

Zoning gully erosion susceptibility using ANN, CART and RF models

Omid Asadi Nalivan^{1*}, Alireza Rabet², Farzaneh Vakili Tajareh³, Marziyeh Ramezani⁴, Mahammad Momeni⁵ and Kohzad Hydari⁶

¹ Ph.D Graduated, Department of Watershed management, faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

² Assistant Professor, Agricultural and Natural Resources Research Center of Zanjan Province, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Zanjan, Iran

³ Ph.D student in Watershed Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

⁴ B.A Graduated in Rangeland and Watershed Management, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, Yazd, Iran

⁵ Expert of Watershed management, General Department of Natural Resources and Watershed Management of Alborz Province, Alborz, Iran

⁶ Ph.D Graduated, Department of Watershed management, faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Received: 16 February 2022

Accepted: 20 August 2022

Extended abstract

Introduction

Gully erosion is a water erosion that has a great contribution to land degradation and is known as one of the most important environmental hazards in the world and especially in Iran. In recent years, machine learning techniques and geographic information systems have been highly effective in determining areas sensitive to gully erosion and have increased accuracy and speed in the evaluation and potential of gully erosion and in determining effective factors on gully erosion has also been effective. The loess lands of Golestan Province are more susceptible to water erosion due to sufficient depth and almost uniform silty graining, excessive use, cultivation on sloping lands, and wrong land management so that all types of erosion can be observed in these areas. The most common type of erosion in these sediments is gully erosion. The studied watershed is faced with the increase of dry and abandoned land, land use change, the presence of surplus livestock in the forests, and also the population increase. Therefore, this area is facing an increase in sensitivity to gully erosion, and areas with the potential for gully erosion should be identified and managed.

Materials and methods

The studied watershed with an area of 222,000 ha and an elevation range of 58 to 2168 m is located in the northeast of Golestan Province. The average rainfall of the area is between 224 and 736 mm. In this research, first, the location of the gullies was obtained from the General Directorate of Natural Resources and Watershed Management of Golestan Province. Then, from the total of 1127 gullies position, 70% were randomly classified as training data and 30% as validation data. To determine the effective variables in gully erosion sensitivity, 14 factors were identified and in the next step, the collinearity test between the variables was performed using SPSS software. By using the indices of tolerance coefficient and variance inflation factor, if there is collinearity between the variables, they were removed from the modeling process. Considering the importance of the DEM map and its application in the preparation of various factors of the current research, a DEM was prepared using ALOS satellite images. The layers of slope and aspect are prepared by using a digital elevation model and slope and aspect functions respectively. Slope length index in SAGA GIS software, layers of distance from stream based on the map of stream, and distance from roads based on existing roads, and using the Euclidean distance function in the ArcGIS software was prepared. Stream density and road density layers were obtained based on the map of existing streams and roads in the region and using the line density function in ArcGIS. The lithology layer was extracted from the geological map of the region and the land use layer was obtained from the General Directorate of Natural Resources and Watershed Management of Golestan province. The rainfall map has been prepared using the information from 35 rain gauge stations. First, the average rainfall of 26 years was calculated for each station, and then rainfall zoning was done using the global Kriging Method (due to the lowest RMSE) in ArcGIS. The TPI layer was prepared using the DEM and using the SAGA GIS software. The HAND index is

* Corresponding author: omd.asadi@ut.ac.ir

a topographic-hydrological index of the DEM of the nearest drain, representing the hydrological behavior of the watershed. To evaluate the models, the relative performance detection curve (ROC) was used for the predictive power of the models.

Results and discussion

The results showed that there is no co-linearity between the variables and therefore all the variables were used in the modeling process. The relationship between gully erosion and elevation showed that lower elevations are more sensitive than higher elevations and more susceptible to gully erosion near waterways. The results showed that with the increase in drainage density, the sensitivity of gully erosion increases, and the possibility of gully erosion increases. The results showed that the old barracks, shale, and loess have the greatest impact on the sensitivity of gully erosion. The results show a decrease in the sensitivity of gully erosion with a decrease in the HAND index. This result indicates that in the areas where the level of saturation in the watershed level increases, the possibility and sensitivity of gully erosion increases. The results showed that among the types of land use, canals, poor pastures, and agricultural land use have the highest sensitivity to gully erosion. This is even though the forest areas have the lowest sensitivity to this erosion. The results showed that in the rainfall range of 220 to 420 mm, the possibility of gully erosion has increased, and the range of 420 to 500 mm has shown the highest level of sensitivity, and with the increase of rainfall from 500 mm to above, a reduction in the sensitivity of gully erosion has been encountered. One of the reasons for reducing the sensitivity of gully erosion in higher rainfalls is the increase in vegetation and the creation of suitable conditions for landslides. The results showed that the depth of the valley up to 235 meters have increased the probability of gully erosion, and from 235 meters above, it has decreased the probability of erosion. The results showed that the sensitivity of gully erosion increases near roads, and this case shows the effects of road construction and the aggravation of conditions for gully erosion.

Conclusion

This research was conducted to determine the effective factors on gully erosion and zone its spatial distribution in the northeast of Golestan Province. In this study, by considering 14 important factors and using RF, ANN, and CART models, a sensitivity map of gully erosion was prepared. Because the identification of gully erosion-sensitive areas based on traditional methods and expert opinions do not have acceptable accuracy, it is necessary to use modern machine learning methods. The results showed that the factors of distance from the road and land use are the most important factors affecting the sensitivity of gully erosion, which requires land use management as human activities. The ROC curve showed that the accuracy of the models in estimating areas with gully erosion sensitivity was excellent in the test stage (ANN) and very good in the test and validation stage (RF and CART), which means the excellent performance of the models.

Keywords: Artificial Neural Network, Golestan Province, Gully erosion, Machine learning, Relative performance detection curve

Cite this article: Asadi Nalivan, O., Rabet, A., Vakili Tajareh, F., Ramezani, M., Momeni, M., Hydari, K., 2023. Zoning gully erosion susceptibility using ANN, CART and RF models. *Watershed Engineering and Management* 15 (2), 155–171.

© 2023, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



پهنه‌بندی حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های ANN، CART و RF

امید اسدی نلیوان^{۱*}، علیرضا رابط^۲، فرزانه وکیلی تجربه^۳، مرضیه رضانی^۴، محمد مومنی^۵ و کهزاد حیدری^۶

^۱ دانش‌آموخته دکتری آبخیزداری، گروه آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
^۲ استادیار، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زنجان، ایران
^۳ دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
^۴ فارغ التحصیل کارشناسی مرتع و آبخیزداری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کوبرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران
^۵ کارشناس آبخیزداری اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان البرز، البرز، ایران
^۶ دانش‌آموخته دکتری آبخیزداری، گروه آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۷

چکیده مسوط

مقدمه

فرسایش خندقی یکی از انواع فرسایش آبی است که سهم زیادی در تخریب اراضی دارد و به‌عنوان یکی از مهمترین مخاطرات محیطی در جهان و به‌خصوص در ایران شناخته شده است. در سال‌های اخیر، فن‌های یادگیری ماشینی و سامانه اطلاعات جغرافیایی در زمینه تعیین مناطق حساس به فرسایش خندقی دارای کارایی بالایی بوده‌اند و باعث افزایش دقت و سرعت در زمینه ارزیابی، پتانسیل فرسایش خندقی شده‌اند که این فن‌ها در تعیین عوامل موثر بر فرسایش خندقی نیز موثر بوده‌اند. اراضی لسی استان گلستان به‌دلیل عمق کافی و دانه‌بندی تقریباً یکنواخت سیلنتی، استفاده مفرط، کشت در اراضی شیب‌دار و مدیریت غلط اراضی، فرسایش‌پذیری آبی بیشتری دارند، به طوری که همه انواع فرسایش را در این مناطق می‌توان مشاهده کرد. متداول‌ترین نوع فرسایش در این مناطق، فرسایش خندقی است. حوزه آبخیز مورد مطالعه در استان گلستان، با افزایش زمین‌های دیم و رها شده، تغییر کاربری اراضی، حضور دام مازاد در جنگل‌ها و همچنین، افزایش جمعیت روبه‌رو است. لذا، این حوضه با افزایش حساسیت فرسایش خندقی مواجه است و باید مناطق دارای پتانسیل فرسایش خندقی شناسایی و مدیریت شوند.

مواد و روش‌ها

حوزه آبخیز مورد مطالعه با مساحت ۲۲۲ هزار هکتار و دامنه ارتفاعی ۵۸ تا ۲۱۶۸ متر، در شمال شرقی استان گلستان قرار دارد. میانگین بارندگی حوضه بین ۲۲۴ تا ۷۳۶ میلی‌متر است. در این پژوهش، ابتدا موقعیت خندق‌ها از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان دریافت شد. سپس، از مجموع ۱۱۲۷ موقعیت خندق، به‌صورت تصادفی ۷۰ درصد به‌عنوان داده‌های آموزش و ۳۰ درصد به‌عنوان داده‌های اعتبارسنجی طبقه‌بندی شدند. به‌منظور تعیین متغیرهای موثر در حساسیت فرسایش خندقی، ۱۴ عامل شناسایی شد و در مرحله بعد تست هم‌خطی بین متغیرها با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد. با استفاده از شاخص‌های ضریب تحمل و عامل تورم واریانس در صورت وجود هم‌خطی بین متغیرها از روند مدلسازی حذف شدند. با توجه به اهمیت نقشه مدل رقومی ارتفاع و کاربرد آن در تهیه عوامل مختلف پژوهش حاضر، مدل رقومی ارتفاع (با اندازه سلول ۱۲/۵ متر) با استفاده از تصاویر ماهواره ALOS تهیه شد. لایه‌های شیب و جهت شیب با استفاده از مدل رقومی ارتفاع و به‌ترتیب از توابع Slope و Aspect تهیه شده‌اند. شاخص طول شیب در نرم‌افزار SAGA GIS، لایه‌های فاصله از آبراهه بر اساس نقشه آبراهه‌ها (استخراج از نرم‌افزار SAGA GIS) و فاصله از جاده بر اساس جاده‌های موجود و با استفاده از تابع فاصله اقلیدسی در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شدند. لایه‌های تراکم آبراهه و تراکم جاده، بر اساس نقشه آبراهه‌ها و جاده‌های

موجود در منطقه و با استفاده از تابع Line Density در نرم‌افزار ArcGIS به‌دست آمدند. لایه سنگ‌شناسی از نقشه زمین‌شناسی منطقه (مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰) استخراج شده است و لایه کاربری اراضی از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان دریافت شد. نقشه بارندگی با استفاده از اطلاعات ۳۵ ایستگاه باران‌سنجی تهیه شده است. ابتدا، میانگین بارندگی ۲۶ ساله (دوره آماری مشترک) برای هر ایستگاه محاسبه شد و سپس، با استفاده از روش کریجینگ جهانی (به‌دلیل کمترین میزان RMSE) در نرم‌افزار ArcGIS پهنه‌بندی بارندگی انجام گرفت. لایه شاخص موقعیت توپوگرافیک، با استفاده از مدل رقومی ارتفاع و با کمک نرم‌افزار SAGA GIS تهیه شد. به‌منظور ارزیابی مدل‌ها، از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) جهت قدرت پیش‌بینی مدل‌ها استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد که بین متغیرها هم‌خطی وجود ندارد و لذا، کلیه متغیرها در روند مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند. رابطه بین فرسایش خندقی و ارتفاع نشان داد که ارتفاعات پایین‌تر حساسیت بیشتری نسبت به ارتفاعات بالاتر دارند و نزدیک به آبراهه‌ها حساسیت فرسایش خندقی بیشتر است. نتایج نشان داد که با افزایش تراکم زهکشی، حساسیت فرسایش خندقی افزایش پیدا می‌کند. همچنین، پادگانه‌های قدیمی، شیل و لس‌ها بیشترین تاثیر را بر حساسیت فرسایش خندقی دارند. نتایج نشان‌دهنده کاهش حساسیت فرسایش خندقی با کاهش شاخص HAND است. در واقع این نتیجه بیانگر این است که در مناطقی که میزان سطوح اشباع در سطح حوزه آبخیز افزایش می‌یابد، احتمال وقوع و حساسیت فرسایش خندقی افزایش پیدا می‌کند. نتایج نشان داد که در میان انواع کاربری‌ها، مسیل‌ها، مراتع فقیر و کاربری کشاورزی، دارای بیشترین حساسیت فرسایش خندقی هستند. این در حالی است که مناطق جنگلی دارای کمترین میزان حساسیت به این فرسایش بوده‌اند. نتایج نشان داد که در دامنه بارندگی ۲۲۰ تا ۴۲۰ میلی‌متر، احتمال رخداد فرسایش خندقی افزایش پیدا کرده است و از دامنه ۴۲۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر، بالاترین میزان حساسیت را نشان داده است و با افزایش بارندگی از ۵۰۰ میلی‌متر، حساسیت فرسایش خندقی کاهش یافته است. از دلایل کاهش حساسیت فرسایش خندقی در بارندگی‌های بالاتر می‌توان به افزایش پوشش گیاهی و ایجاد شرایط مناسب برای زمین‌لغزش‌ها اشاره کرد. نتایج نشان داد که عمق دره تا ۲۳۵ متر، باعث افزایش احتمال فرسایش خندقی شده است و از ۲۳۵ متر به بالا، باعث کاهش احتمال رخداد فرسایش شده است. نتایج نشان داد که نزدیک به جاده‌ها میزان حساسیت فرسایش خندقی افزایش پیدا می‌کند و این مورد اثرات جاده‌سازی و تشدید شرایط برای فرسایش خندقی را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف تعیین عوامل موثر بر فرسایش خندقی و پهنه‌بندی توزیع مکانی آن در شمال شرق استان گلستان انجام شد. در این پژوهش، با در نظر گرفتن ۱۴ عامل مهم و با استفاده از مدل‌های جنگل تصادفی، شبکه عصبی مصنوعی و درخت رگرسیون و طبقه‌بندی، نقشه حساسیت وقوع فرسایش خندقی تهیه شد. با توجه به این‌که شناسایی مناطق دارای حساسیت فرسایش خندقی مبتنی بر روش‌های سنتی و نظرات کارشناسی از دقت قابل قبولی برخوردار نیست، استفاده از روش‌های نوین یادگیری ماشینی امری ضروری است. نتایج نشان داد که عوامل فاصله از جاده و کاربری اراضی از مهمترین عوامل تاثیرگذار بر حساسیت فرسایش خندقی هستند که مدیریت کاربری اراضی را از سوی انسان می‌طلبد. منحنی ROC نشان داد که دقت مدل‌ها در برآورد مناطق دارای حساسیت فرسایش خندقی در مرحله آزمون عالی (ANN)، و در مرحله آزمون و اعتبارسنجی خیلی خوب (RF و CART) بوده است که به معنای عملکرد عالی مدل‌ها است.

واژه‌های کلیدی: استان گلستان، شبکه عصبی مصنوعی، فرسایش آب‌کندی، یادگیری ماشینی، ROC

مقدمه

سهم زیادی در تخریب اراضی دارد و به‌عنوان یکی از مهمترین مخاطرات محیطی در جهان و به‌خصوص در

فرسایش خندقی یکی از انواع فرسایش آبی است که

عوامل موثر بر فرسایش خندقی نیز موثر بوده‌اند (Rahmati et al., 2017a). از جمله این مدل‌ها می‌توان مدل‌های جنگل تصادفی، بیشینه آنتروپی، رگرسیون خطی و لجستیک، شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان را نام برد که به روش‌های یادگیری ماشینی معروف هستند.

در زمینه فرسایش خندقی و مدل‌سازی آن تحقیقات گسترده‌ای در سطح ایران و جهان انجام شده است. (Karimi and Ownegh (2016)، در پژوهشی به بررسی روش‌های آماری رگرسیون گام به گام و لجستیک در حوضه ناغان (شهرکرد) به ارزیابی خطر فرسایش خندقی پرداختند. آن‌ها با توجه به منحنی ROC^۳ روش رگرسیون گام به گام را برتر دانستند و بیان داشتند که مناطق با خطر بالای فرسایش خندقی در کاربری دیم واقع شده‌اند. (Shadfar (2016). در مطالعه‌ای به تعیین پتانسیل فرسایش خندقی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و با استفاده از نه عامل موثر در این پدیده در حوزه آبخیز طرود، پرداخته است که کارایی مدل مذکور را در تعیین مناطق دارای حساسیت، مثبت ارزیابی کرد و عوامل شیب، کاربری، واحدهای سنگ‌شناسی و فاصله از آبراهه را به‌عنوان مهمترین عوامل تاثیرگذار معرفی کردند. (Rahamti et al., (2017b) در تحقیقی با استفاده از

۱۲ عامل و چهار مدل ANN^۴، SVM^۵ (با چهار تابع کرنال)، RF^۶ و BRT^۷ به پهنه‌بندی فرسایش خندقی در حوضه کشکان پلدختر پرداختند. آن‌ها بیان داشتند که مدل‌های RF، SVM، BRT و ANN، به ترتیب دارای بیشترین دقت در مدل‌سازی مکانی فرسایش خندقی هستند. (Arabameri et al., (2019) با استفاده از مدل‌های BRT^۸، BLR^۹، NRF^۹ و FR^{۱۰} و استفاده از ۱۶ عامل توپوگرافیکی، ژئولوژیک، هیدرولوژیک و محیطی مرتبط با فرسایش خندقی، به بررسی پهنه‌بندی فرسایش خندقی در حوضه بایز در استان‌های خراسان جنوبی، یزد و اصفهان پرداختند. آن‌ها بیان داشتند که مدل‌های BRT

ایران شناخته شده است و به‌وسیله عوامل محیطی و انسانی کنترل و تشدید می‌شود (Samani et al., 2016). نوع خاک، کاربری اراضی، اقلیم و توپوگرافی از عوامل مهم کنترل‌کننده فرسایش خندقی به حساب می‌آیند (Poesen et al., 2003). تنوع، تعداد و میزان تاثیر عوامل مختلف از نقطه‌ای به نقطه دیگر و متفاوت بودن سهم عوامل شناسایی شده، در شکل‌گیری و گسترش خندق‌ها در پیروی از شرایط محیطی ایجاب می‌کند که تحقیقات بیشتری برای شناسایی بهتر عوامل موثر در فرسایش خندقی انجام شود.

فرایند فرسایش خندقی و تخریب زمین در شمال شرق کشور ناشی از افزایش جمعیت، تغییر کاربری اراضی، حضور دام مازاد در جنگل‌ها و جنگل‌زدایی است (Saber Chenari et al., 2016). عوامل مختلفی از طیف وسیعی از متغیرهای محیطی از قبیل کاربری اراضی، شاخص قدرت جریان، طول شیب، تراکم آبراهه، فاصله از آبراهه، جهت شیب، ارتفاع، شاخص رطوبت توپوگرافی، بارندگی، شیب، فاصله عمودی تا سطح اساس محلی (عمق آبراه)، بافت خاک و نوع خاک، عوامل زمین‌شناسی و عوامل انسانی شامل فاصله از جاده و تراکم جاده، بر میزان پتانسیل فرسایش خندقی تاثیرگذار هستند (Kariminejad et al., 2019; Azareh et al., 2019;) (Conoscenti et al., 2018; Meliho et al., 2018).

مدل‌های مختلفی برای ارزیابی میزان فرسایش به‌صورت کمی و کیفی از قبیل WEPP^۱ و CREAMS^۲ گسترش پیدا کردند (Flanagan and Nearing, 1995;) (Knisel, 1980) ولی قادر به برآورد فرسایش ناشی از خندق‌های بزرگ و دائمی نیستند و مدل‌های فوق، توزیع مکانی حساسیت خندق‌ها را به‌عنوان ابزاری اساسی برای ارزیابی تاثیر خندق بر تغییرات محیطی و برنامه‌ریزی روش‌های کنترل فرسایش، تبیین نمی‌کنند. در سال‌های اخیر، فن‌های یادگیری ماشینی و سامانه اطلاعات جغرافیایی در مقایسه با سایر روش‌ها در زمینه تعیین مناطق حساس به فرسایش خندقی دارای کارایی بالایی بوده‌اند و باعث افزایش دقت و سرعت در زمینه ارزیابی و پتانسیل فرسایش خندقی شده‌اند که این فن‌ها در تعیین

³ Receiver Operating Characteristic

⁴ Artificial Neural Network

⁵ Support Vector Machine

⁶ Random Forest

⁷ Boosted Regression Tree

⁸ Binary Logistic Regression

⁹ Neural Random Forest

¹⁰ Frequency Ratio

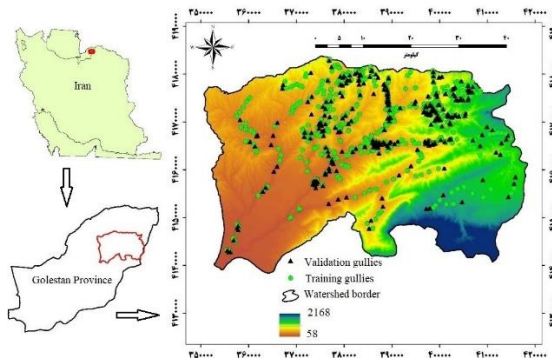
¹ Water Erosion Prediction Project

² Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems

در وقوع و توسعه فرسایش خندقی و تهیه نقشه حساسیت به فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، جنگل تصادفی و درخت رگرسیون و طبقه‌بندی است.

مواد و روش‌ها

حوضه مورد مطالعه در مختصات جغرافیایی ۵۵ درجه و ۱۶ دقیقه و ۵۶ درجه و ۴ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۱۹ دقیقه و ۴۹ درجه و ۳۷ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. حوزه آبخیز مورد مطالعه با مساحت ۲۲۲ هزار هکتار و دامنه ارتفاعی ۵۸ تا ۲۱۶۸ متر در شمال شرقی استان گلستان و در محدوده شهرستان کلالة قرار دارد. خروجی حوضه در محل سد گلستان به‌عنوان پست‌ترین نقطه محدوده در ارتفاع ۵۸ متر از سطح دریا قرار دارد. میانگین بارندگی حوضه بین ۲۲۴ تا ۷۳۶ میلی‌متر است. کمینه و بیشینه دما در حوضه مورد مطالعه بین ۱۰ تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد است. کاربری عمده محدوده مورد مطالعه کشاورزی آبی، دیم، جنگل و مرتع است. شکل ۱، موقعیت محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز مورد مطالعه در ایران و استان و خندق‌های آموزشی و اعتبارسنجی

Fig 1. The location of the studied watershed in Iran and the province and the training and validation gullies

در این پژوهش، ابتدا موقعیت خندق‌ها از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان دریافت شد و تعدادی از خندق‌ها از طریق مطالعات میدانی ثبت شد. سپس، بر اساس مرور منابع گسترده در این زمینه، از مجموع ۱۱۲۷ خندق، به‌صورت تصادفی ۷۸۹ خندق (۷۰ درصد) به‌عنوان داده‌های آزمون (آموزش) و ۳۳۸ خندق (۳۰ درصد) به‌عنوان داده‌های اعتبارسنجی طبقه‌بندی

و FR دقت بیشتری نسبت به مدل‌های NRF و BLR بر اساس شاخص ROC دارند و عوامل لیتولوژی و NDVI^۱ از مهمترین عوامل موثر بر فرسایش خندقی در حوضه مورد مطالعه هستند. (Tien Bui et al., 2019)، با استفاده از ۱۹ شاخص تاثیرگذار به پهنه‌بندی حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از شش مدل هیبریدی ترکیبی جدید یادگیری ماشینی در استان کردستان پرداختند. آن‌ها بیان داشتند که مدل ترکیبی RF-ADTree^۲ نسبت به سایر مدل‌ها بر اساس شاخص ROC برتری دارد. همچنین عوامل فاصله از رودخانه، ژئومورفولوژی، کاربری اراضی، گروه‌های هیدرولوژیک خاک، سنگ‌شناسی و درصد شیب از مهمترین عوامل تاثیرگذار بر فرسایش خندقی تشخیص داده شدند.

جمع‌بندی مرور مطالعات انجام شده، نشان‌دهنده اهمیت تعیین مناطق دارای حساسیت فرسایش خندقی برای مدیریت این فرسایش با توجه به خسارات گسترده آن و شناسایی مهمترین عوامل تاثیرگذار و همچنین توانایی بالای روش‌های یادگیری ماشینی در این امر مهم و حیاتی است. اراضی لسی استان گلستان به‌دلیل عمق کافی و دانه‌بندی تقریباً یکنواخت سیل‌تی، استفاده مفرط، کشت در اراضی شیب‌دار و مدیریت غلط اراضی، فرسایش‌پذیری آبی بیشتری دارند، به‌طوری که همه انواع فرسایش را در این مناطق می‌توان مشاهده کرد. متداول‌ترین نوع فرسایش در این مناطق، فرسایش خندقی است (Sanaei et al., 2005; Zheng, 2006).

حوزه آبخیز مورد مطالعه، با افزایش زمین‌های دیم و رها شده، تغییر کاربری اراضی، حضور دام‌مآزاد در جنگل‌ها و همچنین افزایش جمعیت روبه‌رو است. لذا، این حوضه با افزایش حساسیت فرسایش خندقی مواجه است و باید مناطق دارای پتانسیل فرسایش خندقی شناسایی و مدیریت شوند. از آنجایی که شناسایی عوامل موثر بر وقوع این نوع فرسایش و پهنه‌بندی آن یکی از ابزارهای مهم کنترل این پدیده است (Arabameri et al., 2019)، در پژوهش حاضر ضمن معرفی عوامل موثر بر وقوع فرسایش خندقی به مدلسازی مکانی و تهیه نقشه پهنه‌بندی در شمال شرق استان گلستان پرداخته شده است. همچنین، هدف از این پژوهش تجزیه و تحلیل سهم عوامل مختلف

¹ Normalized Difference Vegetation Index

² Random Forest-Alternating Decision Tree

ایجاد می‌کند و فاصله از جاده با توجه به تغییرات بر اکوسیستم و خاک منطقه، نقش بسیار مهمی در حساسیت وقوع فرسایش خندقی ایفا می‌کند (Tien Bui et al., 2019). لایه‌های تراکم آبراهه و تراکم جاده بر اساس نقشه آبراهه‌ها و جاده‌های موجود در منطقه و با استفاده از تابع Line Density در نرم‌افزار ArcGIS به دست آمدند. تراکم آبراهه بیشتر باعث افزایش رواناب و به تبع آن، اثر بر حساسیت فرسایش خندقی از طریق افزایش قدرت جریان آبراهه در پایین دست دارد (Conoscenti et al., 2018).

تراکم جاده‌ها وضعیت طبیعی و شیب تعادل منطقه را به هم زده است و باعث افزایش فشار به دامنه پایین جاده می‌شوند که خود تشدیدکننده فرسایش خندقی هستند (Tien Bui et al., 2019). لایه سنگ‌شناسی از نقشه زمین‌شناسی منطقه (مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰) استخراج شده است. واحدهای سنگی و سازندهای مختلف دارای درجات حساسیت گوناگونی در وقوع فرسایش خندقی هستند. کاربری اراضی بر روی میزان رواناب سطحی، تبخیر و تعرق و نفوذ آب اثرگذار است و از این طریق بر وقوع فرسایش خندقی نیز تاثیرگذار است که پوشش گیاهی نقش مهمی در کنترل فرسایش خندقی دارد (Tien Bui et al., 2019; Kornejady et al., 2017).

نقشه بارندگی با استفاده از اطلاعات ۳۵ ایستگاه باران-سنجی تهیه شده است. ابتدا، میانگین بارندگی ۲۶ ساله (دوره آماری مشترک) برای هر ایستگاه محاسبه شد و سپس با استفاده از روش کربجینگ جهانی (به دلیل کمترین میزان $RMSE^7$) در نرم‌افزار ArcGIS پهنه‌بندی بارندگی انجام گرفت. لایه شاخص موقعیت توپوگرافیک، با استفاده از مدل رقومی ارتفاع و با استفاده از نرم‌افزار SAGA GIS تهیه شد. شاخص TPI^8 ، ارتفاع هر یک از سلول‌ها در مدل رقومی ارتفاع را با ارتفاع متوسط محدوده مشخص شده در اطراف این سلول مقایسه می‌کند. در واقع این شاخص تفاوت بین پیکسل مرکزی و میانگین سلول‌های اطراف را نشان می‌دهد. مقادیر مثبت این شاخص نشان‌دهنده مکان‌هایی مانند خط‌الرس‌ها هستند که ارتفاعی بالاتر از میانگین اطراف نقطه دارا هستند. مقادیر منفی نشان‌دهنده مکان‌هایی مانند دره‌ها و

شدند (Kornejady et al., 2017; Arabameri et al., 2019; Arulbalaji et al., 2018, 2020).

به منظور تعیین متغیرهای موثر در حساسیت فرسایش خندقی و مطالعات مختلف در این زمینه، ۱۴ عامل شناسایی شد و در مرحله بعد آزمون هم‌خطی بین متغیرها با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد. با استفاده از شاخص‌های ضریب تحمل^۱ و عامل تورم واریانس^۲ در صورت وجود هم‌خطی بین متغیرها ($Tolerance < 0.1$) و $VIF > 5$) از روند مدلسازی حذف شدند.

با توجه به اهمیت نقشه مدل رقومی ارتفاع^۳ و کاربرد آن در تهیه عوامل مختلف پژوهش حاضر، مدل رقومی ارتفاع (با اندازه سلول ۱۲/۵ متر) با استفاده از تصاویر ماهواره ALOS^۴ تهیه شد. لایه‌های شیب و جهت شیب با استفاده از مدل رقومی ارتفاع و به ترتیب از توابع Slope و Aspect تهیه شده‌اند. افزایش شیب زمین باعث کاهش میزان آب نفوذی به زمین و افزایش رواناب می‌شود. لایه شیب، یکی از متغیرهای توپوگرافی بسیار مهم در کنترل وقوع فرسایش خندقی است و شیب‌های کم برای تجمع جریان‌های سطحی و در نتیجه فرسایش خندقی مساعد هستند (Arulbalaji et al., 2019).

جهت شیب بر روی میزان دریافت بارندگی، اثرات باد و تبخیر و تعرق، میزان رطوبت و میزان دریافت نور خورشید اثرگذار است و بر همین اساس نوع پوشش گیاهی و توزیع آن را تحت تاثیر قرار می‌دهد (Wang et al., 2011).

شاخص طول شیب بر تشدید فرسایش خندقی تاثیرگذار است و طول شیب‌های بیشتر در صورت فراهمی شرایط (بارندگی، نوع خاک و درصد شیب و پوشش گیاهی) باعث گسترش بیشتر فرسایش خندقی می‌شوند (Arabameri et al., 2019). لایه‌های فاصله از آبراهه بر اساس نقشه آبراهه‌ها (استخراج از نرم‌افزار SAGA^۵ GIS) و فاصله از جاده بر اساس جاده‌های موجود و با استفاده از تابع فاصله اقلیدسی^۶ در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شدند.

فاصله از آبراهه نقش مهمی در نوع فرسایش خندقی

¹ Tolerance

² Variance inflation factor

³ Digital Elevation Model (DEM)

⁴ Advanced Land Observation Satellite

⁵ System for Automated Geoscientific Analyses

⁶ Euclidean Distance

⁷ Root Mean Square Error

⁸ Topographic Position Index

چاله‌های محلی هستند که ارتفاعی پایین‌تر از میانگین اطراف نقطه دارند. همچنین، مقادیر صفر نشان‌دهنده مناطق مسطح و مکان‌هایی با شیب صفر است (Arabameri et al., 2019a).

$$S = \sum_{n=1}^N w_n \cdot X_n = W^T \cdot X \quad (1)$$

شاخص^۱ HAND شاخص توپوگرافیکی-هیدرولوژیکی ارتفاع از سطح نزدیک‌ترین زهکش، نماینده رفتار هیدرولوژیکی حوزه آبخیز است. این شاخص، حوضه را با توجه به ارتفاع نسبی در طول شبکه زهکشی اصلاح کرده است و وضعیت پتانسیل گرانشی و زهکشی نسبی زمین را تعیین می‌کند (Rahmati et al., 2018). این شاخص با استفاده از نقشه DEM $12/5 \times 12/5$ متری و در نظر گرفتن آستانه مساحتی ۵۰۰ هکتار به دست آمده است. این شاخص در بازه اعداد مثبت قرار گرفته و از کم (عدد صفر) به زیاد (حد خاصی ندارد) نماینده مناطق پاسخ اشباع (دارای جریان اشباع)، دامنه (دارای جریان زیرقشری سریع) و مناطق فلات (دارای جریان نفوذ عمقی) است.

$$y = f(s) \quad (2)$$

$$f(s) = (1 + \exp(-S))^{-1} \quad (3)$$

خروجی y می‌تواند نتیجه مدل و یا ورودی لایه بعدی در شبکه‌های چند لایه باشد. الگوریتم‌های مختلفی برای محاسبه وزن‌های بهینه ارائه شده است که در این میان الگوریتم پس انتشار خطا، پرکاربردترین آن‌ها است.

شبکه‌هایی که در این پژوهش استفاده شده‌اند، از نوع شبکه‌های پرسپترون چندلایه هستند. این شبکه‌ها به صورت پیشرو عمل کرده است و در ساختار تمامی آن‌ها سعی شده طراحی بهینه با یک لایه میانی صورت پذیرد. آموزش شبکه‌های پرسپترون چندلایه با استفاده از الگوریتم آموزش پس انتشار خطا انجام می‌شود. فرایند عملکرد این شبکه‌ها به این صورت است که لایه ورودی، نسبت به پذیرش داده‌ها اقدام کرده و لایه (لایه‌های) میانی عمل فرآوری داده‌ها را انجام می‌دهند. در نهایت، لایه خروجی نیز به نمایش خروجی‌های حاصل از کاربرد مدل اقدام می‌کند (Rahmati et al., 2017; Shadfar, 2016).

مدل درخت رگرسیون و طبقه‌بندی (CART^۲): تجزیه و تحلیل داده‌های پیچیده محیطی نیازمند روش‌های تحلیلی قوی و انعطاف‌پذیری است که بتواند روابط غیرخطی و اثرات متقابل را کنترل کند. CART، یکی از روش‌های رگرسیون نامتغیری است که درخت تصمیم‌گیری را بر اساس الگوریتم تقسیم‌بندی دوتایی بازگشتی، رشد می‌دهد. درخت به صورت گرافیکی با گره ریشه (حاوی داده‌های تقسیم نشده) در بالا و گره‌های شاخه (داده‌های تقسیم شده) و گره‌های برگ (تقسیم‌های نهایی) در پایین نشان داده می‌شود که این موضوع به درک تفسیر روابط کمک می‌کند. اولین اقدام تصمیم‌گیری

مدل شبکه عصبی مصنوعی: شبکه‌های عصبی مصنوعی یکی از مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش است. این مدل از تعدادی نرون تشکیل شده‌اند که به صورت لایه‌ای در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. هر شبکه از یک لایه ورودی و یک لایه خروجی تشکیل شده است. در این پژوهش، از شبکه‌های عصبی پرسپترون چند لایه به دلیل کارایی بهتر نسبت به دیگر انواع شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده است. عناصر اصلی یک شبکه عصبی، عصب‌ها یا نرون‌های مصنوعی هستند. الگوی ورودی به یک گره شبیه دندریت یک سلول بیولوژیک است که می‌توان آن را با برداری با n متغیر یا نرون به صورت $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ نشان داد.

مجموع حاصل ضرب ورودی‌ها در وزن‌های نظیرشان را نیز می‌توان با کمیت اسکالر S (رابطه ۱) نمایش داد. در این شبکه‌ها، وزن‌های داده شده به نرون به نحوی تنظیم می‌شود که نزدیک‌ترین مقدار خروجی را نسبت به مقدار مشاهده‌ای تولید کند. این کار آموزش شبکه نام دارد. الگوریتم‌های آموزش، روندهایی هستند که به وسیله آن‌ها وزن‌های شبکه تنظیم می‌شود. هدف از آموزش شبکه این است که شبکه قانون کار را یاد بگیرد و پس از آموزش به

مجموع حاصل ضرب ورودی‌ها در وزن‌های نظیرشان را نیز می‌توان با کمیت اسکالر S (رابطه ۱) نمایش داد. در این شبکه‌ها، وزن‌های داده شده به نرون به نحوی تنظیم می‌شود که نزدیک‌ترین مقدار خروجی را نسبت به مقدار مشاهده‌ای تولید کند. این کار آموزش شبکه نام دارد. الگوریتم‌های آموزش، روندهایی هستند که به وسیله آن‌ها وزن‌های شبکه تنظیم می‌شود. هدف از آموزش شبکه این است که شبکه قانون کار را یاد بگیرد و پس از آموزش به

مجموع حاصل ضرب ورودی‌ها در وزن‌های نظیرشان را نیز می‌توان با کمیت اسکالر S (رابطه ۱) نمایش داد. در این شبکه‌ها، وزن‌های داده شده به نرون به نحوی تنظیم می‌شود که نزدیک‌ترین مقدار خروجی را نسبت به مقدار مشاهده‌ای تولید کند. این کار آموزش شبکه نام دارد. الگوریتم‌های آموزش، روندهایی هستند که به وسیله آن‌ها وزن‌های شبکه تنظیم می‌شود. هدف از آموزش شبکه این است که شبکه قانون کار را یاد بگیرد و پس از آموزش به

² Classification and Regression Tree

¹ Height Above the Nearest Drainage

می‌سازد. جنگل ساخته شده، در واقع گروهی از درخت‌های تصمیم^۱ است. کار ساخت جنگل با استفاده از درخت‌ها اغلب اوقات به روش کیسه‌گذاری^۲ انجام می‌شود. ایده اصلی روش کیسه‌گذاری آن است که ترکیبی از مدل‌های یادگیری، نتایج کلی مدل را افزایش می‌دهد.

به بیان ساده، جنگل تصادفی چندین درخت تصمیم ساخته و آن‌ها را با یکدیگر ادغام می‌کند تا پیش‌بینی‌های صحیح‌تر و پایدارتری حاصل شوند. مدل پیش‌بینی کننده RF، بر اساس میانگین‌گیری از نتایج حاصل از تمامی درخت‌های تصمیم مربوط استوار است و برای بسیاری از مجموعه داده‌ها، طبقه‌بندی با صحت بالایی را انجام می‌دهد (Rahmati et al., 2017).

ارزیابی مدل‌ها: به منظور ارزیابی مدل‌ها، از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) برای قدرت پیش‌بینی مدل‌ها استفاده شد. این منحنی به صورت نموداری ارائه می‌شود که در آن احتمال تشخیص صحیح نقاط حضور مدل با احتمال تشخیص صحیح نقاط عدم حضور، مورد مقایسه قرار می‌گیرد (Phillips et al., 2006; Elith et al., 2011).

سطح زیر منحنی، بیانگر مقدار پیش‌بینی سامانه از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخ داده و عدم وقوع رخداد آن است. ایده‌آل‌ترین مدل، بیشترین سطح زیر منحنی را دارد و مقادیر AUC^۳ از ۰/۵ تا یک متغیر است. هرچه سطح زیر منحنی به یک نزدیک‌تر باشد، بیانگر بهترین دقت از نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه شده است. شکل ۲، فلوچارت مراحل جریان پژوهش را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

همان‌طور که در بخش مواد و روش‌ها اشاره شد، ابتدا آزمون هم‌خطی بین متغیرها انجام گرفت (جدول ۱). نتایج نشان داد که بین متغیرها هم‌خطی وجود ندارد و لذا، کلیه متغیرها در روند مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند.

در مورد انتخاب بهترین متغیر تقسیم‌کننده است که بتواند متغیر هدف را به بهترین نحو تقسیم کند. هنگامی که بهترین متغیر تقسیم‌کننده انتخاب شد، داده‌ها به دو گروه تقسیم می‌شوند (تقسیم دوگانه).

جنبه تقسیم بازگشتی اشاره به این واقعیت دارد که هر گره به نوبه خود به دو گره فرزند تقسیم می‌شود و آن گره‌ها نیز پس از آن تقسیم می‌شوند و به همین ترتیب این روند ادامه پیدا می‌کند. این تقسیم‌بندی تا زمانی ادامه می‌یابد که گروه‌ها همگن شده یا تعداد مشاهدات در درون گره‌ها کمتر از مقدار کمینه تعریف شده به‌وسیله کاربر باشد. هر گره به‌وسیله تعداد مشاهدات، مقدار میانگین متغیر پاسخ آن مشاهدات و میزان متغیر پیشگو تقسیم‌کننده آن، مشخص می‌شود. یک موضوع مهم در درخت رگرسیون و طبقه‌بندی، تصمیم‌گیری در مورد زمان توقف تقسیم‌ها است.

چنانچه تقسیم شدن‌ها متوقف نشود، الگوریتم درخت در نهایت همه اطلاعات را تقسیم کرده و منجر به بیش‌برازش یا فرایادگیری می‌شود. چنین رویکردی، یک درخت بزرگ و پیچیده ایجاد می‌کند که این درخت را نمی‌توان برای پیش‌بینی موارد دیگر استفاده کرد. از سوی دیگر، درخت کوچک، دور از انتظار است که ویژگی‌های مهم را در بر گیرد.

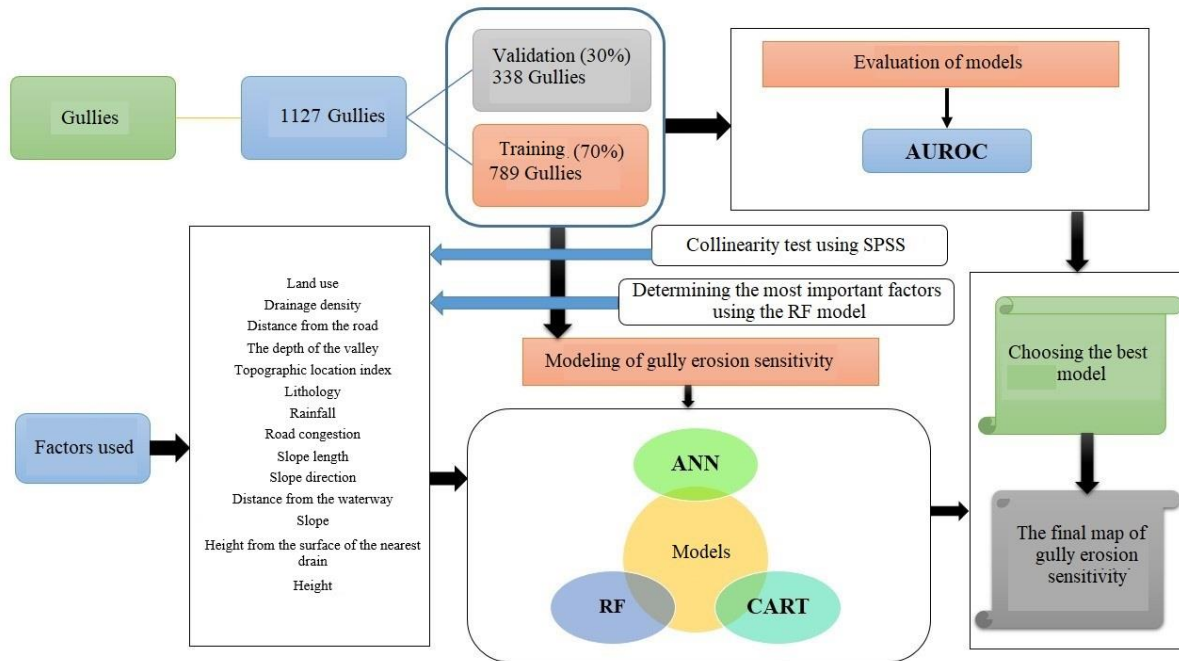
مزایای استفاده از درختان عبارتند از ۱- استفاده از طیف گسترده‌ای از انواع متغیرها از جمله طبقه‌ای، رتبه‌ای و داده‌های بقاء، ۲- سهولت و مقاوم بودن، ۳- سهولت تفسیر و ۴- توانایی کنترل داده‌های از دست رفته، هستند. بنابراین، درختان می‌توانند جایگزینی مناسب برای بسیاری از فن‌های آماری سنتی از جمله رگرسیون چندگانه، رگرسیون لجستیک و مدل لگاریتمی-خطی باشند.

مدل جنگل تصادفی: جنگل تصادفی، یک الگوریتم یادگیری ماشین و نظارت شده با قابلیت استفاده آسان است که اغلب اوقات نتایج بسیار خوبی را حتی بدون تنظیم متغیرهای آن، فراهم می‌کند. همان‌طور که از نام آن مشهود است، این الگوریتم، جنگلی را به‌طور تصادفی

¹ Decision trees

² Bagging

³ Area Under Curve



شکل ۲- فلوچارت تعیین مناطق دارای حساسیت فرسایش خندقی
 Fig 2. Flowchart for determining areas with gully erosion sensitivity

جدول ۱- نتایج تحلیل آزمون هم‌خطی بین متغیرهای مورد استفاده در پژوهش

Table 1. The results of collinearity test analysis between the variables in the research

Variables	Tolerance	VIF
Land use	0.925	1.013
Drainage density	0.912	1.087
Distance from the road	0.905	1.114
The depth of the valley	0.874	1.162
Topographic location index	0.784	1.328
Lithology	0.733	1.335
Rainfall	0.645	1.530
Road congestion	0.641	1.560
Slope length	0.521	1.912
Slope direction	0.471	2.143
Distance from the waterway	0.455	2.185
Slope	0.413	2.371
Height from the surface of the nearest drain	0.375	2.623
Height	0.332	2.883

موقعیت توپوگرافی نیز بین ۰/۳۵/۷ تا ۲۹/۸ متغیر است. ارتفاع از سطح نزدیک‌ترین زهکش، دامنه متغیر بین صفر تا ۱۱۴۸ را دارد. همچنین، شیب حوزه آبخیز تا ۱۶۱ درصد نیز می‌رسد که نشان‌دهنده شیب بسیار بالا است. طول شیب تا ۱۴۴۱ متر است که این مورد به گسترش فرسایش خندقی کمک می‌کند.

میانگین بارندگی در حوضه مذکور بین ۲۲۴ میلی‌متر تا ۷۳۶ میلی‌متر متغیر است و این بارندگی شرایط ایجاد و

لایه‌های مورد استفاده برای تعیین مناطق دارای حساسیت فرسایش خندقی در شکل ۳ نشان داده شده است. دامنه ارتفاعی بین ۵۸ تا ۲۱۶۸ متر متغیر، و از غرب به سمت شرق حوضه ارتفاع کاهش داشته و جنوب شرقی دارای بیشترین ارتفاع از سطح دریا است. عمق دره در این حوزه آبخیز تا ۴۲۴ متر می‌رسد که این مورد نشان‌دهنده فعالیت فرسایش در این حوضه است و بیشترین میزان آن در مرکز و جنوب حوضه است. شاخص

گچ و نمک، پایداری کم لس‌ها و عدم وجود ساختمان قوی خاکدانه‌ها و همچنین کمبود مواد آلی (عدم وجود پوشش گیاهی مناسب در بخش‌های شمالی حوضه) اشاره کرد. اهمیت عامل واحدهای سنگ‌شناسی و تاثیر آن‌ها بر افزایش حساسیت فرسایش خندقی در تحقیقات مختلفی مورد تاکید پژوهشگران بوده است (Viero et al., 2005; Shadfar et al., 2010, 2016; Yamani et al., 2013; Valentin et al., 2005; Azareh et al., 2019; Gornami and Shadfar, 2019). نتایج نشان‌دهنده کاهش حساسیت فرسایش خندقی با کاهش شاخص HAND است. در واقع این نتیجه بیانگر این است که در مناطقی که میزان سطوح اشباع در سطح حوزه آبخیز افزایش می‌یابد، احتمال وقوع و حساسیت فرسایش خندقی افزایش پیدا می‌کند. مناطق اشباع از آب در صورت وجود شیب مناسب از بستر اصلی خود جدا می‌شوند. لازم به ذکر است که شاخص مذکور سومین عامل مهم در حساسیت فرسایش خندقی در حوضه مورد مطالعه بوده است.

نتایج نشان داد که در میان انواع کاربری‌ها، مسیل‌ها، مراتع فقیر و کاربری کشاورزی دارای بیشترین حساسیت فرسایش خندقی هستند. این در حالی است که مناطق جنگلی دارای کمترین میزان حساسیت به این فرسایش بوده‌اند. مسیل‌ها به دلیل تجمع جریان و مراتع فقیر، به دلیل عدم وجود پوشش گیاهی مناسب و کاربری کشاورزی به دلیل مدیریت غلط اراضی حساسیت بالایی در حوضه مورد مطالعه دارند. کاربری اراضی در پژوهش حاضر دومین عامل مهم و تاثیرگذار بر حساسیت فرسایش خندقی بوده است.

همچنین، در تحقیقات بسیاری (Shadfar; 2010; Yamani et al., 2013; Rahmati et al., 2016; Valentin et al., 2005)، بر اهمیت نقش متغیر کاربری بر احتمال رخداد فرسایش خندقی تاکید شده است. نتایج نشان داد که در دامنه بارندگی ۲۲۰ تا ۴۲۰ میلی‌متر، احتمال رخداد فرسایش خندقی افزایش پیدا کرده است و از دامنه ۴۲۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر بالاترین میزان حساسیت را نشان داده است و با افزایش بارندگی از ۵۰۰ میلی‌متر به بالا با کاهش حساسیت فرسایش خندقی مواجه شده است. از دلایل کاهش حساسیت فرسایش خندقی در بارندگی‌های بالاتر می‌توان به افزایش پوشش گیاهی و ایجاد شرایط مناسب برای زمین‌لغزش‌ها اشاره کرد. اهمیت شاخص بارندگی و تاثیر آن بر ایجاد و توسعه فرسایش خندقی در

گسترش خندق را فراهم می‌کند و میزان بارندگی از شمال غربی به سمت جنوب شرقی در حال افزایش است. بر اساس شکل ۳، فاصله از جاده‌ها در حوضه مذکور تا ۱۸ کیلومتر و همچنین، فاصله از آبراهه‌های حوضه نیز تا ۱۷۰۴ متر می‌رسد. تراکم جاده‌ها بسیار پایین و بیشینه تا ۰/۶ کیلومتر بر کیلومتر مربع و تراکم آبراهه‌ها تا ۲/۱ کیلومتر بر کیلومتر مربع می‌رسد. جاده‌های حوضه در راستای محور شمال شرقی به جنوب غربی بیشترین پراکندگی را دارند.

حوضه مذکور هشت نوع کاربری مختلف شامل مرتع (فقیر، متوسط و خوب)، جنگل (کم‌تراکم، متوسط و متراکم)، مناطق مسکونی، باغ، باغ و دیمزار، مسیل، کشاورزی و دیمزار، دارد. لازم به ذکر است که به ترتیب بیشترین و کمترین مساحت حوضه را مراتع متوسط و مناطق مسکونی اشغال کرده‌اند. همچنین، این حوضه دارای جنس سنگ‌های مختلف شامل ماسه‌سنگ، شیل سبز رنگ (کمترین مساحت)، آهک نازک و ضخیم، سیلت، دولومیت، لس و باتلاق (بیشترین مساحت) است.

رابطه بین فرسایش خندقی و ارتفاع نشان داد که ارتفاعات پایین‌تر، حساسیت بیشتری نسبت به ارتفاعات بالاتر دارند. از دلایل این موضوع در حوضه مورد مطالعه وجود تراکم بالای جنگل‌های هیرکانی در ارتفاعات بالاتر و پوشش گیاهی مناسب در زیراشکوب جنگلی است. احتمال ایجاد فرسایش خندقی در طبقات پایین‌تر در تحقیقات دیگر (Arabameri et al., 2018) نیز مورد تاکید قرار گرفته است. نتایج نشان داد که در نزدیکی به آبراهه‌ها حساسیت فرسایش خندقی بیشتر است و کاهش حساسیت فرسایش خندقی با افزایش فاصله از آبراهه‌ها در تحقیقات بسیاری (Arabameri et al., 2018; Azareh et al., 2019; Rahmati et al., 2016) مورد تاکید قرار گرفته است.

نتایج نشان داد که با افزایش تراکم زهکشی، حساسیت فرسایش خندقی افزایش پیدا می‌کند و احتمال رخداد فرسایش خندقی بیشتر شده است. Valentin et al. (2005) بیان کردند که افزایش تراکم آبراهه، یکی از متغیرهای اساسی در فرسایش خندقی است. نتایج نشان داد که پادگانه‌های قدیمی، شیل و لس‌ها بیشترین تاثیر را با حساسیت فرسایش خندقی دارند که از مهمترین علل آن می‌توان به وجود رسوبات ریزدانه رس و سیلت، املاح

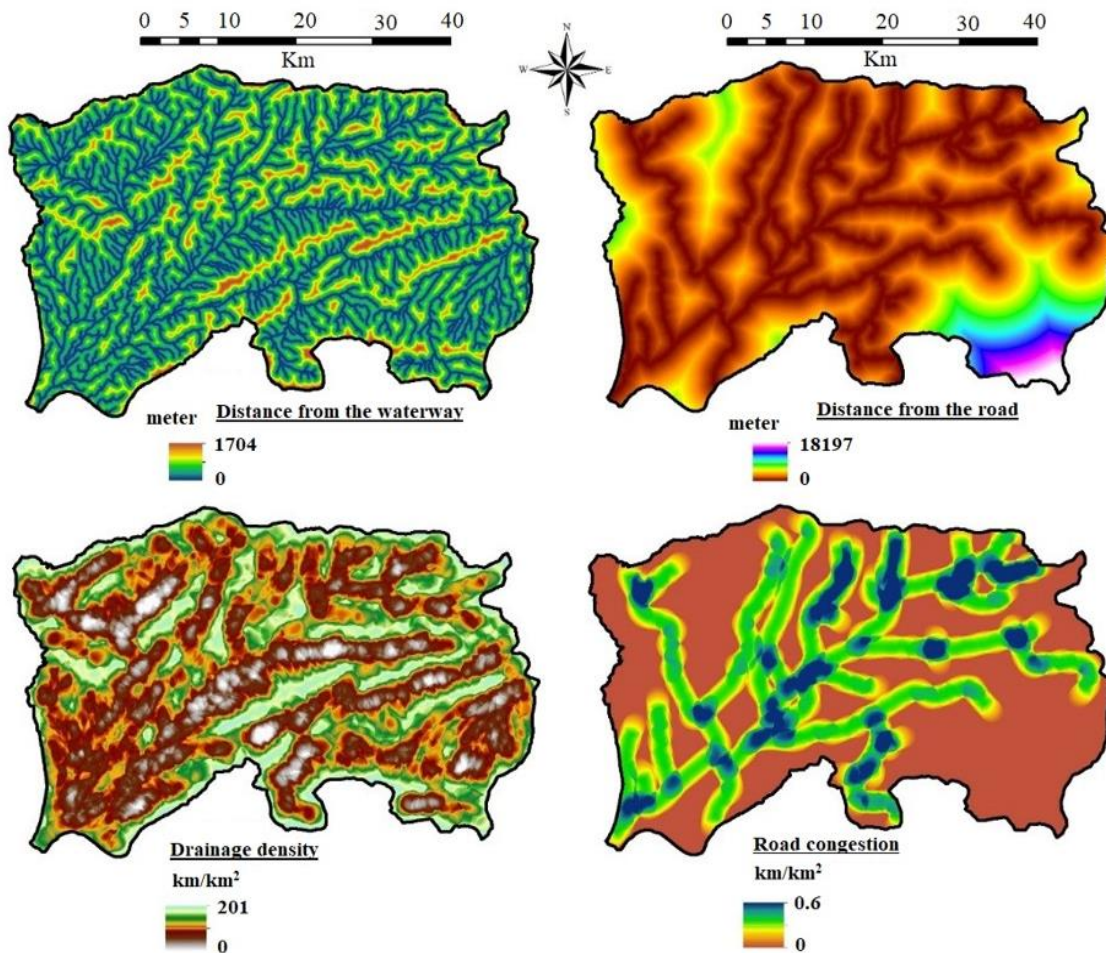
خندقی را نشان می‌دهد که در پژوهش دیگران نیز به این مهم اشاره شده است (Yamani et al., 2013; Shadfar, 2010).

در پژوهش حاضر، عامل فاصله از جاده مهمترین عامل موثر بر حساسیت فرسایش خندقی بوده است که اهمیت و تاثیر آن را به نوعی بیان می‌کند. از طرف دیگر، تراکم جاده‌ها نیز به تشدید و حساسیت رخداد و احتمال فرسایش خندقی دامن می‌زند. شیب، عمق دره، شاخص موقعیت توپوگرافیک و جهت در پژوهش حاضر اهمیت کمتری نسبت به سایر عوامل داشته‌اند. این در حالی است که عامل شیب در تحقیقات دیگر عامل مهمی تلقی شده و مورد تاکید قرار گرفته است (Viero et al., 2005).

تحقیقات (Gornami and Shadfar, 2019)، نیز مورد تاکید قرار گرفته است.

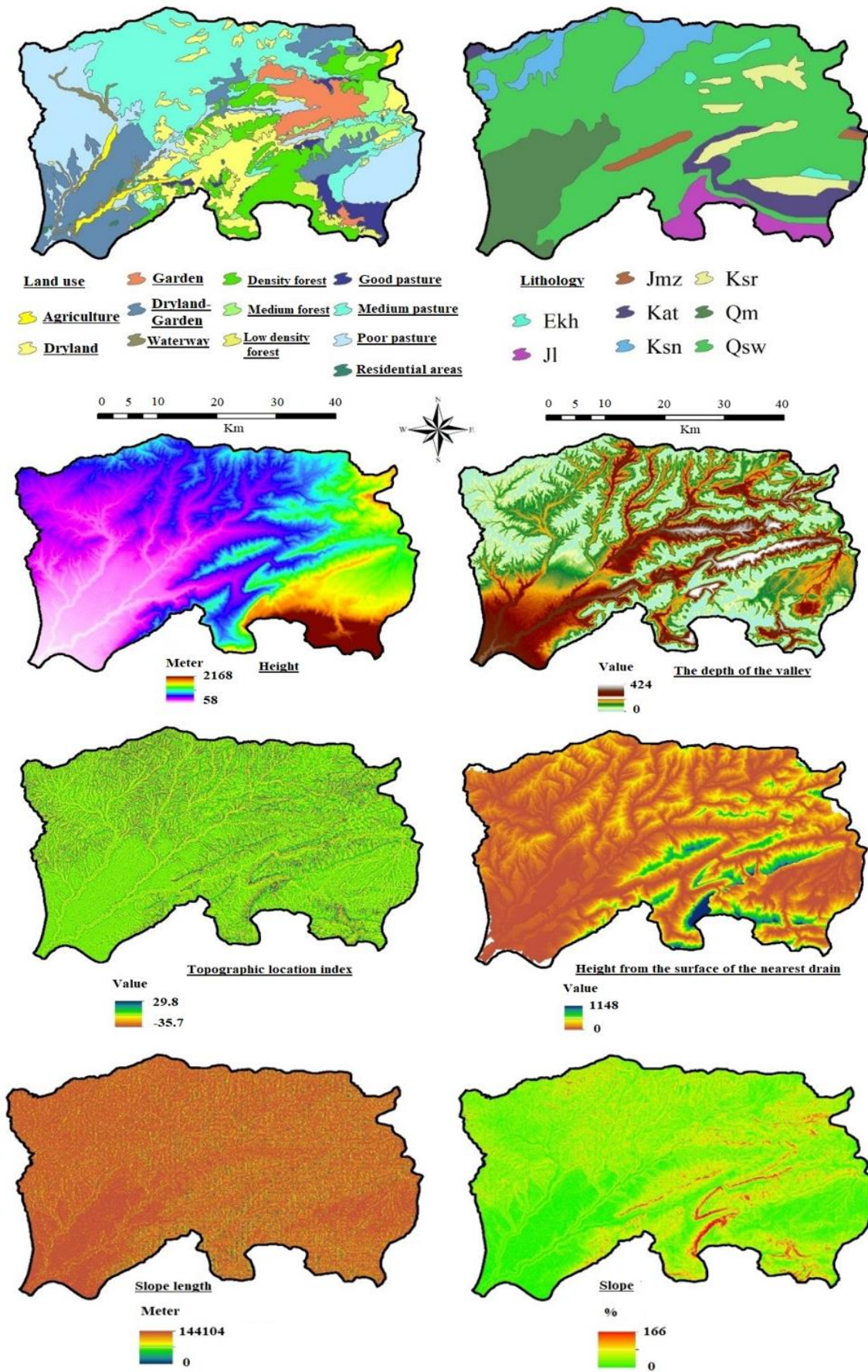
نتایج نشان داد که عمق دره تا ۲۳۵ متر باعث افزایش احتمال فرسایش خندقی شده است و از ۲۳۵ متر به بالا باعث کاهش احتمال رخداد فرسایش شده است. در واقع، تا عمق مذکور فعالیت آبراهه‌ها وجود دارد و در مناطق نزدیک به آبراهه‌ها و تقاطع آن‌ها فرسایش خندقی از نوع جبهه‌ای اتفاق می‌افتد و از عمق مذکور به بعد، فرسایش بستر آبراهه‌ها و فرسایش به صورت عمقی گسترش پیدا می‌کند.

همچنین، نتایج نشان داد که نزدیک به جاده‌ها میزان حساسیت فرسایش خندقی افزایش پیدا می‌کند و این مورد اثرات جاده‌سازی و تشدید شرایط برای فرسایش

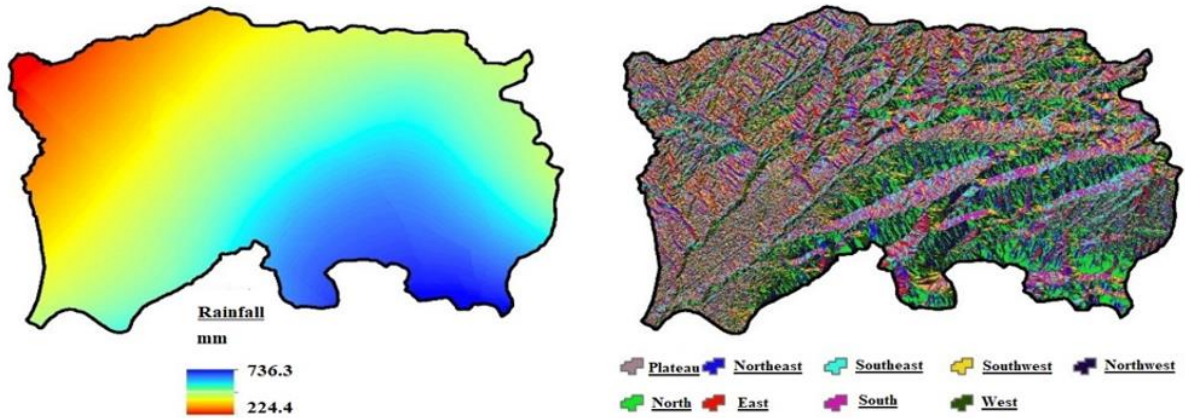


شکل ۳- عوامل مورد استفاده در حساسیت فرسایش خندقی

Fig 3. Factors used in gully erosion sensitivity



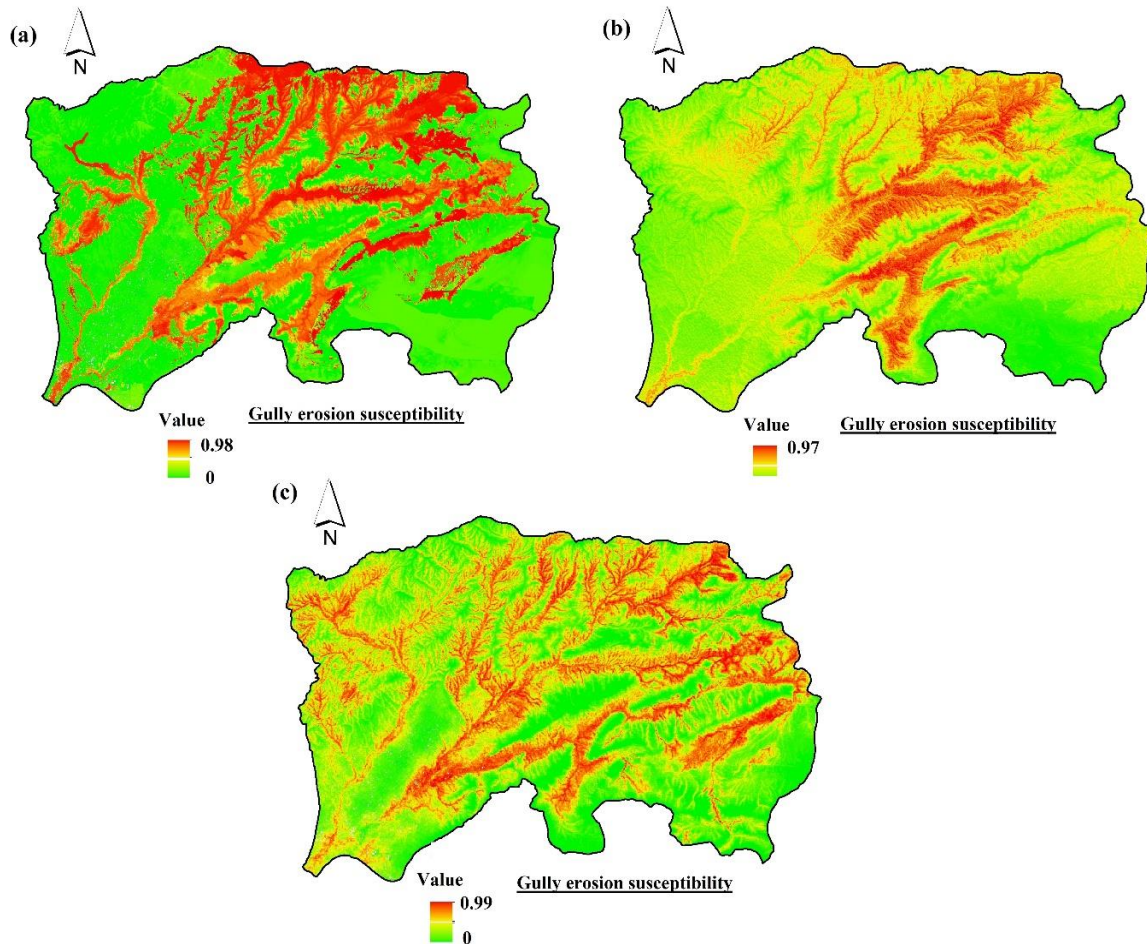
ادامه شکل ۳
Fig 3 continued



ادامه شکل ۳
Fig 3 continued

مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، درخت رگرسیون و طبقه‌بندی و جنگل تصادفی نشان می‌دهد.

شکل ۴، نتایج حاصل از مدل‌سازی حساسیت فرسایش خندقی در شمال شرق استان گلستان را با استفاده از



شکل ۴- نقشه پهنه‌بندی حساسیت فرسایش خندقی

a: شبکه عصبی مصنوعی؛ b: درخت رگرسیون و طبقه‌بندی؛ c: جنگل تصادفی

Fig 4. Zoning map of gully erosion sensitivity

a: Artificial neural network, b: Regression and classification tree and c: Random forest

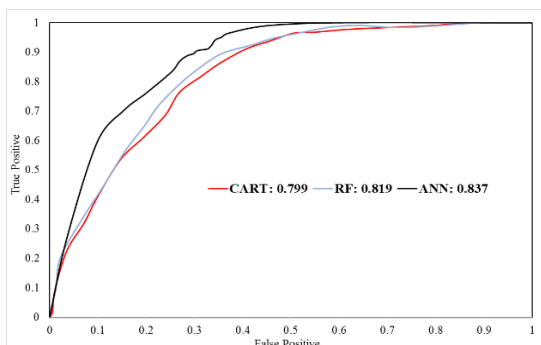
مدل‌ها طبقه با حساسیت خیلی کم، بیشترین مساحت را به خود اختصاص داده است.

درصد مساحت هر یک از طبقات حساسیت فرسایش خندقی در مدل‌های مختلف در جدول ۲، نشان داده شده است. بر اساس این جدول، در همه

جدول ۲- درصد مساحت طبقه‌های مختلف حساسیت فرسایش خندقی

Table 2. Area percentage of different gully erosion sensitivity classes

Models	Class	Area (%)
RF	Very low	28.55
	Low	22.73
	Medium	17.72
	High	17.53
	Very high	13.47
CART	Very low	47.5
	Low	14.5
	Medium	7.5
	High	14.6
ANN	Very high	15.9
	Very low	58.5
	Low	4.78
	Medium	4.13
	High	12.9
	Very high	19.6



شکل ۶- منحنی ROC در مرحله آزمون (اعتبارسنجی) مدل‌ها
Fig 6. ROC curve in the test (validation) phase of the models

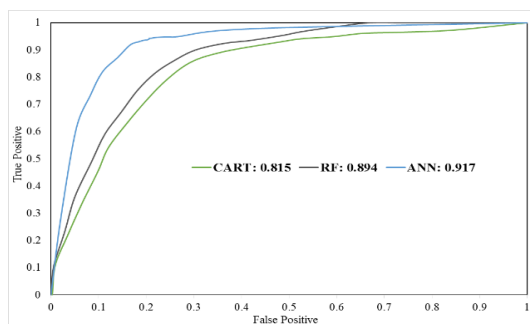
جدول ۳- وزن متغیرهای مورد استفاده برای تعیین مهمترین

متغیرها بر اساس مدل RF

Table 3. The weight of the variables used to determine the most important variables based on RF model

Variable	Weight
Distance from the road	19.25
Land use	18.55
Height from the surface of the nearest drain	17.23
Rainfall	16.22
Road congestion	15.14
Distance from the waterway	14.73
Slope length	14.31
Drainage density	13.51
Height	11.83
Lithology	9.28
Slope	9.18
The depth of the valley	4.35
Topographic location index	2.82
Slope direction	1.91

شکل ۵ و ۶، نتایج حاصل از پیش‌بینی مدل‌ها بر اساس مقادیر AUC را در دو بخش آموزش و اعتبارسنجی نشان می‌دهد. بر اساس این شکل‌ها، در هر دو مرحله آموزش و اعتبارسنجی میزان پیش‌بینی دقت مدل ANN بالاتر بوده است.



شکل ۵- منحنی ROC در مرحله آموزش (یادگیری) مدل‌ها
Fig 5. ROC curve in the training (learning) phase of the models

جدول ۳، نتایج وزن متغیرها حاصل از اجرای مدل RF را نشان می‌دهد. بر اساس مدل RF، متغیر فاصله از جاده مهمترین عامل در تعیین مناطق دارای حساسیت فرسایش خندقی بوده است و متغیر جهت شیب، کمترین اثر را داشته است.

نتیجه‌گیری

فرسایش خندقی، یکی از شکل‌های پیشرفته فرسایش آبی است که شناسایی عوامل موثر و پهنه‌بندی آن، یکی از ابزارهای مهم برای کنترل و مدیریت این پدیده است. لذا، این پژوهش با هدف تعیین عوامل موثر بر فرسایش خندقی و پهنه‌بندی توزیع مکانی آن در شمال شرق استان گلستان انجام شد. در این پژوهش، با در نظر گرفتن ۱۴ عامل مهم و با استفاده از مدل‌های جنگل تصادفی، شبکه عصبی مصنوعی و درخت رگرسیون و طبقه‌بندی، نقشه حساسیت وقوع فرسایش خندقی تهیه شد. با توجه به این‌که شناسایی مناطق دارای حساسیت فرسایش خندقی مبتنی بر روش‌های سنتی و نظرات کارشناسی از دقت قابل قبولی برخوردار نیست، استفاده از روش‌های نوین یادگیری ماشینی امری ضروری است. نتایج نشان داد که عوامل فاصله از جاده و کاربری اراضی از مهمترین عوامل تاثیرگذار بر حساسیت فرسایش خندقی هستند که مدیریت کاربری اراضی توسط انسان را می‌طلبد.

منحنی ROC رسم شده نشان داد که دقت مدل‌ها در برآورد مناطق دارای حساسیت فرسایش خندقی در مرحله آزمون، عالی (ANN) و در مرحله آزمون و اعتبارسنجی خیلی خوب (RF و CART) بوده است که به معنای عملکرد عالی مدل‌ها است. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت که مدل‌های به‌کار رفته در این پژوهش توانایی بالایی در تعیین مناطق دارای حساسیت فرسایش خندقی دارند و با توجه به سرعت و دقت بالای مدل‌ها پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات مشابه به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه با هدف کاهش خسارات فرسایش خندقی و مدیریت اراضی مورد استفاده قرار بگیرند. نتایج این تحقیق در تصمیم‌گیری و آمایش سرزمین شمال شرق استان گلستان و همچنین، برنامه‌ریزی کاربری اراضی قابل استفاده خواهد بود و نقش به‌سزایی در پیشگیری و کاهش خسارات ناشی از وقوع فرسایش خندقی خواهد داشت.

منابع مورد استفاده

- Arabameri, A., A. Cerda and J. Tiefenbacher. 2019a. Spatial pattern analysis and prediction of gully erosion using novel hybrid model of entropy-weight of evidence. *Water*, 11(6): 1129.
- Arabameri, A., B. Pradhan and L. Lombardo. 2019b. Comparative assessment using boosted regression trees, binary logistic regression, frequency ratio and numerical risk factor for gully erosion susceptibility modelling. *Catena*, 183: 104223.
- Arabameri, A., B. Pradhan and D. Tien Bui. 2020. Spatial modelling of gully erosion in the Ardib River Watershed using three statistical-based techniques. *Catena*, 190: 104545.
- Arabameri, A., K. Rezaei and M. Yamani. 2018. Analysis of geo-environmental parameters and gully erosion susceptibility mapping in Toroud Watershed using data-driven EBF method. *Journal of Range and Watershed Management*, 71(1): 97-114 (in Persian).
- Arulbalaji, P., D. Padmalal and K. Sreelash. 2019. GIS and AHP techniques based delineation of groundwater potential zones, a case study from Southern Western Ghats, India. *Scientific Reports*, 9: 2082.
- Azareh, A., O. Rahmati, E. Rafiei, J. Sankey, S. Lee, H. Shahabi and B. Ahmad. 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.
- Conoscenti, C., V. Agnesi, M. Cama, N.A. Caraballo-Arias and E. Rotigliano. 2018. Assessment of gully erosion susceptibility using multivariate adaptive regression splines and accounting for terrain connectivity. *Land Degradation and Development*, 29: 724-736.
- Elith, J., S.J. Phillips, T. Hastie, M. Dudík, Y.E. Chee and C.J. Yates. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Divers Distribution*, 17(1): 43-57.
- Flanagan, D.C. and M.A. Nearing. 1995. USDA-water erosion prediction project: hill slope profile and watershed model documentation. NSERL Report 10. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana, 40 pages.
- Gornami, R. and S. Shadfar. 2019. Application of the GIS in the determination of susceptible areas to gully erosion using the ANP. *Watershed Management Research*, 31(4): 58-68 (in Persian).
- Karimi, E. and M. Ownegh. 2016. 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).

- Kariminejad, N., M. Hosseinalizadeh, H. Pourghasemi, A. Bernatek, G. Campetella and M. Ownegh. 2019. Evaluation of factors affecting gully headcut location using summary statistics and the maximum entropy model: Golestan Province, NE Iran. *Science of the Total Environment*, 677: 281–298.
- Knisel, W.G. 1980. CREAMS: a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. US Department of Agriculture, Conservation research report (USA), 26: 474–485.
- Kornejady, A., M. Ownegh and A. Bahremand. 2017. Landslide susceptibility assessment using maximum entropy model with two different data sampling methods. *Catena*, 152: 144-162.
- Meliho, M., A. Khattabi and N. Mhammdi. 2018. A GIS-based approach for gully erosion susceptibility modelling using bivariate statistics methods in the Ourika Watershed, Morocco. *Environment Earth Science*, 77(18): 655.
- Phillips, S.J., R.P. Anderson and R.E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modeling*, 190: 231–259.
- Poesen, J., G. Nachtergaele, C. Verstraten and C. Valentine. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, 50(2–4): 91–133.
- Rahmati, O., A. Haghizadeh, H.R. Pourghasemi and F. Noormohammadi. 2016. Gully erosion susceptibility mapping: the role of GIS-based bivariate statistical models and their comparison. *Natural Hazards*, 82: 1231-1258.
- Rahmati, O., A. Kornejady, M. Samadi, A.D. Nobre and A.M. Melesse. 2018. Development of an automated GIS tool for reproducing the HAND terrain model. *Environmental Modelling and Software*, 102: 1-12.
- Rahmati, O., N. Tahmasebipour, A. Haghizadeh, H.R. Pourghasemi and B. Feizizadeh. 2017a. 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., N. Tahmasebipour, A. Haghizadeh, H.R. Pourghasemi and B. Feizizadeh. 2017b. Evaluation of different machine learning models for predicting and mapping the susceptibility of gully erosion. *Geomorphology*, 298: 118-137.
- Saber Chenari, K., A. Bahremand, V. Sheikh and B. Komaki. 2016. Gully erosion hazard zoning using of Dempster-Shafer Theory in the Gharnaveh Watershed, Golestan Province. *Eco-Hydrology Journal*, 3(2): 219-231 (in Persian).
- Samani, A.N., R.J. Wasson, M.R. Rahdari and A. Moeini. 2016. Quantifying eroding head cut detachment through flume experiments and hydraulic thresholds analysis. *Environmental Earth Sciences*, 75(21): 1424-1443.
- Sanaei, S., A. Pashayi, S. Ayubi and M. Ekhtesasi. 2005. Sedimentological survey of loess areas of Qopan and Naharkhoran valley from morphometric perspective. *Proceedings of Third Erosion and Sediment National Conference*. Soil Conservation and Watershed Management Institute, Tehran, Iran (in Persian).
- Shadfar, S. 2010. An introduction to gully erosion. Entekhab Publications, 141 pages (in Persian).
- Shadfar, S. 2016. Identifying the gully erosion potential by using Artificial Neural Network (ANN), case study: Troud Watershed. *Watershed Engineering and Management*, 8(3): 256-263 (in Persian).
- Tien Bui, D., A. Shirzadi, H. Shahabi, K. Chapi, E. Omidvar, B. Thai Pham, D. Talebpour, H. Khaledian, B. Pradhan, M. Panahi, B. Ahmad, H. Rahmani, G. Grof and S. Lee. 2019. A novel ensemble artificial intelligence approach for gully erosion mapping in a semi-arid watershed (Iran). *Sensors*, 19: 2444.
- Valentin, C., J. Poesen and L. Yong. 2005. Gully erosion: impacts, factors and control. *Catena*, 63: 132–153.
- Viero, A.C., C. Dos, M.R. Nilza, J.A. Goldenfum, A. Joel and A. Risso. 2005. Natural and anthropogenic factors controlling gully erosion in the basaltic upland of southern Brazil. *International Journal of Sediment Research*, 20(3): 211-223.
- Wang, L., S. Wei, R. Horton and M.A. Shao. 2011. Effects of vegetation and slope aspect on water budget in the hill and gully region of the Loess Plateau of China. *Catena*, 87: 90–100.
- Yamani, S., M. Zamanzadeh and M. Ahmadi. 2013. Analysis of factors affecting the formation and development of gully erosion: a case study of Kahoor Plain in Fars Province. *Geographical Exploration Desert*, 1: 53-84 (in Persian).
- Zheng, F. 2006. Effect of vegetation changes on soil erosion on the Loess Plateau. *Pedosphere*, 16(4): 420–42.