



Print ISSN: 2251-7480
Online ISSN: 2251-7400

Journal of
**Water and Soil
Resources Conservation
(WSRCJ)**

Web site:

<https://wsrcj.srbiau.ac.ir>

Email:

iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

**Vol. 15
No. 1 (57)**

**Received:
2024-11-10**

**Accepted:
2025-03-04**

Pages: 95-114

Prediction of Gully Erosion Susceptibility using ME, Dempster-Shafer and WOE Models in the Southern Slope of Alborz: Determining the Best Model and the Effect of the Most Important Indicators

Ebrahim Yousefi Mobarhan¹, Kouros Shirani^{2*} and Kazem Saber³

1) Assistant Professor, 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.

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

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

*Corresponding author emails: e.yousefi.m@gmail.com

Abstract:

Introduction: Identifying areas sensitive to gully erosion using statistical models and making maximum use of available information with less cost and time and access to greater accuracy is of particular importance. The aim of this research is to prepare a map of sensitivity to gully erosion using maximum entropy, Dempster-Schaffer and witness weight models in the Alaa watershed in the southern slope of Alborz, Semnan province. 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 response curves are other objectives of this research.

method: In this study, after selecting the study area, the necessary information was collected and a map of the factors affecting gully erosion was prepared. Next, a gully occurrence distribution map was prepared and the data were randomly divided into two groups: training or calibration (70%) and experimental or prediction (30%). Also, a multiple collinearity test was performed with the variance inflation factor and tolerance coefficient indices to examine the overlap and importance of each of the effective factors. After implementing the maximum disorder, Dempster-Schaffer, and witness weight models, a gully erosion sensitivity map was prepared and classified into five classes from very low to very high. Finally, an evaluation of gully erosion sensitivity prediction models for the study area was performed and the superior method was selected for the study area.

Results and Discussion: Based on the results obtained from the collinearity test, 20 parameters from 23 effective parameters in the occurrence of gully erosion, including climate, land use, stream density, soil type, elevation, distance from the stream, average annual precipitation, slope, profile curvature index, slope curvature, vertical distance index from the stream, convergence index, vegetation index, topographic moisture index, slope direction, watershed area, light shade index, lithology, ground surface texture, and curvature classification index, were identified for appropriate modeling. The gully erosion sensitivity map of the study area showed that the outcrop of the Quaternary clay and marl rock unit in the southern regions of the basin has the greatest effect on causing gully erosion. The structure performance characteristic curve and the area under the curve were used to validate the models. The maximum irregularity, Dempster-Schaffer, and witness weight models have accuracies of 87.1, 81, and 83.7 percent in the modeling stage, respectively, and 87.5, 80, and 84.6 percent in the validation stage, and are very effective in predicting areas susceptible to gully erosion.

Conclusion: The maximum entropy model with a value of 0.91 in the model development mode and a value of 0.89 in the validation mode can be efficient in zoning and predicting the occurrence of gully erosion. Therefore, the maximum entropy model was used with good speed and accuracy in evaluating the effective factors and validating the zoning of sensitivity to gully erosion. Zoning the sensitivity map to gully erosion in the study area showed that most of the areas with high and very high sensitivity were concentrated in the central and southeastern regions of the study area, while the areas with low sensitivity to gully erosion are spread in the steep and high northern regions. The results of this research can be promoted and trained, and the implementation agencies can take the necessary measures to control gully erosion using the results of this research.

Keywords: Jackknife test, multiple collinearity test, maximum entropy, gully erosion, machine learning model



پیش‌بینی حساسیت‌پذیری فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های حداکثر آنتروپی، دمپسترشفر و وزن شاهد در دامنه‌ی جنوبی البرز: تعیین بهترین مدل و تأثیر مهم‌ترین شاخص‌ها

ابراهیم یوسفی مبرهن^{۱*}، کورش شیرانی^۲ و کاظم صابر چناری^۳

(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.

(۲) پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

(۳) پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

* ایمیل نویسنده مسئول: e.yousefi.m@gmail.com

چکیده:

مقدمه و هدف پژوهش: شناسایی مناطق حساس به فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های آماری و استفاده حداکثری از اطلاعات موجود با صرف هزینه و زمان کمتر و دسترسی به دقت بیش‌تر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. هدف این پژوهش تهیه نقشه حساسیت به فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های حداکثر آنتروپی، دمپسترشفر و وزن شاهد در حوزه آبخیز علاء در دامنه‌ی جنوبی البرز استان سمنان می‌باشد. شناسایی مهم‌ترین عامل‌های محیط زیستی مؤثر بر رخداد فرسایش خندقی با روش جک نایف و بررسی اهمیت هر یک از عامل‌های محیط زیستی در منطقه‌ی مورد مطالعه با تحلیل منحنی‌های پاسخ از دیگر اهداف این تحقیق است.

مواد روش‌ها: در این پژوهش پس از انتخاب منطقه مورد مطالعه، اطلاعات لازم جمع‌آوری و نقشه عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی تهیه گردید. در ادامه نقشه پراکنش رخداد خندقی تهیه و داده‌ها به شکل تصادفی به دو دسته آموزشی (۷۰٪) و دسته آزمایشی یا پیش‌بینی (۳۰٪) تقسیم شدند همچنین آزمون هم‌خطی چندگانه با شاخص‌های فاکتور تورم واریانس و ضریب تحمل به-منظور بررسی هم‌پوشانی و همچنین اهمیت هر یک از عوامل مؤثر انجام شد. پس از اجرای مدل‌های پیش‌بینی بی‌نظمی، دمپسترشفر و وزن شاهد نقشه حساسیت به فرسایش خندقی تهیه و در پنج کلاس خیلی کم تا خیلی زیاد طبقه‌بندی گردید. سرانجام ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی حساسیت فرسایش خندقی منطقه مورد مطالعه انجام و روش برتر برای منطقه مورد مطالعه انتخاب گردید.

نتایج و بحث: براساس نتایج بدست آمده از آزمون هم‌خطی، از ۲۳ پارامتر مؤثر در رخداد فرسایش خندقی ۲۰ پارامتر 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 برای مدل‌سازی مناسب تشخیص داده شدند. نقشه حساسیت به فرسایش خندقی حوزه مورد مطالعه نشان داد که رخنمون واحد سنگی رسی و مارنی کواترنری در مناطق جنوبی حوضه بیشترین تأثیر را در ایجاد فرسایش خندقی دارند. برای اعتبارسنجی مدل‌ها از منحنی مشخصه عملکرد ساختار و مساحت سطح زیرمنحنی استفاده شد. مدل‌های پیش‌بینی بی‌نظمی، دمپسترشفر و وزن شاهد در مرحله مدل‌سازی به ترتیب دارای دقت ۸۱/۷۱٪ و ۸۳/۷٪ درصد و در مرحله اعتبارسنجی نیز دارای دقت ۸۷/۵٪ و ۸۴/۶٪ درصد می‌باشند و دارای کارایی خیلی خوب در پیش‌بینی مناطق حساس به فرسایش خندقی است.

نتیجه‌گیری: مدل حداکثر آنتروپی با مقدار ۰/۹۱ در حالت توسعه مدل و مقدار ۰/۸۹ در حالت اعتبارسنجی می‌توانند در پهنه‌بندی و پیش‌بینی رخداد فرسایش خندقی کارآمد باشد فلذا مدل حداکثر آنتروپی با سرعت و دقت خوب در ارزیابی عوامل مؤثر و اعتبارسنجی پهنه‌بندی حساسیت نسبت به فرسایش خندقی به‌کار گرفته شد. پهنه‌بندی نقشه حساسیت نسبت به فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه نشان داد بیشتر مناطق با حساسیت زیاد و خیلی زیاد در مناطق مرکزی و جنوب‌شرقی منطقه مورد مطالعه متمرکز بوده، درحالی که مناطق با حساسیت فرسایش خندقی کم در مناطق پرشیب و مرتفع شمالی گسترش دارند. نتایج این پژوهش قابل ترویج و آموزش است و دستگاه‌های اجرای برای مهار فرسایش خندقی می‌توانند با استفاده از نتایج این پژوهش اقدام‌های لازم را انجام دهند.

کلید واژه‌ها: آزمون جک‌نایف، آزمون هم‌خطی چندگانه، پیش‌بینی بی‌نظمی، فرسایش آب‌کندی، 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., 2020). 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 هستند 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). والتین و همکاران^۱ (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. باتوجه به موارد ذکر شده شناسایی و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی مناطق مستعد فرسایش خندقی گامی مهم و اساسی در ارزیابی خطرات محیطی حوزه‌های آبخیز به شمار 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; Lombardo et al., 2015; Conoscenti et al., 2013; Valentin et al., 2005). تعداد زیادی از مطالعات نیز یک رویکرد تصادفی را برای پهنه‌بندی حساسیت به فرسایش خندقی اعمال کرده‌اند. علاوه بر تجزیه و تحلیل دومتغیره (Magliulo et al., Ballabio and Sterlacchini., 2012; Magliulo., 2010; Boos and Brownie., 2005; Karimi Sangchini and Farajzadeh et al., 2012; Ownegh., 2015; Luca et al., 2011)، تجزیه و تحلیل شرطی (Ballabio and Sterlacchini., 2012)، درخت‌های رگرسیون و طبقه‌بندی (Marker et al., Geissen et al., 2007)، توپوگرافی نرمال شده (Castillo et al., 2013)، جنگل تصادفی (Kuhnert et al., 2010)، نسبت فراوانی (Conforti et al., 2001; Luca et al., 2011)، وزن شاهد (Shirani et al., Dube et al., 2014)

2018؛ Tahmassebi-poor et al., 2016)، دمپسترشفر^۲ (Shirani et al., 2018؛ Saberi Chenari et al., 2016)، فرآیند سلسله مراتب تحلیلی (Entezari et al., 2014)، شبکه عصبی مصنوعی (Rahmati et al., 2017؛ Pourghasemi et al., 2017)، ماشین بردار پشتیبان (Pourghasemi et al., 2013)، 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 به دلیل 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 حداکثر آنتروپی^۳ به‌عنوان یک مدل یادگیری ماشین^۴ 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 and Blinnikov), بلایای طبیعی مانند زمین‌لغزش (Saberichenari et al., 2017؛ Pourghasemi et al., 2016؛ Davoudi Moghaddam), سیل (Shirani., 2021) and تغذیه آب‌های زیرزمینی (and Haghizadeh., 2020)، (Tahmassebi-poor et al., Jafarzadeh et al., 2021) و فرسایش خندقی (Kariminejad et al., 2019) به‌کار گرفته شده است.

مدل حداکثر آنتروپی 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., 2004) و تا به امروز پژوهش‌های متعددی در این زمینه انجام گرفته است (Baboli moakher et al., 2018؛ Shrestha and Kang., 2019؛ Arabameri., 2015؛ Shirani and جیانو^۵ و همکاران (Jiao et al., 2019) به کمک ۱۵ عامل محیطی و بکارگیری دو مدل ارزش اطلاعات و حداکثر آنتروپی اقدام به ارزیابی و پهنه‌بندی حساسیت نسبت به زمین‌لغزش نمودند. آنها روش حداکثر آنتروپی با درصد مطلوبیت بالاتر را به‌عنوان بهترین مدل معرفی کرده‌اند. ذبیحی و همکاران (۲۰۱۸) به مدل‌سازی فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های آماری دو متغیره مانند نسبت فراوانی، وزن شاهد و شاخص بی‌نظمی در استان مازندران در شمال ایران پرداختند. نتایج نشان داد که مدل نسبت فراوانی عملکرد بهتری نسبت به

نداشتن به داده‌ها و کیفیت نامناسب آن‌ها با محدودیت روبه‌رو است. بنابراین، انجام پژوهش‌های کامل در مناطقی با ظرفیت فرسایش‌پذیری و رسوب‌گذاری، ضروری و اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. برای پرداختن به شکاف‌های تحقیقاتی در مطالعه حاضر، مدل حداکثر آنتروپی به عنوان یک تکنیک داده‌کاوی برای تحلیل، کاوش و پیش‌بینی وقوع مکانی فرآیندهای فرسایش خندقی اتخاذ شد. در ادامه کارایی این مدل با مدل‌های احتمال وزن شاهد و دمپسترشفر مقایسه و مدل برتر برای منطقه مورد مطالعه انتخاب گردید. هدف از این پژوهش کاربرد مدل‌های یادگیری ماشین حداکثر آنتروپی، دمپسترشفر و وزن شاهد برای تهیه نقشه‌ی حساسیت فرسایش خندقی برتر در حوزه آبخیز علاء سمنان است. شناسایی مهم‌ترین عامل‌های محیط‌زیستی مؤثر بر رخداد خندقی با روش جک‌نایف^۹ و بررسی نحوه اثرگذاری هر یک از عامل‌های محیط‌زیستی در منطقه‌ی بررسی شده با تحلیل منحنی‌های پاسخ از اهداف دیگر این پژوهش است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

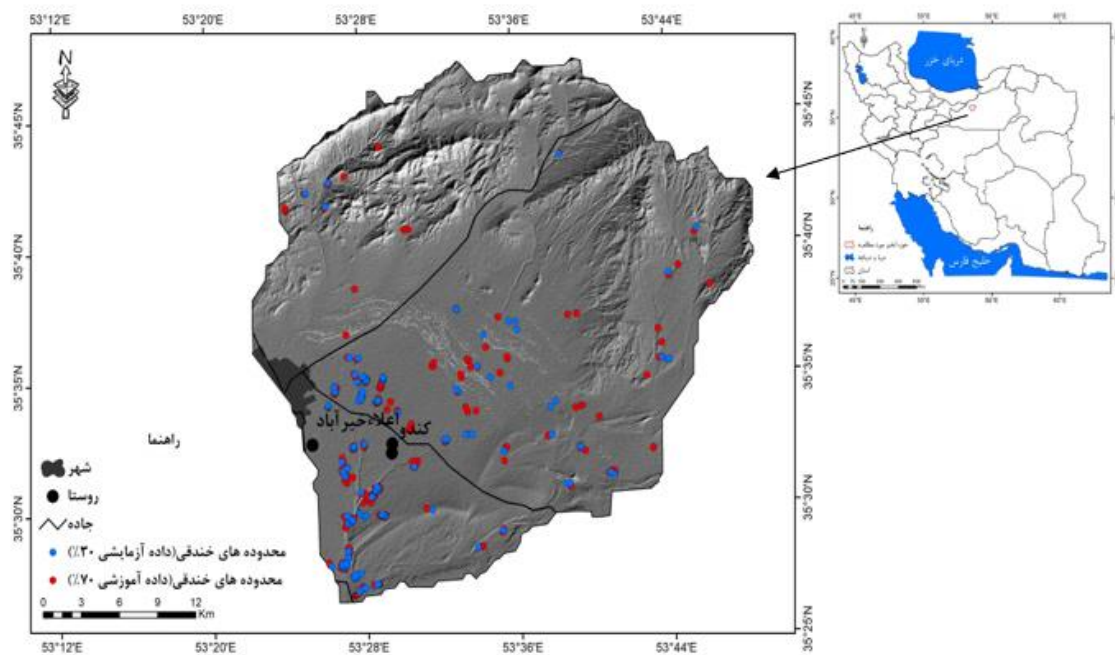
حوزه آبخیز علاء، در شهرستان سمنان به مساحت ۱۰۳۶ کیلومتر مربع و در محدوده جغرافیایی $35^{\circ}08'$ تا $35^{\circ}50'$ عرض شمالی و $53^{\circ}05'$ تا $48^{\circ}53'$ طول شمال قرار گرفته است. این حوزه به دلیل قرار گرفتن در نیمه جنوبی رشته کوه‌های البرز، دارای تنوع توپوگرافیکی می‌باشد به‌طوری‌که بیشینه ارتفاع محدوده ۲۴۸۰ متر از سطح دریا در شمال و حداقل ارتفاع ۹۴۴ متر در جنوب حوزه واقع شده است. آب و هوای این منطقه گرم و در زمستان نسبتاً سرد است. میزان متوسط بارندگی سالانه آن ۱۴۰ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت سالانه حدود ۱۸ درجه سانتی‌گراد بوده و تعداد روزهای یخبندان در طول سال حدود ۴۸ روز است (دوست محمدیان، ۲۰۲۰). این تنوع توپوگرافیکی به همراه عوامل اقلیمی منجر به تنوع بوم‌سازگان در این منطقه گردیده است به‌طوری‌که این حوزه در برگزیده بوم‌سازگان کوهستانی، بیابانی و کویری می‌باشد. موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز سمنان در شکل ۱ نمایش داده شده است.

روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش در هفت گام اصلی انجام شد. در گام اول منطقه پژوهشی انتخاب شد و نقشه پراکنش رخداد خندقی تهیه شد و داده‌ها به شکل تصادفی به دو دسته آموزشی یا واسنجی (۷۰٪) و دسته آزمایشی یا پیش‌بینی (۳۰٪) تقسیم شدند. در گام دوم نقشه‌های ۲۳ عامل مؤثر تهیه و آماده‌سازی شد. در گام سوم آزمون هم‌خطی چندگانه به‌منظور بررسی هم‌پوشانی اطلاعاتی

مدل وزن‌دهی شاهد و شاخص بی‌نظمی داشت. رحمتی و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی کارایی مدل حداکثر آنتروپی 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 حداکثر آنتروپی تایید کردند. همچنین مددی و همکاران (۲۰۲۲) حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی در حوزه آبخیز رودخانه شور را بررسی نمودند. نتایج نشان از دقت بالای ۹۵ درصدی مدل در مرحله اعتبارسنجی مدل بود. عسگری و شیرانی (۲۰۲۴) در ارزیابی عوامل مؤثر در حساسیت‌پذیری فرسایش گالی با استفاده از مدل‌های دمپسترشفر و حداکثر آنتروپی به این نتیجه رسیدند که مدل حداکثر آنتروپی دقت بهتری نسبت به دمپسترشفر دارد. همچنین عسگری و همکاران (۲۰۲۵) در حوزه ایلام فرسایش آب‌کندی را با استفاده از مدل‌های وزن شاهد (WofE) و دمپسترشفر (DSH) ارزیابی نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که در هر دو مدل، درصد سطح زیرمنحنی قابل قبول نشان دادند که این موضوع نشان‌دهنده عملکرد زیاد هر دو مدل در منطقه پژوهشی بود. جاویدان و همکاران (۲۰۲۰) پهنه‌بندی حساسیت فرسایش خندقی در حوزه گرگان‌رود را به کمک ۱۷ عامل محیطی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی انجام دادند. نتایج نشان داد مدل حداکثر آنتروپی هم در درجه برازش و هم در عملکرد پیش‌بینی عالی عمل کرد و منجر به پیش‌بینی‌های دقیق شد. برنینی^۶ و همکاران (۲۰۲۱) با مدل حداکثر آنتروپی به شناسایی و ارزیابی عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی در حوزه رودخانه مخمازی آفریقای جنوبی پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که پارامترهای ارتفاع، بارندگی و عمق دره مهمترین متغیرهای اثرگذار بر پیش‌بینی فرسایش خندقی می‌باشند. اینیک و اوتلو^۷ (۲۰۲۴) حساسیت فرسایشی را با استفاده از روش‌های رگرسیون لجستیک، نسبت فرکانس، وزن شواهد و روش‌های آنتروپی شانون در بینگول ترکیه بررسی کردند. نتایج نشان از دقت بالای رگرسیون لجستیک نسبت به سایر روش‌ها در پهنه‌بندی نقشه حساسیت‌پذیری فرسایشی بود. لی^۸ و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از داده‌های با وضوح بالا از چندین مدل یادگیری ماشین در پیش‌بینی حساسیت فرسایش خندقی استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل پهنه‌سازی شده XGBOOST بالاترین عملکرد را نسبت به سایر مدل‌ها در تهیه نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش خندقی به دست آورد.

مروری بر سابقه تحقیق نشان داد که هنوز مطالعه‌ای با سه مدل حداکثر آنتروپی، دمپسترشفر و وزن شاهد به‌صورت ترکیبی برای ارزیابی حساسیت به فرسایش خندقی انجام نشده است از طرفی با توجه به اینکه ارزیابی فرسایش خندقی اهمیت بسیار زیادی دارد اما، این ارزیابی به دلیل نبود و یا دسترسی



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و موقعیت خندق‌ها در حوزه آبخیز



شکل ۲. تصاویر فرسایش خندقی در حوزه آبخیز مورد مطالعه

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 به کمک دستگاه موقعیت‌یاب جهانی^۱، تصاویر گوگل‌ارث^{۱۱} به منظور 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) به منظور اجرا و توسعه و ۳۰ درصد (۱۴۶ خندق) به منظور اعتبارسنجی مدل‌ها

عوامل مؤثر و بررسی اهمیت عوامل انجام شد. در گام چهارم مدل‌های حداکثر آنتروپی، دمپسترشفر و وزن شاهد اجرا د و نقشه پهنه‌بندی حساسیت نسبت به رخداد فرسایش خندقی و طبقه‌بندی آن به پنج رده خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد (Shirani., 2017; Yousefi Mobarhan and Shirani., 2023) انجام شد. در گام پنجم ارزیابی دقت طبقه‌بندی و اعتبارسنجی نقشه پهنه‌بندی و پیش‌بینی حساسیت نسبت به رخداد فرسایش خندقی انجام شد. گام ششم: آستانه‌ها و اهمیت عامل‌های مؤثر بر اساس بهترین مدل تعیین شد. در گام هفتم نقشه پهنه‌بندی و پیش‌بینی حساسیت به رخداد فرسایش خندقی تهیه شد.

GIS 10.7، ArcGIS 10.7 و SPSS 22 تهیه و طبقه‌بندی شدند (Shirani, 2021؛ Saberi Chenari et al., 2016) (شکل ۳).

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. در صورتی که داده‌ها فاقد هم‌بستگی یا دارای استقلال باشند از آن‌ها در مدل مورد نظر می‌توان استفاده کرد. بدین منظور 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 (Rahmati et al., 2017؛ Shirani et al., 2015). تحلیل هم‌خطی چندگانه (Multicollinearity) هم‌بستگی میان متغیرهای مستقل را برآورد می‌کند (Dormann et al., 2013؛ Tien Bui et al., 2015). بدین منظور از دو شاخص ضریب تحمل (TOL) و فاکتور تورم واریانس (Variance inflation factor) یا VIF برای تحلیل و تعیین هم‌پوشانی اطلاعاتی عوامل مؤثر استفاده گردید (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 گرفته شد (Milaghardan et al., 2016؛ Tsangaratos et al., 2017). اگرچه تاکنون هیچ قانون مشخصی برای تعیین آستانه‌های دو مقدار VIF و 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 ۱۰ و TOL بزرگ‌تر از ۰/۱ یا ۰/۲ باشد در آن صورت هم‌پوشانی بین عوامل مؤثر وجود ندارد. به‌عبارت دیگر بین داده‌ها یا متغیرهای مستقل هیچ هم‌بستگی وجود نخواهد داشت (Tsangaratos et al., 2017).

اجرای مدل

مدل حداکثر آنتروپی

مدل حداکثر آنتروپی یکی از فن‌آوری‌های ماشین یادگیری 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 فرآیند

بصورت کاملاً تصادفی با استفاده از ابزارهای Random Points Create، Featurs Subset در محیط ArcGIS 10.7 تهیه شدند (Shirani et al., 2018؛ Saberchenari et al., 2016).

جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌های مکانی عوامل مؤثر بر رخداد خندقی

به‌منظور جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌های مکانی مورد نیاز 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 با دقت ۱۲/۵ متر مربوط به ماهواره ALOS ژاپن از جمله داده‌های مکانی است که نقش مؤثری در تهیه و آماده‌سازی عوامل ژئومورفومتریک تاثیرگذار بر ناپایداری و خندق ایفاء می‌کند. لذا به‌منظور تهیه ۱۷ عامل از بین ۲۳ عامل مؤثر انتخابی شامل شاخص‌های انحنای کلی، دامنه، نیمرخ، تحذب، 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 پال‌سار^{۱۲} ماهواره آلوس ژاپن و نرم افزار ۷،۷،۱ SAGA GIS استفاده شد. شش عامل دیگر شامل عوامل ذاتی سنگ‌شناسی، نوع خاک، کاربری اراضی، شاخص پوشش گیاهی^{۱۳} 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 10.7 در قالب فرمت سلولی (رستری) با اندازه سلولی ۲۵×۲۵ متر مربع بصورت یکسان و مشابه برای تمامی عوامل طبقه‌بندی مجدد به روش شکست طبیعی و فاصله هندسی منحنی فراوانی پیکسل‌ها، مدیریت و پردازش شدند. همچنین به منظور 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، در محیط SAGA 7.7.1

$$q \lambda(x) = \frac{e^{\lambda \cdot f(x)}}{Z_y} \quad (2)$$

که در آن، $q\lambda(x)$ تابع توزیع Gibbs، λ وزن متغیر مورد نظر، Z_y ثابت نرمال‌کننده 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 (Yousefi Mobarhan and Shirani, 2021; Jafarzadeh et al., 2008; Graham et al., 2008).

در این پژوهش مدل حداکثر آنتروپی با استفاده از نرم‌افزار مکسنت اجرا شد. سپس روابط بین متغیرهای مستقل (۲۰ عامل مؤثر) و وابسته (پراکنش رخداد خندق‌ها) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

مدل احتمالاتی وزن شاهد

مدل احتمالاتی وزن شاهد بر اساس تئوری بی‌زین استوار بوده که به‌منظور تهیه نقشه حساسیت‌پذیری بلایای طبیعی و انسانی نظیر زمین لغزش، سیل‌گیری و فرسایش خندقی (پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۳) مورد استفاده قرار گرفته است. شبکه‌های بی‌زین به‌نام شبکه‌های تصمیم^{۱۵}، شبکه‌های تصادفی^{۱۶} و نمودارهای تأثیر^{۱۷} نیز شناخته می‌شود (Silakhori et al., 2022) به‌طور کلی تئوری بی‌زین را می‌توان به‌صورت رابطه زیر نوشت (Silakhori et al., 2022)

$$C|D = (D|C) \times P(C)/P(D) \quad (3)$$

که در آن $P(D)$ احتمال وقوع پیش‌آمد، $P(C)$ احتمال وقوع پیش‌آمد C ، $P(C|D)$ احتمال وقوع پیش‌آمد C به شرطی که پیش‌آمد a اتفاق افتاده باشد و $P(D|C)$ احتمال وقوع پیش‌آمد D ، به شرطی که پیش‌آمد C اتفاق افتاده باشد. سپس بر مبنای محاسبات احتمالات وابسته (تئوری بی‌زین) و رابطه‌های (۵) و (۶) وزن‌های محتمل هر عامل محاسبه می‌شود (Shirani, 2017). وزن نهایی مدل به منظور تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از روابط زیر و جدول شماره ۱ محاسبه شد.

$$W_i^+ = \log_e \left[\frac{(N_{pix1} / (N_{pix1} + N_{pix2}))}{(N_{pix3} / (N_{pix3} + N_{pix4}))} \right] \quad (4)$$

$$W_i^- = \log_e \left[\frac{(N_{pix2} / (N_{pix1} + N_{pix2}))}{(N_{pix4} / (N_{pix3} + N_{pix4}))} \right] \quad (5)$$

که در آن N_{pix1} تعداد پیکسل‌های خندقی در یک کلاس، N_{pix2} (تعداد کل پیکسل‌های خندقی در یک نقشه) - (تعداد پیکسل‌های خندقی در یک کلاس)، N_{pix3} (تعداد پیکسل‌های یک کلاس) - (تعداد پیکسل‌های خندقی در یک کلاس)، N_{pix4} (تعداد کل پیکسل‌های یک نقشه) - (تعداد کل پیکسل‌های خندقی در یک نقشه) - (تعداد پیکسل‌های یک کلاس) + (تعداد پیکسل‌های خندقی در یک کلاس).

مدل‌سازی براساس وقوع خندق‌های ثبت شده انجام می‌گیرد و این امر موجب کاهش عدم قطعیت مدل‌سازی می‌شود. برخلاف مدل‌های آماری که قبل از مدل‌سازی تعدادی فرضیات آماری تعریف می‌کنند، مدل حداکثر آنتروپی از ابتدا سعی در یافتن روابط بین متغیرهای مستقل و وابسته دارد تا براساس آن پیش‌بینی مکانی مبتنی بر واقعیت را ارائه دهد (Phillips et al., 2006).

به‌منظور استفاده از مدل حداکثر آنتروپی برای تعیین مناطق مستعد فرسایش خندقی، ابتدا متغیرهای مستقل (عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش خندقی) و متغیر وابسته (وقایع فرسایش خندقی) به ترتیب به فرمت متنی `ascii` و `csv` فایل تبدیل شده و به نرم‌افزار مکسنت^{۱۴} معرفی شدند. مدل حداکثر آنتروپی هم با داده‌های مکانی پیوسته کمی و هم طبقه‌بندی شده کیفی و یا هر دو بصورت هم‌زمان قابل اجرا می‌باشد. اما از آنجایی که نقطه قوت مدل حداکثر آنتروپی در استفاده از متغیرهای مستقل بصورت 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 انحنای کلی 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 بصورت 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 حداکثر آنتروپی 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 به دست 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 زیر قابل محاسبه است (Phillips et al., 2006).

$$H(\hat{\pi}) = -\sum_{x \in X} \hat{\pi}(x) \ln \hat{\pi}(x) \quad (1)$$

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

$N(E_{ij})$: مساحت فاقد فرسایش خندق در هر طبقه، $N(A)$: مساحت فاقد خندق منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

به طور کلی مقدار نرخ‌های بدست آمده از روابط فوقدر محدوده صفر تا بی‌نهایت متغیر است. از این رو یک مرحله دیگری برای استانداردسازی محدوده مورد نظر مورد نیاز می‌باشد که به صورت روابط زیر تعریف می‌شوند:

$$m(T_P)_{E_{ij}} = \frac{\lambda(T_P)_{E_{ij}}}{\sum \lambda(T_P)_{E_{ij}}} \quad (10)$$

$$m(\overline{T_P})_{E_{ij}} = \frac{\lambda(\overline{T_P})_{E_{ij}}}{\sum \lambda(\overline{T_P})_{E_{ij}}} \quad (11)$$

$$m(\theta) = 1 - m(T_P)_{E_{ij}} - m(\overline{T_P})_{E_{ij}} \quad (12)$$

در این روابط $m(T_P)_{E_{ij}}$ نرخ مثبت استاندارد شده (میزان اعتقاد به وقوع فرسایش خندقی)، $m(\overline{T_P})_{E_{ij}}$ نرخ منفی استاندارد شده (میزان اعتقاد به عدم وقوع فرسایش خندقی) و $m(\theta)$ میزان نرخ نهایی می‌باشد.

در ادامه بر اساس توابع احتمالاتی به‌دست آمده از مدل‌های فوق، نقشه پیش بینی احتمال وقوع فرسایش خندقی تهیه و با استفاده از روش شکستگی‌های طبیعی^{۱۸} در پنج کلاس حساسیت خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه بندی گردید (Saberchenari et al., 2018).

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^{۱۹} که رایج‌ترین روش کمی صحت‌سنجی در مدل‌سازی‌های مکانی و پیش‌بینی پدیده‌های طبیعی است، استفاده شد (Dube et al., 2014; Pourghasemi., 2013). پس از کمی نمودن متغیرها یا عوامل مؤثر، آموزش مدل‌های حداکثر آنتروپی با استفاده از ۲۰ عامل مؤثر بر رخداد خندق و نقشه پراکنش فرسایش خندقی (۷۰٪) به عنوان داده‌های ورودی مدل‌ها اجرا و نقشه پهنه‌بندی حساسیت نسبت به رخداد فرسایش خندقی تهیه شد. درنهایت ارزیابی دقت طبقه‌بندی از ۳۰ درصد مابقی داده‌های پراکنش خندق، مقدار سطح زیر منحنی^{۲۰} منحنی مشخصه عملکرد نسبی محاسبه و اقدام به اعتبارسنجی و مقایسه مدل‌ها شد (Shirani., 2021; Yousefi Mobarhan and Karimi Sangchini., 2023). مساحت زیر منحنی میزان دقت نقشه حساسیت فرسایش خندقی را به‌صورت کمی نشان می‌دهد. مقدار سطح زیر منحنی بین ۰/۵ تا ۰/۶ نماینده اتفافی بودن نتایج، بین ۰/۷ تا ۰/۸ نماینده اعتبار خوب، بین ۰/۸ تا ۰/۹ معرف نتایج دارای اعتبار بسیارخوب و در صورتی که سطح زیر منحنی بیش‌تر از ۰/۹ باشد، اعتبار نتایج به‌دست آمده در سطح عالی قرار دارد (Davoudi Moghaddam et al., 2020).

$$C = [(W^+) - (W^-)] \quad (6)$$

$$W_{fin} = C/Sc \quad (7)$$

که در آن، C تفاضل وزن‌های مثبت و منفی، W_{fin} وزن نهایی استاندارد شده و Sc انحراف از استاندارد اس (Shirani., 2017).

جدول ۱. چهار حالت پتانسیل ایجاد فرسایش خندقی

عوامل ایجاد فرسایش خندقی		
عدم حضور	حضور	فرسایش خندقی
Npix2	Npix1	حضور
Npix4	Npix3	عدم حضور

مدل دمپسترشفر

تئوری دمپستر-شفر به عنوان تئوری تابع اعتقادات شناخته می‌شود که خود تعمیمی از تئوری بیزین که مبتنی بر احتمالات می‌باشد. این تئوری در سال ۱۹۶۷ توسط دمپستر به کار برده شد و در ادامه ساختار ریاضی آن توسط شفر در سال ۱۹۷۶ تشریح گردید (Dempster., 1967). تئوری مذکور براساس دو ایده اصلی بنیان‌گذاری گردیده است: ۱. تعیین درجات اعتقاد برای یک سوال مبتنی بر احتمالات ذهنی؛ ۲. تعیین قوانین دمپستر به منظور ترکیب درجات اعتقاد برای بخش‌های مستقل یک واقعه. نظریه وقوع دمپسترشفر در واقع یک چهار چوب ریاضی برای توصیف داده‌های ناقص تهیه می‌کند (Saber chenari et al., 2016; Yousefi Mobarhan and Zanifar., 2023)

اگر فرض شود 1 چندین لایه متعدد از داده‌های مکانی موجود در منطقه بوده که حساس به فرسایش خندقی است. هر لایه‌ای از داده‌های مکانی به صورت $E_i (i=1,2,\dots,1)$ برای تابع هدف T_P در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب E_{ij} بدست می‌آید که در آن ویژگی کلاس یا طبقه‌ای از E_i و دارای توزیع فراوانی از موقعیت‌ها یا ویژگی‌های مثبت و منفی در بروز خندق هاست. نرخ مثبت با علامت $\lambda(T_P)_{E_{ij}}$ نشان داده می‌شود که به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$\lambda(T_P)_{E_{ij}} = \frac{\frac{N(L \cap E_{ij})}{N(L)}}{\frac{N(E_{ij}) - N(L \cap E_{ij})}{N(A) - N(L)}} \quad (8)$$

نرخ یا نمره منفی با علامت $\lambda(\overline{T_P})_{E_{ij}}$ نشان داده می‌شود که به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\lambda(\overline{T_P})_{E_{ij}} = \frac{\frac{N(L) - N(L \cap E_{ij})}{N(L)}}{\frac{N(A) - N(L) - N(E_{ij}) + N(L \cap E_{ij})}{N(A) - N(L)}} \quad (9)$$

که در آن T_P : وضعیت هدف که در اینجا مربوط به عوامل مؤثر در ایجاد فرسایش خندقی است، $\overline{T_P}$: مربوط به عواملی است که بر روی فرسایش خندقی تأثیری ندارند، $N(L \cap E_{ij})$: مساحت خندق در هر طبقه، $N(L)$: مساحت کل خندق‌های منطقه،

جدول ۲. آزمون هم‌خطی چندگانه بین پارامترها

پارامتر	آزمون		پارامتر	آزمون	
	VIF	TOL		VIF	TOL
انحنای	۰/۰۷	۰/۷۸۳	شاخص انحنای نیم‌رخ	۱۵/۳	۱/۲۷
فاکتور طول-شیب آبراهه	۰/۰۸	۰/۶۲۲	انحنای دامنه	۱۷/۵	۱/۶۱
شاخص توان آبراهه	۰/۰۶	۰/۳۶	شاخص فاصله قائم از آبراهه	۱۵/۶	۲/۷۷
اقلیم	۰/۲۶۹	۰/۸۷	شاخص هم‌گرایی	۳/۷۱	۱/۱۴
کاربری اراضی	۰/۶۹۴	۰/۷۹	شاخص پوشش گیاهی	۱/۴۴	۲/۲۶
تراکم آبراهه	۰/۳۸۸	۰/۶۳	شاخص رطوبت توپوگرافی	۲/۵۷	۱/۵۷
نوع خاک	۰/۷۰۵	۰/۷۶	جهت شیب	۱/۴۲	۱/۳۰
ارتفاع	۰/۱۰۶	۰/۹۱	مساحت حوزه ابخیز	۹/۴۴	۱/۰۹
فاصله از آبراهه	۰/۴۲۶	۰/۶۷	شاخص سایه روشن	۲/۳۴	۱/۴۷
بارش متوسط	۰/۱۰۵	۰/۵۴	سنگ‌شناسی	۹/۵	۱/۸۲
شیب	۰/۳۴۲	۰/۳۱	بافت سطح زمین	۲/۹۲	۳/۱۷
طبقه‌بندی انحنای	۰/۳۵			۲/۷۵	

نتایج و بحث

نتایج آزمون هم‌خطی چندگانه

در این پژوهش قبل از اجرای روش حداکثر آنتروپی تحلیل هم‌خطی چندگانه به منظور اجتناب از هم‌پوشانی اطلاعاتی بین عوامل مؤثر انجام و شاخص‌های ضریب تحمل (TOL) و فاکتور تورم واریانس (VIF) مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج حاصل از آزمون هم‌خطی چندگانه بین پارامترها در جدول (۲) ارائه شده است. همان‌طور که قبلاً بیان شد پارامترهایی که ضریب تحمل کم‌تر از ۰/۱ و فاکتور افزونگی انحراف بیش‌تر از ۱۰ داشتند به دلیل وجود هم‌پوشانی بین پارامترها از فرایند مدل‌سازی کنار گذاشته شدند (Rahmati et al., 2017; Shrestha and Kang., 2019). 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 که با نتایج عسگری و همکاران (۲۰۲۵) همخوانی دارد.

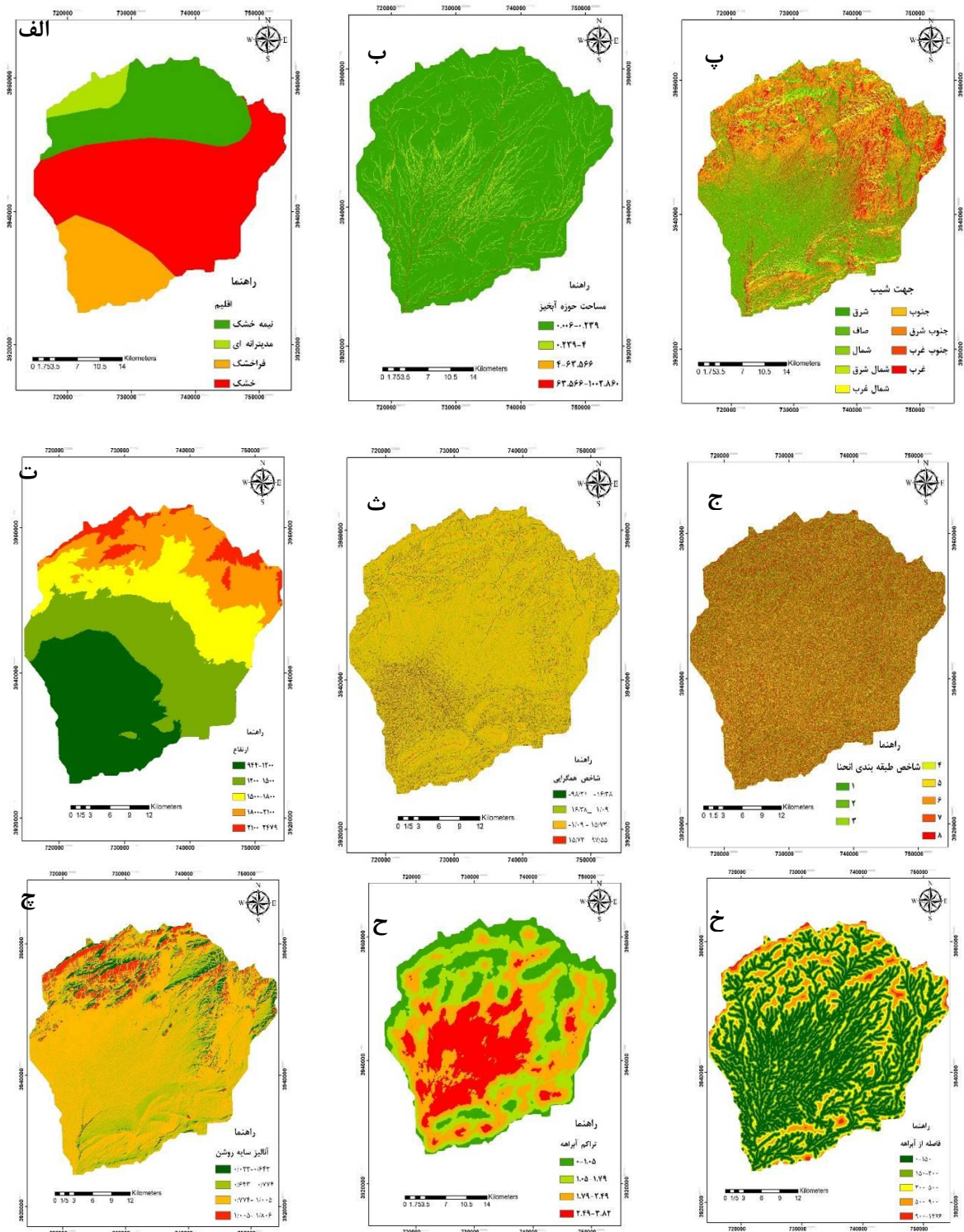
نتایج حاصل از اجرای مدل‌ها

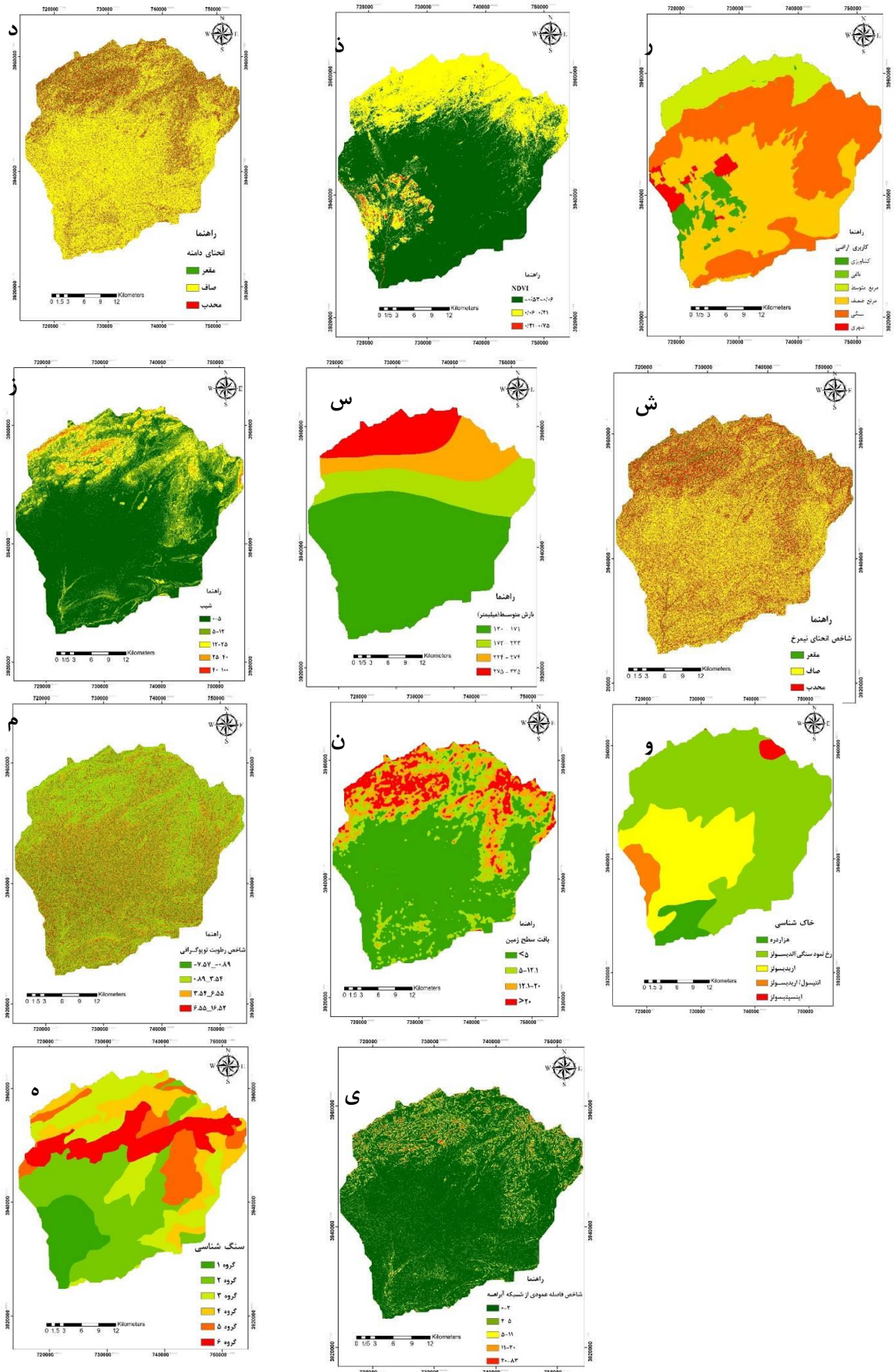
نقشه ۲۰ عامل ورودی مؤثر بر فرسایش خندقی شامل اقلیم، کاربری اراضی، تراکم آبراهه، نوع خاک، ارتفاع، فاصله از آبراهه، بارش متوسط سالانه، شیب، شاخص انحنای نیم‌رخ، انحنای دامنه، شاخص فاصله قائم از آبراهه، شاخص هم‌گرایی، شاخص پوشش گیاهی، شاخص رطوبت توپوگرافی، جهت شیب، مساحت حوزه ابخیز، شاخص سایه روشن، سنگ‌شناسی، بافت سطح زمین و شاخص طبقه‌بندی انحنای در شکل ۳ ارائه شده است. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد صرفاً به منظور 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 به صورت طبقه‌بندی شده بحث و ارائه شده‌اند (شکل ۳)، اما در هنگام مدل‌سازی و ورود به مدل حداکثر آنتروپی 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 ابخیز، ۹۱ درصد از منطقه مورد مطالعه دارای مساحت حوزه‌های ابخیز کم‌تر از ۲۴ هکتار می‌باشد (شکل ۳-ب). تجزیه و تحلیل جهت 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، به ترتیب دارای بیش‌ترین و کم‌ترین پهنه‌های جهت 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) به همین دلیل اغلب جریان‌های سطحی در نقاط خروجی قرار گرفته‌اند. براساس نقشه شاخص طبقه‌بندی انحنای، می‌توان اظهار کرد که کلاس اول، هشتم و ششم، به ترتیب ۲۹، ۲۸ و ۱۵ درصد از منطقه مورد مطالعه را به خود 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-ج). 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 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 حالی که بخش‌های حاشیه‌ای منطقه فاصله‌ی

کاربری اراضی می‌توان اظهار کرد که کاربری 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).

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 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

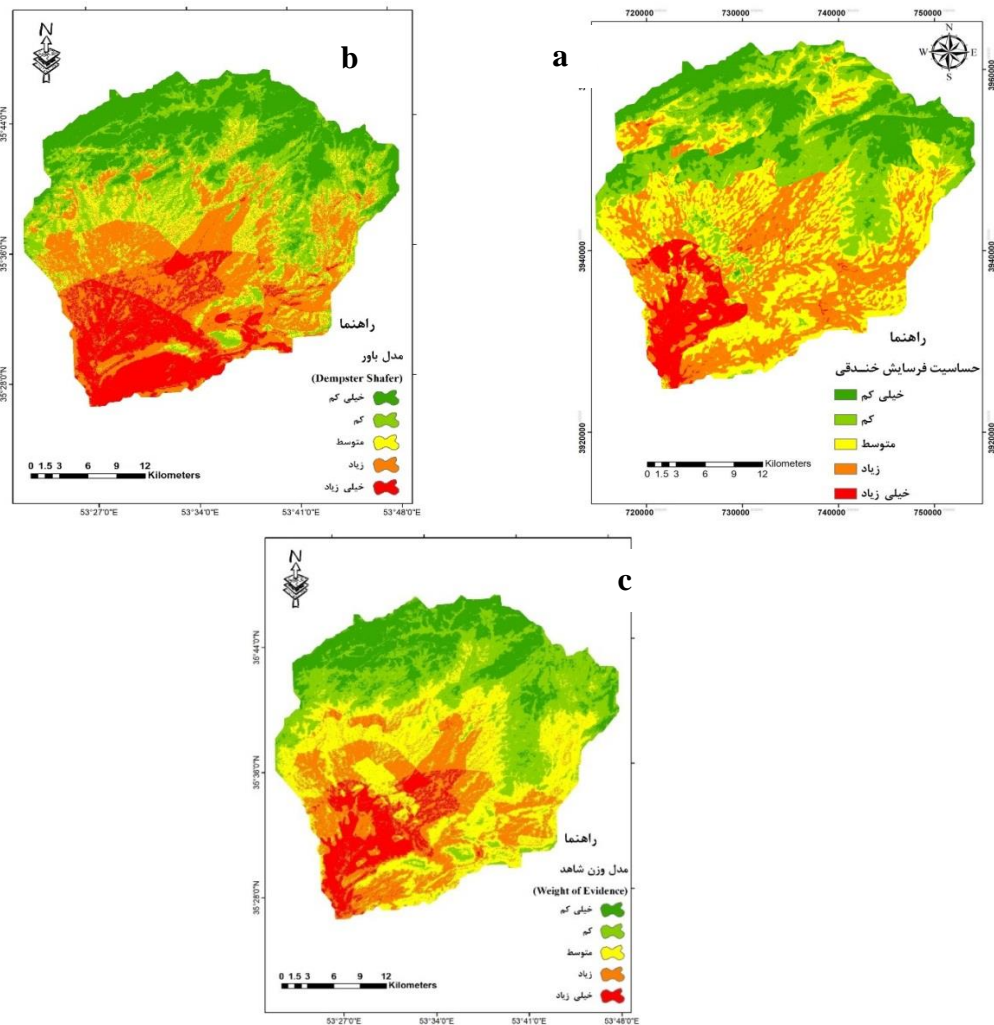




شکل ۳. نقشه عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش خندقی

مورد مطالعه در ۵ طبقه قرار گرفته است که بیشترین سطح در حوزه مورد مطالعه را رخمون سنگی و خاک اندی سولز (۶۲٪) و کمترین سطح را خاک اینسیتی سولز (۱٪) به خود اختصاص داده است (شکل ۳-۳ و). با توجه به تنوع سازندهای زمین‌شناسی (شکل ۳-۵) در حوزه آبخیز سمنان، واخدهای سنگی به ۶ طبقه یا گروه سنگ‌شناسی به شرحی 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 به همراه 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 ۳-۵). لازم به ذکر است حساسیت نسبت فرسایش گروه‌های اول تا ششم سنگ‌شناسی به ترتیب کاسته می‌شود.

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 به خود اختصاص داده است (شکل ۳-۳). لازم به ذکر است که کمینه و بیشینه بارش متوسط سالانه در حوزه آبخیز سمنان به ترتیب ۱۲۰ و ۳۲۵ میلی‌متر می‌باشد. بر اساس نقشه شاخص انحنا نیمرخ می‌توان گفت که اکثر بخش‌های شمالی منطقه دارای انحناى محدب بوده (۳۳ درصد) در حالی‌که بخش‌های مرکزی دارای انحناى کم هستند و با ۵۷ درصد از منطقه کاملاً حالت تخت یا صاف دارند (شکل ۳-۲). 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 به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۳-۳). 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 (شکل ۳-۳). نتایج نقشه نوع خاک نشان داد که منطقه



شکل ۴. استعداد وقوع فرسایش خندقی بر اساس مدل حداکثر آنتروپی (a)، دمپسفر-شفر (b) و وزن شاهد (c)

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

مدل	طبقه	نام طبقه	پیکسل خندقی درصد خندق	پیکسل طبقه درصد مساحت طبقه	نسب فراوانی	سطح سلول هسته
حداکثر آنتروپی	۱	خیلی کم	۰	۲۷۷۳۹۲	۱۶/۷	۰
	۲	کم	۰/۷	۳۷۱۰۲۱	۲۲/۴	۰/۰۳
	۳	متوسط	۸/۷	۴۹۰۲۲۰	۲۹/۶	۳/۴۵
	۴	زیاد	۲۴/۶	۴۰۵۵۶۲	۲۴/۵	۱
	۵	خیلی زیاد	۶۶/۱	۱۱۱۴۵۱	۶/۷	۰/۱
دمپسترشفر	۱	خیلی کم	۰/۸۸	۳۴۱۱۷۱	۲۰/۶	۰/۰۴
	۲	کم	۴/۸	۳۵۴۷۸۶	۲۱/۴	۰/۲۳
	۳	متوسط	۳/۷	۲۲۸۵۳۸	۱۳/۸	۰/۲۷
	۴	زیاد	۳۱/۲	۴۸۵۱۸۶	۲۹/۳	۱/۰۶
	۵	خیلی زیاد	۵۹/۳	۲۴۵۴۸۹	۱۴/۸	۴
وزن شاهد	۱	خیلی کم	۰/۹	۲۶۱۱۸۸	۱۵/۸	۰/۰۶
	۲	کم	۴/۸	۴۱۲۷۵۲	۲۴/۹	۰/۱۹
	۳	متوسط	۱۰/۳	۴۸۰۴۷۲	۲۹/۰۳	۰/۳۶
	۴	زیاد	۲۴/۲	۳۶۱۰۴۲	۲۱/۸	۱/۱
	۵	خیلی زیاد	۵۹/۸	۱۳۹۷۱۶	۸/۴	۷/۰۸

می‌گیرند. شایان ذکر است که این پهنه‌بندی تنها از جنبه نوع فرسایش خندقی می‌باشد و لذا ممکن است انواع فرسایش آبی از جمله فرسایش شیاری، بین شیاری و همچنین فرسایش توده ای در نواحی شیب دار حوزه مورد مطالعه نیز مشاهده گردد.

اعتبارسنجی نقشه‌های پیش‌بینی مناطق حساس به فرسایش خندقی

از آنجایی که 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; Saberchenari *et al.*, 2018; Pourghasemi *et al.*, 2017). سطح زیر منحنی مشخصه عملکرد نسبی در مرحله مدل‌سازی و اعتبارسنجی هر سه مدل به‌دست آمد (شکل ۵). ابتدا داده‌های به‌دست‌آمده از نقشه‌های پهنه‌بندی فرسایش خندقی با استفاده از هر سه مدل حداکثر آنتروپی، وزن شاهد و دمپسترشفر به نقاط مربوط به ۶۸۴ خندق و ۲۹۲ خندق به صورت مجزا برازش داده شد و پس از انتقال داده‌ها به فایل اکسل داده‌ها در نرم‌افزار SPSS مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. طبق جدول ۴ و شکل ۵ که از نقاط واسنجی (۷۰٪) و اعتبارسنجی (۳۰٪) به‌دست آمده است، هر سه مدل دارای

تهیه نقشه پیش‌بینی مناطق حساس به فرسایش خندقی

پس از انجام مدل‌سازی مکانی پیش‌بینی مناطق دارای پتانسیل خندقی نتایج بدست آمده از سه مدل حداکثر آنتروپی، دمپسترشفر و وزن شاهد در نرم افزار ArcGIS 10.7 طبقه‌بندی شد که در شکل ۴ نشان داده شده است. براساس نتایج بدست آمده بخش‌های انتهایی و جنوبی حوزه آبخیز سمنان پتانسیل بالایی در وقوع فرسایش خندقی دارد. همانگونه که در نقشه‌های ورودی مدل حداکثر آنتروپی 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.

همانطور که جدول ۳ نشان می‌دهد، در منطقه مورد مطالعه کلاس فرسایش خیلی زیاد در مدل حداکثر آنتروپی با ۶/۱ درصد، دمپسترشفر با ۱۴/۸ درصد و وزن شاهد با ۸/۴ درصد از سطح منطقه به ترتیب دارای ۲۹۳، ۲۷۰ و ۲۷۲ تعداد خندق را به خود اختصاص می‌دهند. همچنین حدود ۳۱/۲ درصد مساحت پهنه‌های با حساسیت زیاد و خیلی زیاد توسط مدل حداکثر آنتروپی، بیش از ۹۰ درصد خندق‌ها منطقه را در بر

روش حداکثر آنتروپی از کل مساحت خندق‌ها، ۶۶/۱ درصد در طبقه حساسیت خیلی زیاد، و ۲۴/۶ درصد در طبقه حساسیت زیاد قرار گرفته است و در مقابل ۰ درصد در طبقه حساسیت خیلی کم و ۰/۶۶ درصد در طبقه حساسیت کم قرار گرفته است، به عبارت دیگر ۹۰/۸ درصد از مساحت خندق‌های در طبقه حساسیت زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است. برای روش نظریه شواهد دمپسترشفر و رگرسیون چندمتغیره به ترتیب ۵۹/۳ و ۵۹/۳ درصد است. لازم به ذکر است با توجه به اینکه مدل حداکثر آنتروپی هم در مرحله واسنجی و هم در مرحله پیش بینی با دقت کارآمدی بهتر نسبت به دو مدل دیگر ارزیابی گردید، لذا برای بررسی اهمیت و تعیین مشارکت و همچنین تعیین آستانه های عوامل مؤثر در رخداد فرسایش خندقی از نتایج منحنی پاسخ و آزمون جکنايف که در بسته نرم افزاری مدل حداکثر آنتروپی فراهم شده است استفاده گردید.

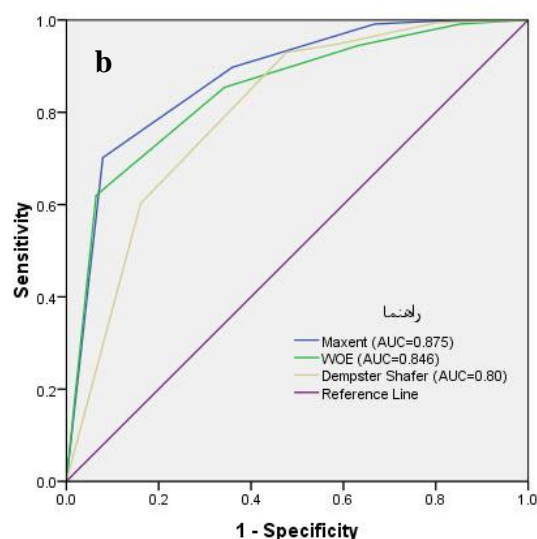
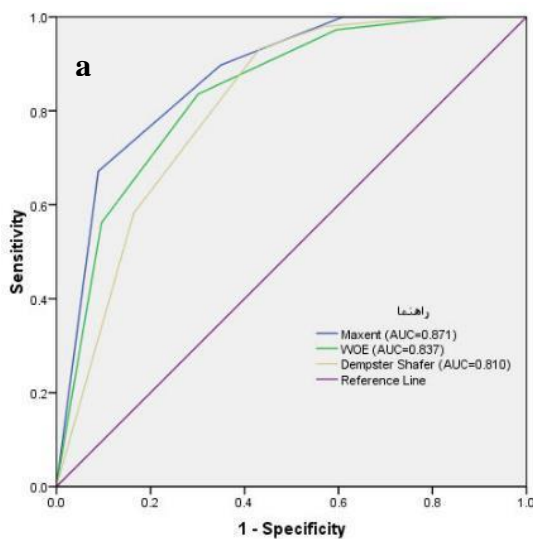
درصد قابل قبولی از مساحت زیر منحنی بودند که این مسئله نشان دهنده عملکرد بالای هر سه مدل در منطقه است. مدل آنتروپی ۸۷/۵ درصد مساحت زیر نمودار دارای بهترین عملکرد برای پهنه‌بندی حساسیت فرسایش خندقی می‌باشد (شیرانی، ۱۳۹۵؛ عسگری و شیرانی، ۱۴۰۳).

بنابراین مدل حداکثر آنتروپی در مراحل مدل‌سازی یا واسنجی و اعتبارسنجی یا پیش‌بینی به ترتیب دارای دقت ۸۷/۱ و ۸۷/۵ درصد است. همچنین بر اساس منابع علمی در زمینه کیفیت تحلیل روش سطح زیر منحنی و اعتبارسنجی مدل‌های پیش‌بینی مکانی می‌توان بیان کرد مدل پیشینه بی‌نظمی در هر دو مرحله توسعه و پیش‌بینی، کارایی بسیار خوبی نسبت به دو مدل دیگر برای پهنه‌بندی حساسیت مناطق مستعد فرسایش خندقی دارا می‌باشد.

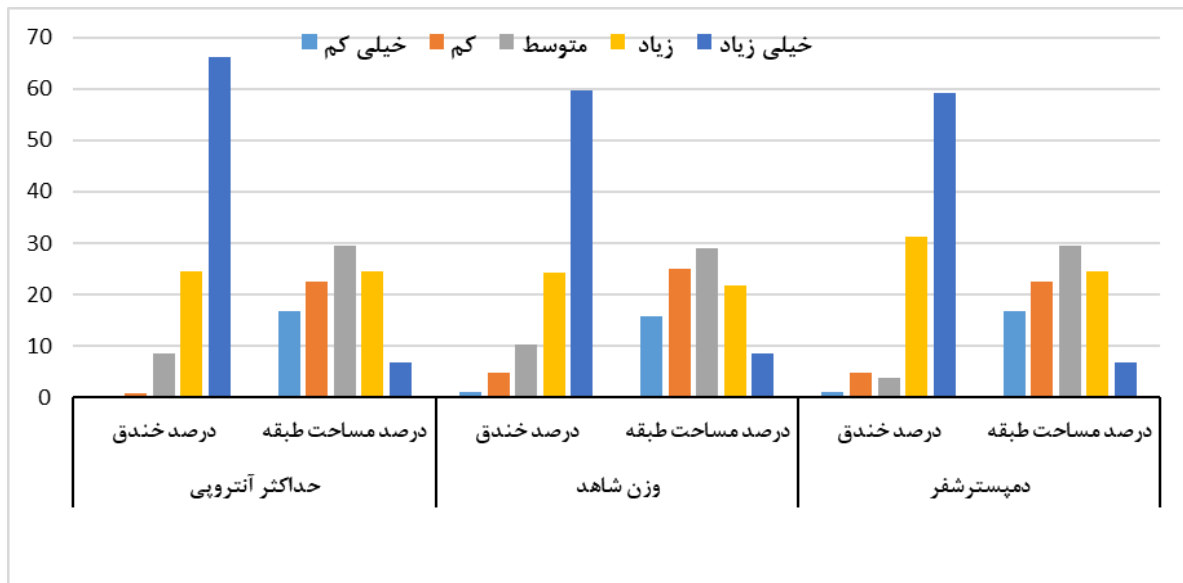
درصد مساحت رخداد خندق و رده‌های حساسیت فرسایش خندقی در شکل ۶ نشان داده شده است. بر اساس شکل ۶، در

جدول ۴. نتایج ارزیابی عملکرد مدل‌ها در دو مرحله پیش‌بینی و تست

مدل	سطح زیر منحنی ROC		انحراف معیار	سطح معنی داری	دامنه اطمینان ± 95 درصد	
	حد بالا	حد پایین				
راهنما	حداکثر آنتروپی	۰/۸۷۱	۰/۰۲۱	0	۰/۸۳۱	۰/۹۱۲
	وزن شاهد	۰/۸۳۷	۰/۰۲۳	0	۰/۷۹۲	۰/۸۸۳
	دمپسترشفر	۰/۸۱	۰/۰۲۵	0	۰/۷۶	۰/۸۶
راهنما	حداکثر آنتروپی	۰/۸۷۵	۰/۰۱۳	0	۰/۸۴۸	۰/۹۰۱
	وزن شاهد	۰/۸۴۶	۰/۰۱۵	0	۰/۸۱۶	۰/۸۷۵
	دمپسترشفر	۰/۸	۰/۰۱۷	0	۰/۷۶۷	۰/۸۳۳



شکل ۵. سطح زیر منحنی مشخصه عملکرد سه مدل حداکثر آنتروپی، دمپسترشفر و وزن شاهد در مرحله پیش‌بینی (a) و تست (b) با استفاده از ۷۰٪ و ۳۰٪ پراکنش رخداد خندق‌ها



شکل ۶ درصد مساحت رخداد خندق و رده‌های حساسیت فرسایش خندقی

متغیرهای مستقل در ایجاد فرسایش خندقی مورد ارزیابی قرار گرفته است. 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. نتایج این پژوهش، نتایج رحمتی و همکاران (۲۰۱۸)، انتظاری و همکاران (۱۳۹۳)، فیض‌نیا و همکاران (۱۳۸۶)، جاویدان و همکاران (۲۰۲۱) و عسگری و شیرانی (۱۴۰۳) را تایید می‌کند. به عبارت دیگر براساس 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 (۱۳۹۳) 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 (۱۳۸۶) 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 به وقوع می‌پیوندد.

نتایج آنالیز حساسیت و اهمیت متغیرها (آزمون جک‌نایف حاصل از مدل حداکثر آنتروپی)

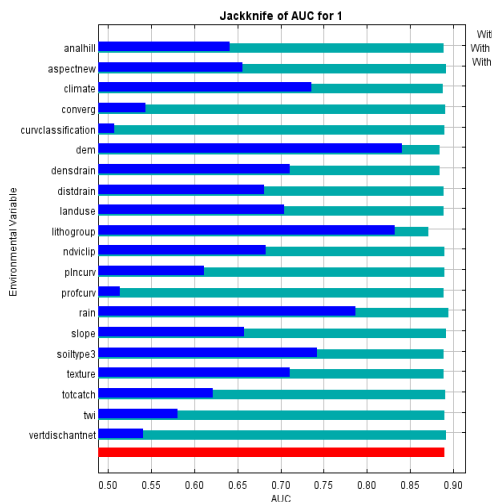
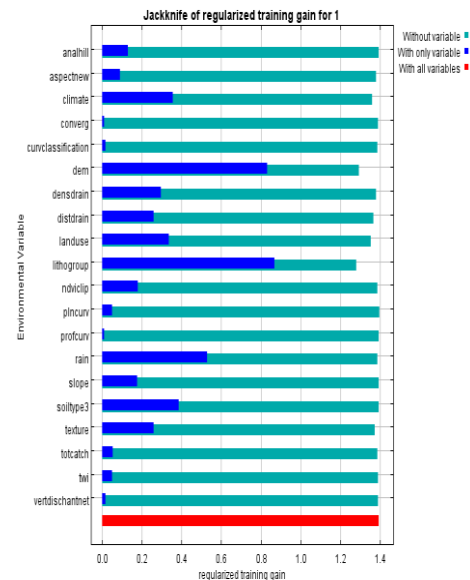
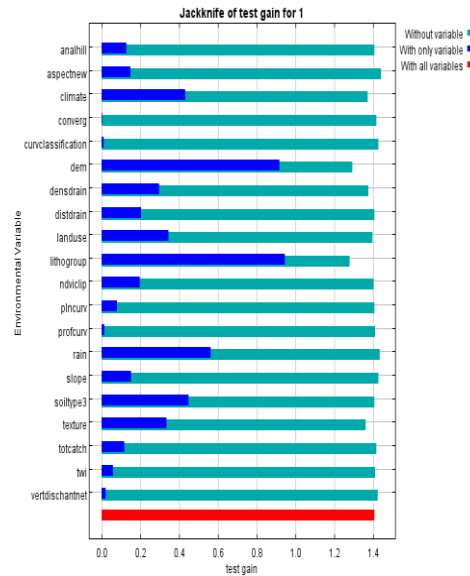
با بهره‌گیری از آزمون جک‌نایف هر یک از شاخص‌های مورد مطالعه بر اساس اهمیت نسبی و میزان تاثیر یا سهم مشارکت در ایجاد فرسایش خندقی اولویت‌بندی شده و به‌صورت نمودار ارایه شده است (شکل ۷). شکل ۷ نتایج منحنی آزمون جک‌نایف است که این آزمون میانگین پاسخ را نسبت به متغیرهای محیطی بعد از ۵۰۰ مرتبه تکرار در تعیین عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش خندقی نشان می‌دهد که به‌ازای تعداد عوامل تاثیرگذار 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 ۸۴ درصد، سنگ‌شناسی ۸۳ درصد، بارش متوسط سالانه ۷۸ درصد، نوع خاک ۷۴ درصد و اقلیم ۷۳ درصد جزء عوامل مهم در رخداد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز سمنان به شمار می‌آیند. همچنین این نتایج نشان‌دهنده آن است تمامی عوامل بر حساسیت فرسایش خندقی تاثیرگذار می‌باشند که با نتایج تحقیق شیرانی و نادری سامانی (۵۴) هم‌خوانی دارد. نکته قابل توجه آن است که نمودار آزمون جک‌نایف تاثیر هر یک از شاخص‌ها را به‌صورت مستقل در پهنه بندی فرسایش خندقی نشان می‌دهد. یعنی نرم افزار به طور مستقل مدل را تنها با در نظر گرفتن شاخص مورد نظر به تنهایی اجرا می‌نماید. جدول ۵ سهم مشارکت عوامل با استفاده مدل حداکثر آنتروپی که بیانگر اهمیت هر یک از شاخص‌ها نیز می‌باشد، به‌عنوان

جدول ۵. درصد مشارکت و اهمیت جایگزینی عوامل در حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی

درصد مشارکت اهمیت جایگزینی	متغیر	درصد مشارکت اهمیت جایگزینی
۱۷/۷	سنگشناسی	۵۸/۲
۵/۹	کاربری اراضی	۱۴/۹
۵۲/۵	ارتفاع	۱۱/۲
۲/۶	فاصله از آبراهه	۵/۱
۳/۹	اقلیم	۱/۹
۲	بافت سطح زمین	۱/۹
۲/۳	تراکم آبراهه	۱/۵
۱	جهت شیب	۱
۱/۹	شاخص پوشش گیاهی	۱
۵/۴	بارش متوسط سالانه	۰/۸
۰/۱	شاخص آنالیز سایه روشن	۰/۸
۰/۴	شاخص طبقه‌بندی انحناء	۰/۶
۱/۴	شیب	۰/۴
۰/۷	مساحت حوزه آبخیز	۰/۳
۰/۲	شاخص تحدب	۰/۱
۰/۲	شاخص فاصله عمودی از شبکه آبراهه	۰/۱
۰/۴	شاخص رطوبت توپوگرافی	۰/۱
۰/۸	نوع خاک	۰/۱
۰/۵	شاخص انحنای نیمرخ	۰
۰/۲	انحنای دامنه	۰

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، کارایی مدل‌سازی حساسیت‌پذیری فرسایش خندقی با سه مدل حداکثر آنتروپی، دمپسترشفر و وزن شاهد 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. با انجام آزمون هم-راستایی از بین ۲۳ پارامتر مؤثر در رخداد فرسایش خندقی، ۲۰ پارامتر برای مدل‌سازی مناسب تشخیص داده شدند. بنابراین پارامترهای شاخص توان آبراهه، فاکتور طول-شیب آبراهه، انحنای به‌دلیل هم پوشانی اطلاعاتی و اثرات غیرمستقیم روی متغیر وابسته رخداد فرسایش خندقی از فرایند مدل‌سازی حذف شدند. نتایج حاصل از درصد مشارکت و اهمیت جایگزینی عوامل در حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی نشان داد که پارامترهای شاخص سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، ارتفاع و فاصله از آبراهه بیشترین تأثیر را در ایجاد فرسایش خندقی داشته‌اند و توجه به آنها در مدیریت و حفاظت خاک منطقه حائز اهمیت است. رخنمون واحد سنگی رسی و مارنی کواترنری در مناطق جنوبی حوضه مورد مطالعه بیشترین اثرگذاری را در ایجاد فرسایش خندقی از خود نشان داده است. علت این امر را می‌توان در حساسیت بسیار بالای این سازند و این نوع واحد



شکل ۷. نتایج اهمیت عوامل مؤثر در مرحله آموزش (واسنجی)، آزمایش (پیش‌بینی) و دقت (ROC) به‌کارگیری آن‌ها با استفاده از آزمون جک‌نایف و اجرای مدل حداکثر آنتروپی

می‌گیرند. پهنه‌بندی نقشه حساسیت به فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه نشان داد بیشتر مناطق با حساسیت زیاد و خیلی‌زیاد در مناطق مرکزی و جنوب‌شرقی منطقه مورد مطالعه متمرکز بوده، درحالی که مناطق با حساسیت فرسایش خندقی کم در مناطق پرشیب و مرتفع شمالی گسترش دارند. بنابراین توجه به این نکات کلیدی در خصوص وضعیت پتانسیل وقوع فرسایش خندقی در برنامه‌ها و اقدامات حفاظت خاک می‌تواند راه‌گشا باشد. همچنین با توجه به تاثیر شکل سطح زمین در رخداد فرسایش خندقی استفاده و بکارگیری سایر شاخص‌ها و پارامترهای تاثیرگذار توپوگرافیک نظیر شاخص موقعیت زمین^{۲۱}، شاخص پستی و بلندی نسبی^{۲۲} و شاخص هیپسومتریک به همراه شاخص‌های مورد استفاده در این تحقیق برای مدل‌سازی توصیه می‌شود. در نهایت با توجه کارآمدی مدل حداکثر آنتروپی نسبت به مدل‌های دمپسترشفر و وزن شاهد، بکارگیری مدل حداکثر آنتروپی برای شناسایی و اولویت‌بندی مناطق مستعد فرسایش خندقی برای تمرکز هر چه بهتر پروژه‌های اجرایی آبخیزداری در مناطق حساس به فرسایش خندقی پیشنهاد می‌گردد.

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 ۹۹۰۵۸۶-۲۵-۲۹-۳۸-۰ 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 پژوهش‌سکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور به‌خاطر فراهم آوردن زمینه این پژوهش ابراز می‌نمایند.

Reference:

- Asgari S, Shirani K. Evaluation of the effective factors in gully erosion sensitivity using Dempster-Shafer. 2024. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*: 11 (2): 137-159 (In persian).
- Asgari S, Shirani K. and Soleimani, F. 2025. Evaluation of gully erosion using weight of evidence (WofE) and Dempster-Schiffer (DSH) models in Ilam watershed. *Watershed Management Research*, 37(4), 71-98 (In persian).
- 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., and 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*, 10 (11), 1-20.

سنگی به فرایند فرسایش خاک بخصوص فرسایش انحلالی دانست. بر اساس نقشه کاربری اراضی می‌توان اظهار کرد که کاربری مراتع بیش‌ترین مساحت (۵۲ درصد) را به‌خود اختصاص داده است فلذا بیشترین اثرگذاری را در ایجاد فرسایش خندقی از خود نشان داده است. فرم کلی شیب منطقه به گونه‌ای است که بیشترین شیب، مربوط به مناطق بالادست حوضه است و هرچه به‌سمت خروجی حوضه حرکت کنیم شیب کاهش می‌یابد. این تغییرات شیب، خود یک عامل برای افزایش سرعت رواناب در بالادست و پایین آمدن زمان تمرکز است. تراکم آبراهه با کاهش شیب کاهش یافته و باعث متمرکز شدن رواناب و تجمع جریان در اراضی پست و کم‌شیب می‌شود. چون این اراضی بیش‌تر از جنس مارن و رس هستند، لذا انحلال یافته و باعث تشدید فرسایش خندقی می‌شود. نقشه‌ی ارتفاع منطقه نشان داد که مناطق شمال‌شرقی به سمت جنوب‌غربی روند کاهشی منظمی داشته و خروجی حوزه دارای کم‌ترین ارتفاع هستند به‌همین دلیل اغلب جریان‌های سطحی و تمرکز خندق‌ها در نقاط خروجی قرار حوزه گرفته‌اند. اعتبارسنجی نقشه‌های حساسیت حاصل از مدل‌های حداکثر آنتروپی، دمپسترشفر و وزن شاهد با شاخص‌های سطح زیرمنحنی مشخصه عملکرد نسبی و سطح سلول هسته نشان داد که مدل حداکثر آنتروپی با مقدار ۰/۹۱ در حالت توسعه مدل و مقدار ۰/۸۹ در حالت اعتبارسنجی همچنین با منحنی سطح سلول هسته نزولی با شیب زیاد و نسبت فراوانی صعودی منظم از رده‌های حساسیت خیلی کم تا خیلی زیاد می‌توانند در پهنه‌بندی و پیش‌بینی رخداد فرسایش خندقی کارآمد باشد فلذا مدل حداکثر آنتروپی با سرعت و دقت خوب در ارزیابی عوامل مؤثر و اعتبارسنجی پهنه‌بندی حساسیت نسبت به فرسایش خندقی می‌تواند به‌کار گرفته شود. لازم به ذکر است حدود ۳۱ درصد مساحت پهنه‌های با حساسیت زیاد و خیلی‌زیاد توسط مدل حداکثر آنتروپی، بیش از ۸۵ درصد خندق‌ها منطقه را در بر

- Boos, D.D. and C. Brownie. 2004. Comparing variances and other measures of dispersion. *Statistical Science*, 19(4): 571-578.
- Castillo, C., E.V. Taguas, P. Zarco-Tejada, M.R. James and J.A. Gómez. 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. *Environ Earth Sci*, 70: 1179- 1195.
- 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., & 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., J. Elith, S. Bacher, C. 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. K. Skidmore, D. Zurell and S. Lautenbach. 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., S. Phillips, T. Hastie, M. Dudík, Y. Chee, and C. Yates. 2010. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17(1): 43–57.
- Entezari, M., M. Amjad, Kh. Moradi and S. Olfati. 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., A. Afzali, Y. Khalili and E. Gholichi. 2012. Gully erosion susceptibility assessment using multivariate regression model, case study: Kiasar, Southern Mazandaran Province. *Environmental Erosion Research Journal*, 2: 42-57 (in Persian).
- Gearman M, Blinnikov, Ms. 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., J. Elith, R.J. Hijmans, A. Guisan, A.T. Peterson, B.A. Loiselle. 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.
- orhan İNİK, Mustaf UTLU. Erosion Susceptibility Analysis in Bingöl (Türkiye) using Logistic Regression, Frequency Ratio, Weight of Evidence and Shannon’s Entropy methods. 2024. PREPRINT (Version 1) available at Research Square [https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4402292/v1].
- 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. Data Mining Technique (Maximum Entropy Model) for Mapping Gully Erosion Susceptibility in the Gorganrood Watershed, Iran. 2020. 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, pp. 427–448
- 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 HR, 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).

- Kuhnert, P. M., A. K. Henderson, R. Bartley and A. Herr. 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*, vol. 14(3): 309-322.
- Li, Heyang, Jizhong Jin, Feiyang Dong, Jingyao Zhang, Lei Li, and Yucheng Zhang. 2024. Gully Erosion Susceptibility Prediction Using High-Resolution Data: Evaluation, Comparison, and Improvement of Multiple Machine Learning Models. *Remote Sensing* 16, no. 24: 4742.
- 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.
- 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.
- 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. *Environment 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., M. Delavar and A. Chehreghan. 2016. Uncertainty in landslide occurrence prediction using Dempster-Shafer theory. *Modelling of Earth System Environments* 2: 188, 1-10.
- Mohammady, M., Dustmohammadian, A. H., Amiri, M., & Kianian, M. K. 2020. Investigating Quantitative Changes of Groundwater in the Semnan Plain. *Water Resources Engineering*, 13(47), 61-70.
- Phillips, S.J., Dudík, M., and Schapire, R.E. 2004. A maximum entropy approach to species distribution modeling. *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning Banff, Alberta, Canada*, 83p.
- Phillips, S.J., Anderson, R.P., and 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., B. Pradhan, C. Gokceoglu, M. Mohammadi and H.R. Moradi. 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.
- 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.
- saberchenari K, salmani H, mirabedini M. Landslide Hazard Mapping Using Dempster-Shafer Theory- A Case Study: Ziarat Watershed, Golestan Province, Iran. 2018. *Journal of Engineering Geology*, 11 (4) :385-404(In Persian).
- Saberi Chenari, K., A. Bahreman, V. Berdi Sheikh and C. Biram Komaki. 2016. Gully erosion hazard zoning using of Dempster-Shafer model in the Ghamaveh watershed, Golestan province. *EcoHydrology* 3(2): 219-231 (In Persian).
- Shirani, K., 2017. Modelling and Assessment of Landslide Susceptibility Zonation using Shannon's Entropy Index and Bayesian Weight of Evidence (Case Study: Sarkhoon Basin, Karoon), *J. Water and Soil Sci (Sci. & Technol. Agric. & Natur. Resour.)*, 21(1), 11.
- Shirani, K., and 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.
- Shirani, K., Pasandi, M., and Arabameri, A.R. 2018. Landslide susceptibility assessment by Dempster-Shafer and Index of Entropy models, Sarkhoon 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 Management*, 75(1): 51-72 (In Persian).
- Shrestha S, Kang TS. 2019. Assessment of seismically- induced landslide susceptibility after the 2015 Gorkha earthquake, Nepal. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 78(3): 1829-1842/

- Silakhori, Z., VahabzadeKebriya, GH, and Pourghasemi, H.R. 2022. Landslide Susceptibility Mapping using Bayesian Model: A Case Study of some Regions of Talar Watershed, Mazandaran Province. *Quarterly journal of Environmental Erosion Research*. 2(50): 122-140.
- Tahmassebi-poor, 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., B. Pradhan, I. Revhaug, D. B. Nguyen, H. V. Pham and Q. N. Bui. 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., I Iliia, H. Hong, W. Chen and C. Xu. 2017. Applying information theory and GIS-based quantitative methods to produce landslide susceptibility maps in Nancheng County, China. *Landslides* 14: 1091-1111.
- Valentin, C., J. Poesen and Y. Li. 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 and K. Shirani. 2023. Assessment of Maximum Entropy (ME) to identify Effective Factors on Gully Erosion and Determination of Sensitive Areas in Alaa Semnan Watershed. *Journal of Watershed Management Research*, 14(28): 37-52 (In Persian).
- Yousefi Mobarhan, E., & Zandifar, S. (2023). Zoning of changes in the decreasing groundwater table and temporal monitoring of drought in the Ghorove-Dehgolan plain. *Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems*, 11(1), 17-35 (In Persian).
- 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 Dinamica Quaternaria*, 37(1): 67-76.
- Zabihi, M., F. Mirchooli, A. Motevalli, A. K. Darvishan, H. R. Pourghasemi, M. A. Zakeri and F. Sadighi. 2018. Spatial modelling of gully erosion in Mazandaran Province, northern Iran. *Catena* 161: 1-13.

یادداشت‌ها

- ¹ Valentin
- ² Dempster-Shafer
- ³ Maximum Entropy
- ⁴ Machine learning model
- ⁵ Jiao
- ⁶ Bernini
- ⁷ INIK and UTLU
- ⁸ Li
- ⁹ Jackknife
- ¹⁰ Global Positioning System
- ¹¹ Google Earth
- ¹² PALSAR
- ¹³ Normalized Difference Vegetation Index
- ¹⁴ Maxent
- ¹⁵ Belief networks
- ¹⁶ Casual networks
- ¹⁷ Influence diagrams
- ¹⁸ Natural Breaks
- ¹⁹ Receiver operating characteristic
- ²⁰ Area Under Curve
- ²¹ Topographic Position Index
- ²² Relative Topographic Index