

The role of morphometric factors in the accuracy of gully erosion zoning using maximum entropy model (Case study: Sarabe Halil watershed in Kerman province)

Hamzeh Saeediyan^{1*}, Kouros Shirani², Shahin Aghamirzadeh³, Peyman Madanchi¹

1- Assistant Professor, Department of Soil Conservation and Watershed Management Research, Kerman Agricultural and Natural Resource Research Center, Kerman, Iran.

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

3- Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Kerman, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Kerman, Iran

* Corresponding author: hamzah.4900@yahoo.com

(Received: 16 July 2023

Revised: 16 September 2023

Accepted: 01 October 2023)

Extended Abstract

Introduction: Gully erosion is a severe form of soil erosion, but internal gully erosion processes are not well understood, especially at the scale of rainfall event. Nowadays, gully erosion is known as one of the most destructive types of erosion in agricultural lands and natural resources in the world such that it has a significant share of scientific research. Although soil erosion is a natural process, human activities in the past decades have greatly accelerated different types of erosion in nature. Gully erosion is the final and advanced stage of the erosion process, which, if not controlled, can cause huge damage to infrastructure as well as various agricultural parts, natural resources and environment, which either do not compensate for damage or if compensated, takes a long time in nature. In arid and semi-arid regions, due to certain conditions, the creation and development of gully erosion can make tremendous progress. Soil erosion in arid and semi-arid regions is one of the important consequences of climate change or is one of the consequences of environmental and ecological changes. Therefore, the purpose of this study is to rank the effective factors of morphometric erosion in creating gully erosion using statistical methods, as well as preparing gully erosion sensitivity map using maximum entropy model and its sensitivity in arid and semi-arid regions in arid and semi-arid provinces such as Kerman, which in turn provides valuable information on how to create and develop gully erosion in these areas.

Material and Methods: In this study, 79 gullies were identified in Sarab Halil watershed in Kerman province. Then, 15 morphometric information layers were obtained along with gullies distribution map and PCA statistical Analysis was used to determine the most important factors affecting morphometric and finally, the map of gully erosion zoning was obtained using entropy maximum model for morphometric factors. In addition, MaxEnt model is a general model that allows users to evaluate the relationships between a dependent variable and several independent variables in different study contexts. The maximum entropy model based on the principle of entropy specifies the network of connections between dependent and independent variables and are obtained based on the role of each independent variable, its influencing weight, and its response curves. Entropy indicates the degree of uncertainty of the unbalanced distribution of the existing phenomena from the expected information content. Entropy method has been used in various fields such as mathematics, computer and economics in Iran and the world, but it has been used less commonly in geomorphology. In addition, Jackknife test was used to determine the importance of morphometric variables and the area under the curve criterion and acceptor performance specific curve were used to evaluate the accuracy of the model. The graph of the acceptor performance specific curve expresses the presence of the prediction against the accuracy of the absence of the forecast. If the amount of the area under the curve falls between 0.7 and 0.8, the model is considered good, and if the area under the curve ranges from 0.8 to 0.9, the model is considered very good, and if the amount of the area under the curve is more than 0.9, it is considered an excellent model. Meanwhile, the area index under the curve in receiver factor is equal to the probability of correctly distinguishing between the points of presence and absence by a model.

Results and discussion: Gully erosion is one of the most important types of erosion in different climates of the planet, which causes widespread destruction and since it is very scattered in watershed areas, predicting its occurrence with low research costs is very important. The use of morphometric factors in this research, in addition to having low research and field costs, showed that the desired and acceptable results can be achieved without the use of other factors that have higher cost. Map of gully erosion prone areas obtained from entropy maximum model using morphometric factors in the study area showed that gully erosion in northeast, east and south is more likely to gully erosion between 0 and 31%, but in the east of the watershed and southeast, the gully erosion increases slightly and reaches the probability of 92%, but the percentage of the area is very low. However, towards the center, north, northwest, west and southwest of the study area, the probability of gully erosion increases and reaches 92% and sometimes in some parts up to 100%.

Conclusion: The results showed that in the occurrence of gully erosion, the morphometric factors of plan curvature, profile curvature, topographic wetness index, vertical distance to channel network, altitude, and length - slope factor, slope and earth's surface texture are effective in creating the gully erosion.

Keywords: Length - slope factor, Gully erosion, Texture, Aspect

Citation: Saeediyan, H., Shirani, K., Aghamirzadeh, S., & Madanchi, P. (2023). The role of morphometric factors in the accuracy of gully erosion zoning using maximum entropy model (Case study: Sarabe Halil watershed in Kerman province). *Integrated Watershed Management*, 3 (3), 63-83. doi: 10.22034/iwm.2023.2007115.1092

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Integrated Watershed Management. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



نقش عوامل مؤثر مورفومتریک در دقت پهنه‌بندی فرسایش آبکندی با استفاده از مدل پیشینه آنتروپی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز سراب هلیل استان کرمان)

حمزه سعیدیان^{*}، کوروش شیرانی^۲، سید شاهین آقامیرزاده^۳، پیمان معدنچی^۱

۱- استادیار پژوهشی بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع

طبیعی کرمان، کرمان، ایران

۲- دانشیار، گروه پژوهشی مهندسی حفاظت خاک و آب، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان

تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

۳- محقق بخش حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمان،

سازمان تحقیقات ترویج و آموزش کشاورزی، کرمان، ایران

*نویسنده مسئول: hamzah.4900@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۵

چکیده

امروزه فرسایش آبکندی به‌عنوان یکی از مخرب‌ترین انواع فرسایش در زمین‌های کشاورزی و منابع طبیعی در دنیا شناخته شده است به‌طوری‌که سهم قابل توجهی از تحقیقات علمی را به خود اختصاص داده است. در این پژوهش در حوزه آبخیز سراب هلیل در استان کرمان، ۷۹ آبکند شناسایی شدند. سپس ۱۵ لایه اطلاعاتی مورفومتریک به همراه نقشه پراکنش آبکندها تهیه شد و از تحلیل آماری PCA برای تعیین مهم‌ترین عوامل مؤثر مورفومتریک استفاده شد و در نهایت نقشه پهنه‌بندی فرسایش آبکندی با استفاده از مدل پیشینه آنتروپی برای عوامل مورفومتریک در محیط نرم‌افزار MaxEnt به دست آمد. نتایج تحقیق نشان داد در مجموع در وقوع فرسایش آبکندی عوامل مورفومتریک انحنای دامنه، انحنای نیمرخ، رطوبت توپوگرافی، فاصله عمودی از آبراهه، ارتفاع، فاکتور طول - شیب آبراهه، شیب و بافت سطح زمین در ایجاد فرسایش آبکندی مؤثر می‌باشند. نقشه مناطق مستعد فرسایش آبکندی به‌دست‌آمده از مدل پیشینه آنتروپی با استفاده از عوامل مورفومتریک در حوزه آبخیز مورد مطالعه نیز نشان داد که فرسایش آبکندی در شمال شرق و شرق و جنوب بیشتر دارای احتمال وقوع بین صفر تا ۳۱٪ است ولی در منتهی‌الیه شرق حوزه و جنوب شرقی فرسایش آبکندی کمی افزایش می‌یابد و تا احتمال رخداد ۹۲٪ نیز می‌رسد ولی درصد مساحت آن خیلی کم است ولی به سمت مرکز، شمال، شمال غرب، غرب و جنوب غربی حوزه آبخیز مورد مطالعه احتمال وقوع فرسایش آبکندی افزایش می‌یابد و تا ۹۲٪ و گاهی در بعضی قسمت‌ها به ۱۰۰٪ نیز می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: فاکتور شیب - آبراهه، فرسایش آبکندی، بافت سطح زمین، جهت دامنه

استناد: سعیدیان، ح، شیرانی، ک، آقامیرزاده، س. ش؛ و معدنچی، پ. (۱۴۰۲). نقش عوامل مؤثر مورفومتریک در دقت پهنه‌بندی فرسایش آبکندی با استفاده از مدل پیشینه آنتروپی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز سراب هلیل استان کرمان). مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز (۳)، ۶۳-۸۳.

حق چاپ:



حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به‌صورت آزاد در وبسایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل دسترس است.

مقدمه

فرسایش آبکندی از فرآیندهای مهم تخریب خاک است که با توجه به شدت عوامل مختلف از کل فرسایش آبی در سراسر دنیا بین ۱۱ تا ۴۹٪ را به خود اختصاص می‌دهد (Shafeie *et al.*, 2011). فرسایش آبکندی از شکل‌های بسیار خطرناک فرسایش آبی است که در بعضی موارد باعث ایجاد کانال‌های با طول، عرض و عمق زیاد می‌شود. این حالت از فرسایش آبی بر اثر شستن خاک از طریق شیارها یا کانال‌های عمیق در سراسر یک زمین محافظت نشده رخ می‌دهد. در حوزه‌های آبخیز یکی از منابع‌های مهم ایجاد رسوب، فرسایش آبکندی است (Wasson *et al.*, 1996; Dunne, 2005; Crouch and Novruzzi, 1989). فرسایش آبکندی جدی‌ترین تهدید برای توسعه پایدار اکوسیستم و اقتصاد جهانی است (Zhou *et al.*, 2023) و یک شکل شدید از فرسایش خاک است، اما فرایندهای فرسایش داخلی آبکنند به‌ویژه در مقیاس رویداد بارندگی به‌خوبی درک نمی‌شود (Wang *et al.*, 2022). علاوه بر تغییر هیدرولوژی حوزه آبریز، فرسایش آبکندی منجر به طیف گسترده‌ای از اثرات در داخل و خارج از محدوده آبکنند از جمله از دست دادن خاک، زمین، زیرساخت‌ها و حتی زندگی می‌شود (Vanmaercke *et al.*, 2021). به‌عنوان یک منبع رسوب اولیه، فرسایش آبکندی منجر به تخریب شدید زمین می‌شود و تهدیدی برای امنیت غذایی و زیست‌محیطی است (Huang *et al.*, 2023). ضمناً آبکندها یکی از شکل‌های مهم ژئومورفولوژیکی هستند که با توسعه خود از بخش‌های مختلف مانند سر و فروریزی مواد از کناره‌ها، مواد دامنه‌ای را به دره‌ها سرازیر می‌سازند و تنها خاک قابل زراعت کوهستان‌ها را در اختیار آب‌های جاری می‌گذارند (Kasai, 2006; Whitford *et al.*, 2010). مقاومت در برابر فرسایش خاک سر آبکنند، فرایند برش آبکنند را تعیین می‌کند و فرسایش آبکندی را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد (Jiarui *et al.*, 2023). ضمناً فرسایش

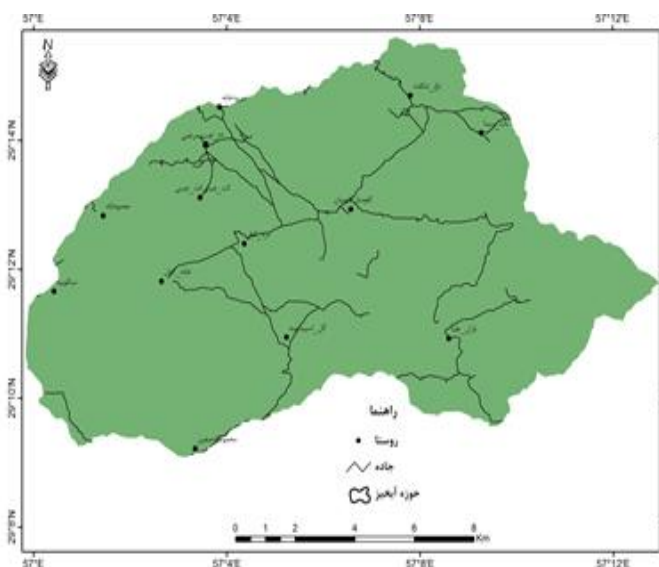
آبکندی شدید نیز در حوزه‌های آبخیز دارای کشاورزی با بازسازی پوشش گیاهی به‌وسیله رویدادهای بارندگی شدید نیز گزارش شده است (Yuan *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2021). فرسایش آبکندی در مناطق کشاورزی نیز آرام‌آرام به حدی بزرگ می‌شود که نمی‌توان به‌وسیله عملیات کشت و زرع معمولی آن را تسطیح کرد؛ بنابراین با توجه به سرعت تخریب عوامل به وجود آورنده فرسایش آبکندی لازم است برای کنترل این نوع فرسایش از تجربه‌های مختلف سراسر دنیا استفاده کرد و بهترین و مناسب‌ترین آن‌ها را برای کنترل این پدیده در کشور توسعه داد و از تخریب بیشتر زمین‌های حاصلخیز و غیر حاصلخیز در کشور جلوگیری کرد. غفلت از این پدیده قطعاً منجر به خسارات زیادی در بخش‌های مختلف خواهد شد. Conoscenti و همکاران (۲۰۱۳) در یک منطقه از کشور ایتالیا بر اساس تجزیه و تحلیل شرطی به مدل‌سازی ژئومورفولوژیکی وقوع لندفرم آبکنند و تعیین مناطق مستعد آن پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که شاخص‌های ژئومورفومتری سهم زیادی در افزایش کارایی دقت مدل‌سازی ژئومورفولوژی دارند. Arabameri و همکاران (۲۰۱۹) از یک روش ترکیبی نوین به‌منظور تهیه نقشه حساسیت فرسایش آبکندی استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که از بین ۱۲ پارامتر توپوگرافیک، هیدرولوژیک، اقلیمی و محیطی مورد استفاده، پارامترهای فاصله از آبراهه، فاصله از جاده و کاربری اراضی بیشترین تأثیر را در رخداد فرسایش آبکندی داشته‌اند. محققین مختلف اهمیت عوامل ژئومورفومتریکی را بر روی فرسایش آبکندی در کشورهای مختلف دنیا مورد بررسی قرار دادند و نقش آن‌ها را در رخداد فرسایش آبکندی قابل توجه دانسته‌اند (Vandekerckhove *et al.*, 2001; Kheir *et al.*, 2007; Zakerinejad and Merker, 2014). ضمناً بیشترین پژوهش‌های انجام‌شده در ارتباط با فرسایش آبکندی در راستای شرایط توپوگرافی و ژئومورفولوژی

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه مورد مطالعه در محدوده جغرافیایی $56^{\circ}59'48''$ تا $29^{\circ}09'03''$ طول شرقی و عرض جغرافیایی $57^{\circ}13'00''$ تا $29^{\circ}15'37''$ عرض شمالی در جنوب غربی استان کرمان واقع شده و راه دسترسی به آن از طریق جاده آسفالتی بافت - رابر به شهرستان جیرفت تأمین می‌شود. این حوضه 154617 هکتار مساحت دارد. ارتفاع این حوضه در بالاترین نقطه از سطح دریا معادل 3350 متر و در پایین‌ترین نقطه در خروجی حوضه معادل 1760 متر است (شکل ۱). با توجه به آمار هواشناسی سینوپتیک رابر حداکثر دمای سالانه $25/8$ درجه و حداقل دما $3/9$ درجه سانتی‌گراد و متوسط سالانه بارش حوضه $279/8$ میلی‌متر است.

آبکندها است (Patton and Schumm, 1975). در مناطق خشک و نیمه‌خشک به علت شرایط خاصی که وجود دارد ایجاد و توسعه فرسایش آبکندی می‌تواند پیشرفت فوق‌العاده‌ای داشته باشد. فرسایش خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک از پیامدهای مهم تغییرات اقلیمی و یا اینکه در کل از نتایج تغییرات محیطی و اکولوژیک است (Bayati Khatibi et al., 2011; Zhou, 2008)؛ بنابراین هدف تحقیق حاضر رتبه‌بندی عوامل مؤثر مورفومتريک در ایجاد فرسایش آبکندی با استفاده از روش‌های آماری و همچنین تهیه نقشه حساسیت فرسایش آبکندی با استفاده از مدل بیشینه آنتروپی و بررسی حساسیت آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک در استان‌های خشک و نیمه‌خشکی مانند کرمان است که اطلاعات ارزشمندی در ارتباط با چگونگی ایجاد و توسعه فرسایش آبکندی در این مناطق ارائه می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت حوضه مورد مطالعه در استان و ایران

Figure 1- Position of the study area in the province and Iran

سنجنده PALSAR ماهواره ALOS ژاپن نیز برای استخراج و آماده‌سازی نقشه‌های مختلف عوامل مورفومتريک استفاده شد. سپس ۱۵ لایه اطلاعاتی مورفومتريک حوضه مورد مطالعه با ارائه نقشه‌های عوامل مؤثر بر رخداد فرسایش آبکندی شامل شاخص‌های مهم

روش تحقیق

در این پژوهش آبکندهای موجود در منطقه مورد مطالعه با استفاده از پیمایش‌های میدانی و گوگل ارث شناسایی شدند (شکل ۲) و نقشه پراکنش آبکندها با ۷۹ آبکند تهیه شد. از نقشه DEM تصاویر ماهواره‌ای حاصل از

وابسته و مستقل را مشخص می‌کند و بر اساس نقش هر متغیر مستقل و وزن تأثیرگذاری آن و منحنی‌های پاسخ آن حاصل می‌شود. آنتروپی نشان‌دهنده مقدار عدم اطمینان درجه توزیع نامتعادل پدیده‌های موجود از محتوی مورد انتظار اطلاعاتی است. روش آنتروپی در موضوعات مختلف علوم مانند ریاضی، کامپیوتر و اقتصاد در ایران و دنیا استفاده شده است ولی در علم ژئومورفولوژی کمتر مورد استفاده قرار گرفته است (Mohammad Khan *et al.*, 2014) که در سال‌های اخیر نیز مورد توجه محققان در این علم نیز قرار گرفته است. ضمناً در این پژوهش از آزمون جک‌نایف^۱ برای تعیین اهمیت متغیرهای موفومتريک و از معیار سطح زیر منحنی و منحنی مشخص عملکرد پذیرنده^۲ (ROC) برای ارزیابی دقت و صحت مدل استفاده شد. نمودار منحنی مشخص عملکرد پذیرنده در واقع حضور پیش‌بینی را در برابر صحت عدم حضور پیش‌بینی بیان می‌کند. اگر مقدار سطح زیر منحنی بین ۰/۷ تا ۰/۸ واقع شود مدل خوب در نظر گرفته می‌شود و اگر مقدار سطح منحنی بین ۰/۸ تا ۰/۹ واقع شود مدل عالی در نظر گرفته می‌شود و اگر مقدار سطح زیر منحنی بیش از ۰/۹ باشد مدل بسیار عالی فرض می‌شود (Virkkala *et al.*, 2010). ضمناً شاخص سطح زیر منحنی عامل دریافت‌کننده برابر با احتمال تشخیص صحیح میان نقاط حضور و عدم حضور توسط یک مدل است (Fielding and Bell, 1997).

ژئومورفومتری شاخص تحذب، شاخص طبقه‌بندی انحناء، انحناء، انحنای دامنه، شاخص انحنای نیمرخ، شاخص فاصله عمودی از شبکه آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی، ارتفاع، شیب، جهت، شاخص آنالیز سایه و روشن، بافت سطح زمین، مساحت حوزه آبخیز، شاخص توان آبراهه، فاکتور طول - شیب آبراهه با استفاده از ArcGIS به دست آمدند که علت انتخاب این شاخص‌ها نیز احتمال داشتن بیش‌ترین تأثیر در ایجاد و توسعه فرسایش آبکندی در اقلیم‌های مختلف و همچنین سهل‌الوصول بودن این شاخص‌ها در مناطق مختلف است. سپس بعد از طی مراحل موردنیاز GIS و آماده‌سازی فایل‌های موفومتريک موردنیاز بدون دخالت عوامل مختلف دیگر از آزمون هم‌راستایی استفاده شد. سپس مهم‌ترین عوامل مؤثر موفومتريک در پراکنش آبکندها از بین ۱۵ لایه اطلاعاتی مروفومتريک مورد مطالعه با استفاده از آزمون آماری PCA یا تحلیل مؤلفه‌های اصلی در محیط نرم‌افزار SPSS به دست آمد و در نهایت نیز با استفاده از مدل بیشینه آنتروپی یا MaxEnt نقشه حساسیت فرسایش آبکندی به عوامل موفومتريک مورد مطالعه در محیط نرم‌افزار MaxEnt به دست آمد و مورد تجزیه و تحلیل‌های مختلف قرار گرفت. ضمناً مدل بیشینه آنتروپی یا MaxEnt مدلی عمومی است که امکان ارزیابی روابط بین یک متغیر وابسته و چند متغیر مستقل را در زمینه‌های مطالعاتی مختلف برای کاربران فراهم می‌کند. مدل بیشینه آنتروپی بر اساس اصل آنتروپی، شبکه ارتباطات بین متغیرهای

2. Receiver operating characteristic

1. Jackknife

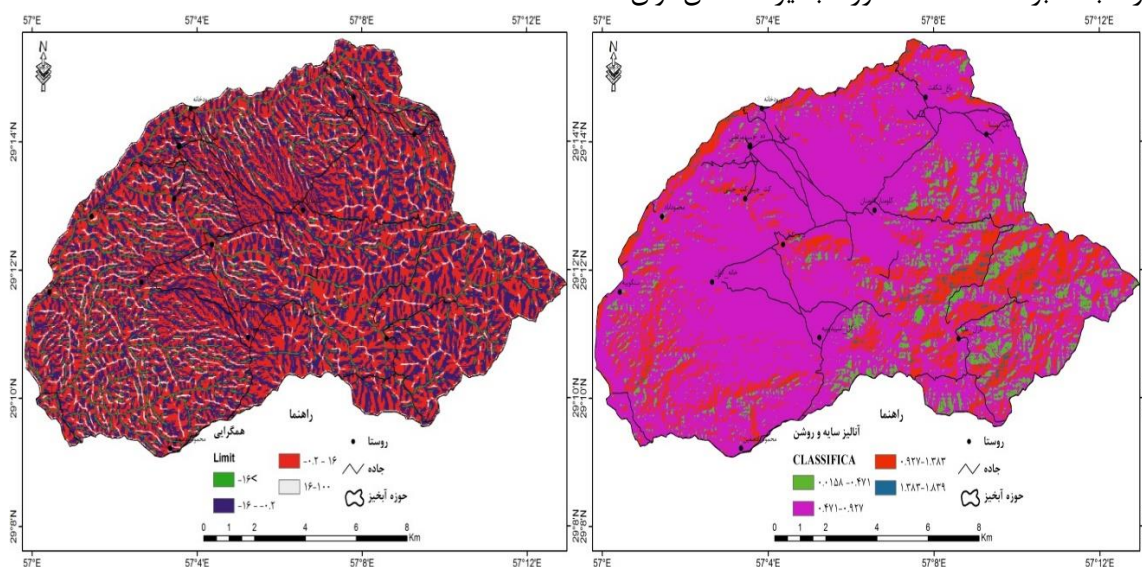


شکل ۲- نمایی از آبکندهای مشاهده شده
 Figure 2- A view of the observed gullies

نتایج

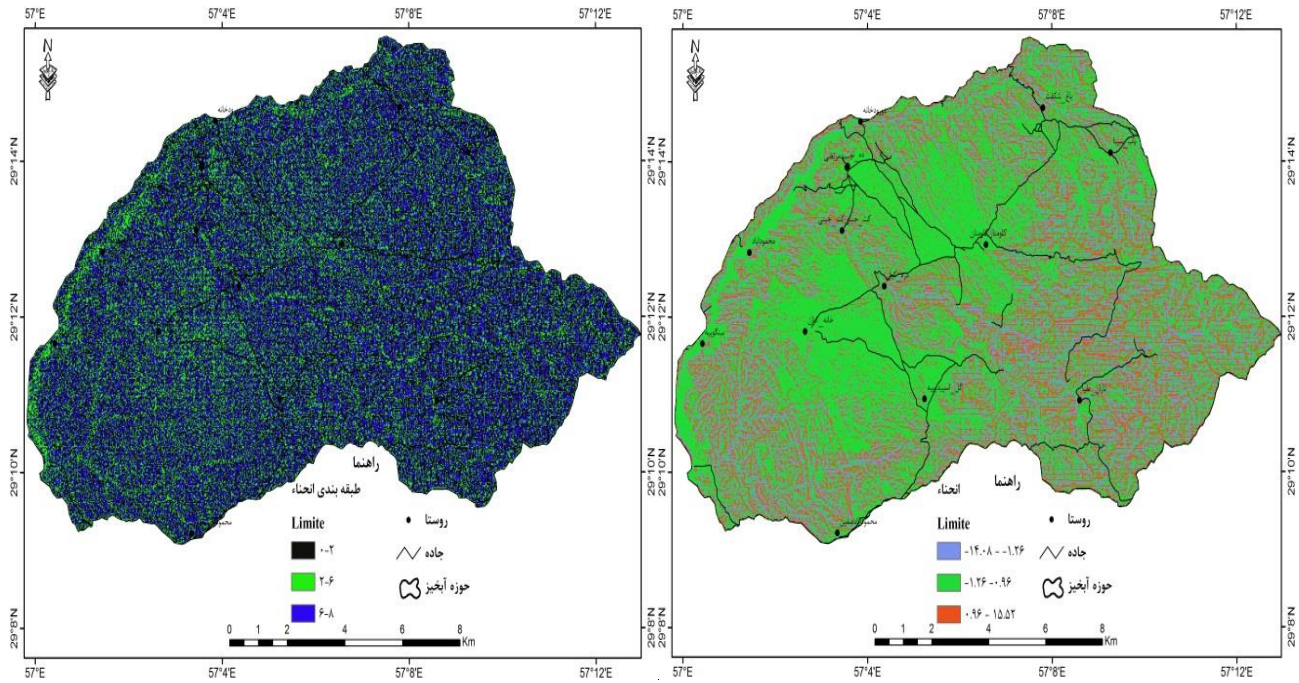
آبراهه، فاکتور طول - شیب آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی، ارتفاع، شیب، جهت، شاخص آنالیز سایه و روشن، بافت سطح زمین در شکل‌های ۳ تا ۱۰ آمده است.

طبقه‌بندی اطلاعاتی شاخص‌های مورفومتریک شامل شاخص‌های انحنا، انحناى دامنه، شاخص انحناى نیمرخ، شاخص تحدب، شاخص طبقه‌بندی انحنا، شاخص فاصله عمودی از شبکه آبراهه، مساحت حوزه آبخیز، شاخص توان



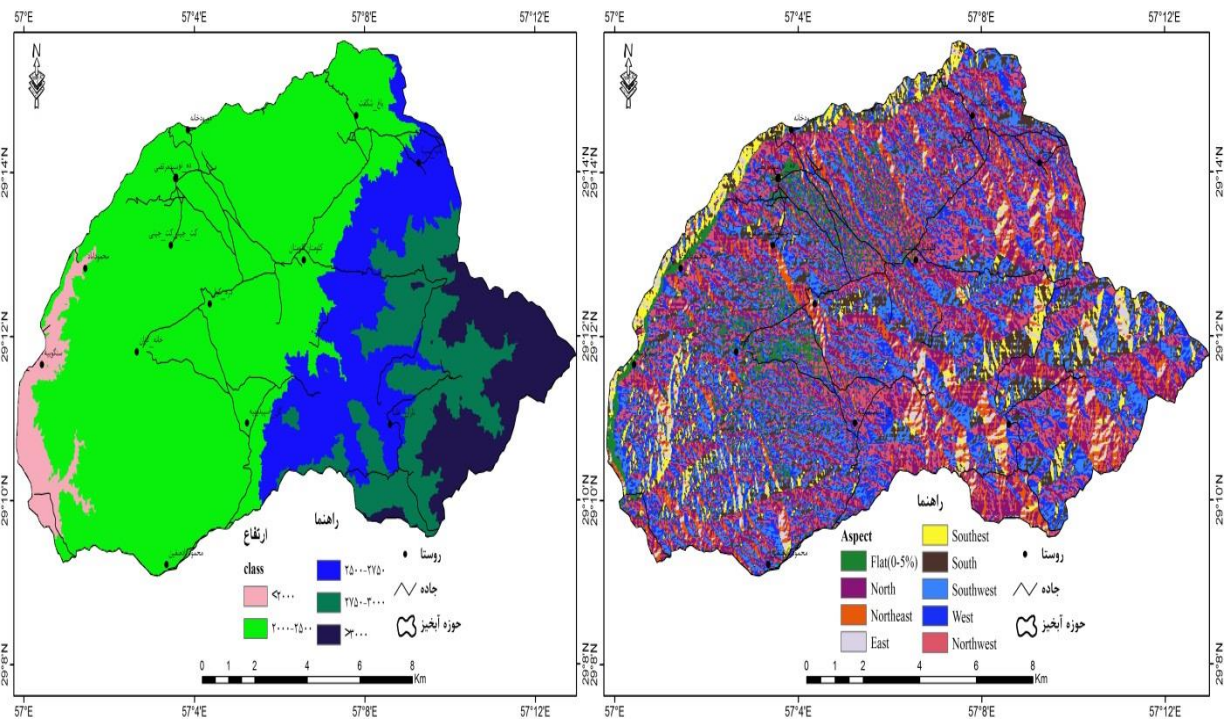
شکل ۳- لایه‌های اطلاعاتی آنالیز سایه و روشن و شاخص تحدب در حوزه آبخیز سراب هلیل

Figure 3- Analytical hillshading information layers and convergence index in Sarabe Halil watershed



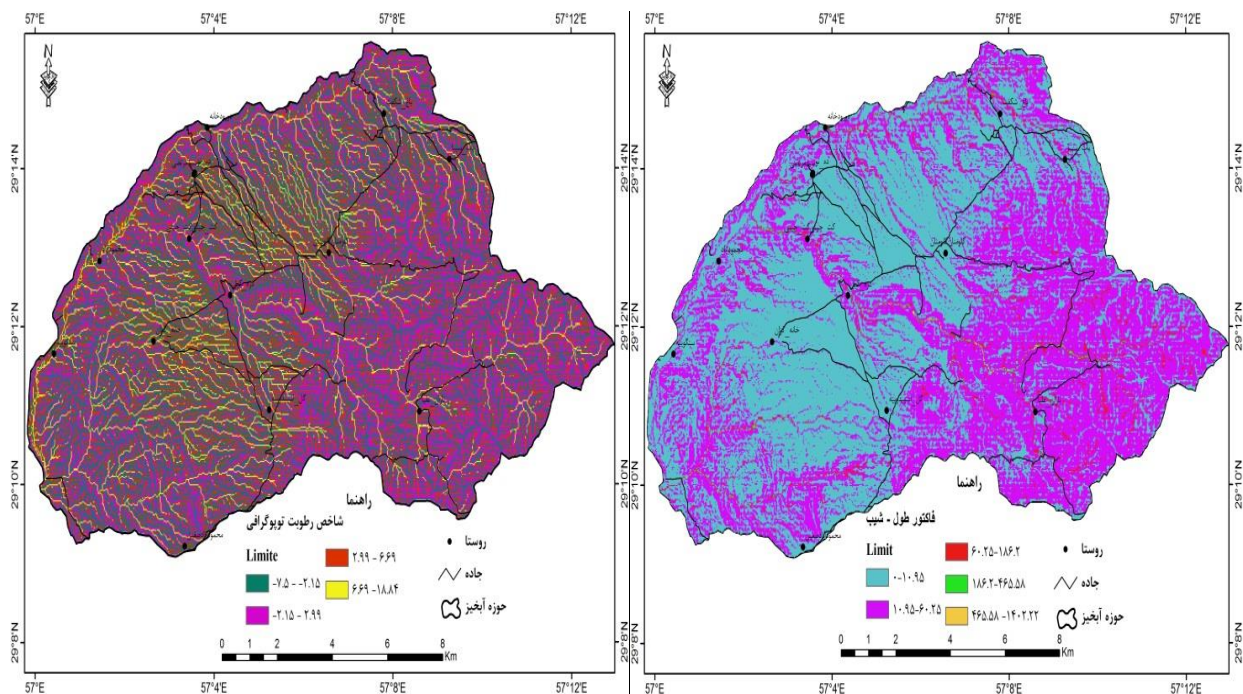
شکل ۴ - لایه‌های اطلاعاتی انحناء و طبقه‌بندی انحناء در حوزه آبخیز سراب هلیل

Figure 4 - Information layers of curvature and curvature classification index in Sarabe Halil watershed



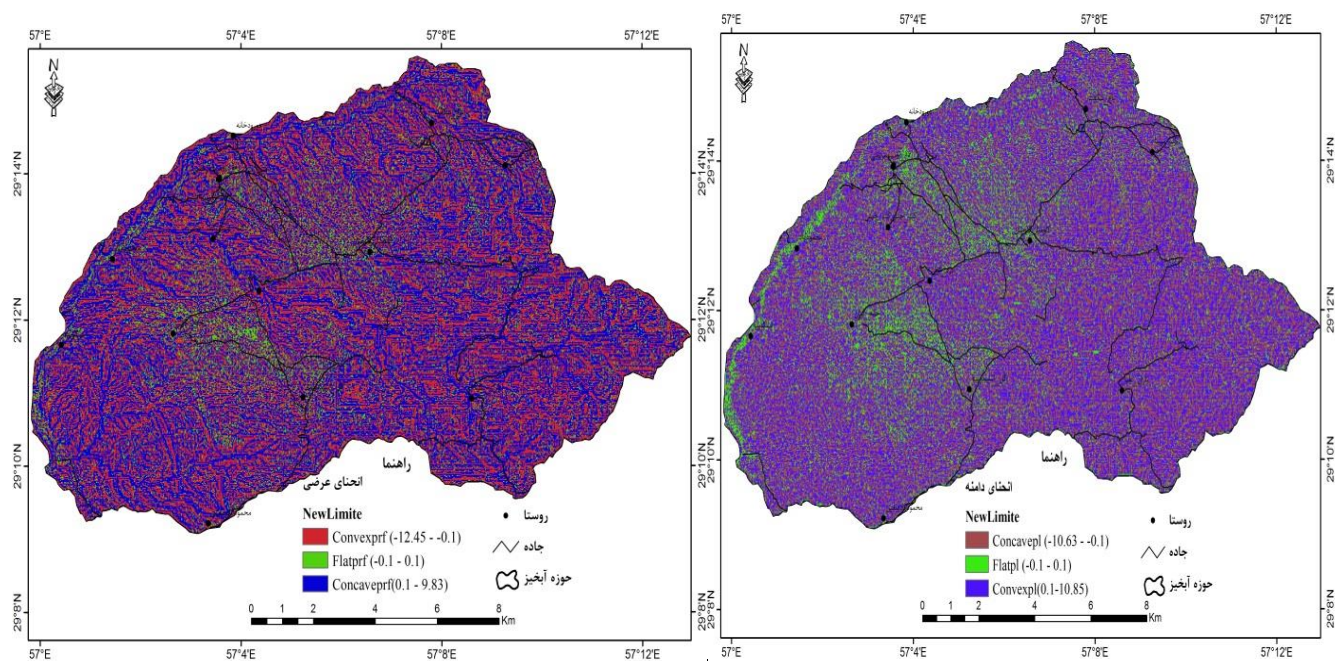
شکل ۵ - لایه‌های اطلاعاتی ارتفاع و جهت دامنه در حوزه آبخیز سراب هلیل

Figure 5 - Information layers height and Aspect in Sarabe Halil watershed



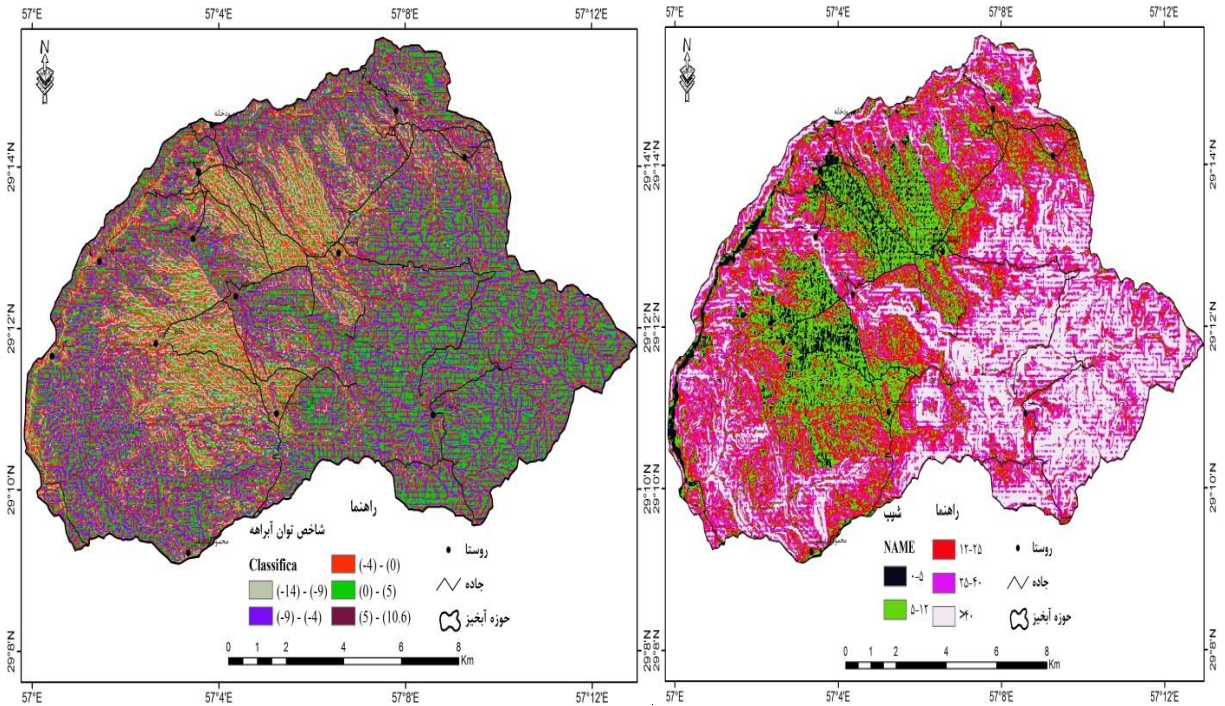
شکل ۶ - لایه‌های اطلاعاتی طول - شیب و رطوبت توپوگرافی در حوزه آبخیز سراب هلیل

Figure 6 - Information layers of LS and TWI in Sarab-e-Halil watershed

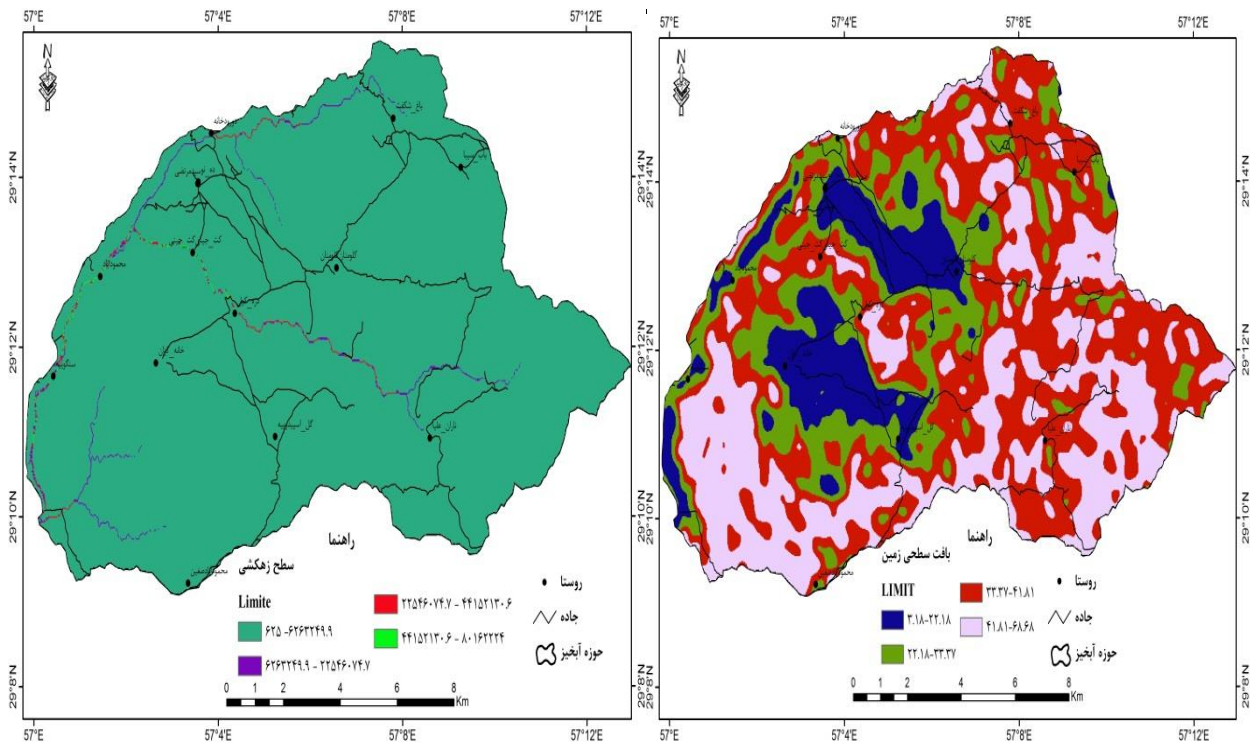


شکل ۷ - لایه‌های اطلاعاتی انحنای دامنه و انحنای نیمرخ در حوزه آبخیز سراب هلیل

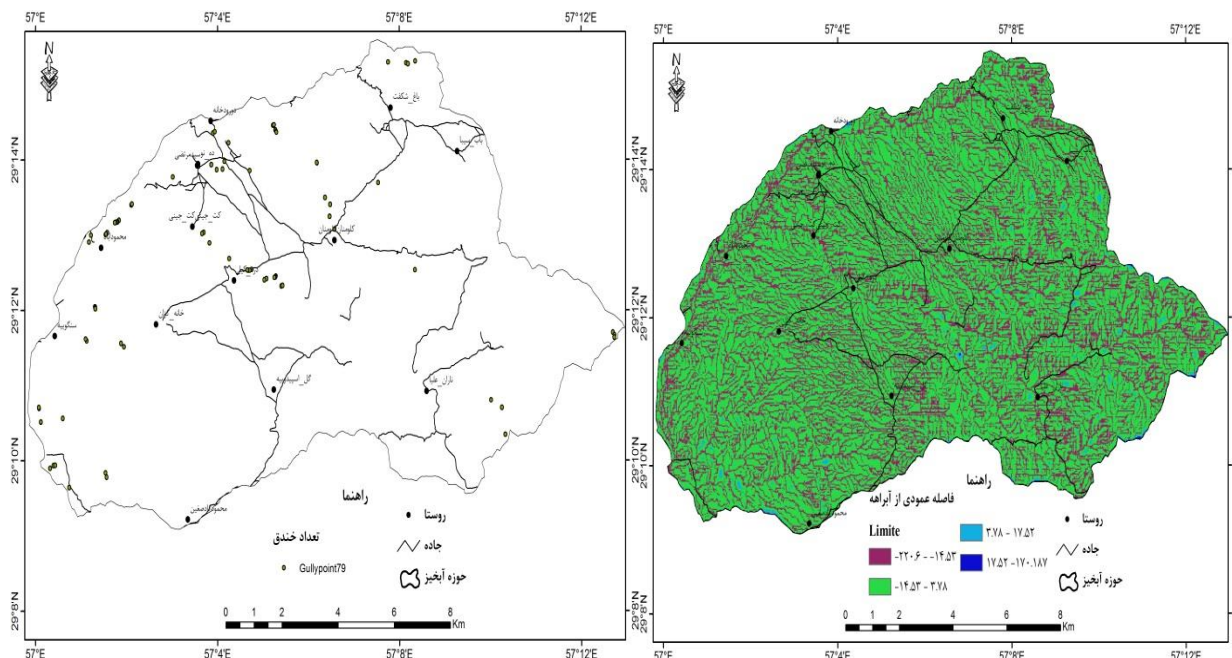
Figure 7 - Information layers of plan curvature and profile curvature in Sarab-e-Halil watershed



شکل ۸ - لایه‌های اطلاعاتی شیب و توان آبراهه در حوزه آبخیز سراب هلیل
Figure 8 - Information layers of slope and stream power index in Sarabe Halil watershed



شکل ۹ - لایه‌های اطلاعاتی بافت سطح زمین و مساحت در حوزه آبخیز سراب هلیل
Figure 9 - Information layers of earth surface texture and area in Sarabe Halil watershed



شکل ۱۰ - لایه‌های اطلاعاتی فاصله عمودی از شبکه آبراهه و پراکنش آبکندهای مورد مطالعه در حوزه آبخیز سراب هلیل

Figure 10 - information layers of distribution of the studied gully erosion and vertical distance to channel network index in Sarabe Halil watershed

شاخص توان آبراهه دارای VIF خیلی بالا و بیش از ۱۰ می‌باشند بنابراین از مدل‌سازی حذف شدند و مدل‌سازی با ۱۳ لایه اطلاعاتی مورفومتریک که دارای VIF پایین می‌باشند، انجام شد (جدول ۱).

انجام آزمون هم‌راستایی برای حذف عوامل هم‌راستا یا هم خط بسیار مهم است که با توجه میزان عامل تورم واریانس یا VIF در این تحقیق انجام شده است. نتایج آزمون هم‌راستایی برای ۱۵ لایه اطلاعاتی مورفومتریک نشان داد که شاخص انحنا و

جدول ۱- آزمون هم‌راستایی عوامل مورفومتریک در ایجاد فرسایش آبکندی جهت مدل‌سازی

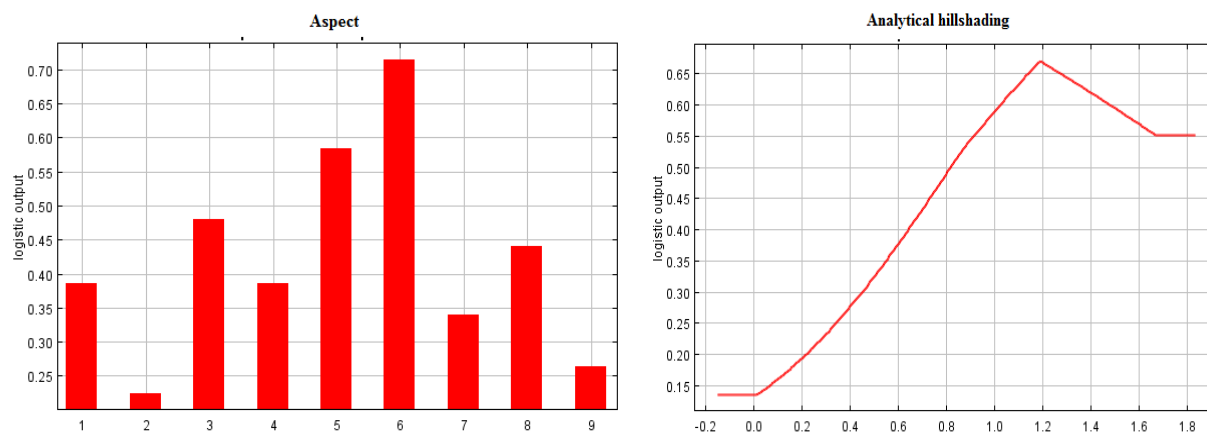
Table 1- Collinearity test of morphometric factors in creating gully erosion for modeling

عوامل مورد مطالعه	عامل تورم واریانس (VIF)	ضریب تحمل (Tolerance)	عوامل مورد مطالعه	عامل تورم واریانس (VIF)	ضریب تحمل (Tolerance)
شاخص تحدب	1.380	0.725	شاخص طبقه‌بندی انحنا	1.148	0.871
شاخص انحنای نیمرخ	1.700	0.588	شاخص رطوبت توپوگرافی	2.031	0.492
انحنای دامنه	1.792	0.558	ارتفاع	1.559	0.641
فاکتور طول - شیب آبراهه	1.838	0.544	بافت سطح زمین	1.758	0.569
شاخص فاصله عمودی از شبکه آبراهه	2.301	0.435	جهت	1.270	0.788
شاخص توان آبراهه	حذف از مدل‌سازی	-	شیب	2.457	0.407
مساحت حوزه آبخیز	1.240	0.806	شاخص انحنا	حذف از مدل‌سازی	-
شاخص آنالیز سایه و روشن	1.409	0.710	-	-	-

جدول ۲- تحلیل PCA در منطقه مورد مطالعه

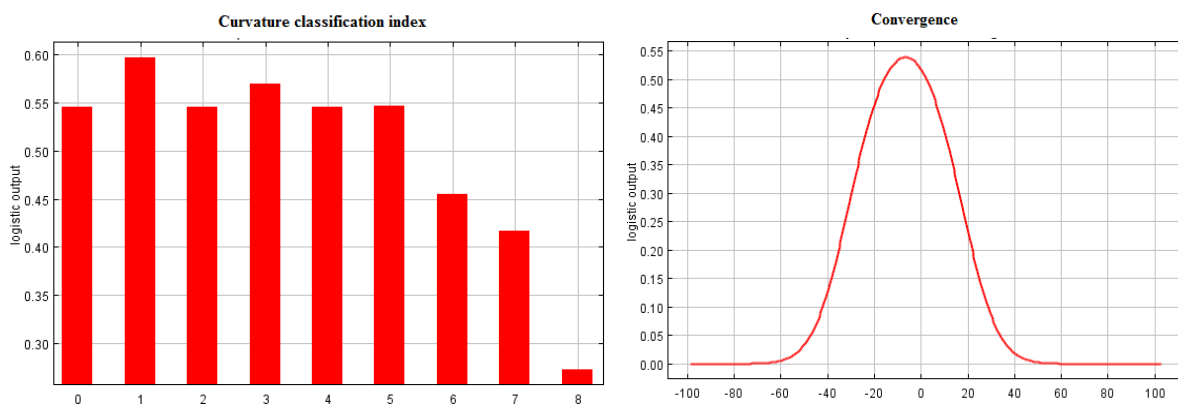
Table 2- PCA analysis in the study area

عوامل مورفومتریک	عامل اول	عامل دوم	عامل سوم	عامل چهارم
وجود و عدم وجود گالی	-0.321	-0.230	0.632	-0.098
شاخص آنالیز سایه و روشن	0.117	-0.023	0.788	0.089
جهت	-0.037	-0.210	-0.669	0.054
شاخص تحدب	0.235	-0.036	-0.138	-0.693
ارتفاع	0.080	0.650	-0.336	-0.112
فاکتور طول - شیب آبراهه	-0.324	0.583	0.134	0.469
انحنای دامنه	0.796	-0.128	-0.017	0.067
شاخص انحنای نیمرخ	-0.721	0.090	0.095	0.053
شیب	0.018	0.845	0.203	-0.133
بافت سطح زمین	0.027	0.800	-0.009	0.043
مساحت حوزه آبخیز	0.007	-0.131	-0.110	0.802
شاخص رطوبت توپوگرافی	-0.770	-0.050	-0.011	0.283
شاخص فاصله عمودی از شبکه آبراهه	0.728	0.341	-0.044	-0.176
شاخص طبقه‌بندی انحناء	0.254	0.032	-0.319	-0.103

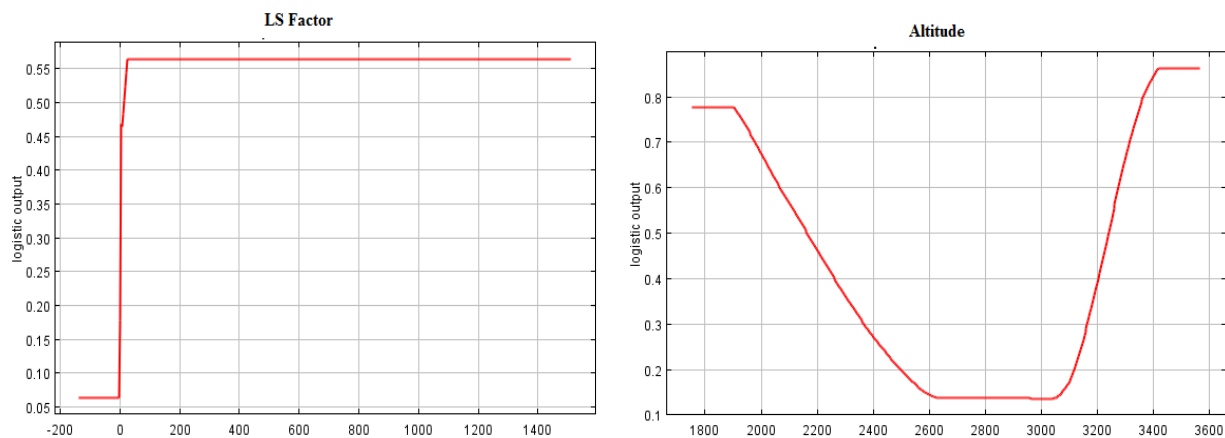


شکل ۱۱- منحنی‌های پاسخ عوامل مورفومتریک جهت و آنالیز سایه و روشن

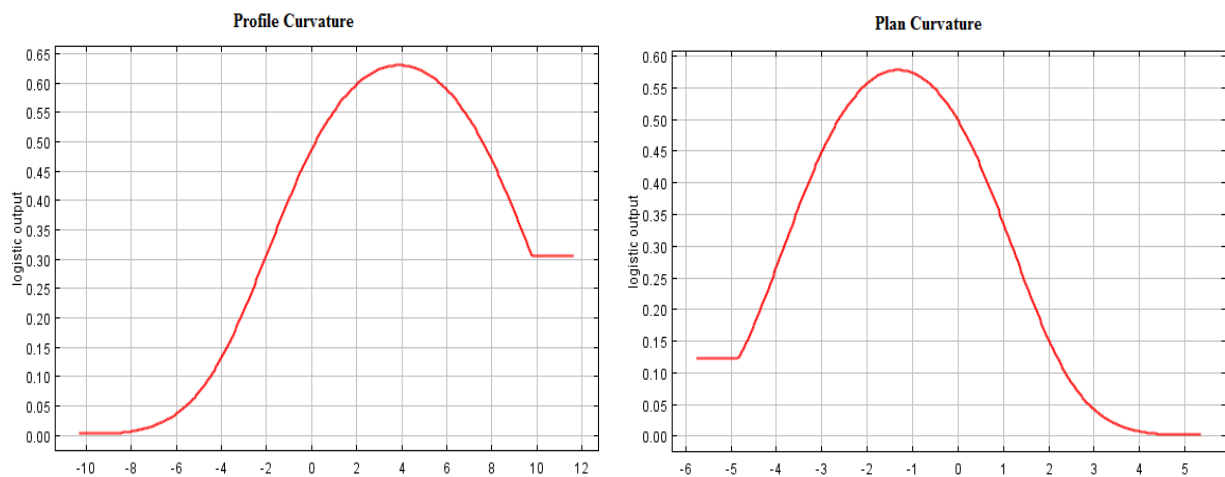
Figure 11- Response curves of morphometric factors aspect and Analytical hillshading



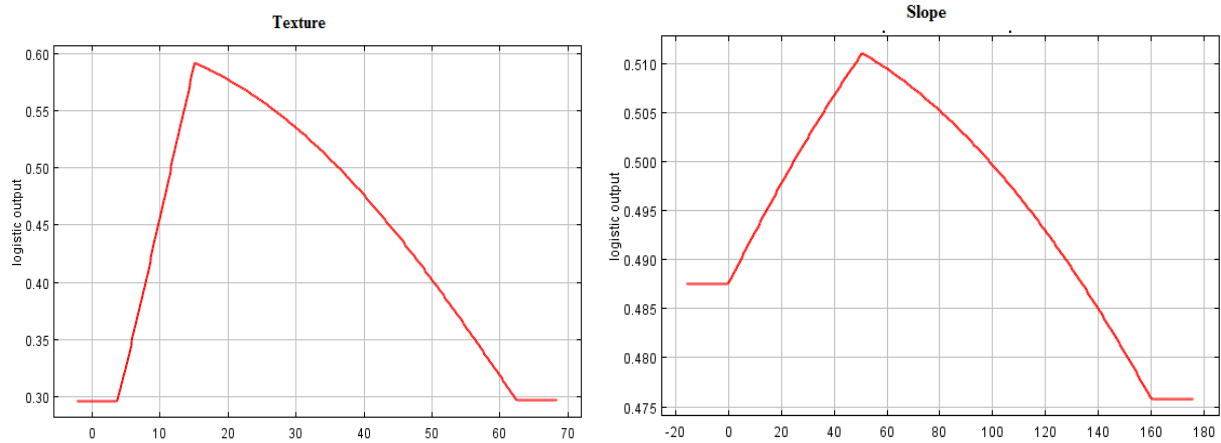
شکل ۱۲- منحنی‌های پاسخ عوامل مورفومتریک تحدب و طبقه‌بندی انحناء
Figure 12- Response curves of convergence and curvature classification index



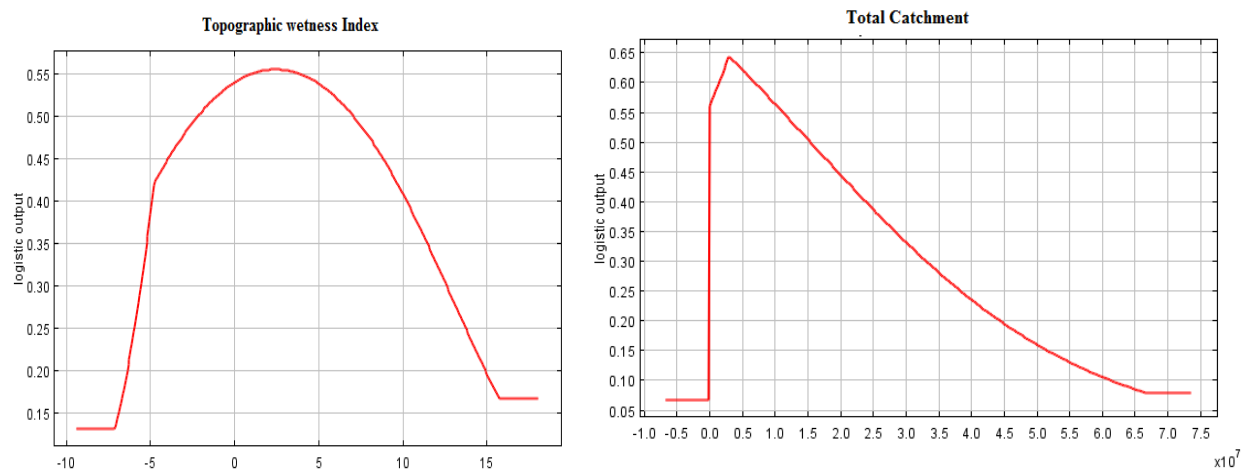
شکل ۱۳- منحنی‌های پاسخ عوامل مورفومتریک فاکتور طول - شیب و ارتفاع
Figure 13- Response curves of LS Factor and Altitude



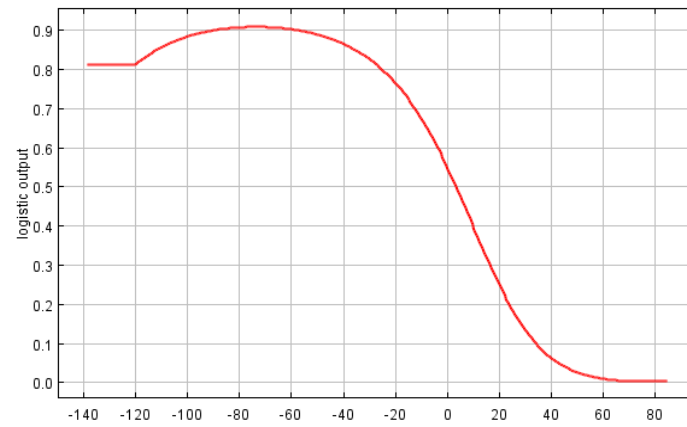
شکل ۱۴- منحنی‌های پاسخ عوامل مورفومتریک انحنای دامنه و نیمرخ انحناء
Figure 14- Response curves of morphometric factors of plan curvature and profile curvature



شکل ۱۵- منحنی‌های پاسخ عوامل مورفومتریک بافت سطح زمین و شیب
 Figure 15- Response curves of morphometric factors of ground surface texture and slope



شکل ۱۶- منحنی‌های پاسخ عوامل مورفومتریک مساحت و رطوبت توپوگرافی
 Figure 16- Response curves of morphometric factors of area and TWI
 Vertical distance to channel network index

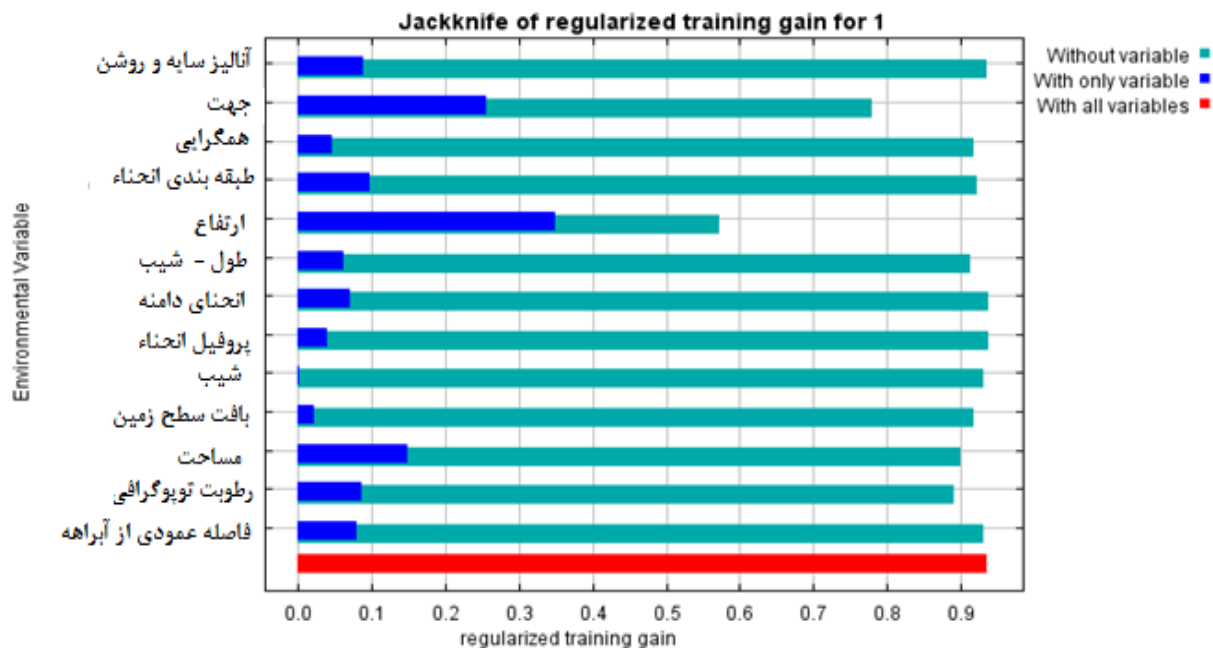


شکل ۱۷- منحنی‌های پاسخ عوامل مورفومتریک فاصله عمودی از شبکه آبراه
 Figure 17- Response curves of morphometric factors vertical distance to channel network index

جدول ۳- سهم مشارکت عوامل مورفومتريک در فرسایش آبکندی در مدل بیشینه آنتروپی

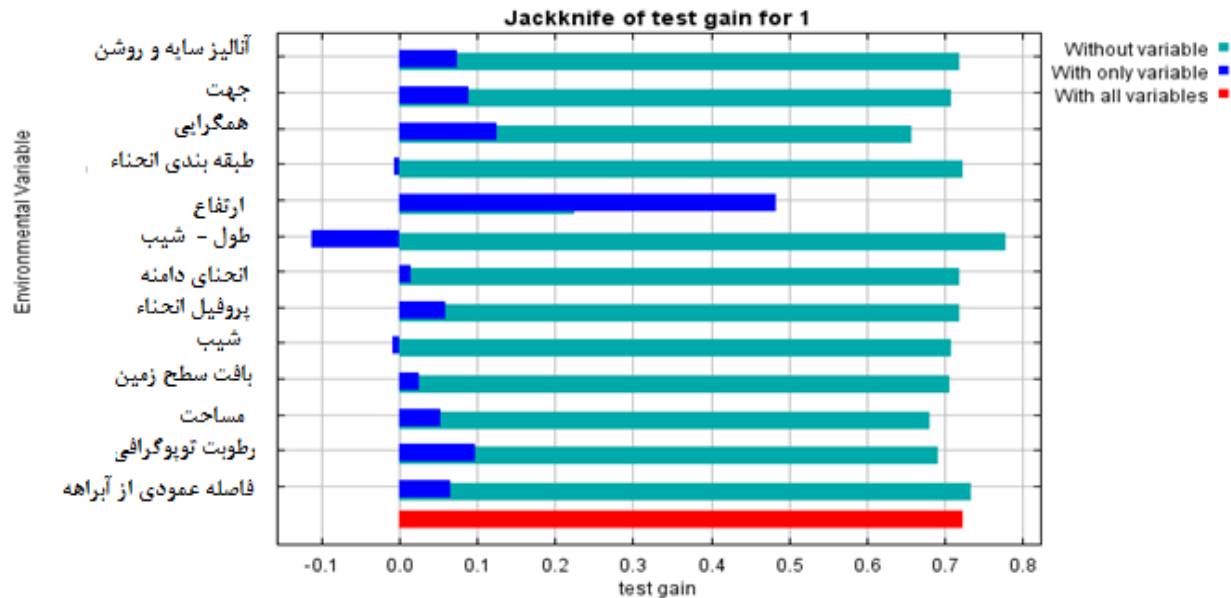
Table 3- Contribution of morphometric factors participation in gully erosion in maximum entropy model

سهم مشارکت (درصد)	عوامل مورد مطالعه	سهم مشارکت (درصد)	عوامل مورد مطالعه
3.8	فاکتور طول - شیب آبراهه	0	انحنای دامنه
3.6	شاخص رطوبت توپوگرافی	0	شاخص انحنای نیمرخ
37.6	ارتفاع	2.8	شاخص تحذب
0.4	شیب	3.4	شاخص طبقه‌بندی انحناء
27	جهت	0.2	شاخص فاصله عمودی از شبکه آبراهه
2.7	بافت سطح زمین	18.3	مساحت حوزه آبخیز
حذف از مدل‌سازی	شاخص انحناء	0	شاخص آنالیز سایه و روشن
-	-	حذف از مدل‌سازی	شاخص توان آبراهه

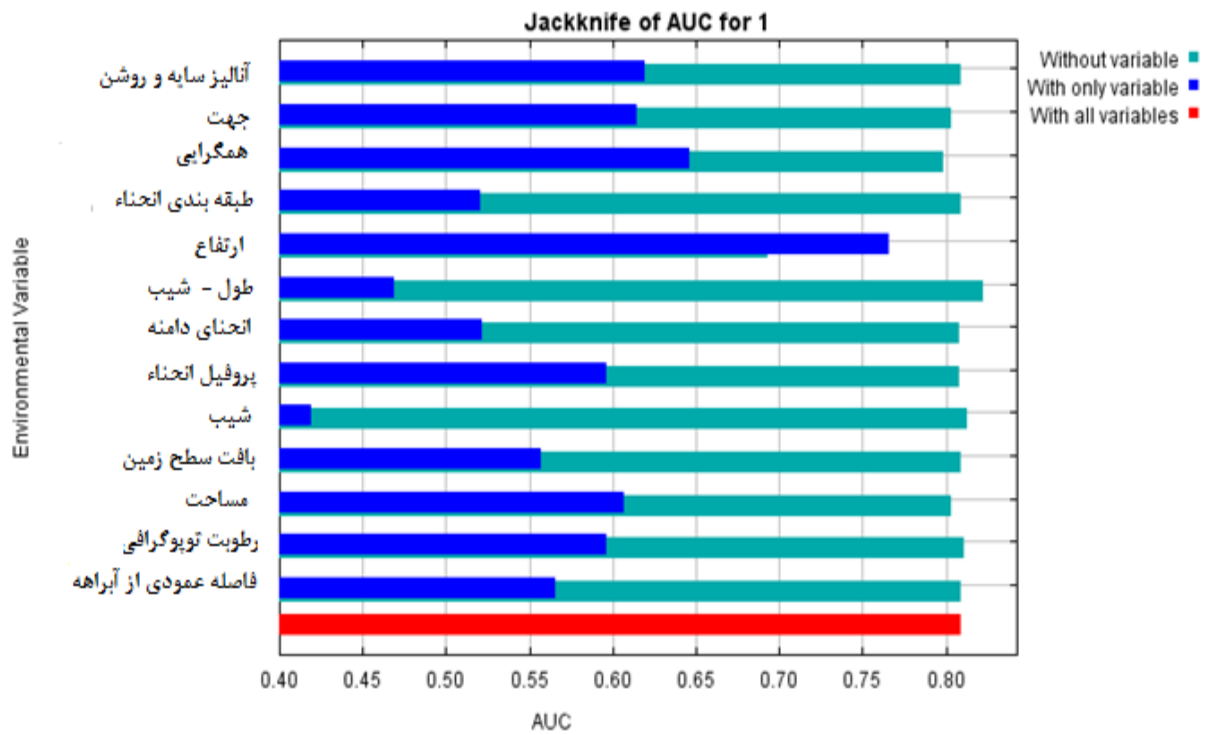


شکل ۱۸- نمودار نتایج آزمون جک نایف برای تعیین اهمیت عوامل مورفومتريک در مرحله واسنجی (آموزش)

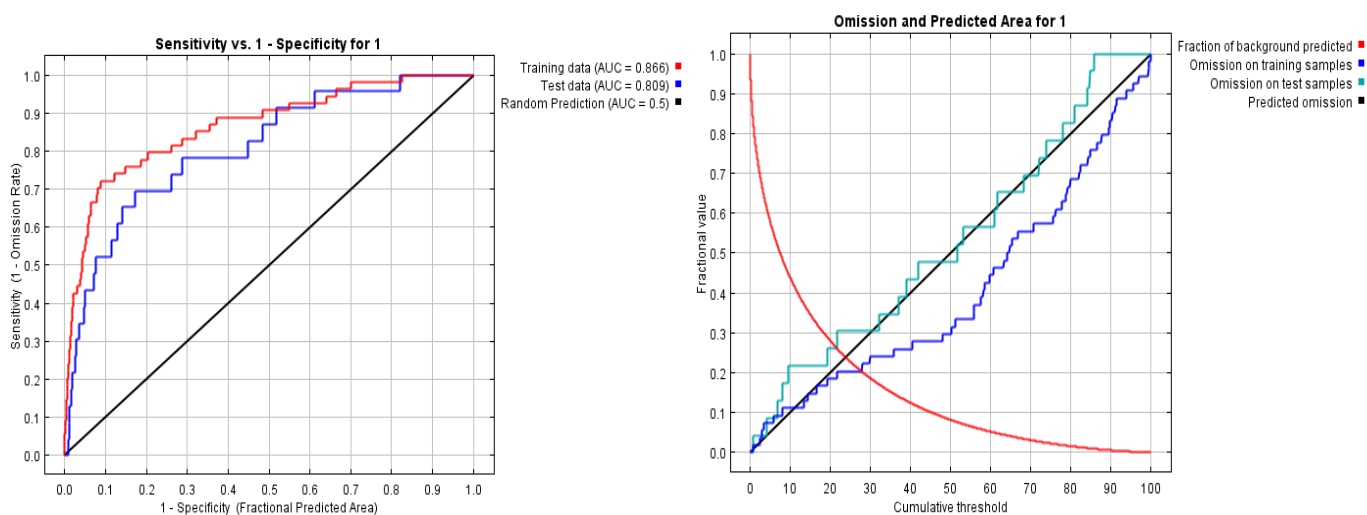
Figure 18- Diagram of Jackknife test results to determine the importance of morphometric factors in calibration stage (training)



شکل ۱۹- نمودار نتایج آزمون جک نایف برای تعیین اهمیت عوامل مورفومتریک در مرحله اعتبار سنجی (تست)
 Figure 19- Diagram of Jackknife test results to determine the importance of morphometric factors in validation stage (test)

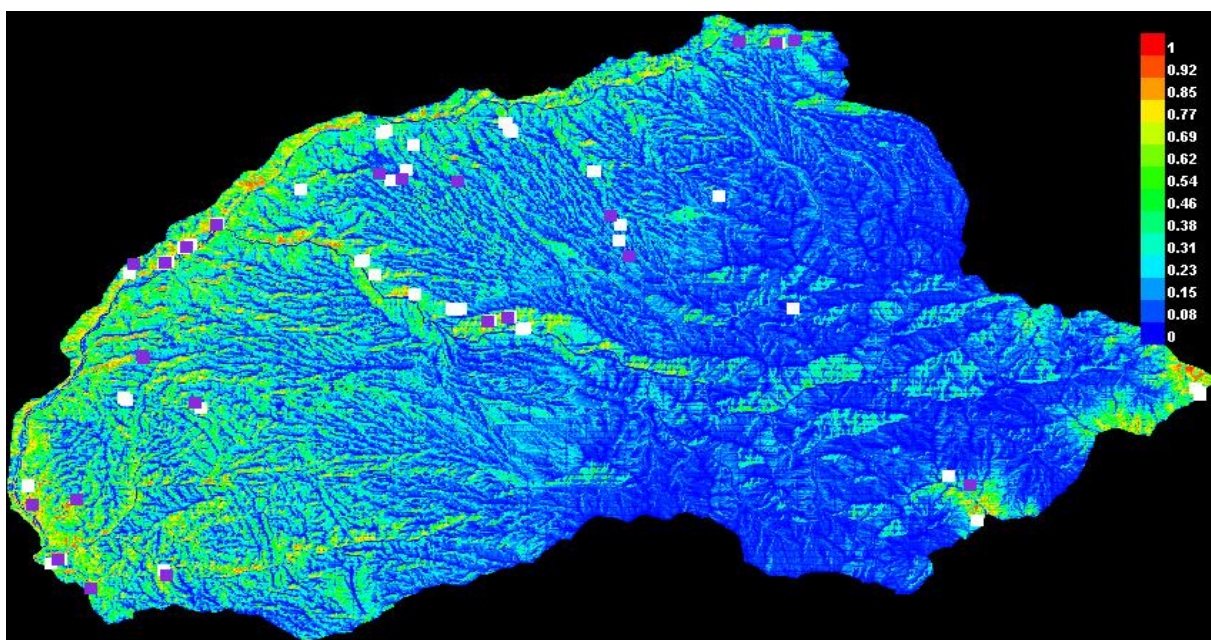


شکل ۲۰- نمودار نتایج آزمون جک نایف برای تعیین سطح زیر منحنی (AUC) عوامل مورفومتریک
 Figure 20- Jackknife test results diagram for determining AUC in morphometric factors



شکل ۲۱- نمودار ROC^۱ در حالت‌های واسنجی و اعتبار سنجی نقشه پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش آبکندی نسبت به عوامل مورفومتریک

Figure 21- ROC diagram in calibration and validation modes of the predicting map of areas prone to gully erosion compared to morphometric factors in maximum entropy model



شکل ۲۲- نقشه مناطق مستعد وقوع فرسایش آبکندی در حوزه آبخیز سراب هلیل بر اساس عوامل مورفومتریک در مدل بیشینه آنتروپی

Figure 22- Map of areas susceptible to gully erosion in Sarabe Halil watershed based on morphometric factors in maximum entropy model

بحث

نتایج تحلیل منحنی پاسخ عامل آنالیز سایه و روشن در مدل بیشینه آنتروپی در رخدادهای فرسایش آبکندی حوزه آبخیز سراب هلیل نشان داد که رخدادهای فرسایش آبکندی تا ۰/۰۱ روند ثابتی دارد سپس از ۰/۰۱ تا ۱/۲ به صورت ملایم افزایش می‌یابد و از ۱/۲ تا ۱/۶۶ کاهش می‌شود و در نهایت روند ثابتی را طی می‌کند. ناهمواری‌هایی که در حوزه سراب هلیل در برابر تابش مستقیم قرار می‌گیرند روشن‌تر و ارتفاعات پشت به آفتاب تاریک‌تر می‌باشند که در حوزه سراب هلیل به علت شرایط ناهمواری زیاد و کوهستانی بودن منطقه آنالیز سایه و روشن نقش برجسته‌ای در افزایش رخدادهای خندقی از خود نشان داد (شکل ۱۱). همچنین نتایج تحلیل منحنی پاسخ جهت دامنه در مدل بیشینه آنتروپی در رخدادهای فرسایش آبکندی نشان داد که رخدادهای آبکندی در جنوب غربی و جنوب بیشترین حالت ممکن است و در جهت شمال شرقی نیز دارای کمترین رخدادهای فرسایش آبکندی است که افزایش رخدادهای آبکندی به میزان کم پوشش گیاهی در دامنه‌های جنوب غربی و جنوب و همچنین به زاویه تابش آفتاب نیز اشاره دارد (شکل ۱۱). نتایج تحلیل منحنی پاسخ شاخص تحدب در مدل بیشینه آنتروپی در رخدادهای فرسایش آبکندی نشان داد که رخدادهای فرسایش آبکندی تا ۶۴- در شاخص تحدب تقریباً ثابت و از ۶۴- تا حدود ۷- افزایش می‌یابد سپس تا ۵۰ کاهش می‌یابد و در ادامه روند ثابتی را طی می‌کند که نشان می‌دهد در دامنه‌هایی که حالت‌های تحدب و تفرع متوسط دارند میزان فرسایش خندقی زیاد است که احتمالاً به ایجاد تشکیل خاک مناسب و همچنین شیب مناسب وقوع فرسایش خندقی اشاره دارد (شکل ۱۲). نتایج تحلیل منحنی پاسخ شاخص طبقه‌بندی انحناء در مدل بیشینه آنتروپی در رخدادهای فرسایش آبکندی نشان داد که رخدادهای آبکندی با افزایش شاخص طبقه‌بندی انحناء تا ۱ افزایش می‌یابد سپس تا ۵ دارای تغییرات اندک کاهش می‌یابد و از ۵ تا ۷ با سرعت ملایم‌تری روند کاهش می‌یابد و از ۷ تا ۸

روند کاهش سرعت بیشتری پیدا می‌کند (شکل ۱۲) که نشان‌دهنده ناهمواری‌های زیاد حوزه مورد مطالعه است که می‌تواند در فرسایش خندقی نقش آفرینی نماید. نتایج تحلیل منحنی پاسخ ارتفاع در مدل بیشینه آنتروپی در رخدادهای فرسایش آبکندی نشان داد که رخدادهای آبکندی تا ارتفاع ۱۹۰۰ روند ثابتی را طی می‌کند سپس با افزایش ارتفاع تا ۲۶۵۰ متر کاهش می‌یابد سپس تا ارتفاع ۳۰۸۰ متری روند ثابتی را طی می‌کند و با افزایش ارتفاع از ۳۰۸۰ تا ۳۴۲۰ رخدادهای فرسایش آبکندی افزایش می‌یابد و از ارتفاع ۳۴۲۰ به بعد روند ثابتی را طی می‌کند که احتمالاً به وجود بارندگی‌های با شدت متوسط در این ارتفاعات و ایجاد پوشش گیاهی مناسب برمی‌گردد که باعث کاهش فرسایش خندقی شده است و با افزایش ارتفاع و در نتیجه افزایش شدت بارندگی بر میزان توسعه فرسایش خندقی افزوده شده است که البته نیازمند فراهم شدن سایر شرایط برای ایجاد و توسعه فرسایش خندقی نیز است چون اگر سایر شرایط مهیا نباشد لزوماً با افزایش ارتفاع، فرسایش خندقی اتفاق نمی‌افتد (شکل ۱۳). نتایج تحلیل منحنی‌های پاسخ فاکتور طول - شیب آبراهه در مدل بیشینه آنتروپی در رخدادهای فرسایش آبکندی نشان داد که رخدادهای آبکندی در فاکتور طول - شیب آبراهه تا صفر روند ثابتی را طی می‌کند سپس تا ۳۰ روند افزایشی دارد و از ۳۰ به بعد روند یکسانی را طی می‌کند (شکل ۱۳) که نشان‌دهنده تأثیر طول شیب و ایجاد شرایط مناسب خاک‌سازی و نقش آن در ایجاد و توسعه فرسایش خندقی برمی‌گردد. نتایج تحلیل منحنی پاسخ شاخص انحنای دامنه در مدل بیشینه آنتروپی در رخدادهای فرسایش آبکندی نشان داد که رخدادهای آبکندی در شاخص انحنای دامنه تا ۴/۸- روند ثابتی را نشان می‌دهد سپس از ۴/۸- تا ۱/۴- یعنی در حالت مقعر روند افزایشی دارد سپس از ۱/۴- تا ۴/۱- یعنی حالت محدب حالت کاهش نشان می‌دهد سپس روند ثابتی را طی می‌کند؛ بنابراین رخدادهای فرسایش خندقی در حالت مقعر به علت وجود خاک مستعد و فرسایش، بالا است (شکل ۱۴). نتایج

تحليل منحنی پاسخ شاخص انحنای نیمرخ در مدل بييشينه آنتروپي در رخداد فرسایش آبکندي نشان داد که رخداد فرسایش آبکندي در شاخص انحنای نیمرخ تا ۴ روند افزایشی دارد سپس از ۴ تا ۹/۹ روند کاهشی دارد سپس روند ثابتی را طی می کند (شکل ۱۴) که نشان دهنده تأثیر زیاد شکل مقعر دامنه و همچنین شکل محدب متوسط در افزایش رخداد خندقی است که نقش وجود خاک و همچنین شستشوی آن در ایجاد فرسایش خندقی مشهود است. نتایج تحليل منحنی های پاسخ شیب در مدل بييشينه آنتروپي در رخداد فرسایش آبکندي نشان داد که رخداد آبکندي نسبت به شیب تا صفر روند ثابتی را طی می کند سپس تا ۵۰ روند افزایشی از خود نشان می دهد از ۵۰ به بعد این روند کاهشی تا ۱۶۰ ادامه دارد و در نهایت نیز روند ثابتی را طی می کند. در شیب های متوسط به علت وجود خاک های مرغوب و نامرغوب با اندکی شرایط مناسب بارندگی رخداد های فرسایش خندقی رخ می دهد ولی در شیب بالا احتمال رخداد فرسایش خندقی به علت نبود خاک کاهش می یابد که در این تحقیق مشهود است (شکل ۱۵). نتایج تحليل منحنی های پاسخ شاخص بافت زمین در مدل بييشينه آنتروپي در رخداد فرسایش آبکندي نشان داد که رخداد آبکندي در شاخص بافت زمین تا ۴ روند ثابتی دارد سپس تا ۱۵ روند افزایشی نشان می دهد سپس از ۱۵ تا ۶۳ روند کاهشی را طی کرده و در نهایت ثابت می شود (شکل ۱۵). زبری و درشتی سطح زمین تا حدی نمی تواند مانع ایجاد فرسایش خندقی شود ولی از حدی که در این مطالعه مشخص شده است به علت مانعی که در برابر بارندگی ایجاد می کند، می تواند در کاهش فرسایش خندقی نقش برجسته ای داشته باشد. نتایج تحليل منحنی های پاسخ شاخص مساحت حوزه آبخیز در مدل بييشينه آنتروپي در رخداد فرسایش آبکندي نشان داد که شاخص مساحت حوزه آبخیز تا صفر روند ثابت از خود نشان می دهد سپس به صورت سریع و ثابت تا ۰/۲۵ حالت افزایشی دارد سپس تا ۶/۷ روند کاهشی از خود نشان داده و ثابت می شود که نشان دهنده میزان تغییرات زهکشی حوزه مورد مطالعه است

و زهکشی های نامناسب نیز در تمام سطح حوزه آبخیز در ایجاد فرسایش خندقی نقش آفرینی می کنند (شکل ۱۶). نتایج تحليل منحنی های پاسخ شاخص رطوبت توپوگرافی در مدل بييشينه آنتروپي در رخداد فرسایش آبکندي نشان داد که شاخص رطوبت توپوگرافی تا ۴- روند ثابتی را طی می کند سپس تا ۲/۵ روند افزایشی را از خود نشان می دهد سپس از ۲/۵ به بعد تا ۱۷ روند کاهشی داشته و سپس ثابت می شود (شکل ۱۶) که نشان دهنده تأثیر رطوبت در ناهمواری های توپوگرافی متوسط در ایجاد فرسایش خندقی است و تأثیر رطوبت در ناهمواری های خیلی زیاد و خیلی کم در ایجاد فرسایش خندقی کم می شود. نتایج تحليل منحنی های پاسخ فاصله عمودی از شبکه آبراهه در مدل بييشينه آنتروپي در رخداد فرسایش آبکندي نشان داد که فاصله عمودی از شبکه آبراهه تا ۱۲۰- روند ثابتی را طی می کند سپس تا ۷۰- روند افزایشی را از خود نشان می دهد سپس از ۷۰- تا ۶۰- روند کاهشی دارد و در ادامه روند ثابتی را طی می کند (شکل ۱۷) که نشان دهنده تأثیر زیاد فاصله عمودی از آبراهه در ایجاد فرسایش خندقی است و هرچه این فاصله کمتر باشد به علت جریان های قشری و زیر قشری که ایجاد می شود تأثیر بیشتری در ایجاد فرسایش خندقی دارد. با توجه به تجزیه و تحليل سهم مشارکت هر یک از عوامل مورفومتريک حوزه آبخیز سراب هلیل در بييشيني فرسایش آبکندي با استفاده از مدل بييشينه آنتروپي، نتایج نشان داد که بييشترين سهم مشارکت مربوط به ارتفاع، جهت و مساحت حوزه آبخیز است که علت این امر احتمالاً به میزان بالای ارتفاع حوزه مورد مطالعه و وسعت زیاد آن و نقشی که در تغییرات بارش ایجاد می شود، اشاره دارد و کمترین سهم مشارکت نیز مربوط به شاخص آنالیز سایه و روشن، انحنای دامنه و انحنای نیمرخ است و شاخص توان آبراهه و انحناء در مدل سازی به کمک مدل بييشينه آنتروپي دخالتی نداشتند (جدول ۳). از آزمون جک نایف برای تعیین میزان اهمیت عوامل مورفومتريک در ایجاد و توسعه فرسایش آبکندي در این تحقیق استفاده شد. نتایج آزمون جک نایف در مرحله واسنجی (آموزش) نشان داد که

حوزه آبخیز مهم‌ترین لایه‌های اطلاعاتی می‌باشند. نتایج نشان داد که عامل اول و دوم به‌طور مشترک بیشترین لایه‌های اطلاعاتی مورفومتریکی در فرسایش آبکندی منطقه مورد مطالعه را پوشش می‌دهد و کمترین لایه‌های اطلاعاتی مورفومتریکی در فرسایش آبکندی را عامل چهارم به خود اختصاص داد (جدول ۲). در مجموع در وقوع فرسایش آبکندی در حوزه آبخیز سراب هلیل با استفاده از آزمون PCA عوامل مورفومتریکی انحنای دامنه، انحنای نیمرخ، رطوبت توپوگرافی، فاصله عمودی از آبراهه، ارتفاع، فاکتور طول - شیب آبراهه، شیب و بافت سطح زمین در ایجاد فرسایش آبکندی مؤثر می‌باشند که با نتایج تحقیقات Conoscenti و همکاران (2013) و همچنین نتایج تحقیقات Vandekerckhove و همکاران (2001)، Kheir و همکاران (2007) که اهمیت عوامل ژئومورفومتریکی را بر روی فرسایش آبکندی قابل توجه دانسته‌اند، مطابقت دارد. نقشه مناطق مستعد فرسایش آبکندی به‌دست‌آمده از مدل پیشینه آنتروپی با استفاده از عوامل مورفومتریکی در حوزه آبخیز مورد مطالعه نشان می‌دهد فرسایش آبکندی در شمال شرق و شرق و جنوب بیشتر دارای احتمال وقوع بین صفر تا ۳۱ درصد است ولی در منتهی‌الیه شرق حوزه و جنوب شرقی فرسایش آبکندی اندکی افزایش می‌یابد و تا احتمال رخداد ۹۲ درصد نیز می‌رسد ولی درصد مساحت آن خیلی اندک است. ولی به سمت مرکز، شمال، شمال غرب، غرب و جنوب غربی حوزه آبخیز مورد مطالعه احتمال وقوع فرسایش آبکندی افزایش می‌یابد و تا ۹۲ درصد و گاهی در بعضی قسمت‌ها تا ۱۰۰ درصد نیز می‌رسد (شکل ۲۲)؛ بنابراین زمانی که صرفاً از عوامل مورفومتریکی برای مدل‌سازی استفاده می‌شود درصد بیشتری از رخداد فرسایش آبکندی را در حوزه مورد مطالعه نمایش می‌دهد. بر همین اساس مدل پیشینه آنتروپی پیش‌بینی مناسبی از احتمال وقوع فرسایش آبکندی از خود نشان داد که با نتایج تحقیقات Rahmati و همکاران (2018) و Shirani and Zakerinejad (2019) مطابقت دارد.

بااهمیت‌ترین عوامل مورفومتریکی در وقوع فرسایش آبکندی، ارتفاع و سپس جهت دامنه می‌باشند و کم‌اهمیت‌ترین عوامل استفاده‌شده برای توسعه مدل در مرحله آموزش نیز شیب دامنه می‌باشند (شکل ۱۸). نتایج آزمون جک نایف در مرحله اعتبارسنجی (تست) نشان داد که بااهمیت‌ترین عوامل مورفومتریکی برای توسعه مدل در وقوع فرسایش آبکندی، ارتفاع می‌باشند و کم‌اهمیت‌ترین عوامل استفاده‌شده برای توسعه مدل فاکتور طول - شیب آبراهه می‌باشند (شکل ۱۹). نتایج آزمون جک نایف با توجه به سطح زیر منحنی (AUC) نشان داد که بااهمیت‌ترین عوامل مورفومتریکی برای توسعه مدل در وقوع فرسایش آبکندی، ارتفاع می‌باشند و کم‌اهمیت‌ترین عوامل مورفومتریکی استفاده‌شده برای توسعه مدل با توجه به سطح زیر منحنی نیز شیب دامنه است (شکل ۲۰). پس از اعتبارسنجی سطح زیر منحنی (AUC) در حالت‌های واسنجی (آموزش) مدل پیشینه آنتروپی ۰/۸۶۶ و در حالت اعتبارسنجی (تست) مدل پیشینه آنتروپی ۰/۸۰۹ به دست آمد؛ بنابراین در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی چون مدل پیشینه آنتروپی دارای سطح زیر منحنی بین ۰/۸ تا ۰/۹ است؛ بنابراین توانایی عالی برای پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش آبکندی از خود نشان داد و مدل عالی فرض می‌شود (شکل ۲۱). برای تعیین مهم‌ترین عوامل مورفومتریکی در ایجاد فرسایش آبکندی حوزه آبخیز سراب هلیل از آزمون PCA استفاده شد که نتایج نشان داد که داده‌های اطلاعاتی مورد استفاده در ۴ گروه طبقه‌بندی شدند که در عامل اول، انحنای دامنه، شاخص انحنای نیمرخ، شاخص رطوبت توپوگرافی و شاخص فاصله عمودی از آبراهه مهم‌ترین لایه‌های اطلاعاتی مؤثر بودند. در عامل دوم نیز ارتفاع، فاکتور طول - شیب آبراهه، شیب و بافت سطح زمین مهم‌ترین لایه‌های اطلاعاتی مؤثر بودند. در عامل سوم نیز شاخص آنالیز سایه و روشن، جهت، شاخص طبقه‌بندی انحنای مهم‌ترین لایه‌های اطلاعاتی می‌باشند و همچنین در عامل چهارم نیز شاخص تحدب و مساحت

نتیجه‌گیری

مطلوب و قابل‌قبولی دست یافت. نتایج تحقیق نشان داد در مجموع در وقوع فرسایش آب‌کندی عوامل مورفومتریک انحنای دامنه، انحنای نیم‌رخ، رطوبت توپوگرافی، فاصله عمودی از آبراهه، ارتفاع، فاکتور طول - شیب آبراهه، شیب و بافت سطح زمین در ایجاد فرسایش آب‌کندی مؤثر می‌باشند. نقشه مناطق مستعد فرسایش آب‌کندی به‌دست‌آمده از مدل بیشینه آنتروپی با استفاده از عوامل مورفومتریک در حوزه آبخیز مورد مطالعه نیز نشان داد که دقت قابل‌قبولی دارد و می‌توان از این روش پژوهشی در حوزه‌های آبخیز مختلف نیز استفاده کرد.

References

- Arabameri, A., Pradhan, B. & Rezaei, K. (2019). Gully erosion zonation mapping using integrated geographically weighted regression with certainty factor and random forest models in GIS. *Journal of environmental management*, 232, 928-942.
- Bayati Khatibi, M., Rajabi, M. & Karami F. (2011). Investigation of topographic thresholds and analyzing role of surface materials on gully development in the hillslope of semi-arid areas, case study: Shoorchay. *Geography and Environmental Planning Journal*, 22(1), 15-34. (In Persian)
- Conoscenti C., Agnesi, V., Angileri, S., Cappadonia, C., Rotigliano, E. & Marker, M. (2013). A GIS-based approach for gully erosion susceptibility modeling: a test in Sicily, Italy. *Environ Earth Sci.* 70(3), 1179-1195.
- Crouch R & Novruzzi T. (1989). Threshold conditions for rill initiation on a vertisol, Gunnedah, N.S.W., Australia, *Catena*. 10, 101-110.
- Dunne T. (2005). Formation and controls of channel network. *Progress in Physical Geography*. 4, 211-239.
- Fielding, A.H. & Bell, J.F. (1997). A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation*, 24(1), 38-49.
- Huang, D., Su, L., Zhou, L., Tian, y. & Fan, H. (2023). Assessment of gully erosion susceptibility using different DEM-derived topographic factors in the black soil region of Northeast China, *International Soil and Water Conservation Research*, 11(1), 97-111.
- Jiarui, Q., Mingming, G., Pengchong, Zh., Xingyi, Zh., Jinzhong, X., Zhuoxin, Ch., Xin, L., Lixin, W. & Zhaokai, W. (2023). Soil erosion resistance factors in different types of gully heads developed in four main land-uses in the Mollisols region of Northeast China, *Soil and Tillage Research*, Volume 230, 105697.
- Kasai, M. (2006). Channel processes following land use changes in a degrading steep, headwater stream in North Island, New Zealand, *Geomorphology* 81, 421-439.
- Kheir R., Wilson, J. & Deng Y. (2007). Use of terrain variables for mapping gully erosion susceptibility in Lebanon. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 1770-1782.
- Mohammad Khan, S.H, Wisey A. & Bagheri, K. (2014). Landslide hazard potential using entropy model, case study (Shirpanah mountainous area in southwest of Kermanshah province). *Geographic Quarterly of Territory*, 44, 89-103. (In Persian)
- Patton, P.C. & Schumm, S.A. (1975). Gully erosion: a threshold phenomenon. *Geology*, 3, 88-90.
- Rahmati, A, Tahmasebipour, N, Haqizadeh, A, Pourghassemi, H, R& Feizizadeh, B. (2018). Evaluation of efficiency of maximum entropy model in predicting

- susceptibility to gully erosion occurrence in Kashkan - Pole-Doukhan watershed, *Watershed Engineering and Management*, 10(4), 738-727.
- Shafeie, A., Khazayi, M., Molayi, A. & Sofi, M. (2011). Study and Comparison of Pedagogical and Morphoclimatical Characteristics of Gullies. *Iranian J. Water and Irrigation Engineering*, 2 (5), 27-38. (In Persian)
- Shirani, K. & Zakerinejad, R. (2019). Zoning of Sensitivity to Gully Erosion Using Maximum Entropy Probabilistic Model (Case Study: South of Isfahan Province). *Soil Conservation and Watershed Management Research Institute*.
- Vandekerckhove, L., Muys, B., Poesen, J., D.E. Weerd, B. & Coppe, N. (2001). A method for dendrochronological assessment of mediumterm gully erosion rates. *Catena*, 45, 123-161.
- Vanmaercke, M., Panagos, P., Vanwalleghem, T., Hayas, A., Foerster, S., Borrelli, P. & Borselli, L. (2021). Measuring, modelling and managing gully erosion at large scales: a state of the art. *Earth Sci. Rev.* 218, 103637.
- Virkkala, R., Marmion, M., Heikkinen, R.K., Thuiller, W. & Luoto, M. (2010). Predicting range shifts of northern bird species: influence of modelling technique and topography. *Acta Oecologica*, 36(3), 269-281.
- Wang, j., Zhang, y., Li, k., Zhang, z. & Chen., Ch. (2022). Gully internal erosion triggered by a prolonged heavy rainfall event in the tableland region of China's Loess Plateau, *International Soil and Water Conservation Research*, Available online 30 December 2022, 4, 610-621.
- Wasson R, J., Olive L, J. & Rosewell C, J. (1996). Rates of erosion and sediment transport in Australia. In: Walling, D., Webb, B. Eds., *Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives*, *IAHS Publ.* 236 p. 139-148.
- Whitford, J.A., Newham, L.T.H., Vigiak, O., Melland, A.R. & Roberts, A.M. (2010). Rapid assessment of gully sidewall erosion rates in data-poor catchments: A case study in Australia, *Geomorphology*, 118 (2010) 330-338.
- Yuan, M., Zhang, Y., Zhao, Y. & Deng, J. (2020). Effect of rainfall gradient and vegetation restoration on gully initiation under a large-scale extreme rainfall event on the hilly Loess Plateau: A case study from the wuding river basin, China. *Science of the Total Environment*, 739, Article140066.
- Zakerinejad, R. & Merker, M. (2014). Prediction of Gully erosion susceptibilities using detailed terrain analysis and maximum entropy modeling: A case study in the Mazayejan Plain, Southwest Iran. *Geogr. Fis. Din. Quat.* 37, 67-76. (In Persian)
- Zhao, Y., Zhang, Y., Yuan, M., Yang, M. & Deng, J. (2021). Estimation of initiation thresholds and soil loss from gully erosion on unpaved roads on China's Loess Plateau. *Earth surface processes and landforms*. <https://doi.org/10.1002/esp.5102>
- Zhou, P. (2008). Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed. *Catena*, 75, 319-325.
- Zhou, X., Wei, Y., He, J. & Cai, CH. (2023). Estimation of gully erosion rate and its determinants in a granite area of southeast China, *Geoderma*, 429, 1, 116223.