Gonbad Kavous University
Journal of New Approaches in
Water Engineering and Environment
Volume 2, Issue 1

Investigating the performance of the entropy maximum model in determining the importance of effective environmental factors in creating gully erosion in semi-arid areas

Hamzeh saeediyan[1*], Kourosh Shirani[2], Afshin Salajegeh[3], Ramin Ahmadi[4]

[1]Assistant Professor, Department of Soil Conservation and Watershed Management Research, Kerman Agricultural and Natural Resource Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Kerman, Iran.
[2]Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran
[3]Researcher, Department of Soil Conservation and Watershed Management Research, Kerman Agricultural and Natural Resource Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Kerman, Iran.
[4]Researcher, Department of Soil Conservation and Watershed Management Research, Kerman Agricultural and Natural Resource Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Kerman, Iran.
Received: 22.03.2023; Accepted: 22.06.2023

Abstract

One of the most important types of erosion that causes widespread land degradation is gully erosion which has many changes in different climates. In this study, environmental factors such as soil type information layers, Lithology, land use, NDVI, precipitation, Drainage density and distance to drainage and climate type were obtained using GIS for Sarab Halil watershed of Kerman province. Then, using PCA method, the most important environmental factors were identified and finally, using entropy maximum model, the map of the areas prone to gully erosion was obtained using environmental factors. The results showed that the most important environmental factors affecting gully erosion in the study area are climate, lithology, precipitation and soil type. Map of susceptible areas of gully erosion to environmental factors showed that environmental factors in east, south and southeast have more effects on reducing gully erosion and increase to the center of watershed and north and west of the watershed and the effects of environmental factors in increasing gully erosion increase. Meanwhile, the AUC in calibration modes of entropy maximum model was 0.861 and in validation mode was 0.837. Therefore, the entropy maximum model showed excellent ability to predict prone areas to gully erosion and the model is assumed to be excellent.

Keywords: Sarab Halil, Environmental factors, Modeling, Gully erosion

* Corresponding author, Email: Hamzah.4900@yahoo.com

دانشگاه گنبد کاووس
نشریه "رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط‌زیست"
دوره دوم، شماره اول
http:// Nawee.gonbad.ac.ir

بررسی عملکرد مدل بیشینه آنتروپی در تعیین اهمیت عوامل مؤثر محیطی در ایجاد فرسایش خندقی در مناطق نیمه‌خشک

حمزه سعیدیان[1*]، کوروش شیرانی[2]، افشین سلاجقه[3]، رامین احمدی[4]

[1] استادیار پژوهشی بخش تحقیقات حافظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمان، ایران.

[2] دانشیار، گروه پژوهشی مهندسی حفاظت خاک و آب، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

[3] محقق بخش تحقیقات حافظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمان، ایران.

[4] محقق بخش تحقیقات حافظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۰۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۱

چکیده

یکی از مهمترین اشکال فرسایش آبی که باعث تخریب گسترده زمین می‌شود فرسایش خندقی است که در اقلیم‌های مختلف شدت آن نیز تغییرات زیادی دارد. در این پژوهش لایه‌های اطلاعاتی عوامل محیطی مانند نوع خاک، سنگ شناسی، کاربری اراضی، NDVI، بارش، تراکم آبراهه، فاصله از آبراهه و نوع اقلیم با استفاده از GIS برای حوزه آبخیز سراب هلیل استان کرمان به دست آمدند. سپس با استفاده از روش PCA مهم‌ترین عوامل محیطی مؤثر شناسایی شدند و در نهایت نیز با استفاده از مدل بیشینه آنتروپی نقشه مناطق مستعد فرسایش خندقی به دست آمد. نتایج تحقیق نشان داد که مهمترین عوامل محیطی تأثیر گذار در فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه نوع اقلیم، سنگ شناسی، بارش و نوع خاک می‌باشند. نقشه مناطق مستعد فرسایش خندقی عوامل محیطی نیز نشان داد که عوامل محیطی در شرق و جنوب و جنوب شرقی دارای اثرات بیشتری در کاهش فرسایش خندقی می‌باشند و به سمت مرکز حوزه و شمال و غرب حوزه فرسایش خندقی افزایش می‌یابد و اثرات عوامل محیطی در افزایش فرسایش خندقی بیشتر می‌شود. همچنین مساحت زیر منحنی ROC (AUC) در حالت‌های واسنجی مدل بیشینه آنتروپی ۰/۸۶۱ و در حالت اعتبار سنجی مدل بیشینه آنتروپی ۰/۸۳۷ به دست آمد. بنابراین مدل بیشینه آنتروپی عملکرد مناسبی برای پیش بینی مناطق مستعد فرسایش خندقی از خود نشان داد.

کلمات کلیدی: سراب هلیل، عوامل محیطی، مدل سازی، فرسایش خندقی

* نویسنده مسئول: Email: Hamzah.4900@yahoo.com

مقدمه

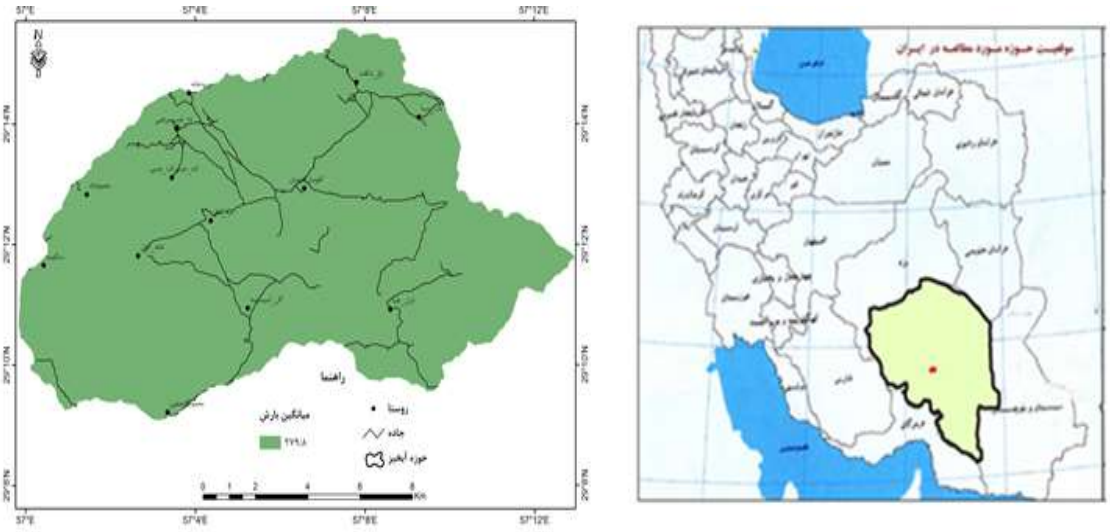
امروزه فرسایش خندقی به علت تولید رسوب زیاد و از بین بردن حداکثر زمین در حال تبدیل شدن به یکی از مهمترین انواع فرسایش در سراسر دنیا است، بنابراین در دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته است به طوری که تحقیقات مختلفی درباره چگونگی ایجاد و توسعه فرسایش خندقی در اقلیم‌های مختلف انجام می‌شود. در بسیاری از مناطق سهم مهمی از رسوب تولید شده در حوزه‌های آبخیز نیز ناشی از فرسایش خندقی می‌باشد (Poesena et al., 2003). فرسایش خندقی یک مشکل مهم برای مدیریت منابع طبیعی است که باعث تخریب زمین و خسارات اقتصادی در همه دنیا می‌شود (Chaplot, 2013). فرسایش خندقی زمانی آغاز می‌شود که نیروی جریان آب از مقاومت خاکی که آب روی آن جریان می‌یابد، بیشتر شود و ایجاد آنها نشان دهنده مراحل شدید فرسایش می‌باشد. امروزه مدل سازی مختلفی در سراسر دنیا در ارتباط با فرسایش خندقی و چگونگی ایجاد آن در حال انجام است و بیش‌ترین تلاش‌ها برای مدل سازی این نوع از فرسایش با استفاده از پیش بینی محل تشکیل آنها، رشد طولی و همچنین حجم رسوب ایجاد شده در اثر فرسایش خندقی و امکان تشکیل آن می‌باشد (Jafari Gorzin and Kavian, 2009; Tekwa et al., 2015). فرسایش خندقی همچنین باعث آسیب به زیر ساخت ها، منابع طبیعی و کشاورزی نیز می‌شود (Gomez-Gutierre et al., 2015; Arabameri and Pourghasemi, 2019). به هر حال فرسایش خاک یکی از مهمترین مسائل در زمینه توسعه پایدار در مناطق خشک و نیمه خشک محسوب می‌شود (Arabameri et al., 2018). نتایج فرسایش شامل تلفات خاک و همچنین از بین رفتن زمین‌های زراعی و پوشش گیاهی و ته نشینی رسوب در مخزن‌ها می‌باشد(Evans and Lindsay, 2010; Rahnema Rad et al., 2010). از سوی دیگر فرسایش خندقی می‌تواند رسوب فراوانی را ایجاد کند که سبب مشکلات زیادی در پائین دست آن‌ها می‌شود. فرسایش خندقی یکی از پیشرفته‌ترین مرحله فرسایش است که این پدیده حاصل و نتیجه بهره‌برداری بی‌رویه و نادرست از اراضی است. محققان بسیاری در سراسر دنیا با توجه به اهمیت بالای فرسایش خندقی و همچنین ایجاد و توسعه خندق‌ها به پژوهش‌های مختلف در اقلیم‌های متفاوت پرداختند و گاها به نتایج مشابه و متضادی در ایجاد و توسعه خندق‌ها رسیدند. Conforti et al (2011)برای مدل‌سازی استعداد وقوع و گسترش لندفرم‌های خندق در حوزه آبخیز تاربلو ایتالیا از مدل ارزش شاخص یا ارزش اطلاعاتی[1]استفاده نمودند. در این تحقیق متغیرهای مختلف سنگ‌شناسی، خاک‌شناسی، توپوگرافی، هیدرولوژیکی و مورفومتری به‌عنوان عوامل مؤثر بر وقوع لندفرم‌های خندق انتخاب گردید. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که این روش دقت قابل‌قبولی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی مناطق مستعد وقوع فرسایش خندقی دارد. Rahmati et al (2017) بیان کردند که توپوگرافی، لیتولوژی، کاربری اراضی، پوشش سطحی، ویژگی‌های خاک و همچنین هیدرولوژی از پارامترهای مؤثر در ایجاد فرسایش خندقی در مناطق نیمه خشک می‌باشد. Giglou and Ghazavi (2018) با بررسی عوامل مؤثر محیطی و ویژگی‌های خاک در شمال استان اردبیل بیان کردند که گسترش طولی خندق‌ها بیشتر تحت تأثیر مساحت پیرامون هر خندق و درصد ماده آلی خاک می‌باشد. شناسایی عوامل مؤثر در وقوع فرسایش خندقی یکی از ابزارهای اساسی و مهم جهت مدیریت و کنترل این پدیده می‌باشد. پژوهش‌های متفاوتی در مدل‌های مختلف در سراسر دنیا در ارتباط با پیش بینی رخداد فرسایش خندقی انجام شده است ولی هدف تحقیق حاضر بررسی عملکرد مدل بیشینه آنتروپی نسبت به عوامل محیطی در مناطق نیمه خشک است بدون اینکه عامل‌های دیگری اثر متقابل خود را در مدل سازی اعمال کنند تا اینکه حساسیت مدل بیشینه آنتروپی در مناطق خشک و نیمه خشک و استان‌های کویری مانند استان کرمان بررسی شود و نتایج حاصله مورد تجزیه و تحلیل علمی قرار گیرد. اصولاً چون مدل‌ها در شرایط خاصی ایجاد می‌شوند بدون تحقیق و مطالعه دقیق پژوهشی نمی‌توان به نتایج آنها در اقلیم‌های مختلف دیگر به طور صد در صد اعتماد کرد بنابراین ضروری است حساسیت آنها به عوامل مختلف

[1] . Indicator Value

بررسی و مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

حوضه مورد مطالعه در محدوده جغرافیایی "۴۸ '۵۹ °۵۶ تا "۰۰ '۱۳°۵۷ طول شرقی و عرض جغرافیایی "۰۳ '۰۹ °۲۹ تا "۳۷ '۱۵ °۲۹ عرض شمالی در جنوب غربی استان کرمان واقع شده و راه دسترسی به آن از طریق جاده آسفالته بافت - رابر به شهرستان جیرفت تأمین می‌شود. این حوضه ۱۵۴۶۱/۷ هکتار مساحت دارد. با توجه به آمار هواشناسی سینوپتیک رابر میانگین دمای سالیانه ۱۴/۸۱ درجه سانتی گراد، حداکثر دمای سالانه ۲۵/۸ درجه و حداقل دما ۳/۹ درجه سانتی گراد و متوسط سالانه بارش حوزه ۲۷۹/۸ میلیمتر می‌باشد.



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز مورد مطالعه در استان کرمان و ایران

روش تحقیق

در این پژوهش خندق‌های موجود در منطقه مورد مطالعه با استفاده از پیمایش‌های صحرایی و گوگل ارث شناسایی و ثبت شدند و نقشه پراکنش خندق‌ها با ۷۹ خندق به دست آمد که این خندق‌ها دارای پراکنش مناسبی از غرب به شرق در سطح حوزه آبخیز مورد مطالعه می‌باشند. از تصاویر ماهواره‌ای و همچنین سایر منابع اطلاعاتی سازمان‌های مختلف نیز برای استخراج نقشه‌ها استفاده شد. سپس ۸ لایه اطلاعاتی صرفاً محیطی حوزه مورد مطالعه با ارائه نقشه‌های عوامل مؤثر بر رخداد فرسایش خندقی از جمله نوع خاک، سنگ شناسی، کاربری اراضی، NDVI، بارش، تراکم و فاصله از آبراهه و نوع اقلیم با استفاده از GIS به دست آمدند.

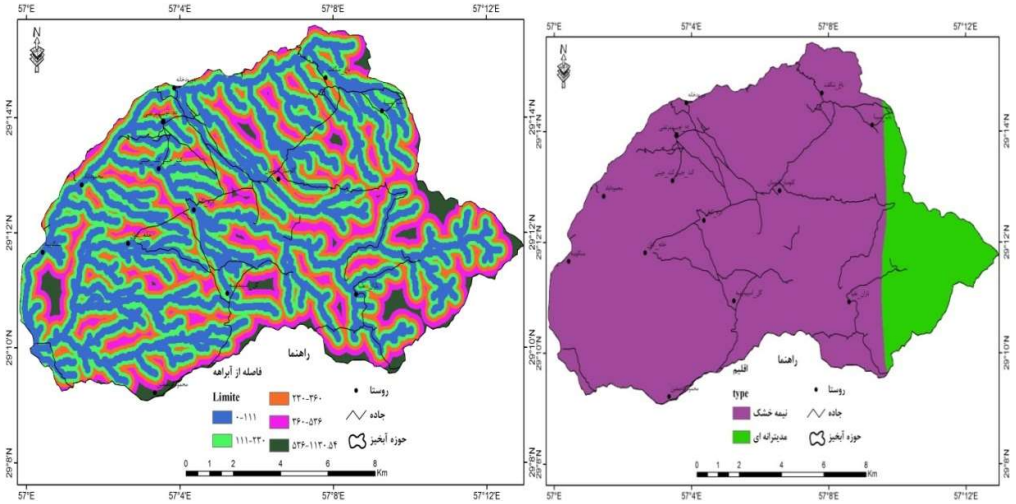
شکل ۲- نمایی از خندق‌های مشاهده شده در حوزه آبخیز مورد مطالعه

سپس بعد از طی مراحل مورد نیاز GIS و آماده سازی فایل‌های مورد نیاز همه عوامل موحیطی مورد مطالعه از آزمون هم راستایی یا آزمون هم‌خطی (Collinearity) استفاده شد سپس مهمترین عوامل مؤثر در پراکنش خندق‌ها از بین ۸ لایه اطلاعاتی محیطی مورد مطالعه با استفاده از آزمون آماری PCA به دست آمد و در نهایت نیز با استفاده از مدل بیشینه آنتروپی نقشه حساسیت فرسایش خندقی به عوامل محیطی به دخالت و اثرات متقابل سایر عوامل مختلف دیگر به دست آمد و مورد تجزیه و تحلیل‌های مختلف قرار گرفت. آنتروپی نشان دهنده مقدار عدم اطمینان درجه توزیع نامتعادل پدیده‌های موجود از محتوی مورد انتظار اطلاعاتی است. همچنین این مدل مدلی عمومی است که امکان ارزیابی روابط بین یک متغیر وابسته و چند متغیر مستقل را در زمینه‌های مطالعاتی مختلف برای کاربران فراهم می‌کند (Rahmati et al., 2016) و قابلیت پیش بینی مکانی بالایی در زمینه‌های مختلف علوم محیطی دارد (Philips et al., 2006; Park, 2015). مدل حداکثر آنتروپی بر اساس اصل آنتروپی شبکه ارتباطات بین متغیرهای مستقل و وابسته را تعیین کرده که بر اساس نقش هر متغیر مستقل و وزن تأثیر و منحنی پاسخ آن به دست می‌آید. همچنین داده‌های مکانی پراکنش فرسایش خندقی در قالب دو دسته تصادفی آموزشی (۷۰ درصد) و آزمایشی (۳۰ درصد) به‌ترتیب به‌منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل تقسیم و استفاده شدند. همچنین برای مشخص کردن اهمیت عوامل محیطی در این پژوهش از آزمون آماری جک نایف استفاده شد که به عنوان روشی برای ارزیابی دقت قابل قبول پذیرفته شده است (Zare Chahoulki, 2018). در تحلیل داده‌های پیچیده، معمولاً الگوهای نمونه‌گیری ساختاری غیر i.i.d (Independent and identically distributed) را برای داده‌ها در نظر می‌گیرند. همچنین برای ارزیابی دقت و صحت سنجی مدل از معیار سطح زیر منحنی (AUC) بهره برده شد. معیار AUC ناشی از منحنی مشخص عملکرد پذیرنده (ROC) می‌باشد. در این تحقیق از نرم افزارهای گوگل ارث و ArcGIS، MAXENT و SPSS استفاده شد.

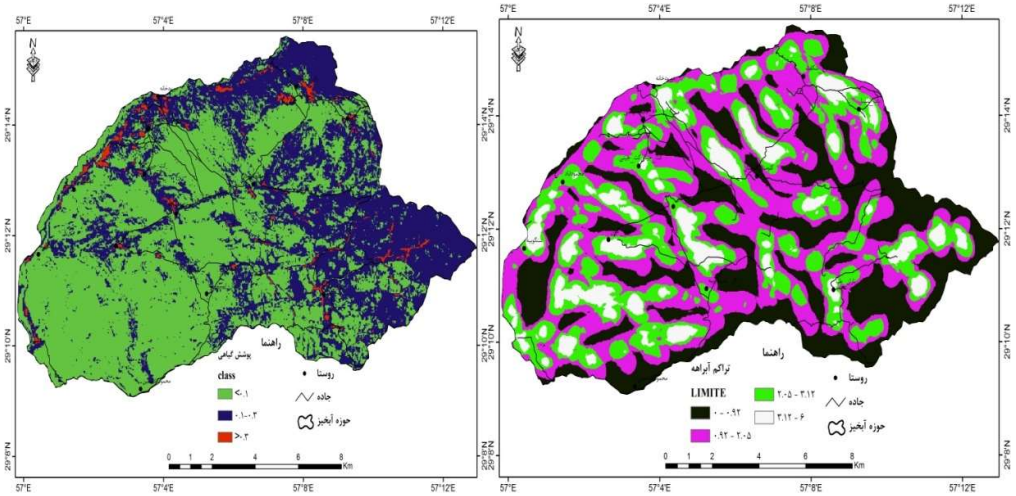
شکل ۳- نمایی کلی از منطقه مورد مطالعه

نتایج و بحث

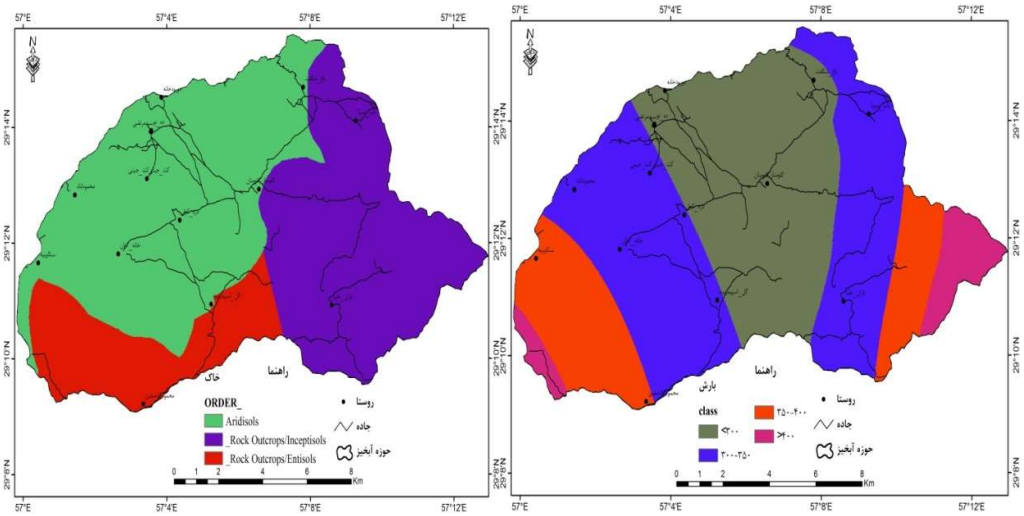
لایه‌های اطلاعاتی انواع عوامل محیطی مانند نوع خاک، سنگ شناسی، کاربری اراضی، NDVI، بارش، تراکم و فاصله از آبراهه و نوع اقلیم در شکل‌های (۴ تا ۷) ارائه شده است.



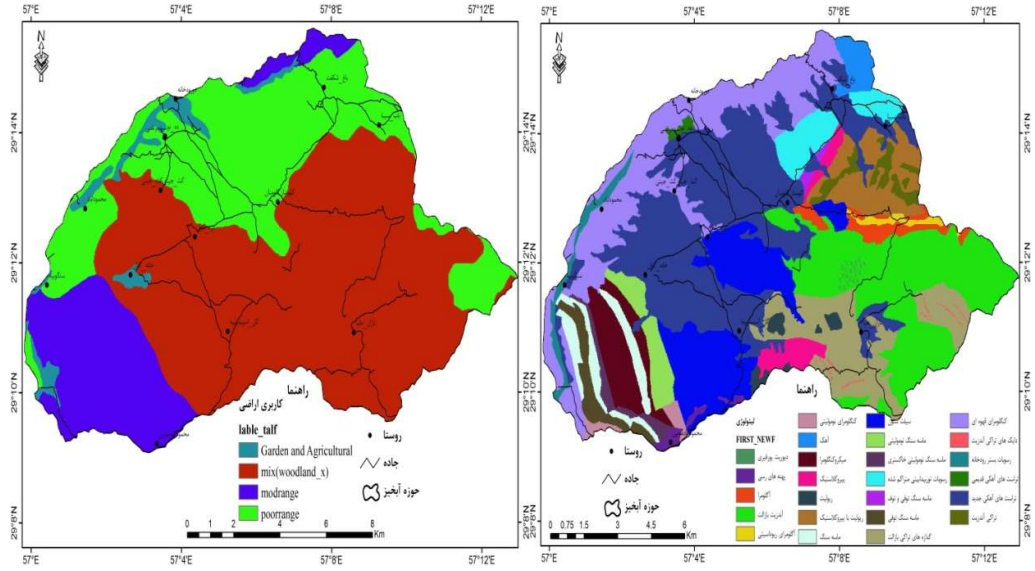
شکل ۴- لایه‌های اطلاعاتی اقلیم و فاصله از آبراهه حوزه آبخیز سراب هلیل



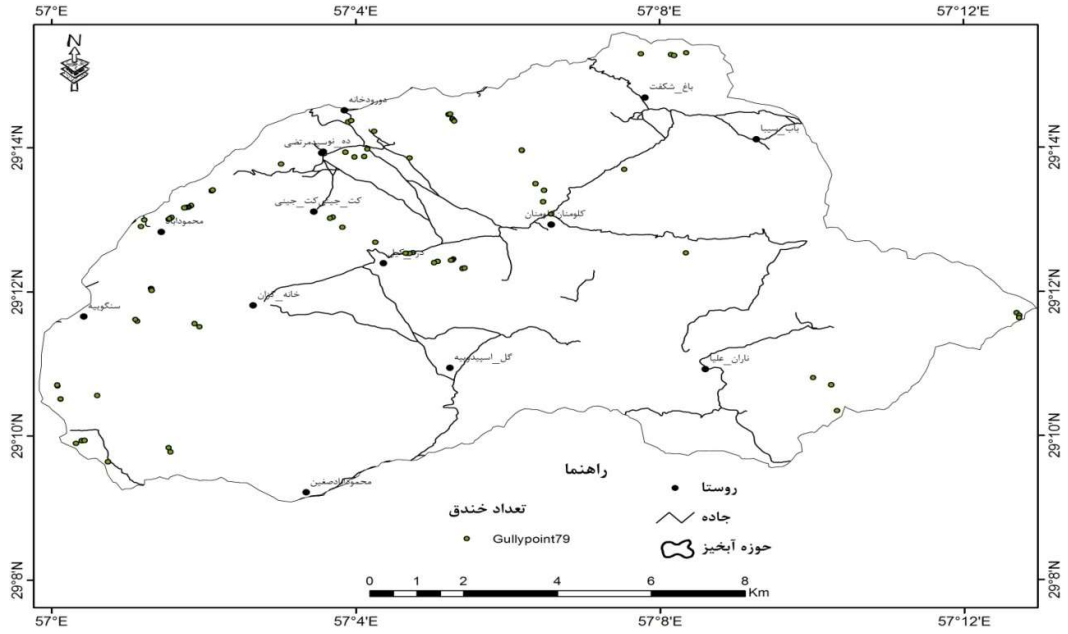
شکل ۵- لایه‌های اطلاعاتی تراکم آبراهه و پوشش گیاهی حوزه آبخیز سراب هلیل



شکل ۶- لایه‌های اطلاعاتی بارندگی و نوع خاک حوزه آبخیز سراب هلیل



شکل ۷- لایه‌های اطلاعاتی کاربری اراضی و سنگ شناسی حوزه آبخیز سراب هلیل



شکل ۸- نقشه پلی گونی پراکنش خندق‌ها در حوزه آبخیز سراب هلیل

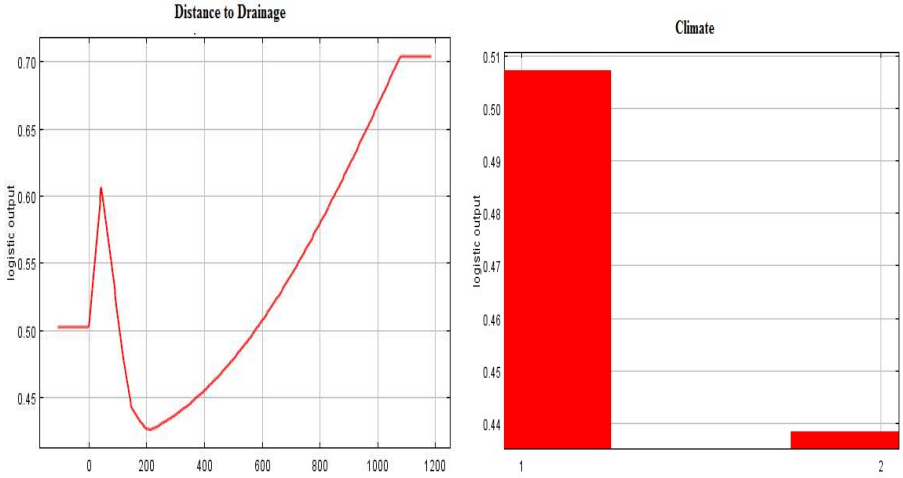
جدول ۱- آزمون همراستایی عوامل مؤثر در پیدایش فرسایش خندقی حوزه آبخیز سراب هلیل

VIF	عوامل مورد مطالعه	VIF	عوامل مورد مطالعه
۱/۴۰۹	شاخص پوشش گیاهی	۱/۷	کاربری اراضی
۳/۳۸۶	تراکم آبراهه	۲/۳۷۵	بارش
۱/۶۶۳	سنگ شناسی	۳/۴۹۱	فاصله از آبراهه
۲/۴۹۸	نوع اقلیم	۱/۴۸۷	نوع خاک

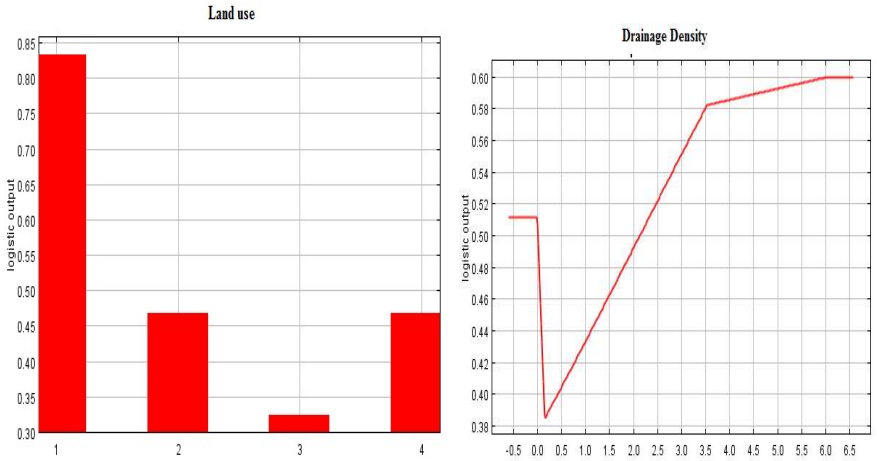
جدول ۲- آزمونPCA در منطقه مورد مطالعه

متغیرهای محیطی	عوامل		
	۱	۲	۳
وجود و عدم وجود گالی	-۰/۲۵۳	-۰/۰۰۸	۰/۷۵۵
نوع اقلیم	۰/۶۴۵	۰/۴۷۳	۰/۰۸۱
فاصله از آبراهه	۰/۲۲۸	۰/۸۶۶	-۰/۰۵۹
تراکم زهکشی	-۰/۰۶۹	-۰/۹۰۴	۰/۰۵۵
کاربری اراضی	-۰/۳۳۷	۰/۴۰۹	-۰/۶۴۴
سنگ شناسی	-۰/۷۲۱	-۰/۲۵۱	۰/۰۴۸
پوشش گیاهی	۰/۰۹۶	۰/۰۲۸	۰/۷۰۷
بارش	۰/۷۴۵	۰/۰۱۰	۰/۲۹۴
نوع خاک	۰/۷۸۲	-۰/۰۰۹	-۰/۱۷۷

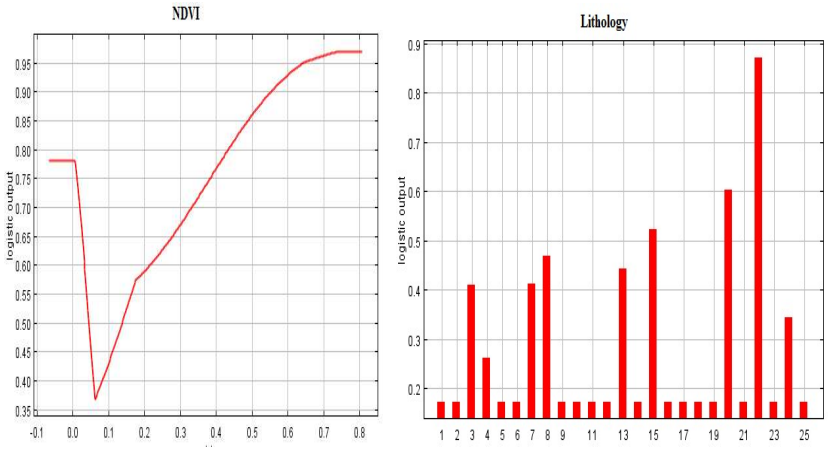
برای انجام مدل سازی منطقه مورد مطالعه آزمون همراستایی لایه‌های اطلاعاتی عوامل محیطی انجام شد که نتایج آزمون همرستایی نشان داد که همه عوامل محیطی دارای VIF مناسب برای مدل سازی می‌باشند بنابراین مدل سازی با ۸ لایه اطلاعاتی عوامل محیطی انجام شد (جدول ۱ و ۲).



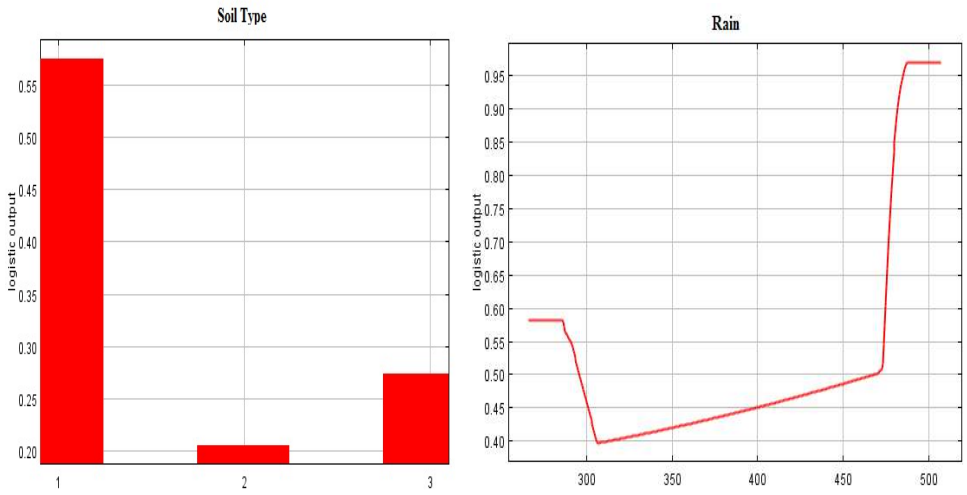
شکل ۹- منحنی‌های پاسخ فاصله از آبراهه و اقلیم در حوزه آبخیز سراب هلیل



شکل ۱۰- منحنی‌های پاسخ کاربری اراضی و تراکم زهکشی در حوزه آبخیز سراب هلیل



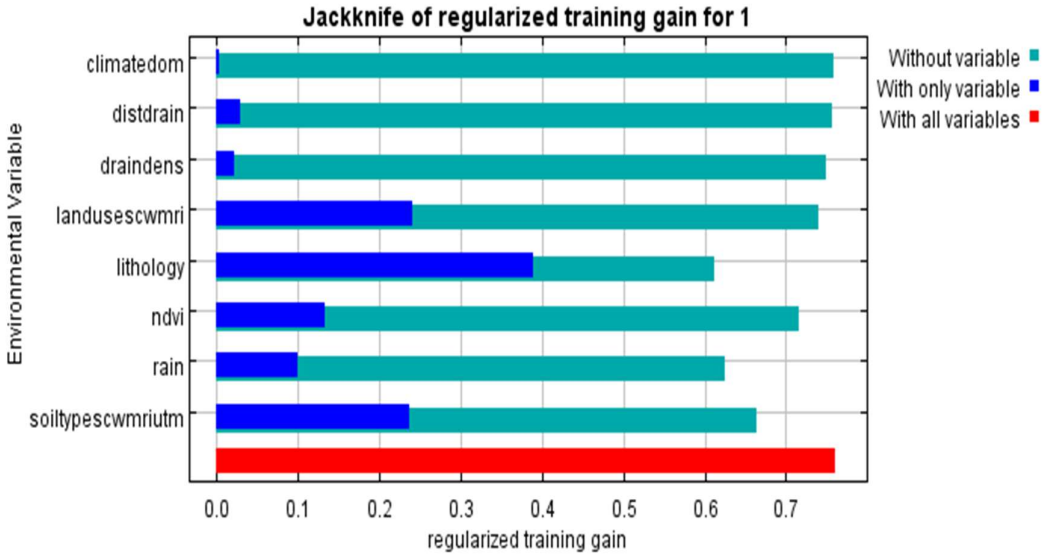
شکل ۱۱- منحنی‌های پاسخ پوشش گیاهی و لیتولوژی در حوزه آبخیز سراب هلیل



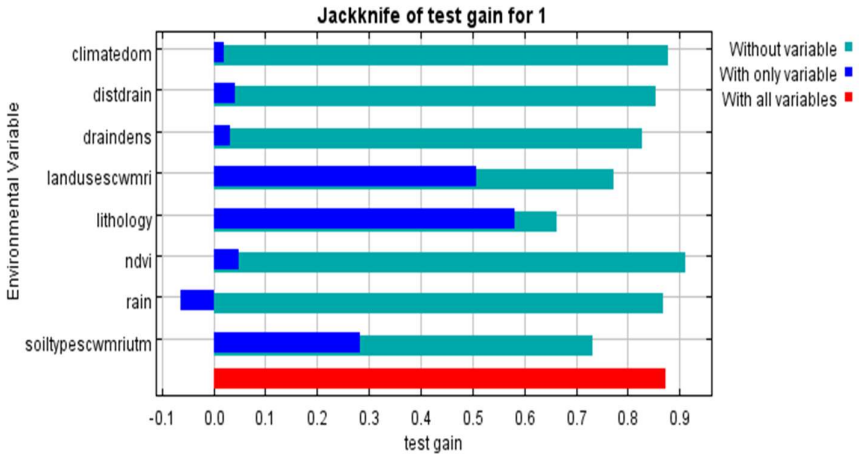
شکل ۱۲- منحنی‌های پاسخ نوع خاک در حوزه آبخیز سراب هلیل

جدول ۳- سهم مشارکت عوامل محیطی مورد مطالعه در فرسایش خندقی در مدل بیشینه آنتروپی

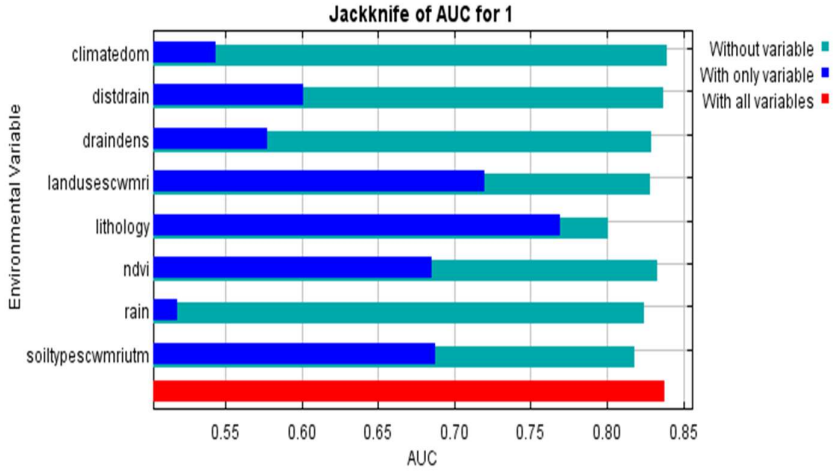
سهم مشارکت (درصد)	عوامل مورد مطالعه	سهم مشارکت (درصد)	عوامل مورد مطالعه
۲۹/۷	سنگ شناسی	۳۰/۸	نوع خاک
۴/۹	شاخص پوشش گیاهی	۱۳/۸	کاربری اراضی
۱/۱	تراکم آبراهه	۱۸	بارش
۰/۴	نوع اقلیم	۱/۴	فاصله از آبراهه



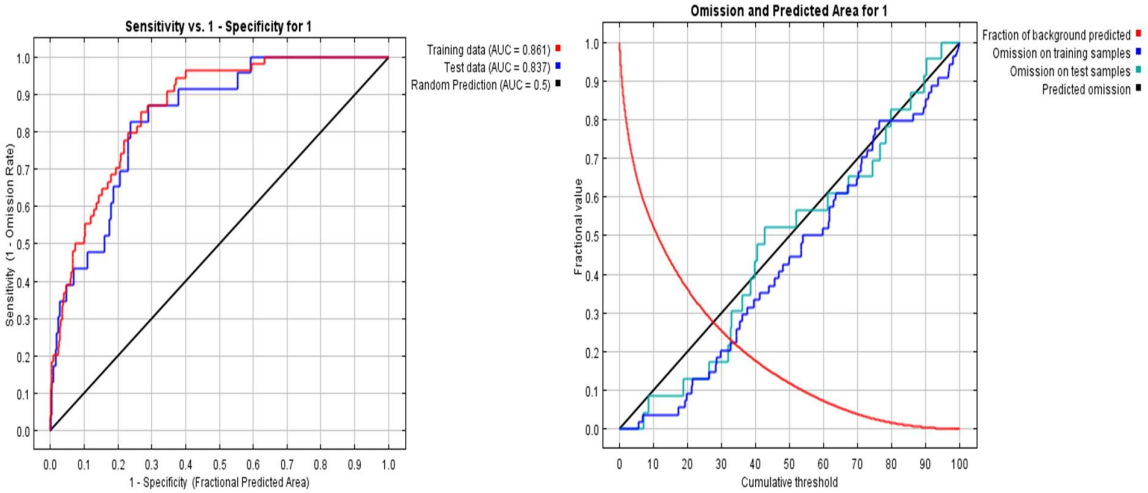
شکل ۱۳- نمودار نتایج آزمون جک نایف برای تعیین اهمیت عوامل محیطی در مرحله واسنجی (آموزش) برای توسعه مدل



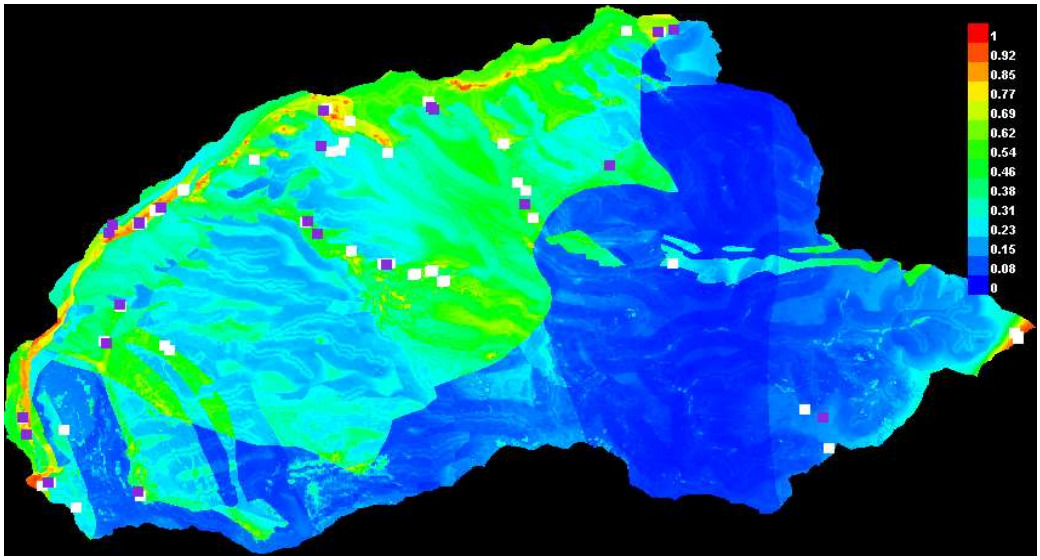
شکل ۱۴- نمودار نتایج آزمون جک نایف برای تعیین اهمیت عوامل محیطی در مرحله اعتبار سنجی (تست) برای توسعه مدل



شکل ۱۵- نمودار نتایج آزمون جک نایف برای تعیین سطح زیر منحنی (AUC) عوامل محیطی برای توسعه مدل



شکل ۱۶- نمودار ROC در حالت‌های واسنجی و اعتبار سنجی نقشه پیش بینی مناطق مستعد فرسایش خندقی



شکل ۱۷- نقشه مناطق مستعد وقوع فرسایش خندقی بر اساس عوامل محیطی

بحث

برای تعیین مهمترین عوامل محیطی مؤثر در فرسایش خندقی حوزه آبخیز سراب هلیل از آزمون PCA استفاده شد که نتایج آزمون نشان داد که داده‌های مورد استفاده در ۳ عامل طبقه بندی شدند که عامل اول مهمترین لایه‌های اطلاعاتی را شامل می‌شود و عامل‌های دوم و سوم به طور مساوی کمترین لایه‌های اطلاعاتی را شامل می‌شوند. در عامل اول نوع اقلیم، سنگ شناسی، بارش و نوع خاک مهمترین لایه‌های اطلاعاتی مؤثر بودند و در عامل دوم، فاصله از آبراهه و تراکم زهکشی مهمترین لایه اطلاعاتی می‌باشند و در عامل سوم نیز کاربری اراضی و پوشش گیاهی مهمترین لایه‌های اطلاعاتی می‌باشند. بنابراین مهمترین عوامل محیطی تأثیر گذار در فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه، نوع اقلیم، سنگ شناسی، بارش و نوع خاک می‌باشند که با نتایج تحقیقات Sofi (2005)، Farajzadeh و همکاران (2012)، Yasrebi و همکاران (2013)، Tahmasebipour و همکاران (2016)، Conoscentiو همکاران (2014)، Pourghasemi و همکاران (2017) مطابقت دارد (جدول ۲). نتایج تحلیل منحنی‌های پاسخ عوامل محیطی در مدل بیشینه آنتروپی در رخداد فرسایش خندقی نشان داد که رخداد خندقی در اقلیم نیمه خشک خیلی زیاد و بیش از ۰/۵۰ درصد می‌باشد و درصد اندکی از رخداد فرسایش خندقی نیز در اقلیم مدیترانه‌ای اتفاق می افتد که کمتر از ۴۴ درصد می‌باشد. نتایج تحلیل منحنی‌های پاسخ عوامل محیطی در مدل بیشینه آنتروپی در رخداد فرسایش خندقی نشان داد که رخداد فرسایش خندقی در شاخص فاصله از آبراهه تا حدود صفر ثابت است سپس تا حدود ۵۰ افزایش می‌یابد و سپس تا حدود ۲۱۰ کاهشی می‌شود و از ۲۱۰ به بعد تا ۱۰۸۰ افزایش می‌یابد و سپس روند ثابتی را طی می‌کند (شکل ۹). نتایج تحلیل منحنی‌های پاسخ عوامل محیطی در مدل بیشینه آنتروپی در رخداد فرسایش خندقی نشان داد که رخداد خندقی در شاخص تراکم آبراهه تا صفر روند ثابتی دارد سپس تا ۰/۲ روند کاهشی دارد سپس تا ۳/۵ روند افزایش را با شیب تند طی می‌کند و بعد از آن روند افزایشی با شیب ملایم تا ۶ ادامه دارد و سپس روال ثابتی را نشان می‌دهد. نتایج تحلیل منحنی‌های پاسخ عوامل محیطی در مدل بیشینه آنتروپی در رخداد فرسایش خندقی نشان داد که

رخداد خندقی در کاربری باغی و زراعی دارای بیشترین میزان رخداد فرسایش خندقی و ۸۴ درصد می‌باشد و کاربری زمین درختزار و جنگلی دارای کمترین رخداد فرسایش خندقی و ۳۳ درصد می‌باشد (شکل ۱۰). نتایج تحلیل منحنی‌های پاسخ عوامل محیطی در مدل بیشینه آنتروپی در رخداد فرسایش خندقی نشان داد که بیشترین رخداد فرسایش خندقی در رسوبات بستر رودخانه که حدود ۸۸ درصد می‌باشد و بعد از آن گنگلومرای قهوه‌ای که حدود ۶۰ درصد می‌باشد، اتفاق افتاده است. نتایج تحلیل منحنی‌های پاسخ عوامل محیطی در مدل بیشینه آنتروپی در رخداد فرسایش خندقی نشان داد که رخداد خندقی در شاخص پوشش گیاهی ۰/۰۱ روندی ثابت و سپس تا ۰/۰۶ روند کاهشی دارد و از ۰/۰۶ تا ۰/۱۷ با شیب تند دارای روند افزایشی می‌باشد سپس این روند افزایشی از ۰/۱۷ تا ۰/۷۳ با شیب ملایم ادامه دارد و در نهایت روند ثابتی را طی می‌کند (شکل ۱۱). نتایج تحلیل منحنی‌های پاسخ عوامل محیطی در مدل بیشینه آنتروپی در رخداد فرسایش خندقی نشان داد که رخداد خندقی نسبت به بارندگی در ابتدا روند ثابتی را طی می‌کند سپس تا تا ۳۱۰ میلی متر روند کاهشی دارد و از ۳۱۰ میلی متر با افزایشی ملایم تا ۴۷۵ میلی متر ادامه پیدا می‌کند سپس در ۴۷۵ میلی متر افزایشی چشم گیری دارد و سپس روند ثابتی را نشان می‌دهد. نتایج تحلیل منحنی‌های پاسخ فقط عوامل محیطی در مدل بیشینه آنتروپی در رخداد فرسایش خندقی نشان داد که رخداد خندقی در خاک‌های اریدیسول بیش‌ترین حالت و حدود ۵۳ درصد می‌باشد و در خاک‌های اینسپتیسول دارای کمترین حالت و حدود ۲۷ درصد می‌باشد (شکل ۱۲). با توجه به تجزیه و تحلیل سهم مشارکت هر یک از عوامل محیطی حوزه آبخیز سراب هلیل در پیش بینی فرسایش خندقی با استفاده از مدل بیشینه آنتروپی، نتایج نشان داد که بیشترین سهم مشارکت مربوط به نوع خاک با ۳۰/۸ درصد سهم مشارکت و سپس سنگ شناسی با ۲۹/۷ درصد سهم مشارکت می‌باشد و کمترین سهم مشارکت نیز مربوط به نوع اقلیم با ۰/۴ درصد سهم مشارکت می‌باشد. بنابراین نتایج نشان داد که همه عوامل محیطی با درصدهای مختلف در پیش بینی رخداد فرسایش خندقی مشارکت داشتند (جدول ۳). نتایج آزمون جک نایف در مرحله واسنجی (آموزش) با ۷۰ درصد داده‌ها نشان داد که با اهمیت‌ترین عوامل محیطی استفاده شده در مدل سازی در وقوع فرسایش خندقی، سنگ شناسی و سپس نوع خاک و کاربری اراضی می‌باشند و کم اهمیت‌ترین عوامل محیطی به کار برده شده برای مدل سازی نوع اقلیم می‌باشد (شکل ۱۳). نتایج آزمون جک نایف در مرحله اعتبار سنجی (تست) با ۳۰ درصد داده‌ها نشان داد که با اهمیت‌ترین عوامل محیطی به کار برده شده برای مدل سازی در وقوع فرسایش خندقی، سنگ شناسی و سپس کاربری اراضی می‌باشند و کم اهمیت‌ترین عوامل استفاده شده برای مدل سازی نیز بارندگی می‌باشند (شکل ۱۴). نتایج آزمون جک نایف عوامل محیطی با توجه به سطح زیر محنی (AUC) نشان داد که با اهمیت‌ترین عوامل محیطی به کار برده شده برای مدل سازی در وقوع فرسایش خندقی، سنگ شناسی و کاربری اراضی می‌باشند و کم اهمیت‌ترین عوامل محیطی استفاده شده برای توسعه مدل با توجه به سطح زیر منحنی نیز بارندگی می‌باشد (شکل ۱۵). بنابراین سطح زیر منحنی (AUC) در حالت‌های واسنجی (آموزش) مدل بیشینه آنتروپی ۰/۸۶۱ و در حالت اعتبار سنجی (تست) مدل بیشینه آنتروپی ۰/۸۳۷ به دست آمد. در مرحله واسنجی چون مدل بیشنیه آنتروپی دارای سطح زیر منحنی بین ۰/۸ تا ۰/۹ می‌باشد بنابراین توانایی عالی برای پیش بینی مناطق مستعد فرسایش خندقی از خود نشان داد و مدل عالی فرض می‌شود.

در مرحله اعتبار سنجی نیز مدل دارای توانایی عالی برای پیش بینی مناطق مستعد فرسایش خندقی از خود نشان داد و مدل عالی فرض می‌شود (شکل ۱۶). نقشه مناطق مستعد فرسایش خندقی با توجه به عوامل محیطی نشان می‌دهد که عوامل محیطی در شرق و جنوب و جنوب شرقی دارای اثرات بیشتری در کاهش فرسایش خندقی می‌باشند به طوری که احتمال وقوع فرسایش خندقی تا کمتر از ۲۳ درصد کاهش می‌یابد و به سمت مرکز حوزه و شمال و غرب حوزه فرسایش خندقی افزایش می‌یابد و اثرات عوامل محیطی در افزایش فرسایش خندقی بیشتر می‌شود و احتمال وقوع فرسایش خندقی بین ۲۳ درصد تا ۹۲ درصد می‌باشد علت آن نیز به وجود رودخانه و همچنین وجود زمین‌های کشاورزی و کم شیب در روستاهای پراکنده حوزه مورد مطالعه بر می‌گردد. وقوع فرسایش خندقی شدید بیش از ۹۲ درصد در این حوزه خیلی کم می‌باشد و به صورت نقطه‌ای در شمال، شمال شرق و غرب با توجه به عوامل محیطی مشاهده می‌شود که به نظر می‌رسد بیشتر تحت تأثیر رودخانه جاری در حوزه و کشت و کارهای غیر اصولی انجام شده در اطراف آن می‌باشد. بنابراین مدل بیشنیه آنتروپی پیش بینی مناسبی از احتمال وقوع فرسایش خندقی در حوزه سراب هلیل از خود نشان داد که با نتایج تحقیقات Rahmati و همکاران (2018) و Shirani و Zakerinejad (2019) مطابقت دارد (شکل ۱۷). توسعه روز افزون فرسایش خندقی در اقلیم‌های مختلف ایران نشان می‌دهد که این نوع فرسایش ممکن است در آینده خطرات جدی برای امنیت غذایی کشور ایجاد کند و باید انواع روش‌های مختلف کنترل آن را در کشور به کار برد. ضمناً توصیه می‌شود در حوزه‌هایی مانند سراب هلیل که رودخانه در آنها جاری است و با توجه به کشاورزی‌های غیر اصولی در آن، نظارت و کنترل بیشتری توسط سازمان‌های مربوطه صورت گیرد.

منابع

Arabameri A. and Pourghasemi H. R. 2019. Spatial Modeling of Gully Erosion Using Linear and Quadratic Discriminant Analyses in GIS and R. Edit; Pourghasemi, H. R., Gokceoglu, C. Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences. First edition. Elsevier publication. p.796.

Arabameri A., Pradhan B., Pourghasemi H. R. and Rezaei K. 2018. Identification of erosion-prone areas using different multi-criteria decision-making techniques and GIS. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 9: 1129- 1155.

Chaplot V. 2013. Impact of terrain attributes, parent material and soil types on gully erosion. Geomorphology, 186: 1- 11

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.

Conoscenti C, S. Angileri, C. Cappadonia, E. Rotigliano, V. Agnesi and M. Mrker. 2014. Gully erosion susceptibility assessment by means of GIS-based logistic regression: A case of Sicily (Italy). Geomorphology 204(1):399-411.

Evans M., and Lindsay J. 2010. High resolution quantification of gully erosion in upland peat lands at the landscape scale. Earth Surface Processes and Landforms. 35(8), 876-886.

Farajzadeh M., Afzali A., Khalili Y., Qellichi A. 2012. Assessment of sensitivity to gully erosion using multivariate regression model (Case study: southeast of Mazandaran province, Kiaser). Environmental Erosion Research, 2(2), 42-57.

Farid Giglou B., Ghazavi R. 2018. The Role of Physicochemical Characteristics of Gully Soil and Environmental Factors of its Upper-Catchment Area in the Expansion of Gully Erosion, JWSS, 22(3), 273-286. (in Persian)

Go´mez-Gutierrez A., Conoscenti C., Angileri S. E., Rotigliano E. and Schnabel S. 2015. Using topographical attributes to evaluate gully erosion proneness)susceptibility(in two mediterranean basins: advantages and limitations. Nat Hazards, V. 79, p. 291- 314.

Jafarai Gorzin B., and Kavian A. 2009. Assessment of Gully Erosion Occurrence in Sorkh-Abad Watershed Using Remote Sensing and Geographical Information System. Iran-Watershed Management Science and Engineering. 3(7): 55-58. (In Persian)

Park N.W. 2015. Using maximum entropy modeling for landslide susceptibility mapping with multiple geoenvironmental datasets. Environment Earth Science, 73(3): 937-949.

Phillips S., Anderson R. and Schapire R. 2006. Maximum entropy modelling of species geographic distributions. Ecological Modeling, 190: 231–259.

Poesena J., Nachtergaelea J., Verstraetena G., and Valentin C. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. Catena, 50:91– 133.

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 A., Tahmasebipour N., Haghizadeh A., Pourghasemi, H., R., Feizizadeh, B. 2018. Evaluation of Maximum Entropy Model Efficiency in Predicting Potential for Gully Erosion in Kashkan – Pole Dokhtar Watershed, Watershed Engineering and Management, 10(4): 727-738.

Rahmati O., Tahmasebipour N., Haghizadeh A., Pourghasemi, H. R. and 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, V. 579, p. 913- 927.

Rahnema Rad j., Khosravi F., RigiNejad S. 2010. Chemical specifications of soil for creation and development of gully in the Dashtyari region, Chabahar, Journal of Applied Geology, 6(1), 9-16. Pages (In Persian).

Shirani K., Zakerinejad R. 2019. Zoning Sensitivity to Gully Erosion Using Maximum Entropy Probabilistic Model (Case Study: South of Isfahan Province), Research Project of Soil Conservation and Watershed Management Research Institute.

Sofi M. 2005.Determining the effect of vegetation degradation and urban development on the expansion of gullies in south of Fars province. Proceedings of the Third National Conference on Erosion and Sediment. Publication of Soil Conservation and Watershed Management Research Center. Tehran. Pages 355-350.

Tahmasebipour N., Rahmati A., Ghorbani Nejad S. 2016. Prediction of Sensitivity to Gully Erosion in Seymareh Region Based on Deterministic Factor Model and Determining the Importance of Affecting Factors, Echohydrology, Vol. 1, No. 3, 83-93.

Tekwa I.J., Laflen J.M., MusaKundiri A. 2015. Efficiency test of adapted EGEM model in predicting ephemeral gully erosion around Mubi, Northeast Nigeria. International Soil and Water Conservation Research, 3: 15-27.

Yasrebi B., Noormohammadi F., Sadeghi S.H. R., Soufi, M. 2013. Determining the role of topographic factors in initiation of gully erosion, Case study: Darrehshahr in Ilam Province, Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering, Vol. 7, No. 21: 53-58.

Zare Chahouki M.A., Zare Chahouki A. 2010. Predicting the distribution of plants species using logistic regression (Case study: Garizat rangelands of Yazd province). Desert, 15(2): 151-158.