Susceptibility modeling and determining the contribution of factors affecting gully erosion

Khazaei Majid [a,*], **Shirani Korosh** [b], **Saleh Iman** [a]
(Authors' names should be typed in full, not abbreviated)
(You should put an asterisk on top of corresponding author's name)
[a] *Assistant Professor of Forests, Rangelands and Watershed Management Engineering Department, Kohgiluyeh & Boyerahmad Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Kohgiluyeh & Boyerahmad, Iran.*
[b] *Associate professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran*

Research Full Paper
Article History (Received: 2023/09/5 Accepted: 2024/08/21)

Extended abstract

1- Introduction

Soil erosion is one of the most important environmental issues in the world; so that, soils that are affected by degradation processes such as compaction, loss of nutrients and water retention capacity lead to soil erosion and loss in fertile agricultural lands. Gully erosion is the most severe type of water erosion, which is one of the main factors of land degradation. 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, economic and social damages could be controlled through appropriate measures and strategies in addition to preventing heavy costs to control gully erosion. According to the available models and relationships, it can be concluded that the 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; So that, only a part of the effective factors have been investigated due to variability of factors affecting the gully. While the present research aims to determine the most important factors affecting the gully erosion and prioritize the factors and finally zoning the gully points and sensitivity to the gully in Maroon watershed.
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, the long-term average annual temperature in te representative stations of the plains is 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 effective factors using alignment test between the effective 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 the present study, the location of gullies created in the Takht Daraz watershed was first recorded by field visit, and based on the recorded points, they were divided into two groups of training data (70%) and experimental data (30%) respectively in order to calibrate and validate the models. 23 factors affecting the occurrence of gully erosion were identified based on scientific references and watershed conditions, and their maps were prepared in ARCGIS environment. The weight of these factors was determined based on the frequency ratio, and then the correlation of the effective factors was investigated using the collinearity test. In the next step, the maximum entropy model was calibrated and validated using the weighted data of the effective factors and the spatial training and experimental data of the gully distribution. The Jackknife test and the receiver operating characteristic index

* **Corresponding Author: M.Khazaei@areeo.ac.ir**

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-16]

were respectively used to determine the thresholds of effective factors in the occurrence of gully erosion as well as evaluating the efficiency of the studied models.

3- Results

According to the collinearity analysis, the variance inflation rate of the investigated variables was less than 0.5, which indicates the non-collinearity between the investigated variables and all the variables were included in the modeling process. Based on the results of MaxEnt model (maximum entropy), a gully erosion sensitivity map was obtained, based on which the very high sensitivity class with 52 percent of gully occurrences has the highest density of gullies; So that the ratio of the frequency of gullies in this class was 6.73 and the Seed Cell Index area was 0.15. The very low sensitivity class has the lowest amount and frequency ratio of gully by 0.02 and nuclear cell surface index at the rate of 46.8. According to the information obtained from the map, the highest percentage of the area is related to very low sensitivity class (46%), which has eight pixels of gullies, and the lowest area of the watershed is related to the very high sensitivity class (8%) which has 420 pixels of gully. In general, based on the maximum entropy method, 34% of the watershed is in the medium to very high sensitivity class. Also, the validation results of the maximum entropy model based on the index of the area under the curve (AUC) showed that the area under the curve in this method was 0.85, which indicates the high accuracy of the maximum entropy model.

4- Discussion & Conclusions

In the present study, the spatial distribution of gullies and its relationship with the effective environmental parameters of the Takht Daraz basin have been used in order to evaluate the sensitivity of gully erosion. For this purpose, different methods and models including witness weight, belief model and entropy method have been used to prepare a gully erosion sensitivity map. Google Earth image interpretation, past research and extensive field visits were used to prepare the gully distribution map, and 70% of the gullies were used for modeling and 30% for validation. In the field of effective parameters in gully erosion, 23 effective parameters were identified and prepared using research literature, access to data and environmental conditions of the study area. The results showed that the entropy model with the area under the curve (AUC) of 0.86 had high prediction accuracy. The results of the effective factors on gully erosion showed that according to the Jackknife test, the lithological factor had the greatest effect on the areas under the curve. The results of determining the parameters weight also showed that different parameters have different participation rates in the gully erosion occurrence; so that, the parameters of land-use and geology had the largest share of participation in the occurrence of gully erosion, with a contribution of 24% and 18% respectively.

Key Words: Entropy, Takht Deraz Watershed, Gully Erosion, Maroon Dam.

Cite this article: Khazaei, M., Shirani, K., & Saleh, I. (2024). Susceptibility modeling and determining the contribution of factors affecting gully erosion. *Journal of* Environmental *Erosion Research. 2024; 14 (3) :123-141.* http//doi.org/

© The Author(s).
DOI: http//doi.org/
Published by Hormozgan University Press.
URL: http://magazine.hormozgan.ac.ir

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-16]

بررسی عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی و تهیه نقشه پهنه‌بندی در حوزه آبخیز تخت‌دراز

مجید خزائی*: *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.*

کورش شیرانی: *دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.*

ایمان صالح: 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.

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخچهٔ مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۶/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۵/۳۱)

DOI: http//doi.org/

چکیده

شناسایی عوامل مؤثر و پیش‌بینی مناطق حساس به فرسایش خندقی از عوامل کلیدی جهت مدیریت و حفاظت خاک در حوزه‌های آبخیز است. این پژوهش در حوزه آبخیز تخت‌دراز در استان کهگیلویه و بویراحمد انجام گرفته که سد مارون نیز در پایین دست آن قرار گرفته است. در این پژوهش ابتدا با بازدید میدانی موقعیت تعدادی از خندق‌های ایجاد شده در حوزه آبخیز تخت‌دراز با سامانه موقعیت‌یاب جهانی ثبت و شرایط ایجاد خندق‌ها از جمله نوع کاربری، نوع سازند، نزدیکی به جاده و رودخانه، شکل خندق و غیره مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌منظور پیش‌بینی مناطق حساس به فرسایش خندقی در سایر نقاط حوزه از مدل حداکثر آنتروپی استفاده شد که در این مدل داده‌های ثبت شده از نقاط خندقی به دو دسته داده‌های آموزشی (۷۰ درصد کل داده‌ها) و آزمایشی (۳۰ درصد کل داده‌ها) تقسیم شدند. بر اساس منابع علمی و شرایط کنونی حوزه آبخیز تخت‌دراز ، ۲۳ عامل مؤثر بر وقوع فرسایش خندقی شناسایی و نقشه آن‌ها در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی تهیه شدند. وزن هر کدام از عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی بر اساس نسبت فراوانی هر عامل تعیین گردید. در مرحله بعد همبستگی عوامل موثر بر فرسایش خندقی با استفاده از آزمون هم‌خطی بررسی و عواملی که دارای هم‌خطی بودند از چرخه مدلسازی حذف شدند و با استفاده از عواملی که هم‌خطی نداشتند مدلسازی صورت گرفت. به منظور تعیین آستانه‌های عوامل موثر در رخداد فرسایش خندقی و ارزیابی کارآمدی مدل‌های مورد بررسی از آزمون جک‌نایف استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل آنتروپی با سطح زیر منحنی ۰/۸۸ دارای دقت پیش‌بینی مناسبی در تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی بوده است و کاربری اراضی و زمین‌شناسی بیشترین اهمیت را در رخداد فرسایش خندقی به ترتیب با سهم مشارکت ۲۴ و ۱۸ درصد داشته‌اند.

واژگان کلیدی: آنتروپی، حوزه آبخیز تخت‌دراز ، فرسایش خندقی، سد مارون

* نویسندهٔ مسئول: M.Khazaei@areeo.ac.ir

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-16]

۱ـ مقدمه

فرسایش خاک یکی از مهمترین مسائل زیست‌محیطی در جهان است (Lal, 2001) اشکال مختلفی از فرسایش آبی شناخته شده است که در این میان فرسایش خندقی حد پیشرفته فرسایش خاک و از عوامل اصلی تخریب اراضی است. براساس تحقیقات صورت گرفته در خصوص فرسایش خندقی، سهم رسوب حاصل از این نوع فرسایش چند صد برابر فرسایش‌های پاشمانی و سطحی است (Morgan, 1980). پیش‌بینی مکانی رخداد فرسایش خندقی راهکاری برای برنامه‌ریزی به منظور مدیریت حوزه‌های آبخیز و پیشگیری از رخداد این نوع فرسایش است. به‌نحوی که پهنه‌بندی فرسایش خندقی در حوزه‌های آبخیز سبب کاهش هزینه‌های کنترل فرسایش خندقی و جلوگیری از خسارات اقتصادی و صدمات اجتماعی می‌شود (Shirani, 2021). بررسی، تبیین و مقایسه مدل مناسب برای پیش بینی مکانی شکل‌گیری و گسترش فرسایش خندقی، با توجه به اهمیت این موضوع مورد توجه بسیاری از پژوهشگران از جنبه ها و دیدگاه های گوناگون مورد نظر بوده است (Ghoddousi, 2003). پیشینه اقدامات انجام شده در باره مدلسازی فرسایش خندقی نشان می‌دهد که در دهه ۱۹۸۰، اولین اقدامات درباره مبانی نظری نحوه و چگونگی شکل‌گیری فرسایش خندقی براساس قوانین فیزیکی آغاز شد. اما از آنجا که نتایج پژوهش‌های انجام شده درباره فرسایش خندقی در دهه ۱۹۸۰ منجر به دستیابی به کلیه اهداف و انتظارات مورد نیاز نشده و ابهامات زیادی در ابعاد مختلف آن وجود داشته است، در دهه ۱۹۹۰ پژوهش ها به صورت گسترده انجام گرفته و بر اساس نتایج حاصله اقدام به ارائه مدل‌هایی درباره روند شکل‌گیری و گسترش فرسایش خندقی به ویژه در دامنه‌های شیب‌دار و بستر دره‌های عریض شده است که امروزه پایه و اساس مطالعات تکمیلی درباره این نوع فرسایش محسوب می‌شود. در سال‌های اخیر از مدل‌های یادگیری ماشین، روش‌های آماری و چند متغیره نیز برای پهنه‌بندی فرسایش خندقی استفاده شده است (Gayen et al., 2019; Bernini et al., 2021). به طورکلی در خصوص فرایند ایجاد، عوامل مؤثر بر تشکیل، پیش‌بینی و پهنه بندی فرسایش خندقی مطالعات متعددی صورت گرفته است که در ذیل به تعدادی از آن‌ها اشاره شده است.

Shafeie و همکاران (2010) ریخت اقلیمی و خاک‌شناسی آبکندهای به وجود آمده در دو حوزه آبخیز زهره و مارون ن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تجزیه و تحلیل داده ها در دو منطقه نشان داد که تغییرات SAR و ESP، EC در حوزه آبخیز زهره نسبت به سازند میشان بیشتر بوده است که نشان دهنده بالا بودن میزان املاح در خاک بوده که باعث فرسایش‌پذیری بیشتر خاک در این حوضه شده است و تفاوت مورفولوژی آبکندهای منطقه گچساران نسبت به منطقه ی دهدشتنیز ناشی از تغییرات خاکشناسی ان عوامل بوده است. شده است. محققین در مناطق مختلف عوامل متنوعی و متعددی را در وقوع فرسایش خندقی مورد بررسی قرار داده‌اند در این ارتباط Khazayi و همکاران (2012) نقش عوامل ریخت‌شناسی، پوشش گیاهی و بارندگی را بر پیشروی خندق مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج آنها نشان داد که توسعه‌ی خندق به صورت غار مانند و از بخش میانی تا تحتانی در اثر لایه های سست و شکننده و وجود املاح و عناصر انحلال پذیر و فرو ریختن سقف خندق بوده است. 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 بوده است. بررسی عوامل موثر بر فرسایش خندقی برای مدیریت حوزه‌های آبخیز و کنترل فرسایش خندقی دارای اهمیت است ولی با توجه به وسعت حوزه‌های آبخیز و شرایط دینامیک موجود در حوضه لزوم پهنه‌بندی فرسایش خندقی با استفاده از عوامل مؤثر

* نویسندهٔ مسئول: M.Khazaei@areeo.ac.ir

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-16]

را میطلبد که در این ارتباط مدل‌های مختلفی ارائه شـــدملند در این خصـــوص Saberchenari و همکاران (2016) طی تحقیقی اقدام به پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی با استفاده از مدل دمپسترـ شفر در حوزه آبخیـــز قرنـــاوه استان گلستان نمودند. نتایج آنها نشـــان داد که از کل پهنه‌های خندقی در حوزه آبخیز قرناوه ۶۸/۰۶ درصد در طبقـــه زیاد و بسیار زیاد قرار گرفتند. یکی دیگر از مدل‌های مورد استفاده برای پهنه‌بندی فرسایش خندقی مدل حداکثر آنتروپی بوده است در این ارتباط Rahmati و همکاران (2018) کارایی مدل بیشـــینه آنتروپی را در پیش‌بینی وقوع فرســـایش آبکندی در حوزه آبخیز کشـکان-پل دختر مورد ارزیابی قرار دادند که بر اسـاس بررسـی، نقشـه مناطق مسـتعد فرسـایش آبکندی حاصـل از مدل بیشـینه آنتروپی ۹۰/۷ درصـد دقت داشـته اسـت. در این پژوهش از بافت خاک، تراکم زهکشـی، سـنگ شـناسـی و فاصـله از جریان به عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع فرسـایش آبکندی نام برده شـده اسـت در حالی که عوامل ارتفاع، فاصله از جاده، جهت شیب، کاربری اراضی، شاخص رطوبت توپوگرافی و انحنای سطح تأثیر کمتری در وقوع فرسایش آبکندی منطقه مورد مطالعه داشتند.

Madadi و همکاران (2022) نقشـه پهنه‌بندی حسـاسـیت به فرسـایش خندقی را با اسـتفاده از مدل حداکثر آنتروپی مورد بررسی قرار دادند. نتایج ان ها نشان داده است که بر اساس آزمون جک نایف به ترتیب متغیرهای ارتفاع، متوسط بارندگی سـالانه، بافت خاک، تراکم زهکشـی، زمین‌شـناسـی، فاصـله از جاده، فاصـله از رودخانه بیشـترین تأثیر را در فرسایش خندقی داشته است. Garosi و همکاران (۲۰۱۸) طی تحقیق به شناسایی مناطق مستعد وقوع فرسایش خندقی با اسـتفاده از مدل‌های یادگیری ماشـین در حوزه آبخیز سـد اکباتان پرداخت. نتایج نشـان داد که مدل درخت رگرسـیونی پیشرفته و مدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی کارایی بالایی در پیش‌بینی مناطق مستعد وقوع فرسایش خندقی دارند. Gayen و همکاران (۲۰۱۹) به مقایســـه میزان دقت پیش‌بینی مدل‌های یادگیری ماشـــین و آنالیز تشـــخیص انعطاف‌پذیر برای شناسایی مناطق مستعد خندق در حوزه آبخیز در کشور هند پرداختند. نتایج اثبات نمود که مدل جنگل تصادفی بیشترین دقت را به خود اختصـــاص داده اســـت. Teymouri و همکاران (2022) طی تحقیقی نقشـــه‌ی احتمال رخداد فرســـایش خندقی را با مدل یادگیری ماشـــینی بیشـــینه ی آنتروپی در اســـتان فارس تهیه نمودند. نتایج آن ها برپایه ی یافته های آزمون جک نایف، متغیرهای احتمال رویداد افق R ،عمق خاک، درصـد قطعه های درشـت دانه، اسـیدیته، و درصـد ذره های لای بیشترین تأثیر را در مدلسازی فرسایش خندقی نشان داده است.Bernini و همکاران (2021) طی تحقیق اقدام به شـناسـایی و ارزیابی عوامل مؤثر بر فرسـایش خندقی در حوضـه آبخیز رودخانه خومازی[1] در آفریقای جنوبی نمودند. نتایج آن ها نشان داد که مدل MaxEnt می‌تواند بین خندق‌های نوع V شکل و U شکل بر اساس روند منحنی‌های پاسخ تمایز ایجاد کند.

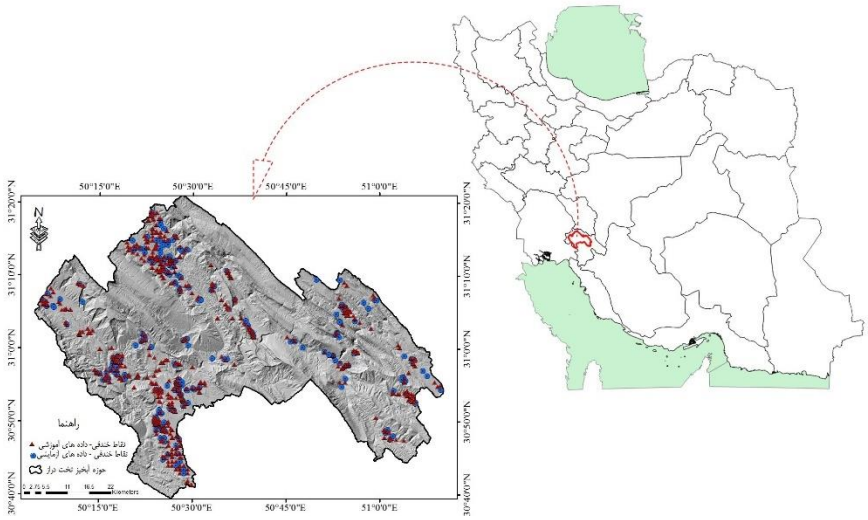
با توجه به مدل‌ها و روابط ارائه شده، می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین تلاش‌ها در مدل‌سازی فرسایش خندقی حول محور محل تشـکیل خندق‌ها و پیش بینی امکان یا عدم امکان شـکل گیری خندق‌ها بوده اسـت. به طوری که بدلیل تعدد عوامل موثر بر خندق فقط به بررسـی بخشـی از عوامل موثر پرداخته شـده اسـت در صـورتیکه این تحقیق با هدف تعیین مهمترین عوامل موثر بر فرســـایش خندقی و اولویت بندی عوامل و در نهایت پهنه بندی نقاط خندقی و حســـاســـیت به خندق در حوزه آبخیز مارون انجام گردید.

[1] Mkhomazi

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-16]

۲ـ منطقهٔ مورد مطالعه

حوزه آبریز تخت‌دراز (مارون) در تقسیم‌بندی کلی هیدرولوژی ایران بین طول شرقی ´۰۵- ۵۰ الی ´۱۱- ۵۱ و عرض شمالی ´۳۹- ۳۰ الی ´۲۱- ۳۱ قرار دارد (شکل ۱). مساحت حوضه ۳۸۳۷ کیلومتر مربع، حداکثر ارتفاع ۳۴۲۰/۳ متر و حداقل ۳۷۲/۸ متر است. متوسط بارندگی سالیانه ۸۱۵ میلی‌متر،میانگین دمای سالیانه بلند مدت در ایستگاه معرف مناطق دشتی به میزان ۱۹ و ایستگاه های واقع در مناطق مرتفع (کوهستانی) به میزان ۱۶ درجه سانتی‌گراد بوده است. تیپ اقلیمی مطابق سیستم دومارتن، مدیترانه‌ای تا نیمه خشک است (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

۳- مواد و روش

بطورخلاصه این پژوهش در هفت گام اصلی به شرحی که در ادامه آمده است اجرا می گردد: ۱) انتخاب منطقه، تهیه نقشه پراکنش رخداد خندق ها (متغیر وابسته) و تقسیم تصادفی آن به دو دسته آموزشی یا واسنجی (۷۰ درصد) و دسته آزمایشی یا پیش بینی (۳۰ درصد)، ۲) آماده‌سازی و تهیه نقشه های ۲۳ عامل موثر (متغیرهای مستقل)، ۳) انتخاب عوامل موثر با استفاده از آزمون هم راستایی بین عوامل موثر و رخداد خندق ها، ۴) اجرای مدل حداکثر آنتروپی ۵) تعیین آستانه‌ها و اهمیت عوامل موثر بر اساس بهترین مدل و ۶) تهیه نقشه پهنه‌بندی و پیش‌بینی حساسیت به رخداد فرسایش خندقی. در ادامه به تفصیل مراحل اجرایی روش تحقیق تشریح می گردد.

۳-۱- داده ها و روش گردآوری آن‌ها

در این بخش، مراحل ذیل انجام شد:

۳-۱-۱- تعیین عوامل مؤثر بر رخداد فرسایش خندقی و تهیه نقشه رقومی آن‌ها

بر اساس بازدیدهای میدانی وسیع از خندق‌های ایجاد شده و بررسی علل ایجاد خندق‌ها و همچنین با در نظر گرفتن تحقیقات صورت گرفته در دنیا در خصوص عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی به طور کلی ۲۳ عامل اصلی مؤثر بر فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شد (شاخص‌های انحنای کلی، انحنای دامنه و نیمرخ، شاخص طبقه بندی انحناء، شاخص تحدب، فاصله عمودی از شبکه آبراهه، مساحت حوزه آبخیز، شاخص توان آبراهه، طول شیب، شاخص رطوبت توپوگرافی، سایه روشن، ارتفاع، شیب، جهت، بافت سطحی، خاکشناسی، سنگ شناسی، کاربری اراضی، NDVI، بارش، تراکم آبراهه، فاصله از آبراهه و اقلیم) (جدول ۱).

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-16]

جدول ۱- مشخصات نقشه‌های عوامل موثر و منبع تهیه آنها

ردیف	نام متغیر یا داده مکانی	منبع تهیه	مرجع
۱	ارتفاع (Altitude)	DEM-PALSAR-ALOS	Burrough and McDonell, 1998
۲	شاخص آنالیز سایه و روشن (Analytical hillshading)	DEM-PALSAR-ALOS	Tarini, Cignoni, Montani, 2006
۳	گرادیان شیب (Slope)	DEM-PALSAR-ALOS	Burrough and McDonell, 1998
۴	شیب - طول	DEM-PALSAR-ALOS	Wischmeier, , Smith, 1978, Moore et al., 1991
۵	وجه شیب (Aspect)	DEM-PALSAR-ALOS	Burrough and McDonell, 1998
۶	انحناء کلی (General Curvature)	DEM-PALSAR-ALOS	Moore et al., 1991
۷	شاخص انحنای نیمرخ (profile curvature)	DEM-PALSAR-ALOS	Moore et al., 1991
۸	انحنای دامنه(plan curvature)	DEM-PALSAR-ALOS	Moore et al., 1991
۹	شاخص طبقه بندی انحناء (curvature classification index)	DEM-PALSAR-ALOS	MacMillan and Shary, 2009
۱۰	شاخص تحدب(convergence index)	DEM-PALSAR-ALOS	Koethe and Lehmeier, 1996
۱۱	شاخص فاصله عمودی از شبکه آبراهه (Vertical distance to channel network index)	DEM-PALSAR-ALOS	Olaya & Conrad, 2008
۱۲	مساحت حوزه آبخیز(catchment area)	DEM-PALSAR-ALOS	Olaya & Conrad, 2008
۱۳	بافت سطح زمین (Terrian surface texture)	DEM-PALSAR-ALOS	Iwahashi and Pike, 2007
۱۴	شاخص توان آبراهه (Stream power Index)	DEM-PALSAR-ALOS	Olaya &Conrad, 2009
۱۵	شاخص رطوبت توپوگرافی (Topographic wetness Index)	DEM-PALSAR-ALOS	Olaya &Conrad, 2009
۱۶	تراکم آبراهه	DEM-PALSAR-ALOS	Silverman, 1986
۱۷	فاصله از آبراهه	DEM-PALSAR-ALOS	Silverman, 1986
۱۸	سنگ شناسی	نقشه زمین شناسی 100k سازمان زمین شناسی	ArcGIS®10.8
۱۹	نوع خاک،	نقشه نوع خاک موسسه آب و خاک	ArcGIS®10.8
۲۰	کاربری اراضی	نقشه کاربری اراضی SENTINEL Google Engine	ArcGIS®10.8
۲۱	NDVI	نقشه کاربری اراضی SENTINEL Google Engine	ArcGIS®10.8
۲۲	بارش	نقشه بارش جاماب و ایستگاههای سازمان هواشناسی	ArcGIS®10.8
۲۳	نوع اقلیم	نقشه اقلیم دومارتن	ArcGIS®10.8

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-16]

۳-۱-۲- تعیین و انتخاب عوامل موثر اصلی (متغیرهای مستقل)

بطورکلی وجود هم‌پوشانی اطلاعاتی بین عوامل موثر بر فرسایش خندقی بر اساس روش عامل تورم واریانس مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور از روش هم خطی در نرم افزار SPSS21 استفاده شد.

۳-۱-۳- تهیه نقشه پراکنش رخداد فرسایش خندقی

از آنجایی که در این تحقیق منطقه مورد مطالعه از حوزه های آبخیز پرپتانسیل رخداد فرسایش خندقی است لذا قبل از بررسی و بازدید میدانی، عکس‌های هوایی و خصوصاً تصاویر گوگل ارث مورد بررسی بصری قرار گرفت. سپس با توجه به شناخت قبلی و اطلاعات مذکور اقدام به بازدید میدانی و ثبت موقعیت مکانی خندق های هر منطقه توسط دستگاه GPS و تصاویر گوگل ارث شد. رخدادهای خندقی ثبت شده که متغیر وابسته را در این پژوهش تشکیل می‌دهند بصورت داده‌های نقطه ای یا چندضلعی (پلی گونی) در بازدید میدانی ثبت شدند. در نهایت کلیه نقاط و محدوده های ثبت شده برداشت میدانی پس از همپوشانی و بررسی بصری با تصاویر گوگل ارث منجر به تهیه نقشه پراکنش خندقی بصورت چندضلعی شد. لازم به ذکر است نقاط ثبت میدانی یا پلی گونها معرف هدکت‌های یک سیستم شبکه خندقی در نظر گرفته شد. همچنین لازم به ذکر است برای استفاده از نقشه پراکنش خندقی به عنوان واقعیت زمینی (متغیر وابسته) در مدل سازی به صورت یک نقشه نقطه‌ای مورد استفاده قرار گرفت. ضمناً در بازدید و کنترل میدانی، مرز انواع کاربری اراضی، نوع واحد سنگی و خاک شناسی موجود خصوصاً در محل رخداد فرسایش های خندقی در نقشه‌های مذکور تدقیق شد.

لازم به‌ذکر است در مراحل بعدی اجرای تحقیق نقشه پراکنش فرسایش خندقی تهیه شده برای هر منطقه منتخب مطالعاتی بصورت تصادفی به دو دسته تصادفی به نسبت ۷۰ و ۳۰ درصد به‌ترتیب برای واسنجی (اجرا و توسعه) و اعتبارسنجی (پیش‌بینی) مدل‌ها تقسیم شدند.



شکل ۲- تصاویر نمونه هایی از فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-16]

۴-۱-۳تحلیل هم‌خطی چندگانه خطی

به‌منظور تعیین هم‌خطی بین متغیرهای مستقل معمولاً از روش آماری رگرسیونی خطی چند متغیره خطی و میزان همبستگی بین متغیرهای مستقل استفاده می شود. پس از تشکیل رگرسیون چندمتغیره خطی بین عوامل موثر (متغیرهای مستقل) و نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندق (متغیر وابسته) آزمون هم خطی با استفاده از دو معیار TOL و VIF تعیین می‌شود (روابط آن در ذیل آمده است). چنانچه TOL کوچکتر از ۰/۲ یا VIF بزرگتر از ۱۰ باشد در آن صورت هم‌خطی بین آن متغیرها وجود دارد (O'brien، 2007 و Bhandari، 2024). بنابراین با استفاده از آزمون تحلیل هم خطی چندگانه خطی مهمترین عوامل موثر که فاقد هم پوشانی اطلاعاتی می‌باشند از بین عوامل مذکور مشخص و برای ورود به روش های مدل سازی مورد نظر در این پژوهش تعیین و استفاده شد (Shirani و همکاران، ۲۰۱۸).

$VIF= 1/tolerance, Tolerance=1-R_j^2$

۳-۲- ابزارهای پژوهش

۳-۲-۱- مدل حداکثر آنتروپی

این مدل در اصل برای بررسی توزیع مکانی گونه‌های جانوری ارائه شد و سپس در سایر زمینه‌های علوم محیطی نیز بکار رفته است (فیض نیا و همکاران، ۲۰۱۸). در این تحقیق از نرم افزار مکسنت اقدام به مدلسازی فرسایش خندقی گردید. مکسنت یک روش یادگیری ماشینی مبتنی بر الگوریتم‌های آماری است (فیلیپس و همکاران، ۲۰۰۶) که حساسیت هر سلول شبکه را به عنوان تابعی از متغیرهای محیطی آن سلول شبکه بیان می‌کند. به این ترتیب، امکان پیش‌بینی مناطق تحت تأثیر فرسایش خندقی و ارزیابی حساسیت منطقه را فراهم می‌کند. در این تحقیق در ابتدا نقاط خندقی در قالب فرمت CSV وارد مدل گردید و در گام بعد متغیرهای خندقی که هم‌خطی نداشته‌اند با فرمت ASCII وارد بخش لایه‌های محیطی گردید و از طریق تنظیم پارامترهای مدل (تعیین درصد اعتبارسنجی، منحنی پاسخ، آنالیز جک نایف و فرمت خروجی) اقدام به مدلسازی گردید. مزیت این روش در مقایسه با سایر روش‌ها این است که نیازی به داده‌های عدم وقوع خندق ندارد و اثرات متغیرهای مستقل را فقط با در نظرگرفتن نقاط خندقی به عنوان متغیر وابسته بررسی می‌کند.

۳-۳- تجزیه و تحلیل نتایج

۳-۳-۱- تحلیل آزمون جک نایف[1]

در این روش که در مدل آنتروپی قابل انجام است با روش حذفی اثرات متغیرها را بر فرسایش خندقی به صورت مستقل بررسی می‌کند به طوریکه با دخالت همه متغیرها در مدلسازی و حذف مرحله به مرحله متغیرها و مشاهده سطح زیر منحنی سهم هر متغیر در دقت مدلسازی تعیین خواهد شد بدین صورت که کاهش شدید سطح زیرمنحنی نشان دهنده تاثیرگذاری زیاد متغیر حذفی خواهد بود و برعکس (Feiznia et al., 2018)

۳-۳-۲- ارزیابی و اعتبارسنجی مدل‌ها

برای ارزیابی نتایج مدل آنتروپی و محدوده‌های خندقی ثبت شده با بازدیدهای میدانی از منحنی ویژگی عملگر نسبی یا گیرنده (ROC) به منظور بررسی حساسیت فرسایش خندقی استفاده شده است. در این خصوص از نرم افزار SPSS21 استفاده شد.

[1] Jackknife

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-16]

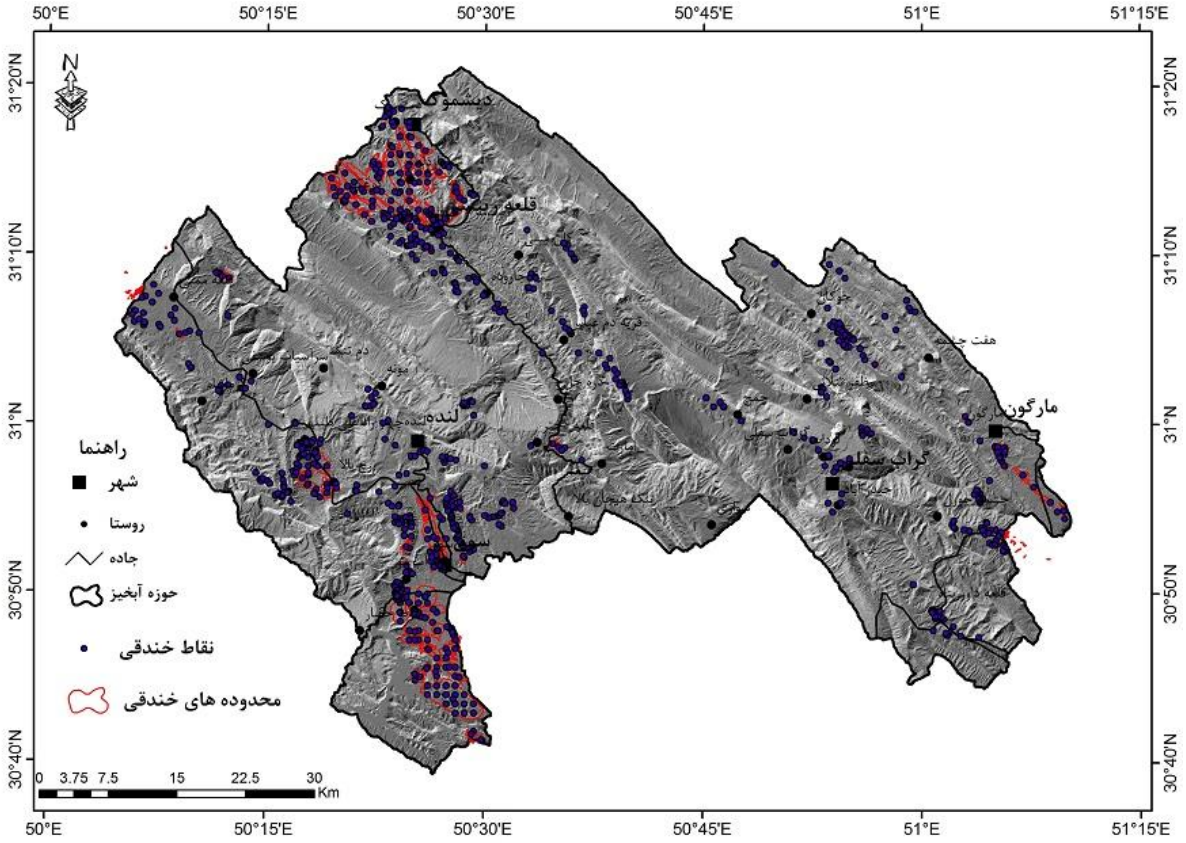
۳-۳-۳- تهیه نقشه پهنه‌بندی و پیش‌بینی حساسیت فرسایش خندقی

با استفاده از نتایج به دست آمده از مدل های مختلف در نرم‌افزار ARCGIS اقدام به تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی شد.

۴-یافته‌ها

۴-۱- نقشه پراکنش فرسایش خندقی

همانطور که در بخش روش تحقیق اشاره شد محدوده‌های فرسایش خندقی با استفاده از پایگاه اطلاعاتی پروژه های تحقیقاتی اجرا شده و بازدیدهای میدانی گسترده در نقاط مختلف حوزه آبخیز مارون با استفاده از GPS تهیه گردید (شکل ۳). به طور کلی نوع خندق‌های حوزه آبخیز تخت‌دراز غالباً پنجه‌ای بوده است.

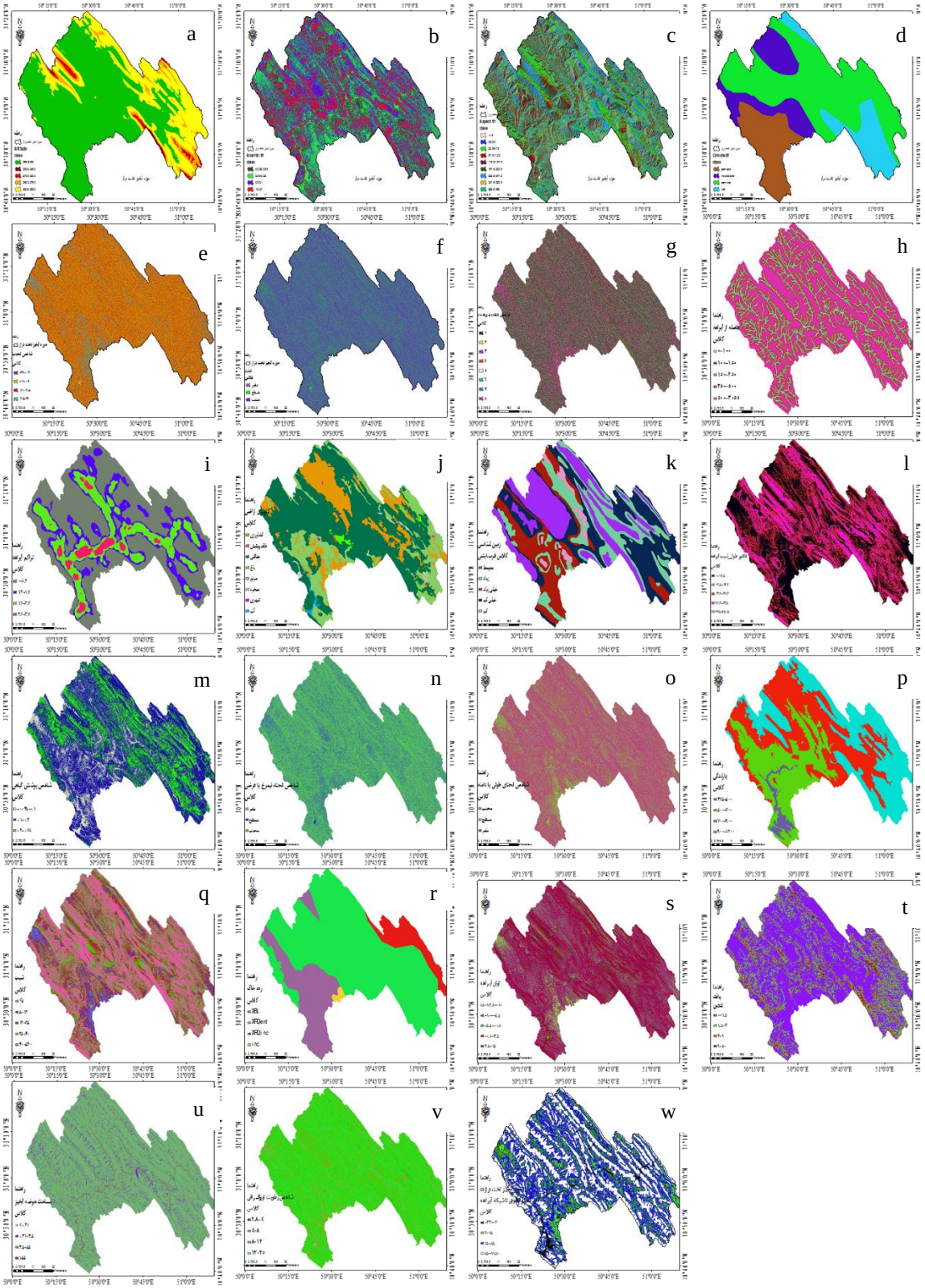


شکل ۳: نقشه پراکنش فرسایش خندقی حوضه تخت‌دراز

۴-۲- نقشه طبقات لایه های محیطی موثر بر فرسایش خندقی

نقشه عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی با استفاده از داده‌های مختلفی تهیه شده است (شکل ۴). ورودی‌های مدل شامل شاخص‌های توپوگرافی، عوامل محیطی بوده است. لازم به ذکر است برای تهیه تمامی نقشه‌های شاخص‌های توپوگرافی و محیطی استخراج شده از نقشه رقومی ارتفاع و نقشه‌های موضوعی در یک فریم برای مدل‌سازی، تمامی نقشه‌های ورودی زمین مرجع شده ودارای سیستم مختصات یکسان می‌باشند.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-16]

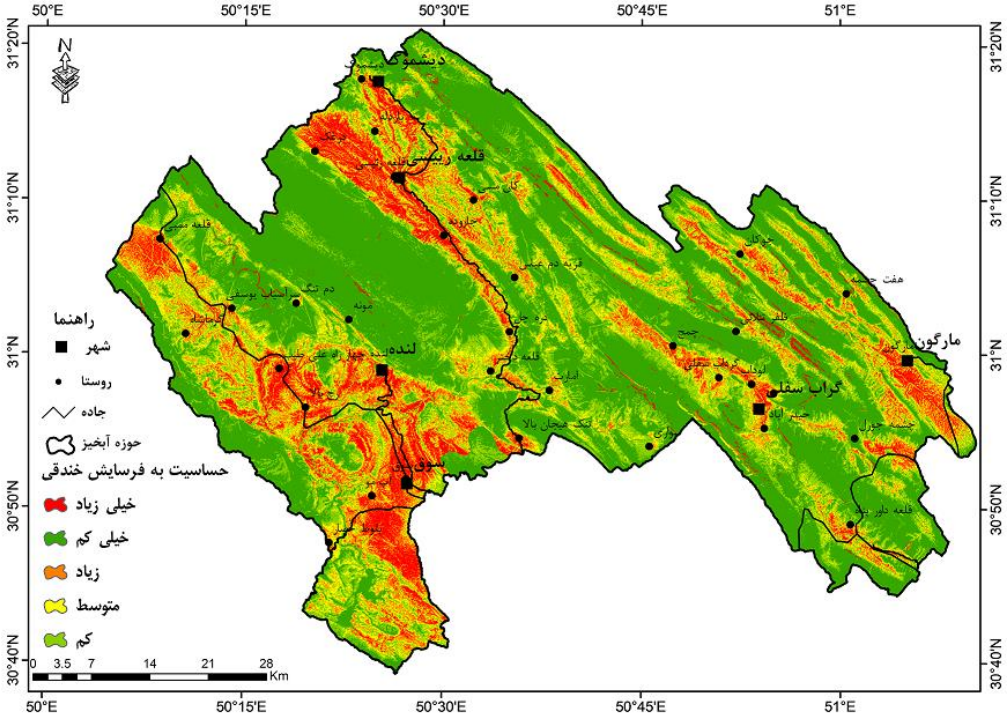


شکل ۴-نقشه لایه های اطلاعاتی عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی شامل: a: ارتفاع، b: سایه روشن c: جهت d: اقلیم، e: تحدب، f: انحناء، g: طبقه‌بندی انحناء، h: فاصله از آبراهه، i: تراکم ابراهه، j: کاربری اراضی، k: زمین شناسی، l: فاکتور طول شیب، m: NDVI، n: شاخص انحناء عرضی، o: شاخص انحناء طولی، p: بارندگی، q: شیب، r: رده خاک s: توان آبراهه، t: بافت، u: مساحت حوضه، v: شاخص رطوبت توپوگرافی ، w: فاصله عمودی از آبراهه

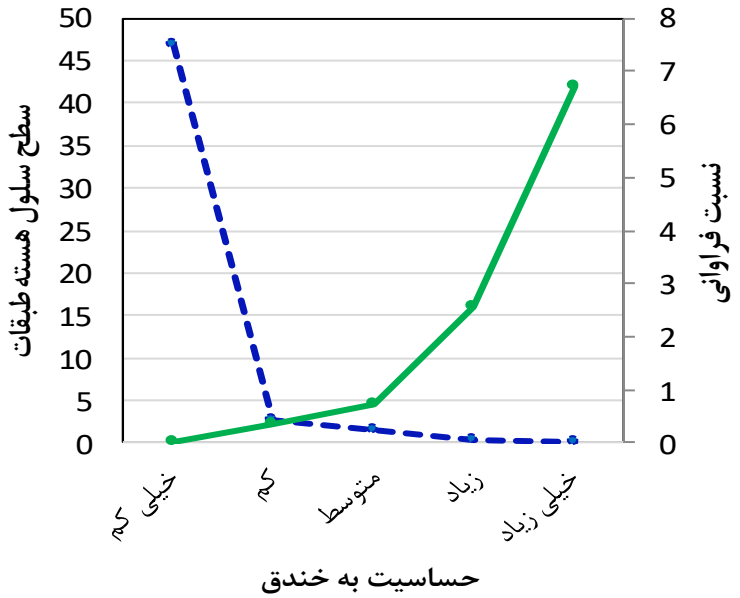
[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-16]

۴-۳- پهنه بندی فرسایش خندقی با مدل بیشینه انتروپی

به منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت فرسایش خندقی از طریق مدل انتروپی لایه های موثر بر فرسایش خندقی را که هم خطی نداشته اند بعنوان متغیر مستقل و نقاط خندقی را به عنوان متغیر وابسته وارد مدل مکسنت گردید و با لحاظ ۳۰ درصد داده ها برای اعتبارسنجی ، مدل اجرا گردید که نتایج نقشه حاصل از آن در شکل ۵ ارائه شده است. به منظور مقایسه طبقات فرسایش خندقی از نمودار شاخص نسبت فراوانی و سطح سلول هسته طبقات استفاده شد که نتایج آن در شکل ۵ ارائه شده است. درصد سطح طبقات و درصد مساحت خندق نیز در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۴-پهنه بندی حساسیت به فرسایش خندقی در مدل حداکثر آنتروپی



شکل ۵-سطح سلول هسته و نسبت فراوانی در طبقات حساسیت به فرسایش خندقی (واحد شاخص‌ها بدون بعد هستند)

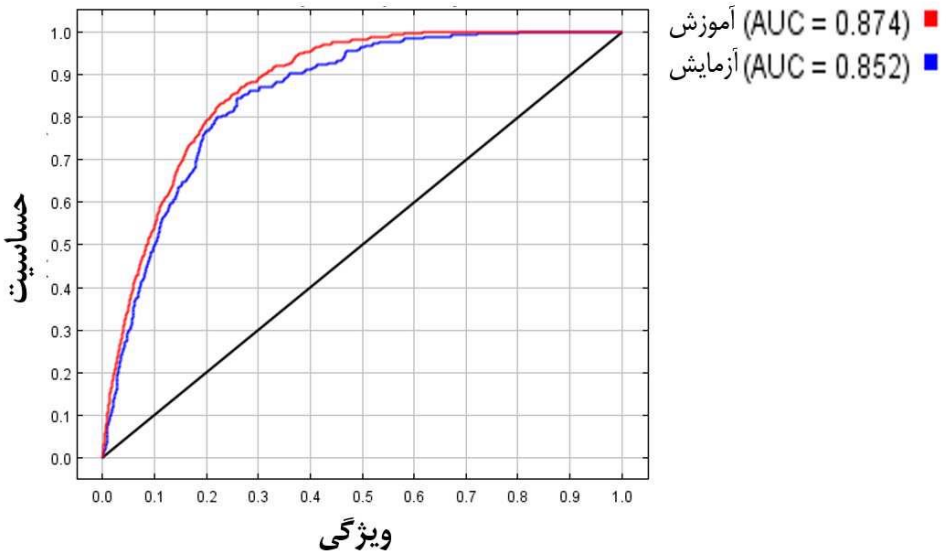
[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-16]

جدول ۱- درصد مساحت طبقات و درصد طبقات خندق در حوزه آبخیز تخت‌دراز

	درصد مساحت طبقات	درصد مساحت خندق
خیلی کم	۴۶	۱
کم	۲۰	۷
متوسط	۱۵	۱۰
زیاد	۱۱	۳۰
خیلی زیاد	۸	۵۱

۴-۴- اعتبارسنجی و کارآمدی مدل حداکثر آنتروپی

در این پژوهش نقشه پراکنش فرسایش خندقی برای ۸۱۸ خندق تهیه و رقومی شده است، که از ۷۰ درصد خندق‌ها برای آموزش (شامل ۵۷۲ خندق) و از ۳۰ درصد مابقی که (شامل ۲۴۶ خندق) برای اعتبارسنجی مدل ها استفاده شد. از منحنی مشخصه عملکرد (ROC) و مساحت سطح زیر نمودار (AUC) نیز برای ارزیابی مدل استفاده شد (شکل ۶). ابتدا داده‌های به‌دست آمده از نقشه‌های پهنه‌بندی فرسایش خندقی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی، به نقاط مربوط به ۵۷۲ خندق و ۲۴۶ خندق به صورت مجزا برازش داده شد و پس از انتقال داده‌ها به فایل اکسل داده‌ها در نرم افزار SPSS مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. طبق شکل ۶ که از نقاط واسنجی(۳۰٪) به دست آمده است، مدل دارای درصد قابل قبولی از مساحت زیر منحنی بوده است که این مسئله نشان دهنده عملکرد بالای مدل آنتروپی (۸۶/۸) برای پهنه‌بندی حساسیت فرسایش خندقی بوده است.

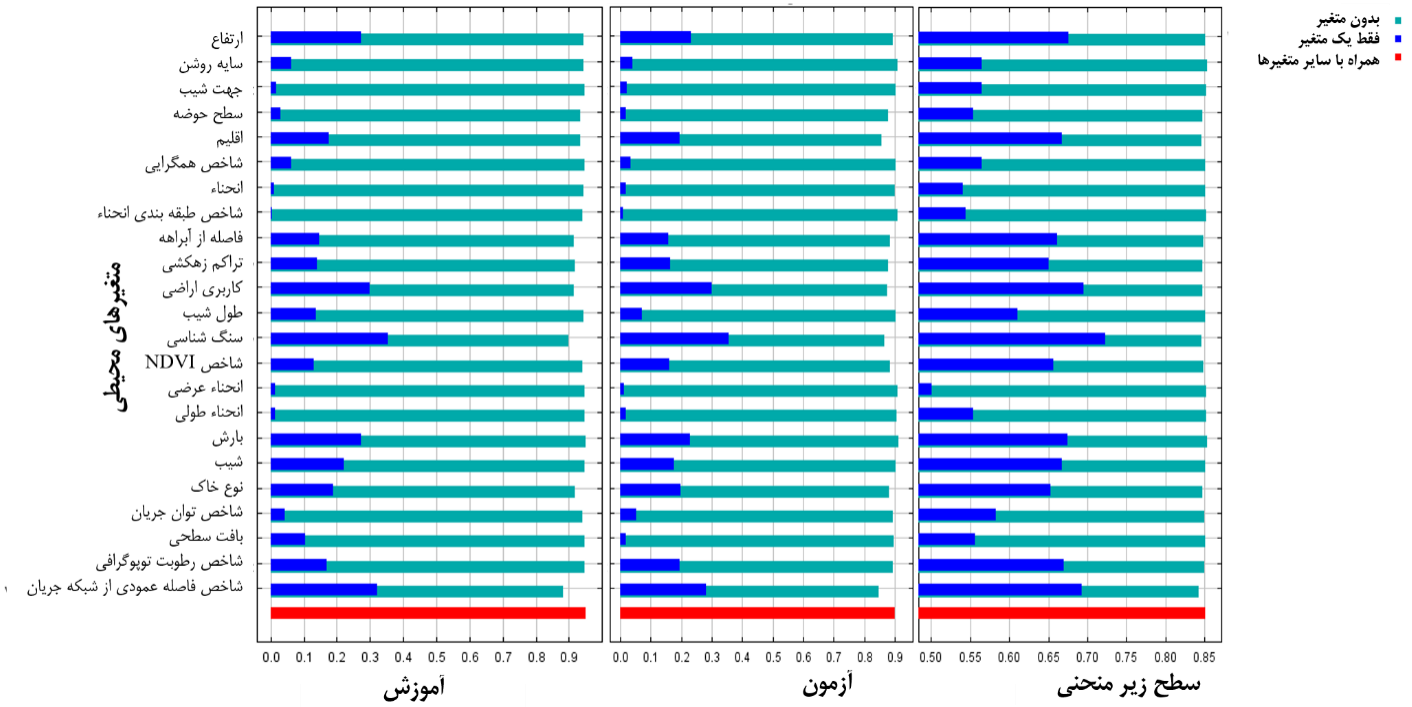


شکل ۶-نمودار سطح زیر منحنی برای داده‌های آموزش و اعتبار سنجی در مدل حداکثر آنتروپی

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-16]

۴-۵- نتایج آنالیز حساسیت و اهمیت متغیرها (آزمون جک نایف حاصل از مدل حداکثر آنتروپی)

با توجه به اینکه مدل حداکثر آنتروپی هم در مرحله واسنجی و هم در مرحله پیش بینی با دقت کارآمدی خوبی ارزیابی گردید، لذا برای بررسی اهمیت و تعیین مشارکت و همچنین تعیین آستانه های عوامل موثر در رخداد فرسایش خندقی از نتایج آزمون جک نایف در بسته نرم افزاری مدل حداکثر آنتروپی استفاده شد (شکل ۷). نمودار جک نایف تاثیر هر یک از شاخص‌ها را بصورت مستقل در پهنه بندی فرسایش خندقی نشان داده است.



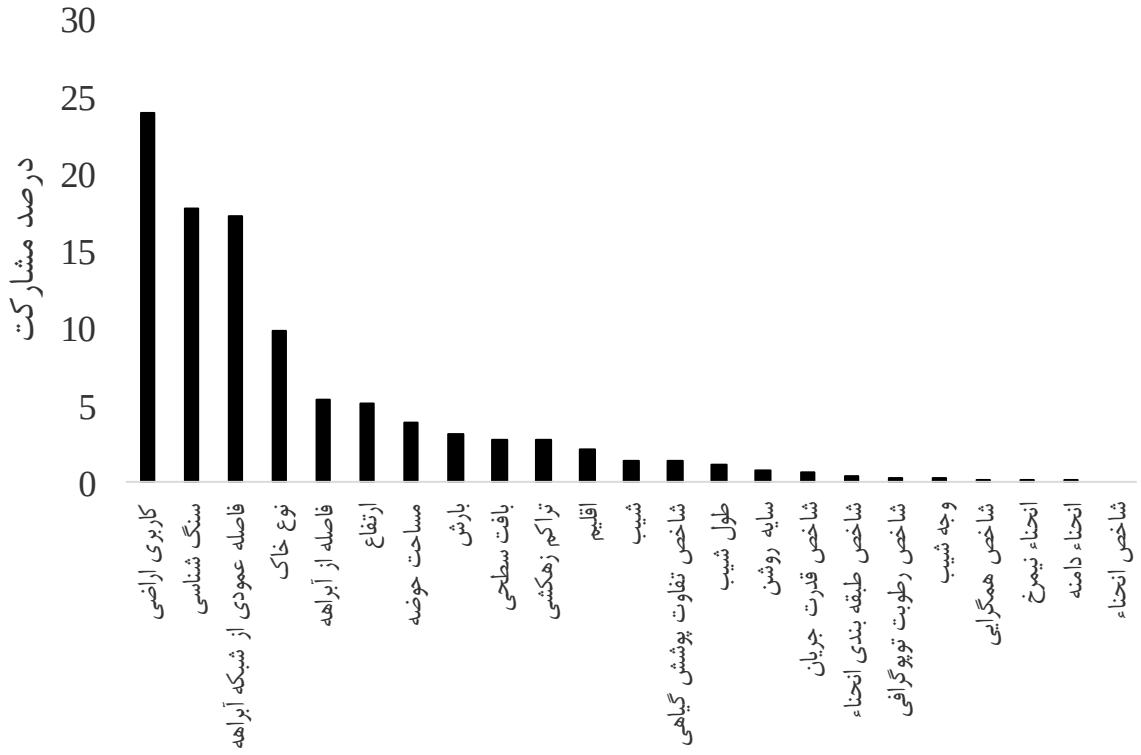
شکل ۷-نتایج تحلیل جک نایف در بررسی سهم متغیرها در تهیه نقشه حساسیت به فرسایش خندقی

همانطور که نتایج تحلیل متغیرهای موثر بر فرسایش خندقی بر اساس تحلیل جک نایف نشان داده است شاخص‌های سنگ‌شناسی با میزان ۰/۷۲، کاربری اراضی با سطح زیر منحنی ۰/۶۹ و فاصله عمودی از شبکه زهکشی با سطح زیر منحنی ۰/۶۸ مهمترین عوامل موثر بر فرسایش خندقی بوده‌اند.

۴-۶- تجزیه و تحلیل مشارکت متغیرها

سهم مشارکت عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی با استفاده مدل مکسنت که بیانگر اهمیت هر یک از شاخص‌ها نیز می‌باشد، به‌عنوان متغیرهای مستقل در ایجاد فرسایش خندقی مورد ارزیابی قرار گرفته است (شکل ۸). بر اساس نتایج شکل (۸) به ترتیب بیشترین وکمترین مشارکت در پیش‌بینی فرسایش خندق را متغیرهای کاربری اراضی با سهم مشارکت ۲۴ درصد و شاخص انحناء با مشارکت صفر درصد داشته است.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-16]



شکل۸-درصد مشارکت عوامل موثر بر فرسایش خندقی

دلیل انتخاب این عوامل به این سبب است که عوامل توپوگرافی از جمله: ارتفاع، شیب، جهت، انحنای سطح و شاخص موقعیت شیب نسبی، تأثیر به‌سزایی در فرایندهای هیدرولوژیکی و فرسایش دارند و از این‌رو به‌عنوان متغیرهای پیش‌بینی‌کننده مورد استفاده قرار خواهند گرفت. خاک‌شناسی یکی از عوامل مهم در وقوع و گسترش فرسایش خندقی است به گونه‌ای که سرعت رشد خندق‌ها در خاک‌های حساس بسیار بالاتر است. عامل سنگ‌شناسی همواره میزان حساسیت واحد سنگ‌شناسی به فرسایش را مشخص می‌کند و می‌تواند اطلاعات مفیدی برای تخمین فرسایش خندقی را ارائه نماید. همچنین، از آنجایی که جریان‌ها (زهکش‌ها) جریان‌های سطحی و زیرسطحی محدوده‌های اطراف و بالادست را جمع‌آوری می‌کنند، همگرایی جریان‌ها می‌تواند پتانسیل بالایی برای وقوع و رشد فرسایش‌های خندقی داشته باشد، از این‌رو عامل فاصله از جریان به‌عنوان یکی از متغیرهای پیش‌بینی‌کننده انتخاب شده است. تراکم زهکشی نیز نشان‌دهنده‌ی میزان تراکم جریان‌ها در واحد سطح منطقه است و بر پتانسیل فرسایش خاک و فرایندهای هیدرولوژیکی تأثیرگذار است. شاخص رطوبت توپوگرافی نیز به‌عنوان یک شاخص ترکیبی توپوگرافی- هیدرولوژیکی، میزان جریان بالادست پیکسل و وضعیت شیب پیکسل را همزمان در نظر می‌گیرد تا میزان جریان بالقوه و شرایط نفوذ را نشان دهد. بارندگی نیز از عوامل اصلی وقوع فرسایش آبی است و به‌منظور تخمین هدررفت خاک، بایستی به‌عنوان یکی از عوامل مهم پیش‌بینی‌کننده در نظر گرفته شود. لایه‌های اطلاعاتی این متغیرها در سیستم اطلاعات جغرافیایی در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ یا ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه می‌شود.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-16]

۵ـ بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق از مدل حداکثر آنتروپی به منظور تهیه نقشه فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تخت‌دراز (مارون) در استان کهگیلویه و بویراحمد استفاده شد. فرسایش خندقی در این حوزه آبخیز از نظر پراکنش، وسعت و تعدد مناطق خندقی دارای اهمیت است. با توجه به وسعت زیاد حوضه تنوع اقلیمی، ساختارها و واحدهای زمین شناسی مختلف، شرایط اکولوژیکی، فیزیوگرافی و توپوگرافی متفاوتی وجود دارد که باعث تنوع از ررخسارهای فرسایشی در این حوزه آبخیز گردیده است. به طوریکه در این تحقیق بیش از ۸۰۰ محدوده خندقی شناسایی شد و در مجموع ۲۳ متغیر تاثیرگذار بر فرسایش خندقی مشخص شد که شامل عوامل اقلیمی (بارش، اقلیم)، عوامل توپوگرافی (گرادیان شیب، درجه شیب، ارتفاع، آنالیز سایه و روشن، انحناء دامنه، انحناء نیمرخ، طبقه بندی انحناء، مساحت حوزه آبخیز، شاخص تحدب و بافت)، عوامل هیدرولوژیکی (فاصله طولی از آبراهه، فاصله عمودی از آبراهه، تراکم آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص توان آبراهه و طول-شیب آبراهه) و عوامل اکولوژیکی (شامل کاربری اراضی، پوشش گیاهی، خاکشناسی) بوده است که همه عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی مورد بررسی قرار گرفت. در این خصوص Madadi و همکاران (۲۰۲۲) از ۱۵ عامل، Shahbazi و همکاران (۲۰۲۱) از ۱۴ عامل، Shirani (۲۰۲۱) ۱۴ عامل و Arab Amiri و همکاران (۲۰۱۸) ۱۵ عامل را به منظور عوامل موثر بر فرسایش خندقی مورد بررسی قرار دادند. بررسی نسبت فراوانی قرارگیری پیکسل های خندقی در طبقات مختلف از لایه های اطلاعاتی موثر بر فرسایش خندقی نشان داده است که به ترتیب بیشترین نسبت فراونی در لایه آنالیز سایه روشن به میزان ۱/۳۲، لایه جهت شیب به میزان ۱/۳۵، شاخص تحدب به میزان ۲/۰۸، شاخص انحناء به میزان ۱/۲۱، طبقه‌بندی انحناء به میزان ۱/۴، فاصله از آبراهه به میزان ۱/۹۵، تراکم زهکشی به میزان ۲، لایه ارتفاع به میزان ۱/۳۴، کاربری اراضی به میزان ۲/۲۷، زمین شناسی به میزان ۲/۷۹، فاکتور طول شیب به میزان ۱/۵، شاخص NDVI به میزان ۱/۷، انحنای دامنه به میزان ۱/۱۷، انحنای نیمرخ به میزان ۱/۳۳، بارش به میزان ۱/۹، شیب به میزان ۲/۴۱، نوع خاک به میزان ۲/۶۵، شاخص توان آبراهه به میزان ۱/۴۹، بافت به میزان ۱/۲۴، مساحت حوزه آبخیز به میزان ۱/۵۲، شاخص رطوبت توپوگرافی به میزان ۸، فاصله عمودی از آبراهه به میزان ۲/۳۳ و اقلیم به میزان ۲/۳۰ محاسبه شده است.

در مجموع تراکم خندق در شیب های جنوبی بیشتر و در شیب های شمالی کمتر بوده است که احتمالا به دلیل رطوبت بالاتر شیب های شمالی و وجود پوشش گیاهی احتمال رخداد فرسایش خندقی کمتر بوده است. در این خصوص Rostamizad و همکاران (۲۰۱۴) به نتایج مشابهی در این ارتباط رسیدند و علت این امر را آفتابگیر بودن این دامنه ها و کاهش رطوبت و پوشش گیاهی کمتر نسبت به جهت های دیگر اعلام کردند. اثر جهت شیب بر فرسایش خندقی به علت اختلاف میکروکلیمای در شیب های مختلف است که این نتایج با یافته‌های Madadi و همکاران (۲۰۲۲) همخوانی دارد. از نظر سنگ شناسی، بیشترین خندق های حوزه آبخیز تخت‌دراز در سازندهای زمین شناسی گچساران، آغاجاری، میشان و رسوبات کواترنری مشاهده شدند که از مهمترین دلایل آن میتوان به وجود املاح گچ و نمک، انحلال پذیری، وجود رسوبات ریزدانه رس و سیلت و عدم وجود ساختمان قوی خاکدانه ها و همچنین کمبود مواد آلی اشاره کرد. از نظر توزیع فرسایش خندقی در کاربری های مختلف بیشترین تراکم خندق ها در ارضی

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-16]

کشاورزی ایجاد شده اند که با نتایج Shahbazi و همکاران (۲۰۲۱) مطابقت دارد در صورتی که مناطق جنگلی دارای کمترین میزان حساسیت به فرسایش خندقی بوده‌اند.

بر اساس تحلیل هم خطی میزان تورم واریانس متغیرهای مورد بررسی در این تحقیق کمتر از ۰/۵ بوده است که نشان دهنده عدم هم خطی بین متغیرهای مورد بررسی بوده است و همه متغیرها وارد فرایند مدلسازی گردیدند. بر اساس نتایج مدل مکسنت (حداکثر آنتروپی) ورود داده‌های خندق به عنوان متغیر وابسته و متغیرهای مستقل (۲۳ عامل) نقشه نقشه حساسیت فرسایش خندقی به دست آمد که بر اساس آن طبقه حساسیت خیلی زیاد با ۵۲ درصد رخدادهای خندق بیشترین میزان تراکم خندق را داشته است. در این خصوص Saberchenari و همکاران (2016) با استفاده از مدل دمپسترـــ شفر به نتایج مشابهی در حوزه آبخیز قرناوه رسیدند و ۶۸ درصد کل پهنه‌های خندقی در طبقـــه زیاد و بسیار زیاد قرار داشتند.

نسبت فراوانی خندق در این طبقه ۶/۷۳ و شاخص سطح سلول هسته به میزان ۰/۱۵ بوده است. طبقه حساسیت خیلی کم کمترین میزان و نسبت فراوانی خندقی را به میزان ۰/۰۲ و شاخص سطح سلول هسته به میزان ۴۶/۸ داشته است. طبق اطلاعات به دست آمده از نقشه پهنه‌بندی خندق بیشترین مساحت منطقه مربوط به حساسیت خیلی کم به فرسایش خندقی (۴۶٪) بوده است و کمترین مساحت حوزه آبخیز مربوط به طبقه حساسیت خیلی زیاد به فرسایش خندقی (۸ درصد) بوده است. به طور کلی بر اساس روش بیشینه آنتروپی ۳۴ درصد حوزه آبخیز در طبقه حساسیت متوسط تا خیلی زیاد قرار گرفته است. همچنین نتایج اعتبارسنجی مدل حداکثر آنتروپی بر اساس شاخص سطح زیر منحنی نشان داده است که به ترتیب سطح زیر منحنی در این روش به میزان ۰/۸۵ بوده است که نشان دهنده دقت بالای مدل مدل بیشیه آنتروپی بوده است.

با توجه به دقت بالای مدل آنتروپی در تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی، سهم مشارکت عوامل ورودی به مدل از با استفاده مدل مکسنت بررسی شد که اهمیت هر یک از شاخص‌ها با لحاظ میزان مشارکت هر عامل بر فرسایش خندقی تعیین شده است که بر اساس روش جک نایف عوامل لیتولوژی و کاربری اراضی به عنوان مهمترین عوامل تأثیرگذار بر حساسیت به فرسایش آبکندی مشارکت داشته‌اند در این خصوص Shahbazi و همکاران (2021) به نتایج مشابهی در خصوص اهمیت عوامل سنگ شناسی و کاربری اراضی در طبقه فرسایش خندقی رسیده‌اند. همچنبن Shafeie و همکاران (2010) تغییرات خاکشناسی و زمین‌شناسی را به عنوان عوامل اصلی ایجاد فرسایش خندقی ذکر نموده‌اند که با نتایج این تحقیق مطابق داشته است. بطور کلی نتایج تحقیق نشان داد که مدل آنتروپی با سطح زیر منحنی ۰/۸۶ دارای دقت پیش بینی بالایی در تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی بوده است در این ارتباط Rahmati و همکاران (2018) به نتایج مشابهی در خصوص کارایی مدل بیشینه آنتروپی در پیش‌بینی وقوع فرسایش آبکندی در حوزه آبخیز کشکان-پل دختر گزارش نمودند.

۶- سپاس‌گزاری

از پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کهگیلویه و بویراحمد جهت حمایت مالی از اجرای این پروژه تحقیقاتی تشکر و قدردانی می‌گردد.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-16]

منابع

1. Amiri, M., Pourghasemi, H. R., Ghanbarian, Gh. & S. F., Afzali. 2020. Spatial modeling of gully erosion in Maharlou Watershed using different scenarios and Weights-of-evidence algorithm. Watershed Engineering and Management, 11(4): 1016-1032. (In Persian). https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.120399.1435.
2. 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. https://doi.org/10.3390/rs12172833.
3. Bernini, A., Bosino, A., Botha, G. A., & M. Maerker. 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. https://doi.org/10.3390/ijgi10110729.
4. Garosi.Y, Sheklabadi. M, Pourghasemi .H.R, Besalatpour. A.A, Conoscentid. C, Ooste. K.V, Comparison of differences in resolution and sources of controlling factors for gully erosion susceptibility mapping. *Geoderma*. 330 (1). 65-78. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.05.027.
5. Gayen.A, Pourghasemi.H.R, Saha.S, Keesstra.S, Bai.S. 2019. Gully erosion susceptibility assessment and management of hazardprone areas in India using different machine learning algorithms, *Science of the Total Environment*. 124 (668). 124-138. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.436.
6. Ghoddousi, J. 2003. Modelling of gully erosion and zoning of its risk (A case study: Zanjanroud watershed). Ph.D *Thesis, Faculty of natural resources*, Tehran University, Tehran, Iran. (In Persian)
7. Howard, A. D. 1971. Simulation of Stream Networks by Headword Growth and Branching. *Geographical analysis*. 3(1):29-50. https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1971.tb00346.x.
8. Hugus MK, Mark DM. Spatial data processing of digital simulation of erosion. Technical Paper of the Fall Convention of the American Society of Photogrammetry / American Congress on Surveying and Mapping, 1988. pp. 683-693.
9. Khazayi, M., A. Shafeie & A. Molayi. 2010. Study of the Factors Affecting Gully Erosion Development. *Journal of Soil Research (Soil and Water Sciences)*. 26 (2): 153-163. https://doi.org/10.22092/ijsr.2012.126367.
10. Kirkby MJ. 1992. Thresholds and instability in stream head hollows: a model of magnitude and frequency for wash processes. *School of Geography, University of Leeds.*
11. Lal, R. 2001. Soil degradation by erosion. L. *Degrad. Dev*. 12, 519–539 .
12. Madadi, A., Saraskanroud, S. S., Negahbanc, S. & M. Marhamatd. 2022. Evaluation of Gully Erosion Sensitivity using Maximum Entropy Model in Shoor River Watershed (Mohr Township). *Geography and Environmental Hazards.* 11(2): 123-145. (In Persian). https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.76707.1228.
13. Morgan RP. 2009. Soil erosion and conservation. John Wiley & Sons.
14. Panagos, P., Standardi, G., Borrelli, P., Lugato, E., Montanarella, L., Bosello, F. 2018. Cost of agricultural productivity loss due to soil erosion in the European Union: From direct cost evaluation approaches to the use of macroeconomic models. L. *Degrad. Dev.* 29, 471–484 . https://doi.org/10.1002/ldr.2879.
15.
16. Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H. R. and B. Feizizadeh. 2018. Assessing the effectiveness of the maximum entropy model to gully erosion susceptibility prediction in the Kashkan-Poldokhtar Watershed. https://doi.org/10.22092/IJWMSE.2018.118040.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-16]

17. saber chenari, K., Bahremand, A., Sheikh, V. B., & Komaki, C. B. (2016). Gully Erosion Hazard Zoning Using of Dempster-Shafer Model in The Gharnaveh Watershed, Golestan Province. *Iranian journal of Ecohydrology*, 3(2), 219-231. (In Persian). https://doi.org/10.22092/10.22059/ije.2016.59663.
18. Shahbazi, A., Vakili, T., Alvandi, A., Bayat, A. 2021. Evaluation of Artificial Neural Network and maximum entropy in gully erosion zoning of Golestan dam watershed. 52: 12-14. (In Persian). https://doi.org/20.1001.1.20089554.1400.15.52.4.6.
19. Shahrivar A. 1997. Factors Effecting Gully Erosion and Model Presentation in Souq-Dehdasht, Master's Thesis, Faculty of Natural Resources, University of Tehran. (In Persian). https://doi.org/10.22059/ije.2017.60893.
20. Shirani, K., Pasandi, M., Arabameri, A. (2018). Landslide susceptibility assessment by Dempster–Shafer and Index of Entropy models, Sarkhoun basin, Southwestern Iran. *Nat. Hazards* 93:1379–1418. https://doi.org/10.1007/s11069-018-3356-2.
22. Shirani K. 2021. Gully Erosion Mapping and Susceptibility Assessment Using Statistical and Probabilistic Methods. *JWSS*, 25 (2) :151-174. (In Persian). https://doi.org/10.47176/jwss.25.2.147215.
23. Willgoose G, Bras RL, Rodriguez-Iturbe I. 1991. Results from a new model of river basin evolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16(3):237-54. https://doi.org/10.1002/esp.3290160305.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-16]