Zoning and assessing the sensitivity of gully erosion using the maximum entropy model in the Ilam watershed

Shamsolah Asgari[a,*], **Kourosh Shirani**[b]
[a]*Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Ilam Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.*
[b]*Associate Prof, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.*

Research Full Paper
Article History (Received: 2025/04/23 Accepted: 2025/08/26)

Extended abstract

1- Introduction

The Ilam Basin, located in the southwest of Ilam Province, with Ilam City and Chavar City, in the north of this basin, is highly sensitive to gully erosion due to its climatic, topographic, and lithological characteristics. Gully erosion is active in this area, and sometimes the length of the gully reaches more than 200 meters. Considering that the study area is structurally located in the folded Zagres geological region with a specific morphology, topographic features or indicators resulting from the geological structure, along with other inherent factors such as lithology, vegetation cover, and climate, play an effective role in the occurrence of gully erosion. Also, due to the high sensitivity of the surface layers of the soil and in some parts of the surface and deep layers of the soil, runoff causes the creation of furrows and, in the later stages, ditches in the study area. Since the effect of ditch erosion on land degradation in the study area is several times greater than other types of water erosion, therefore, considering the aforementioned materials, the purpose of this study is to implement the maximum entropy model in order to determine the threshold of ditch erosion, the influencing factors and indicators, prepare a ditch erosion zoning map, and evaluate and validate the prediction maps of sensitivity to ditch erosion in order to increase the accuracy of prediction maps for ditch erosion.

2- Methodology

In this study, the capability of the maximum entropy model was used to zone the susceptibility of gully erosion. Using Google Earth images and field visits, 331 gully points were identified and recorded, and a gully distribution map was prepared. The spatial data of gully erosion distribution were divided into two random groups: training (70%) and experimental (30%). 23 factors affecting the occurrence of gully erosion (including slope curvature indices, profile curvature index, convergence index, curvature classification index, watershed area, watershed power index, watershed length-slope factor, topographic moisture index, elevation, slope gradient, slope direction, light and shade analysis index, drainage density map and distance from drainage network, lithology, soil type and depth characteristics, vegetation cover index (NDVI), land use and average precipitation, and Demarton climate layer) were used in the model analysis.

3- Results

In this study, a method for identifying gullies was presented, and 331 gullies were recorded, and the gullies' boundaries and points were specified, and the gullies' distribution layer of the watershed was prepared for the first time in the Ilam watershed. The study of the Collinearity between the independent variables on gullies' erosion increased the accuracy of the model's prediction. The response curves to the sensitivity of gullies' erosion extracted from maximum entropy introduced the research method in terms of science, quantitative, mathematical and statistical regularity, and in the Ilam watershed, the relationship and effect of the indicators or independent variables with the dependent variable of gullies' erosion and gullies' erosion threshold were explained. The results

[*] **Corresponding Author: s.asgari@areeo.ac.ir**

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.124]

of the classification of the gulley erosion susceptibility zoning map using the maximum entropy model showed that the percentage of the area of the gulley erosion susceptibility classes of very high, high, medium, low and very low in the Ilam basin are 12.98, 24.05, 31.90, 11.58 and 19.49, respectively. Also, the percentage of gulley erosion occurrence in the very high, high, medium, low and very low sensitivity classes in the Ilam basin are 86.02, 12.16, 1.22, 0.30 and 0.30, respectively. In other words, the very high and high sensitivity classes have accounted for more than 37 percent in the Ilam basin in total. In general, based on the maximum entropy model, more than 80 percent of gulley erosion occurrences are in the two sensitivity classes of very high to high.

4- Discussion & Conclusions

The results of model validation from the ROC system performance characteristic curve and the area under the AUC graph obtained from the calibration points (30%) showed that the model had an acceptable percentage of the area under the curve, which indicates the high performance of this model in the region. The entropy model with 90.9% of the area under the graph has the best performance for gulley erosion sensitivity zoning, which is consistent with the research of Saeedian et al. (2023). The results of the response curve analysis of gulley erosion sensitivity thresholds and the Jackknife test diagram showed that topographic factors, watercourse density, lithology, land use, climate type, vegetation cover and precipitation have the greatest impact on gulley erosion. Research proposal: This model can be used in other regions for gulley erosion zoning, and the implementation proposal is to plan control and protection measures according to the influential factors introduced in this research in gulley erosion.

Key Words: Ilam Watershed, Zoning, Gully Erosion, Maximum Entropy Model

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.124]

Cite this article: Asgari, S., Shirani , K. (2026). Zoning and assessing the sensitivity of gully erosion using the maximum entropy model in the Ilam watershed. *Journal of Environmental Erosion Research. 2026; 15 (4):124-148.* http//doi.org/10.61186/jeer.15.4.124

© The Author(s).
DOI: http//doi.org/10.61186/jeer.15.4.124
Published by Hormozgan University Press.
URL: http://magazine.hormozgan.ac.ir

پهنه بندی و ارزیابی حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی در آبخیز ایلام

شمس اله عسگری*: استادیار تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان ایلام، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی،تهران، ایران.

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

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخچهٔ مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۴)

DOI: http//doi.org/10.61186/jeer.15.4.124

چکیده

فرسایش خندقی تاثیر زیادی درتخریب اراضی دارد و یکی از مشکلات آبخیز ایلام تخریب اراضی آن بر اثر فرسایش خندقی است بنابراین ارزیابی و پهنه بندی فرسایش خندقی در دراین حوضه ضروری است. در این پژوهش جهت پهنه‌بندی حساسیت‌پذیری فرسایش خندقی از مدل حداکثر آنتروپی استفاده شده است. با استفاده از تصاویر گوگل ارث و همچنین بازدیدهای میدانی ۳۳۱ نقطه خندقی شناسایی و ثبت شد و نقشه پراکنش خندق تهیه شد. داده‌های مکانی پراکنش فرسایش خندقی در قالب دو دسته تصادفی آموزشی (۷۰ درصد) و آزمایشی (۳۰ درصد) تقسیم شدند. ۲۳عامل مؤثر بر وقوع فرسایش خندقی در تحلیل مدل مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج طبقه‌بندی نقشه پهنه‌بندی حساسیت به فرسایش خندقی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی نشان داد که درصد مساحت طبقات حساسیت فرسایش خندقی خیلی‌زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی‌کم در حوضه ایلام به‌ترتیب ۱۲/۹۸، ۲۴/۰۵، ۳۱/۹۰، ۱۱/۵۸ و ۱۹/۴۹، می‌باشد. همچنین درصد رخداد فرسایش خندقی در طبقات حساسیت خیلی‌زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی‌کم در حوضه ایلام به‌ترتیب ۸۶/۰۲، ۱۲/۱۶، ۱/۲۲، ۰/۳۰ و ۰/۳۰می‌باشد. به‌عبارت دیگر طبقات حساسیت خیلی زیاد و زیاد مجموعاً در حوضه ایلام بیش از ۳۷ درصد، به خود اختصاص داده است. منحنی پاسخ آستانه های حساسیت فرسایش خندقی و نمودار آزمون جک نایف برای مهم‌ترین شاخص‌های تاثیر گذار بر فرسایش خندقی تهیه، ترسیم و تحلیل شد که نتایج تحلیل‌ها نشان داد که عوامل توپوگرافی، تراکم‌آبراهه، لیتولوژی، کاربری‌اراضی، نوع اقلیم، پوشش‌گیاهی و بارش بیش‌ترین تاثیر بر فرسایش خندقی دارند. محدودیت‌های این تحقیق کمبود داده و اطلاعات از حوزه آبخیز و دشواری‌های جمع‌آوری داده و اطلاعات صحرایی بود و۴ سال طول کشید تا پروژه منبع این مقاله انجام شد. از لحاظ تحقیقاتی استفاده از روش تحقیق علمی این مقاله در دیگر مناطق جهت ارزیابی آستانه شاخص‌های موثر در فرسایش خندقی و پهنه‌بندی فرسایش خندقی پیشنهاد می شود. از لحاظ کاربردی و اجرایی، نقشه پراکنش وجانمایی خندقها، نقشه پهنه‌بندی فرسایش خندقی و اولویت‌بندی عوامل راهبردی برای برنامه‌ریزی و اقدام حفاظتی، اجرایی در آبخیز ایلام پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی: حوزه آبخیز ایلام، پهنه‌بندی، فرسایش خندقی، مدل حداکثر آنتروپی

* نویسندهٔ مسئول: s.asgari@areeo.ac.ir

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.124]

۱ـ مقدمه

فرسایش خندقی یک پدیده‌ی آستانه‌ای است که عامل‌های پرشماری در بروز و تشدید آن نقش دارند. عامل‌های طبیعی، نتیجه‌ی تأثیر سال‌های طولانی است که به صورت تدریجی اثرگذار بوده‌اند ولی عامل‌های انسانی به صورت تشدیدی سبب بروز این پدیده شده‌اند (Kou et al, 2016). فرسایش خندقی شدیدترین نوع فرسایش آبی است که از عوامل اصلی تخریب سرزمین محسوب میشود (Poesen et al, 2003) فرآیندهای مانند فشردگی، از دست دادن مواد مغذی و از دست دادن ظرفیت ذخیره سازی آب، منجر به فرسایش خاک میشود (Panagos et al, 2018). ارزیابی گسترش فرسایش خندقی علاوه بر مطالعات میدانی نیاز به تحلیل و به کارگیری مدل های کمی دارد تا صحت و دقت نتایج پهنه‌بندی را در حد بالایی ارتقاء دهد، لذا مدل‌های مختلفی در مورد پهنه‌بندی ارائه شده است (Roy and Saha, 2019). تاکنون تحقیقات متعددی در رابطه موضوع پهنه بندی و ارزیابی حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی در مناطق مختلف انجام شده است و مدل حداکثر آنتروپی یکی از مدل‌هایی است که توسط پژوهشگران بعنوان مدلی با کارایی بسیارخوب در بررسی فرسایش خندقی معرفی شده است. Shirani و Zakerinejad (۲۰۲۰) با استفاده از ۲۰ عامل موثر ژئومورفومتریک و محیطی و بکارگیری مدل حداکثر آنتروپی در منطقه جنوب استان اصفهان به مدل‌سازی حساسیت به فرسایش خندقی پرداختند. در این پژوهش مشخص شد که عوامل ژئومورفومتریک مستخرج از دادهای رقومی ارتفاع (DEM) نقش به سزایی در رخداد و حساسیت پذیری نسبت به فرسایش خندقی دارند. همچنین مدل حداکثر آنتروپی با کارایی بسیار خوب امکان پهنه‌بندی مناطق نسبت به فرسایش خندقی را دارا می باشد.Mxadadi و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی خندق با استفاده از مدل آنتروپی پرداختند که بر اساس آزمون جک نایف به ترتیب متغیرهای ارتفاع، متوسط بارندگی سالانه، بافت خاک، تراکم زهکشی، زمین‌شناسی، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه بیشترین تأثیر را در فرسایش خندقی داشتند. منحنی ROC نشان دهنده دقت ۹۵ درصدی در مرحله اعتبار سنجی مدل است. بر اساس این مدل بیش از ۱۵ درصد حوضه (۸۴۴۵٫۸۳ هکتار) دارای حساسیت زیاد و خیلی زیاد به فرسایش خندقی است. Teimurian و همکاران(۲۰۲۲) در تحقیقی که در ارتباط با فرسایش خندقی با استفاده از مدل آنتروپی در استان فارس انجام دادند نتیجه گرفتند که سطح زیر منحنیِ ویژگیِ عاملِ گیرنده بیش از ۹۰٪ به‌دست آمد، که نشان می‌دهد مدل به‌خوبی توانست فرسایش خندقی را با داده ها ارزیابی کند. برپایه‌ی یافته‌های آزمون جک‌نایف، متغیرهای احتمال روی‌داد افقR ، عمق خاک، درصد قطعه‌های درشت‌دانه، پی‌اچ در محلول کلرید پتاسیم، و درصد ذره‌های لای بیش‌ترین تأثیر را در مدل‌سازی فرسایش خندقی داشت. Zakerinejad و Alvandi (۲۰۲۳) درتحقیقی برای اجرای مدل حداکثر آنتروپی (Maxent) از ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش مدل و ۳۰ درصد برای آزمون مدل استفاده نمودند. در این تحقیق با استفاده از آزمون جک نایف میزان تأثیر هر یک از شاخص‌ها بر دیگر شاخص‌ها مشخص شده که در نهایت تأثیرگذارترین شاخص‌ها معرفی شد. جهت اعتبار سنجی مدل جهت پهنه‌بندی فرسایش خندقی منطقه موردمطالعه با استفاده از منحنی (ROC) و مساحت زیر منحنی (AUC) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که شاخص ارتفاع وکاربری اراضی پوشش گیاهی و عمق آبراهه تأثیرگذارترین شاخص‌ها در ایجاد فرسایش خندقی است و میزان AUC=0/947در سطح عالی است. Khazaei و همکاران (۲۰۲۴) به منظور تعیین آستانه‌های عوامل موثر در رخداد فرسایش خندقی و ارزیابی کارآمدی مدل‌های مورد بررسی از آزمون جک‌نایف

* نویسندهٔ مسئول: s.asgari@areeo.ac.ir

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.124]

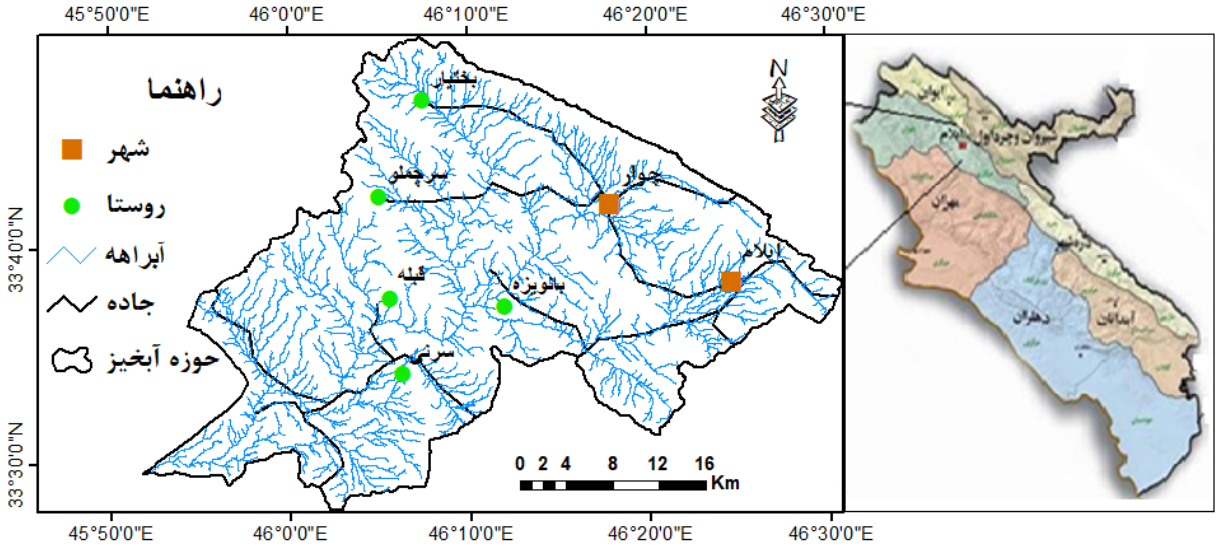
استفاده شد .نتایج نشان داد که مدل آنتروپی با سطح زیر منحنی ۰/۸۸ دارای دقت پیش‌بینی مناسبی در تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی بوده است و کاربری اراضی و زمین‌شناسی بیشترین اهمیت را در رخداد فرسایش خندقی به ترتیب با سهم مشارکت ۲۴ و ۱۸ درصد داشته‌اند. این پژوهش در آبخیز ایلام به دنبال تعیین مهمترین آستانه‌ها، جهت شناسایی مناطق مستعد فرسایش خندقی می باشد. بنابراین آگاهی از مناطق مستعد فرسایش می تواند از ابزارهای کلیدی در جهت مدیریت مناسب و بهره‌برداری صحیح از اراضی مد نظر باشد. حوضه ایلام واقع در جنوب غرب استان ایلام که شهر ایلام و شهر چوار در شمال این حوضه قرار گرفته اند، به دلیل ویژگی های اقلیمی، توپوگرافیک و سنگ‌شناسی حساسیت بالایی نسبت به فرسایش خندقی دارا است. در این منطقه فرسایش خندقی فعال بوده و گاهی طول خندقها به بیش از ۲۰۰ متر میرسد. با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه از نظر ساختاری در منطقه زمینشناسی زاگرس چین خورده با مورفولوژی خاص قرار دارد. لذا ویژگی‌ها یا شاخصهای توپوگرافیک ناشی از ساختار زمین شناسی در کنار سایر فاکتورهای ذاتی از قبیل سنگ‌شناسی، پوشش گیاهی و اقلیم نقش مؤثری در رخداد فرسایش خندقی دارد. همچنین با توجه به حساسیت بالای لایه های سطحی خاک و در بعضی بخشها لایه های سطحی و عمقی خاک، رواناب باعث ایجاد شیار و در مراحل بعدی خندق در منطقه مورد مطالعه میشود. از آنجایی که تأثیر فرسایش خندقی در تخریب زمین در منطقه مورد مطالعه نسبت به انواع دیگر فرسایش آبی چندین برابر است، لذا با توجه به مطالب اشاره شده هدف این پژوهش اجرای مدل حداکثر آنتروپی به منظور تعیین آستانه فرسایش خندقی عوامل و شاخص های تاثیر گذار، تهیه نقشه پهنه بندی فرسایش خندقی و ارزیابی و اعتبارسنجی نقشه‌های پیش‌بینی حساسیت نسبت به فرسایش خندقی به منظور افزایش صحت نقشه‌های پیش‌بینی نسبت به فرسایش خندقی است.

۲ـ منطقهٔ مورد مطالعه

آبخیز ایلام با کد تماب۲۱۱۹ در شمال‌غرب استان ایلام موقعیت جغرافیائی از ´۲۷ °۳۳ تا ´۴۹ °۳۳ عرض شمالی و ´۵۲ °۴۵ تا ´۳۰ °۴۶ درجه طول شرقی با مساحت ۱۱۹۱کیلومتر مربع واقع شده است. ارتفاع حداقل و حداکثر آبخیز به ترتیب۲۰۰ و۲۶۰۰ متر از سطح دریا می‌باشد. بر اساس دوره آماری ۳۰ ساله متوسط سالیانه بارندگی آبخیز۶۳۰ میلی‌متر و متوسط حداکثر وحداقل سالیانه دمای منطقه به ترتیب ۲۲/۱ و ۱۰/۲ درجه سانتی‌گراد است. از شمال به جنوب از اقلیم نیمه مرطوب سرد و معتدل مدیترانه‌ای تا اقلیم خشک بیابانی معتدل برخوردار است. عمده گستردگی سازندهای زمین‌شناسی شامل آسماری، ایلام، پابده، گورپی، آغاجاری وگچساران با سنگ‌شناسی آهک، شیل، مارن، ماسه‌سنگ، انیدریت است و بیشتر آبخیز از زمین‌های تپه‌ماهوری، تیغ‌های‌فرسایشی و گیاهان پراکنده تشکیل شده است و تنها در نزدیکی مرز، قسمت‌هایی از دشت دارای شیب ملایمی می‌باشد. شکل ۱ موقعیت آبخیز را در نقشه ایران و استان ایلام نشان می‌دهد.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.124]



شکل۱: نقشه موقعیت حوضه آبخیز ایلام

۳ـ مواد و روش

۳ـ۱ـ داده‌ها و مراحل اجرای پژوهش

درارتباط با انتخاب عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی روش خاصی وجود ندارد و معمولا بر اساس روش تحقیق محققان قبلی شاخص ها و عوامل موثر در فرسایش خندقی انتخاب می شود. بنابراین براساس روش کار محققان قبلی به منظور تهیه و آماده سازی نقشه های عوامل موثر و نقشه پراکنش رخداد فرسایش خندقی از نقشه‌های موضوعی پایه و تصاویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه به شرح ذیل استفاده گردید:

ازنقشه زمین‌شناسی (مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰) سازمان زمین شناسی کشور برای استخراج نقشه عامل موثر واحدهای سنگی یا سنگ شناسی، از نقشه کاربری اراضی (مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰) طرح سیمای فرسایش پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری و تدقیق با تصاویر ماهواره ایSENTINEL2 برای استخراج نقشه کاربری اراضی در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ استفاده شد. از نقشه خاک‌شناسی موسسه خاک و آب کشور برای تهیه نقشه نوع خاک استفاده شد. از نقشه اقلیمی دومارتن برای تهیه نقشه نوع اقلیم و نقشه خطوط هم باران از تحلیل آماری داده‌های دراز مدت بارش ایستگاه های هواشناسی شهر ایلام و شهر ایوان و شهر چوار و ایستگاه های باران سنجی منطقه با طول دوره آماری ۳۰ساله به روش درون یابی کریجینگ تهیه شد. ازتصویر ماهواره ای SENTINEL2 مربوط به سال ۲۰۲۰ میانگین رویشی چهار ماه خرداد، تیر، مرداد و شهریور نقشه شاخص پوشش گیاهی تفاضلی بهنجارشده[1] با دقت مکانی ۱۲/۵متر تهیه شد. داده‌های رقومی ارتفاع[2] حاصل از سنجنده PALSAR ماهواره ALOS ژاپن با دقت مکانی ۱۲/۵ متر به منظور استخراج نقشه‌های هیدروژئومورفومتری (۱۷ متغیر مستقل مورفومتریک) با دقت مکانی ۲۵ متر تهیه شد. شاخص‌های انحنای کلی[3]، انحنای دامنه یا طولی[4]، شاخص انحنای نیم‌رخ[5]، شاخص تحدب[6]، شاخص طبقه‌بندی انحنا[7]، شاخص فاصله

1-normalized difference vegetation index (NDVI)
2-Digital Elevation Model (DEM)
3-General curvature
4-Plan curvature
5-Profile curvature
6-Convergence index
7-Curvature classification index

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.61186/jeer.15.4.124]

عمودی از شبکه آبراهه[1]، مساحت آبخیز[2]، شاخص توان آبراهه[3]، فاکتور طول – شیب آبراهه[4]، شاخص رطوبت پستی‌بلندی[5]، بافت سطحی زمین[6]، ارتفاع[7]، درجه شیب[8] (t)، جهت شیب[9] و شاخص تحلیل سایه و روشن[10]، تراکم زه‌کشی[11] و فاصله از شبکه زه‌کشی[12] برای پهنه بندی استفاده شد. باید توجه داشت که نقشه‌های نامبرده موجود در مقیاس‌های گوناگون به‌عنوان مبنای اطلاعات اولیه برای شناخت منطقه، استفاده شدند.سپس بر اساس اطلاعات تصاویر ماهواره ای SENTINEL2 با دقت مکانی ۱۲/۵متر مقیاس اطلاعاتی آنها در حد مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تدقیق و یکسان شد. به عبارت دیگر داده های مکانی که در مقیاس مبنای کوچکتر (۱:۲۵۰۰۰۰ مثل کاربری اراضی) بودند با داده های ماهواره ای SENTINEL2 تا مقیاس بزرگتر (۱:۱۰۰۰۰۰) تدقیق شدند. تصاویر گوگل ارث (Google Earth) به منظور تدقیق نقشه های عوامل موثر و همچنین شناسایی، تکمیل و تعیین محدوده های رخداد فرسایش خندقی، در ادامه برای آماده سازی و ورود داده های مکانی برای اجرای مدل ها، کلیه نقشه های مورد نیاز اعم از نقشه های عامل موثر در محیط ArcGIS®10.8 در قالب فرمت رستری با اندازه سلولی مشابه و یکسان ۲۵ متر نمونه برداری مجدد (Resample) گردیدند. نرم‌افزارهای مورد استفاده شامل ArcGIS@10.8 برای ایجاد و مدیریت پایگاه اطلاعاتی مکانی عوامل موثر، تحلیل و اجرای مدل و نقشه‌های خروجی، برای تهیه لایه‌های اطلاعاتی هیدروژئومورفومتریک از SAGA GIS@4.9، برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای SENTINEL2، از ENVI@5.3، برای مدیریت و محاسبات مدل MaxEnt و پایگاه توصیفی لایه‌های اطلاعاتی از EXCEL@2019 و ویژگی عملگر گیرنده (ROC) از SPSS@26 استفاده شد.

بررسی رابطه هم خطی بین متغیرهای مستقل

تست هم خطی بین پارامترها به وسیله دو شاخص ضریب تحمل (tolerance) و عامل تورم واریانس (factor inflation variance) انجام می شود. اگر مقدار ضریب تحمل کمتر یا مساوی ۰/۱ باشد و مقدار تورم واریانس بیشتر یا مساوی پنج باشد نشانگر هم خطی پارامترها است(پاندی و همکاران ،۲۰۱۴).

مدل حداکثر آنتروپی(MaxEnt)

آنتروپی روشی جهت اندازه‌گیری یک سیستم بی‌نظم، ناپایدار، نامتعادل و دارای عدم قطعیت است. مقدار انتروپی یک سیستم با درجه بی‌نظمی آن سیستم، مرتبط است. اندازهگیری مقدار انتروپی ابتدا توسط بولتزمن ارائه شد که تحت عنوان اصل بولتزمن برای توصیف وضعیت ترمودینامیکی سیستم به کار گرفته شد. شانون[13] (۱۹۴۸) اصل بولتزمن را اصلاح و مدل انتروپی را در نظریه اطلاعات پایهگذاری کرد. آنتروپی قادر به اندازه‌گیری عدم قطعیت منابع اطلاعات است (Alencar et al ,۲۰۲۲) این شاخص نشان‌دهنده میزان بی‌نظمی در محیط است (Bernini et al ,۲۰۲۱)، تهیه

1-Vertical distance to channel network index
2-catchment area
3-Stream power Index
4-Slope-Length
5-Topographic wetness Index
6-Surface texture
7-Altitude
8-Slope gradien
9-Slope aspect
10- Analytical hillshading
11-Drainage density
12-Distance to drainage
13-Shanon

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.61186/jeer.15.4.124]

نقشه حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از شاخص انتروپی امکان محاسبه وزن مربوط به هر یک از متغیرهای ورودی را فراهم می‌کند (Azareh، et al, ۲۰۱۹) مقدار وزن هر یک از عوامل به‌طور جداگانه تحت عنوان شـــاخص انتروپی بیان می‌گردد، درنتیجه با اســتفاده از این شـــاخص، می توان عواملی که بیشترین تأثیر را در رخداد گالی یا هر پدیده‌ای دارند، شـــناسایی کرد. به‌منظور تعیین وزن مربوط به هر یک از عوامل مؤثر از روابط ۱ تا ۵ استفاده شد(Conforti, et al, 2024).

$$W_f = I_C * FR$$ رابطه ۱)

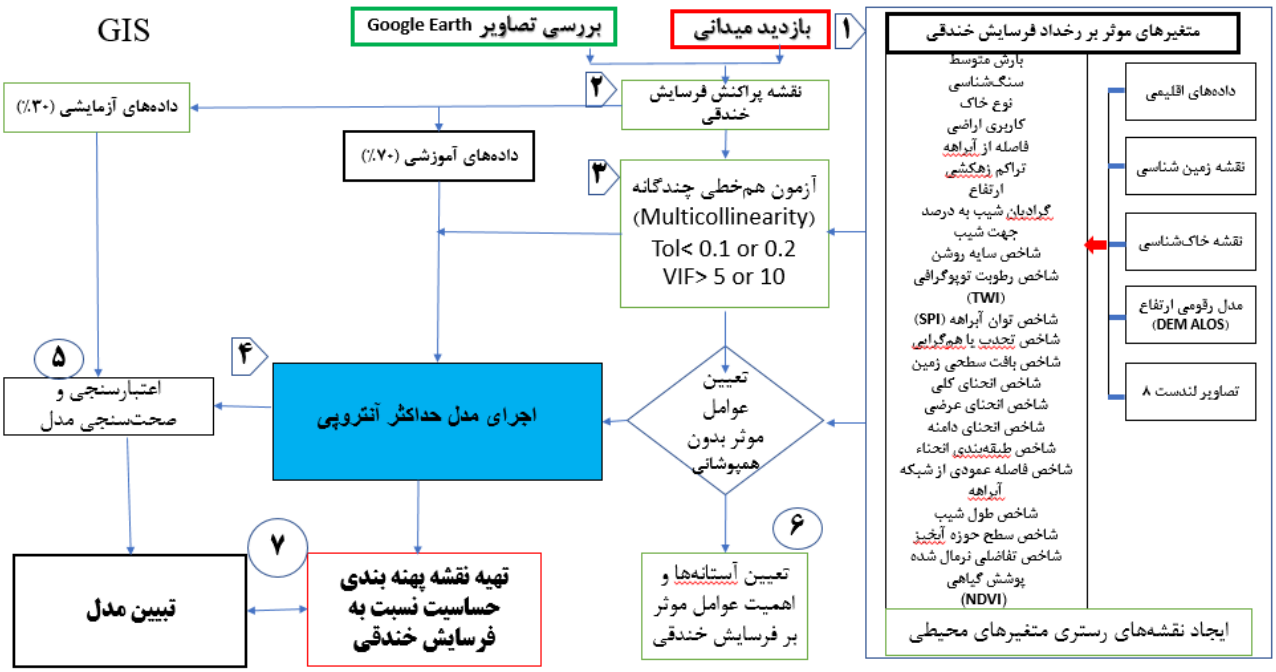
$$I_c = \frac{Env_{max} - En}{Env_{max}} \quad c = 1, \dots n$$ رابطه ۲)

$$En_{max} = log_2 N_c, N_c - NClass$$ رابطه ۳)

$$P_d = \frac{FR}{\sum_c^{Nc} = 1 FR}$$ رابطه ۴)

$$FR = \frac{A_l}{A_{cl}}$$ رابطه ۵)

که در آن A_l درصد پیکسل‌های خندق در هر طبقه از عوامل مؤثر، A_{cl} درصد پیکسل‌های (مساحت) مربوط به هر طبقه از عوامل مؤثر، FR: نسبت فراوانی خندق هر طبقه از عوامل مؤثر، P_d چگالی احتمال، En_vمقدار انتروپی، En_{max} : حداکثر انتروپی، I_c: ضـــریب اطلاعات و W: وزن نهایی هر عامل است. بطورکلی فلوچارت روش تحقیق در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل۲: فلوچارت مراحل تحقیق

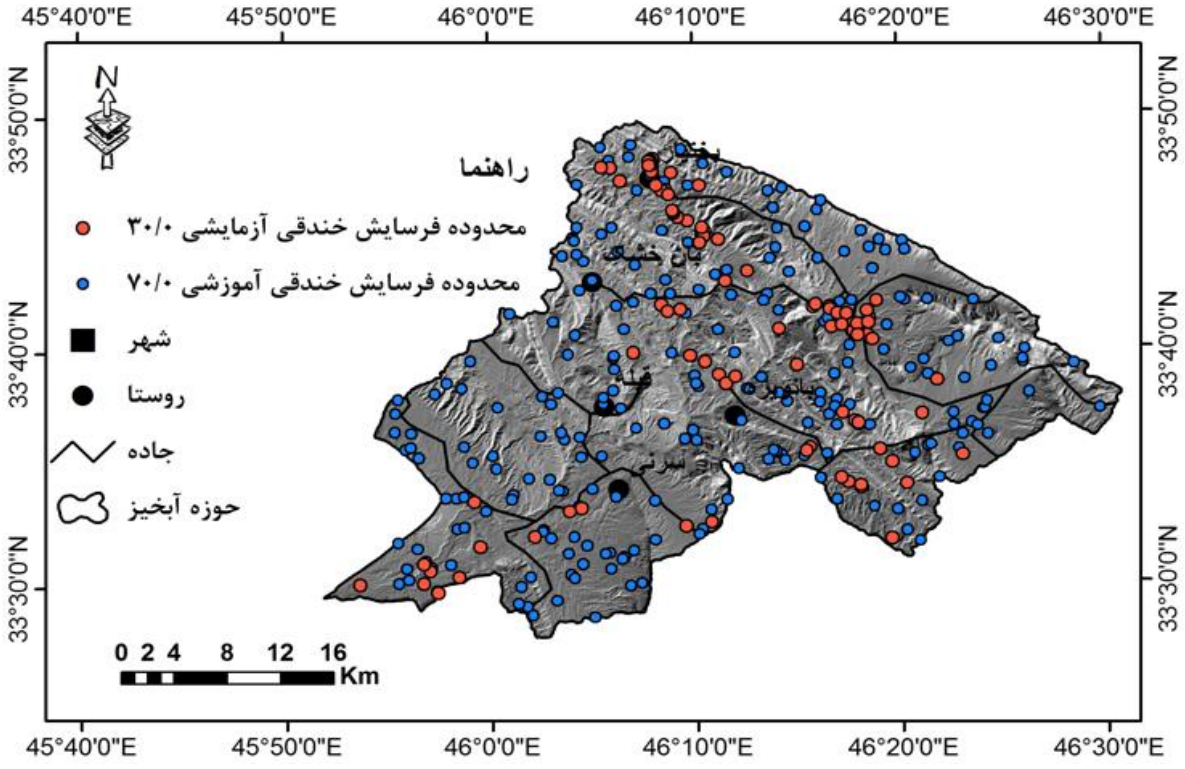
۴-یافته‌ها

تهیه لایه پراکنش خندق

در این پژوهش پس ازپیمایش و بررســی‌های میدانی با اســتفاده از دســتگاه GPS و تفسیر پردازش تصاویر ماهواره‌ای و Google Earth تعداد ۳۳۱ خندق شـــناسایی و ثبت شدند. انواع خندق‌های مشاهده شده در این منطقه شامل فرم‌های،

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.61186/jeer.15.4.124]

پنجه‌ای، پیازی، خطی و جبهه‌ای هستند. به ترتیب تعداد ۱۶۶ خندق پنجه‌ای معادل ۱۵/ ۵۰ درصد، خندق خطی به تعداد ۷۸ مورد معادل ۲۳/۵۶درصد، خندق پیازی ۵۳ مورد معادل ۱۶/۰۱درصد و خندق جبهه‌ای ۳۴مورد معادل۱۰/۲۷درصد می باشند که غالب خندق‌های منطقه مورد مطالعه از نوع خندق‌های پنجه‌ای می‌باشند. طول بلند ترین خندق ۱۷۴۲ متر است که از نوع پنجه‌ای می‌باشد، و طول کوتاه ترین خندق ۲۸ متر می‌باشد محدوده‌ها و نقاط خندقی تدقیق داده شد و لایه پراکنش خندقی حوضه آبخیربرای اولین بار در این حوضه تهیه شد برای آماده‌سازی ورودی داده‌ها به مدل‌ها، لایه پلی‌گونی پراکنش خندقی با دستور Feature to point به فایل نقطه‌ای تبدیل گردید. فایل نقطه‌ای مرحله قبل به دو دسته آموزشی یا کالیبراسیون و آزمایشی یا اعتبارسنجی به نسبت ۷۰ و ۳۰ درصد تقسیم شد که در شکل ۳ نتایج بصورت لایه پراکنش داده‌های آموزشی و آزمایشی نشان داده شده است.



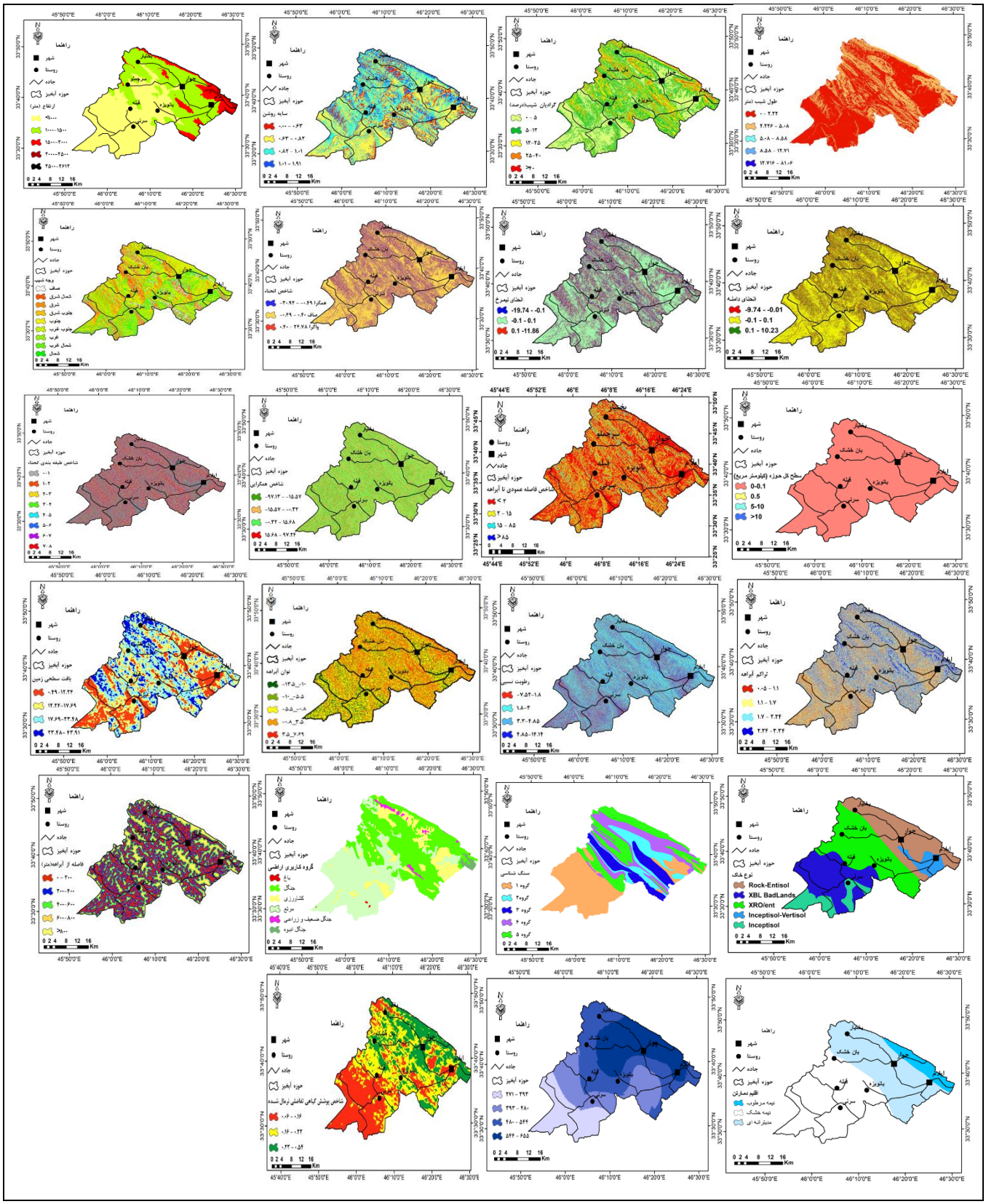
شکل۳: نقشه پراکنش فرسایش خندقی آبخیز ایلام

تهیه لایه‌های شاخص‌های موثر بر حساسیت فرسایش خندقی

براساس روش تحقیق و با استفاده منابع و داده‌ها و نرم افزارهایی که در روش تحقیق ارائه شد ۲۳ لایه تهیه و کلاس بندی، وزن‌دهی و رستری شده تا در مدل حداکثر آنتروپی منحنی پاسخ به حساسیت فرسایش خندقی استخراج شود لایه‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.124]



شکل ۴: نقشه‌های طبقه‌بندی عامل‌های موثر بر رخداد فرسایش خندقی

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.124]

نتایج بررسی هم‌خطی بین عوامل موثر (متغیرهای مستقل) بر فرسایش خندقی

در تهیه نقشه حساسیت به فرسایش خندقی، انجام تست هم خطی بین متغیرهای انتخابی دارای اهمیت است Arabameri (et al. 2019). بنابراین بعد از تهیه لایه‌ها تست هم‌خطی انجام شد و از میان ۲۳ متغیر انتخابی، ۲ متغیر تراکم آبراهه و شاخص رطوبت توپوگرافی در جدول ۲ به علت پایین آمدن دقت پیش بینی مدل حذف شدند و ۲۱ پارامتر دیگر که دارای ضریب تحمل بیش از ۰/۱ و عامل تورم واریانس کمتر از ۵ دارند، در جریان مدل‌سازی قرار گرفتند.

جدول۲: بررسی هم‌خطی عوامل موثر بر وقوع فرسایش خندقی

Coefficients[a]		
	Collinearity Statistics	Model
VIF	Tolerance	
		(Constant)
1.16	0.862	سایه روشن
1.69	0.592	وجه شیب
3.141	0.318	شاخص هم‌گرایی
1.528	0.654	انحناء
2.63	0.38	شاخص طبقه بندی انحناء
2.144	0.466	فاصله از آبراهه
1.615	0.619	نوع اقلیم
1.794	0.557	تراکم آبراهه
2.508	0.399	ارتفاع
1.694	0.59	کاربری اراضی
1.827	0.547	سنگ شناسی
3.428	0.292	طول شیب
1.755	0.57	شاخص پوشش گیاهی
2.053	0.487	انحنای دامنه
1.708	0.586	انحنای مقطع
2.795	0.358	بارش
4.36	0.229	گرادیان شیب
1.572	0.636	نوع خاک
7.606	**0.131**	شاخص توان آبراهه
1.689	0.592	با فت سطحی زمین
1.348	0.742	سطح زه‌کشی حوضه
7.644	**0.131**	شاخص رطوبت توپوگرافی
1.981	0.505	فاصله عمودی از شبکه آبراهه
a Dependent Variable: Gully		

نتایج آستانه‌های مهم‌ترین شاخص‌ها در تعیین مناطق حساس به فرسایش خندقی با استفاده از مدل Maxent

نتایج منحنی‌های پاسخ نشان می دهد که با افزایش ارتفاع به‌ترتیب تا ۱۵۰۰ متر میزان نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی افزایش یافته (نسبت مستقیم) اما از ارتفاع ۱۵۰۰متر نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی کاهش یافته و رابطه

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.124]

معکوس است. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و نقشه شاخص سایه روشن در ۴ طبقه از مقدار ۰/۰۰۵ تا ۱/۹۱ نشان داد که میزان شاخص سایه روشن که خود به اثر ترکیب ارتفاع با مورفومتری سطح زمین وابستگی پیدا می‌کند با نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی رابطه معکوس دارد. بررسی‌ها نشان داد که میان ارتفاع و مناطق مستعد فرسایش خندقی (از نظر کمی) رابطه معکوس برقرار می‌باشد. در این پژوهش با افزایش شیب تا ۱۵ درصد منطبق با رخساره ژئومورفولوژیک دشت‌سر تا قبل از رخساره کوهستان میزان رخداد فرسایش خندقی افزایش می‌یابد. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و عامل طول شیب به متر در ۵ طبقه بین صفر تا ۲۳۵ متر نشان می دهد که با افزایش طول شیب نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی کاسته شده است. این امر به‌دلیل عملکرد پارامترهای دیگر مورفومتریک در دامنه‌های طویل مانند استقرار پوشش گیاهی، جنس سازند و ... می‌تواند باشد. نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی به‌ترتیب در جهات شیبِ شمال، شمال غرب و شمال شرق دارای بیش‌ترین میزان می باشد که به‌دلیل رطوبت بیشتر و عمق بیشتر خاک در دامنه های شمالی است. و همچنین نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی در جهات شیبِ جنوب، صاف و جنوب شرق کم‌ترین میزان می‌باشد. میزان شاخص انحناء کلی با میزان نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی ابتدا افزایش خندق در (هم‌گرا به صاف) و سپس کاهش خندق در(صاف به واگرا) می‌یابد. بطورکلی نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقیِ طبقه هم‌گرا نسبت به طبقه واگراً بیش‌تر است.

نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و طبقات شاخص انحناء دامنه یا طولی در قالب سه طبقهِ هم‌گرا یا مقعر[1] (۹/۷۴- تا ۰/۱-)، صاف یا مسطح[2] (۰/۱- تا ۰/۱)، واگرا یا محدب[3] (۰/۱ تا ۱۰/۲۳) ارائه شده است. میزان شاخص انحناء دامنه یا طولی با میزان نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی ابتدا افزایش (هم‌گرا به صاف) و سپس کاهش (صاف به واگرا) می‌یابد. بطورکلی رابطه نسبت فراوانی و طبقات شاخص طبقه‌بندی انحناء معکوس است. به‌عبارت دیگر با افزایش شاخص طبقه‌بندی انحناء، نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی کاهش می‌یابد. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و طبقات شاخص هم‌گرایی در ۴ طبقه از ۱۷- تا ۱۷/۵ ارائه شده است. بطورکلی رابطه نسبت فراوانی و طبقات شاخص هم‌گرایی معکوس است. به‌عبارت دیگر با افزایش میزان شاخص هم‌گرایی، نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی کاهش می‌یابد. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و طبقات شاخص انحناء نیم‌رخ یا عرضی در قالب سه طبقهِ هم‌گرا یا مقعر (۱۱/۸۶ تا ۰/۱)، صاف یا مسطح (۰/۱ تا ۰/۱-)، واگرا یا محدب (۰/۱- تا ۱۹/۳-) ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است مقادیر منفی و مثبت طبقات انحناء نیم‌رخ یا عرضی در مقایسه با انحناء کلی و انحنای دامنه متضاد می‌باشد. میزان شاخص انحناء نیم‌رخ یا عرضی با میزان نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی ابتدا افزایش (واگرا به صاف) و سپس کاهش (صاف به هم‌گرا) می‌یابد. نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقیِ طبقه هم‌گرا نسبت به طبقه واگرا در آبخیز ایلام بیش‌تر است. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و طبقات شاخص فاصله قائم تا شبکه آبراهه در ۴ طبقه از ۰ تا ۸۵ متر ارائه شده است. میزان شاخص فاصله قائم تا شبکه آبراهه با نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی ابتدا از ۰ تا ۱۵ متر افزایش و سپس از ۱۵ متر به بالا، کاهش می‌یابد. بنابراین در این آبخیز با افزایش فاصله افقی و قائم از آبراهه‌ها نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی کاهش می‌یابد. پیرامون

6. concave
7. flat
8. convex

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.124]

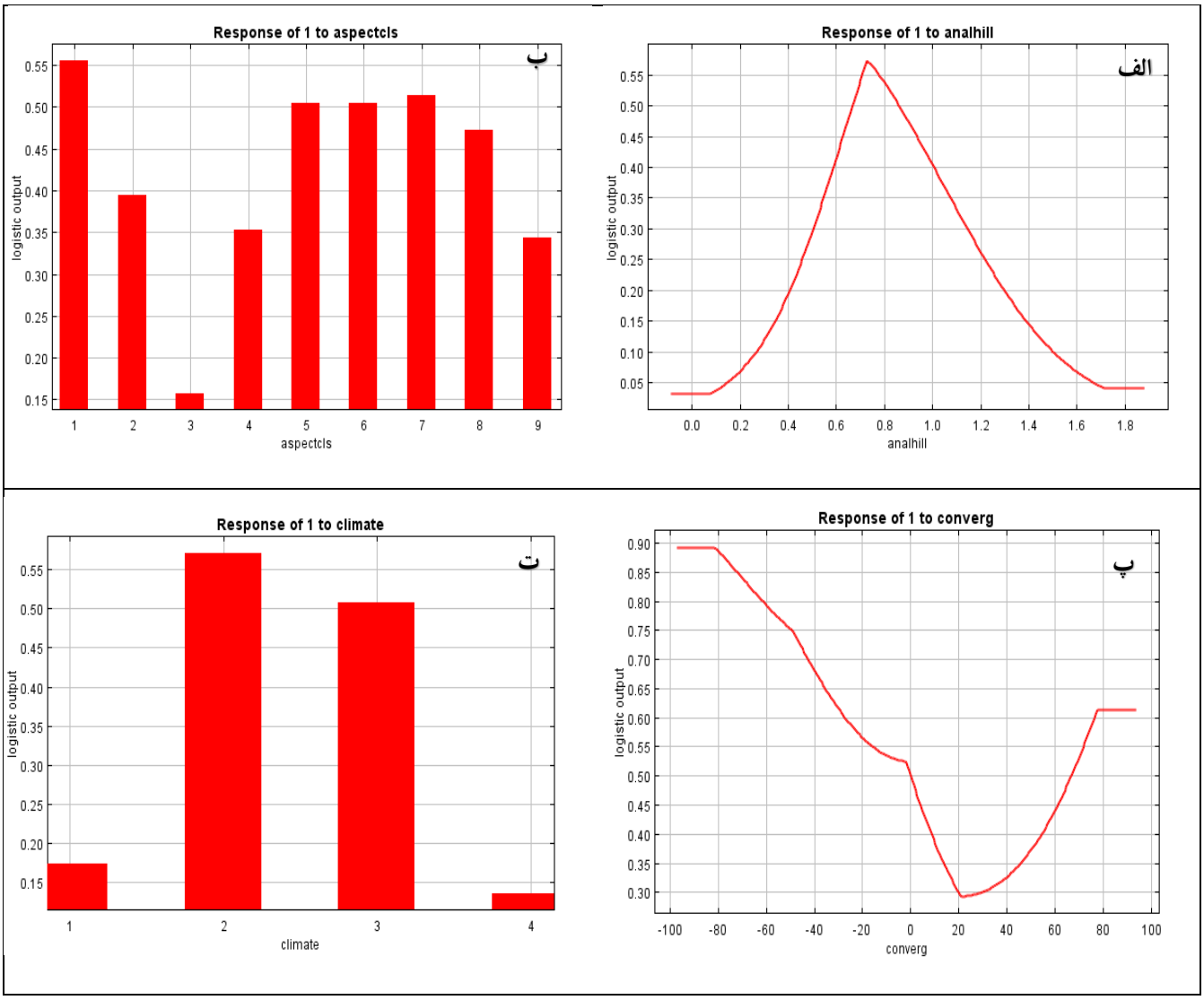
آبراهه‌ها و رودها به‌دلیل تمرکز جریان و جریان آب‌های سطحی عموماً شرایط مناسبی برای شکل‌گیری فرسایش خندقی است(Tadesual et al, 2023). نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و طبقات فاصله از آبراهه بر حسب متر در ۴ طبقه بین ۰ تا بیشتر از ۵۰۰ متر ارائه شده است. میزان فاصله از آبراهه با نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی رابطه معکوس دارد. به‌عبارت دیگر با افزایش فاصله از آبراهه، میزان نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی کاهش می‌یابد. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و طبقات شاخص سطح زه‌کشی حوزه آبخیز در ۴ طبقه از ۰/۲۱ کیلومتر تا ۵۵ کیلومتر ارائه شده است. بطورکلی رابطه نسبت فراوانی و طبقات شاخص سطح زه‌کشی آبخیز مورد مطالعه مستقیم است. به‌عبارت دیگر با افزایش میزان شاخص سطح زه‌کشی آبخیز، نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی نیز افزایش می‌یابد. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و طبقات شاخص بافت سطحی زمین در ۴ طبقه از ۱۲/۲۵ تا ۲۳/۵ ارائه شده است. میزان شاخص بافت سطحی زمین با نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی رابطه مستقیم دارد. به‌عبارت دیگر با افزایش بافت سطحی زمین، میزان نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی نیز افزایش می‌یابد. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و طبقات شاخص توان آبراهه در ۵ طبقه از ۱۳/۵- تا ۷/۶۹ ارائه شده است. بطورکلی نسبت فراوانی و شاخص توان آبراهه رابطه مستقیم دارد. به‌عبارت دیگر با افزایش میزان شاخص توان آبراهه، نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی نیز افزایش می‌یابد.

نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و طبقات شاخص رطوبت توپوگرافی در ۵ طبقه از ۷/۵۲- تا ۱۴/۱۴ ارائه شده است. بطورکلی نسبت فراوانی خندق و شاخص رطوبت توپوگرافی رابطه مستقیم دارد. به‌عبارت دیگر با افزایش میزان شاخص رطوبت توپوگرافی، نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی نیز افزایش می‌یابد. لازم به‌ذکر است این روند در آبخیز ایلام ابتدا از ۷/۵۲- تا ۱/۸ اندکی کاهش و سپس از ۱/۸ به بالا، افزایش می‌یابد. بر اساس پژوهش انجام شده نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و طبقات تراکم آبراهه برحسب کیلومتر بر کیلومتر مربع در ۵ طبقه از ۰ تا ۳۴ کیلومتر بر کیلومتر مربع ارائه شده است. بطورکلی نسبت فراوانی خندق و شاخص تراکم آبرهه رابطه مستقیم نشان داد. به‌عبارت دیگر با افزایش میزان تراکم آبرهه، نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی نیز افزایش می‌یابد. سازند زمین‌شناسی یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در رخداد فرسایش خندقی است. زیرا مقاومت واحدهای سنگی مختلف دارای درجات حساسیت گوناگونی نسبت به انواع فرسایش به‌ویژه فرسایش آبی در بروز این پدیده هستند. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و نوع واحد سنگی در ۵ گروه بر حسب ویژگی‌های سنگی ارائه شده است. میزان نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی انواع واحد سنگی به‌ترتیب از بیش‌ترین گروه یک شامل آغاجاری، گچساران، لهبری، کنگلومرای بختیاری و رسوبات جدید، گروه دوم سازندگورپی، گروه سوم سازند ایلام گروه چهارم سازند پابده و گروه پنجم سازند آسماری به کم‌ترین می باشد. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و کاربری زمین در ۶ گروه ارائه شده است. میزان نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی انواع کاربری زمین به‌ترتیب از بیش‌ترین به کم‌ترین مشخص شدکه به‌ترتیب کاربری کشاورزی و باغ، زمین بایر، جنگل و مرتع فقیر دارای رخداد فرسایش خندقی می‌باشند. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و انواع خاک در ۵ گروه ارائه شده است. فراوانی رخداد فرسایش خندقی خاک‌های نوع رخنمون سنگی اینسپتی‌سویل کم‌ترین و نوع مربوط به بدلند یا هزاردره بیش‌ترین را نشان می دهد. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و طبقات شاخص NDVI در ۳ طبقه کم‌تر از ۰/۰۶، ۰/۰۶

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

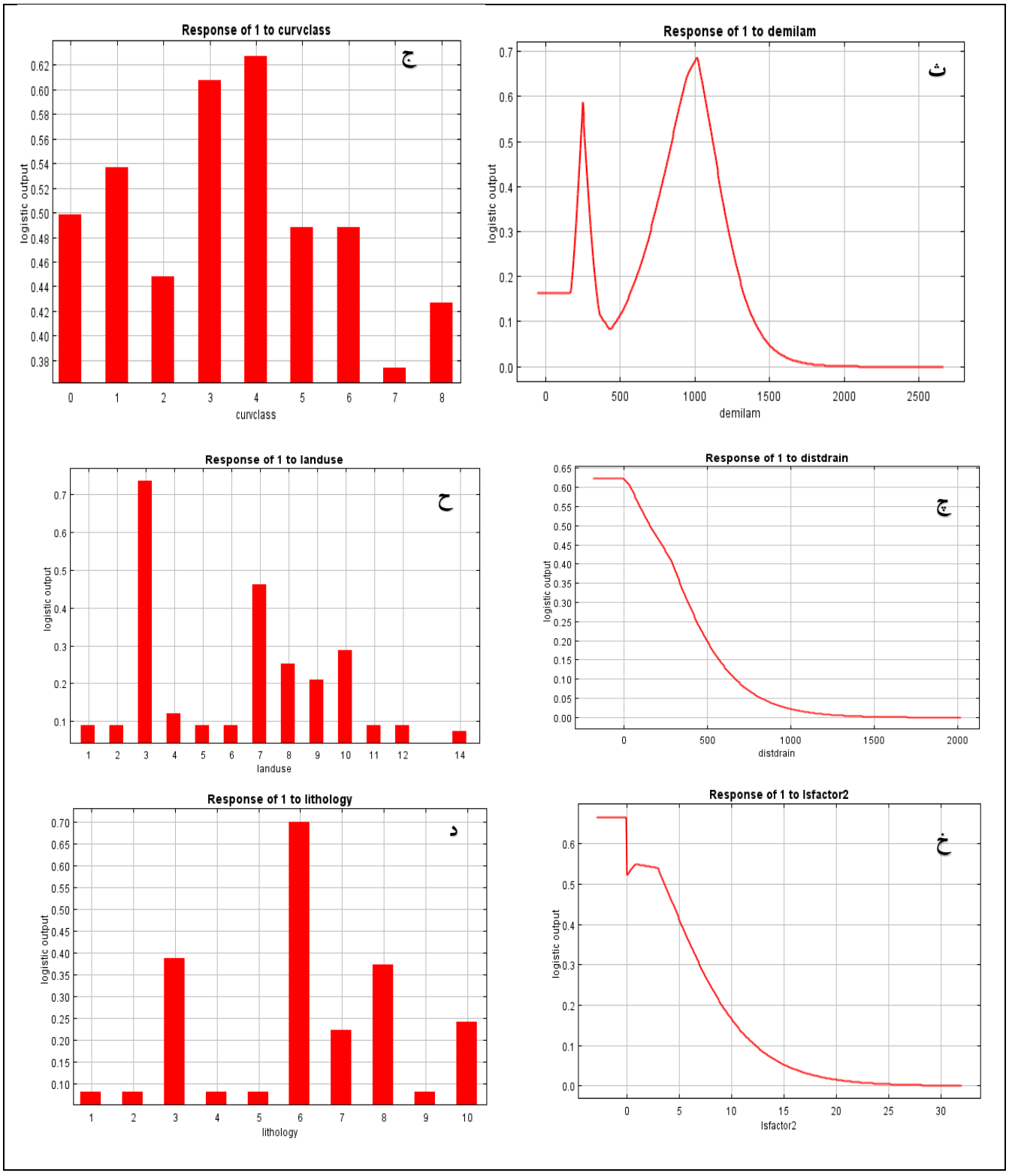
[DOI: 10.61186/jeer.15.4.124]

تا ۰/۱۱ و بیش‌تر از ۰/۱۱ ارائه شده است. میزان شاخص NDVI با نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی رابطه معکوس دارد. به‌عبارت دیگر با افزایش شاخص NDVI، میزان نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی کاهش می‌یابد. در این پژوهش با افزایش میزان بارش خصوصاً در مناطق اقلیمی فراخشک، خشک و نیمه خشک میزان رخداد فرسایش خندقی بیشتر می‌باشد. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و طبقات بارش در ۴ طبقه کم‌تر از ۳۰۰ میلی‌متر، ۳۰۰ تا ۳۵۰ میلی‌متر، ۳۵۰ تا ۳۷۰ میلی‌متر و بیش‌تر از ۳۷۰ میلی‌متر ارائه شده است. میزان بارش با نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی رابطه مستقیم دارد. به عبارت دیگر با افزایش بارش نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی نیز افزایش یافته است. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی و نوع اقلیم در۳ اقلیم نیمه خشک از جنوب و جنوب غرب به نیمه مرطوب و مدیترانه ای بطرف شمال آبخیز ارائه شده است. میزان نسبت فراوانی رخداد فرسایش خندقی به‌ترتیب اقلیم مدیترانه‌ای، نیمه‌خشک و نیمه‌مرطوب، دارای بیش‌ترین رخداد فرسایش خندقی می‌باشند که نتایج هر پارامتر بصورت منحنی های پاسخ به آستانه حساسیت فرسایش خندقی در شکل ۵ تا ۷ ارائه شده است.



[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

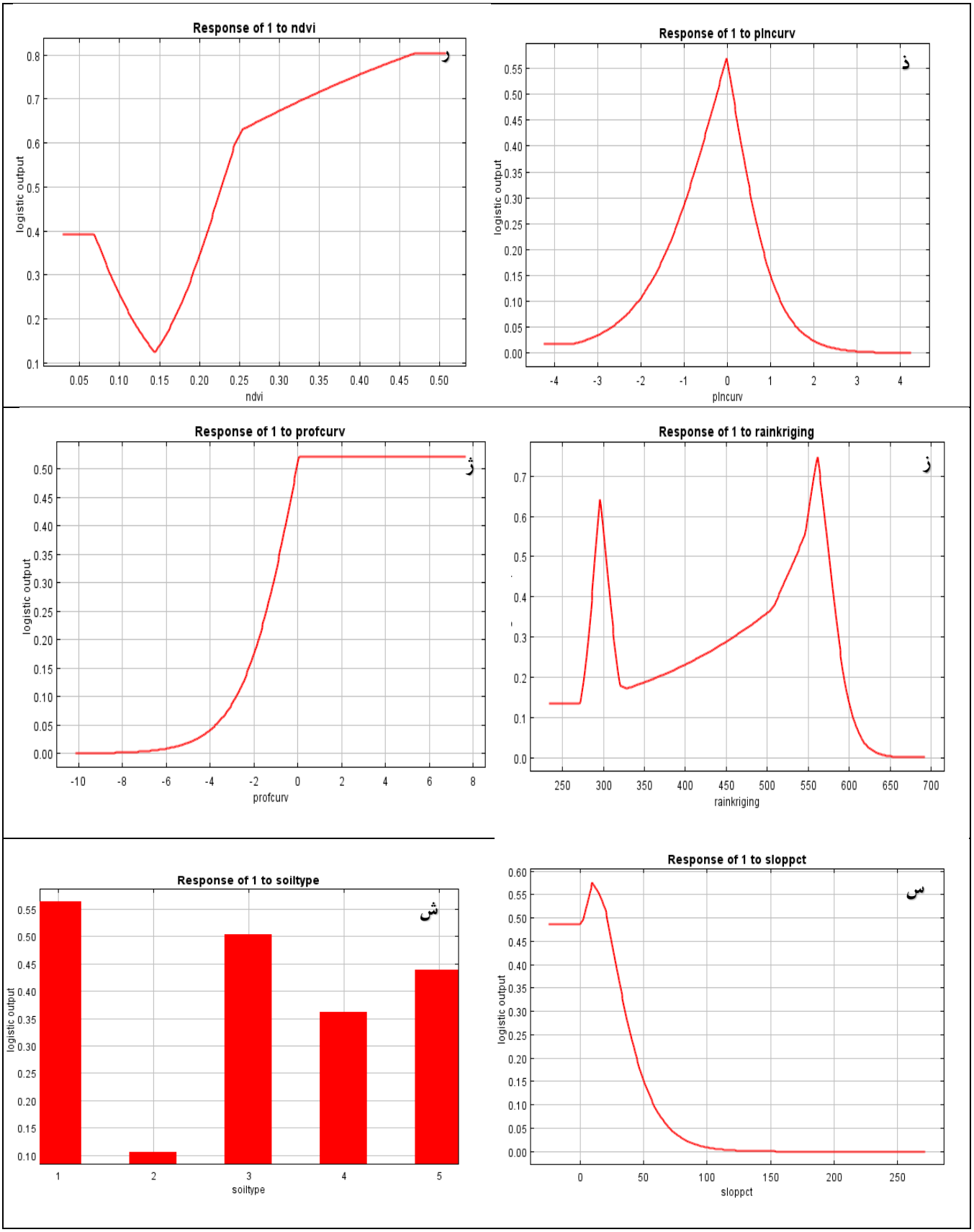
[DOI: 10.61186/jeer.15.4.124]



شکل ۵: منحنی پاسخ آستانه‌های حساسیت فرسایش خندقی الف: نمودار پاسخ شاخص سایه روشن ب: نمودار پاسخ شاخص جهت جغرافیایی پ: نمودار پاسخ شاخص تحدب ت: نمودار پاسخ شاخص اقلیم ث: نمودار پاسخ شاخص طبقه‌بندی انحنا ج: نمودار پاسخ شاخص اقلیم چ : نمودار پاسخ شاخص فاصله از آبراهه ح: نمودار پاسخ شاخص کاربری اراضی خ:نمودارشاخص پاسخ طول شیب آبراهه د: نمودارشاخص پاسخ نوع سنگ

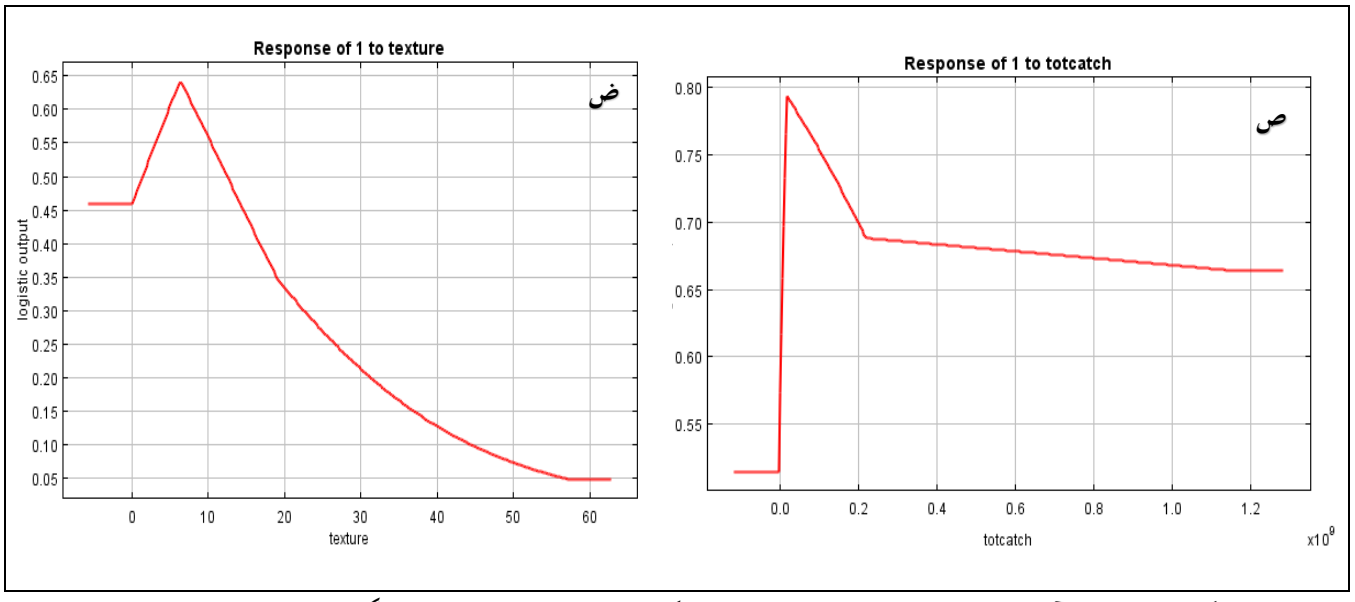
[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.124]



[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.124]

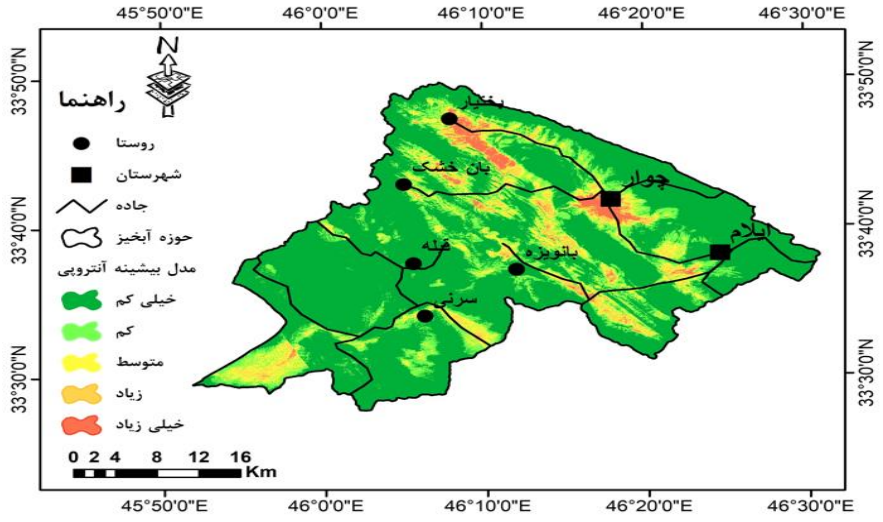


شکل۶: منحنی پاسخ آستانه‌های حساسیت فرسایش خندقی ذ: انحنای کلی ر:نمودار شاخص تفاضل پوشش گیاهی ز: نمودار پاسخ شاخص بارش ژ: نمودار پاسخ شاخص پروفیل طولی س: نمودار پاسخ شاخص شیب ش: نمودار پاسخ شاخص خاک ص: نمودار پاسخ شاخص مساحت حوضه ض: نمودار پاسخ شاخص بافت

نتایج تهیه نقشه طبقات پهنه بندی در مدل حداکثر آنتروپی

نتایج طبقه‌بندی نقشه پهنه‌بندی حساسیت به فرسایش خندقی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی (MaxEnt) در شکل ۶ نشان داده شده است ومقایسه نتایج شاخص‌های نسبت فراوانی و سطح سلول هسته در مدل حداکثر آنتروپی در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج ذکر شده نشان داد که درصد مساحت طبقات حساسیت فرسایش خندقی خیلی‌زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی‌کم در حوضه ایلام به‌ترتیب ۱۲/۹۸، ۲۴/۰۵، ۳۱/۹۰، ۱۱/۵۸ و ۱۹/۴۹، می‌باشد. همچنین درصد رخداد فرسایش خندقی در طبقات حساسیت خیلی‌زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی‌کم در حوضه ایلام به‌ترتیب ۸۶/۰۲، ۱۲/۱۶، ۱/۲۲، ۰/۳۰ و ۰/۳۰می‌باشد. به‌عبارت دیگر طبقات حساسیت خیلی زیاد و زیاد مجموعاً در حوضه ایلام بیش از ۳۷ درصد، به خود اختصاص داده است. همچنین این دو طبقه حساسیت (خیلی زیاد و زیاد) در حوضه ایلام بیش از ۹۸ درصد، رخدادهای فرسایش خندقی را در بر می‌گیرند. بطورکلی بر اساس مدل حداکثر آنتروپی بیش از ۸۰ درصد رخدادهای فرسایش خندقی در دو طبقه حساسیت خیلی زیاد تا زیاد قرار دارند شکل ۶. همانطور که ملاحظه می‌شود دو شاخص نسبت فراوانی و سطح سلول هسته تقریباً رابطه معکوس با همدیگر دارند. به‌عبارت دیگر با افزایش حساسیت اراضی نسبت به رخداد فرسایش خندقی، شاخص نسبت فراوانی افزایش و شاخص سطح سلول هسته کاهش می‌یابد. شاخص نسبت فراوانی برای رده‌های خیلی کم تا متوسط حساسیت اراضی نسبت به رخداد فرسایش خندقی با شیب نسبتاً ملایم افزایش و برای رده‌های زیاد تا خیلی زیاد بطور قابل توجهی افزایش نشان می‌دهد. شاخص نسبت فراوانی بیش‌ترین روند تغییرات افزایشی را نشان می‌دهد. در مقابل شاخص سطح سلول هسته از رده حساسیت خیلی کم تا متوسط کاهش قابل توجه و از رده زیاد تا خیلی زیاد، کاهش نسبتاً تدریجی نشان می‌دهد شکل۷ .

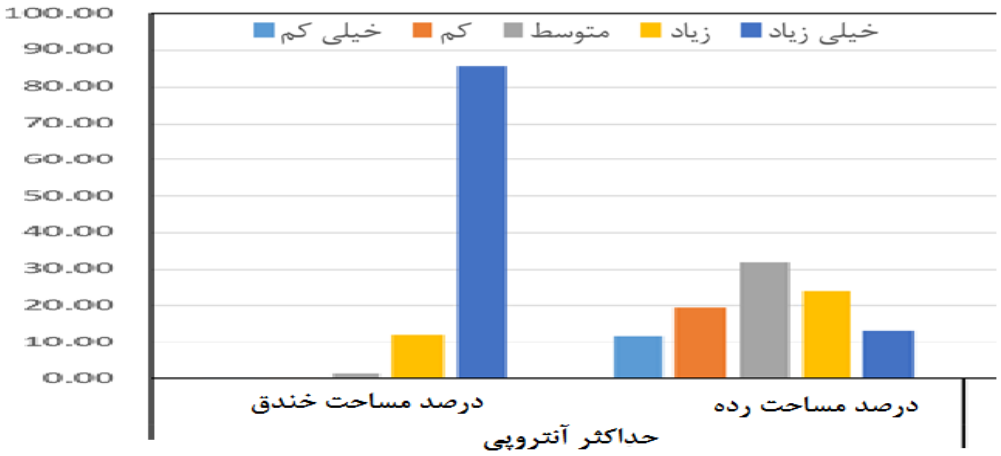
[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.61186/jeer.15.4.124]



شکل ۷: نقشه طبقات پهنه‌بندی حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی

جدول ۳: مقادیر شاخص نسبت فراوانی و سطح سلول هسته در هر طبقه از نقشه پهنه‌بندی حساسیت به فرسایش خندقی

طبقه	نام طبقه	پیکسل خندقی	درصد خندق	پیکسل طبقه	درصد مساحت طبقه	FR	SCAI
1	خیلی کم	۱	۰,۳۰	۲۲۰۶۶۶	۱۱,۵۸	۰,۰۳	۳۸,۰۹
2	کم	۱	۰,۳۰	۳۷۱۳۷۳	۱۹,۴۹	۰,۰۲	۶۴,۱۱
3	متوسط	۴	۱,۲۲	۶۰۷۹۰۵	۳۱,۹۰	۰,۰۴	۲۶,۲۴
4	زیاد	۴۰	۱۲,۱۶	۴۵۸۴۱۵	۲۴,۰۵	۰,۵۱	۱,۹۸
5	خیلی زیاد	۲۸۳	۸۶,۰۲	۲۴۷۴۲۳	۱۲,۹۸	۶,۶۳	۰,۱۵



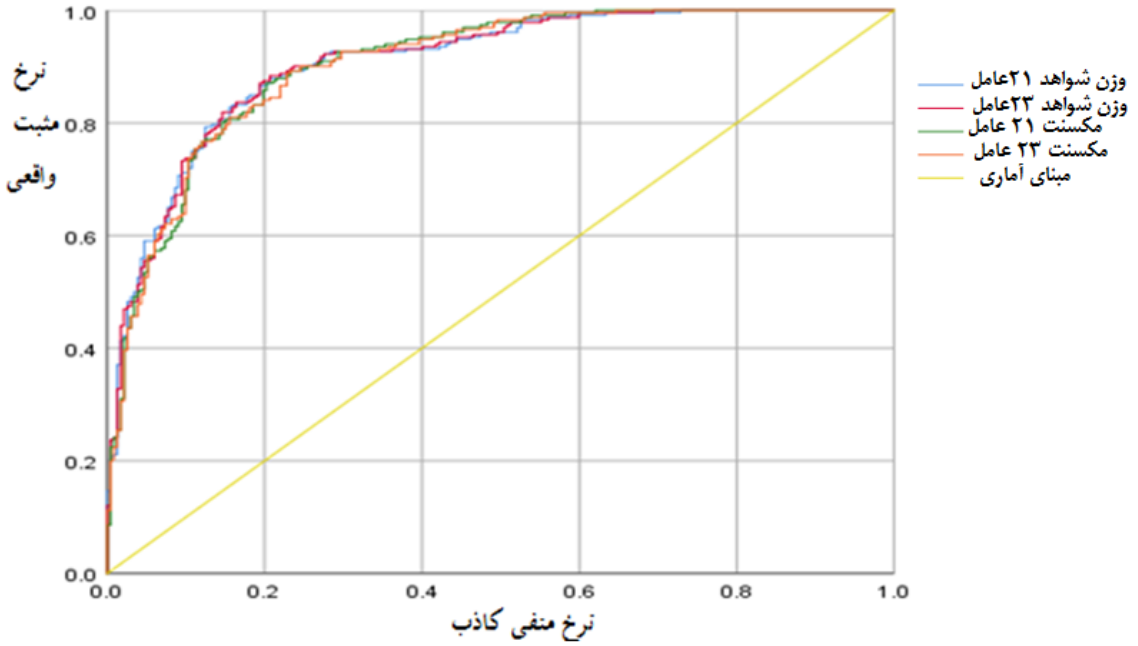
شکل۸: درصد مساحت رخداد خندق و رده‌های حساسیت فرسایش خندقی

اعتبار سنجی و کارآمدی مدل

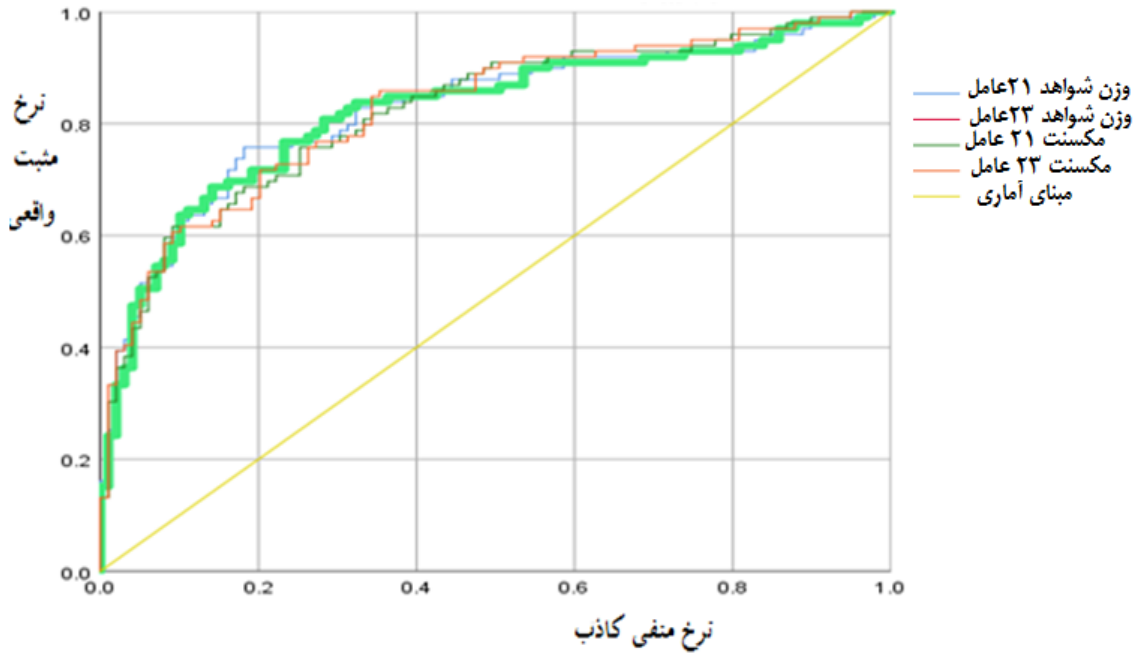
در این پژوهش از ۷۰ درصد خندق‌ها برای آموزش مدل حداکثر آنتروپی استفاده گردید که شامل ۲۳۲ خندق می‌باشد. از ۳۰ درصد مابقی که شامل ۹۹ خندق است، برای اعتبارسنجی مدل ها از منحنی مشخصه عملکرد سیستم ROC و مساحت سطح زیر نمودار AUC استفاده شد. ابتدا داده‌های به‌دست‌آمده از نقشه‌های پهنه‌بندی فرسایش خندقی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی به نقاط مربوط به ۹۹ خندق و۲۳۲ 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 جدول۵ و شکل۹که از

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.61186/jeer.15.4.124]

نقاط واسنجی(۳۰٪) به دست آمده است، مدل دارای درصد قابل قبولی از مساحت زیر منحنی بوده که این مسئله نشان دهنده عملکرد بالای این مدل در منطقه است. مدل آنتروپی با ۹۰/۹ درصد مساحت زیر نمودار دارای بهترین عملکرد برای پهنه‌بندی حساسیت فرسایش خندقی می‌باشد (شیرانی و ذاکری‌نژاد ۲۰۲۰).



شکل ۹: نمودار منحنی مشخصه عملکرد مدل حداکثرآنتروپی، در مرحله واسنجی با استفاده از ۷۰٪ پراکنش رخداد خندق‌ها



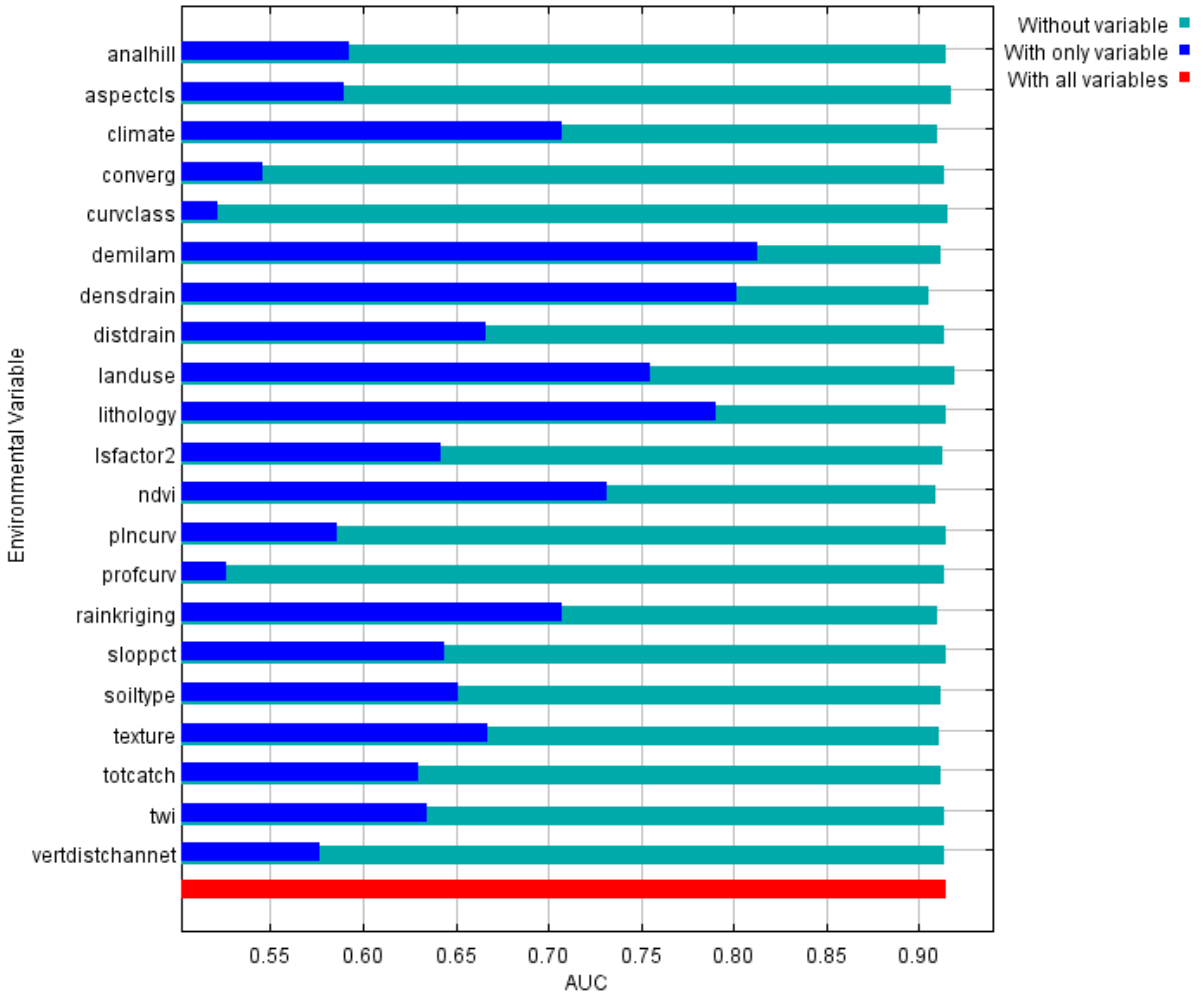
شکل ۱۰: نمودار منحنی مشخصه عملکرد حداکثرآنتروپی، در مرحله پیش‌بینی با استفاده از ۳۰٪ پراکنش رخداد خندق‌ها

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.124]

نتایج آنالیز حساسیت و اهمیت متغیرها (آزمون جک نایف[1] حاصل از مدل MaxEnt)

با بهره‌گیری از آزمون جک نایف هر یک از شاخص‌های مورد مطالعه بر اساس اهمیت نسبی و میزان تاثیر یا سهم مشـارکت در ایجاد فرسـایش خندقی اولویت‌بندی شده و به‌صورت نمودار و جدول ارایه شده است نکته قابل توجه آن اسـت که نمودار آزمون جک نایف تاثیر هر یک از شـاخص‌ها را بصورت مستقل در پهنه بندی فرسایش خندقی نشان می دهد. یعنی نرم افزار به طور مستقل مدل را تنها با در نظر گرفتن شاخص مورد نظر به تنهایی اجرا می‌نماید شکل ۱۰. سـهم مشـارکت عوامل با استفاده مدل مکسنت که بیانگر اهمیت هر یک از شاخص‌ها نیز می باشد، به‌عنوان متغیرهای مستقل در ایجاد فرسایش خندقی مورد ارزیابی قرار گرفته است.



شکل ۱۱: نمودار آزمون جک‌نایف برای شاخص‌های مورد استفاده بر اساس مدل حداکثر آنتروپی

۵ـ بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش روش شناسایی خندقها ارائه شد و ۳۳۱ خندق ثبت و محدوده‌ها و نقاط خندقی تدقیق داده شده و لایه پراکنش خندقی حوضـه آبخیز برای اولین بار در حوضـه آبخیز ایلام تهیه شـد. منحنی‌های پاسخ به حساسیت فرسایش

[1] - Jackknife

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.61186/jeer.15.4.124]

خندقی استخراج شده از حداکثر آنتروپی، روش تحقیق را از لحاظ علمی، قانونمندی کمی، ریاضی و آماری معرفی نمود و در حوضه آبخیز ایلام ارتباط و تاثیر شاخص‌ها یا متغیرهای مستقل با متغیر وابسته فرسایش خندقی و آستانه فرسایش خندقی تشریح شد.

نتایج طبقه‌بندی نقشه پهنه‌بندی حساسیت به فرسایش خندقی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی نشان داد که درصد مساحت طبقات حساسیت فرسایش خندقی خیلی‌زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی‌کم در حوضه ایلام به‌ترتیب ۱۲/۹۸، ۲۴/۰۵، ۳۱/۹۰، ۱۱/۵۸ و ۱۹/۴۹، می‌باشد. همچنین درصد رخداد فرسایش خندقی در طبقات حساسیت خیلی‌زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی‌کم در حوضه ایلام به‌ترتیب ۸۶/۰۲، ۱۲/۱۶، ۱/۲۲، ۰/۳۰ و ۰/۳۰می‌باشد. به‌عبارت دیگر طبقات حساسیت خیلی زیاد و زیاد مجموعاً در حوضه ایلام بیش از ۳۷ درصد، به خود اختصاص داده است. بطورکلی بر اساس مدل حداکثر آنتروپی بیش از ۸۰ درصد رخدادهای فرسایش خندقی در دو طبقه حساسیت خیلی زیاد تا زیاد قرار دارند. نتایج اعتبارسنجی مدل از منحنی مشخصه عملکرد سیستم ROC و مساحت سطح زیر نمودار AUC که از نقاط واسنجی(۳۰٪) به دست آمده است نشان داد که مدل دارای درصد قابل قبولی از مساحت زیر منحنی بوده که این مسئله نشان دهنده عملکرد بالای این مدل در منطقه است. مدل آنتروپی با ۹۰/۹ درصد مساحت زیر نمودار دارای بهترین عملکرد برای پهنه‌بندی حساسیت فرسایش خندقی می‌باشد که با تحقیق سعیدیان و همکاران (۲۰۲۳) مطابقت دارد. نتایج تحلیل منحنی پاسخ آستانه‌های حساسیت فرسایش خندقی و نمودار آزمون جک نایف نشان داد که عوامل توپوگرافی، تراکم‌آبراهه، لیتولوژی، کاربری‌اراضی، نوع اقلیم، پوشش‌گیاهی و بارش بیش‌ترین تاثیر بر فرسایش خندقی دارند. پیشنهاد تحقیقاتی، می‌توان از این مدل در دیگر مناطق در جهت پهنه‌بندی فرسایش خندقی استفاده نمود و پیشنهاد اجرایی با توجه به عوامل تاثیرگذار معرفی شده در این تحقیق در فرسایش خندقی اقدام کنترلی و حفاظتی را برنامه ریزی نمود.

جدول ۴- فراوانی نسبی نتایج ارتباط بین هر عامل موثر بر رخداد فرسایش خندقی

Parameter	Class	Class area in pixel	Gully erosion area in pixel	FreqR
Hillshad	0.005-0.65	252043	14	0.46
	0.65-0.82	806210	133	1.36
	0.82-1	623944	69	0.91
	1-1.91	223585	15	0.55
Slope aspect	Flat	599189	20	0.28
	North	135471	5	0.3
	Northeast	184001	6	0.27
	East	122902	37	2.48
	Southeast	125029	35	2.31
	South	182534	54	2.44
	Southwest	278469	44	1.3
	West	167726	16	0.79
	Northwest	110461	14	1.05
Climoatology	SemiArid	944038	35	0.28

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.124]

	Mediterian	818558	195	1.83
	SemiHumid	143186	1	0.05
Convergence	<-17.23	85342	15	1.45
	-17.23 to -0.20	710248	98	1.14
	-17.7	1031636	116	0.93
Convergence	>17.5	78556	2	0.21
	concave(-18.24 to -0.1)	424926.1	47	0.91
Curvature	flat(-0.1-0.1)	1178027	166	1.16
	Convex(0.1-20.64)	302829.1	18	0.49
Curvature classification	1	594568	88	1.22
	2	162462	16	0.81
	3	144082	16	0.92
	4	80724	13	1.33
	5	110171	16	1.2
	6	225073	21	0.77
	7	143161	17	0.98
	8	445541	44	0.81
Distance to drainage	0-100	684723	138	1.66
	100-150	569668	70	1.01
	150-250	379298	23	0.5
	250-500	207625	0	0
	>500	64468	0	0
Drainage density	0-1.2	382219	1	0.02
	1.2-1.7	583825	12	0.17
	1.7-27	569841	74	1.07
	2.7-3.34	369897	144	3.21
Altitude	<1000	956067	122	1.05
	1000-1500	746702	109	1.2
	1500-2000	175577	0	0
	2000-2500	27323	0	0
	2500-2612	113	0	0
Landuse	Orchard	1913	0	0
	Forest	804167	60	0.62
	Agriculture	286101	147	4.24
	PoorRange	766343	21	0.23
	Rock	24682	3	1
	DensForest	22576	0	0
Litology	Group1	665907	29	0.36
	Group2	240751	124	4.25
	Group3	229065	11	0.4
	Group4	350767	50	1.18
	Group5	419292	17	0.33
Slope-Length	0-2.5	829901	132	1.31
	2.5-5	476742	76	1.32
	5-8.5	368528	20	0.45
	8.5-13	189692	3	0.13

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.124]

	13-56.7	40919	0	0	
NDVI	<0.15	472136	14	0.24	-5.912
	0.15-0.25	1144150	120	0.87	-2.499
	>0.25	289496	97	2.76	10.478
Plan Cruvature	concavepl(-9.74 to -0.1)	206173	17	0.68	-1.68
	flatpl(-0.1-0.1)	1181404	171	1.19	3.72
	convexpl(0.1-10.23)	518205	43	0.68	-2.901
Profile Cruvature	convexprf(-19.30 to -0.1)	92573	1	0.09	-2.458
	flatprf(-0.1-0.1)	944431	126	1.1	1.514
	concaveprf(0.1-11.86)	868778	104	0.99	-0.172
Rian	<400	359678	14	0.32	-4.652
	400-500	585724	37	0.52	-4.707
	500-550	521374	68	1.08	0.709
	>550	439006	112	2.1	8.704
Slope gradient	<5	635711	95	1.23	2.493
	5-12	558519	107	1.58	5.557
	12-25	384693	27	0.58	-3.162
	25-40	254915	2	0.06	-4.045
	>40	71943	0	0	-0.585
Soil type	Rock-Inceptisol	521186	101	1.6	5.464
	XBL BadLands	468052	5	0.09	-5.947
	Rock-Entisol	640686	96	1.24	2.543
	Inceptisol-Vertisol	100699	12	0.98	-0.061
	Inceptisol	175159	17	0.8	-0.292
Stream power	-13.5_-10	170192	16	0.78	-1.065
	-10_-5.5	273052	31	0.94	-0.394
	-5.5_-0.8	461288	61	1.09	0.781
	-0.8_3.5	634992	87	1.13	1.398
	3.5_7.69	366259	36	0.81	-0.615
Surface texture	<12.25	461783	91	1.63	5.268
	12.25-17.7	569929	89	1.29	2.845
	17.7-23.5	594460	33	0.46	-5.322
	>23.5	279610	18	0.53	-2.894
Catchment area	<0.1	1750392	192	0.9	-1.384
	0.1-5	137417	28	1.68	0
	5-10	4733	3	5.23	0.16
	>10	13240	8	4.98	0.422
Topographic wetness	1.8_3	551715	52	0.78	-2.148
	3.3_4.85	682319	84	1.02	0.178
	4.85_14.14	228672	48	1.73	4.035
Vertical distance to channel network	<0	667954	94	1.16	1.064
	0-2	471315	72	1.26	1.128
	2-10	582839	61	0.86	-1.375
	>10	183674	4	0.18	-3.57

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.124]

منابع

1. Alencar, P.H.L., Simplício, A.A.F., de Araújo, J.C., (2022). Entropy-based Model for Gully Erosion – A combination of probabilistic and deterministic components, *Science of The Total Environment*, 836(155629), 0048-9697, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155629.
2. Arabameri, A. , rezaei, K. , yamani, M. and shirani, K. (2019). Optimization of gully erosion susceptibility using data-driven statistical combined methods (case study: Toroud-Najar Abad basin). *Researches in Earth Sciences*, *10*(1): 18-38. https://doi.org/ 10.52547/esrj.10.1.18. (In Persian).
3. Azareh.A, Rahmati.O, Rafiei-Sardooi.E, Joel B. Sankey, Lee.S, Shahabi.H, Bin Ahmad.B, (2019), Modelling gully-erosion susceptibility in a semi-arid region, Iran: Investigation of applicability of certainty factor and maximum entropy models, *Science of the total Environment*, 655(10):684-696. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.235. (In Persian).
4. Bernini, Alice, Alberto Bosino, Greg A. Botha, and Michael 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): 715-729. https://doi.org/10.3390/ijgi10110729.
5. Conforti, Massimo, and Fabio Ietto. 2024. "Testing the Reliability of Maximum Entropy Method for Mapping Gully Erosion Susceptibility in a Stream Catchment of Calabria Region (South Italy)" *Applied Sciences* 14(1): 240-261. https://doi.org/10.3390/app14010240.
6. Ejtemaei B, Moghtaderi G. 2025. Zoning and Analysis of Temporal and Spatial Changes in Gully Erosion and Its Impact on the Villages of the Mond Watershed during the Years 2000 to 2024. *E.E.R.* 15 (1):105-119. https://doi.org/ 10.61186/jeer.15.1.105. (In Persian).
7. Khazaei M, Shirani K, Saleh I. 2024. Susceptibility modeling and determining the contribution of factors affecting gully erosion. *E.E.R.*, 14 (3):123-141. https://doi.org/ 10.61186/jeer.14.3.123.(In Persian).
8. Kou M., Jiao J., Yin Q., Wang N., Wang Z., Li Y., Yu W., Wei Y., Yan F., Cao B. 2016. Successional trajectory over 10 years of vegetation restoration of abandoned slope croplands in the hill-gully region of the Loess Plateau. *Land Degradation & Development*, 27(4): 919-932. https://doi.org/ 10.1002/ldr.2356
9. 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 Geographyand Environmental Hazards*,11(3): 123-145.https://doi.org/ 10.22067/geoeh.2022.76707.1228. (In Persian).
10. mohamdkhan, S., pirani, P., riahi, S. and geravand, F. (2020). Evaluation of entropy model efficiency in erosion zoning of kand watershed with geomorphologic approach. Geographical Planning of Space, 9(34), 85-98. https://doi.org/ 10.30488/gps.2019.100315. (In Persian).
11. 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 approachesto the use of macroeconomic models. *L. Degrad*.29(21):471–484. https://doi.org/10.1002/ldr.2879.
12. Pandey, V.K., Pourghasemi, H.R., & Sharma, M.C., 2018. Landslide susceptibility mapping using maximum entropy and support vector machine models along the Highway Corridor, *Garhwal Himalaya*. *Geocarto International*, 35(2):1-38. https://doi.org/10.1080/ 10106049. 2018. 1510038.
13. Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G. and Valentin, C 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs, *Catena*, 50(2-4):91–133. https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00143-1.
14. Roy J, Saha S. 2019. GIS-based gully erosion susceptibility evaluation using frequency ratio, cosine amplitude and logistic regression ensembled with Fuzzy logic in Hinglo River Basin, India, *Remote Sensing Applications, Society and Environment*,64(452):125-148 https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.100247.
15. Saeediyan, H., shirani, K., salajegheh, A., ahmadi, R. (2023). 'Investigating the performance of the entropy maximum model in determining the importance of effective environmental factors in creating gully erosion in semi-arid areas', *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 2(1): 129-144. https://doi.org/ 10.22034/nawee.2023.407297.1047. (In Persian).
16. Shirani, K., Zakerinejad, R. 2020. Gully erosion mapping and susceptibility assessment using statistical and probabilistic methods. *Journal of Water and Soil Sciences*, 25 (2):151-174. https://doi.org/10.47176/jwss.25.2.147215. (In Persian).

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.124]

17. Tadesual A, Setargie M, Ebabu K, Nzioki B, Meshesha TM. 2023. Random Forest–based gully erosion susceptibility assessment across different agro-ecologies of the Upper Blue Nile Bbasin, Ethiopia. *Geomorphology*,431(14):241-263. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108671.
18. Teimurian, T., Nazari Samani, A. , Feiznia, S. , Ahmadaali, K. and Soleimanpour, S. M. (2022). Determining the Spatial Distribution of Gully Erosion Probability Using the MaxEnt Model. *Watershed Management Research*, *35*(2), 2-15 https://doi.org/10.22092/wmrj.2021.354647.1415. (In Persian).
19. 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. *J Watershed Manage Res*, 14(28), 37-54. https://doi.org/ 10.61186/jwmr.14.28.37. (In Persian).
20. Zakerinejad R, Alvandi P. 2023. Spatial prediction of gully erosion using TanDEM-X data and Maximum Entropy Model (A case study: Khasoyeh Watershed, in Southeast of Fars Province). *Environmental Erosion Research Journal*,3(1):96-113. https://doi.org/20.1001.1.22517812.1402.13.1.4.6. (In Persian).

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.124]