



Evaluation of Gully Erosion Sensitivity using Maximum Entropy Model in Shoor River Watershed (Mohr Township)

Aghil Madadi^{a*}, Sayyad Asghari Saraskanroud^b, Saeed Negahban^c, Mehri Marhamat^d

^a Professor, Department of Geomorphology, Faculty of Literature and Humanities, University of Mohagheh Ardabili, Ardabil, Iran

^b Associate Professor, Department of Geomorphology, Faculty of Literature and Humanities, University of Mohagheh Ardabili, Adabil, Iran

^c Associate Professor, Department of Geomorphology, Faculty of Economics, Management and Social Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran

^d PhD Candidate in Geomorphology, University of Mohagheh Ardabili, Ardebil, Iran

Received: 14 April 2022

Revised: 4 May 2022

Accepted: 31 May 2022

Abstract

Gully erosion is one of the most important land degradation processes that leads to reduced land use. The southern and southeastern parts of the Shoor-Mohr basin have been affected by gully erosion. The consequences of this type of erosion include disturbing the ecological balance of the region, endangering the biological resources, which have necessitated the study of gully erosion in the region. The purpose of this study is to prepare a zoning map for gully erosion sensitivity using the maximum entropy model and GIS. To achieve this goal, 15 variables were selected: height, slope, slope direction, distance from waterway, drainage density, distance from road, soil texture, geology, land use, rainfall, distance from fault, vegetation, cross section curvature, flow strength index (SPI), and Topographic Moisture Index (TWI). Linearity test was performed using Variance Inflation Factor and Tolernace indices. Out of 100 selected gullies, 70% were randomly selected for educational data and 30% for classification validation. Bootstrap sampling method was used to run the model. Jackknife test was used to determine the most important variables and ROC curve was used to determine the predictive power of the model. Test results showed alignment between vegetation, fault distance, cross-sectional curvature, SPI, and TWI, they were thus omitted. According to Jackknife test, the variables of height, average annual rainfall, soil texture, drainage density, geology, distance from the road, distance from the river had the greatest effect on gully erosion, respectively. The ROC curve represents 95% accuracy in the validation stage of the model. According to this model, more than 15% of the basin (8445.83 hectares) is very sensitive to gully erosion.

Keywords: Gully Erosion, Zoning, Sensitivity, Maximum Entropy, ROC

*. Corresponding author: Aghil Madadi E-mail: a_madadi@uma.ac.ir Tel: +989143533026

How to cite this Article: Madadi, A., Asgharisaraskanroud, S., Negahban, S., Marhamat, M. (). Evaluation of gully erosion sensitivity using Maximum Entropy model in Shoor river watershed (Mohr Township) . *Journal of Geography and Environmental Hazards*. 11(2), 123-145

DOI:10.22067/geoeh.2022.76707.1228



Journal of Geography and Environmental Hazards are fully compliant With open access mandates, by publishing its articles under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).





Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Geography and Environmental Hazards

Volume 11, Issue 3 - Number 43, Fall 2022


<https://geoeh.um.ac.ir>

 <https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.76707.1228> 

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شماره چهارم و سوم، پاییز ۱۴۰۱، صص ۱۴۵-۱۲۳

مقاله پژوهشی

ارزیابی حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی در حوضه آبخیز رودخانه شور (شهرستان مهر)

 عقیل مددی^۱ - استاد ژئومورفولوژی گروه جغرافیا، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی.

صیاد اصغری سراسکانرود-دانشیار ژئومورفولوژی گروه جغرافیا، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی.

سعید نگهبان- دانشیار ژئومورفولوژی گروه جغرافیا، دانشکده اقتصاد، مدیریت و علوم اجتماعی، دانشگاه شیراز.

مهری مرحمت- دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱/۲۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۲/۱۴ تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۳/۱۰

چکیده

فرسایش خندقی یکی از مهم‌ترین فرآیندهای تخریب زمین است که منجر به کاهش بهره‌برداری از زمین می‌گردد. بخش جنوب و جنوب شرقی حوضه شور مهر تحت تأثیر فرسایش خندقی قرار گرفته است، از پیامدهای این نوع فرسایش می‌توان به بهم خوردن تعادل اکولوژیک منطقه، به خطر افتادن منابع زیستی اشاره کرد که این امر مطالعه در مورد فرسایش خندقی در منطقه را ضروری می‌کند. هدف از این پژوهش تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت به فرسایش خندقی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی و سیستم اطلاعات جغرافیایی است. برای رسیدن به هدف مزبور ۱۵ متغیر شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی، فاصله از جاده، بافت خاک، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، بارندگی، فاصله از گسل، پوشش گیاهی، انحنای مقطع، شاخص قدرت جریان (SPI)، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) انتخاب و تست هم خطی با استفاده از شاخص‌های (Variance Inflation Factor) و (Tolernace) گرفته شد. از ۱۰۰ خندق انتخابی مورد بررسی ۷۰ درصد به صورت تصادفی برای داده‌های آموزشی و ۳۰ درصد برای اعتبار

Email: a_madadi@uma.ac.ir

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۴۳۵۳۳۰۲۶

نحوه ارجاع به این مقاله:

مددی، عقیل؛ اصغری سراسکانرود، صیاد؛ نگهبان، سعید؛ مرحمت، مهری. (۱۴۰۱) ارزیابی حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از

مدل حداکثر آنتروپی در حوضه آبخیز رودخانه شور (شهرستان مهر). جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۱(۳). صص ۱۴۵-۱۲۳

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.76707.1228>

سنجی طبقه‌بندی و از روش نمونه‌برداری Bootstrap برای اجرای مدل استفاده شد. جهت تعیین مهم‌ترین متغیرها از آزمون جک نایف و برای مشخص نمودن قدرت پیش‌بینی مدل از منحنی ROC استفاده شد. نتایج تست هم خطی بین پوشش گیاهی، فاصله از گسل، انحنای مقطع، SPI و TWI وجود داشت در نتیجه حذف شدند. 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.

کلیدواژه‌ها: فرسایش خندقی، پهنه‌بندی، حساسیت، حداکثر آنتروپی، ROC.

۱-مقدمه

یکی از بزرگ‌ترین مشکلات زیست‌محیطی سراسر جهان، فرسایش خاک است (مارارکانی و سامنر، ۲۰۱۷). خاک‌هایی که تحت یک سری فرآیندهای تخریب قرار می‌گیرند مانند فشردگی، از دست دادن مواد مغذی و از دست دادن ظرفیت ذخیره‌سازی آب، منجر به فرسایش خاک می‌شود (پاناگوس و همکاران، ۲۰۱۸). یکی از انواع فرسایش آبی، فرسایش خندقی که دارای مساحت کمتری نسبت به دیگر اشکال فرسایش آبی است اما جزء عوامل اصلی فرسایش خاک در بسیاری از حوضه‌ها به شمار می‌آید. فرسایش خندقی یکی از مشکلات زیست‌محیطی مهم در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌گردد (آزره و همکاران، ۲۰۱۹). از جمله پارامترهای محیطی که می‌توانند بر میزان پتانسیل فرسایش خندقی تأثیر بگذارند از قبیل هیدرولوژیکی، اقلیمی، توپوگرافی، اکولوژیک، زمین‌شناسی و انسانی است (کریمی نژاد و همکاران، ۲۰۱۹). پیامدهای این پدیده می‌تواند به ایجاد انواع خسارات در جاده‌ها، منابع طبیعی، مناطق مسکونی، کشاورزی و زیرساخت‌ها اشاره کرد (ذاکرنژاد و مرکر، ۲۰۱۵). استفاده از الگوریتم‌های ماشینی در تعیین مناطق حساس به فرسایش خندقی دارای کارایی بالاتری نسبت به روش‌های سنتی هستند (رحمتی و همکاران، ۲۰۱۶). از جمله مدل‌های یادگیری ماشینی که به محققان اجازه می‌دهند نقشه حساسیت به فرسایش خندقی را تهیه کنند و با تعیین روابط آماری بین عوامل محیطی و توزیع مکانی خندق‌ها، احتمال مکانی وقوع خندق‌ها را ارزیابی و پیش‌بینی کنند، مدل حداکثر آنتروپی است. در داخل و خارج از کشور مطالعات زیادی در خصوص فرسایش خندقی صورت گرفته است که نشان دهنده این موضوع است که پارامترهای محیطی مختلف می‌تواند بر فرسایش خندقی اثرگذار باشد. علی‌رغم حساسیت بالا حوضه آبخیز شور به فرسایش خندقی و با توجه به خطرات ناشی از این نوع فرسایش برای زیرساخت‌های انسانی و منابع آب‌و خاک، تاکنون مطالعات اندکی با

1 Mararakanye & Sumner

2 Panagos et al

3 Azareh et al

4 Zakernejad & Maerker

استفاده از مدل‌های یادگیری ماشینی در این منطقه صورت گرفته است؛ بنابراین مطالعه حاضر به منظور پر کردن این خلأ انجام شده است. حوضه آبخیز رودخانه شور در شهرستان مهر (استان فارس) بخصوص دشت‌های دامنه‌ی واقع در شرق حوضه تا روستای چاهو به شدت تحت تأثیر فرسایش خندقی قرار دارد. نوسان زیاد بارش در دوره‌های

جدول ۱- برخی مطالعات انجام شده در ایران و جهان

نویسندگان	عنوان	منطقه مورد مطالعه	هدف بررسی	روش	نتیجه‌گیری
ذاکری نژاد (۱۳۹۹)	ارزیابی مدل‌های رقومی ارتفاع جهت تهیه نقشه پتانسیل فرسایش خندقی	حوضه آبخیز سمیرم، جنوب استان اصفهان	تهیه شاخص‌های مختلف توپوگرافی از نقش‌های رقومی ارتفاع و انتخاب بهترین شاخص و بهترین مدل جهت پهنه‌بندی فرسایش خندقی	مدل مکسنت و سیستم اطلاعات جغرافیایی	مدل ارتفاعی SRTM دارای دقت بالاتری نسبت به ASTER است. نقشه پهنه‌بندی نشان داد که نواحی جنوبی و جنوب غربی دارای پتانسیل بالایی برای فرسایش می‌باشند.
شهبازی و وکیلی تجربه (۱۴۰۰)	اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی و تعیین پهنه‌های حساس	استان کرمانشاه	پهنه‌بندی عرصه‌های خندق و اولویت‌بندی آبکندها از نظر میزان خسارت و تعیین عوامل مؤثر در ایجاد و گسترش خندق‌ها	مدل مکسنت	لایه‌های لیتولوژی، شیب، ارتفاع و تراکم آبراهه به ترتیب مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر حساسیت وقوع فرسایش خندقی است.
آزده و همکاران (۲۰۱۹)	مدل‌سازی حساسیت به فرسایش خندقی	منطقه چوار، شمال استان ایلام	تعیین مهم‌ترین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده فرسایش خندقی	بررسی کاربرد ضریب اطمینان و حداکثر آنتروپی	نقشه‌های تهیه شده از مدل حداکثر آنتروپی دارای دقت بالاتری نسبت به ضریب اطمینان دارد. همچنین شیب، فاصله از رودخانه، سنگ‌شناسی و کاربری اراضی جز تأثیرگذارترین عوامل بر ایجاد فرسایش در منطقه به شمار می‌آید.
برنینی و همکاران ^۱ (۲۰۲۱)	ارزیابی حساسیت فرسایش خندقی	حوضه رودخانه مخمازی فوقانی، کشور آفریقای جنوبی	شناسایی و ارزیابی عوامل مؤثر عوامل محرک فرسایش خندقی	مدل مکسنت	تقسیم خندق‌ها به دو گروه: گروه A: نهشته‌های شیب کولوویال را برش می‌دهند گروه B: در نواحی پایین دره متمرکز شده‌اند که با رسوبات تراس کولوویال یا آبرفتی با پالئوسول‌های درونی مشخص شده است.

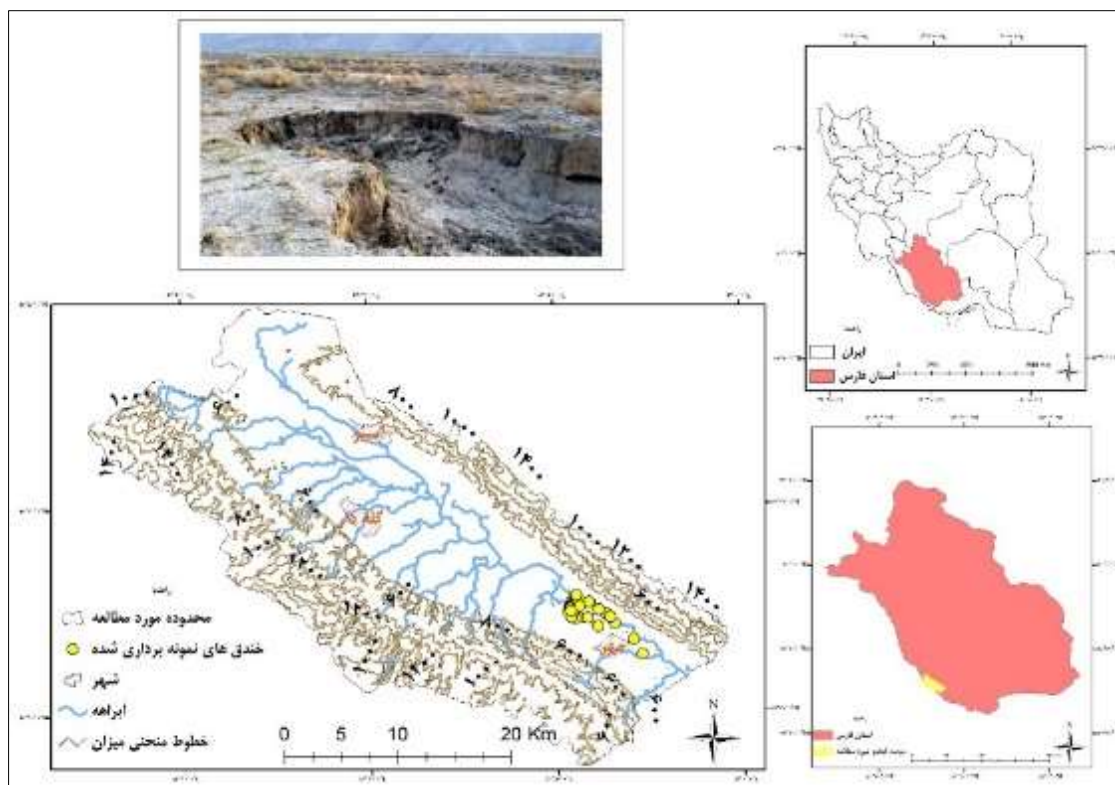
نویسندگان	عنوان	منطقه مورد مطالعه	هدف بررسی	روش	نتیجه گیری
جاویدان و همکاران (۲۰۲۱)	ارزیابی نقشه‌های خطر (سیل)، رانش زمین و فرسایش خندقی)	حوضه آبخیز گرگانرود، استان گلستان	بررسی توانایی مدل Maxent برای پیش‌بینی وقوع سیل، رانش زمین و فرسایش خندقی و برای درک بهتر روابط بین این فرآیندها و عوامل کتر کننده آنها	مدل مکسنت	عوامل ایجاد سیل: تراکم رودخانه، فاصله از رودخانه و ارتفاع. عوامل ایجاد زمین لغزش: سنگ‌شناسی، ارتفاع، و میانگین بارندگی سالانه و عوامل ایجاد فرسایش خندقی: میانگین سالانه بارندگی، ارتفاع و سنگ‌شناسی بوده است. با ترکیب نقشه‌های حساسیت به سیل، زمین لغزش و فرسایش خندقی، یک نقشه یکپارچه چند خطر ایجاد شده است.

مختلف، ضعف یا نبود پوشش گیاهی سطح زمین در بعضی نقاط باعث شده خندق‌های زیادی شکل گیرد. همچنین به سبب دخالت انسان مانند چرای مفرط، شخم زدن زمین‌ها در جهت شیب، حرکت وسایل نقلیه و ماشین‌آلات کشاورزی در زمین‌ها و مراتع و غیره فعالیت این پدیده را به مرحله بحرانی رسانده است (شکل ۱). در این تحقیق با بررسی برخی عوامل محیطی و انسانی سعی بر آن شده است که عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی شناسایی و با تهیه نقشه حساسیت به فرسایش خندقی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی و سیستم اطلاعات جغرافیایی به پیش‌بینی دقیق‌تر و از خسارات ناشی از آن تا حد امکان جلوگیری شود. بررسی عوامل مؤثر بر ایجاد و گسترش، مدل‌سازی و تغییرات ابعاد هندسی خندق‌ها با روش‌های مختلف صورت گرفته است که هرکدام دارای نتایج متفاوتی از یکدیگر بوده‌اند؛ اما آنچه که بین این نتایج مشترک بوده است رشد خندق‌ها و تخریب خاک در مناطق مختلف می‌باشد که به برخی از آن‌ها اشاره شده است (جدول ۱).

۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه مورد پژوهش

حوضه آبخیز رودخانه شور با مساحت ۱۰۱۳۵۰ هکتار و میانگین ارتفاعی ۱۰۵۰/۵ متر در قسمت شرق و شمال شرقی شهرستان مهر، در جنوب استان فارس واقع شده است. این حوضه بین ۲۷ درجه، ۲۷ دقیقه و ۲۲ ثانیه تا ۲۷ درجه، ۴۹ دقیقه و ۴۱ ثانیه عرض شمالی و ۵۲ درجه، ۲۴ دقیقه و ۵۸ ثانیه تا ۵۲ درجه، ۵۹ دقیقه و ۱۴ ثانیه طول شرقی قرار گرفته است. شکل ۱ موقعیت محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و نمونه‌ی از خندق‌های ایجاد شده در منطقه

۲-۲- مواد و روش

۲-۲-۱- انتخاب عوامل موثر بر فرسایش خندقی

خروجی حوضه (جنوب و جنوب شرقی) آبرفت‌ها به تدریج که از شدت جریان آب و شیب زمین کاسته می‌شود از حرکت باز می‌ماند و در سطح زمین رسوب می‌کند. این قسمت دارای حساسیت بالا به فرسایش خندقی تحت تأثیر برخی عوامل طبیعی از جمله شرایط اقلیمی (بارندگی)، خاک (رسی و سیلتی، شنی لومی) و برخی عوامل مرتبط با انسان از جمله چرای بی‌رویه و اعمال نامناسب کشاورزی است. به طوری که فرسایش خندقی مهم‌ترین ویژگی در این قسمت حوضه است. مقدار بارندگی در این قسمت از حوضه بین ۱۷۰-۱۸۰ میلی‌متر است که نشان دهنده این موضوع است که در فصل خشک ترک‌ها و شکاف‌های در سطح زمین ایجاد می‌گردد و با ایجاد بارش‌های ناگهانی و با شدت زیاد، آب وارد این شکاف‌ها شده و به درون زمین نفوذ می‌کند و در جهت شیب زمین و با انحلال مواد محلول موجب شکل‌گیری پیه‌های زیر زمینی می‌شود که عامل مهمی در انتقال مواد انحلال‌پذیر و رسوب به شبکه‌های جاری می‌گردد.

در زمینه انتخاب عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی دستورالعمل خاصی وجود ندارد؛ بنابراین براساس روش کار محققان قبلی در این تحقیق ۱۵ متغیر شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی، فاصله از جاده، بافت خاک، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، بارندگی، فاصله از گسل، پوشش گیاهی، انحناى مقطع، شاخص قدرت جریان (SPI)، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) انتخاب شد. در مرحله بعد تست هم خطی بین پارامترها به وسیله دو شاخص ضریب تحمل (tolerance) و عامل تورم واریانس (variance inflation factor) صورت گرفت. 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^۱، ۲۰۱۸). پس از انجام تست هم خطی ۱۰ پارامتر شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، تراکم آبراهه، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، بافت خاک و مقدار بارندگی جهت تعیین مناطق حساس به فرسایش خندقی انتخاب شد. مقدار بارندگی با تغییرات ارتفاع تغییر می‌کند که موجب تغییر در میزان هوازدهی و میزان نفوذ آب خواهد شد و از این طریق فرسایش خندقی را کنترل می‌کند (رحمتی و همکاران، ۲۰۱۷). این لایه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ی Landsat-۸ در ابعاد ۳۰ در ۳۰ تهیه گردید. با کاهش شیب، سرعت حرکت رواناب‌های سطحی کاهش می‌یابد و موجب تجمع و نفوذ این رواناب‌ها می‌گردد در نتیجه منطقه را برای فرسایش خندقی آماده می‌کند (هانگ شن و همکاران^۲، ۲۰۱۴). این لایه با استفاده از نقشه DEM در محیط Arc GIS و با استفاده از تابع Slope تهیه شد. جهت شیب می‌تواند تبخیر و تعرق، پوشش گیاهی و تابش خورشید را کنترل کند؛ بنابراین می‌تواند به عنوان یک پارامتر مهم در نظر گرفته شود. این لایه در محیط ArcGIS و با استفاده از تابع aspect از نقشه DEM استخراج گردید. آبراهه‌ها با ایجاد شیارها و شکافتن لایه‌های به هم پیوسته خاک، موجب افزایش نفوذ آب‌های سطحی می‌گردد. همچنین موجب ناپایداری دامنه‌ها و تغییر شیب در منطقه می‌گردند که این امر باعث ایجاد سطوح ضعیف بر روی دامنه‌ها است و سازه‌های اطراف را تحت تأثیر این پدیده قرار می‌گیرد (بهیاری و همکاران، ۱۳۹۶). این لایه در محیط ArcGIS و با استفاده از تابع Euclidean distance تهیه شد. جاده باعث تمرکز رواناب سطحی، انحراف رواناب متمرکز به سایر حوضه‌ها و افزایش اندازه حوضه می‌شود که دلایل اصلی توسعه خندق پس از ساخت جاده است. برای بررسی ارتباط بین وقوع خندق با فاصله از جاده در محیط ArcGIS و با استفاده از تابع Euclidean distance اقدام به تهیه نقشه شد. در این نقشه، فاصله اقلیدسی برای هر یک از راه‌های داخل حوضه تعریف شد. تراکم زهکشی تحت تأثیر بارندگی، زمین‌شناسی، نوع پوشش گیاهی، شیب و خاک حوضه آبخیز است (ماناپ و همکاران^۳، ۲۰۱۳). این پدیده موجب کاهش نفوذپذیری، رواناب بیشتر و در نتیجه حساسیت بیشتر منطقه به فرسایش خندقی می‌گردد (کاناستی و همکاران^۴، ۲۰۱۸). این لایه در محیط Arc GIS و با استفاده از

1 Pandey et al

2 Hongchun et al

3 Manap et al

4 Conoscenti et al

تابع Line Density تهیه شد. سنگ‌شناسی و سازندهای موجود عامل بسیار مهمی بر فرایندهای سطح زمین و توسعه شکل‌های فرسایشی مانند خندق‌ها تأثیر می‌گذارد (اگنسی و همکاران، ۲۰۱۱). این لایه از نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور تهیه شد. نوع کاربری اهمیت بالایی در مقدار نفوذ، تبخیر و فرسایش دارد (جعفرزاده و همکاران، ۱۳۹۹). به‌طور کلی کاربری اراضی یک محرک مهم ایجاد خندق و تخریب زمین است. برای تهیه این لایه ابتدا تصاویر ماهواره Landsat 8 از سایت زمین‌شناسی ایالات متحده دانلود شد. سپس در محیط نرم‌افزاری ENVI 5.3 مرحله پیش‌پردازش که شامل تصحیح رادیومتریکی است، انجام شد. پس از آن تصحیح اتمسفری با استفاده از روش Flash Atmospheric Correction انجام شد. بعد از اعمال روش‌های فوق منطقه مورد مطالعه از کل تصویر جدا شد. برای اینکه پدیده‌ها از وضوح بالاتری برخوردار باشند با استفاده از دستور Gram Schmidt Pan Sharpening قدرت تفکیک ۳۰ متری لندست ۸ با به‌کارگیری باند پانکروماتیک ۱۵ همه باندهای مالتی اسپکترال به ۱۵ متری تبدیل شد. پس از انجام پیش‌پردازش‌ها برای نمونه‌برداری بهتر و دقیق از نرم‌افزار Google Earth استفاده شد. بعد از تصحیحات انجام شده بر روی تصاویر، نقشه کاربری اراضی استخراج گردید. نرخ و الگوهای توسعه خندق به شدت توسط خواص خاک کنترل می‌شود. فرسایش‌پذیری خاک تحت تأثیر بافت خاک و سایر خصوصیات فیزیکی خاک است (اورسوالد و همکاران، ۲۰۱۴). این لایه از اداره مرکز تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس دریافت شد. بر اساس این نقشه منطقه، دارای ۶ نوع کلاس بافت خاک است. از جمله پارامترهای اقلیمی که نقش مهمی در وقوع فرسایش خندقی دارد، بارش است (خطیبی، ۱۴۰۰). متوسط بارش سالانه حوضه، بر اساس آمار بارندگی استخراج شده از سازمان آب منطقه استان فارس، با استفاده از ۸ ایستگاه باران‌سنجی و سینوپتیک و دوره آماری ۱۳۹۹-۱۳۷۵ آماده و نقشه با استفاده از تابع IDW در نرم‌افزار ArcGIS درون‌یابی شد (جدول ۲).

جدول ۲- داده‌های مورد استفاده به منظور تعیین مناطق حساس به فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه

روش تهیه	داده
تصاویر ماهواره لندست ۸ در ابعاد ۳۰ در ۳۰	مدل رقومی ارتفاعی (DEM)
استفاده از نقشه DEM و تابع slope در نرم‌افزار ArcGIS	شیب
استفاده از نقشه DEM و تابع aspect در نرم‌افزار ArcGIS	جهت شیب
استفاده از نقشه توپوگرافی و نقشه DEM و استفاده از تابع Euclidean distance در نرم‌افزار ArcGIS	فاصله از آبراهه و فاصله از جاده
استفاده از نقشه DEM و تابع Line Density در نرم‌افزار ArcGIS	تراکم آبراهه

1 Agnesi et al

2 Auerswald et al

روش تهیه	داده
با استفاده از نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰	سنگ‌شناسی
تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ در ابعاد ۳۰ در ۳۰	کاربری اراضی
اداره مرکز تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس	بافت خاک
از طریق ایستگاه‌های باران‌سنجی و تابع IDW در نرم‌افزار Arc GIS	متوسط بارندگی

۲-۲-۲- ثبت موقعیت خندق

در پژوهش حاضر برای شناسایی پهنه‌های حساس به فرسایش خندقی، بازدیدهای گسترده میدانی انجام شد و موقعیت خندق توسط جی پی اس (GPS) ثبت و سپس وارد نرم‌افزار Arc GIS 10.5 شد در مجموع ۱۰۰ خندق در منطقه به صورت تصادفی انتخاب و ثبت گردید.

۳-۲-۲- مدل حداکثر آنتروپی (Maxent)

Maxent یک روش یادگیری ماشینی مبتنی بر الگوریتم‌های آماری با یک فرمول ریاضی ساده و دقیق است (فیلیس و همکاران^۲، ۲۰۰۶). این مدل حساسیت هر سلول شبکه را به‌عنوان تابعی از متغیرهای محیطی آن سلول شبکه بیان می‌کند. به این ترتیب، امکان پیش‌بینی مناطق تحت تأثیر فرسایش خندقی و ارزیابی حساسیت منطقه را فراهم می‌کند. همچنین از نظر عملکرد این مدل بهتر از سایر الگوریتم‌های آماری است. برای ساخت مدل آنتروپی حداکثر، لازم است تمامی نقشه‌های متغیرهای محیطی ورودی به مدل، با فرمت ASCII در نرم‌افزار Arc GIS تهیه گردد. تمامی نقشه‌های موجود برای ورود به مدل باید موقعیت مکانی، اندازه سلول، تعداد سلول و دارای سیستم مختصات یکسانی باشد تا مدل بتواند انطباق کامل را انجام دهد (زارع چاهوکی و همکاران، ۱۳۹۷). از آخرین نسخه به‌روزرسانی شده 3.4.4 این مدل در این پژوهش استفاده گردید. برای کار با این نرم‌افزار با تعدادی ورودی، خروجی و پارامتر روبرو هستیم. اگر داده‌ها از فایل اکسل استفاده گردد فرمت داده‌ها حتماً باید CSV باشد. در این روش از ۷۰ درصد نقاط حضور به‌صورت تصادفی برای داده‌های آموزشی و ۳۰ درصد باقیمانده برای ارزیابی نتایج مدل استفاده شد خروجی این مدل اصولاً به‌صورت ۳ فایل می‌باشد: ۱- یک فایل با پسوند html که اصلی‌ترین فایل خروجی می‌باشد و شامل محاسبه‌های آماری، نقشه‌ها، تصویر مدل و پیوند فایل‌های دیگر می‌باشد، همچنین شامل پارامترها و تنظیماتی است که برای جدا کردن مدل استفاده شده است. ۲- یک فایل با پسوند asc که شامل نقشه پیش‌بینی‌ها با قالب (format ascii)، یک فایل با پسوند Png که شامل تصویر پیش‌بینی توزیع می‌باشد. ۳- نقشه‌های مختلف و نمودارها در دایرکتوری Plot ذخیره می‌شوند. در نظر داشته باشید نقشه پیش‌بینی ساخته شده توسط

1 Global Positioning System

2 Philips et al

Maxent یک نقشه احتمالی پیوسته است و این احتمال بین صفر (عدم حساسیت) و یک (حساسیت بسیار بالا) است. همچنین آزمون جک نایف متغیرهای مؤثر را تعیین و سهم هریک از این عوامل را نشان می‌دهد.

۲-۳-۱- روش نمونه برداری

روش بوت استرپ (Bootstrap): یکی از تکنیک‌های باز نمونه‌گیری طبقه‌بندی شده و برای تعیین خطای استاندارد و فاصله اطمینان به کار گرفته می‌شود. این روش در حین سادگی اما یکی از روش‌های قوی نمونه‌گیری مونت کارلو محسوب می‌شود که عموماً برای دقت آماری و یا برآورد S توزیع از پارامترهای نمونه استفاده می‌شود. در این روش نمونه تصادفی اولیه را به عنوان چارچوب جامعه به شمار می‌آورد و بعد نمونه‌های مونت کارلو را از خود نمونه اولیه با جایگذاری انتخاب می‌کند. عموماً هیچ فرض پارامتری بر جامعه که از آن نمونه‌برداری شده است، وجود ندارد به همین دلیل از یک توزیع یکنواخت گسسته بر روی نمونه‌های تصادفی در نظر می‌گیرند. به عبارتی دیگر این روش، نمونه‌گیری از یک نمونه می‌باشد که با تکیه بر یک نمونه مشخص انجام می‌گیرد که آن نمونه مشخص تنها منبعی است که پژوهشگر برای پژوهش در اختیار دارد و همین امر بر اهمیت این روش می‌افزاید (پراساد و همکاران، ۲۰۰۸). دو پیش فرض مهم این روش شامل ۱- نمونه، نمونه معتبری از جمعیت است. ۲- نمونه را با جایگزینی از نمونه اصلی می‌گیرد که هر نمونه گرفته شده با این روش، دارای توزیع جمعیت برابر هستند ولی هر نمونه مستقل از نمونه‌های دیگر است. اگر تعداد اطلاعات حضور کم باشد و بخواهید با تکرار کم انجام دهید، این روش بهترین گزینه خواهد بود. در این روش N نمونه با جایگذاری انتخاب می‌گردد. احتمال انتخاب یک نمونه $\frac{1}{N}$ است. احتمال اینکه یک نمونه N بار انتخاب نشود برابر با 0.368 است.

رابطه (۳):

$$\left(1 - \frac{1}{N}\right)^N \approx e^{-1} = 0.368$$

در نتیجه در هر بار مجموعه آموزشی فقط ۶۳ درصد داده‌ها را در بر می‌گیرد. از آنجایی که تعداد اطلاعات کم بوده است به همین علت این روش انتخاب گردید.

۲-۳-۲- ارزیابی مدل (Maxent)

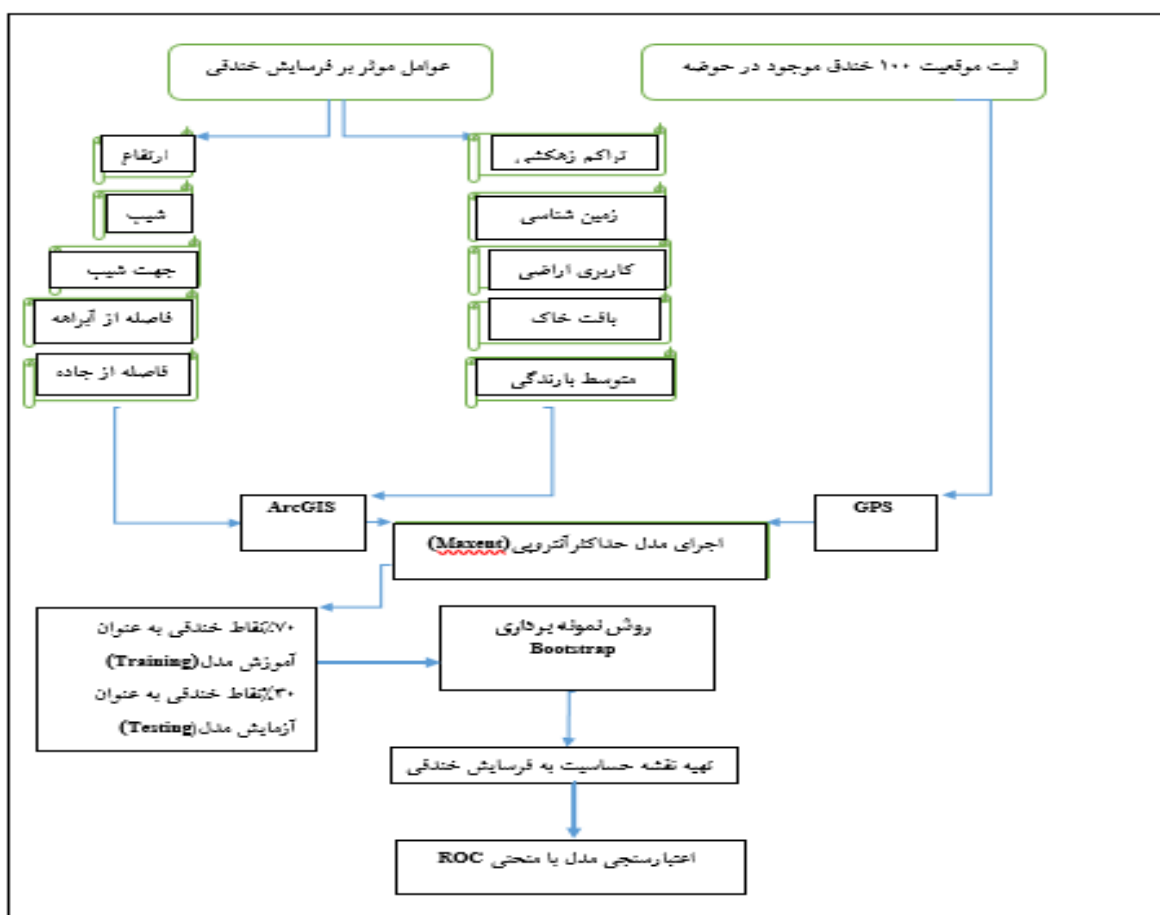
مدل‌ها بدون تأیید از اعتبار علمی برخوردار نیستند. منحنی‌های مشخصه عملکرد گیرنده (ROC^2) معمولاً برای انجام ارزیابی‌های دقت پیش‌بینی استفاده می‌شوند. این منحنی یک شاخص مؤثر برای کیفیت مدل‌های قطعی و احتمالی و سیستم‌های پیش‌بینی است. افرادی همچون (آنجلیری و همکاران، ۲۰۱۶) برای ارزیابی و عملکرد مدل‌ها

1 Prasad et al

2 Receiver Operating Characteristic

3 Angileri et al

در تعیین توانایی پیش‌بینی وقوع درستی خندق‌ها از منحنی ROC استفاده کردند. مساحت زیر منحنی (AUC) به‌عنوان یک اقدام عملکردی مستقل از آستانه در نظر گرفته شده است، که برای اندازه‌گیری صحت پیش‌بینی‌های مکانی به کار گرفته شده است (عمر و همکاران^۱، ۲۰۱۴). مقادیر AUC از ۰/۵ تا ۱ می‌باشد. مقادیر پیش‌بینی دقت مدل‌هایی که از منحنی‌های AUC استفاده می‌کنند به شرح زیر تعیین می‌شوند: ۰/۶-۰/۵ (ضعیف)، ۰/۷-۰/۶ (متوسط)، ۰/۸-۰/۷ (خوب)، ۰/۹-۰/۸ (بسیار خوب)، ۱-۰/۹ (عالی) است (عربامری، ۲۰۱۹). مراحل اجرای کار در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲- فرآیند پژوهش

1 Area Under Curve

2 Umar et al

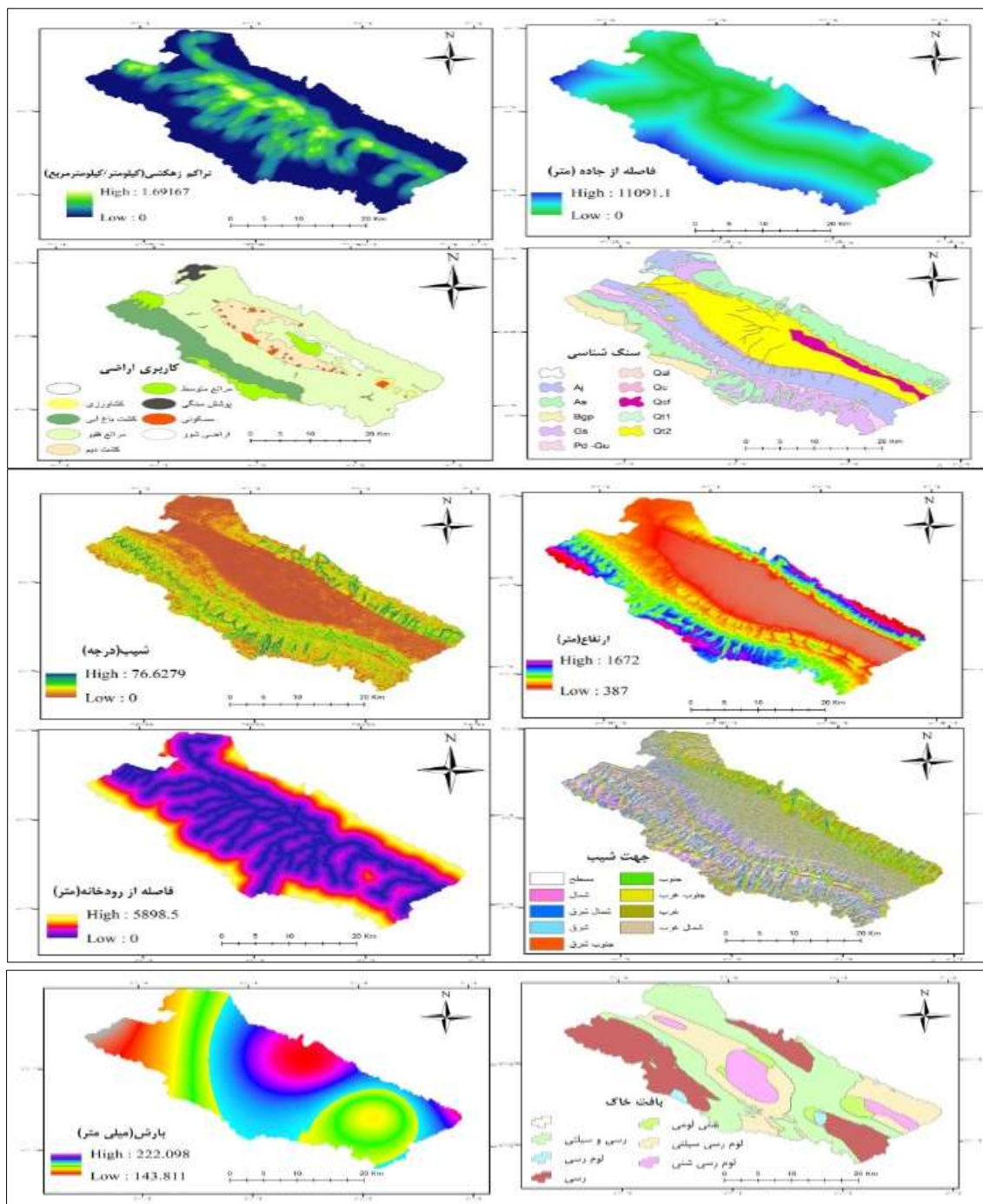
۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج

در تهیه نقشه حساسیت به فرسایش خندقی، انجام تست هم خطی بین متغیرهای انتخابی دارای اهمیت است (عرب عامری و همکاران، ۱۳۹۷). از میان ۱۵ متغیر انتخابی، ۵ متغیر دارای هم خطی هستند و به علت پایین آمدن دقت پیش‌بینی مدل حذف شدند و ۱۰ پارامتر دیگر که دارای ضریب تحمل بیش از ۰/۱ و عامل تورم واریانس کمتر از ۵ دارند، در جریان مدل‌سازی قرار گرفتند (جدول ۳ و شکل ۳).

جدول ۳- نتایج آنالیز بین متغیرهای محیطی مؤثر بر فرسایش خندقی

تست هم خطی		عوامل
ضریب تحمل	عامل تورم واریانس	
۱/۲۳۲	۹۵۳/	ارتفاع
۳/۶۷۸	۲۵۴/	شیب
۳/۰۵۶	۵۶۵/	جهت شیب
۲/۶۷۸	۶۲۲/	فاصله از آبراهه
۲/۹۸۹	۴۹۸/	فاصله از جاده
۳/۱۱۰	۳۳۲/	تراکم زهکشی
۲/۵۵۴	۸۶۷/	زمین‌شناسی
۴/۰۹۹	۷۹۸/	کاربری اراضی
۲/۴۵۵	۸۵۶/	بافت خاک
۴/۰۶۵	۶۵۳/	متوسط بارندگی سالانه



شکل ۳- متغیرهای محیطی مؤثر بر فرسایش خندقی

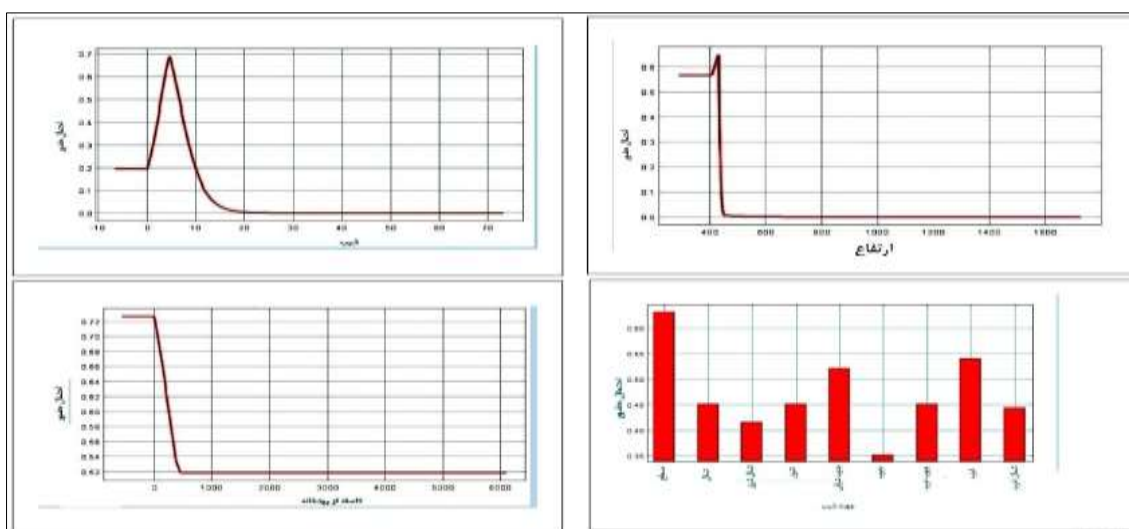
بررسی منحنی پاسخ تغییرات متغیرهای مورد استفاده جهت تعیین مناطق حساس به فرسایش خندقی در مدل

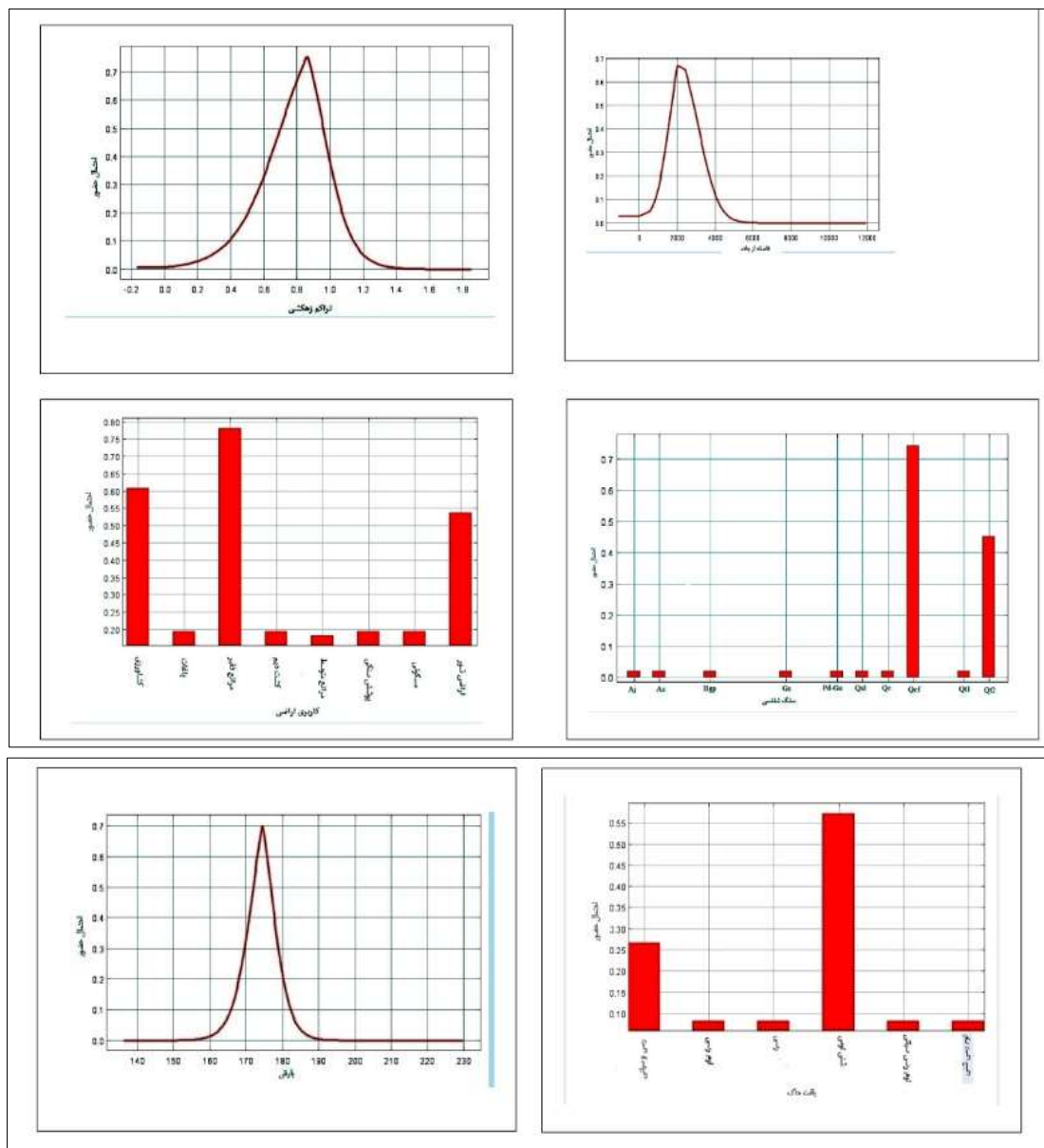
Maxent به شرح زیر است:

دامنه ارتفاعی منطقه بین ۳۸۷ تا ۱۶۷۲ متر متغیر و از شمال غرب به سمت جنوب غرب ارتفاع کاهش می‌یابد. خندق‌ها در طبقات ارتفاعی کمتر از ۵۰۰ متر ایجاد و گسترش یافته‌اند. شیب حوضه آبخیز بین صفر تا ۷۶ درجه است که شیب حدود صفر تا ۱۰ درجه بیشترین تأثیر را در ایجاد فرسایش خندقی دارد. در میان جهات مختلف شیب (مسطح، غرب و جنوب شرقی) بیشترین تأثیر را در رخداد فرسایش خندقی دارند. فاصله از آبراه‌های حوضه تا ۵۸۹۸ متر می‌رسد که عموماً خندق‌ها در فاصله ۵۰۰ متری از آبراه‌ها شکل گرفته‌اند. همچنین فاصله از جاده تا ۱۱۰۹۱ متر است که خندق‌ها حدوداً بین ۱۵۰۰ تا ۳۵۰۰ متر از جاده‌ها ایجاد شده‌اند. تراکم آبراه‌ها حداکثر تا ۱/۶۹ کیلومتر بر کیلومتر مربع است و خندق‌ها بین ۰/۶ تا ۱/۲ کیلومتر بر کیلومتر مربع در حوضه شکل گرفته‌اند. همچنین این حوضه دارای واحدهای سنگ‌شناسی متنوعی شامل سازند آغاچاری (Aj)، آسماری (As)، بنگستان (Bgp)، گچساران (Gs)، پابده گورپی (Gu-Pd)، رسوبات رودخانه (Qal)، نهشته‌های کنگلومرایی سخت‌شده (Qc)، پهنه‌های رسی و سیلتی (Qcf)، پادگانه‌های آبرفتی قدیمی (۱Qt)، پادگانه‌های آبرفتی جدید (۲Qt) دارد. بالاترین میزان پتانسیل فرسایش خندقی مربوط به سازندهای کواترنری (پادگانه‌های آبرفتی جوان و پهنه‌های رسی و سیلتی) رخ داده است (جدول ۴). در حوضه آبخیز ۸ نوع کاربری متفاوت شامل کشاورزی، باغات، مراتع فقیر، کشت دیم، مراتع متوسط، پوشش سنگی، مسکونی و اراضی شور است. شکل‌گیری خندق‌ها بیشتر در مراتع فقیر، زمین‌های کشاورزی و اراضی شور رخ داده است. بافت خاک موجود در منطقه ۶ نوع است که شامل رسی و سیلتی، لوم رسی، رسی، شنی لومی، لوم رسی سیلتی و لوم رسی شنی است. عمده خندق‌های موجود در منطقه در بافت شنی لومی و رسی و سیلتی شکل گرفته‌اند. میانگین بارندگی سالانه در حوضه بین ۱۴۳ تا ۲۲۲ متغیر است و این بارندگی شرایط را برای ایجاد و گسترش خندق‌ها مهیا می‌کند. در مناطقی از حوضه که متوسط بارندگی سالانه بین ۱۷۰ تا ۱۸۰ میلی‌متر بوده است، عمده خندق‌ها شکل گرفته است (شکل ۴).

جدول ۴- زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

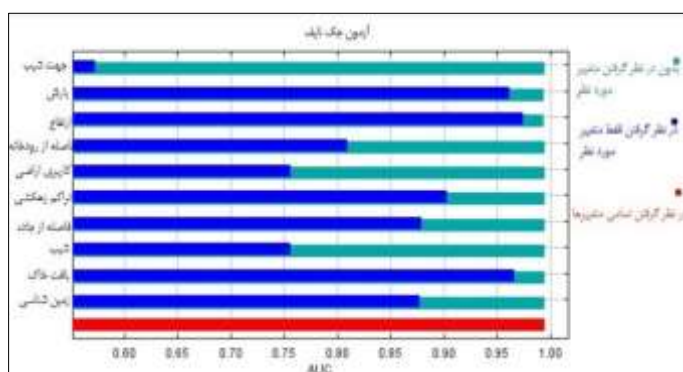
سن	توضیحات	نام واحد	نماد واحد سنگ شناسی
کرتاسه	تناوبی از بخش‌های کربناتی و بخش‌های شیلی نرم است. علاوه بر آن، به‌طور لکه‌ای و پراکنده گرهک‌ها و رگه‌هایی از ژئیس و اکسید آهن نیز دیده می‌شود.	بنگستان	Bgp
کرتاسه	متشکل از تناوب لایه‌های مارنی به رنگ‌های کرم، سبز، زرد، آبی و لایه‌های نازک آهک رسی و لایه‌هایی از شیل‌های توده‌ای و متورق خاکستری روشن مایل به آبی می‌باشد.	پابده-گوربی	GU-Pd
میوسن	آهک دولومیتی و آهک کرم تا قهوه‌ای رنگ بوده که در بیرون‌زدگی‌ها بصورت برجسته با درز و شکاف‌های زیاد به خوبی مشخص می‌باشد	آسماری	As
میوسن	شامل مارن، انیدریت، ژئیس و لایه‌های نازک آهک است	گچساران	Gs
میوسن	شامل تناوب ماسه سنگ‌های قهوه‌ای تا خاکستری و مارن‌های قرمز رنگ با رگه-های ژئیس و بالاخره سیلستون قرمز رنگ است.	آغاچاری	Aj
کواترنر	بیشتر از قلوه‌های آهکی تشکیل شده‌اند و فضای بین دانه‌ها را زمینه‌ای ماسه‌ای همراه با سیمان کربناته پر کرده است.	نهنه‌های کنگلومرای سخت شده	Qc
کواترنر	از آبرفت‌های دانه درشت تا متوسط و گاهی ریز که سخت شدگی ضعیفی را نشان می‌دهند، تشکیل شده‌اند.	پادگانه‌های آبرفتی قدیمی	Qt1
کواترنر	نسبت به پادگانه‌های قدیمی دانه ریزترند و سخت شدگی کمتری را نیز نشان می‌دهند.	پادگانه‌های آبرفتی جوان	Qt2
کواترنر	شامل پهنه‌های رسی و سیلتی است که اغلب در پیرامون رودخانه‌ها و در مرکز دشتها واقع شده‌اند و در مواقع سیلابی از آب پوشیده می‌شوند.	پهنه‌های رسی و سیلتی	Qcf
عهد حاضر	شامل رسوبات شنی و قلوه سنگی است و از اندازه رس و سیلت تا قطعات بزرگ در حد تخته سنگ در آن‌ها دیده می‌شود.	رسوبات رودخانه‌ عهد حاضر	Qal





شکل ۴- منحنی‌های پاسخ متغیرهای مؤثر بر فرسایش خندقی با استفاده از روش نمونه برداری Bootstrap در مدل مکسنت

نتایج حاصل از آزمون جک نایف نشان داد که مهم ترین متغیرهای تاثیرگذار بر فرسایش خندقی در منطقه به ترتیب شامل ارتفاع، متوسط بارندگی سالانه، بافت خاک، تراکم زهکشی، زمین شناسی، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه است (شکل ۵).



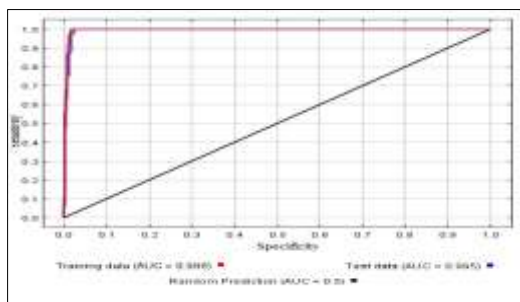
شکل ۵- آزمون جک نایف

درصد سهم مشارکت هر یک از متغیرهای مؤثر نشان می دهد که بافت خاک دارای بیشترین (۵۳/۶) و شیب (۰/۱) کمترین سهم مشارکت در مدل سازی را دارا می باشند (جدول ۵).

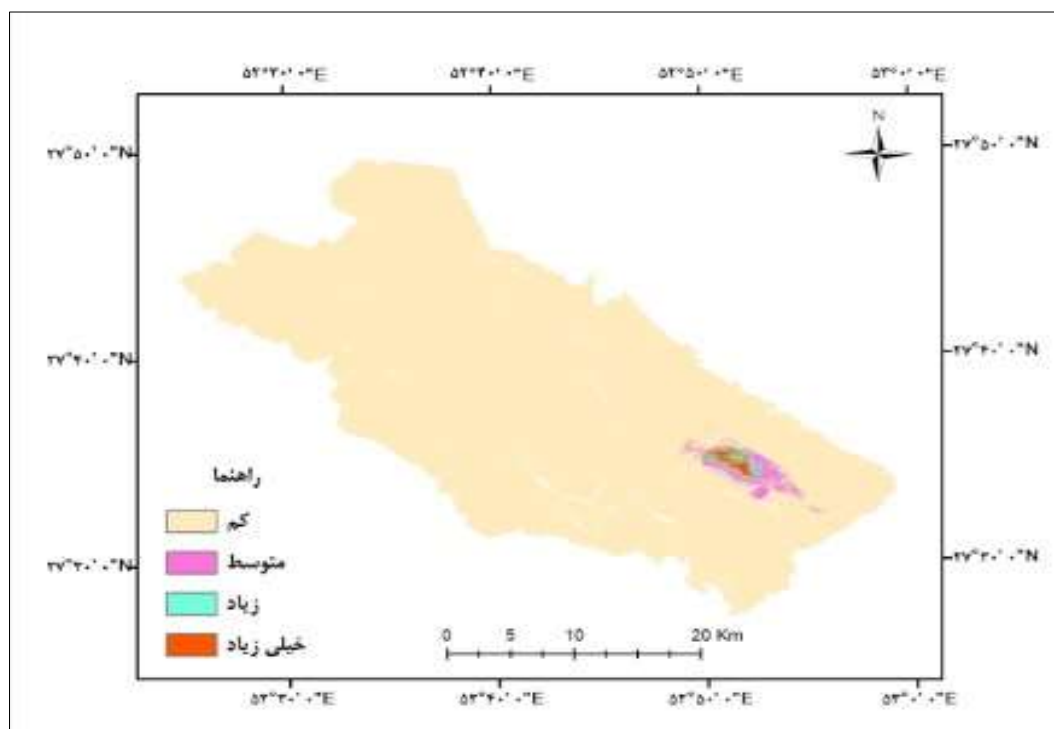
جدول ۵- درصد سهم مشارکت هر یک از متغیرها در مدل سازی

متغیر	درصد سهم مشارکت
بافت خاک	۵۳/۶
بارش	۱۵/۹
ارتفاع	۱۵
تراکم زهکشی	۱۱/۳
جهت شیب	۱/۹
زمین شناسی	۱/۱
کاربری اراضی	۰/۴
فاصله از رودخانه	۰/۴
فاصله از جاده	۰/۳
شیب	۰/۱

در مرحله بعد از نمودار عامل ROC برای صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت. هرچه نقاط به سمت بالا و چپ نزدیک‌تر باشد، مناسب‌تر و مدل به حالت ایده‌آل نزدیک‌تر خواهد بود. مقدار AUC یا سطح زیر نمودار به روش بوت استرپ ۹۵ درصد (عالی) است که این درصد نشان دهنده صحت نتایج حاصل از مدل‌سازی می‌باشد (شکل ۶).



شکل ۶- منحنی ROC به روش Bootstrap



شکل ۷- نقشه پهنه‌بندی فرسایش خندقی

در نهایت نقشه پهنه‌بندی فرسایش خندقی بر اساس مدل نشان داده شده است (شکل ۷). بر اساس این نقشه ۶۶/۱۰ درصد از پهنه حوضه دارای پتانسیل فرسایش خندقی کم، ۱۶/۸۸ درصد از حوضه دارای پتانسیل متوسط، ۶۳

۱/۱ درصد از حوضه دارای پتانسیل زیاد و در نهایت ۵/۳۸ درصد از حوضه دارای پتانسیل خیلی زیاد فرسایش خندقی است (جدول ۶).

جدول ۶- توزیع میزان حساسیت فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه

طبقه حساسیت	مساحت (هکتار)	مساحت (درصد)
کم	۷۶۰۱۲/۵	۶۶/۱۰
متوسط	۱۶۸۹۱/۶۶	۱۶/۸۸
زیاد	۷۴۰۰/۵۰	۱۱/۶۳
خیلی زیاد	۱۰۴۵/۳۳	۵/۳۸

۲-۳- بحث

در این تحقیق متغیرهای مؤثر بر فرسایش خندقی مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت نقشه پهنه‌بندی حساسیت به فرسایش خندقی در سطح حوضه آبخیز تهیه گردید. رابطه بین فرسایش خندقی و ارتفاع رابطه معکوسی است به این صورت که ارتفاعات پایین‌تر حساسیت بیشتری نسبت به ارتفاعات بالاتر دارد. علت این امر را می‌توان کم بودن عمق خاک در ارتفاعات بالاتر و یا نبود حوضه بالادست دانست. این نتایج با نتایج شیت و همکاران (۲۰۱۵) همخوانی دارد. رابطه بین فرسایش خندقی و شیب نشان داد که عموماً خندق‌ها در شیب‌های ملایم یا کمتر از ده درجه ایجاد شده‌اند. در شیب‌های کم رواناب فرصت تمرکز و نفوذ بیشتری دارند؛ بنابراین احتمال ایجاد حفره و تبدیل شدن به فرسایش خندقی بیشتر است. این نتایج با نتایج لوروکس و همکاران (۲۰۱۲) همخوانی دارد. رابطه بین جهت شیب و فرسایش خندقی نشان داد که این متغیر اثر غیر مستقیمی در ایجاد فرسایش دارد. اثر این عامل بر فرسایش به علت اختلاف میکروکلیمای در شیب‌های مختلف است. خندق‌ها بیشتر در جهت‌های مسطح، غرب و جنوب شرقی تشکیل شده‌اند که این نتایج با نتایج قربان‌زاده و همکاران (۲۰۲۰) همخوانی دارد. رابطه فرسایش خندقی با فاصله از رودخانه نشان داد که کاهش فاصله از رودخانه به علت آب‌شویی و فرسایش کناری، تعادل دامنه به هم می‌خورد در نتیجه احتمال ایجاد فرسایش خندقی افزایش می‌یابد. این نتایج با نتایج دویی و همکاران (۲۰۱۴) همخوانی دارد. در رابطه با فاصله از جاده و ایجاد فرسایش خندقی رابطه معکوس است. به این صورت که با کاهش فاصله از جاده، فرسایش خندقی بیشتری رخ می‌دهد به این علت که در کنار جاده‌ها ضخامت زیادی از خاک‌های ریز بافت و همچنین شیب کم منطقه موجب رخداد این پدیده می‌گردد. رابطه فرسایش خندقی با تراکم زهکشی یک رابطه مثبت بوده است به این صورت که افزایش تراکم زهکشی باعث کاهش نفوذپذیری و رواناب بیشتر و در نتیجه

1 Shit et al

2 Le Roux et al

3 Dube et al

اثر آن بر فرسایش خندقی از طریق افزایش جریان است. این نتایج یا نتایج رحمتی و همکاران (۲۰۱۶) همخوانی دارد. نتایج حاصل از متغیر لیتولوژی نشان داد که رسوبات کواترنر (پادگانه‌های آبرفتی جوان و پهنه‌های رسی و سیلتی) به دلیل وجود املاح زیاد گچ و نمک، وجود رسوبات ریزدانه رس و سیلت، ناپایداری لس‌ها، تضعیف ساختمان خاکدانه‌ها و کمبود مواد آلی بیشترین ارتباط را با فرسایش خندقی دارند. نتایج بیانگر این موضوع بود که در میان کاربری‌ها مراتع فقیر، زمین‌های کشاورزی و اراضی شور به علت کمبود پوشش گیاهی در این نوع کاربری‌ها فرسایش خندقی بیشتر رخ داده است. به عبارتی دیگر سطوح خالی از پوشش گیاهی در مقابل سطوح پوشیده شده از جنگل که قدرت فرسایش‌پذیری خاک را کاهش می‌دهد، فرسایش شدیدتری رخ می‌دهد. همچنین نتایج حاصل از مطالعات انجام شده در مورد عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی بیانگر این موضوع بوده است که در بیشتر حوضه‌های آبخیز نوع استفاده از اراضی نقش مهمی در ایجاد فرسایش و تولید رسوب دارند. این نتایج با نتایج شهبازی و همکاران (۱۴۰۰) همخوانی دارد. رابطه بین بافت خاک و فرسایش نشان‌دهنده وجود بافت ریز در نتیجه زیاد شدن ظرفیت نگهداری آب در خاک، کاهش چسبندگی ذرات و انتقال آن‌ها می‌گردد. این نتایج با نتایج سها و همکاران^۱ (۲۰۲۱) همخوانی دارد. نتایج حاصل از بارندگی نشان داد که منطقه دارای آب‌وهوای خشک است که در فصل خشک ترک‌ها و شکاف‌های در سطح زمین ایجاد می‌گردد و با ایجاد بارش‌های ناگهانی و با شدت زیاد، آب وارد این شکاف‌ها شده و به درون زمین نفوذ می‌کند و در جهت شیب زمین و با انحلال مواد محلول موجب شکل‌گیری پپ‌های زیر زمینی می‌شود که عامل مهمی در انتقال مواد انحلال‌پذیر و رسوب به شبکه‌های جاری می‌گردد. اهمیت این متغیر و تأثیر آن بر روی فرسایش خندقی در تحقیقاتی مانند امیری و همکاران (۱۳۹۸) مورد تأکید قرار گرفته است. منحنی ROC که دقت مدل در تعیین مناطق حساس به فرسایش خندقی در مرحله اعتبارسنجی عالی بوده است. همچنین جاویدان و همکاران (۲۰۲۱) توانایی این مدل جهت تعیین مناطق حساس به فرسایش خندقی را تأیید کرد.

۴- جمع‌بندی

توسعه شدید فرسایش خندقی در مناطق خشک و نیمه‌خشک نیاز به انجام تحقیقات برای بررسی چگونگی تأثیر فعالیت‌های انسانی و عوامل ژئومحیطی بر وقوع فرسایش خندقی را ضروری می‌سازد. رشد و گسترش سریع این نوع فرسایش در منتهی‌الیه شرقی حوضه علاوه بر تخریب سطح وسیعی از اراضی کشاورزی و مرتعی، خطری جدی برای چند روستا از جمله روستاهای قلعه سید و چاهو و حتی بخشی از شهر مهر است. تهیه نقشه پتانسیل این نوع فرسایش در حوضه با استفاده از رابطه موقعیت مکانی ۱۰۰ خندق انتخابی در منطقه و ۱۰ عامل مؤثر شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، تراکم زهکشی، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، بافت خاک و

متوسط بارندگی سالانه تهیه شد. از کل پهنه‌های خندقی ۷۰ درصد به صورت تصادفی برای تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر و ۳۰ درصد برای اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شد. همچنین از روش نمونه‌برداری Bootstrap به علت کم بودن اطلاعات استفاده شد. از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار در این حوضه به ترتیب می‌توان به ارتفاع، متوسط بارندگی سالانه، بافت خاک، تراکم زهکشی، زمین‌شناسی، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه اشاره کرد. در نهایت نقشه پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی در ۴ کلاس کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تهیه شد. برای اعتبارسنجی مدل از منحنی مشخصه عملکرد نسبی و سطح زیر منحنی آن استفاده گردید. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که مدل پهنه‌بندی با سطح زیر منحنی ۹۵ درصد دارای دقت عالی است. فرسایش خندقی دارای مکانیزم پیچیده است لازم است به منظور کنترل و کاهش این نوع فرسایش اقدامات حفاظتی و آبخیزداری نظیر اصلاح و ایجاد پوشش گیاهی، ایجاد بندهای موقتی، بندهای سنگی، بندهای خاکی در انتهای خندق‌ها، اقدام به جمع‌آوری رواناب کرد. برای بررسی و تحلیل کامل‌تر فرسایش خندقی منطقه می‌توان از مدل رگرسیون درخت تقویت‌شده (BRT) در نرم‌افزار R استفاده کرد.

کتابنامه

- امیری، مهدیس؛ پورقاسمی، حمیدرضا؛ قنبریان، غلام عباس؛ افضلی، سیدفخرالدین؛ ۱۳۹۶. مدل‌سازی مکانی فرسایش خندقی حوزه آبخیز مهارلو با استفاده از سناریوهای مختلف و الگوریتم وزن واقعه، مهندسی و آبخیزداری. جلد ۱۱. شماره ۴. صص ۱۰۳۲-۱۰۱۶. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.120399.1435>
- بهیاری، مهدی؛ عزیزاده، ا؛ محمودیان، شهاب؛ ۱۳۹۶. ارزیابی تأثیر ساختارهای فعال بر خطر فرونشست زمین با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمتغیره. زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته. شماره ۲۴. صص: ۵۶-۴۹. <https://doi.org/10.22055/aag.2017.13229>
- جعفرزاده، مریم؛ طهماسبی پور، ناصر؛ حقی زاده، علی؛ پورقاسمی، حمیدرضا؛ روحانی، حمید؛ ۱۳۹۹. بررسی کارایی روش‌های نمونه‌برداری داده‌های مشاهداتی بر پهنه‌های قابلیت نفوذ آب در خاک با روش ماکزیمم آنتروپی. مدیریت حوزه آبخیز. سال یازدهم. شماره ۲۲. صص: ۹۶-۱۱۰. [20.1001.1.22516174.1399.11.22.5.1](https://doi.org/10.22055/aag.2017.13229)
- خطیبی، مریم؛ ۱۴۰۰. تعیین آستانه‌های اقلیمی و توپوگرافی برای شروع فرسایش خندقی در شیب‌های نواحی نیمه‌خشک (مطالعه موردی: حوضه اوجان چای، دامنه شرقی کوهستان سهند). پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. دوره ۵۳. شماره ۴. صص: ۴۴۵-۴۳۱. [10.22059/JPHGR.2022.106008.1006609](https://doi.org/10.22059/JPHGR.2022.106008.1006609)
- ذاکری نژاد، رضا؛ ۱۳۹۹. ارزیابی مدل‌های رقومی ارتفاع جهت تعیین پتانسیل فرسایش خندقی با استفاده از مدل مکسنت و سامانه اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سمیرم، جنوب استان اصفهان). سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی. سال ۱۱. شماره ۳. صص: ۱۲۲-۱۰۶. <http://girs.iaubushehr.ac.ir>

- زارع چاهوکی، محمدعلی؛ ناصری حصار، نرگس؛ جعفری، محمد؛ ۱۳۹۶. مدل‌سازی پراکنش تیب‌های گیاهی با استفاده از روش آنتروپی حداکثر (مطالعه موردی: مراتع غرب شهرک صنعتی اشتهارد). فصلنامه تحقیقات مراتع و بیابان ایران. ۲۵ (۲): صص: ۲۹۸-۳۰۹. [10.22092/IJRDR.2018.116842](https://doi.org/10.22092/IJRDR.2018.116842)
- شهبازی، خسرو؛ وکیلی تجربه، فرزانه؛ ۱۴۰۰. اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی و تعیین پهنه‌های حساس در استان کرمانشاه با استفاده از مدل Maxent. انجمن آبخیزداری ایران. سال پانزدهم. شماره ۵۴. صص: ۵۸-۴۸. [20.1001.1.20089554.1400.15.54.6.2](https://doi.org/10.1001.1.20089554.1400.15.54.6.2)
- شهبازی، خسرو؛ وکیلی تجربه، فرزانه؛ الوندی، احسان؛ بیات، اصغر؛ اسدی نلیوان، امید؛ ۱۴۰۰. ارزیابی مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و حداکثر آنتروپی در پهنه‌بندی حساسیت فرسایش آبکندی حوزه آبخیز سد گلستان. علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. سال ۱۵. شماره ۵۲. صص: ۱۲-۲۳. [20.1001.1.20089554.1400.15.52.4.6](https://doi.org/10.1001.1.20089554.1400.15.52.4.6)
- عرب عامری، علی رضا؛ رضایی، خلیل؛ یمانی، مجتبی؛ ۱۳۹۶. ارزیابی حساسیت زمین نسبت به فرسایش خندقی با تکنیک داده کاوی گروهی مطالعه موردی: حوضه شاهرود. علوم زمین. سال ۲۸. شماره ۱۱۱. صص: ۱۵۰-۱۳۹. <https://doi.org/10.22071/gsj.2018.114756.1374>
- عرب عامری، علی رضا؛ رضایی، خلیل؛ یمانی، مجتبی؛ ۱۳۹۷. تحلیل متغیرهای محیطی به منظور تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی در حوضه طرود با روش شواهد وزن قطعی. مرتع و آبخیزداری. مجله منابع طبیعی ایران. دوره ۷۱ شماره ۱. صص: ۹۷-۱۱۴. [10.22059/jrwm.2018.244297.1178](https://doi.org/10.22059/jrwm.2018.244297.1178)
- گرنامی، رضا؛ شادفر، صمد؛ ۱۳۹۶. کاربرد GIS در تعیین مناطق مستعد فرسایش خندقی با روش فرآیند تحلیل شبکه. پژوهش‌های آبخیزداری. دوره ۲۱. شماره ۴. صص: ۵۸-۶۸. [10.22092/WMEJ.2018.121633.1112](https://doi.org/10.22092/WMEJ.2018.121633.1112)
- Arabameri, A., Pradhan, B., Rezaei, Kh., & Conoscent, Ch., 2019. Gully erosion mapping using GIS- based multi-criteria decision analysis techniques, *Catena* 180:282-297. DOI: [10.1016/j.catena.2019.04.032](https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.04.032)
- Auerswald, K., Fiener, P., Martin, W., & Elhaus, D., 2014. Use and misuse of the K factor equation in soil erosion modeling: an alternative equation for determining USLE nomograph soil erodibility values. *Catena* 118, 220-225. DOI: [10.1016/j.catena.2014.01.008](https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.01.008)
- Azareh, A.; Rahmati, O.; Rafiei-Sardooi, E.; Sankey, J.B.; Lee, S.; Shahabi, H.; & Ahmad, B., 2019. Modelling gully-erosion susceptibility in a semi-arid region, Iran: Investigation of applicability of certainty factor and maximum entropy models. *Sci. Total Environ*, 684-696. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.11.235](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.235)
- A Bernini, A., Bosino, A., Botha, G., & Mearker, M., 2021. Elevation of gully erosion susceptibility using a maximum entropy model in the upper Mkhomazi River Basin in South Africa. *Geo Information*, 1-20. <https://doi.org/10.3390/ijgi10110729>
- Conoscenti, C., Agnesi, V., Cama, M., Caraballo-Arias, N.A., & Rotigliano, E., 2018. Assessment of gully erosion susceptibility using multivariate adaptive regression splines and accounting for terrain connectivity. *Land Degrad. Dev.* 29 (3), 724-736. DOI: [10.1002/ldr.2772](https://doi.org/10.1002/ldr.2772)
- Dube, F., Nhapi, I., Murwira, A., Gumindoga, W., Goldin, J., & Mashauri, D.A., 2014. Potential of weight of evidence modelling for gully erosion hazard assessment in Mbire District-Zimbabwe. *Phys. Chem. Earth* 67, 145-152. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2014.02.002>

- Ghorbanzadeh, O., Shahabi, H., Mirchooli, F., Valizadeh Kamran, KH., Lim, S., Aryal, J., Jarihani, B., & Blaschke, TH., 2020. gully erosion susceptibility mapping (GESM) using machine learning methods optimized by the multi-collinearity analysis and K-fold cross validation. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* VOL. 11, NO. 1, 1653–1678. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1810138>
- Hongchun, Z.H.U., Guoan, T., Kejian, Q., & Haiying, L., 2014. Extraction and analysis of gully head of loess plateau in China based on digital elevation model. *Chin. Geogr. Sci.* 24(3), 328–338. doi: 10.1007/s11769-014-0663-8
- Javidan, N., Kaviani, A., Pourghasemi, H. M., Conoscenti, CH., Jafarian, Z., & Rodrige-Comino, J., 2021. Evaluation of multi-hazard map produced using MaxEnt machine learning technique *Nature portfolio*, 64-94. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85862-7>
- Kariminejad, N.; Hosseinalizadeh, M.; Pourghasemi, H.R.; Bernatek-Jakiel, A.; Campetella, G.; & Ownegh, M., 2019. Evaluation of factors affecting gully headcut location using summary statistics and the maximum entropy model: Golestan Province, NE Iran. *Sci. Total Environ.* 677, 281–298. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.306
- Le Roux, J. J., & Sumner, P. D., 2012. Factors controlling gully development: Comparing continuous and discontinuous gullies. *Land Degradation & Development*, 23(5), 440–449. <https://doi.org/10.1002/ldr.1083>
- Manap, M.A., Sulaiman, W.N.A., Ramli, M.F., Pradhan, B., & Surip, N., 2013. A knowledge-driven GIS modeling technique for groundwater potential mapping at the Upper Langat Basin, Malaysia. *Arab. J. Geosci.* 6, 1621–1637. <https://doi.org/10.1007/s12517-011-0469-2>
- Mararakanye, N., & Sumner, P.D., 2017. Gully erosion: A comparison of contributing factors in two catchments in South Africa. *Geomorphology* 288, 99–110. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.03.029>
- Panagos, P., Standardi, G., Borrelli, P., Lugato, E., Montanarella, L., & Bosello, F., 2018. Cost of agricultural productivity loss due to soil erosion in the European Union: From direct cost evaluation approaches to the use of macroeconomic models. *L. Degrad. Dev.* 29, 471–484. <https://doi.org/10.1002/ldr.2879>
- 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. DOI:10.1080/10106049.2018.1510038
- Prasad, R.K., N.C. Mondal, P. Banerjee, M.V. Nandakumar & Singh .V.S., 2008. Deciphering potential groundwater zone in hard rock through the application of GIS. *Environ. Geol.* 55(3): 467-475. DOI:10.1007/s00254-007-0992-3
- Rahmati, O., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H.R., & Noormohamadi, F., 2016. Gully erosion susceptibility mapping: the role of GIS-based bivariate statistical models and their comparison, *Nat. Hazards*, 82 (2), 1231–1258. <http://link.springer.com/10.1007/s11069-016-2239-7>
- Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H.R., & Feizizadeh, B., 2017. Evaluating the influence of geo-environmental factors on gully erosion in a semi-arid region of Iran: An integrated framework. *Sci. Total Environ.* 579, 913–927. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.10.176
- Saha, A., Chandra pal, S., Arabameri, A.R., Chowdhuri, I., Rezaie, F., Chakraborty, R., Roy, P., & Manisa, SH., 2021. Optimization modelling to establish false measures implemented with ex-situ plant species to control gully erosion in monsoon-dominated region with novel in situ measurements. *Environmental management*, 287, 112284. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112284

- Shit, P.K., Paira, R., Bhunia, G. & Maiti, R., 2015. Modeling of potential gully erosion hazard using geo-spatial technology at Garbheta block, West Bengal in India. *Model, Earth Sys. Environ*, 1 (1-2), 1-16. DOI:[10.1007/s40808-015-0001-x](https://doi.org/10.1007/s40808-015-0001-x)
- Umar, Z., Pradhan, B., Ahmad, A., Jebur, M.N., & Shafapur Tehrani, M., 2014. Earth quake induced landslide susceptibility mapping using an integrated ensemble frequency ratio and logistic regression models in West Sumatera Province, Indonesia. *Catena* 118, 124-135. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.02.005>
- Zakerinejad, R., & Maerker, 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. E Din. Quat.* 37, 67-76. DOI:[10.4461/GFDQ.2014.37.7](https://doi.org/10.4461/GFDQ.2014.37.7)