Sari Agriculture Sceinces and Natural Resources University

Journal of Watershed Management Research, Vol. 14, No.28, Winter 2023 p: 37-54

"Research paper"

Assessment of Maximum Entropy (ME) to identify Effective Factors on Gully Erosion and Determination of Sensitive Areas in Alaa Semnan Watershed

Ebrahim Yousefi Mobarhan[1] and Kourosh Shirani[2]

1- Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Semnan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Semnan, Iran, (Corresponding author: e.yousefi.m@gmail.com)

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

Received: 6 Februrary, 2023 Accepted: 15 April, 2023

Extended Abstract

Introduction and Objective: Gully erosion is one of the factors threatening the environmental balance and its stability and plays a prominent role in increasing the sedimentation capacity of watersheds and changing the hydrological characteristics of surface streams. The purpose of this research is to evaluate the effectiveness of the maximum disorder machine learning model in order to prepare a gully erosion sensitivity map in the Semnan watershed. Identifying the most important environmental factors affecting the occurrence of gully erosion using the jackknife method and examining the importance of each environmental factor in the study area by analyzing the response curves are other goals of this research.

Material and Methods: This research consist of five main steps: the first step is choosing the study area, collecting and preparing maps of the effective factors, the second step is preparing the distribution map of the ditch erosion event, the third step is the multiple collinearity test with the index of the tolerance coefficient and the variance inflation factor in order to check the information overlap of the effective factors. and checking the importance of the factors, the fourth step is to implement the maximum irregularity or maximum irregularity model, prepare a zoning map of sensitivity to the event of gully erosion and classify it into five categories: very low, low, medium, high and very high, the fifth step is to evaluate the classification accuracy and validate the zoning map and Prediction of sensitivity to gully erosion.

Results: According to the results, among the 23 initial factors or variables, the factors of the waterway slope length index, surface curvature, and waterway power index had colinearity or overlapping information, and in the next stages, they were removed from entering the modeling process, and modeling was carried out with 20 independent factors or variables. The gully erosion sensitivity map of the studied area showed that the southern and southern parts of the Semnan watershed are prone to gully erosion. Also, the zoning results obtained from the implementation of the maximum irregularity model indicate that the areas prone to gully erosion are in high areas, sensitive rock units (quaternary clay and marl zones), average annual rainfall, Eridesville soil type, ultra-arid climate, high drainage density classes, low slope, low lands without geographical slope, high topographic moisture index, pasture land use and low land surface texture are observed. Also, the maximum irregularity model has 91% and 89% accuracy in the calibration and validation stages, respectively, which in terms of efficiency is in the very good category for predicting gully erosion prone areas.

Conclusion: About 35% of the area of high and very high sensitivity areas resulting from the implementation of the maximum irregularity model include more than 90% of the ditches in the region. Also, the maximum irregularity model in the stages of implementation or development and prediction or validation with the area under the receiver operating characteristic curve with the values of 0.91 and 0.89, respectively, is effective in zoning and predicting the occurrence of gully erosion. This result will be useful for local managers and planners as well as executive experts in order to identify areas prone to gully erosion and determine the best implementation methods of watershed operations for soil protection approaches.

Keywords: Machine learning model, Maximum entropy, Multicollinearity, Semnan

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.28.3.2]

[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.37]

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

"مقاله پژوهشی"

ارزیابی کارایی مدل بیشینه بی‌نظمی در شناسایی عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی و تعیین پهنه‌های حساس در حوزه آبخیز علاء سمنان

ابراهیم یوسفی مبرهن[۱] و کورش شیرانی[۲]

۱- بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سمنان، ایران، (نویسنده مسوول: e.yousefi.m@gmail.com)

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱/۲۶

صفحه: ۳۷ تا ۵۴

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: فرسایش خندقی یکی از عوامل تهدیدکننده تعادل محیط زیست و پایداری آن بوده و نقش برجسته‌ای در بالابردن توان رسوب‌زایی حوزه‌های آبخیز و تغییر خصوصیات هیدرولوژیکی جریان‌های سطحی دارد. هدف از این تحقیق ارزیابی کارائی مدل یادگیری ماشین بیشینه‌ی بی‌نظمی به‌منظور تهیه نقشه‌ی حساسیت فرسایش خندقی در حوزه آبخیز سمنان است. شناسایی مهمترین عامل‌های زیســت‌محیطی مؤثر بر رخداد فرسایش خندقی با روش جک‌نایف و بررسی اهمیت هر یک از عامل‌های زیست‌محیطی در منطقه‌ی مورد مطالعه با تحلیل منحنی‌های پاسخ از دیگر اهداف این پژوهش است.

مواد و روش‌ها: این پژوهش در پنج گام اصلی شامل، گام نخست انتخاب محدوده مورد مطالعه، جمع‌آوری و آماده‌سازی نقشه‌های عوامل مؤثر، گام دوم تهیه نقشه پراکنش رخداد فرسایش خندقی، گام سوم آزمون هم‌خطی چندگانه با شـاخص ضریب تحمل و فاکتور تورم واریـانس به‌منظور بررسی هم‌پوشانی اطلاعاتی عوامل مؤثر و بررسی اهمیت عوامل، گام چهارم اجرای مدل بیشینه بی‌نظمی یا حداکثر بی‌نظمی، تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت نسبت به رخداد فرسایش خندقی و طبقه‌بندی آن به پنج رده خیلی‌کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی‌زیاد، گام پنجم ارزیابی دقت طبقه‌بندی و اعتبارسنجی نقشه پهنه‌بندی و پیش‌بینی حساسیت نسبت به رخداد فرسایش خندقی می‌باشد.

یافته‌ها: طبق نتایج حاصله، از بین ۲۳ عامل یا متغیر اولیـه، عوامل شاخص طول شیب آبراهه، انحنای سطح و شاخص توان آبراهه دارای هم‌خطی یا هم‌پوشـانی اطلاعاتی بوده و در مراحل بعدی از ورود به فرایند مدل‌سازی حذف و مدل‌سازی با ۲۰ عامل یا متغیر مستقل اجرا گردید. نقشه حساسیت فرساش خندقی منطقه مورد مطالعه نشان داد بخش‌های خروجی و جنوبی حوزه آبخیز سمنان مستعد وقوع فرسایش خندقی می‌باشد. همچنین نتایج پهنه‌بندی حاصل از اجرای مدل بیشینه بی‌نظمی بیانگر آن است که مناطق مستعد فرسایش خندقی در مناطق مرتفع، واحدهای سنگی حساس (پهنه‌های رسی و مارنی کواترنری)، بارش متوسط سالانه، نوع خاک اریدسویل، اقلیم فراخشک، طبقات تراکم زهکشی بالا، شیب کم، اراضی پست و بدون وجه شیب جغرافیایی، شاخص رطوبت توپوگرافی بالا، کاربری اراضی مرتعی و سطح زمین با بافت کم مشاهده می‌شوند. همچنین مدل بیشینه بی‌نظمی در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب دارای دقت ۹۱ و ۸۹ درصد است که از نظر کارایی در رده خیلی خوب برای پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش خندقی قرار می‌گیرد.

نتیجه‌گیری: حدود ۳۵ درصد مساحت پهنه‌های با حساسیت زیاد و خیلی زیاد حاصل از اجرای مدل بیشینه بی‌نظمی، بیش از ۹۰ درصد خندق‌های منطقه را در بر می‌گیرند. هم‌چنین مدل بیشینه بی‌نظمی در مراحل اجرا و پیش‌بینی با سطح زیر منحنی ویژگی عمل‌گر گیرنده بالاتر از ۹۰ درصد در پهنه‌بندی و پیش‌بینی رخداد فرسایش خندقی کارامد می‌باشد. این نتیجه برای مدیران و برنامه‌ریزان محلی و هم‌چنین کارشناسان اجرایی به‌منظور شناسایی مناطق مستعد فرسایش خندقی و تعیین بهترین روش‌های اجرایی عملیات آبخیزداری برای رویکردهای حفاظت از خاک مفید خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: آزمون هم‌خطی چندگانه، حداکثر آنتروپی، سمنان، مدل ماشین یادگیری

مقدمه

فرسایش خاک توسط آب یک رخداد جدی تخریب سرزمین است که حدود یک میلیارد هکتار از سطح جهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Lal, 2003) و باعث کاهش رشد پوشش گیاهی، پرشدن مخازن و دره‌ها، تخریب محیطی زمین، از بین رفتن مقدار زیادی خاک می‌شود (Javidan et al., 2019). فرسایش خندقی یکی از فرآیندهای فرسایشی و پیچیده‌ترین پدیده فرسایش است، که اغلب توسط ترکیبی از رگبارهای شدید باران و استفاده نامناسب از زمین ایجاد یا تشدید می‌شود (Chaplot et al., 2005). علاقه‌مندی به تجزیه و تحلیل فرسایش خندقی نشان دهنده نیاز به افزایش دانش ما در مورد تأثیرات و عوامل شرایط آن است که تحت گستره وسیعی از علل تغییر می‌کنند (Chaplot et al., 2005). خندق‌ها شامل فرآیندهای پیچیده‌ای هستن د که با تنوع متغیرهای مرتبط نزدیک مانند بافت خاک، سنگ‌شناسی، کاربری زمین و پوشش گیاهی، آب و هوا و توپوگرافی کنترل می‌شوند (Conforti et al., 2011). والنتین و همکاران (۲۰۰۵) نشان دادند که فرسایش خندقی یکی از عوامل تهدیدکننده تعادل زیست محیطی و پایداری آن بوده، نقش برجسته‌ای در بالابردن توان رسوب‌زایی حوزه‌های آبخیز و تغییر خصوصیات هیدرولوژیکی جریان‌های سطحی دارد (Valentin et al., 2005). باتوجه به موارد ذکر شده شناسایی و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی مناطق مستعد فرسایش خندقی گامی مهم و اساسی در ارزیابی خطرات محیطی حوزه‌های آبخیز به‌شمار می‌روند.

عوامل ژئومورفولوژی به‌طور گسترده‌ای به‌منظور ارزیابی و تعیین نقشه حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از روش‌های آماری و داده‌کاوی به‌کار گرفته شده است (Castillo et al., 2014؛ Conoscenti et al., 2013، Lombardo et al., 2015؛ Yousefi Mobarhan & Karimi Sangchini, 2021؛ Yousefi Mobarhan & Peyrowan, 2022). تعداد زیادی از مطالعات نیز یک رویکرد تصـادفی را برای پهنه‌بندی حساسیت به فرسایش خندقی اعمال کرده‌اند. علاوه بر تجزیه

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.28.3.2]

[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.37]

و تحلیل دومتغیره (Ballabio & Sterlacchini, 2012؛ Magliulo, 2010؛ Magliulo, 2012)، رویکردهای آماری چندمتغیره مختلف مانند رگرسیون لجستیک (Boos & Karimi ،Farajzadeh et al., 2012 ،Brownie, 2004 ،Lucà et al., 2011 ،Sangchini & Ownegh, 2015)، تجزیه و تحلیل شرطی (Ballabio & Sterlacchini, 2012)، درخت‌های رگرسیون و طبقه‌بندی (Geissen et al., 2007 ،Märker et al., 2011)، توپوگرافی نرمال شده (Castillo et al., 2014)، جنگل تصادفی (Kuhnert et al., 2010)، نسبت فراوانی (Conforti et al. 2011، Lucà et al. 2011)، وزن واقعه (Tahmassebipoor et al., 2016، Dube et al. 2014)، دمپسترشفر (Shirani, 2021)، فرآیند سلسله مراتب تحلیلی (Zakerinejad & Märker, 2014)، شبکه عصبی مصنوعی (Pourghasemi et al., 2017، Rahmati et al. 2017)، ماشین بردار پشتیبان (Pourghasemi et al., 2017)، و رگرسیون خطی تطبیقی چندمتغیره (Conforti et al., 2011، Gómez Gutiérrez et al., 2009) نیز برای این هدف به کار گرفته شده است.

روش‌هایی که در فوق مطرح شد دارای محدودیت و ضعف هستند، به‌عنوان مثال این روش‌ها برای تجزیه و تحلیل روابط بین وقوع فرسایش خندقی و عوامل مؤثر بر آن، نیازمند طبقه‌بندی محیطی هستند که به‌دلیل نبود روشی مناسب برای یافتن تعداد و آستانه‌های مناسب برای محدوده‌های طبقه‌بندی، عدم قطعیت مدل‌سازی افزایش می‌یابد (Rahmati et al., 2017). این درحالی است که مدل بیشینه بی‌نظمی (Maximum entropy) (ME) به‌عنوان یک مدل یادگیری ماشینی (Machine learning model) می‌تواند بر این محدودیت غلبه کند و مبتنی بر آمارهای تصادفی است. تاکنون در مدل‌سازی مکانی و تجزیه و تحلیل‌های پراکنش گونه‌های گیاهی و جانوری (Erfani et al., 2021، Gearman & Blinnikov, 2019)، بلایای طبیعی مانند زمین‌لغزش (Rajabzadeh et al., 2018، Shrestha & Kang, 2019، Shirani & Naderi Samani, 2022)، سیل (Davoudi Moghaddam & Haghizadeh, 2020)، تغذیه آب‌های زیرزمینی (Jafarzadeh et al., 2021، Teimouri & Asadi Nalivan, 2021) و فرایش خندقی (Kariminejad et al., 2019) به‌کار گرفته شده است.

مدل بیشینه بی‌نظمی با ساختار نظریه بیشینه با یک رویکرد ریاضی متفاوت از نظریه بیزی، از جمله الگوریتم‌هایی هستند که با گستردگی بیش‌تری نسبت به سایر مدل‌های احتمالاتی دومتغیره مورد توجه و استفاده پژوهشگران قرار گرفته است (Dempster ,1967، Phillips et al., 2004، Phillips et al., 2006) و تا به امروز پژوهش‌های متعددی در این زمینه انجام گرفته است (Baboli moakher et al. 2018، Shirani & Arabameri, 2015، Shirani & et al., 2018). جیائو و همکاران (۲۰۱۹) به‌کمک ۱۵ عامل محیطی و به‌کارگیری دو مدل ارزش اطلاعات و بیشینه بی‌نظمی اقدام به ارزیابی و پهنه‌بندی حساسیت نسبت به زمین‌لغزش نمودند. آنها روش بیشینه بی‌نظمی با درصد مطلوبیت بالاتر را به‌عنوان بهترین مدل معرفی کرده‌اند (Jiao et al., 2019). ذبیحی و همکاران (۲۰۱۸) به مدل‌سازی فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های آماری دو متغیره مانند نسبت فراوانی، وزن واقعه و شاخص بی‌نظمی در استان مازندران در شمال ایران پرداختند. نتایج نشان داد که مدل نسبت فراوانی عملکرد بهتری نسبت به مدل وزن‌دهی واقعه و شاخص بی‌نظمی داشت (Zabihi et al., 2018). رحمتی و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی کارایی مدل بیشینه بی‌نظمی در پیش‌بینی وقوع فرسایش خندقی در حوزه آبخیز کشکان-پلدختر پرداختند. نتایج اعتبارسنجی با دقت حدود ۹۱ درصد، پیش‌بینی دقیق استعداد فرسایش خندقی با استفاده از مدل بیشینه بی‌نظمی تأیید کردند (Rahmati et al., 2018). جاویدان و همکاران (۲۰۲۰) پهنه‌بندی حساسیت فرسایش خندقی در حوزه گرگان‌رود را به‌کمک ۱۷ عامل محیطی با استفاده از مدل بیشینه بی‌نظمی (ME) انجام دادند. نتایج نشان داد مدل ME هم در درجه برازش و هم در عملکرد پیش‌بینی عالی عمل کرد و منجر به پیش‌بینی‌های دقیق شد (Javidan et al., 2020). برنینی و همکاران (۲۰۲۱) با مدل ME به شناسایی و ارزیابی عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی در حوضه رودخانه مخمازی آفریقای جنوبی پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که پارامترهای ارتفاع، بارندگی و عمق دره مهمترین متغیرهای اثرگذار بر پیش‌بینی فرسایش خندقی می‌باشند (Bernini et al., 2021). همچنین مددی و همکاران (۲۰۲۲) حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی در حوضه آبخیز رودخانه شور را بررسی نمودند. نتایج نشان از دقت بالای ۹۵ درصدی مدل در مرحله اعتبارسنجی مدل بود (Madadi et al., 2022).

مروری بر سابقه تحقیق نشان داد که تنها چند مطالعه از مدل بیشینه بی‌نظمی (ME) برای ارزیابی حساسیت به فرسایش خندقی استفاده کرده‌اند و با توجه به پیشینه تحقیق، مطالعه جامعی برای مقایسه و ارزیابی قابلیت مدل ME برای ارزیابی حساسیت به فرسایش خندقی وجود ندارد. برای پرداختن به شکاف‌های تحقیقاتی، در مطالعه حاضر، مدل بیشینه بی‌نظمی(ME) به‌عنوان یک تکنیک داده‌کاوی برای تحلیل، کاوش و پیش‌بینی وقوع مکانی فرآیندهای فرسایش خندقی اتخاذ شد. بیشینه بی‌نظمی یک روش بسیار محبوب است که قبلاً برای پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش به‌طور گسترده‌ای استفاده شده است (Kornejady et al., 2017). هدف از این تحقیق کاربرد مدل یادگیری ماشین بیشینه‌ی بی‌نظمی برای تهیه نقشه‌ی حساسیت فرسایش خندقی در حوزه آبخیز علاء سمنان است. شناسایی مهم‌ترین عامل‌های زیست‌محیطی مؤثر بر رخداد خندقی با روش جک نایف و بررسی نحوه‌ی اثرگذاری هریک از عامل‌های زیست‌محیطی در منطقه‌ی بررسی شده با تحلیل منحنی‌های پاسخ از اهداف دیگر این پژوهش است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز علاء، در شهرستان سمنان به مساحت ۱۰۳۶ کیلومتر مربع و در محدوده جغرافیایی ' ۰۸-°۳۵ تا ' ۵۰-°۳۵ عرض شمالی و ' ۰۵-°۵۳ تا ' ۴۸-°۵۳ طول شمال قرار

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.28.3.2]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.37]

گرفته است. این حوزه به‌دلیل قرار گرفتن در نیمه جنوبی رشته کوه‌های البرز، دارای تنوع توپوگرافیکی می‌باشد به‌طوریکه بیشینه ارتفاع محدوده ۲۴۸۰ متر از سطح دریا در شمال و حداقل ارتفاع ۹۴۴ متر در جنوب حوزه واقع شده است. این تنوع توپوگرافیکی به‌همراه عوامل اقلیمی منجر به تنوع اکوسیستمی در این منطقه گردیده است به‌طوریکه این حوزه در برگیرنده اکوسیستم‌های کوهستانی، بیابانی و کویری می‌باشد. موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز سمنان در شکل ۱ نمایش داده شده است.

این پژوهش در پنج گام اصلی به شرحی که در ادامه آمده است، اجرا شد. گام نخست انتخاب محدوده مورد مطالعه، جمع‌آوری و آماده‌سازی نقشه‌های عوامل مؤثر، گام دوم تهیه نقشه پراکنش رخداد فرسایش خندقی، گام سوم آزمون هم‌خطی چندگانه به‌منظور بررسی هم‌پوشانی اطلاعاتی عوامل مؤثر و بررسی اهمیت عوامل، گام چهارم اجرای مدل بیشینه بی‌نظمی، تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت نسبت به رخداد فرسایش خندقی و طبقه‌بندی آن به پنج رده خیلی‌کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی‌زیاد، گام پنجم ارزیابی دقت طبقه‌بندی و اعتبارسنجی نقشه پهنه‌بندی و پیش‌بینی حساسیت نسبت به رخداد فرسایش خندقی.

نقشه پراکنش خندق

در این پژوهش به‌منظور استفاده از روش‌های احتمالاتی دومتغیره و مدل‌سازی در پهنه‌بندی حساسیت به رخداد خندق از داده‌های مکانی و نقشه پراکنش فرسایش خندقی به‌عنوان متغیر وابسته استفاده شد. در راستای تهیه این نقشه با استفاده از مشاهدات میدانی، ثبت مکانی خندق‌ها به‌کمک دستگاه موقعیت‌یاب جهانی (GPS)، تصاویر گوگل ارث به‌منظور ترسیم و تدقیق، تعداد ۴۸۷ خندق شناسایی شد (شکل ۲). داده‌های مکانی پراکنش خندق‌ها در قالب دو دسته آموزشی و آزمایشی به‌ترتیب به نسبت ۷۰ درصد (۳۴۱ خندق) به‌منظور اجرا و توسعه و ۳۰ درصد (۱۴۶ خندق) به‌منظور اعتبارسنجی مدل‌ها به‌صورت کاملاً تصادفی با استفاده از ابزارهای Random Create Points، Featurs Subset در محیط ArcGIS 10.5 تهیه شدند (Moghaddam, 2021).

جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌های مکانی عوامل مؤثر بر رخداد خندقی

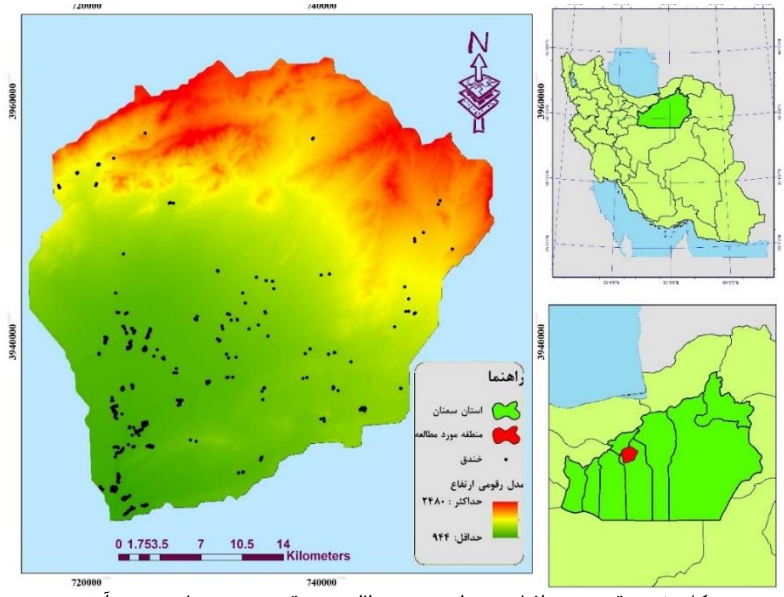
پیش‌نیاز توسعه و برازش تمامی مدل‌های داده‌کاوی برای ایجاد نقشه‌های پهنه‌بندی، تهیه و آماده‌سازی متغیرهای مستقل (نقشه عوامل مؤثر بر رخداد فرسایش خندقی) و وابسته (نقشه پراکنش خندق‌ها) می‌باشد. به‌منظور جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌های مکانی موردنیاز جهت پهنه‌بندی و پیش‌بینی حساسیت نسبت به رخداد فرسایش خندقی، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور، کاربری اراضی و اقلیمی منطقه مورد مطالعه مورد بررسی و پردازش قرار گرفت.

مدل رقومی ارتفاعی DEM با دقت ۱۲/۵متر مربوط به ماهواره ALOS ژاپن از جمله داده‌های مکانی است که نقش مؤثری در تهیه و آماده‌سازی عوامل ژئومورفومتریک تأثیرگذار بر ناپایداری و خندق ایفاء می‌کند. لذا به‌منظور تهیه ۱۷ عامل از بین ۲۳ عامل مؤثر انتخابی شامل شاخص‌های انحناهای کلی، دامنه، نیمرخ، تحدب، طبقه‌بندی انحناء، شاخص فاصله عمودی از شبکه آبراهه، مساحت حوزه آبخیز، شاخص توان آبراهه، فاکتور طول–شیب آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی، ارتفاع، شیب، وجه یا جهت شیب، تراکم آبراهه، فاصله از آبراهه، شاخص آنالیز سایه و روشن و بافت سطح زمین از مدل رقومی ارتفاعی DEM پال‌سار[1] ماهواره آلوس ژاپن و نرم‌افزار SAGA GIS ۷.۷.۱ استفاده شد. شش عامل دیگر شامل عوامل ذاتی سنگ‌شناسی، نوع خاک، کاربری اراضی، شاخص پوشش گیاهی NDVI، اقلیم و بارش متوسط با استفاده از نقشه‌های موجود و تدقیق آنها به شرحی که در ادامه آمده است، تهیه شد. نقشه سنگ‌شناسی با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی تهیه گردید. نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه با استفاده از اطلاعات و نقشه‌های کاربری اراضی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان و همچنین تدقیق آن‌ها با استفاده از تصاویر رقومی ماهواره لندست ۸ سال ۲۰۲۱ تهیه گردید. برای تهیه نقشه هم‌بارش سالیانه از آمار بارش متوسط سالیانه ایستگاه‌های هواشناسی اداره هواشناسی و وزارت نیرو منطقه مورد مطالعه استفاده شد.

کلیه نقشه‌های عوامل مؤثر و پراکنش رخداد خندقی در محیط ArcGIS 10.5 در قالب فرمت سلولی (رستری) با اندازه سلولی ۲۵*۲۵ متر مربع به‌صورت یکسان و مشابه برای تمامی عوامل طبقه‌بندی مجدد به روش شکست طبیعی و فاصله هندسی منحنی فراوانی پیکسل‌ها، مدیریت و پردازش شدند. هم‌چنین به‌منظور آماده‌سازی، ورود، برازش و مدل‌سازی از نرم‌افزارهای بانک اطلاعاتی Excel 2016 استفاده شد. نهایتاً ۲۰ عامل مؤثر بر رخداد خندقی بر اساس سابقه پژوهش، ویژگی‌های محیطی منطقه، و آزمون هم‌خطی چندگانه (Multicollinearity)، در محیط SAGA GIS 7.7.1، ArcGIS 10.5 و SPSS 22 تهیه و طبقه‌بندی شدند (Shirani et al., 2018؛ Shirani & Arabameri, 2015) (شکل ۳).

1- PALSAR

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.28.3.2]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.37]



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و موقعیت خندق‌ها در حوزه آبخیز
Figure 1. The geographical location of the study area and the location of Gully in watershed



شکل ۲- تصاویر فرسایش خندقی در حوزه آبخیز مورد مطالعه
Figure 2. Photographs of gully erosions in study area watershed

آزمون هم‌خطی چندگانه به‌منظور بررسی هم‌پوشانی اطلاعاتی عوامل مؤثر

قبل از به‌کارگیری عوامل مؤثر و تلفیق آن‌ها بر اساس مدل مورد استفاده در تهیه نقشه حساسیت نسبت به فرسایش خندقی، لازم است آزمون هم‌خطی چندگانه بین داده‌های مورد استفاده آزمون یا بررسی شود. درصورتی که داده‌ها فاقد هم‌بستگی یا دارای استقلال باشند از آن‌ها در مدل مورد نظر می‌توان استفاده کرد. بدین‌منظور آزمون‌های آماری مختلفی برای تحلیل هم‌بستگی بین فاکتورهای مؤثر بر رخداد خندق به خدمت گرفته می‌شوند. تحلیل مؤلفه‌های اصلی، مقایسه زوجی یا جفتی، و رگرسیون لجستیک از جمله این آزمون‌ها هستند (Shirani & Arabameri, 2015؛ Shirani et al., 2018). تحلیل هم‌خطی چندگانه (Multicollinearity) هم‌بستگی میان متغیرهای مستقل را برآورد می‌کند (Dorman et al. 2013؛ Tien Bui et al. 2015). بدین‌منظور از دو شاخص ضریب تحمل (TOL) و فاکتور تورم واریانس (Variance inflation factor) یا VIF برای تحلیل و تعیین هم‌پوشانی اطلاعاتی عوامل مؤثر استفاده می‌شود (Tsangaratos et al., 2017؛ Valentin et al., 2005). این دو شاخص در حین اجرای مدل‌های خطی تعمیم‌یافته برای تحلیل ارتباط میان متغیرهای مستقل یا آزمون هم‌خطی چندگانه به‌کار می‌رود (Milaghardan et al., 2016). اگرچه تا کنون هیچ قانون مشخصی برای تعیین آستانه‌های دو مقدار VIFو TOL در تحلیل و تخمین هم‌خطی چندگانه عوامل مؤثر بر رخداد خندق وجود ندارد (Tsangaratos et al., 2017،Valentin et al. 2005). اما بر اساس سابقه تحقیقی که در این زمینه انجام شده است، اگر عدد VIF کم‌تر از ۵ یا ۱۰و TOL بزرگ‌تر از ۰/۱ یا ۰/۲ باشد در آن‌صورت هم‌پوشانی بین عوامل مؤثر وجود ندارد. به‌عبارت دیگر بین

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.28.3.2]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.37]

داده‌ها یا متغیرهای مستقل هیچ هم‌بستگی (collinearity) وجود نخواهد داشت (Tsangaratos et al., 2017).

اجرای مدل

مدل بیشینه بی‌نظمی

مدل بیشینه بی‌نظمی یکی از فن‌اوری‌های ماشین یادگیری (Machine learning techniques) است که قابلیت پیش‌بینی مکانی بالایی در زمینه‌های مختلف علوم محیطی دارد (Phillips et al., 2006؛ Park, 2015). یکی از مزیت‌های استفاده از این مدل، بالابردن قطعیت در پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش خندقی است، زیرا فرایند مدل‌سازی براساس وقوع خندق‌های ثبت شده انجام می‌گیرد و این امر موجب، کاهش عدم‌قطعیت مدل‌سازی می‌شود. برخلاف مدل‌های آماری که قبل از مدل‌سازی تعدادی فرضیات آماری تعریف می‌کنند، مدل بیشینه بی‌نظمی از ابتدا سعی در یافتن روابط بین متغیرهای مستقل و وابسته دارد تا براساس آن پیش‌بینی مکانی مبتنی بر واقعیت را ارائه دهد (Park, 2015).

همچنین، مدل بیشینه بی‌نظمی فقط براساس موقعیت‌های وقوع فرسایش خندقی، مدل‌سازی را انجام می‌دهد، درحالی‌که مدل‌های آماری مانند رگرسیون لجستیک علاوه بر موقعیت‌های وقوع فرسایش خندقی، نیازمند موقعیت‌های عدم وقوع فرسایش خندقی نیز هستند (Park, 2015).

به‌منظور استفاده از مدل بیشینه بی‌نظمی برای تعیین مناطق مستعد فرسایش خندقی، ابتدا متغیرهای مستقل (عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش خندقی) و متغیر وابسته (وقایع فرسایش خندقی) به‌ترتیب به فرمت متنی ascii و csv فایل تبدیل شده و به نرم‌افزار MAXENT معرفی شدند. مدل بیشینه بی‌نظمی هم با داده‌های مکانی پیوسته کمی و هم طبقه‌بندی شده کیفی و یا هر دو به‌صورت هم‌زمان قابل اجرا می‌باشد. اما از آنجایی‌که نقطه قوت مدل بیشینه بی‌نظمی در استفاده از متغیرهای مستقل به‌صورت داده‌های مکانی کمی پیوسته یا بدون طبقه‌بندی به‌منظور کاهش عدم قطعیت‌ها در اجرای مدل می‌باشد. لذا متغیرها یا عوامل مؤثر کاربری اراضی، نوع خاک، زمین‌شناسی و نوع اقلیم که ذاتاً دارای ویژگی داده مکانی توصیفی طبقه‌بندی شده کیفی هستند یا داده‌های مکانی کمی که برای استفاده عملی طبقه‌بندی شده‌اند مانند طبقات انحناءکلی و جهت شیب و مابقی عوامل شامل ارتفاع، شاخص سایه روشن، گرادیان شیب، تراکم و فاصله از آبراهه، شاخص انحنای نیم‌رخ، انحنای دامنه، شاخص هم‌گرایی، شاخص فاصله قائم از آبراهه، بافت سطحی زمین، مساحت حوزه آبخیز، شاخص رطوبت توپوگرافی، بارش متوسط سالانه و شاخص پوشش گیاهی (NDVI) به‌صورت پیوسته کمی در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند. هم‌چنین لازم به‌ذکر است که در این مرحله تنها از داده‌های خندق دسته آموزشی که در مراحل قبلی تهیه شده است، برای واسنجی مدل استفاده شد. مدل بیشینه بی‌نظمی براساس "اصل بی‌نظمی" شبکه ارتباطات بین متغیرهای مستقل و وابسته را تعیین کرده که براساس نقش هر متغیر مستقل و وزن تأثیر و منحنی پاسخ آن به‌دست می‌آید. این مدل قادر است توزیع احتمالاتی داده‌های هریک از لایه رستری مربوط به عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش خندقی را استخراج نماید. بی‌نظمی‌ای توزیع‌ها براساس رابطه ۱ قابل محاسبه است (Phillips et al., 2006).

$$H(\hat{\pi}) = -\sum x \in X\ \hat{\pi}(x)\ \ln\hat{\pi}(x) \qquad (۱)$$

که در آن، $H(\hat{\pi})$ مقدار بی‌نظمی توزیع احتمالاتی متغیر موردنظر، ln لگاریتم طبیعی، x مقدار ارزش هر سال و X مجموع‌هایی از داده‌های یک لایه رستری است. توزیع احتمالاتی Gibbs برای هریک از متغیرهای مستقل مطابق رابطه ۲ به‌دست می‌آید (Elith et al., 2010).

$$q\,\lambda\,(x) = \frac{e^{\lambda.f(x)}}{Z_y} \qquad (۲)$$

که در آن، $q\lambda(x)$ تابع توزیع Gibbs، λ وزن متغیر موردنظر، Z_λ ثابت نرمال کننده تابع Gibbs هستند. به‌منظور تعیین رابطه وقایع فرسایش خندقی و هریک از عوامل مؤثر بر وقوع آن، باید بسط "اصل بی‌نظمی" و استخراج منحنی‌های پاسخ یادگیری ماشینی انجام گیرد (Graham et al., 2008). در این پژوهش مدل بیشینه بی‌نظمی با استفاده از نرم‌افزار MAXENT اجرا شد. سپس روابط بین متغیرهای مستقل (۲۰ عامل مؤثر) و وابسته (پراکنش رخداد خندق‌ها) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بر اساس توابع احتمالاتی به‌دست آمده، نقشه پیش‌ینی احتمال وقوع فرسایش خندقی در این نرم‌افزار تهیه شد. علاوه بر آن، آزمون جک‌نایف (Boos & Brownie, 2008) برای تعیین اهمیت نسبی هریک از عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی انجام گرفت. در این آزمون، شاخص اهمیت نسبی هریک از عوامل مؤثر محاسبه شده و بر اساس آن می‌توان اهمیت عوامل محیطی را در وقوع فرسایش خندقی مورد تجزیه و تحلیل قرار داد.

اعتبارسنجی نقشه مناطق مستعد فرسایش خندقی

به‌منظور اعتبارسنجی نقشه نهایی مناطق مستعد فرسایش خندقی حوزه آبخیز سمنان، از داده‌های موقعیت خندق‌های مرحله اعتبارسنجی استفاده شد. دقت پیش‌بینی نقشه نهایی از روش منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) که رایج‌ترین روش کمی صحت‌سنجی در مدل‌سازی‌های مکانی و پیش‌بینی پدیده‌های طبیعی است، استفاده شد (Dobe et al., 2014). پس از کمی نمودن متغیرها یا عوامل مؤثر، آموزش مدل‌های بیشینه بی‌نظمی با استفاده از ۲۰ عامل مؤثر بر رخداد خندق و نقشه پراکنش فرسایش خندقی (۷۰٪) به‌عنوان داده‌های ورودی مدل‌ها اجرا و نقشه پهنه‌بندی حساسیت نسبت به رخداد فرسایش خندقی تهیه شد. در نهایت ارزیابی دقت طبقه‌بندی از ۳۰ درصد مابقی داده‌های پراکنش خندق، مقدار سطح زیر منحنی (AUC) ویژگی عملکرد گیرنده (ROC) محاسبه و اقدام به اعتبارسنجی و مقایسه مدل‌ها شد (Shirani et al., 2018). مساحت زیر منحنی (AUC) میزان دقت نقشه حساسیت فرسایش خندقی را به‌صورت کمی نشان می‌دهد. مقدار سطح زیر منحنی بین ۰/۵ تا ۰/۶ نماینده اتفاقی بودن نتایج، بین ۰/۷ تا ۰/۸ نماینده اعتبار خوب، بین ۰/۸ تا ۰/۹ معرف نتایج دارای اعتبار بسیارخوب و در صورتی‌که سطح زیر

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.28.3.2]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.37]

منحنی بیش‌تر از ۰/۹ باشد، اعتبار نتایج به‌دست آمده در سطح عالی قرار دارد (Davoudi Moghaddam & Haghizadeh, 2020).

نتایج و بحث

نتایج آزمون هم‌خطی چندگانه

در این پژوهش قبل از اجرای روش بیشینه بی‌نظمی تحلیل هم‌خطی چندگانه به‌منظور اجتناب از هم‌پوشانی اطلاعاتی بین عوامل مؤثر انجام و شاخص‌های ضریب تحمل (TOL) و فاکتور افزونگی انحراف (VIF) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمون هم‌خطی چندگانه بین پارامترها در جدول (۱) ارائه شده است. همان‌طور که قبلاً بیان شد پارامترهایی که ضریب تحمل کم‌تر از ۰/۱ و فاکتور افزونگی انحراف بیش‌تر از ۱۰ داشتند به‌دلیل وجود هم‌پوشانی بین پارامترها از فرایند مدل‌سازی کنار گذاشته شدند (Rahmati et al., 2018). طبق نتایج حاصله، از بین ۲۳ پارامتر اولیه، پارامترهای شاخص طول شیب آبراهه، انحنای کلی و شاخص توان آبراهه دارای هم‌خطی یا هم‌پوشانی اطلاعاتی بوده و در نتیجه از فرایند مدل‌سازی حذف و مدل‌سازی با ۲۰ متغیر مستقل یا عامل مؤثر انجام گرفت.

جدول ۱- آزمون هم‌خطی چندگانه بین پارامترها

Table 1. The multicollinearity diagnosis indexes for variables

پارامتر parameter	آزمون هم‌خطی چندگانه Multiple collinearity test		پارامتر parameter	آزمون هم‌خطی چندگانه Multiple collinearity test	
	ضریب تحمل (TOL)	ضریب افزونگی انحراف (VIF)		ضریب تحمل (TOL)	ضریب افزونگی انحراف (VIF)
انحنای Curvature	0.07	15.3	شاخص انحنای نیمرخ Profile curvature	0.78	1.3
فاکتور طول-شیب آبراهه LS factor	0.08	17.5	انحنای دامنه Plan curvature	0.62	1.6
شاخص توان‌آبراهه Stream power Index	0.06	15.6	شاخص فاصله قائم از آبراهه Vertical distance to channel network index	0.36	2.8
اقلیم Climate	0.23	3.7	شاخص هم‌گرایی Convergence index	0.87	1.1
کاربری اراضی Land use	0.69	1.4	شاخص پوشش گیاهی NDVI	0.79	2.3
تراکم آبراهه Drainage density	0.39	2.6	شاخص رطوبت توپوگرافی Topographic wetness Index	0.63	1.6
نوع خاک Soil	0.71	1.4	جهت شیب Aspect	0.76	1.3
ارتفاع Altitude	0.11	9.4	مساحت حوزه ابخیز Catchment area	0.91	1.1
فاصله از آبراهه Distance	0.43	2.3	شاخص سایه روشن Analytical hillshading	0.67	1.5
بارش متوسط Rain	0.1	9.5	سنگ‌شناسی lithology	0.54	1.8
شیب Slope	0.34	2.9	بافت سطح زمین Terrian surface texture	0.31	3.2
طبقه‌بندی انحنای Curvature classification index	0.35	2.7			

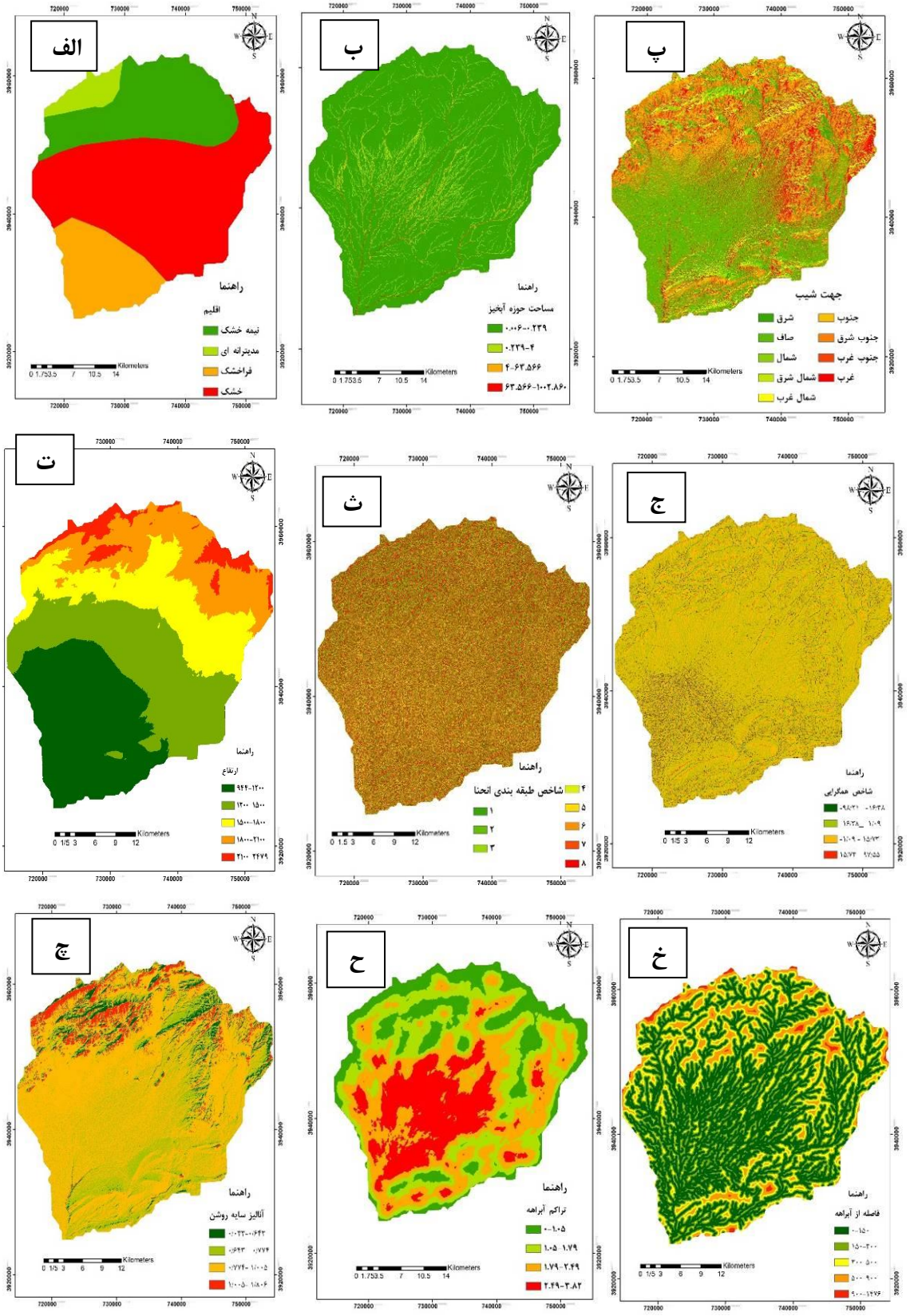
نتایج حاصل از اجرای مدل بیشینه بی‌نظمی

نقشه ۲۰ عامل ورودی مؤثر بر فرسایش خندقی شامل اقلیم، کاربری اراضی، تراکم آبراهه، نوع خاک، ارتفاع، فاصله از آبراهه، بارش متوسط سالانه، شیب، شاخص انحنای نیم‌رخ، انحنای دامنه، شاخص فاصله قائم از آبراهه، شاخص هم‌گرایی، شاخص پوشش گیاهی، شاخص رطوبت توپوگرافی، جهت شیب، مساحت حوزه آبخیز، شاخص سایه روشن، سنگ‌شناسی، بافت سطح زمین و شاخص طبقه‌بندی انحنای در شکل ۳ ارائه شده است. همانطور که قبلاً نیز اشاره شد صرفاً به‌منظور سهولت بحث در مورد نتایج هریک از عوامل مؤثر که دارای مقادیر کمی هستند و همچنین بیان وضعیت گستره‌های مربوط به آن‌ها، کلیه عوامل مؤثر به‌صورت طبقه‌بندی شده بحث و ارائه شده‌اند (شکل ۳)، اما در هنگام مدل‌سازی و ورود به مدل بیشینه بی‌نظمی عواملی که دارای مقادیر کمی پیوسته بودند از آن‌ها بصورت داده‌های مکانی پیوسته در مدل‌سازی استفاده شد. طبقات نقشه اقلیم نشان داد حدود ۷۵ درصد از حوزه در محدوده خشک و نیمه‌خشک واقع شده است (شکل ۳- الف). بر اساس نقشه مساحت حوزه آبخیز، ۹۱ درصد از منطقه مورد مطالعه دارای مساحت حوزه‌های آبخیز کم‌تر از ۲۴ هکتار می‌باشد (شکل ۳- ب). تجزیه و تحلیل جهات شیب زمین نشان داد که در منطقه مورد مطالعه تمام جهات نه گانه شیب، خندق وجود دارد هم‌چنین بخش صاف با ۳۵ درصد و بخش شمال‌شرقی با حدود ۲ درصد، به‌ترتیب دارای بیش‌ترین و کم‌ترین پهنه‌های جهات شیب منطقه هستند (شکل ۳- پ). نقشه‌ی ارتفاع منطقه نشان داد که مناطق شمال‌شرقی به سمت جنوب‌غربی روند کاهشی منظمی داشته و خروجی حوزه دارای کم‌ترین ارتفاع و مناطق ورودی دارای بیش‌ترین ارتفاع هستند (شکل ۳-ت) به‌همین دلیل اغلب جریان‌های سطحی در نقاط خروجی قرار دارند. براساس نقشه شاخص طبقه‌بندی انحنای، می‌توان اظهار کرد که کلاس اول، هشتم و ششم، به‌ترتیب ۲۹، ۲۸ و ۱۵ درصد از منطقه مورد مطالعه را به‌خود اختصاص داده‌اند (شکل ۳-ث). نقشه شاخص سایه روشن منطقه بین ۰/۰۳- تا ۱/۸ متغیر است و ۶۳ درصد از بخش‌های مرکزی و جنوبی منطقه مورد مطالعه در کلاس ۰/۷ — ۱ قرار گرفته است (شکل ۳- چ). نقشه تراکم آبراهه نشان داد که مقدار تراکم زه‌کشی منطقه مورد مطالعه بین صفر تا ۳/۸۲ کیلومتر بر کیلومتر مربع متغیر بوده که بخش‌های مرکزی منطقه دارای بیش‌ترین مقدار تراکم

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.28.3.2]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.37]

زه‌کشی است (شکل ۳- ح). بر اساس نقشه فاصله از آبراهه، بخش‌های زیادی از منطقه مورد مطالعه و مخصوصاً بخش میانی آن در مجاورت جریان‌های سطحی قرار دارند در حالی‌که بخش‌های حاشیه‌ایی منطقه فاصله بیش‌تری با جریان‌های سطحی دارند (شکل ۳- خ). نقشه شاخص انحنای دامنه منطقه نشان داد ۶۷ درصد، ۲۱ درصد و ۱۲ درصد از دامنه حوزه آبخیز به‌ترتیب دارای انحنای صاف، محدب و مقعر می‌باشد (شکل ۳- د). نقشه‌ی شاخص پوشش گیاهی (NDVI) منطقه نشان داد، ۶۵ درصد از منطقه با شاخص کم‌تر از ۰/۰۶ و فقط ۱ درصد از منطقه با شاخص بیش‌تر ۰/۲۱ می‌باشد (شکل ۳- ذ) بر اساس نقشه کاربری اراضی می‌توان اظهار کرد که کاربری مراتع بیش‌ترین مساحت (۵۲ درصد) را به‌خود اختصاص داده است (شکل ۳- ر). بر اساس نقشه شیب زمین، ۳۶ درصد از منطقه مورد مطالعه از شیب ۵-۰ درصد و ۴ درصد از منطقه شیب بالاتر از ۴۰ درصد برخوردارند (شکل ۳- ز). نقشه‌ی بارش متوسط سالانه منطقه نشان داد ۳۴ درصد از حوزه مورد مطالعه با بارش کم‌تر از ۱۲۸ میلی‌متر و ۱۶ درصد از حوزه بیش‌تر از ۲۵۳ میلی‌متر بارش را به‌خود اختصاص داده است (شکل ۳- س) لازم به ذکر است که کمینه و بیشینه بارش متوسط سالانه در حوزه آبخیز سمنان به‌ترتیب ۱۲۰ و ۳۲۵ میلی‌متر می‌باشد. بر اساس نقشه شاخص انحنای نیمرخ می‌توان گفت که اکثر بخش‌های شمالی منطقه دارای انحنای محدب بوده (۳۳ درصد) در حالی‌که بخش‌های مرکزی دارای انحنای کم هستند و با ۵۷ درصد از منطقه کاملاً حالت تخت یا صاف دارند (شکل ۲- ش). شاخص رطوبت توپوگرافی منطقه بین ۷/۵- تا ۱۶/۵ متغیر است که بخش‌های شمالی و شرقی منطقه مورد مطالعه‌ی شاخص رطوبت توپوگرافی بیش‌تری را به‌خود اختصاص داده‌اند (شکل ۳- م). نقشه بافت سطح زمین نشان داد که ۵۷ درصد منطقه مورد مطالعه دارای بافت کم‌تر از ۵ بوده و بخش‌های مرکزی منطقه دارای کم‌ترین مقدار بافت سطحی است (شکل۳- ن). نتایج نقشه نوع خاک نشان داد که منطقه مورد مطالعه در ۵ طبقه قرار گرفته است که بیش‌ترین سطح در حوزه مورد مطالعه را رخنمون سنگی و خاک اندی‌سولز (۶۲٪) و کم‌ترین سطح را خاک اینسپتی‌سولز (۱٪) به خود اختصاص داده است (شکل ۳- و). با توجه به تنوع سازندهای زمین‌شناسی (شکل ۳- ه) در حوزه آبخیز سمنان، واحدهای سنگی به ۶ طبقه یا گروه سنگ‌شناسی به‌شرحی که در ادامه آمده است, تقسیم شدند. گروه اول شامل پهنه‌های رسی کواترنر، گروه دوم شامل نهشته‌های مارنی، تبخیری تراس‌های جوان و مخروط‌افکنه‌ها، گروه سوم شامل آهک و ماسه‌سنگ به‌همراه شیل و مارن، گروه چهارم شامل توف آتشفشانی، شیل آهکی، آهک و دولومیت و کنگلومرا، گروه پنجم شامل آهک‌های توده‌ایی و توف‌های داسیتی و نهایتاً گروه ششم سنگ‌های آتشفشانی آندزیت و دیوریت می‌باشند (شکل ۳- ه). لازم به ذکر است حساسیت نسبت فرسایش گروه‌های اول تا ششم سنگ‌شناسی به‌ترتیب کاسته می‌شود.

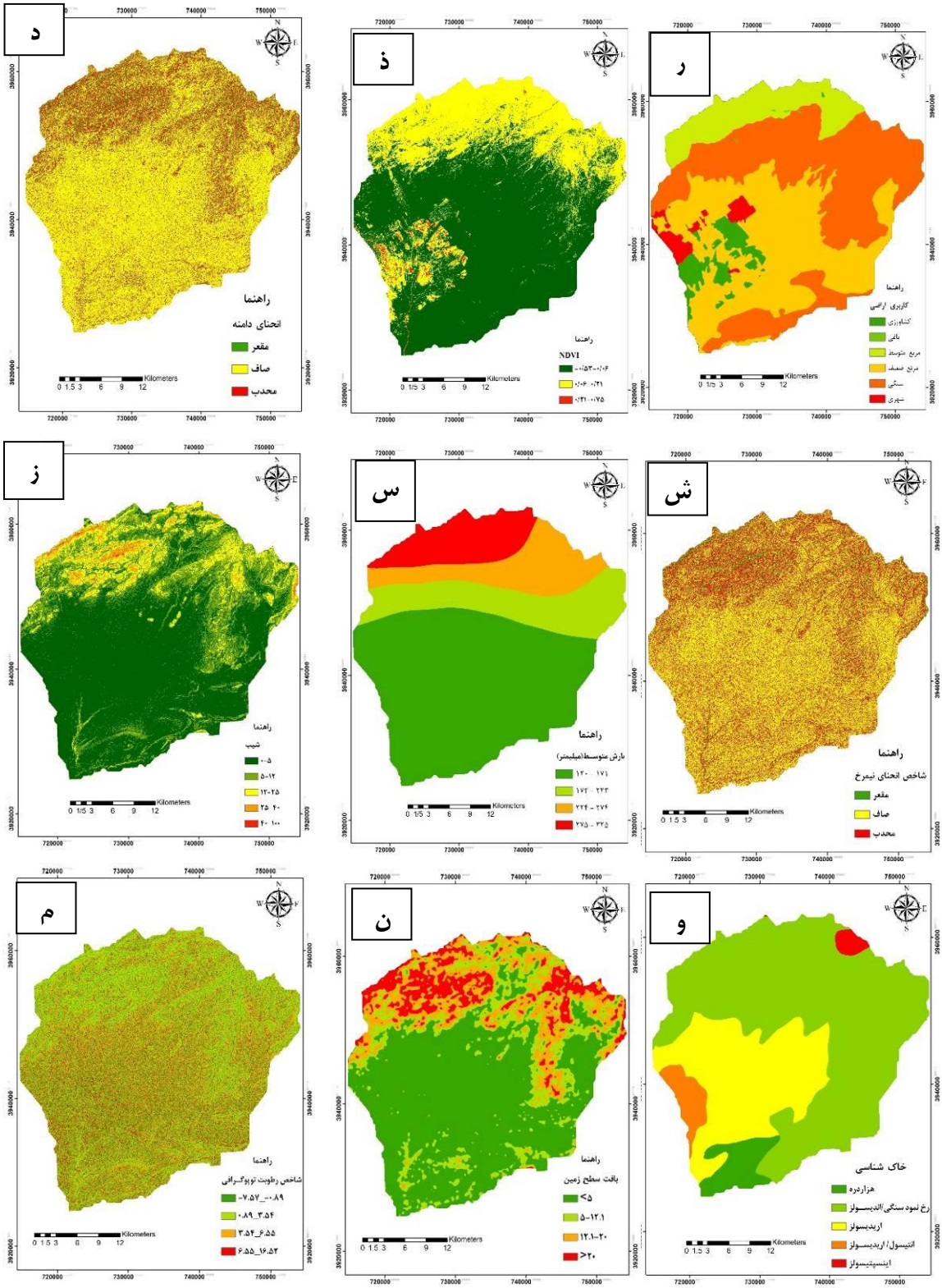
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.28.3.2]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.37]



شکل ۳- نقشه عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش خندقی

Figure 3. Map of effective factors on the occurrence of gully erosion

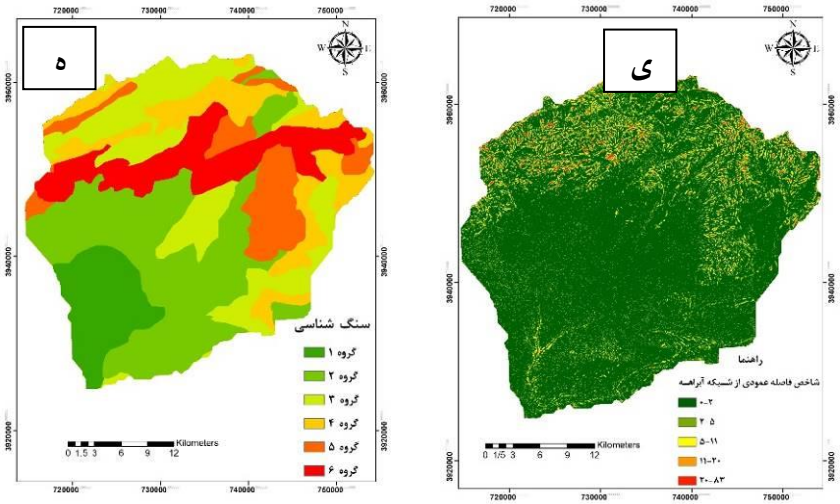
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.28.3.2]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.37]



ادامه شکل ۳- نقشه عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش خندقی

Continued Figure 3. Map of effective factors on the occurrence of gully erosion

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.28.3.2]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.37]



ادامه شکل ۳- نقشه عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش خندقی

Continued Figure 3. Map of effective factors on the occurrence of gully erosion

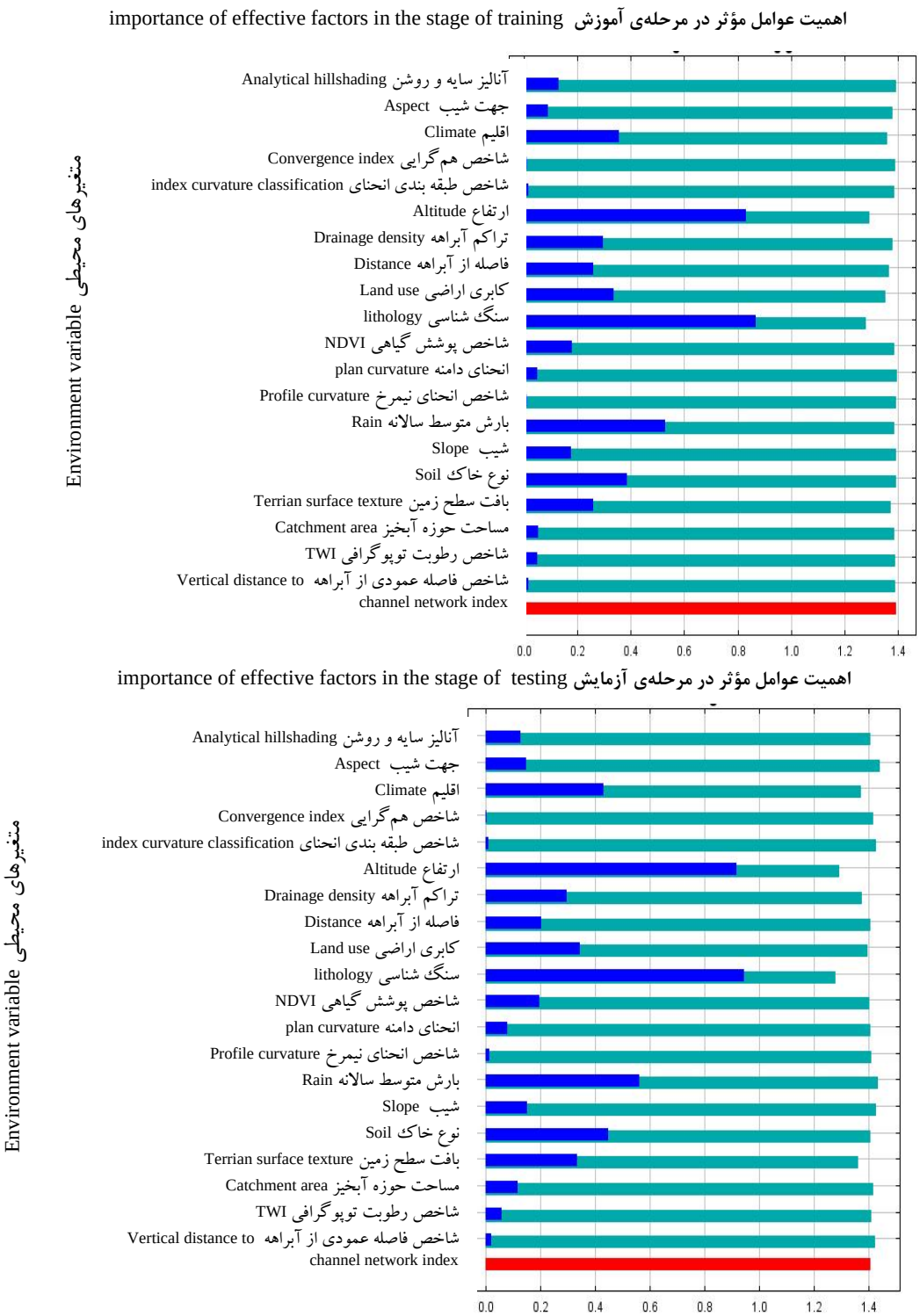
جدول ۲- درصد مشارکت و اهمیت جایگزینی عوامل در حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از مدل بیشینه بی‌نظمی

Table 2. The percentage of participation and the importance of replacing factors in gully erosion sensitivity using ME

متغیر Variable	درصد مشارکت Percent contribution	اهمیت جایگزینی Permutation importance
سنگ‌شناسی lithology	58.2	17.7
کاربری اراضی Land use	14.9	5.9
ارتفاع Altitude	11.2	52.5
فاصله از آبراهه distance	5.1	2.6
اقلیم Climate	1.9	3.9
بافت سطح زمین Terrian surface texture	1.9	2
تراکم آبراهه Drainage density	1.5	2.3
جهت شیب Aspect	1	1
شاخص پوشش گیاهی NDVI	1	1.9
بارش متوسط سالانه Rain	0.8	5.4
شاخص آنالیز سایه روشن Analytical hillshading	0.8	0.1
شاخص طبقه‌بندی انحناء index curvature classification	0.6	0.4
شیب Slope	0.4	1.4
مساحت حوزه آبخیز catchment area	0.3	0.7
شاخص هم‌گرایی convergence index	0.1	0.2
شاخص فاصله عمودی از شبکه آبراهه Vertical distance to channel network index	0.1	0.2
شاخص رطوبت توپوگرافی Topographic wetness Index	0.1	0.4
نوع خاک Soil	0.1	0.8
شاخص انحنای نیمرخ profile curvature	0	0.5
انحنای دامنه plan curvature	0	0.2

در پژوهش حاضر با استفاده از بیشینه بی‌نظمی، درصد مشارکت و اهمیت جایگزینی فاکتورهای محیطی به‌دست آمد (جدول ۲). لازم به یادآوری است که تحلیل مدل یادشده بدون حضور آزمون جک‌نایف است. بر این اساس، نتایج بیان‌گر مشارکت زیاد و اهمیت فراوان متغیرهای شاخص سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، ارتفاع و فاصله از آبراهه بود. شکل ۴ نتایج منحنی آزمون جک‌نایف است که این آزمون میانگین پاسخ را نسبت به متغیرهای محیطی بعد از ۵۰۰ مرتبه تکرار در تعیین عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش خندقی نشان می‌دهد که به‌ازای تعداد عوامل تأثیرگذار منحنی پاسخ وجود دارد. در این شکل نمودار رنگ قرمز حالت بهینه، رنگ آبی نوسانات پیرامون آن، محور X ارزش هر متغیر و محور y هر متغیر محیطی یا عامل مؤثر را نشان می‌دهد. نتایج به‌دست آمده از این آزمون، بیانگر آن است که ارتفاع، سنگ‌شناسی، بارش متوسط سالانه، نوع خاک و اقلیم جزء عوامل مهم در رخداد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز سمنان به‌شمار می‌آیند همچنین این نتایج نشان‌دهنده آن است تمامی عوامل بر حساسیت فرسایش خندقی تأثیرگذار می‌باشند که با نتایج تحقیق شیرانی و نادری سامانی (۲۰۲۲) هم‌خوانی دارد.

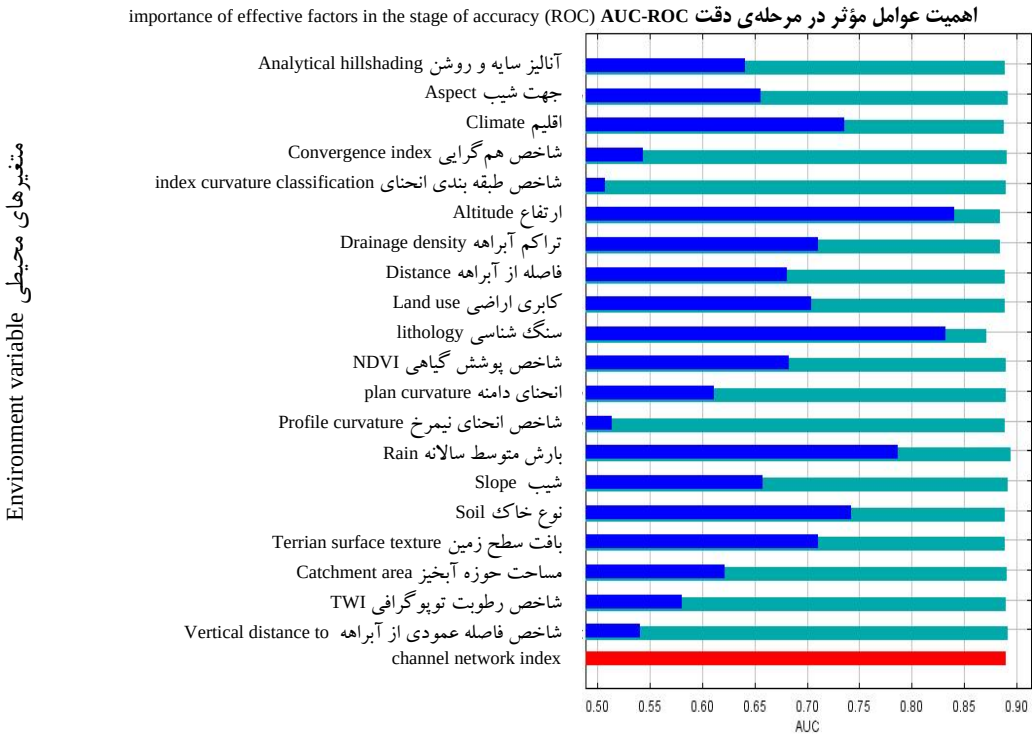
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.28.3.2]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.37]



شکل ۴- نتایج اهمیت عوامل مؤثر در مرحله آموزش (واسنجی)، آزمایش (پیش‌بینی) و دقت (ROC) به‌کارگیری آن‌ها با استفاده از آزمون جک‌نایف و اجرای مدل بیشینه بی‌نظمی

Figure 4. The results of the importance of effective factors in the stage of training, testing and accuracy (ROC) of their application using the jackknife test and implementation of the ME model

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.28.3.2]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.37]



ادامه شکل ۴- نتایج اهمیت عوامل مؤثر در مرحله آموزش (واسنجی)، آزمایش (پیش‌بینی) و دقت (ROC) به‌کارگیری آن‌ها با استفاده از آزمون جک‌نایف و اجرای مدل بیشینه بی‌نظمی

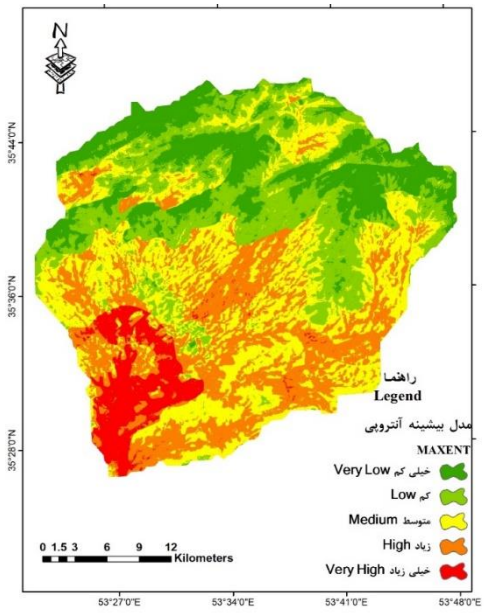
Continued Figure 4. The results of the importance of effective factors in the stage of training, testing and accuracy (ROC) of their application using the jackknife test and implementation of the ME model

تهیه نقشه پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش خندقی

پس از انجام مدل‌سازی مکانی پیش‌بینی مناطق دارای پتانسیل خندقی نتایج به‌دست آمده از مدل انتروپی در نرم‌افزار ArcGIS 10.5 طبقه‌بندی شد که در شکل ۵ نشان داده شده است بر اساس نتایج به‌دست آمده بخش‌های انتهایی و جنوبی حوزه آبخیز سمنان پتانسیل بالایی در وقوع فرسایش خندقی دارد همان‌گونه که در نقشه‌های ورودی مدل بیشینه بی‌نظمی مشاهده می‌شود بخش‌های مستعد فرسایش خندقی، مرتفع با واحدهای سنگی حساس به فرسایش آبی شامل پهنه‌های رسی، نهشته‌های کواترنری، مارن و رسوبات تبخیری، تراس‌ها و مخروط‌افکنه‌ها، بارش متوسط سالانه، نوع خاک اریدسول و اقلیم خشک و فراخشک بوده و بیش‌تر، در طبقات تراکم زه‌کشی بالا، شیب کم، اراضی پست و بدون جهت جغرافیایی، شاخص رطوبت جریان بالا، کاربری اراضی مرتعی، و بافت‌های کم سطح زمین مشاهده می‌شوند.

نتایج این پژوهش، نتایج رحمتی و همکاران (Rahmati et al., 2018)، انتظاری و همکاران (Entezari et al., 2014) و فیض‌نیا و همکاران (Farajzadeh et al., 2012) را تأیید می‌کند. به‌عبارت دیگر بر اساس نتایج به‌دست آمده از پژوهش رحمتی و همکاران (۲۰۱۸) بافت خاک، تراکم زه‌کشی، سنگ‌شناسی و فاصله از جریان مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع فرسایش خندقی و هم‌چنین پژوهش انتظاری و همکاران (۲۰۱۴) وقوع فرسایش خندقی را نیازمند وجود شرایط بحرانی هم‌زمان بین چندین متغیر محیطی از جمله سنگ‌شناسی، کاربری اراضی و فاصله از آبراهه می‌دانند. لذا بر این اساس پژوهش حاضر از این نظر با پژوهش‌های مذکور دارای وجه اشتراک می‌باشد. هم‌چنین این پژوهش موید نتایج فیض‌نیا و همکاران (۲۰۱۲) می‌باشد. آن‌ها معتقدند فرآیند فرسایش خندقی با سایر اشکال فرسایشی متفاوت بوده و معمولاً در اراضی کم‌شیب مشاهده می‌شود. لازم به توضیح است دلیل این امر را می‌توان فرصت نفوذ بیش‌تر جریان‌های سطحی در اراضی کم‌شیب بیان کرد که در صورت حساس بودن خاک منطقه (وجود املاح) احتمال ایجاد حفره افزایش می‌یابد که پس از فرسایش لانه روباهی فرسایش خندقی به‌وقوع می‌پیوندد.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.28.3.2]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.37]



شکل ۵- استعداد وقوع فرسایش خندقی بر اساس مدل بیشینه بی‌نظمی
Figure 5. Gully erosion susceptibility mapping of the study area using ME model

اعتبارسنجی نقشه پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش خندقی

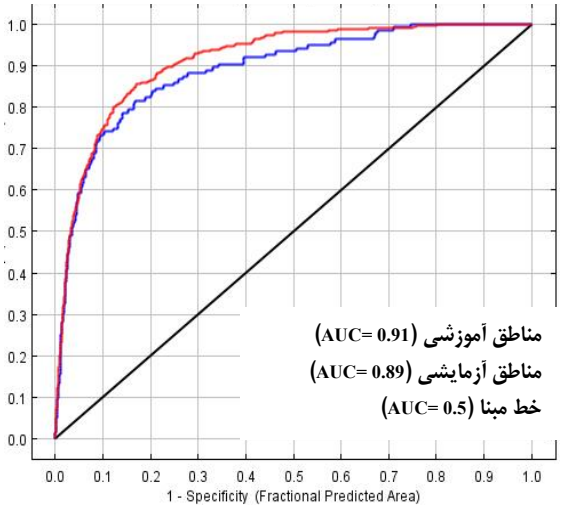
از آنجایی‌که در مرحله اعتبارسنجی مدل‌ها، نمی‌توان از همان خندق‌هایی که در مدل‌سازی یا واسنجی نقشه پهنه‌بندی حساسیت فرسایش خندقی به‌کار گرفته شده‌اند، استفاده نمود. لذا پهنه‌های خندقی در منطقه مطالعاتی به‌طور تصادفی به دو دسته آموزشی (۷۰ درصد) و آزمایشی (۳۰ درصد) به‌ترتیب برای مدل‌سازی و اعتبارسنجی تقسیم شدند (Azareh et al., 2019، Pourghasemi et al., 2017، Rahmati et al., 2017). سطح زیر منحنی (AUC) ویژگی عمل‌گر گیرنده (ROC) در مرحله مدل‌سازی و اعتبارسنجی مدل بیشینه بی‌نظمی به‌ترتیب ۰/۹۱ و ۰/۸۹ به‌دست آمد (شکل ۶) بنابراین مدل بیشینه بی‌نظمی در مراحل مدل‌سازی یا واسنجی و اعتبارسنجی یا پیش‌بینی به‌ترتیب دارای دقت ۹۱ و ۸۹ درصد است. هم‌چنین بر اساس منابع علمی در زمینه کیفیت تحلیل روش منحنی ROC و اعتبارسنجی مدل‌های پیش‌بینی مکانی می‌توان بیان کرد مدل پیشینه بی‌نظمی در هر دو مرحله توسعه و پیش‌بینی، کارایی خیلی خوبی برای پهنه‌بندی حساسیت مناطق مستعد فرسایش خندقی دارا می‌باشد.

با توجه به نتایج به‌دست آمده و مطالعات میدانی انجام شده در حوضه سمنان، مهم‌ترین عوامل در وقوع فرسایش خندقی این منطقه، عوامل طبیعی و محیطی است که می‌توان به‌ترتیب به عامل‌های ارتفاع، سنگ‌شناسی، بارش متوسط سالانه، نوع خاک و اقلیم اشاره نمود. مدل بیشینه بی‌نظمی سطح رده‌های حساسیت خیلی‌زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی‌کم به‌ترتیب با نسبت‌های ۱۰، ۲۵، ۲۸، ۱۹ و ۱۸ درصد از سطح ۱۰۳۴ کیلومتر مربع منطقه مورد مطالعه را پوشش می‌دهند هم‌چنین در مدل مورد استفاده در حوزه آبخیز سمنان تراکم وقوع فرسایش خندقی از رده‌های حساسیت خیلی‌کم تا زیاد افزایش و در رده خیلی‌زیاد اندکی کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، کارایی مدل بیشینه بی‌نظمی برای شناسایی مناطق مستعد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز سمنان بر اساس مطالعات میدانی و ثبت ۴۸۷ مورد از خندق‌های موجود در منطقه بررسی شد. بر اساس نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، می‌توان بیان نمود که مدل بیشینه بی‌نظمی کارایی بسیار خوبی در تعیین پتانسیل مناطق مستعد فرسایش خندقی دارد. این مدل برای تولید نقشه پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش خندقی از وقایع خندقی گذشته به عنوان متغیر وابسته استفاده شد و روابط بین متغیرهای مستقل و وابسته را بر اساس میزان بی‌نظمی شناسایی می‌کند تا خطای پیش‌بینی به کمینه برسد. بنابراین میزان عدم قطعیت پیش‌بینی‌های آن کم می‌باشد و نتایج حاصل از آن برای مدیریت و کنترل فرسایش حوزه‌های آبخیز مفید و قابل اعتماد می‌باشد هم‌چنین نتایج نشان داد که تراکم و احتمال وقوع فرسایش‌های خندقی در بخش‌های مختلف منطقه متفاوت است.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.28.3.2]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.37]



شکل ۶- منحنی ROC و سطح زیر منحنی نقشه حساسیت فرسایش خندقی
Figure 6. ROC curve and area under the curve of gully erosion sensitivity map

یافتن مناطق مستعد وقوع فرسایش خندقی اولین گام در مدیریت حفاظت خاک و کنترل فرسایش و تولید رسوب منطقه است. مدل بیشینه بی‌نظمی نشان داد که طبقات ارتفاعی، سنگ‌شناسی، بارش متوسط سالانه، اقلیم و نوع خاک شرایط بحرانی برای وقوع فرسایش خندقی هستند که توجه به آنها در مدیریت و حفاظت خاک منطقه حائز اهمیت است.

حدود ۳۵ درصد مساحت پهنه‌های با حساسیت زیاد و خیلی‌زیاد توسط این مدل، بیش از ۹۰ درصد خندق‌ها منطقه را در بر می‌گیرند. مدل بیشینه بی‌نظمی با مقدار ۰/۹۱ در حالت توسعه مدل و مقدار ۰/۸۹ در حالت اعتبارسنجی می‌توانند در پهنه‌بندی و پیش‌بینی رخداد فرایش خندقی کارامد باشند. بنابراین توجه به این نکات کلیدی در خصوص وضعیت پتانسیل وقوع فرسایش خندقی در برنامه‌ها و اقدامات حفاظت خاک می‌تواند راه‌گشا باشد. در نهایت به‌کارگیری مدل بیشینه بی‌نظمی برای شناسایی و اولویت‌بندی مناطق مستعد فرسایش خندقی برای تمرکز هر چه بهتر پروژه‌های اجرایی آبخیزداری در مناطق حساس به فرسایش خندقی پیشنهاد می‌شود.

تشکر و قدردانی

این پژوهش بخشی از نتایج پروژه ملی تحقیقاتی "تعیین آستانه‌های مهم‌ترین عوامل مؤثر و ارزیابی مدل‌سازی حساسیت‌پذیری فرسایش خندقی در حوزه‌های منتخب کشور، منطقه مطالعاتی حوزه آبخیز سمنان)" با کد ملی ۹۹۰۵۸۶-۰۲۵-۲۹-۳۸-۰ است. نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی سمنان و همچنین پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور به‌خاطر فراهم آوردن زمینه این پژوهش ابراز می‌نمایند

منابع

Azareh, A., Rahmati, O., Rafiei-Sardooi, E. Sankey, J. B., Lee, S., Shahabi, H., bin, B., & 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, 684-696

Baboli moakher, H., Shirani, K., & Taghian. A.R. (2018). Performance of chaos theory on natural systems in landslide hazard zonation in Fahlian River Basin. *Journal of Geoscience*, 28(109), 187-200 (In Persian).

Ballabio, C., & Sterlacchini, S. (2012). Support vector machines for landslide susceptibility mapping: the Staffora River Basin case study, Italy. *Mathematical geosciences*, 44(1), 47-70.

Bernini, A., Bosino, A., Botha, G., & Mearker, M. (2021). Elevation of gully erosion suscepceptibility using a maximum entropy model in the upper Mkhomazi River Basin in South Africa. *Geo Information*, 1-20.

Boos, D.D., & Brownie, C. (2004). Comparing variances and other measures of dispersion. *Statistical Science*, 19(4), 571-578.

Castillo, C., Taguas, E.V., Zarco-Tejada, P., James, M.R., & Gómez, J.A. (2014). The normalized topographic method: an automated procedure for gully mapping using GIS. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(15), 2002–2015.

Chaplot, V., Giboire, G., Marchand, P., Valentin, C. (2005). Dynamic modelling for linear erosion initiation and development under climate and land-use changes in northern Laos. *Catena*, 63(2-3), 318-328.

Conoscenti, C., Agnesi, V., Angileri, S., Cappadonia, C., Rotigliano, E., Märker, M. (2013). A GIS-based approach for gully erosion susceptibility modelling: a test in Sicily, Italy. *Enviromental Earth Science*, 70, 1179-1195.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.28.3.2]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.37]

Conoscenti, C., Angileri, S., Cappadonia, C., Rotigliano, E., Agnesi, V., Märker, M. (2014). Gully erosion susceptibility assessment by means Fig. 29.9 Robustness of the ME model in training and validation steps based on AUC 444 N. Javidan et al. of GIS-based logistic regression: A case of Sicily (Italy). *Geomorphology*, 204(1), 399–411.

Conoscenti, C., Ciaccio, M., Caraballo-Arias, N. A., Gómez-Gutiérrez, Á., Rotigliano, E., & Agnesi, V. (2015). Assessment of susceptibility to earth-flow landslide using logistic regression and multivariate adaptive regression splines: a case of the Belice River basin (western Sicily, Italy). *Geomorphology*, 242, 49-64.

Conforti, M., Aucelli, P. P., Robustelli, G., & Scarciglia, F., (2011). Geomorphology and GIS analysis for mapping gully erosion susceptibility in the Turbolo stream catchment (Northern Calabria, Italy). *Natural Hazards*, 56(3), 881-898.

Davoudi Moghaddam, D. & Rahmati, O., Panahi, M., Tiefenbacher, J., Darabi, H., Haghizadeh, A., Torabi Haghighi, O., Asadi Nalivan, O., & Tien Bui, D. (2020). The effect of sample size on different machine learning models for groundwater potential mapping in mountain bedrock aquifers. *Catena*, 187(1), 1-15.

Davoudi Moghaddam, D., & Haghizadeh, A. (2020). Detection of Susceptible Areas to Flooding and its Most Important Contributing Factors Using the Maximum Entropy Model in the Tashan Watershed, Khuzestan. *Watershed Management Research Journal*, 33(4), 94-109.

Dempster, A.P. (1967). Upper and lower probabilities induced by a multi valued mapping. *Ann Math Stat*, 38(2), 325–339.

Dormann, C. F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, G., Carl, G., Carré, J. R. G., Marquéz, B., Gruber, B., Lafourcade, P.J., Leitão, T., Münkemüller, C., Mc Clean, P. E., Osborne, B., Reineking, B., Schröder, A., Skidmore, K., Zurell, D., & Lautenbach, S. (2013). Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography* 36, 27-46.

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

Elith, J., Phillips, S., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y., & Yates, C. (2010). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17(1), 43–57.

Entezari, M., Amjad, M., Moradi, Kh., & Olfati, S. (2014). Zoning of gully erosion in catchment of Dyreh by Analytical Hierarchy Process (AHP). *The Journal of Spatial Planning*, 17, 63-86 (in Persian).

Erfani, M., Jahanishakib, F., & Enayat, A. (2021). Modeling the habitat distribution of Black Francolin (Francolinus francolinus) using MaxEnt algorithm in Sistan region. *Journal of Animal Environment*, 13(1),139-146.

Farajzadeh, M., Afzali, A., Khalili, Y., & Gholichi, E. (2012). Gully erosion susceptibility assessment using multivariate regression model, case study: Kiasar, Southern Mazandaran Province. *Environmental Erosion Research Journal*, 2, 42-57 (in Persian).

Feiznia, S., Heshmati, M., Ahmadi, H., & Ghodosi. J. (2007). Gully erosion assessment in Aghajari Formation in Ghasr-shirin region. *Research and Construction*, 40, 32-74 (In Persian).

Gearman, M., & Blinnikov, M.s. (2019). Mapping the potential distribution of Oak Wilt (Bretziella fagacearum) in east central southeast the Minnesota using the Maxent. *Journal of Forestry*. 117(6), 579-591.

Geissen, V., Kampichler, C., López-de Llergo-Juárez, J.J., GalindoAcántara, A. (2007). Superficial and subterranean soil erosion in Tabasco, tropical Mexico: Development of a decision tree modeling approach. *Geoderma*, 139(3-4), 277–287.

Gómez Gutiérrez, Á., Schnabel, S., Lavado Contador, J.F. (2009). Using and comparing two nonparametric methods (CART and MARS) to model the potential distribution of gullies. *Ecological Modelling*, 220(24), 3630-3637.

Graham, C.H., Elith, J., Hijmans, R.J., Guisan, A., Peterson, A.T., & Loiselle, B.A. (2008). The NCEAS predicting species distributions working group. The influence of spatial errors in species occurrence data used in distribution models. *Journal of Applied Ecology*, 45, 239–247.

Karimi Sangchini, E., Ownegh, M., Sadoddin, A., & Yousefi Mobarhan, E. (2020). Predicting the Impacts of Land Cover Management Scenarios on the Run-off Volume and River Pollutants Using the L-THIA Model for the Hablehrud basin. *Watershed Management Research Journal*, 33(3), 36-52.

Jafarzadeh, M. S., Tahmasebipoor, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H., & Rouhani, H. (2021). Prediction of susceptible areas for groundwater recharge based on maximum entropy model. *Advanced Applied Geology*, 11(4): 723-739.

Javidan, N., Kavian, A., Pourghasemi, H.R., Conoscenti, C., Jafarian, Z. (2020). Data Mining Technique (Maximum Entropy Model) for Mapping Gully Erosion Susceptibility in the Gorganrood Watershed, Iran. In Gully Erosion Studies from India and Surrounding Regions; Shit, P.K., Pourghasemi, H.R., Bhunia, G.S., Eds.; Advances in Science, Technology & Innovation; *Springer International Publishing: Cham, Switzerland*, 427–448

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.28.3.2]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.37]

Jiao, Y., Zhao, D., Ding, Y., Liu, Y., Xu, Q., Qiu, Y., Liu, C., Liu, Z., and Zha, Z., Li, R. (2019). Performance evaluation for four GIS-based models purposed to predict and map landslide susceptibility: A case study at a World Heritage site in Southwest China. *Catena*, 183, 104221.

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. *Science Total Enviroment*, 677: 281-298.

Karimi Sangchini, E. and M. Ownegh. (2015). Evaluation of gully erosion hazard by statistical models in Naghan Inter basin, Chaharmahal Va Bakhtiari province. *Journal of Water and Soil Conservation*, 22(5), 315-319 (In Persian).

Kornejady, A., Ownegh, M., Bahremand, A. (2017). Landslide susceptibility assessment using maximum entropy model with two different data sampling methods. *Catena*, 152, 144-162.

Kuhnert, P. M., Henderson, A. K., Bartley, R. and Herr, A. (2010). Incorporating uncertainty in gully erosion calculations using the random forests modelling approach. *Environmetrics*, 21, 493-509.

Lal, R. (2003). Offsetting global CO2 emissions by restoration of degraded soils and intensification of world agriculture and forestry. *Land Degradation & Development*, 14(3), 309-322.

Lucà, F., Conforti, M., Robustelli, G. (2011). Comparison of GIS-based gullying susceptibility mapping using bivariate and multivariate statistics: Northern Calabria, South Italy. *Geomorphology*, 134, 297–308.

Lombardo, L., Cama, M., Conoscenti, C., Märker, M., & Rotigliano, E. (2015). Binary logistic regression versus stochastic gradient boosted decision trees in assessing landslide susceptibility for multiple occurring landslide events: application to the 2009 storm event in Messina (Sicily, southern Italy). *Natural Hazards*, 79(3), 1621-1648.

Madadi, A., Asgharisaraskanroud, S., Negahban, S., Marhamat, M. (2022). Evaluation of gully erosion sensitivity using Maximum Entropy model in Shoor River watershed (Mohr Township). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(2), 123-145

Magliulo, P. (2010). Soil erosion susceptibility maps of the Janare Torrent Basin (Southern Italy). J. Maps, 6, 435-447.

Magliulo, P. (2012). Assessing the susceptibility to water-induced soil erosion using a geomorphological, bivariate statistics-based approach. *Enviroment earth Science*, 67, 1801–1820.

Märker, M., Pelacani, S., Schröder, B. (2011). A functional entity approach to predict soil erosion processes in a small Plio-Pleistocene Mediterranean catchment in Northern Chianti, Italy. *Geomorphology*, 125(4), 530-540.

Milaghardan, A. H., Delavar, M., & Chehreghan, A. (2016). Uncertainty in landslide occurrence prediction using Dempster–Shafer theory. *Modelling of Earth System Environments*, 2, 188.

Phillips, S.J., Dudík, M., & Schapire, R.E. (2004). A maximum entropy approach to species distribution modeling. *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning*, 83.

Phillips, S.J., Anderson, R.P., & Schapire, R.E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3/4), 231-259.

Park, N.W. (2015). Using maximum entropy modeling for landslide susceptibility mapping with multiple geo environmental data sets. *Environmental Earth Science*, 73, 937–949.

Pourghasemi, H.R., Pradhan, B., Gokceoglu, C., Mohammadi, M., & Moradi, H.R. (2013). Application of weights-of-evidence and certainty factor models and their comparison in landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 6, 2351–2365.

Pourghasemi, H.R., Yousefi, S., Kornejady, A., and Cerdà, A. (2017). Performance assessment of individual and ensemble data-mining techniques for gully erosion modeling. *Science of the Total Environment*, 609,764-775.

Rajabzadeh, F., Ghiasi, S., & Rahmati, O. (2018). The performance of the maximum entropy algorithm and geographic information system in shallow landslide susceptibility assessment. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 8(2), 57-74.

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

Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H., & Feizizadeh, B. (2018). Assessing the effectiveness of the maximum entropy model to gully erosion susceptibility prediction in the Kashkan-Poldokhtar Watershed. *Watershed Engineering and Management*, 10(4), 727-738.

Saberi Chenari, K., Bahremand, A., Berdi Sheikh, V., and Biram Komaki, C. (2016). Gully erosion hazard zoning using of Dempster-Shafer model in the Gharnaveh watershed, Golestan province. *EcoHydrology*, 3(2), 219-231 (In Persian).

Shrestha S, Kang, T.S. (2019). Assessment of seismically- induced landslide susceptibility after the 2015 Gorkha earthquake, Nepal. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 78(3), 1829-1842.

Shirani, K., & Arabameri, A.R. (2015). Landslide hazard zonation using logistic regression method (Case study: Dez-e-Oulia basin). *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 19(72), 321-335.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.28.3.2]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.37]

Shirani, K., Pasandi, M., & Arabameri, A.R. (2018). Landslide susceptibility assessment by Dempster–Shafer and Index of Entropy models, Sarkhoun basin, Southwestern Iran, *Natural Hazards*, 93(3), 1379-1418.

Shirani K. (2021). Gully Erosion Mapping and Susceptibility Assessment Using Statistical and Probabilistic Methods. *JWSS - Isfahan University of Technology*; 25(2), 151-174 (In Persian).

Shirani, K., & Naderi Samani, R. (2022). Prioritization of effective parameters, landslide susceptibility zonation using maximum entropy, and dempster shafer in Doab Samsami, Chaharmahal Bakhtiyari. *Journal of Range and Watershed Managment*, 75(1), 51-72 (In Persian).

Swets, J.A. (1988). Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 240(4857), 1285–1293.

Tahmassebipoor, N., Rahmati, O., Noormohamadi, F., Lee, S. (2016). Spatial analysis of groundwater potential using weights-of-evidence and evidential belief function models and remote sensing. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(1), 79.

Teimouri, M., & Asadi Nalivan, O. (2021). Determination of Groundwater Spring Potential Using Maximum Entropy, GIS and RS Emphasizing HAND Topographic-Hydrologic New Index (Case Study: Urmia Lake Basin). *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 13(2), 119-138.

Tien Bui, D., Pradhan, B., Revhaug, I., Nguyen, D. B., Pham, H. V., & Bui, Q. N. (2015). A novel hybrid evidential belief function-based fuzzy logic model in spatial prediction of rainfall-induced shallow landslides in the Lang Son city area (Vietnam) Geomatics. *Natural Hazards Risk*, 6, 243-271.

Tsangaratos, P., Ilia, I., Hong, H., Chen, W., & Xu, C. (2017). Applying information theory and GIS-based quantitative methods to produce landslide susceptibility maps in Nancheng County, China. *Landslides*, 14, 1091-1111.

Valentin, C., Poesen, J., & Li, Y. (2005). Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena*, 63, 132- 153.

Yousefi Mobarhan, E., & Karimi Sangchini, E. (2021). Continuous Rainfall-Runoff Modeling Using HMS-SMA with Emphasis on the Different Calibration Scale. *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 52(2), 112-119.

Yousefi Mobarhan, E., & Peyrowan, H. (2022). Investigating the Sustainability and Interactive Effects of Physical-chemical Properties of Erosion-sensitive Marl and Rangeland Vegetation in Arid and Semiarid Areas (Case Study: Shahrood Town). *Geography and Environmental Sustainability*, 12(1), 57-74.

Zakerinejad, R., & Märker, M. (2014). Prediction of Gully erosion susceptibilities using detailed terrain analysis and maximum entropy modeling: a case study in the Mazayejan Plain, Southwest Iran. *Geografia Fisica e Dinamicca Quaternaria*, 37(1), 67-76.

Zabihi, M., Mirchooli, F., Motevalli, A., Darvishan, A. K., Pourghasemi, H. R., Zakeri, M. A., & Sadighi, F. (2018). Spatial modelling of gully erosion in Mazandaran Province, northern Iran. *Catena*, 161, 1-13.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.28.3.2]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.37]