش بینی فرسایش آبکندی استفاده شدند. نتایج عوامل مؤثر بر فرسایش آبکندی نشان دادند که عامل سنگ‌شناسی دارای بیشترین تاثیر بر سطح زیر منحنی بود. نتایج حاصل از تعیین وزن پارامترها نشان دادند که پارامترهای مختلف دارای میزان مشارکت متفاوت در وقوع فرسایش آبکندی بودند و پارامترهای کاربری اراضی، زمین‌شناسی با سهم مشارکت ۲۴ و ۱۸ درصد بیشترین سهم مشارکت را در رخداد فرسایش آبکندی داشتند. به‌طور کلی، با توجه به دقت بالای نقشه حساسیت فرسایش آبکندی حاصل از مدل حداکثر آنتروپی می‌توان از آن برای انجام اقدامات مدیریتی مناسب برای جلوگیری از پیشروی و مهار فرسایش خندق در مناطق خیلی حساس استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی آبکند، حوزه آبخیز تخت دراز، فرسایش خاک، کهگیلویه و بویراحمد، مدل آنتروپی، مدل دمپسترشفر، مدل وزن شاهد

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1252]

مقدمه

فرسایش خاک یکی از مسائل جدی زیست‌محیطی و تهدیدی جدی برای اراضی کشاورزی و منابع طبیعی است (Posesen *et al*., 2003; Pal *et al*., 2019). فرسایش خاک انواع و اشکال مختلفی دارد که هر کدام فرآیند تشکیل متفاوت دارند. در این میان، فرسایش آبکندی غالب‌ترین فرایند تخریب زمین و حالت پیشرفته فرسایش خاک است (Montanarella *et al*., 2016, Pennock, 2019) که طبق تحقیقات صورت گرفته در دنیا سهم بالایی در نرخ فرسایش خاک از عرصه‌های طبیعی و رسوبات مخازن سدها را تشکیل داده است (Poesen *et al*., 2003; Vanmaercke *et al*., 2012). بر اساس تحقیقات صورت گرفته، تخمین زده شده است که در مقیاس جهانی تقریباً ۶ میلیون هکتار از زمین‌های حاصل‌خیز سالانه به‌دلیل فرسایش خاک از بین می روند (Bobe, 2018) که این میزان در مورد ایران تقریباً ۲ تا ۲/۵ میلیارد تن در سال برآورد شده است که از نظر فرسایش خاک در رتبه دوم جهان قرار دارد (Mohammadi *et al*., 2018). تعاریف مختلفی برای فرسایش آبکندی توسط محققان مختلف ارائه شده‌اند. به طور کلی، فرسایش آبکندی تشکیل و گسترش رخساره‌های فرسایشی در خاک در نتیجه جریان متمرکز رواناب است (Posesen *et al*., 2003). این نوع از فرسایش آثار درون منطقه‌ای و برون منطقه‌ای متعددی از جمله تخریب اراضی، کاهش عملکرد اراضی و کاهش بهره‌روی تولید، تخریب جاده‌ها و زیرساخت‌ها و مناطق مسکونی، کاهش کیفیت خاک و تغییر کاربری اراضی و بیابان‌زائی دارد (Guerra *et al*., 2007; Zgłobicki *et al*., 2015; Hayas *et al*., 2017). با توجه به اثرات مخرب فرسایش آبکندی در حوزه‌های آبخیز، نیاز به مطالعات دقیق در خصوص تعیین راهبردهای مدیریت و مهار فرسایش است (Golosov & Belyaev, 2013). توسعه راهبردهای مناسب برای پیشگیری و اصلاح فرسایش آبکندی مستلزم درک کامل دینامیک و عوامل مهار کننده آن است. فرسایش آبکندی از گذشته تاکنون مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است (Castillo & Gomez, 2016) که منجر به شناخت و درک بیشتری در ارتباط با نحوه شکل‌گیری و گسترش خندق و سهم آنها در بارهای رسوبی شده است. با این‌حال، هنوز درک ما از فرآیندها، تعاملات و عوامل مهار کننده فرسایش آبکندی محدود است (Poesen *et al*., 2011; De Vente *et al*., 2013; Vanmaercke *et al*., 2016). مناسب‌ترین راهکار برای برنامه‌ریزی مدیریت اراضی در حوزه‌های آبخیز جهت پیشگیری از رخداد این نوع فرسایش تهیه نقشه پهنه‌بندی فرسایش خندقی است، به‌نحوی که در صورت در اختیار بودن نقشه پهنه‌بندی، علاوه بر پیشگیری از انجام هزینه‌های سنگین برای مهار و مبارزه با فرسایش خندقی از طریق اقدامات متناسب با شرایط حوضه، از خسارات اقتصادی و صدمات اجتماعی ناشی از آن جلوگیری می کند (Gornami & Shadfa, 2018). در این خصوص، مطالعات زیادی صورت گرفته‌اند که در ذیل به تعدادی از آنها اشاره شده است.

شفیعی و همکاران (Shafei *et al.,* 2011) ریخت اقلیمی و خاک‌شناسی آب‌کندهای به وجود آمده در دو حوزه آبخیز (زهره و مارون) واقع شده در دو نوع از مهمترین سازندهای حساس به فرسایش (میشان و گچساران) را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان دادند که تغییرات SAR و ESP، EC در سازند گچساران نسبت به سازند میشان بیشتر بودند که نشان دهنده بالا بودن میزان املاح در خاک است که باعث فرسایش پذیری بیشتر خاک در سازند گچساران شده است. این موضوع، باعث تفاوت در مورفولوژی آبکندهای منطقه گچساران نسبت به منطقه‌ی دهدشت شده است؛ به‌طوری که شکل پلان عمومی آبکند در منطقه‌ی دهدشت هم به‌صورت پنجه‌ای و هم خطی و در منطقه‌ی گچساران غالبا به‌صورت پنجه‌ای بود.

خزائی و همکاران (Khazayi *et al.,* 2019) نقش عوامل ریخت‌شناسی، پوشش گیاهی و بارندگی بر پیشروی خندق در مراحل مختلف را در حوزه آبخیز مارون بررسی نمودند. بدین منظور ابتدا اقدام به نصب شاخص در مقاطع خندق و در فاصله‌های مختلف از خندق نمودند و سپس مشخصات خندق را بعد از وقوع هر بارندگی اندازه‌گیری کردند. نتایج آنها نشان داد که توسعه‌ی خندق به‌صورت غار مانند و از بخش میانی تا تحتانی بر اثر لایه‌های سست و شکننده و وجود املاح و عناصر انحلال‌پذیر و فروریختن سقف خندق بود. نتایج تحقیق آنها نشان دادند که شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک، پوشش گیاهی و بارندگی در کندن خاک و پیشروی خندق چه از نظر طولی و چه از نظر عرضی مؤثر بودند (Khazaei *et al*., 2012). خوجه و همکاران (Khojeh *et al*., 2017) نقش عوامل محیطی را بر شکل‌گیری و توسعه فرسایش آبکندی در استان گلستان مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان دادند که عوامل زمین محیطی، از قبیل طبقات ارتفاعی، شیب زمین، جهت دامنه، ارتفاع دامنه، بارندگی سالانه، واحدهای سنگی، تیپ اراضی و تراکم پوشش گیاهی، نقش موثری در شکل‌گیری و گسترش فرسایش آبکندی داشتند.

یوسفی مبرهن و شیرانی (Yousefi Mobarhan & Shirani, 2023) نقشه حساسیت به فرسایش آبکندی را در حوزه آبخیز علاء سمنان با روش حداکثر آنتروپی تهیه نمودند. آن‌ها دقت بالای مدل حداکثر آنتروپی را در پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش آبکندی در مراحل واسنجی (۹۱ درصد) و اعتبارسنجی (۸۹ درصد) گزارش دادند.

برنینی و همکاران (Bernini *et al*., 2021) اقدام به شناسایی و ارزیابی عوامل مؤثر بر فرسایش آبکندی در حوضه آبخیز رودخانه Mkhomazi در KwaZulu-Natal، آفریقای جنوبی نمودند. آن‌ها در ابتدا نقشه پراکنش خندق را تهیه کردند و از تکنیک‌های سنجش از دور و همچنین بررسی‌های میدانی را برای اعتبارسنجی نقشه خندق استفاده نمودند. برای اعتبارسنجی نتایج مدل MaxEnt[1]، از نقشه پراکنش خندق

[1] Maximum Entropi

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1252]

استفاده کردند. بر اساس نتایج، لایه‌های محیطی شامل سطح حوضه آبخیز، شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (Normalized difference vegetation index) (NDVI)، فاصله عمودی تا شبکه آبراهه، سنگ شناسی، عمق دره، شاخص موقعیت توپوگرافی (Topographic position index) (TPI)، کاربری زمین و شاخص رطوبت توپوگرافی (Stream Power Index) (SPI) نقش مهم و معنی‌داری را در شکل‌گیری فرسایش آبکندی نشان دادند. نتایج آن‌ها نشان دادند که مدل MaxEnt توانست بین خندق‌های نوع V شکل و U شکل بر اساس روند منحنی‌های پاسخ تمایز ایجاد کند.

شیرانی و همکاران (Shirani *et al*., 2023) با استفاده از ۲۰ عامل موثر محیطی و هیدروژئومورفومتریک و به کارگیری مدل‌های رگرسیونی وزنی جغرافیایی (Geographic weighted regression) (GWR)، رگرسیون لجستیک (LogR) و نسبت فراوانی (Frequency Ratio) در استان ایلام اقدام به پهنه‌بندی و پیش‌بینی رخداد فرسایش آبکندی نمودند. آنها ضمن اولویت‌بندی عوامل موثر و تعیین اهمیت نقش عوامل هیدروژئومورفومتریک مورد استفاده، نتیجه گرفتند که مدل‌های GWR، LogR و FR به‌ترتیب از دقت مناسبی در پیش‌بینی رخداد فرسایش آبکندی برخوردار بودند.

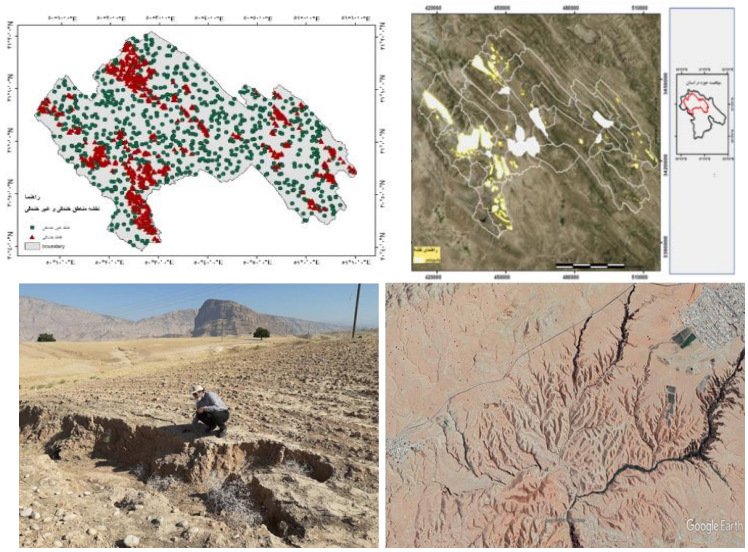
حسن‌الزمان و شیت (Hasanuzzaman & Shit, 2024) با به کارگیری مدل‌های یادگیری ماشینی RF (Random Forest) و XGB (extreme gradient boosting) و روش تصمیم‌گیری تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و نسبت فراوانی (FR)، برای ارزیابی حساسیت فرسایش آبکندی (GES) در حوضه رودخانه کانگساباتی (Kangsabati) در شرق هند نشان دادند که تقریباً ۷ درصد از حوضه آبخیز بسیار مستعد خندق، ۱۲ درصد نسبتاً حساس و ۸۱ درصد با حساسیت کم به فرسایش آبکندی بودند. مقادیر ROC (Receiver Operating Characteristic) در مدل XGB (ROC=۸۵/۵)، مدل تحلیل سلسله مراتبی (ROC=۸۱/۷)، مدل RF (ROC=۷۹/۸) و مدل FR (ROC =۸۳/۸) بودند.

جمع‌بندی تحقیقات انجام‌شده در ارتباط با موضوع تحقیق نشان داده است که فرسایش آبکندی یک چالش جدی محیط زیستی در مناطق دنیا شناخته شده است. در این خصوص، از گذشته تاکنون تحقیقات متعددی صورت گرفته‌اند که به درک و شناخت فرایند تشکیل خندق و عوامل مهارکننده خندق کمک شایانی نموده‌اند. با این‌حال، با توجه به ماهیت پیچیده این نوع از فرسایش و دخالت عوامل مختلف در تشکیل آن، هنوز شناخت کاملی از عوامل موثر بر خندق وجود ندارد و مهار آن نیز در گرو شناخت دقیق این نوع فرسایش و پیش‌بینی آن در مقیاس حوزه آبخیز است.

لذا، با توجه به وسعت تخریب اراضی ناشی از این نوع فرسایش در حوزه آبخیز سد مارون و هزینه‌های بالای لایروبی رسوبات پشت سد، لزوم شناسایی مناطق حساس به این نوع از فرسایش برای جلوگیری از پیشروی خندق را بسیار حائز اهمیت نموده است. در این تحقیق، با لحاظ عوامل متعدد موثر بر فرسایش آبکندی از مدل‌های مختلف آماری به منظور تهیه نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش آبکندی پرداخته شده است که به برنامه‌ریزان و ذینفعان محلی برای اجرای اقدامات مناسب حفاظت از خاک و آب کمک خواهد نمود.

مواد و روش‌ها

حوزه آبخیز مارون در طول جغرافیایی ۵۰-۰۵ الی ۱۱-۵۱ شرقی و عرض ۳۹-۳۰ الی ۲۱-۳۱ شمالی واقع شده است (شکل ۱). مساحت حوضه ۳۸۳۷ کیلومتر مربع، حداکثر ارتفاع ۳۴۲۰/۳ متر و حداقل ۳۷۲/۸ متر هستند (Khazayi *et al.,* 2012). متوسط بارندگی سالیانه ۸۱۵ میلی‌متر، میانگین دمای سالیانه بلندمدت در ایستگاه معرف مناطق دشتی به‌میزان ۱۹ و ایستگاه‌های واقع در مناطق مرتفع (کوهستانی) به میزان ۱۶ درجه سانتی‌گراد گزارش شدند (Khazayi *et al.,* 2012). تیپ اقلیمی مطابق سیستم دومارتن، مدیترانه‌ای تا نیمه‌خشک است (Khazayi *et al.,* 2012). پراکنش فرسایش آبکندی در حوزه ابخیز مارون طوری است که این نوع از فرسایش در بخش‌های مختلف حوضه مشاهده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه
Figure 1. Geographical location of the studied area

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1252]

در این پژوهش، به‌منظور شناسایی محدوده‌های فرسایش آبکندی علاوه بر بازدیدهای میدانی از تصاویر ماهواره‌ای نیز استفاده شده است. برای این‌منظور، در ابتدا محدوده‌های آبکندی استخراج گردید و بر اساس تابع تبدیل پلی‌گون به نقطه در نرم‌افزار ARCGIS هر محدوده به نقاط آبکندی تبدیل شد. نقشه محدوده‌های ثبت شده از فرسایش آبکندی در حوزه آبخیز مارون در شکل (۱) ارائه شده است. روندنمایی از مراحل اجرای این تحقیق در شکل (۲) ارائه شده است.

به‌منظور تهیه و آماده‌سازی نقشه‌های عوامل موثر از نقشه‌های موضوعی پایه و تصاویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه استفاده گردید. فهرست عوامل موثر بر رخداد فرسایش آبکندی همراه با مشخصات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

به‌منظور تهیه نقشه پیش‌بینی حساسیت به فرسایش آبکندی با روش‌های وزن شاهد، دمپستر شفر و حداکثر آنتروپی علاوه بر عوامل مستقل نیاز به داده مشاهداتی (عامل وابسته) است.

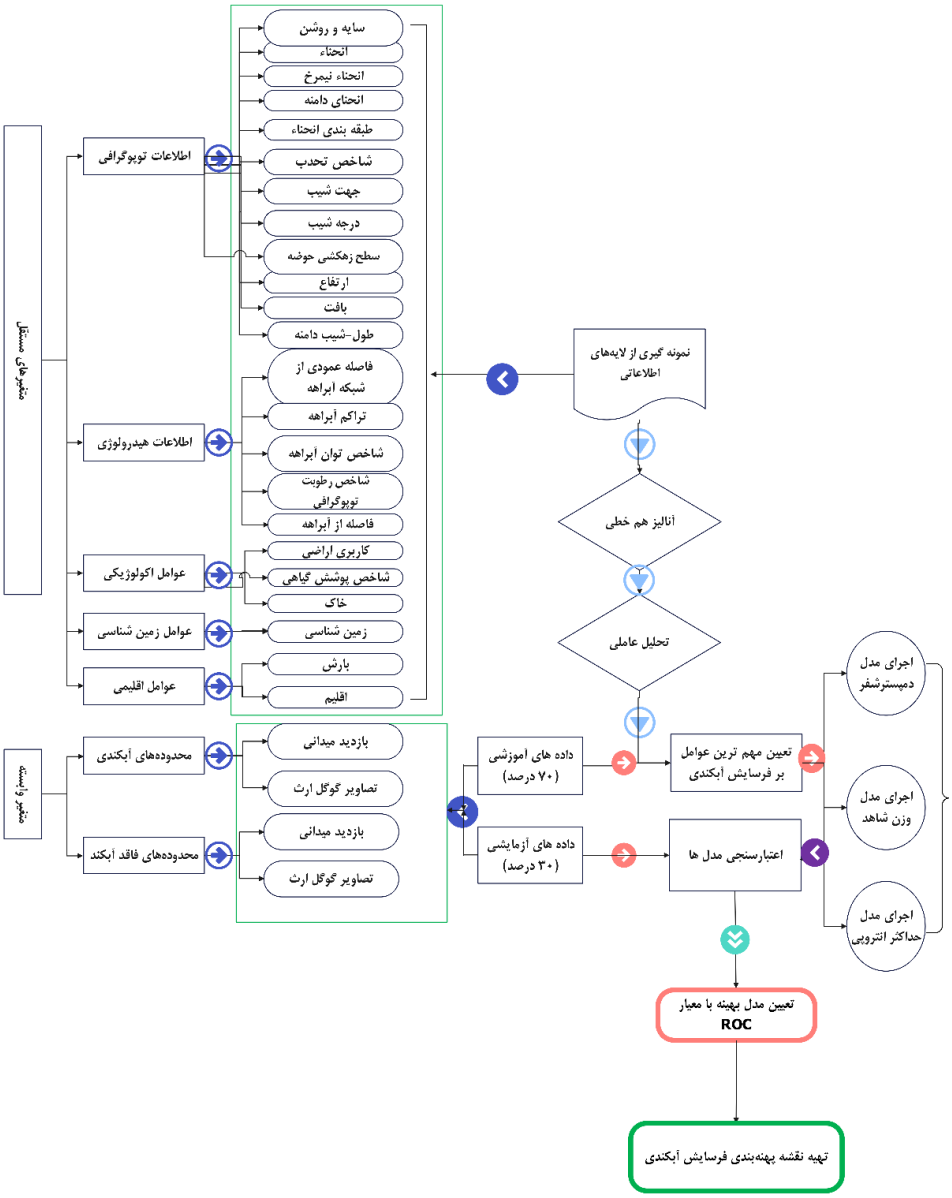
نقشه عوامل مختلفی که در شکل‌گیری خندق‌ها مؤثر هستند (۲۳ عامل) با استفاده از منابع اطلاعاتی مختلف که در جدول شماره ۱ ارائه شده‌اند در نرم‌افزارهای ArcGIS 10.8، SAGA، GooleEarthEngine تهیه شدند. این عوامل در قالب پنج دسته شامل عوامل توپوگرافی (انحنای کلی، انحنای دامنه و نیمرخ، شاخص طبقه‌بندی انحناء، شاخص تحدب، سطح زهکشی حوزه آبخیز، سایه روشن، ارتفاع، شیب، جهت، بافت سطحی) عوامل هیدرولوژی (طول شیب آبراهه، فاصله عمودی از شبکه آبراهه، شاخص توان آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی، تراکم آبراهه، فاصله از آبراهه)، عوامل اکولوژیکی (خاک، شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) و کاربری اراضی)، عوامل زمین‌شناسی (سنگ شناسی)، و عوامل اقلیمی (بارش و اقلیم) در یک سیستم مختصات واحد تهیه شدند (شکل ۳) .

برای این منظور، ابتدا همه نقشه‌ها با درجه تفکیک مکانی ۱۲/۵ تهیه شدند سپس به منظور تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی و پردازش سریعتر به درجه تفکیک مکانی ۲۵ متر تبدیل شدند.

جدول ۱- مشخصات عوامل مؤثر بر فرسایش آبکندی در حوزه آبخیز سد مارون
Table 1. Characteristics of factors affecting gully erosion in the Maroon Dam watershed

نام عامل یا لایه Factor (Layer)	نرم‌افزا ر مورد استفاده Software	داده مبنا Basic data	مرجع	نام عامل یا لایه Factor (Layer)	نرم‌افزا ر مورد استفاده Software	داده مبنا Basic data	مرجع
انحنا Curvature	ArcGIS	DEM-ALOS	Moore et al., 1991	جهت شیب Aspect	ArcGIS	DEM-ALOS	Burrough and McDonell, 1998
انحنای دامنه Plan Curvature	ArcGIS	DEM-ALOS	Moore et al., 1991	آنالیز سایه و روشن Analytical hillshading	SAGA GIS	DEM-ALOS	Tarini, Cignoni, Montani, 2006
انحنای نیمرخ Profile Curvature	ArcGIS	DEM-ALOS	Moore et al., 1991	بافت سطح زمین Terrian surface texture	SAGA GIS	DEM-ALOS	Iwahashi and Pike, 2007
تحدب Convergence index	SAGA GIS	DEM-ALOS	Koethe and Lehmeier, 1996	خاک Soil type	ArcGIS	موسسه آب و خاک	ArcGIS® 10.8
طبقه‌بندی انحناء Curvature classification index	SAGA GIS	DEM-ALOS	MacMillan and Shary, 2009	سنگ‌شناسی Lithology	ArcGIS	سازمان زمین‌شناسی کشور	ArcGIS® 10.8
فاصله عمودی از آبراهه Vertical distance to channel network index	SAGA GIS	DEM-ALOS	Olaya & Conrad, 2008	کاربری اراضی Landuse	Google Earth Engine	تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2	ArcGIS® 10.8
سطح زهکشی حوزه آبخیز Catchment area	SAGA GIS	DEM-ALOS	Olaya & Conrad, 2008	شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال NDVI	Google Earth Engine	تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2	ArcGIS® 10.8
توان آبراهه Stream power Index	ArcGIS	DEM-ALOS	Olaya &Conrad, 2009	بارش Rain	ArcGIS	ایستگاه هواشناسی	ArcGIS® 10.8
طول – شیب دامنه Length Slope	SAGA GIS	DEM-ALOS	Wischmeier, , Smith, 1978, Moore et al., 1991	تراکم آبراهه Drainage density	SAGA GIS	DEM-ALOS-12.5mRes	Silverman, 1986
رطوبت توپوگرافی Topographic wetness Index	ArcGIS	DEM-ALOS	Olaya &Conrad, 2009	فاصله از آبراهه Distance to drainage	SAGA GIS	DEM-ALOS-12.5mRes	Silverman, 1986
ارتفاع Altitude	ArcGIS	DEM-ALOS	Burrough and McDonell, 1998	اقلیم Climate	ArcGIS	داده‌های بارش و دما	ArcGIS® 10.8
درجه شیب Slope	ArcGIS	DEM-ALOS	Burrough and McDonell, 1998				

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1252]



شکل ۲- روندنمای پهنه‌بندی فرسایش آبکندی در حوزه آبخیز مارون
Figure 2. The fowchart of gully erosion zoning in the Maroon watershed

به‌منظور مدل‌سازی فرسایش آبکندی با مدل‌های دمپسترشفر یا دمپسترشفر، وزن شاهد و حداکثر آنتروپی از لایه‌های اطلاعاتی تهیه شده در مرحله قبل نمونه‌گیری صورت گرفت. برای این کار، ارزش عددی پیکسل‌های هر عامل استخراج و معادل هر پیکسل وجود و عدم وجود خندق نیز مشخص گردید. سپس، به منظور بررسی عدم وجود همبستگی بین عوامل مؤثر بر فرسایش آبکندی از آزمون هم‌خطی استفاده شد. در صورتی که میزان هم‌خطی بزرگتر از ۰/۲ و میزان تورم واریانس کمتر از ۱۰ باشد بین عوامل همبستگی وجود ندارد و بر عکس (Shirani *et al.*, 2023). در صورت وجود هم‌خطی بین عامل‌ها باید آن عوامل از چرخه مدلسازی حذف گردند. برای این منظور از نرم‌افزار SPSS 21 استفاده شد.

بعد از تعیین عوامل اصلی مؤثر بر فرسایش آبکندی بر اساس روابط هر مدل اقدام به مدل‌سازی گردید به‌طوری‌که مدل‌های دمپسترشفر و وزن شاهد در نرم‌افزار اکسل برنامه‌نویسی شدند. سپس، از طریق وارد کردن تعداد پیکسل‌های هر طبقه و پیکسل‌های خندق و محاسبه پارامترهای هر مدل اقدام به مدل‌سازی گردید و مدل آنتروپی نیز از طریق نرم‌افزار MaxEnt اجرا گردید. در نهایت، بعد از اجرای مدل‌ها به‌منظور تهیه نقشه وزنی برای مدل وزن شاهد مقدار C برای هر یک از طبقات عوامل موثر بر فرسایش آبکندی محاسبه و در نرم‌افزار ArcGIS بر اساس آن میزان و در نظر گرفتن حاصلضرب مقدار C در ارزش هر پیکسل، نقشه نهایی حساسیت به فرسایش آبکندی تهیه شد. به‌منظور تهیه نقشه‌های وزنی برای تولید نقشه پهنه‌بندی حساسیت

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1252]

فرسایش آبکندی با مدل دمپسترشفر مقدار تابع باور برای هر یک از طبقات عوامل موثر بر فرسایش آبکندی محاسبه و توسط نرم‌افزار ArcGIS در نقشه طبقه‌بندی شده آن عامل ضرب شد و نقشه حساسیت فرسایش آبکندی تهیه شد. به منظور تهیه نقشه‌های وزنی برای تولید نقشه پهنه‌بندی حساسیت فرسایش آبکندی با استفاده از مدل انتروپی نیز نقشه تهیه شده از نرم‌افزار MaxEnt توسط نرم‌افزار ArcGIS طبقه‌بندی و ارائه شد. از ازمون جک نایف در مدل آنتروپی به‌منظور اثرات متغیرها بر فرسایش آبکندی استفاده شد.

در این روش، با دخالت همه متغیرها در مدلسازی و حذف مرحله به مرحله متغیرها سهم هر متغیر در دقت مدل تعیین شد به این صورت که کاهش شدید سطح زیرمنحنی نشان دهنده تاثیرگذاری زیاد متغیر حذفی بود. یکی از عوامل مهم در پهنه‌بندی فرسایش و مدیریت مناطق مستعد فرسایشی، دانستن آستانه و یا حد خطر معیارها یا عوامل موثر در فرسایش خندقی است. به این‌منظور، آستانه‌های عوامل موثر بر فرسایش خندقی در این روش بر اساس نمودارهای حاصل از اجرای مدل حداکثر آنتروپی (مدل برتر) تعیین شدند. در واقع، برای هر شاخص نمودار چگونگی گسترش و توسعه فرسایش آبکندی نمایش داده می‌شود. به‌عبارت دیگر، این نمودارها با استفاده از مدل برتر (در این پژوهش حداکثر آنتروپی) و بر اساس نقشه حساسیت اراضی به فرسایش خندقی برای هر شاخص بصورت مستقل از سایر شاخص‌ها تعیین می‌شود (Shirani *et al.*, 2023).

ارزیابی و اعتبارسنجی مدل‌ها

در این پژوهش، موقعیت محدوده‌های فرسایش خندقی با بازدیدهای میدانی به‌وسیله سامانه موقعیت‌یاب جهانی ثبت و سپس در نرم‌افزار گوگل ارث اقدام به ترسیم پلان هر کدام از خندق شد. سپس، به‌منظور ورود اطلاعات به فرایند مدل‌سازی هر کدام از پلی‌گون‌های آبکندی به نقاط آبکندی تبدیل گردید. در مجموع، ۸۱۸ نقطه آبکندی به‌دست آمد که از ۷۰ درصد خندق‌ها (۵۷۲ نقطه) برای آموزش مدل‌ها استفاده گردید و از ۳۰ درصد مابقی (۲۴۶ نقطه) برای اعتبارسنجی مدل‌ها استفاده شد. برای این منظور، از منحنی مشخصه عملکرد (ROC) و مساحت سطح زیر نمودار (AUC) در نرم‌افزار SPSS21 مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند.

در ترسیم نمودار ROC، حساسیت بیان‌گر مقادیر پیش‌بینی‌شده درست در مقابل تمام خروجی‌های مثبت است. ویژگی بیان‌گر مقادیر پیش‌بینی شده منفی درست در مقابل تمام خروجی‌های منفی است. در صورتی که مقدار ویژگی از عدد یک کسر شود (متمم ویژگی) موید مقادیر پیش‌بینی شده مثبت در مقابل تمام خروجی‌های منفی خواهد بود که معیار بهتری برای ارزیابی و اعتبارسنجی است (Shirani *et al.*, 2023). برای رسم این منحنی باید محور X که نمایان‌گر متمم ویژگی یا "ویژگی -۱" و محور Y که حاوی "حساسیت" است به‌ازای هر مقدار از آستانه طبقه موردنظر محاسبه شود (رابطه‌های ۱ و ۲).

$$1 - \text{ویژگی} = \frac{TP}{TN+FP} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$\text{حساسیت} = \frac{TP}{TP+FN} \quad \text{رابطه ۲}$$

سطح زیر منحنی ROC که AUC (Area under the curve) نامیده می‌شود، بیان‌گر مقدار پیش‌بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخداده (پراکنش خندق‌ها) و عدم وقوع رخداد (طبقات پهنه‌های حساسیت نسبت به فرسایش آبکندی) است. مقادیر AUC از ۱/۵-۰ متغیر است. همبستگی کیفی-کمی سطح زیر منحنی (AUC) و ارزیابی تخمین به صورت (۱-۰/۹، عالی؛ ۰/۹-۰/۸، خیلی خوب؛ ۰/۸-۰/۷،خوب؛ ۰/۷-۰/۶، متوسط و ۰/۶-۰/۵، ضعیف) است. هرچه سطح منحنی به یک نزدیک‌تر باشد، بیان‌گر بهترین دقت از نقشه پهنه‌بندی تهیه شده است.

نسبت فراوانی

نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی در هر پهنه یا طبقه عامل، ساده‌ترین و در عین حال شاخص مناسبی برای مقایسه و بررسی طبقات هریک از عوامل موثر در رخداد فرسایش آبکندی است که از نسبت مساحت خندق در هر طبقه به‌میزان کل مساحت هر طبقه محاسبه می‌شود.

نتایج و بحث

نقشه طبقات عوامل مؤثر بر فرسایش آبکندی

همان‌طور که در روش تحقیق اشاره شد، بعد از شناسایی عوامل مؤثر بر فرسایش آبکندی و جمع‌آوری داده‌های اولیه موردنیاز هر عامل بر اساس روش‌های مورد اشاره در جدول (۱)، نقشه هر عامل در سامانه اطلاعات جغرافیایی ترسیم و با روش شکست طبیعی طبقه‌بندی گردید (شکل۳).

به‌منظور تعیین نسبت فراوانی فرسایش آبکندی تعداد پیکسل هر طبقه از هر عامل و تعداد پیکسل آبکندی در هر طبقه استخراج و از نسبت آن‌ها نسبت فراوانی محاسبه گردید که نتایج آن ها در شکل (۴) ارائه شده‌اند. به منظور بررسی وجود همبستگی بین عوامل موثر بر فرسایش آبکندی و تعیین موثرترین عوامل جهت ورود به مدل‌سازی از آزمون هم‌خطی استفاده شد. با توجه به نتایج جدول (۲) و مقادیر تولرانس و تورم واریانس، هیچ‌گونه هم‌خطی بین عوامل مورد بررسی مشاهده نشده است. چنانچه TOL کوچکتر از ۰/۲ یا VIF بزرگتر از ۱۰ باشد در آن صورت هم‌خطی بین آن متغیرها وجود دارد.

نتایج نسبت فراوانی

بررسی نسبت فراوانی قرارگیری پیکسل‌های آبکندی در طبقات مختلف از لایه‌های اطلاعاتی موثر بر فرسایش آبکندی نشان داد که به‌ترتیب بیشترین نسبت فراونی در لایه آنالیز سایه روشن به‌میزان ۱/۳۲ در طبقه ۰/۸۲-۱، جهت شیب به‌میزان ۱/۳۵ در طبقه شرقی، شاخص تحدب به‌میزان ۲/۰۸ طبقه کمتر از ۱۷-، شاخص انحناء به‌میزان ۱/۲۱ طبقه مقعر، طبقه‌بندی انحناء به‌میزان ۱/۴ کلاس ۵، فاصله از آبراهه به‌میزان ۱/۹۵ طبقه ۱۰۰-۱۵۰، تراکم زهکشی به‌میزان ۲ طبقه ۲/۷-۳/۳۴، ارتفاع به‌میزان ۱/۳۴ طبقه کمتر

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1252]

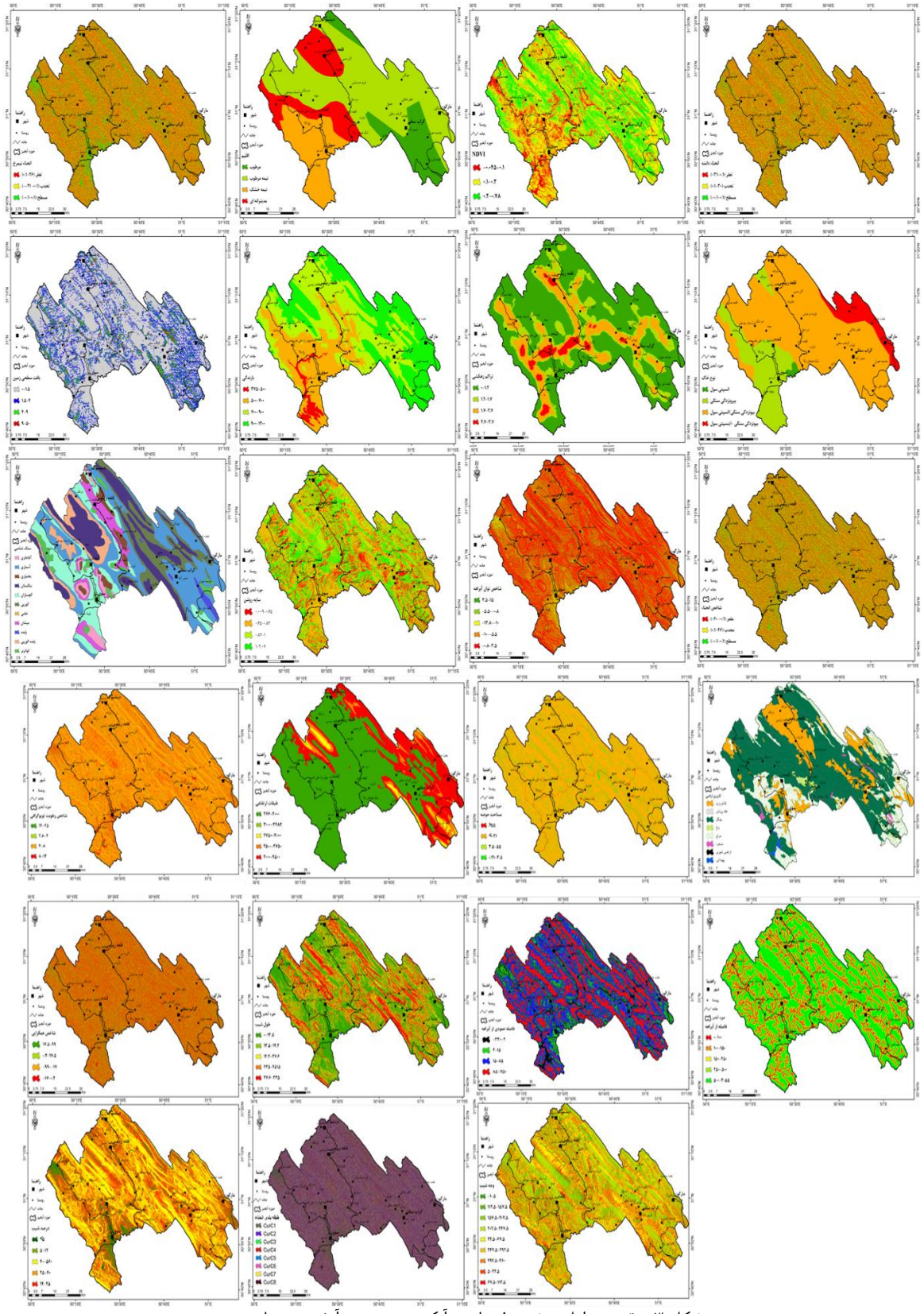
از ۲۰۰۰ متر، کاربری اراضی به‌میزان ۲/۲۷ طبقه اراضی کشاورزی، زمین‌شناسی به‌میزان ۲/۷۹ طبقه ۳، فاکتور طول شیب به میزان ۱/۵ طبقه ۰-۱۳، شاخصNDVI به‌میزان ۱/۷ طبقه کمتر از ۰/۰۶، انحنای دامنه به‌میزان ۱/۱۷ طبقه مسطح، انحنای نیمرخ به‌میزان ۱/۳۳ طبقه مسطح، بارش به‌میزان ۱/۹ طبقه ۵۰۰-۷۰۰ میلی متر، و شیب به‌میزان ۲/۴۱ طبقه کمتر از ۵ درصد بودند.

جدول ۲- مقادیر هم‌خطی متغیرهای مستقل مؤثر بر فرسایش آبکندی در حوزه آبخیز سد مارون
Table 2. Collinearity values of independent variables affecting gully erosion in the Maroon Dam watershed

تورم واریانس Variance inflation	تلرانس Tolerance	عامل Factor
2.844	0.352	شاخص رطوبت توپوگرافی Topographic wetness Index
2.245	0.446	شاخص توان آبراهه Stream power Index
1.461	0.685	تراکم آبراهه Drainage density
1.295	0.772	بافت سطحی زمین Terrian surface texture
1.323	0.756	کاربری اراضی Landuse
1.085	0.922	سنگ شناسی Lithology
4.471	0.224	طبقه‌بندی انحناء Curvature classification
7.324	0.241	شاخص انحناء Curvature
2.187	0.457	شاخص تحدب Convergence index
2.925	0.342	اقلیم Climate
1.17	0.855	جهت Aspect
1.3	0.769	سایه روشن Analytical hillshading
2.377	0.421	ارتفاع Altitude
4.286	0.233	بارش Rain
2.007	0.498	انحنای دامنه Plan curvature
2.966	0.337	انحنای مقطع Profile curvature
1.255	0.797	شاخص پوشش گیاهی NDVI
1.815	0.551	فاکتور طول شیب دامنه Length Slope
1.233	0.811	فاصله آبراهه Distance to drainage
2.747	0.364	درجه شیب Slope
2.139	0.467	نوع خاک Soil type
1.569	0.638	سطح زه‌کشی حوضه Catchment area
1.707	0.586	فاصله عمودی از شبکه آبراهه Vertical distance to channel

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

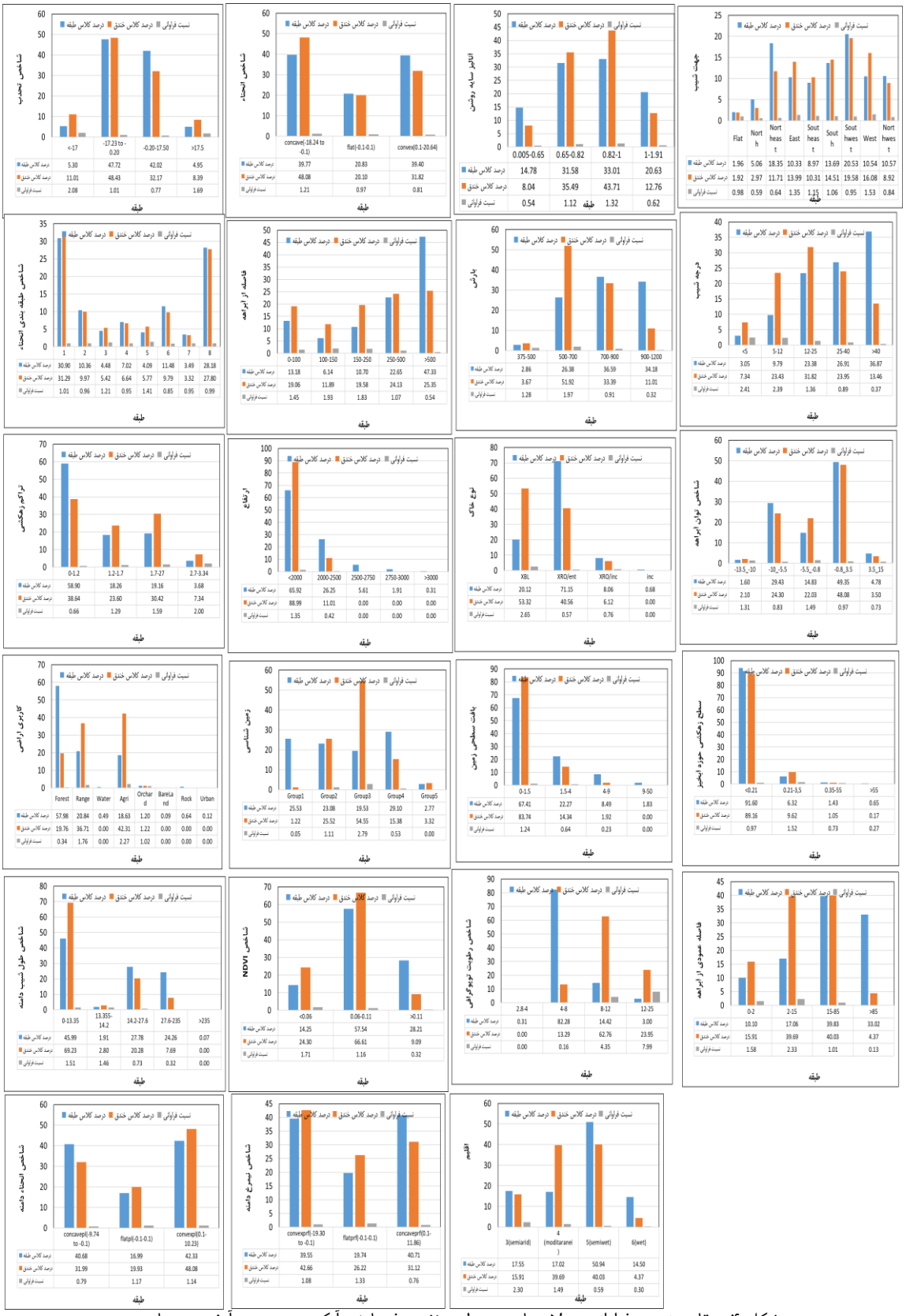
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1252]



شکل ۳- نقشه عوامل مؤثر بر فرسایش آبکندی در حوزه آبخیز سد مارون
Figure 3. The map of factors affecting gully erosion in the Maroon Dam watershed

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1252]



شکل ۴- مقادیر نسبت فراوانی در لایه‌های محیطی مؤثر بر فرسایش آبکندی در حوزه آبخیز سد مارون

Figure 4. Frequence rates of the environmental layers of gully erosion affecting factors in the Maroon Dam watershed

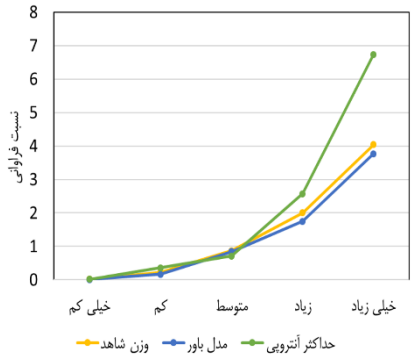
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1252]

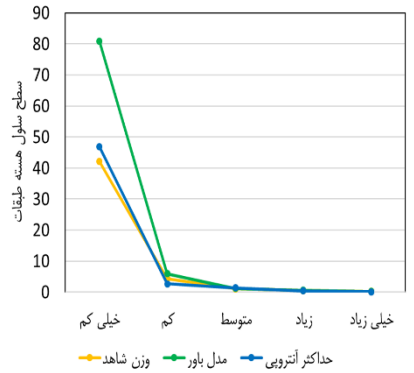
نتایج نقشه وزنی حساسیت به فرسایش آبکندی

نقشه نهایی پهنه‌بندی حساسیت فرسایش آبکندی تولید و نقشه حساسیت به فرسایش آبکندی در پنج سطح حساسیت خیلی‌زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی‌کم طبقه‌بندی گردید (شکل ۵ الف و ب). برای تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت فرسایش آبکندی از مدل انتروپی استفاده شد که نتایج نقشه حاصل از آن در شکل (۵ ج) ارائه شده‌اند.

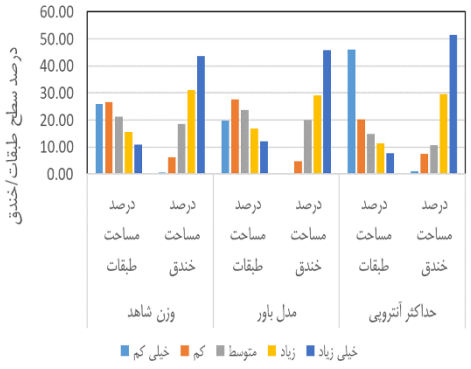
به‌منظور مقایسه مدل‌های دمپسترشفر، وزن شاهد و آنتروپی از نمودار شاخص نسبت فراوانی و سطح سلول هسته طبقات استفاده شد که نتایج آن در شکل (۶) ارائه شده‌اند. توزیع فراوانی درصد مساحت طبقات و درصد طبقات خندق در حوزه آبخیز سد مارون در شکل ۷ ارائه شده‌اند.



شکل ۵- نسبت فراوانی در طبقات حساسیت به فرسایش آبکندی در حوزه آبخیز سد مارون
Figure 5. Frequency rates in classes of susceptibility maps to gully erosion in the Maroon Dam watershed

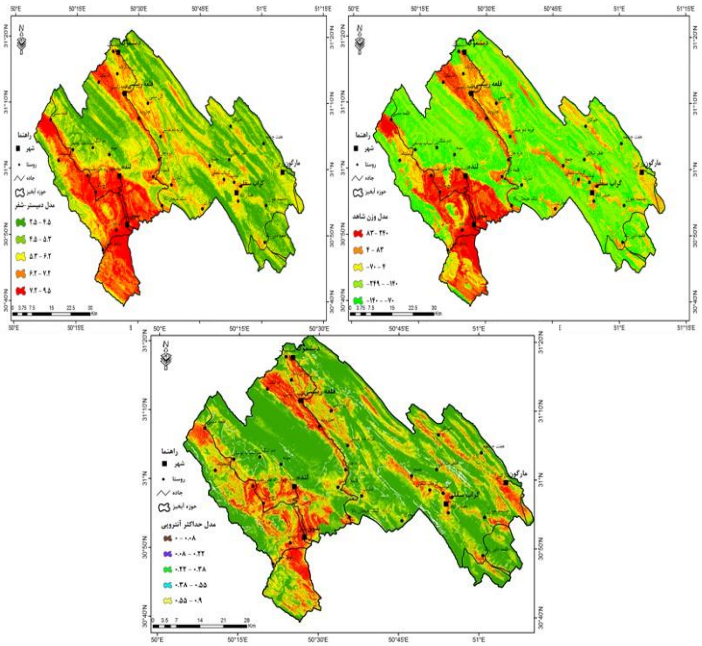


شکل ۶- سطح سلول هسته در طبقات حساسیت به فرسایش آبکندی در حوزه آبخیز سد مارون
Figure 6. The seed core area indexes in gully erosion susceptibility classes in the Maroon Dam watershed



شکل ۷- درصد مساحت طبقات و درصد طبقات خندق در حوزه آبخیز سد مارون
Figure 7. The percentage of areas and gully classes in the Maroon Dam watershed

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1252]



شکل ۸- پهنه‌بندی حساسیت به فرسایش آبکندی در مدل‌های مورد بررسی در حوزه آبخیز سد مارون با استفاده از الف) مدل وزن شاهد، ب) دمپسترشفر و ج) مدل حداکثر آنتروپی (از چپ به راست)

Figure 8. Gully erosion susceptibility maps in the Maroon Dam watershed using: a) weight of evidence, b) Dempster-Shafer and c) MaxEnt (left to right)

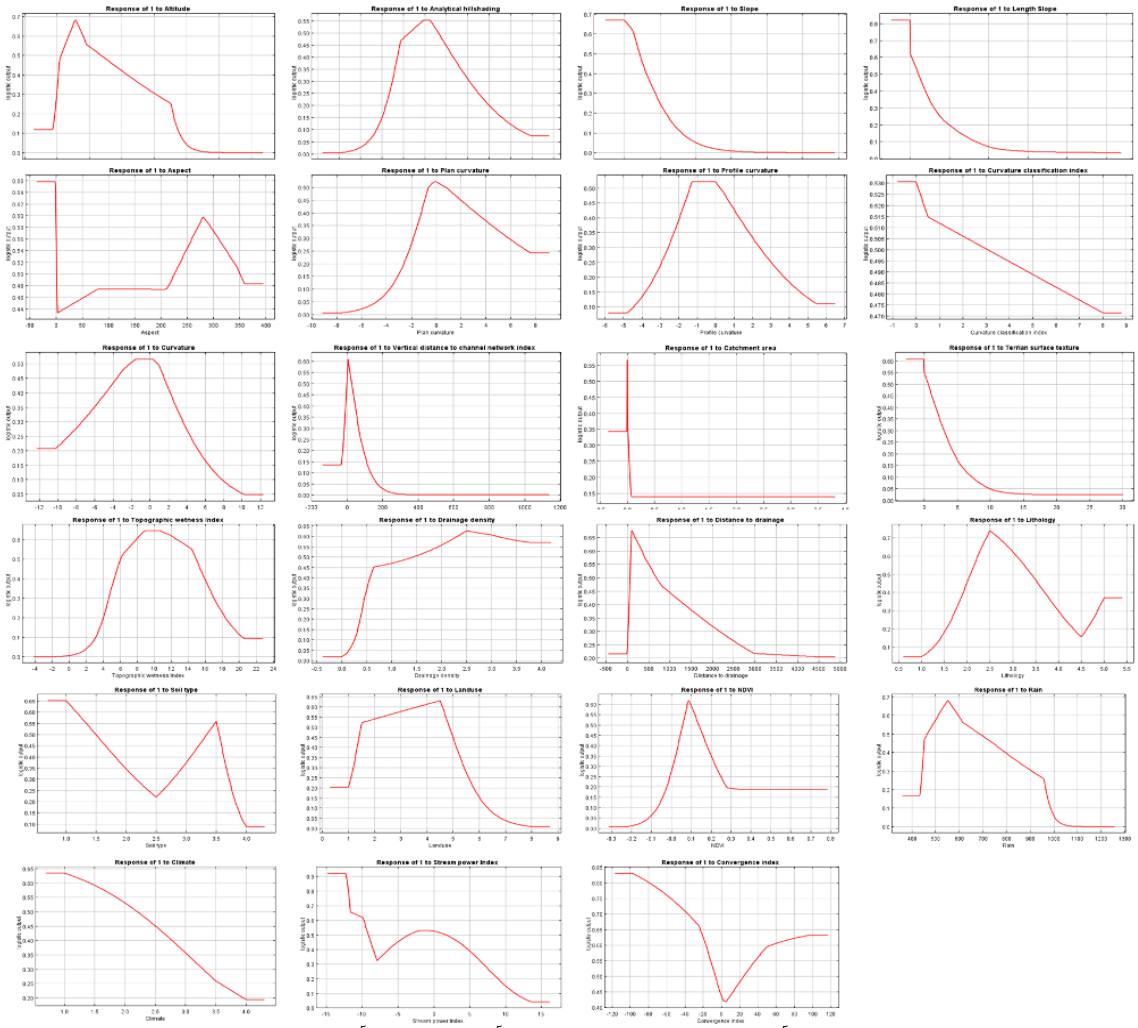
بر اساس اطلاعات به‌دست آمده از نقشه حساسیت فرسایش آبکندی با استفاده از مدل وزن شاهد، بیشترین درصد مساحت منطقه مربوط به حساسیت زیاد (۳۰ درصد) است که دارای ۲۱ خندق است و بیشترین خندق نیز در طبقه حساسیت خیلی زیاد با درصد مساحت ۲۸٪ و تعداد ۷۴ خندق مشاهده شد. نتایج مدل دمپستر شفر نشان دادند که بیشترین درصد مساحت منطقه مربوط به حساسیت متوسط (۲۷٪) با ۱۴ خندق بود و بیشترین خندق در طبقه حساسیت خیلی زیاد با ۲۵٪ مساحت کل منطقه بود و ۱۱۸ خندق مشاهده شد. در مدل حداکثر آنتروپی، بیشترین درصد مساحت منطقه مربوط به حساسیت متوسط (۲۷٪) بود که ۱۴ خندق داشت. بیشترین خندق در طبقه حساسیت خیلی زیاد با ۲۵٪ مساحت کل منطقه و ۱۱۸ خندق مشاهده شد (شکل ۷).

اعتبارسنجی و کارآیی مدل حداکثر آنتروپی

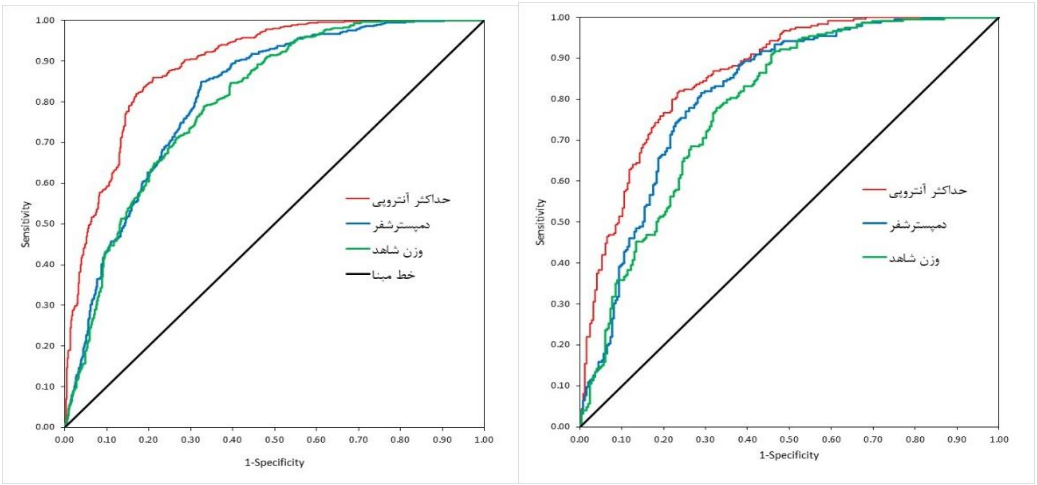
به‌طور کلی، بر اساس نتایجی که از نقاط اعتبارسنجی (۳۰٪) به‌دست آمدند، هر سه مدل دارای درصد قابل‌قبولی از مساحت زیر منحنی بودند که دراین میان مدل آنتروپی (۸۵ درصد مساحت زیر نمودار) بالاترین دقت را در پهنه‌بندی حساسیت فرسایش آبکندی داشت. بررسی منحنی پاسخ تغییرات متغیرهای مورد استفاده جهت تعیین مناطق حساس به فرسایش آبکندی در مدل MaxEnt به شرح شکل ۸ است.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1252]



شکل ۹- مقادیر آستانه فاکتورهای موثر در فرسایش آبکندی در حوزه آبخیز سد مارون
Figure 9. Threshold values of factors affecting gully erosion in the Maroon Dam watershed



شکل ۱۰- نمودار سطح زیر منحنی برای داده‌های آموزش و اعتبارسنجی در حوزه آبخیز سد مارون
Figure 10. The AUC of the training and validation datasets in the Maroon Dam watershed

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1252]

درک و شناخت ارتباط بین عوامل موثر و رخداد خندق یکی از راهکارهای مهم مدیریت منابع آب و خاک محسوب می‌شود. همچنین، پهنه‌بندی و پیش‌بینی فرسایش آبکندی بر مبنای توسعه مدل‌های مناسب و کاربردی جهت شناسایی مناطق مستعد به انواع فرسایش خاک به‌ویژه فرسایش آبکندی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. چنان که با صرف هزینه پایین، به‌سرعت و با دقت می‌توان مناطق مستعد به فرسایش آبکندی را شناسایی و با مدیریت محیطی مناسب از توسعه و گسترش و تخریب مناطق حساس به فرسایش آبکندی جلوگیری نمود.

در این تحقیق با استفاده از بررسی اهمیت نسبی و تعیین آستانه ۲۳ عامل موثر در رخداد فرسایش آبکندی اقدام به پهنه‌بندی و پیش‌بینی حساسیت اراضی نسبت به رخداد فرسایش آبکندی شد.

بررسی آستانه‌های مهم‌ترین عوامل موثر در رخداد فرسایش آبکندی

مقادیر آستانه به‌عنوان نقاط عطف کاهش یا افزایش رخداد فرسایش آبکندی محسوب می‌شوند. لذا در این تحقیق علاوه بر بررسی هر عامل، میزان آستانه هر عامل در کاهش یا افزایش فرسایش آبکندی نیز مشخص شد. به‌طور مثال، نتایج نشان دادند که آستانه تاثیر عامل ارتفاع در حوضه مارون ۸۰۰ متر بود و با افزایش ارتفاع، میزان رخداد فرسایش آبکندی روند کاهشی نشان داد و این مقدار آستانه به‌عنوان نقطه عطف کاهش رخداد فرسایش آبکندی محسوب می‌شود. آستانه تاثیر عامل گرادیان شیب به‌میزان ۱۲/۵ درصد تعیین شد، به این مفهوم که مقادیر کمتر از شیب ۱۲/۵ درصد دارای بیشترین تاثیر هستند و مقادیر بزرگتر از آن کمترین تاثیر را در حساسیت نسبت به فرسایش آبکندی دارند. این آستانه گرادیان شیب با نتایج شادفر و صوفی (Shadfar & Soufi, 2025) هم‌خوانی دارد. آستانه عامل سطح زه‌کشی حوزه آبخیز مارون به میزان ۲۵۰۰ کیلومتر مربع بود که حاکی از تاثیر افزایش سطح زهکشی در حساسیت مناطق به فرسایش آبکندی است. همچنین، نوع خاک انتی‌سویل یا لیتیک‌زروتنت در حوضه مارون در بین انواع خاک‌های مربوط به حوضه خود بیشترین حساسیت را به فرسایش آبکندی یا بیشترین تاثیر را در حساسیت اراضی نسبت به فرسایش آبکندی از خود نشان دادند. به طور کلی، بر اساس درصد کل مشارکت عوامل موثر در حوضه مارون، اهمیت نسبی و آستانه‌های عوامل موثر به صورت زیر تعیین شدند. آستانه مؤثر بارش ۱۰۰–۹۵۰ میلی‌متر، سنگ‌شناسی رسوبات منفصل، شیل و مارن، ارتفاع ۲۷۵۰متر، تراکم آبراهه ۰/۷–۳/۲ کیلومتر بر کیلومتر مربع، نوع خاک اینسپتی‌سویل یا لیتیک‌کلسی‌زرپیت، گرادیان شیب ۱۲/۵ درصد، کاربری اراضی کشاورزی و باغ و زمین بایر، شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی ۰/۰۷۵– ۰/۵۰، آنالیز سایه روشن ۰/۵۵– ۰/۷۷، شاخص رطوبت توپوگرافی ۱۴/۵–۸/۳، شاخص هم‌گرایی ۰/۱– تا ۰/۱، انحنای دامنه ۰/۱– تا ۰/۱، وجه شیب ۶۷/۵ و ۲۹۲/۵ درجه، فاصله از آبراهه ۲۵–۲۰۰ متر، فاصله عمودی از شبکه آبراهه ۰–۴۰۰ متر، انحناء ۰/۱– تا ۰/۱، اقلیم فراخشک و نیمه‌خشک، سطح زه‌کشی حوزه آبخیز ۰/۱ کیلومتر مربع، انحناء مقطع ۰/۱– تا ۰/۱، طول شیب ۲۰–۲۰۰ متر و بافت سطح زمین ۵/۵–۸/۵ بودند.

نسبت فراوانی عوامل مؤثر بر فرسایش آبکندی

نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی ساده‌ترین شاخص برای مقایسه و بررسی طبقات هریک از عوامل موثر در رخداد فرسایش آبکندی است. رابطه بین جهت شیب و فرسایش آبکندی نشان داد که تراکم خندق در شیب های جنوبی بیشتر و در شیب های شمالی کمتر بود که احتمالا به دلیل رطوبت بالاتر شیب‌های شمالی و وجود پوشش گیاهی احتمال رخداد فرسایش آبکندی کمتر بود. در این خصوص، رستمی‌زاد و همکاران (Rostamizad *et al.,* 2014) به نتایج مشابهی در این ارتباط رسیدند و علت این امر را آفتابگیر بودن این دامنه‌ها و کاهش رطوبت و پوشش گیاهی کمتر نسبت به جهت‌های دیگر اعلام کردند. به‌طور کلی، بیشترین تراکم خندق در شیب غربی و شرقی مشاهده شد. اثر جهت شیب بر فرسایش آبکندی به‌علت اختلاف میکروکلیمای در شیب‌های مختلف است که این نتایج با نتایج شهبازی و همکاران (Shahbazi *et al.,* 2021) و مددی و همکاران (Madadi *et al.,* 2022) همخوانی دارند. از نظر سنگ‌شناسی، بیشترین خندق‌های حوزه آبخیز سد مارون در سازندهای زمین‌شناسی گچساران، آغاجاری، میشان و رسوبات کواترنری مشاهده شدند که از مهمترین دلایل آن می‌توان به وجود املاح گچ و نمک، انحلال‌پذیری، وجود رسوبات ریزدانه رس و سیلت و عدم وجود ساختمان قوی خاکدانه‌ها و همچنین کمبود مواد آلی اشاره کرد. در این ارتباط، نگهبان و همکاران (Negahban *et al.,* 2012) تناوب فصول خشک و مرطوب را عامل مهم به‌وجود آمدن ترک‌ها و شیارها در سازندهای ریزدانه حاوی رس و سیلت و در نهایت توسعه‌ی فرسایش شیاری و پیدایش خندق ذکر کردند. از نظر توزیع فرسایش آبکندی در کاربری‌های مختلف، بیشترین تراکم خندق‌ها در اراضی کشاورزی ایجاد شدند که با نتایج شهبازی و همکاران (Shahbazi *et al.,* 2021) مطابقت دارد در صورتی‌که مناطق جنگلی دارای کمترین میزان حساسیت به فرسایش آبکندی بودند.

فرسایش‌های آبکندی عموماً در ارتفاعات پست مشاهده می‌شوند. دلیل این امر احتمالاً به تجمع جریان در ارتفاعات پایین یک حوضه بر می‌گردد (Zabihi *et al.,* 2018). به‌طور کلی در حوضه مورد بررسی، شاخص نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی با افزایش ارتفاع کاهش یافت. میزان شاخص سایه روشن که خود به اثر ترکیب ارتفاع با مورفومتری سطح زمین وابستگی پیدا می‌کند، با نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی رابطه معکوس نشان داد. بررسی‌ها نشان دادند که بین ارتفاع و مناطق مستعد فرسایش آبکندی رابطه معکوس برقرار بود. نتایج مذکور نتایج سایر پژوهش‌گران (Sarvati *et al.,* 2008؛ Khazayi *et al.,* 2012) را تایید می‌کنند.

درجه شیب یکی از اصلی‌ترین عوامل محیطی در فرایند شکل‌گیری فرسایش آبکندی است (Conoscenti *et al.,*

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1252]

2014؛ Rahmati *et al.,* 2017). در حوضه مارون با افزایش شیب تا ۱۵ درصد میزان رخداد فرسایش آبکندی افزایش یافت. این یافته با استفاده از نسبت فراوانی و اوزان مستخرج از هر سه مدل وزن شاهد، دمپسترشفر و حداکثر آنتروپی استنتاج شده است و تایید می‌شود.

برای سطح زمین، پنج نوع انحنای زمین شامل انحنای کلی، انحنای مقطع و انحنای دامنه، هم‌گرایی سطح زمین و طبقه‌بندی انحناء در نظر گرفته شدند. هر یک از این متغیرها اطلاعات متمایزی از وضعیت هم‌گرایی عمودی و افقی دامنه‌ها ارائه می‌دهند و تأثیر زیادی بر شرایط هیدرولیک جریان سطحی و زیرسطحی و در نهایت نرخ فرسایش خاک دارند (Hurst *et al.,* 2012). عوامل انحناء در مطالعات پیش‌بینی استعداد فرسایش آبکندی غالباً مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Garosi *et al.,* 2018، Roy *et al.,* 2020). در این راستا، به‌طور کلی مقادیر منفی انحناء که نماینده هم‌گرایی سطح هستند به‌دلیل تمرکز جریان و تاثیر عملکرد فرسایشی بیشتر نسبت به سطوح انحناء صاف یا مثبت انحناء از مقادیر بیشتر نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی برخوردارند. این پنج انحناء در حوضه مورد بررسی دقیقاً این اصل علمی را تایید می‌نمایند. با توجه به نقشه شاخص هم‌گرایی و منحنی پاسخ این شاخص، بیش‌تر خندق‌ها در مناطق مقعر تشکیل شده‌اند. وجود مناطق پست به‌عنوان چاله‌هایی که حالت مقعر دارند، باعث ایجاد به دام‌افتادگی رواناب می‌شود و شرایط لازم را برای انحلال فراهم می‌آورد. این تحلیل و نتیجه‌گیری نتایج دیگران را نیز تایید می‌کنند (Angileri *et al.,* 2016؛ Rahmati *et al.,* 2017).

بافت سطحی زمین نماینده زبری سطح زمین است. بافت سطحی زبر در واقع نماینده تناوب رسوبات یا سازندهای سست و میزان فرسایش بالا در سطح زمین است. بنابر این، رخداد فرسایش آبکندی در سطوح با زبری زیاد محتمل‌تر به‌نظر می‌رسد. در حوضه‌های منتخب در این پژوهش با افزایش بافت سطحی زمین، میزان نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی نیز افزایش یافت.

شاخص رطوبت توپوگرافی، مساحت بالادست هر نقطه را در نظر می‌گیرد و پتانسیل تولید رواناب و جریان را به‌صورت غیر مستقیم نشان می‌دهد. بر اساس مطالعه جانکویز و همکاران (Jancewicz *et al.,* 2019)، شاخص رطوبت توپوگرافی می‌تواند به‌تنهایی بسیاری از فرایندهای سطحی و زیرسطحی را در مقیاس چشم‌انداز[۲] تفسیر نماید. در حوضه‌ی منتخب با افزایش میزان شاخص رطوبت توپوگرافی، نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی نیز افزایش می‌یابد. عامل رطوبت و ایجاد پوشش گیاهی مناسب می‌تواند یک عامل بازدارنده باشد. این نتیجه با نتایج دیگر پژوهش‌گران هم‌خوانی دارد (Maerker *et al.,* 2012؛ Nazari Samani *et al.,* 2009).

شاخص توان جریان نیز نشان‌دهنده میزان انرژی جریان و در مطالعات مختلف فرسایش مورد استفاده قرار گرفته است (Liuzzo *et al.,* 2019؛ Malik *et al.,* 2020). انرژی جریان نقش مهمی در شروع فرایند فرسایش آبکندی دارد (Shi *et al.,* 2020). از این‌رو، شاخص توان جریان در مطالعات پیش‌بینی استعداد فرسایش آبکندی کاربرد فراوانی داشته است (Dube et al., 2014؛ Conoscenti *et al.,* 2020). در حوضه‌ی منتخب با افزایش میزان شاخص توان آبراهه، نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی نیز افزایش می‌یابد.

اطراف آبراهه‌ها و رودخانه‌ها به‌دلیل تمرکز جریان و جریان آب‌های سطحی عموماً شرایط مناسبی برای شکل‌گیری فرسایش آبکندی وجود دارند (Mararakanye & Sumner, 2017). بنابر این، فاصله افقی و قائم از جریان به‌عنوان یکی از متغیرهای محیطی در پیش‌بینی و تحلیل مکانی استعداد فرسایش آبکندی به‌کار گرفته شده است (Conoscenti *et al.,* 2014؛ Rahmati *et al.,* 2016؛ Hitouri *et al.,* 2022؛ Pourghasemi *et al.,* 2020).

تراکم زه‌کشی یکی از معیارهای مهم توصیف رفتار و پاسخ هیدرولوژیکی حوضه است. هر چه میزان تراکم زه‌کشی در حوضه بالاتر باشد، پتانسیل تخلیه جریان از حوضه سریع‌تر خواهد شد. پژوهش گیدئون و همکاران (Gideon *et al.,* 2021) با استفاده از تحلیل‌های مبتنی بر تصمیم‌گیری چندمعیاره نشان داد که قسمت‌هایی از حوضه که تراکم زه‌کشی بالاتری داشتند، احتمال فرسایش آبکندی و تولید رسوب بالاتری داشتند. بر اساس نتایج مطالعه رحمتی و همکاران (Rahmati *et al.,* 2016)، تراکم زه‌کشی موجب تجمع بیشتر جریان در یک محدوده از حوضه شد که به‌نوبه خود افزایش احتمال شکل‌گیری فرسایش آبکندی در این محدوده‌ها را به‌دنبال داشت. بر اساس پژوهش انجام شده در حوضه‌های منتخب، با افزایش میزان تراکم آبرهه، نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی نیز افزایش می‌یابد (Were *et al.,* 2023؛ Setargie *et al.,* 2023).

سطح زه‌کشی حوزه آبخیز هر چه بیشتر باشد تمرکز جریان در قسمت‌های پایین دست افزایش یافته، لذا رخداد فرسایش آبکندی نیز افزایش می‌یابد (Shirani, 2019). در حوضه منتخب با افزایش میزان شاخص سطح زه‌کشی حوزه آبخیز، نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی نیز افزایش می‌یابد؛ این نتیجه با نتایج مارکر و همکاران (Maerker *et al.,* 2012) هم‌خوانی دارد.

از آنجایی‌که شکل‌گیری فرسایش آبکندی وابستگی زیادی به شرایط بالادست دارد، هنگامی‌که طول دامنه زیاد باشد، پتانسیل رخداد فرسایش آبکندی به واسطه تجمیع جریان‌های سطحی، افزایش می‌یابد. از این‌رو، عامل طول دامنه در برخی از مطالعات پیش‌بینی استعداد فرسایش خاک به‌عنوان متغیر پیش‌بینی‌کننده مورد استفاده قرار گرفته است (Hembram *et al.,* 2019). در حوضه منتخب، با افزایش طول شیب نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی کاسته شد. این امر به‌دلیل عملکرد پارامترهای دیگر مورفومتریک در دامنه‌های طویل مانند استقرار پوشش گیاهی، جنس سازند و ... می‌تواند باشد.

بارندگی عموماً ارتباط پیچیده‌ای با پدیده فرسایش خاک دارد؛ به‌گونه‌ای که در مناطق دارای بارندگی زیاد، پوشش

[2] Landscape

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1252]

گیاهی زیادی مستقر شده، پتانسیل فرسایش خاک به طرز چشم‌گیری کاهش می‌یابد. این در حالی است که در مناطقی که مقدار بارش سالیانه کم است، اگرچه پوشش گیاهی کمی مستقر می‌شود، مقدار بارش به حدی نیست که فرسایش خاک قابل توجیهی رخ دهد. در مناطق نیمه‌خشک که مقدار بارش متوسط است، مقدار بارش برای استقرار پوشش گیاهی زیاد مناسب نیست ولی از نظر رخداد فرسایش خاک پتانسیل لازم را دارد. از این‌رو، مناطق نیمه‌خشک شرایط شکننده‌ای دارند و بیشترین میزان فرسایش در این نواحی ملاحظه می‌شود. از آنجایی که بارندگی عامل شروع‌کننده و محرک فرسایش خاک است، درنظر گرفتن عامل بارندگی در مطالعات فرسایش خاک الزامی است. در خصوص پتانسیل‌یابی فرسایش آبکندی نیز، عامل بارندگی به عنوان یکی از متغیرهای مهم پیش‌بینی‌کننده مورد استفاده قرار گرفته است (Saha *et al.,* 2020؛ Lana *et al.,* 2022). در این پژوهش، با افزایش میزان بارش خصوصاً در مناطق اقلیمی فراخشک، خشک و نیمه‌خشک میزان رخداد فرسایش آبکندی بیشتر است. این نکته توسط دیگر محققین نیز بیان شده است (Shit *et al.,* 2020). مناطق اطراف مسیر زهکش اصلی (آبراهه اصلی) به‌دلیل خواص فیزیکی منطقه مورد مطالعه، وجود هم‌گرایی و انحنای نیمرخ مقعر مسیر، در زمان بارش رواناب به سرعت از مناطق مرتفع پژوهش‌گران دیگری بیان گردیده‌اند و به نتایج مشابه‌ای دست یافته‌اند (Kheir *et al.,* 2007؛ & Le Roux & Sumner, 2012).

پوشش گیاهی همواره یک نقش محافظتی در مقابل بارندگی و جریان‌های سطحی دارد و موجب کاهش فرسایش خاک می‌شود. نقشه تراکم پوشش گیاهی اطلاعات مفیدی را درخصوص آسیب‌پذیری و حساسیت اراضی نسبت به فرسایش خاک ارائه می‌دهد. یکی از شاخص‌های رایج برای محاسبه تراکم پوشش گیاهی، شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) است که در مطالعات مدل‌سازی و پیش‌بینی فرسایش آبکندی مورد استفاده قرار گرفته است (Azedou *et al.,* 2021؛ Wei *et al.,* 2022؛ Wang *et al.,* 2022). در حوضه‌های منتخب با افزایش شاخص NDVI، میزان نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی کاهش می‌یابد، اگر چه شاخص جهت شیب به عنوان یکی از عوامل اصلی در میزان نگهداشت رطوبت و همچنین بالطبع تراکم پوشش گیاهی است (Maerker *et al.,* 2012؛ Olaya & Conard, 2008).

مقایسه نتایج نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت اراضی نسبت به فرسایش آبکندی

در این پژوهش، مقایسه نتایج روش‌های مختلف اعتبارسنجی شامل ROC، FR و SCAI مورد بررسی نشان داد که روش‌های حداکثر آنتروپی، مدل باور یا دمپسترشفر و وزن شاهد به‌ترتیب بهترین یا مناسب‌ترین روش‌ها برای پهنه‌بندی و پیش‌بینی حساسیت اراضی نسبت به رخداد فرسایش آبکندی در حوضه‌های منتخب هستند. همچنین، میزان سطح زیرمنحنی مشخصه عملکرد دریافت کننده (ROC) هر سه روش در حوضه‌ی منتخب در هر دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی از مقدار ۰/۷ بالاتر است. بنابر این، هر سه مدل در تمامی حوضه‌های منتخب در این پژوهش عملکرد خوبی از خود نشان داده‌اند. به‌عنوان نتیجه‌گیری کلی، بر اساس میزان AUC-ROC برای حوضه مارون چه در مرحله واسنجی و چه در مرحله پیش‌بینی نشان داد که مدل حداکثر آنتروپی، دمسترشفر و وزن شاهد به‌ترتیب با دقت عالی (۰/۹–۱)، بسیار خوب (۰/۸–۰/۹) و خوب (۰/۷–۰/۸) کارآمد هستند.

دو شاخص نسبت فراوانی و سطح سلول هسته تقریباً در هر سه مدل از حوضه‌ی منتخب رابطه معکوس دارند. به‌عبارت دیگر، با افزایش حساسیت اراضی نسبت به رخداد فرسایش آبکندی، شاخص نسبت فراوانی افزایش و شاخص سطح سلول هسته کاهش می‌یابد. شاخص نسبت فراوانی هر سه مدل در حوضه مارون برای رده‌های خیلی کم تا متوسط حساسیت اراضی نسبت به رخداد فرسایش آبکندی با شیب نسبتاً ملایم افزایش و برای رده‌های زیاد تا خیلی زیاد به‌طور قابل‌توجهی افزایش نشان می‌دهد.

در این پژوهش، مدل حداکثر آنتروپی به‌عنوان کارآمدترین و دقیق‌ترین مدل حساسیت اراضی نسبت به رخداد فرسایش آبکندی در حوزه‌ی آبخیز منتخب تعیین گردید. لذا، با استفاده از این مدل سهم مشارکت عوامل موثر که بیان‌گر اهمیت نسبی هر یک از شاخص‌ها نیز است، تعیین و مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند که کاربری اراضی، فاصله عمودی از شبکه آبراهه، سنگ‌شناسی، بارش و نوع خاک در حوضه مارون از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر حساسیت فرسایش آبکندی هستند. لازم به‌ذکر است که نتایج این پژوهش با نتایج شهبازی و همکاران (Shahbazi *et al.,* 2021) در خصوص اهمیت عوامل سنگ‌شناسی و کاربری اراضی مطابقت دارند.

مقایسه دقت مدل‌های پهنه‌بندی فرسایش آبکندی

مقایسه نتایج روش‌های مورد بررسی در این تحقیق، شامل روش‌های وزن شاهد، مدل دمپسترشفر و حداکثر انتروپی، در تهیه نقشه حساسیت فرسایش آبکندی نشان داد که نسبت فراوانی خندق در روش حداکثر آنتروپی در طبقه متوسط تا خیلی زیاد بیشتر از دو روش دیگر بود. همچنین، شاخص سطح سلول هسته طبقات نیز نشان داد که مدل دمپسترشفر در طبقه خیلی کم تا کم بیشترین میزان را نسبت به دو روش دیگر داشت. نتایج اعتبارسنجی هر سه مدل حداکثر آنتروپی، دمپستر شفر و وزن شاهد بر اساس شاخص سطح زیر منحنی و نشان دادند که به ترتیب سطوح زیر منحنی در روش‌های ذکر شده به مقادیر ۰/۸۵، ۰/۸۱ و ۰/۷۸ بودند که دقت بالاتر مدل بیشیه آنتروپی را نسبت به روش دمپسترشفر و وزن شاهد نشان می‌دهد. همچنین، روش وزن شاهد کمترین دقت را در میان روش‌های مورد بررسی داشت. به طور کلی، هر سه مدل دارای درصد قابل قبولی از مساحت زیر منحنی بودند که این مسئله نشان‌دهنده عملکرد بالای هر سه مدل در منطقه است.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1252]

نتیجه‌گیری کلی

فرسایش خاک یکی از موانع مهم برای دست‌یابی به توسعه کشاورزی و منابع طبیعی است. از این‌رو، به‌منظور برنامه‌ریزی در زمینه احیاء، توسعه و مدیریت پایدار اراضی به‌ویژه در قالب طرح‌های حفاظت خاک و آبخیزداری، آگاهی از وضعیت فرسایش خاک و تولید رسوب در حوزه‌های آبخیز، یکی از ابزارهای مهم تصمیم‌گیری برای برنامه‌ریزی حوزه‌های آبخیز محسوب می‌شود. لازمه برنامه‌ریزی و اتخاذ تصمیم درباره مهار فرسایش و رسوب، آگاهی از میزان فرسایش و تولید رسوب دریک حوزه آبخیز و شناسایی مناطق بحرانی و اولویت‌بندی آنها برای اجرای برنامه‌ها و اقدامات آبخیزداری به‌منظور کاهش فرسایش و مهار تولید و حمل رسوب است.

این نوع از فرسایش یکی از مهمترین مخاطرات طبیعی در حوضه آبخیز سد مارون است که به‌دلیل قرارگیری سد مارون در پایین‌دست این حوزه از اهمیت زیادی برخوردار است. در این خصوص، تهیه نقشه فرسایش آبکندی می‌تواند به برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران در زمینه برنامه‌ریزی به‌منظور اقدامات مدیریتی کمک کند. در پژوهش حاضر، به منظور ارزیابی حساسیت فرسایش آبکندی از توزیع مکانی خندق‌ها و رابطه آن با پارامترهای زمین محیطی مؤثر در حوضه تخت دراز (سد مارون) استفاده شد. به این‌منظور، از روش‌ها و مدل‌های مختلف وزن شاهد، مدل دمپسترشفر و روش آنتروپی به منظور تهیه نقشه حساسیت فرسایش آبکندی استفاده شد. برای تهیه نقشه پراکنش خندق از تفسیر تصاویر گوگل ارث، تحقیقات گذشته و بازدیدهای میدانی گسترده استفاده شد و ۷۰ درصد خندق‌ها برای مدل‌سازی و ۳۰ درصد برای اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفتند. در زمینه پارامترهای مؤثر بر فرسایش آبکندی در ابتدا با استفاده از مطالعه ادبیات تحقیق، دسترسی به داده‌ها و شرایط محیطی منطقه مورد مطالعه، ۲۳ عامل مؤثر شناسایی و تهیه شدند. نتایج نشان دادند که مدل آنتروپی با سطح زیر منحنی ۰/۸۵ دارای دقت پیش‌بینی بالاتری نسبت به مدل‌های وزن شاهد و مدل دمپسترشفر بود. نتایج عوامل مؤثر بر فرسایش آبکندی نشان دادند که بر اساس آزمون جک نایف، عامل سنگ‌شناسی دارای بیشترین تاثیر بر سطح زیر منحنی بود. نتایج حاصل از تعیین وزن عوامل نشان دادند که عامل‌های مختلف دارای میزان مشارکت متفاوت در وقوع فرسایش آبکندی بودند، به‌طوری‌که عوامل کاربری اراضی و زمین‌شناسی با سهم مشارکت ۲۴ و ۱۸ درصد بیشترین سهم مشارکت را در رخداد فرسایش آبکندی داشتند. سهم‌های عوامل فاصله از شبکه زهکشی، نوع خاک، فاصلی از آبراهه، ارتفاع از سطح دریا، مساحت حوضه، بارش، بافت سطحی، تراکم زهکشی، اقلیم، شیب، شاخص تفاوت پوشش گیاهی، طول شیب، سایه روشن، شاخص قدرت جریان، شاخص طبقه‌بندی انحناء، شاخص رطوبت توپوگرافی، وجه شیب، شاخص همگرایی، انحناء نیمرخ، انحناء دامنه و شاخص انحناء به‌ترتیب ۱۷، ۱۰، ۵/۲، ۵، ۴، ۳، ۲/۷، ۲، ۱/۳، ۱/۳، ۱/۱، ۰/۷۵، ۰/۶۴، ۰/۳۶، ۰/۲۷، ۰/۲۶، ۰/۰۹، ۰/۰۵، ۰/۰۳، ۰ درصد بودند.

پیشنهادها

– استفاده از DEM با قدرت تفکیک مکانی بیشتر و همچنین مقایسه نتایج خروجی با دقت‌های متفاوت جهت ارزیابی پارامترهای توپوگرافی (تهیه DEM با دقت های ۲ متر به‌روش فتوگرامتری و...)

– از آنجایی‌که عوامل سنگ‌شناسی، بارش، نوع خاک، کاربری اراضی و پوشش گیاهی در مناطق مختلف نقش به‌سزایی دارند، لذا اصلاح و احیای پوشش گیاهی در مناطق مختلف خصوصاً مناطق حساس مارنی و شور با چالش‌های فراوانی روبرو هستند و از سویی این مناطق به علت فرسایش‌پذیری بالا و ویژگی‌های انحصاری از نظر پوشش گیاهی فقیر هستند. لذا حفاظت از این مناطق باید در اولویت نخست مدیران منابع طبیعی بر اساس نتایج و پیشنهادهای تحقیقاتی مرتبط قرار گیرد.

– اجرای برنامه‌های حفاظت خاک و مهار فرسایش جهت جلوگیری و مبارزه با فرسایش آبکندی و جلوگیری از تولید رسوبات فراوان می‌تواند از اقدامات اساسی و قابل مطرح باشد.

– با توجه به شریط اقلیمی و نوع سازند، اقدامات لازم جهت توسعه پوشش مرتعی و جلوگیری از تخریب پوشش گیاهی به‌ویژه در مناطق با کلاس شدید و خیلی شدید فرسایشی توصیه می‌شوند.

References

Amiri, M., Pourghasemi, H., Ghanbarian, G. A., & Afzali, S. F. (2019). Spatial modeling of gully erosion in Maharlou Watershed using different scenarios and Weights-of-evidence algorithm. *Watershed Engineering and Management,* 11(4), 1016-1032.

Angileri, S. E., Conoscenti, C., Hochschild, V., Märker, M., Rotigliano, E., & Agnesi, V. (2016). Water erosion susceptibility mapping by applying stochastic gradient treeboost to the Imera Meridionale river basin (Sicily, Italy). *Geomorphology*, 262, 61-76.

Arabameri, A., Asadi Nalivan, O., Chandra Pal, S., Chakrabortty, R., Saha, A., Lee, S., & Tien Bui, D. (2020). Novel machine learning approaches for modelling the gully erosion susceptibility. *Remote Sensing*, 12(17), 2833.

Azedou, A., Lahssini, S., Khattabi, A., Meliho, M., & Rifai, N. (2021). A methodological comparison of three models for gully erosion susceptibility mapping in the rural municipality of El Faid (Morocco). *Sustainability,* 13(2), 682.

Bernini, A., Bosino, A., Botha, G. A., & Maerker, M. (2021). Evaluation of gully erosion susceptibility using a maximum entropy model in the upper mkhomazi river basin in South Africa. ISPRS *International Journal of Geo-Information*, 10(11), 729.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1252]

Bobe, B. W. (2004). Evaluation of soil erosion in the Harerge region of Ethiopia using soil loss models, rainfall simulation and field trials (Doctoral dissertation, University of Pretoria).

Castillo, C., & Gómez, J. A. (2016). A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches. *Earth-Science Reviews*, 160, 300-319.

Conoscenti, C. & Rotigliani, E. (2020). Predicting gully occurrence at watershed scale: Comparing topographic indices and multivariate statistical models. *Geomorphology*, 335-359.

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.

De Vente, J., Poesen, J., Verstraeten, G., Govers, G., Vanmaercke, M., Van Rompaey, A. & Boix-Fayos, C. (2013). Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: where do we stand?. *Earth-Science Reviews*, 127, 16-29.

Dube, F., Nhapi, I., Murwira, A., Gumindoga, W., Goldin, J., & Mashauri, D. A. (2014). Potential of weight of evidence modelling for gully erosion hazard assessment in Mbire District–Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 67, 145-152.

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, 65-78.

Gideon, D., Mustafa, F.B., & Victor, I. (2021). The application of an expert knowledge-driven approach for assessing gully erosion susceptibility in the subtropical Nigerian savannah. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 42(1), 107-131.

Golosov, V., & Belyaev, V. (2013). The history and assessment of effectiveness of soil erosion control measures deployed in Russia. *International Soil and Water Conservation Research*, 1(2), 26-35.

Gornami, R., & Shadfar, S. (2018). Application of the GIS in the Determination of Susceptible Areas to Gully Erosion Using the Analytic Network Process (ANP). *Watershed Management Research*, 31(4), 58-68.

Guerra, A. J., Bezerra, J. F., Fullen, M. A., Mendonça, J. K. S., Sathler, R., Lima, F. S., & Guerra, T. T. (2007). Urban gullies in Sao Luis city, Maranhao state, Brazil. In Javier Casalí, Rafael Giménez (eds.): Progress in Gully Erosion Research. IV International Symposium on Gully Erosion. September 17-19, 2007. Pamplona, Spain. Pamplona: Universidad Pública de Navarra/Nafarroako Unibertsitate Publikoa, 2007. Universidad Pública de Navarra/Nafarroako Unibertsitate Publikoa.

Hasanuzzaman, M., & Shit, P. (2025). Assessment of gully erosion susceptibility using four data-driven models AHP, FR, RF and XGBoosting machine learning algorithms. *Natural Hazards Research,* 5(1), 36-47.

Hayas, A., Vanwalleghem, T., Laguna, A., Peña, A., & Giráldez, J. V. (2017). Reconstructing long-term gully dynamics in Mediterranean agricultural areas. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(1), 235-249.

Hembram, T. K., Paul, G. C., & Saha, S. (2019). Spatial prediction of susceptibility to gully erosion in Jainti River basin, Eastern India: a comparison of information value and logistic regression models. *Modeling Earth Systems and Environmen*t, 5, 689-708.

Hitouri, S., Varasano, A., Mohajane, M., Ijlil, S., Essahalaoui, N, Ali, S. A., Pham, QB, Waleed, M., Palateerdham, S. K., & Teodoro, A. C. (2022). Hybrid machine learning approach for gully erosion mapping susceptibility at a watershed scale. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(7), 384-401.

Hurst, M. D., Mudd, S.M., Walcott, R., Attal, M. & Yoo, K. (2012). Using hilltop curvature to derive the spatial distribution of erosion rates, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F2).

Jancewicz, K., Migoń, P., & Kasprzak, M. (2019). Connectivity patterns in contrasting types of tableland sandstone relief revealed by Topographic Wetness Index. Science of the Total Environment, 656, 1046-1062.

Khazayi, M. , Shafeie, A., & Molayi, A. (2012). Study of the Factors Affecting Gully Erosion Development. *Iranian Journal of Soil Research*, 26(2), 153-163.

Kheir, R.B., Abdallah, C., Runnstrom, M., & Martensson, U. (2008). Designing erosion management plans in lebanon using remote sensing, GIS and decision-tree modeling. *Landscape and Urban Planning*, 88(2-4), 54-63.

Khojeh, N., Ghoddosi, J., & Esmaili, R. (2017). Investigation of the effect of earth environmental factors on initiation and expansion of gully erosion by using geographical information system (case study in Temer Ghareh Ghozi, Kalaleh, Golestan province). *Journal of Watershed Management,* 202-212.

Lana, J.C., Castro, P.D., & Lana, C.E. (2022). Assessing gully erosion susceptibility and its conditioning factors in southeastern Brazil using machine learning algorithms and bivariate statistical methods: A regional approach. *Geomorphology*, 402, 108159.

Le Roux, J. J., & Sumner, P. D. (2012). Factors controlling gully development: comparing continuous and discontinuous gullies. *Land Degradation & Development*, 23(5), 440-449.

Liuzzo, L., Sammartano, V. & Freni, G. (2019). Comparison between different distributed methods for flood susceptibility mapping. *Water Resources Management*, 33, 3155-3173.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1252]

Madadi, A. , Asghari Saraskanroud, S. , Negahban, S. & Marhamat, M. (2022). Evaluation of Gully Erosion Sensitivity using Maximum Entropy Model in Shoor River Watershed (Mohr Township). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(3), 123-145.

Maerker, M., Pelacani, S., & Schrder, B. (2012). A functional entity Approach to predict soil erosion processes in a small Plio-Pleistocene Mediterranean catchment in Northern Chianti, Italy. *Geomorphology*, 125(4), 530-540.

Malik, S., Pal, S.C., Chowdhuri, I., Chakrabortty, R., Roy, P. & Das, B. (2020). Prediction of highly flood prone areas by GIS based heuristic and statistical model in a monsoon dominated region of Bengal Basin. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 19, 100343.

Mararakanye, N., & Sumner, P. D. (2017). Gully erosion: A comparison of contributing factors in two catchments in South Africa. *Geomorphology*, 288, 99-110.

Mohammadi, S., Karimzadeh, H., & Alizadeh, M. (2018). Spatial estimation of soil erosion in Iran using RUSLE model. *Iranian journal of Ecohydrology*, 5(2), 551-569.

Montanarella, L., Pennock, D. J., McKenzie, N., Badraoui, M., Chude, V., Baptista, I., & Vargas, R. (2016). World's soils are under threat. *Soil*, 2(1), 79-82.

Nazari Samani, A., Ahmadi, H., Jafari, M., Boggs, G., Ghoddousi, J. & Malekian, A. (2009). Geomorphic threshold conditions for gully erosion in Southwestern Iran (Boushehr-Samal watershed). *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(2), 180-189.

Negahban, S., Rahimi, O. & Rahimi Harabadi, S. (2012). Investigation of gully erosion potential using hydrothermal climate coefficients and Ws. Case study: three basins of Bayakhi, Palangan and Hezarkanian in Kurdistan province. *Natural Geography*, 5(16), 89-101.

Olaya, V. & Conrad, O. (2008). Geomorphometry in SAGA. Developments in soil science, 33, 293-308.

Pal, S. C., & Chakrabortty, R. (2019). Simulating the impact of climate change on soil erosion in sub-tropical monsoon dominated watershed based on RUSLE, SCS runoff and MIROC5 climatic model. *Advances in Space Research*, 64(2), 352-377.

Pennock, D. (2019). Soil erosion: The greatest challenge for sustainable soil management.

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

Pourghasemi, H. R., Sadhasivam, N., Kariminejad, N. & Collins, A. L. (2020). Gully erosion spatial modelling: Role of machine learning algorithms in selection of the best controlling factors and modelling process. *Geoscience Frontiers*, 11(6), 2207-2219.

Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H.R., & Feizizadeh, B. (2017). Evaluating the influence of geo-environmental factors on gully erosion in a semi-arid region of Iran: An integrated framework. *Science of the Total Environment,* 579, 913-927.

Rahmati, O., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H.R., & Noormohamadi, F. (2016). Gully erosion susceptibility mapping: the role of GISbased bivariate statistical models and their comparison. *Natural Hazards*, 82(2), 1231-1258.

Rostamizad, Q., Selajgeh, A., Nazari Samani, A.A., Qudousi. J. (2013). Implementation of effective factors in the geometry of ditch erosion. *Journal of Environmental Erosion Sciences*, 4(13), 50-61.

Rostamizad, G., Salajeghe, A., Nazari Samani, A. A. & Ghodousi, J. (2014). Determining the Factors affecting on the geometry of Gully Erosion (Case study: Darrehshahr, Ilam). *Environmental Erosion Research Journal*, 4(1), 50-61.

Roy, P., Chakrabortty, R., Chowdhuri, I., Malik, S., Das, B. & Pal, S.C. (2020). Development of different machine learning ensemble classifier for gully erosion susceptibility in Gandheswari Watershed of West Bengal, India. *Machine Learning for Intelligent Decision Science*, 1-26.

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), 1313.

Sarvati, M. R., Ghodousi, J., & Dadkhah, M. (2008). Factors affecting the initiation and advancement of gully erosion in loesses. *Pajouhesh-va-Sazandegi*, 21(1), 20-33.

Setargie, T. A., Tsunekawa, A., Haregeweyn, N., Tsubo, M., Rossi, M., Ardizzone, F., & Meshesha, T. M. (2023). Modeling of Gully Erosion in Ethiopia as Influenced by Changes in Rainfall and Land Use Management Practices. *Land*, 12(5), 947.

Shadfar, S., & Soufi, M. (2025). Causes of Gully Erosion and Damages Caused by it in Iran. *Watershed Management Research*, 38(2), 83-97.

Shahbazi, A., Alvandi, E., & Bayat, A. (2021). Assessment of artificial neural network models and maximum entropy in zoning of gully erosion sensitivity of golestan dam Basin. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering,* 15(52), 12-23.

Shafiei, A., Khazayi, M., Molayi, A., & Soufi, M. (2011). Study and comparison of pedological and Morphological characteristics of gullies.*Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, 2(5), 26-38.

Shahbazi, K., Parvizi, Y., & Kalehhouei, M. (2021). Gully Erosion Classification in Kermanshah Province using Relative Similarity Analysis with Morphometric and Soil Auxiliary Variables. *Journal of Watershed Management Research*, 12(24), 298-307. [In Persian]

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1252]

Shirani, K. (2019). Gully erosion susceptibility zonation using Stochastic Maxent model (case study: the south of Isfahan Province). Final Report, Areeo, Jihad and Keshavarzi Ministery.

Shirani, K., Peyrowan, H., Shadfar, S., & Asgari, S. (2023). Gully erosion mapping based on hydro-geomorphometric factors and geographic information system. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195, 721.

Shit, P.K., Bhunia, G.S., & Pourghasemi, H.R. (2020). Gully erosion susceptibility mapping based on bayesian weight of evidence. Gully erosion studies from India and surrounding regions, 133-146.

Vanmaercke, M., Maetens, W., Poesen, J., Jankauskas, B., Jankauskiene, G., Verstraeten, G., & de Vente, J. (2012). A comparison of measured catchment sediment yields with measured and predicted hillslope erosion rates in Europe. *Journal of Soils and Sediments*, 12, 586-602.

Vanmaercke, M., Poesen, J., Van Mele, B., Demuzere, M., Bruynseels, A., Golosov, V., & Yermolaev, O. (2016). How fast do gully headcuts retreat?. *Earth-Science Reviews*, 154, 336-355.

Wang, Z., Zhang, G., Wang, C., & Xing, S. (2022). Assessment of the gully erosion susceptibility using three hybrid models in one small watershed on the Loess Plateau. *Soil and Tillage Research*, 223, 105481.

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, 115869.

Were, K., Kebeney, S., Churu, H., Mutio, J.M., Njoroge, R., Mugaa, D., Alkamoi, B., Ng'etich, W., & Singh, B.R. (2023). Spatial Prediction and Mapping of Gully Erosion Susceptibility Using Machine Learning Techniques in a Degraded Semi-Arid Region of Kenya. *Land*, 12(4), 890.

Yousefi Mobarhan, E., & Shirani, K. (2023). Assessment of Maximum Entropy (ME) to identify Effective Factors on Gully Erosion and Determination of Sensitive Areas in Alaa Semnan Watershed. *Journal of Watershed Management Research*, 14(28), 37-54. [In Persian]

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.

Zgłobicki, W., Kołodyńska-Gawrysiak, R., & Gawrysiak, L. (2015). Gully erosion as a natural hazard: the educational role of geotourism. *Natural Hazards*, 79, 159-181.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1252]