



## Assessing gully erosion susceptibility and Identifying its Important Factors in the Khasuyeh Watershed in Fars Province

Reza Zakerinejad<sup>1</sup> , Abbas Kahrani<sup>2</sup> 

1. Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Geographical and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran. E-mail: [r.zakerinejad@geo.ui.ac.ir](mailto:r.zakerinejad@geo.ui.ac.ir)
2. M.Sc. in Remote Sensing and Geographic Information Systems, Department of Physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran. E-mail: [akahrani@yahoo.com](mailto:akahrani@yahoo.com)

### Article Info

### ABSTRACT

#### Article type:

Research Article

#### Article history:

Received: 27 December 2024

Revised: 4 October 2025

Accepted: 8 October 2025

Published: 15 March 2026

#### Keywords:

Gully erosion,  
data mining,  
TreeNet model,  
R-software.

Water erosion has affected about 99 billion ha of land in the world and is considered as one of the most widespread soil threatening factors in terms of quantity and quality. The aim of this research is to identify the factors affecting the occurrence of gully erosion, assessment and mapping the probability of the Khasyoueh watershed in Fars province using TreeNet models. In this research, first, the location of existing gullies were recorded using satellite images, Google Earth images (GE), and Global Positioning System (GPS), and then the influencing variables, including topographical indicators (elevation, slope, slope direction, slope length, stream power index, flow depth, topographic wetness index and longitudinal curvature), from the digital elevation model (TanDEM) with a spatial resolution of 12 meters in ArcGIS10.8 and SAGA-GIS software have been extracted and prepared. Other indicators related to vegetation density (NDVI) and land use were prepared using data from satellites data in GIS software. After assigning the values related to the independent indicators to the points taken from the gullies, modeling was done for predicting the areas prone to gully erosion. The TreeNet model has been applied for the prediction of gully erosion. In the modeling process, 70% of the data are considered as training data and 30% of the data are considered as test data. The AUC index for validation of the TreeNet model was recorded as 0.776 for the training data and 0.756 for the test data, which indicates the high accuracy of the model to prediction of susceptible area into gully erosion in the Khasyoueh watershed.

**Cite this article:** Zakerinejad, R., & Kahrani, A. (2026). Assessing gully erosion susceptibility and Identifying its Important Factors in the Khasuyeh Watershed in Fars Province. *Journal of Geography and Planning*, 30(95), 223-242. <http://doi.org/10.22034/gp.2025.65173.3342>



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.22034/gp.2025.65173.3342>

Publisher: University of Tabriz.

## Introduction

Soil erosion is a physical process and one of the most dangerous mechanisms of land surface rupture that reduces fertility and damages agricultural lands (Oldman, 1994). The gradual loss of soil in the form of erosion affects the environment, the quality of nature and the natural cycle, and has harmful consequences. During the process of erosion and destruction, the soil is depleted of mineral and organic materials and its ability to grow gradually decreases. Water erosion is divided into four groups according to the importance and the way it is formed, including rill, sheet, gully and badland (Zakerinejad & et al., 2021), which are caused by human intervention through deforestation, overgrazing and agricultural operations beyond the power of the earth take on an intensified state (Abdollahi, 2016). Due to the morphological and topographical conditions, the Khasuyeh watershed in Fars province in southwest of Iran is one of the areas that need to be investigated and measures taken for it. The main goal of this research is to prepare a sensitivity map of water erosion using monthly data and TreeNet model, in order to evaluate the ability of these models and examine the impact of each of the effective factors in this type of erosion in forecasting. At the end of this research, suitable solutions to prevent watershed erosion are provided.

## Materials and Methods

In the present study, topography and its related indices were calculated from the digital model data of Tan DEM-X with a spatial resolution of 12 meters in ArcMap and SAGA software. In the following, by using 16 independent influencing variables in this research, land use variables, geology and soil type were qualitative variables. In the first step, land use indicators, vegetation density should be obtained using satellite data, and soil texture should also be investigated using field surveys.

## Results and Discussion

In this research, as stated in the previous parts of the article, to prepare a map of the risk of water erosion in the Khasouye watershed by applying the TreeNet model and using 16 independent variables that are on event of gully erosion, including; Landuse-landcover (LULC), soil erodibility, geology, soil type, distance from river, distance from stream, stream depth, NDVI, slope, aspect, topography wetness index (TWI), elevation, rainfall, stream power index (SPI), slope length and longitudinal curvature. The presence of the dependent variable or gullies event were recorded during the field visit and using the Global Positioning System (GPS) as well as the identified and mapped points in the Google Earth (GE) software environment. The order of the variables of height, rainfall, distance from the streams, land use, and the depth of the river with an importance value above 50% are the most important, and the variables of slope direction, profile curvature, topographic and geological humidity, respectively, have the least importance.

## Conclusion

Gully erosion is one of the common geomorphological problems in arid and semi-arid regions. Therefore, it is necessary to develop methods to predict it with simple but very accurate models. In this research, the spatial prediction of gully erosion in the Khasuyeh watershed in Fars province in southwest of Iran, was done using the TreeNet model as well as additional environmental variables. Validation of the that model shows that the model prediction is outstanding. In general, the results of this study indicate that topographical indicators as well as human factors (land use, road construction) play a significant role in the occurrence of gully erosion in our study area. The most influential indicators in the formation of gully erosion in the studied area are: height, distance from river, land use and depth of stream. The lack of suitable vegetation, the height and the low slope of the central points have caused water erosion in this area. This research contributes to advancing scientific knowledge in the field of gully erosion and the application of data mining models in natural resource management, and it can provide a foundation for future studies in this area.

**Keywords:** Gully erosion, data mining, TreeNet model, R-software.



## ارزیابی حساسیت فرسایش آب‌کندی و شناسایی عوامل موثر آن در حوضه آبخیز خسویه در استان فارس

رضا ذاکری‌نژاد<sup>۱</sup>، عباس کهرانی<sup>۲</sup>

۱. نویسنده مسئول، استادیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: [r.zakerinejad@geo.ui.ac.ir](mailto:r.zakerinejad@geo.ui.ac.ir)
۲. کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: [akahrani@yahoo.com](mailto:akahrani@yahoo.com)

### چکیده

### اطلاعات مقاله

فرسایش آب‌کندی (خندقی) یکی از عوامل اصلی بیابان‌زایی و تخریب سرزمین در بسیاری از مناطق خشک و نیمه خشک می‌باشد. هدف این پژوهش تهیه نقشه حساسیت فرسایش آب‌کندی و شناسایی عوامل موثر آن در حوضه آبخیز خسویه در استان فارس با استفاده از مدل‌های TreeNet است. در این پژوهش ابتدا موقعیت آب‌کندهای موجود با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، نرم‌افزار گوگل ارث و سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS) ثبت گردید. در ادامه متغیرهای تاثیر گذار در وقوع این نوع فرسایش خاک در حوضه مورد مطالعه که شامل شاخص‌های مربوط به توپوگرافی مستخرج از مدل رقمی ارتفاع (Tan DEM-X) با دقت مکانی ۱۲ متر، و سایر شاخص شامل: تراکم پوشش گیاهی (NDVI)، کاربری اراضی، فاصله از راه‌ها، فاصله از آبراهه، زمین‌شناسی، میزان بارش، نوع خاک و شاخص فرسایش پذیری خاک (K) تهیه گردیدند. سپس بعد از تهیه تمامی لایه‌های ورودی، با استفاده از نرم‌افزار SPM مدل مربوطه اجرا گردید. در فرایند مدل سازی ۷۰٪ داده‌ها را به عنوان داده‌های آموزش (Training) و ۳۰٪ داده‌ها را به عنوان داده‌های آزمون (Testing) در نظر گرفته‌اند. مقدار دقت شاخص ارزیابی AUC برای مدل TreeNet برابر ۰/۷۷ و ۰/۷۵ به ترتیب برای داده‌های آموزشی و آزمون می‌باشد، که بیانگر دقت بالای مدل مربوطه می‌باشد. میزان اهمیت نسبی متغیرهای شرکت کننده در فرآیند مدل‌سازی به ترتیب، متغیرهای ارتفاع، کاربری اراضی، فرسایش پذیری خاک، عمق آبراهه و فاصله از آبراهه دارای بیشترین اهمیت می‌باشند. نقشه نهایی حساسیت فرسایش آب‌کندی در حوضه مورد مطالعه نشان می‌دهد، نواحی کم شیب و کم ارتفاع در مرکز حوضه دارای بیشترین کلاس خطر بوده در حالی که نواحی مرتفع حوضه در نواحی مرزی منطقه مورد مطالعه در کلاس خطر کم قرار دارند. لذا با توجه به وضعیت شدید فرسایش آب‌کندی در این منطقه انجام عملیات بیولوژیکی و آبخیزداری جهت کنترل اشکال فرسایش خصوصا فرسایش آب‌کندی جهت حفاظت آب و خاک ضروری می‌باشد.

نوع مقاله:  
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۷  
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۲  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۶  
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۲۴

کلیدواژه‌ها:  
فرسایش آب‌کندی،  
داده کاوی،  
برنامه نویسی R،  
مدل TreeNet.

**استناد:** ذاکری‌نژاد، رضا و کهرانی، عباس (۱۴۰۵). ارزیابی حساسیت فرسایش آب‌کندی و شناسایی عوامل موثر آن در حوضه آبخیز خسویه در استان فارس. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۳۰ (۹۵)، ۲۲۳-۲۴۲.

<http://doi.org/10.22034/gp.2025.65173.3342>



© نویسنده‌گان.

ناشر: دانشگاه تبریز.

## مقدمه

فرسایش خاک فرایندی فیزیکی و یکی از خطرناک‌ترین ساز و کارهای گسیختگی سطح زمین است که باعث کاهش حاصل‌خیزی و آسیب به زمین‌های کشاورزی می‌شود (اولدمن<sup>۱</sup>، ۱۹۹۴). از بین رفتن تدریجی خاک به صورت فرسایش بر محیط زیست، کیفیت طبیعت و چرخه طبیعی اثر می‌گذارد و پیامدهای زیان باری را به دنبال دارد. خاک طی فرایند فرسایش و تخریب، از مواد معدنی و آلی تهی می‌شود و کم‌کم استعداد رویش در آن کاهش می‌یابد (رفاهی، ۱۳۹۳؛ استاکینگ و مورناکان<sup>۲</sup>، ۲۰۰۱). فرسایش آبی با توجه به اهمیت و نحوی شکل‌گیری به چهار گروه شامل فرسایش پاشمانی، آبراه‌ای، شیاری و آبکندی (خندقی) تقسیم می‌شود (عرب عامری و همکاران، ۱۳۹۷؛ ذاکری‌نژاد و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۲۱)، که این فرایندها بر اثر دخالت انسان از طریق جنگل تراشی، چرای بیش از حد و عملیات زراعی خارج از پتانسیل اراضی، حالت تشدید می‌گیرد (عبداللهی، ۱۳۹۶). فرسایش آبکندی (گالی زایی) به عنوان یکی از انواع فرسایش آبی، از پدیده‌های معمول در آب و هوای خشک و نیمه خشک است و مناطق وسیعی با شرایط مورفولوژیکی و آب و هوایی متفاوت را تحت تاثیر قرار می‌دهد (غلامی و همکاران، ۱۳۹۶). این نوع فرسایش به دلیل تولید رسوب و از دست رفتن خاک و همچنین خسارات فراوان به اراضی، راه‌ها و سازه‌های عمرانی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (نیک پور و همکاران، ۱۳۹۵). از این رو برای جلوگیری از رشد سریع آبکندها یا به حداقل رساندن خسارت ناشی از آنها، شناخت مورفولوژی و نحوه شکل‌گیری آن و دلایل رشد آن بسیار حیاتی است (ابوطیب<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۲۳؛ ذاکری‌نژاد و همکاران، ۲۰۲۱؛ عرب امیری<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۹). در واقع با پهنه‌بندی و شناسایی مناطق مستعد فرسایش و شناسایی عوامل موثر بر آن می‌توان خطر وقوع این نوع فرسایش خاک را کاهش داد (طهماسبی‌پور و همکاران، ۱۳۹۴).

## مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر مطالعات فراوانی در زمینه پهنه‌بندی، حساسیت و یا پیش‌بینی خطر فرسایش آبکندی صورت گرفته است (مولاناً و همکاران، ۲۰۲۵؛ چنروی<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۲۵؛ ابوطیب و همکاران، ۲۰۲۳؛ ذاکری‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۵؛ جاویدان و همکاران، ۱۴۰۲). یکی از عوامل اصلی در مدل‌های پیش‌بینی فرسایش آبکندی انتخاب شاخص‌های مهم تاثیرگذار، دقت و مقیاس این لایه‌ها می‌باشند، که می‌تواند بر کیفیت و صحت نقش‌های خروجی تاثیر گذار باشد (چنروی، ۲۰۲۵؛ ذاکری‌نژاد<sup>۷</sup> و مرکز، ۲۰۱۴). بسیاری از تحقیقات سال‌های اخیر به ارزیابی و پهنه‌بندی حساسیت فرسایش آبکندی با استفاده از شاخص‌های محیطی از جمله پارامترهای توپوگرافی، اقلیمی، خاک، زمین‌شناسی، تکنونیک، هیدرولوژی، کاربری اراضی و پوشش گیاهی به عنوان متغیرهای تاثیرگذار و با استفاده از الگوریتم داده‌کاوی مانند مدل حداکثر آنتروپی (Maxent)، جنگل تصادفی (RF)، الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM)، نزدیکترین همسایگان (KNN)، تقویت گرادیان شدید (XGBoost)، تقویت سازگار (ADABOOST)، درخت تصمیم تقویت کننده گرادیان (GBDT)، درخت رگرسیون تقویت شده (BRT)، رگرسیون لجستیک (LR) و CART پرداخته شده است (جیانجون لی<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۲۴؛ هاک<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۲۴؛ محب‌زاده<sup>۱۰</sup> و همکاران، ۲۰۲۴؛

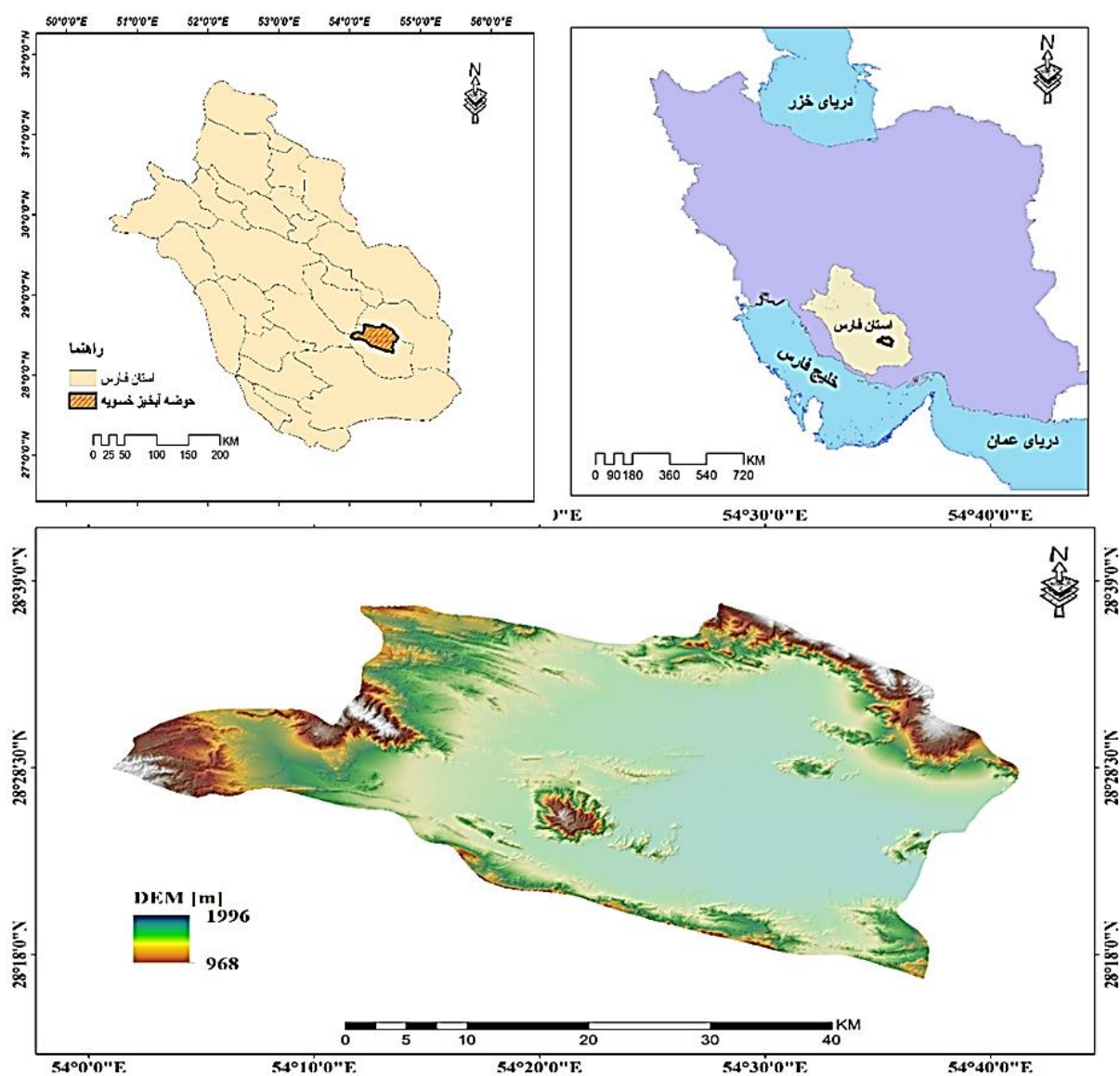
1. Oldeman
2. tocking & Murnaghan
3. Zakerinejad
4. Aboutaib
5. Arabameri
6. Maulana
7. Chenrui
8. Zakerinejad & Maerker
9. Jianjun Li
10. Haque
11. Mohebzadeh

فینزی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۴؛ هیتوری<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۲۴؛ بامبو<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۲۴؛ شیمینت<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۲۴؛ ذاکری نژاد و همکاران، ۲۰۱۸؛ اسوری<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۲). در بعضی از پژوهش‌ها به عملکرد بالای مدل‌های مکسنت و مدل TreeNet همچنین اهمیت بالای شاخص‌های توپوگرافی در تهیه نقشه حساسیت فرسایش آبکندی اشاره شده است (بامبو<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۲۴؛ حسنامن<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۲۴؛ لانا<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۲۲؛ ذاکری نژاد و همکاران، ۲۰۲۱؛ ذاکری نژاد و مرکر، ۲۰۱۴؛ پوزن<sup>۹</sup>، ۲۰۰۳). اخیراً اهمیت تغییرات اقلیمی نیز در مدلسازی فرسایش آبکندی نیز به عنوان یکی از عوامل مهم حساسیت فرسایش اشاره شده است (وئوقی و همکاران، ۱۴۰۳). هر چند با توجه به شرایط توپوگرافی و اقلیمی ایران مناطق زیادی تحت تاثیر فرسایش آبکندی هستند، ولی نواحی دارای اقلیم خشک و نیمه خشک با پوشش گیاهی ضعیف دارای پتانسیل بالاتری از جهت این نوع هدر رفت خاک می‌باشند. در استان فارس نیز این نوع از فرسایش خاک به عنوان یکی از تیپ‌های غالب فرسایشی قلمداد می‌شود (مسعودی و ذاکری نژاد<sup>۱۰</sup>، ۲۰۱۱؛ ذاکری نژاد و مسعودی، ۲۰۱۹). منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، حوضه آبخیز خسویه در جنوب شرقی استان فارس بوده که به دلیل شرایط فیزیوگرافی، اقلیمی و پوشش گیاهی ضعیف تحت تاثیر فرسایش شدید آبکندی می‌باشد، به طوری که موجب خسارات زیادی در اراضی کشاورزی و مرتعی در سال‌های اخیر شده است (ذاکری نژاد و الوندی، ۱۴۰۱). لذا با توجه به وضعیت شدید تخریب اراضی و بیابان‌زایی که بیشتر تحت تاثیر عامل فرسایش خاک در این حوضه می‌باشد، ضرورت تهیه نقشه حساسیت فرسایش آبکندی جهت برنامه ریزی حفاظت آب و خاک در این منطقه از اولویت‌های اساسی محسوب می‌گردد. از نوآوری‌های این پژوهش می‌توان استفاده از الگوریتم داده‌کاوی، داده‌های سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) خصوصاً استفاده از داده‌های رقومی ارتفاعی Tan DEM-X که به ندرت استفاده شده است. ارائه یک نقشه حساسیت فرسایش آبکندی با داده‌های در دسترس و هزینه پایین، از دیگر جنبه‌های مهم این پژوهش بوده که مورد نیاز برنامه‌ریزان منطقه‌ای و ملی حوضه مورد مطالعه می‌باشد.

### منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز خسویه، با وسعتی برابر با ۱۳۶۶۲۲ هکتار در فاصله ۳۳۷ کیلومتری شهر شیراز در استان فارس قرار دارد. از نظر جغرافیایی این حوضه بین طول‌های ۵۴ درجه و ۹ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۴۲ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۸ درجه و ۱۸ دقیقه تا ۲۸ درجه و ۳۹ دقیقه شمالی، نوار شمالی شهرستان زرین دشت را به خود اختصاص داده است. این منطقه دارای آب و هوای خشک بوده و از لحاظ ارتفاع از سطح مبنای ارتفاعات، متوسط ارتفاع دشت خسویه برابر ۱۰۰۰ متر و در مناطق کوهستانی برابر ۱۹۰۰ متر می‌باشد (شکل ۱). سازند های موجود در منطقه مورد مطالعه مربوط به دوره‌های پرکامبرین تا کوارترنر می‌باشد. رسوبات کوارترنری بیشتر در نواحی مرکزی حوضه که دارای اشکال شدید فرسایش آبی هستند، واقع شده‌اند (ذاکری نژاد، ۱۴۰۲). این حوضه به علت دارا بودن شرایط آب و هوایی خشک و نیمه خشک در بیشتر نواحی دارای پوشش گیاهی ضعیف می‌باشد که رخنمون‌های سنگی در بسیاری از مناطق به خوبی قابل رویت می‌باشند. ایستگاه هواشناسی واقع در دهستان خسویه مقدار بارش ۳۶۲/۲ میلی‌متر را برای بازه زمانی ۱۳۵۰-۱۳۸۹ ثبت کرده است که بیشترین میزان بارش مربوط به سال ۵۴-۵۵ به مقدار ۳۹۷ میلی‌متر و کمترین میزان بارش سالانه مربوط به سال ۷۸-۷۹ به مقدار ۶۳/۵ میلی‌متر بوده است (الوندی، ۱۴۰۰). با توجه به تصاویر ماهواره‌ای، عکس‌های هوایی و بازدیدهای زمینی، این حوضه دارای اشکال شدید فرسایش آبی از جمله فرسایش شیاری، ورقه‌ای و آبکندی بوده که بیشتر در نواحی کم شیب و مرکزی حوضه مورد مطالعه می‌باشند (شکل ۲).

1. Phinzi
2. Hitouri
3. Bammou
4. Shiminet
5. Svoray
6. Bammou
7. Hasanuzzaman
8. Lana
9. Poesen
10. Masoudi & Zakerinejad



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز خسویه در استان فارس

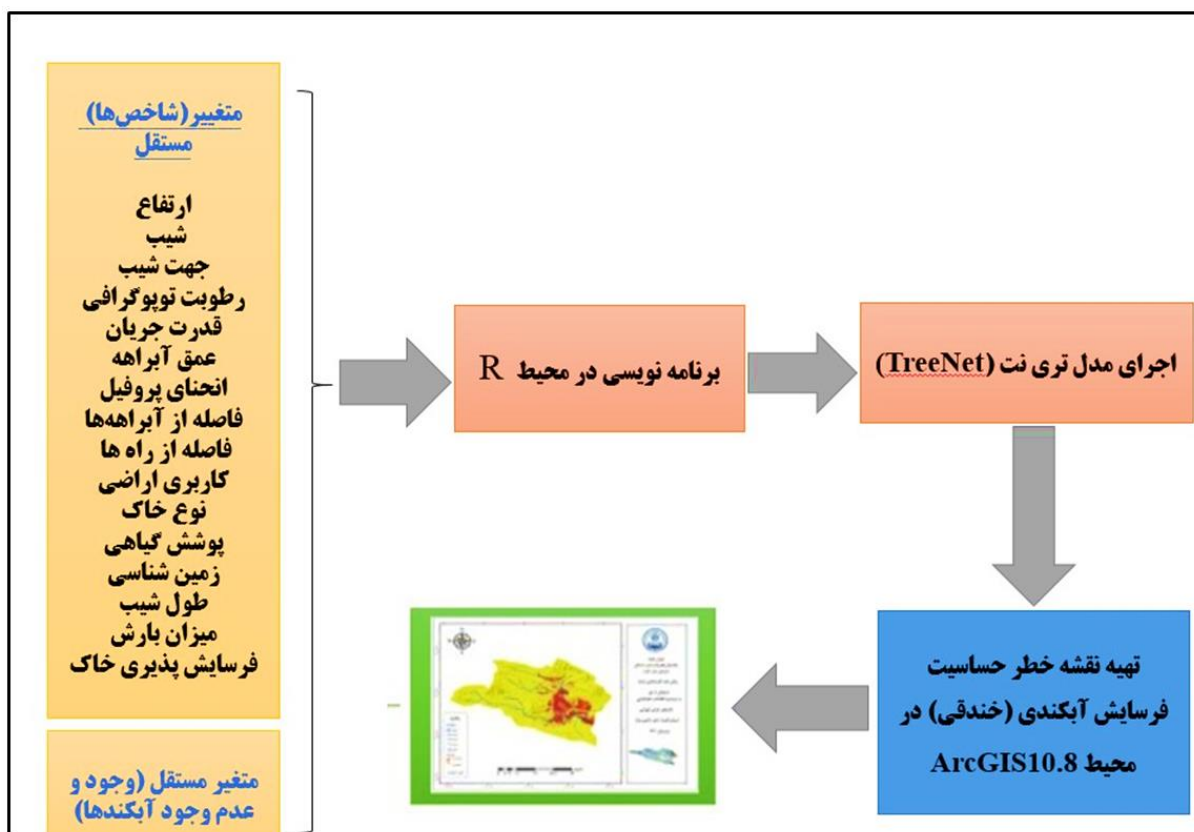


شکل ۲. اشکال فرسایش آبکندی حاشیه رودخانه فصلی خسویه (تصویر راست) و حاشیه جاده مسر حاجی آباد به حاجی طاهر (سمت چپ)

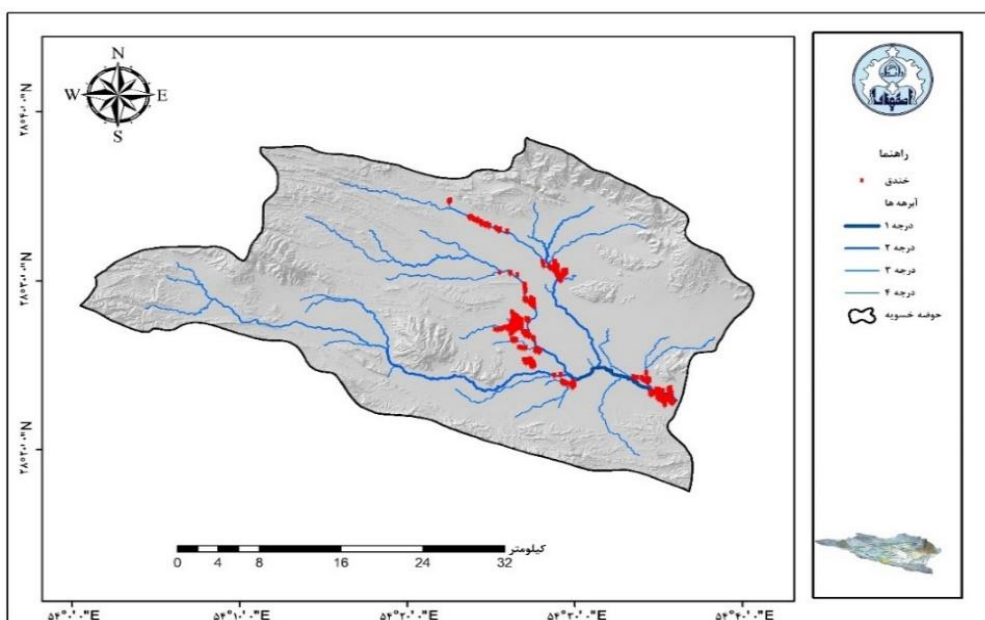
## روش پژوهش

در این پژوهش حساسیت فرسایش آبکندی در حوضه آبخیز خسویه و به منظور پیش‌بینی حساسیت فرسایش آبکندی از روش‌های یادگیری ماشین کمک گرفته شده است. در گام نخست نقشه پراکنش نقاط آبکندی تهیه شده که برای تهیه این نقشه‌ها از روش‌ها و ابزار مختلفی شامل تصاویر ماهواره‌ای (سنجنده لندست ۸ سال ۲۰۲۲)، عکس‌های هوایی (مقیاس ۱:۲۰۰۰۰) و بازدیدهای میدانی کمک گرفته شد. در واقع نقاط فرسایش آبکندی به‌عنوان متغیر وابسته در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته و برای جمع‌آوری این نقاط، از برداشت میدانی و پیمایش زمینی استفاده شد. موقعیت دقیق آبکندها با استفاده از GPS دستی ثبت و سپس با استفاده از نرم‌افزار Google Earth بررسی و اصلاح گردید. در مجموع، تعداد ۵۰۰۰ نقطه فرسایش آبکندی (با دیجیت کردن پلیگون‌های آبکندها و تبدیل هر پلی گون به نقطه در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8)، بصورت تصادفی جمع‌آوری شد، که نمایانگر پراکنش مکانی این پدیده در منطقه است. همانطور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، بیشتر نقاطی که دچار این نوع فرسایش شده‌اند در محدوده مرکزی حوضه که دارای پوشش گیاهی ضعیفی می‌باشد دیده می‌شود. در ادامه با استفاده از ۱۶ متغیر مستقل تاثیرگذار در این پژوهش جهت دستیابی به نقشه پتانسیل فرسایش آبکندی حوضه آبخیز بعد از تهیه نقاط فرسایش آبکندی، لایه‌های شاخص‌های مورد مطالعه تهیه گردید (جدول ۱). انتخاب این شاخص‌ها بر اساس دسترسی به داده‌های موجود و اهمیت این شاخص‌ها بر اساس مطالعات پیشین می‌باشند (ذاکری نژاد و الوندی ۱۴۰۳؛ وثوقی و همکاران ۱۴۰۳). در گام بعدی ۷۰ درصد از نقاط نواحی آبکندهای مورد بررسی در پژوهش به صورت تصادفی انتخاب شده و به‌عنوان داده‌های آموزشی بکار گرفته می‌شود که ۳۰ درصد باقی‌مانده در قالب داده‌های اعتبارسنجی استفاده می‌گردد. در مرحله بعدی نقشه پراکنش نقاط آبکندی به عنوان متغیر وابسته و لایه‌های محیطی به عنوان متغیر مستقل مدلسازی می‌شود. در این تحقیق تمامی شاخص‌های توپوگرافی که شامل: ارتفاع، شیب، جهت شیب، طول شیب، انحنای طولی، عمق آبراهه، رطوبت توپوگرافی (TWI) و قدرت فرساینده‌گی آبراهه (SPI)، با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی سنجنده TanDEM-X با قدرت تفکیک مکانی ۱۲ متر در نرم‌افزار ArcMap و SAGA محاسبه شده‌اند (جدول ۱ و شکل ۵). شاخص نرمال‌شده تفاوت یا تراکم پوشش گیاهی (NDVI)<sup>۱</sup>، که بیانگر سبزی و تراکم پوشش گیاهی می‌باشد با استفاده از تصاویر ماهوره لندست ۸ تهیه گردید. مقدار عددی این شاخص بین ۱- و ۱+ بوده که مقادیر بالا بیانگر تراکم بیشتر پوشش گیاهی و کاهش فرسایش آبکندی می‌باشند و مقدار عددی حدود کمتر از ۰/۳ بیانگر پوشش گیاهی ضعیف یا اراضی آبی می‌باشند. شاخص بارش حوضه مورد مطالعه نیز از داده‌های نقطه‌ای بارش ایستگاه‌های مجاور حوضه (۱۳۵۰-۱۳۸۹) و با روش میان‌یابی کرژینگ<sup>۲</sup> در محیط نرم‌افزار Arcmap 10.8 تهیه گردید. لایه‌های نقشه زمین‌شناسی، نوع خاک (رده) نیز از داده‌های موجود سازمان زمین‌شناسی و جهاد کشاورزی تهیه گردید، که تمامی این لایه‌ها در محیط نرم‌افزار GIS تبدیل به فرمت رستری شدند. لایه‌های فاصله از آبراهه و جاده نیز در محیط نرم‌افزار Arcmap 10.8 و از دستور «فاصله»<sup>۳</sup> تهیه گردیدند. شاخص فرسایش پذیری خاک حوضه مورد مطالعه نیز با استفاده از داده‌های بافت خاک جمع‌آوری شده از منطقه (۴۸ نمونه) و با استفاده از رابطه رینارد<sup>۴</sup> و همکاران (۱۹۹۷) در محیط GIS و بصورت لایه رستری تهیه گردید. شکل ۵ نقشه تمامی شاخص‌های تهیه شده به عنوان متغیرهای محیطی به مدل را نشان می‌دهد.

1. Normalized Difference Vegetation Index
2. Kriging
3. Distance
4. Renard



شکل ۳. فلوجارت روش تحقیق



شکل ۴. نقشه موقعیت آبکندهای دیجیت شده در حوضه آبخیز خسویه

جهت تهیه نقشه حساسیت فرسایش آبکندی از مدل TreeNet که نام دیگر این موتور آنالیز Stochastic Gradient Boosting می‌باشد استفاده شد. این مدل با دقت استثنایی، سرعت بالا و قابلیت کنترل خطاها یا داده‌های ناقص یک روش برجسته و عالی برای داده‌کاوی بشمار می‌رود. این مدل از صدها یا هزاران درخت کوچک که معمولاً هر درخت ۶ گره نهایی

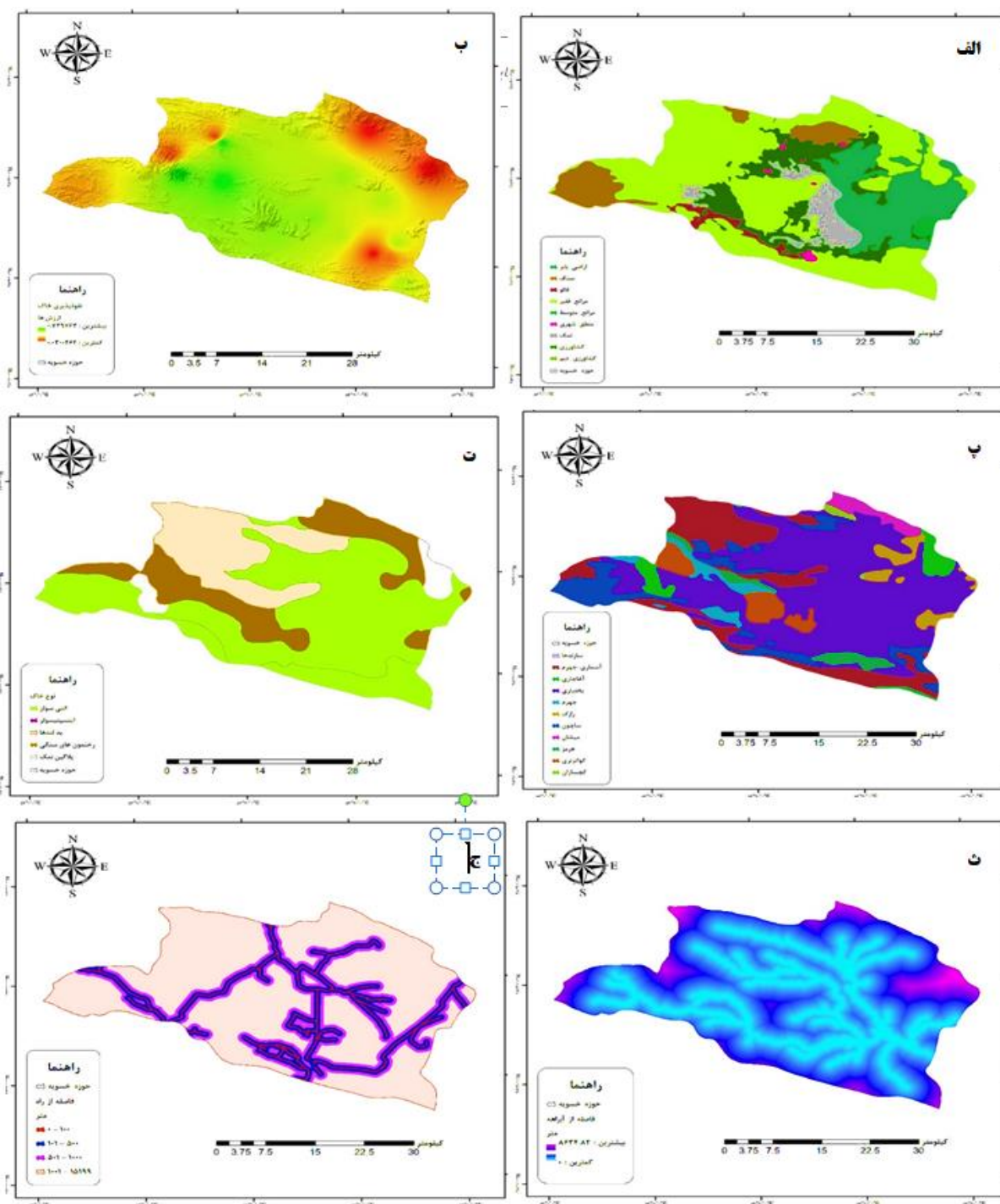
دارد ایجاد می‌شود. هر کدام از این درخت‌ها نقش کوچکی در بوجود آمدن درخت اصلی اعمال می‌کنند. این روش برای همه مسایل مدل سازی شامل رگرسیون، طبقه بندی مورد استفاده قرار می‌گیرد. درخت رگرسیون چندگانه جمع شدنی یک الگوریتم دارای تکرار است که بر اساس رابطه ۱ در هر تکرار  $m$ ، یک درخت رگرسیون مانند  $Tm(x; \{R_{jm}\}_{j=1, \dots, j})$  ساخته شده است (فریدمن<sup>۱</sup>، ۲۰۰۳).

$$Tm(x; \{R_{jm}\}_{j=1, \dots, j}) = \sum_{i=1}^j \bar{y}_{jm} I(X \in R_j) \quad (\text{رابطه ۱})$$

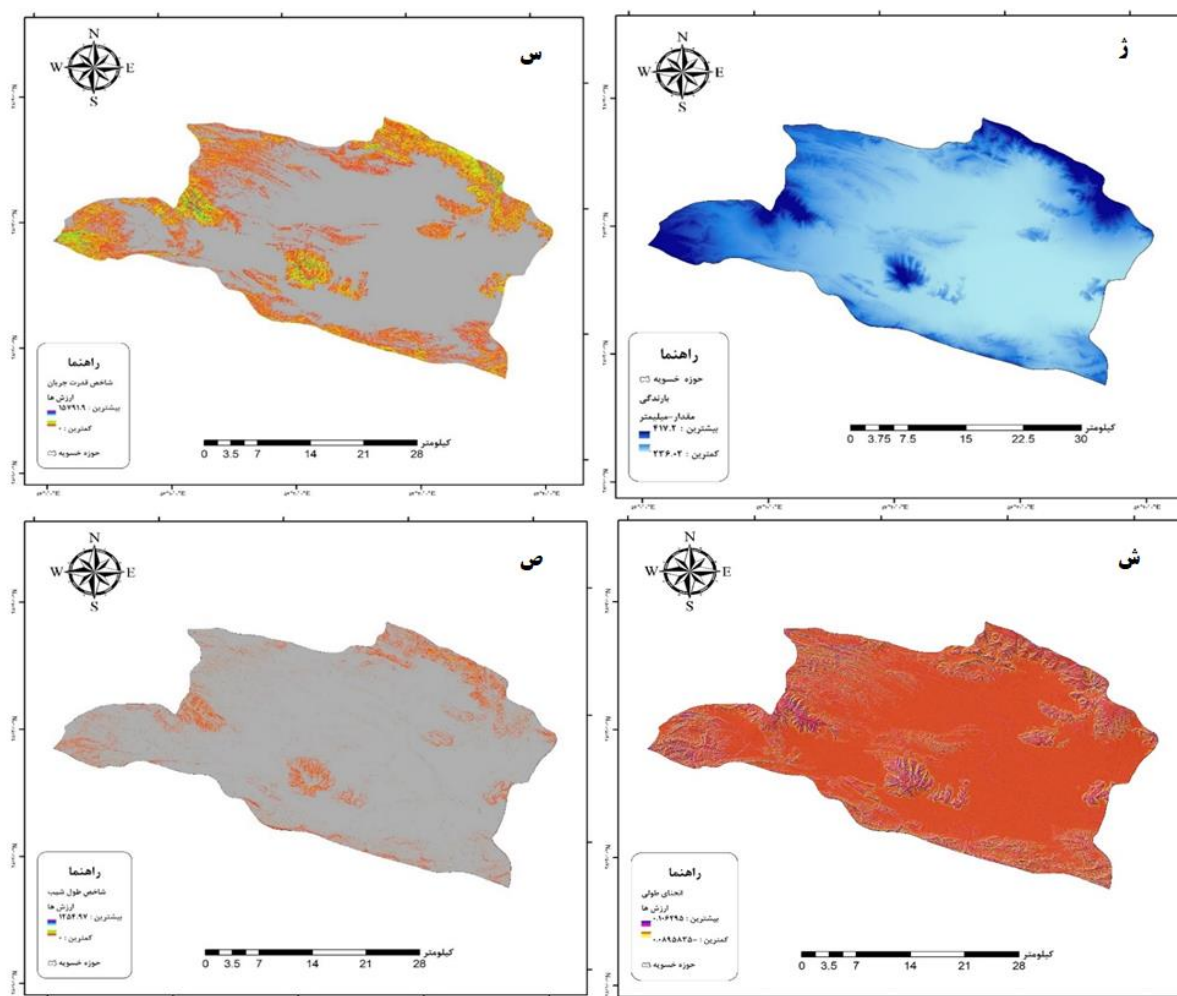
در این رابطه  $y_{jm}$  میانگین شبه پیش بینی در هر موقعیت  $R_{jm}$  در تکرار  $m$  امین است. این مدل از تکنیک بهینه‌سازی Boosting استفاده می‌کند.

جدول ۱. شاخص‌های مورد استفاده در این تحقیق

| ردیف | شاخص‌ها            | روش مورد استفاده             | ردیف | شاخص‌ها          | روش مورد استفاده   |
|------|--------------------|------------------------------|------|------------------|--|
| ۱    | ارتفاع             | تهیه شده در نرم‌افزار ArcGIS | ۹    | بارش             | آمار سازمان هواشناسی   |
| ۲    | شیب                | زوربرگن و تورن <sup>۲</sup>  | ۱۰   | شاخص NDVI        | تهیه شده در نرم‌افزار ArcGIS (۲۰۲۱)                          |
| ۳    | جهت شیب            | زوربرگن و تورن               | ۱۱   | فاصله از راه     | تهیه شده در نرم‌افزار ArcGIS                                 |
| ۴    | طول شیب            | زوربرگن و تورن               | ۱۲   | فاصله از آبراهه  | تهیه شده در نرم‌افزار ArcGIS                                 |
| ۵    | رطوبت توپوگرافی    | کنارد                        | ۱۳   | زمین‌شناسی       | نقشه سازمان زمین‌شناسی                                       |
| ۶    | انحنای طولی        | زوربرگن و تورن               | ۱۴   | کاربری اراضی     | ماهواره سنتینل ۲ مربوط به سال ۲۰۲۱                           |
| ۷    | قدرت فرسایش آبراهه | کنارد <sup>۳</sup>           | ۱۵   | رده خاک          | نقشه خاک شناسی جهاد کشاورزی                                  |
| ۸    | عمق آبراهه         | کنارد                        | ۱۶   | فرسایش پذیری خاک | بر اساس یافته‌های جمع‌آوری شده، تهیه شده در نرم‌افزار ArcGIS |







شکل ۵: نقشه لایه‌های مورد استفاده در تحقیق (به ترتیب شامل: کاربری اراضی (الف)، فرسایش پذیری خاک (ب)، زمین‌شناسی (پ)، نوع یا رده خاک (ت)، فاصله از آبراهه (ث)، فاصله از راه‌ها (ج)، عمق آبراهه (چ)، شاخص پوشش گیاهی (ح)، جهت شیب (خ)، رطوبت توپوگرافی (د)، ارتفاع (ر)، شیب (ز)، بارندگی (ز)، قدرت جریان (س)، انحنای طولی (ش) و طول شیب (ص).

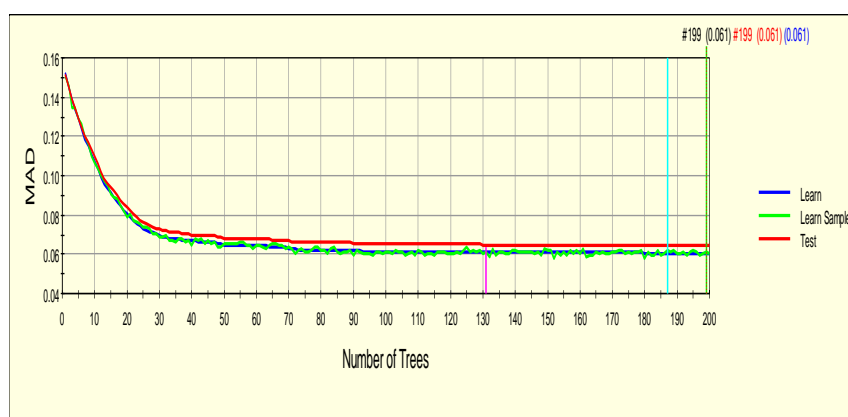
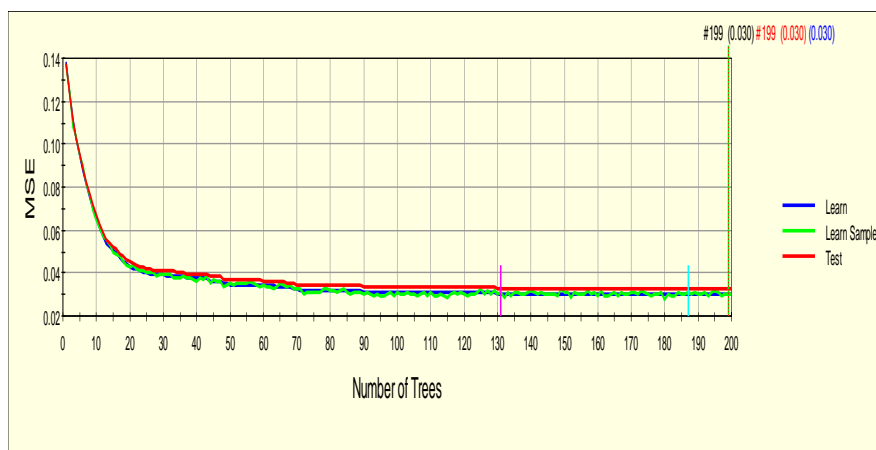
## نتایج و بحث

در این پژوهش به تهیه نقشه حساسیت فرسایش آبکندی در حوضه آبخیز خسویه با استفاده از مدل TreeNet و با استفاده از ۱۶ متغیر مستقل تاثیرگذار پرداخته شد. متغیرهای کاربری اراضی، زمین‌شناسی و خاک (رده و فرسایش پذیری) متغیرهای کیفی بوده‌اند که درگام نخست این متغیرها باید برای مدل مشخص گردد تا مدل، زمان پردازش داده‌ها با آنها به عنوان متغیر کیفی برخوردار کند. وجود متغیر وابسته یا هدف طی بازدید میدانی و با استفاده از موقعیت یاب جهانی (GPS) و همچنین نقاط شناسایی و ترسیم شده در محیط نرم‌افزار گوگل ارث ثبت گردید. در حالی که عدم وجود آبکندها با اجرای طرح نمونه‌برداری تصادفی نقطه‌ای در مناطق بدون آبکنده حوضه خسویه با استفاده از نرم‌افزار برنامه نویسی R تهیه گردید. با معرفی متغیر وابسته از میان ۱۶ متغیر شرکت‌کننده در فرآیند مدل‌سازی و همچنین مشخص کردن متغیرهای کیفی شامل (کاربری اراضی، نوع خاک و زمین‌شناسی) به نرم‌افزار، مدل TreeNet به عنوان موتور آنالیز جهت مشخص کردن نقاط مستعد فرسایش آبکندی استفاده گردید. در فرآیند اجرای مدل TreeNet ۳۰٪ داده‌ها به عنوان داده‌های آزمون (Testing) و ۷۰٪ داده‌ها به عنوان داده‌های آموزش (Learning) در نظر گرفته شد (جدول ۲).

جدول ۲. نمونه داده‌ها، آموزش و آزمون

|   | Sample Partition | N      | Pct    |
|---|------------------|--------|--------|
| ۱ | Learn            | ۲۱/۸۰۷ | ۷۰/۳۵% |
| ۲ | Test             | ۹/۱۹۱  | ۲۹/۶۵% |
| ۳ | Total            | ۳۰/۹۹۸ | ۱۰۰%   |

این مدل با ایجاد تعداد ۲۰۰ درخت تصمیم‌گیری و با مقایسه دقت درخت‌های ساخته شده، با استفاده از دو شاخص MAD و MSE درخت شماره ۱۹۹ را به عنوان درخت بهینه با دقت MAD ۰,۰۶۱ و MSE ۰,۰۳۰ را انتخاب کرده است (شکل‌های ۶ و ۷).

شکل ۶. فرایند ساخت درخت‌های تصمیم‌مدل *TreeNet* و دقت درخت بهینه بر اساس شاخص *MAD*شکل ۷. فرایند ساخت درخت‌های تصمیم‌مدل *TreeNet* و دقت درخت بهینه بر اساس شاخص *MSE*

### شاخص‌های ارزیابی دقت مدل (*TreeNet*)

ضریب تعیین یا R-squared معیاری برای سنجش عملکرد مدل‌های رگرسیونی است. در حقیقت ضریب تعیین عددی است که نسبت پراکندگی یا واریانس قابل پیش‌بینی برای متغیر یا متغیرهای مستقل را در متغیر وابسته نشان می‌دهد. مقادیر بالای ۰,۶۷ برای شاخص مربوط به  $R^2$  (ضریب همبستگی) نشان دهنده دقت بالای مدل مورد استفاده می‌باشد (Gao, 2023). این مقدار برای مدل *TreeNet* برابر ۰,۷۷۶ جهت داده‌ها آموزش و ۰,۷۵۶ برای داده‌ها آزمون به ثبت رسیده است، که بیانگر دقت بالای

مدل جهت شناسی و پهنه بندی نقاط مستعد فرسایش آبکندی در حوضه مورد مطالعه می‌باشد. مقدار شاخص (منحنی مشخصه عملکرد سامانه)  $ROC^1$  که برای کیفیت مدل‌ها کاربرد دارد، نیز به ترتیب برای داده‌های آموزشی و آزمایشی این مدل ۰/۹۷۴ و ۰/۹۶۹ به ترتیب می‌باشند که نشان‌دهنده دقت بالای این مدل در تهیه نقشه حساسیت خطر فرسایش آبکندی در حوضه آبخیز مورد مطالعه می‌باشد.

### اهمیت نسبی متغیرهای مستقل

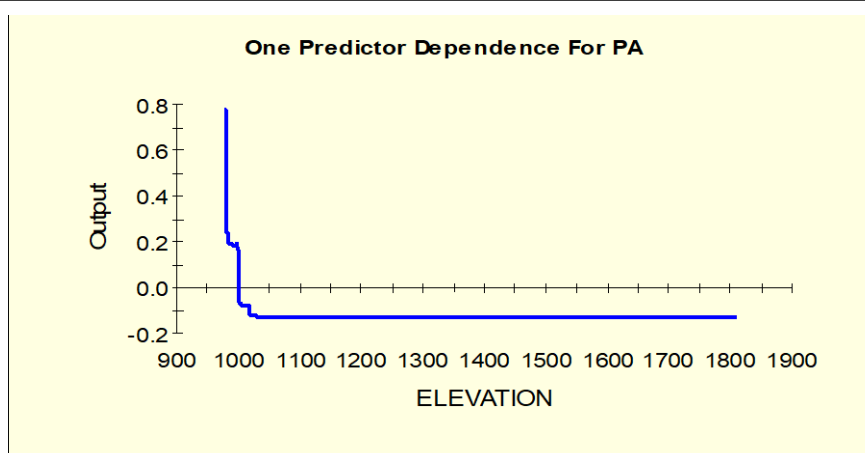
میزان اهمیت نسبی متغیرهای شرکت کننده در فرآیند مدلسازی، متغیرهای ارتفاع، کاربری اراضی، شاخص فرسایش خاک، عمق آبراهه، فاصله از آبراهه با مقدار اهمیت بالای ۵۰٪ دارای بیشترین اهمیت و به ترتیب متغیرهای جهت شیب، انحنای پروفیل، رطوبت توپوگرافی و زمین‌شناسی، از کمترین میزان اهمیت برخوردار بوده‌اند. که در ادامه به بررسی تنها شاخص‌های اثر گذار پرداخته می‌شود (جدول ۴).

جدول ۴. میزان اهمیت نسبی متغیرهای مستقل

| شاخص‌ها          | Score  |  | شاخص‌ها     | Score |  |
|------------------|--------|--|-------------|-------|--|
| ارتفاع           | 100/00 |  | NDVI        | 10/66 |  |
| کاربری اراضی     | 34/90  |  | رده خاک     | 8/86  |  |
| فرسایش پذیری خاک | 29/33  |  | شیب         | 7/98  |  |
| عمق آبراهه       | 23/99  |  | انحنای طولی | 5/68  |  |
| فاصله از آبراهه  | 20/89  |  | زمین‌شناسی  | 4/31  |  |
| طول شیب          | 16/52  |  | SPI         | 1/95  |  |
| فاصله از جاده    | 14/33  |  | TWI         | 1/42  |  |

### شاخص ارتفاع

ارتفاع نقش مهمی در فرسایش خندقی ایفا می‌کند، که اغلب با وقوع و شدت فرسایش همبستگی دارد. اثرات ترکیبی ارتفاعات بالاتر و شیب‌های تندتر، رواناب قوی‌تری ایجاد می‌کند که نیروهای فرسایشی بالایی را در نواحی پایین دست (مناطق پست‌تر) ایجاد می‌کند و به برش و گسترش خندق‌ها کمک می‌کند (Lu, et al., 2024; Zakerinejad, et al., 2018). شکل ۸ میزان تاثیر ارتفاع در فرایند تشکیل آبکندها را نشان می‌دهد. مطابق این نمودار ارتفاع و شکل‌گیری فرسایش آبکندی رابطه‌ی معکوسی وجود دارد، به طوری که با کاهش ارتفاع در حوضه آبخیز خسویه میزان شکل‌گیری آبکندها نیز افزایش پیدا می‌کند. بر اساس این نمودار مناطق با ارتفاع کمتر از ۱۰۰۰ متر که بیشتر در نواحی مرکزی حوضه آبخیز مورد مطالعه می‌باشند دارای حساسیت فرسایش آبکندی بیشتری نسبت به نواحی مرتفع که در نواحی شمالی و جنوبی حوضه واقع شده‌اند می‌باشد.



شکل ۸. تاثیر متغیر ارتفاع

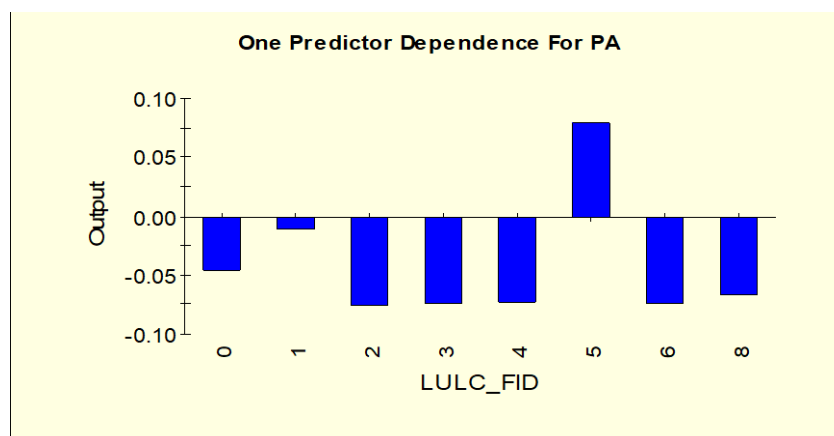
### شاخص کاربری اراضی

شکل ۹ میزان تاثیر متغیر کاربری اراضی را در فرایند تشکیل آبکند نشان می‌دهد. متغیر کاربری اراضی به عنوان یکی از سه متغیر کیفی شرکت کننده در مراحل مدلسازی بوده است. به دلیل اینکه ماتریس داده باید بر اساس اعداد سازماندهی شود. نقشه کاربری اراضی بر اساس ستون FID جدول ۵ توصیفی تبدیل به فرمت رستر گردید. برای اینکه کار این پژوهش با مشکل مواجه نشود، جدول ۳ کاربری اراضی حوضه آبخیز خسویه همراه با عدد FID مربوط به هر کاربری نشان می‌دهد.

جدول ۵. کاربری اراضی حوضه آبخیز خسویه همراه با FID مربوط به هر محدوده

| FID | کاربری اراضی |
|-----|--------------|
| ۰   | مناطق مسکونی |
| ۱   | کشاورزی آبی  |
| ۲   | مراعات متوسط |
| ۳   | مراعات فقیر  |
| ۴   | آیش          |
| ۵   | نمکزار       |
| ۶   | سنگ          |
| ۷   | کشاورزی دیم  |
| ۸   | اراضی بایر   |

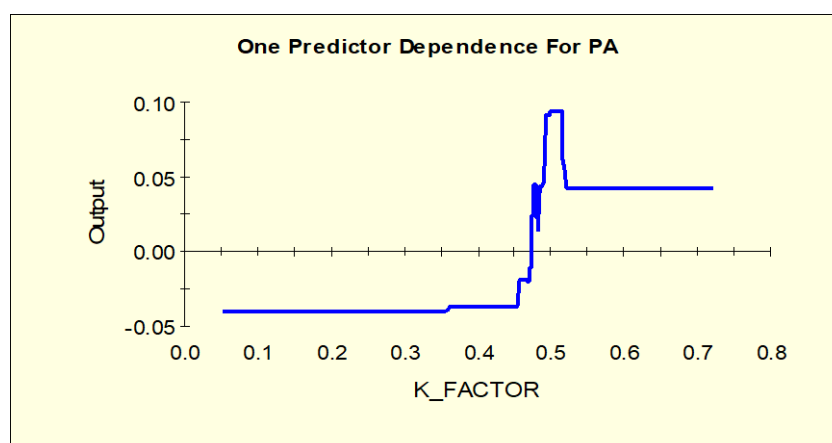
طبق شکل ۹ و جدول ۳ مناطق با مشخصه FID برابر ۵ دارای پوشش زمین‌های نمکی بیشتر در معرض گسترش آبکندها می‌باشند. در این محدوده به علت وجود نمک پدیده انحلال در خاک این منطقه بیشتر صورت گرفته و همین امر باعث فرسایش شدید آبی و تشکیل آبکند می‌گردد. پس از آن مناطق به مشخصه FID برابر با ۱ دارای کاربری کشاورزی آبی مستعد تشکیل آبکند می‌باشند. به علت مجاورت زمین‌های کشاورزی آبی با رودخانه فصلی خسویه، اختلاف ارتفاع سطح آنها با کف رودخانه و در نتیجه استفاده بیش از حد از این زمین‌ها، روان آبها در این مناطق به سمت کف رودخانه بیشتر جاری شده و باعث تشکیل آبکند در این مناطق می‌گردد.



شکل ۹. تاثیر متغیر کاربری اراضی

### شاخص فرسایش پذیری خاک

شکل ۱۰ نیز میزان تاثیر فاکتور K (فرسایش پذیری خاک) را در فرایند تشکیل آبکند نشان می‌دهد. بطور کلی این نمودار مناطق دارای فرسایش پذیری بالا را بیشتر مستعد تشکیل آبکند در حوضه مورد مطالعه نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار مقدار ارزش این شاخص بیشتر از ۰/۴ دارای احتمال رخداد بیشتر فرسایش آبکندی در این حوضه آبخیز می‌باشد. این مناطق به علت جنس خاک و نداشتن پوشش گیاهی مناسب بیشتر در معرض خطر فرسایش قرار دارند. با توجه به زمین‌شناسی و توپوگرافی حوضه خسویه مناطق با ارتفاع بیشتر معمولاً از لحاظ زمین‌شناسی دارای جنس سنگ و نفوذ پذیری کمی دارند. بنابراین تمامی بارش صورت گرفته در این مناطق به صورت روان‌آب به مناطق مرکزی حوضه که دارای ارتفاع کمتر و نفوذپذیری بیشتر می‌باشند سرازیر می‌شود. با وجود اینکه مناطق پست به علت جنس خاک نفوذپذیری بیشتری دارند به علت سرعت روان‌آبهای جاری، شیب منطقه و عدم وجود پوشش گیاهی مناسب، لایه رویی خاک در این مناطق شسته شده و به مرور زمان شاهد تشکیل شیارها و در نهایت فرسایش آبکندی خواهیم بود.

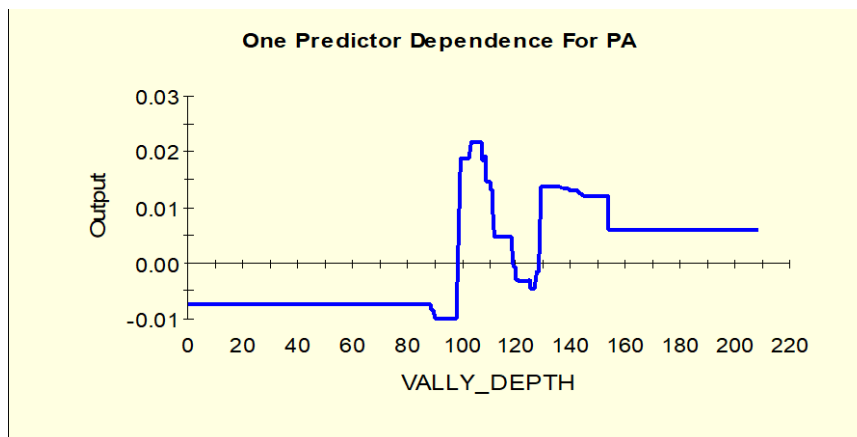


شکل ۱۰. تاثیر متغیر فرسایش پذیری خاک (فاکتور K)

### شاخص عمق آبراهه

عمق آبراهه، نشان‌دهنده فاصله عمودی آب در یک کانال یا روی سطح زمین از سطح آزاد آب تا کف کانال یا زمین است (Olaya, 2004)، این شاخص با استفاده از لایه مدل رقومی ارتفاع و در محیط نرم‌افزار SAGA-GIS تهیه گردید. شکل ۱۱ میزان تاثیر عمق آبراهه را در فرایند تشکیل آبکندها نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار به طور کلی هرچه عمق آبراهه‌ها بیشتر

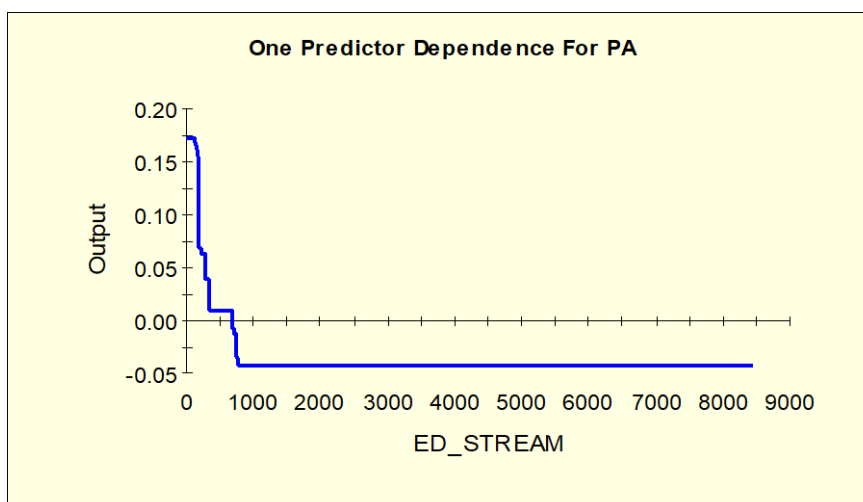
می‌شود میزان شکل‌گیری آبکندها افزایش پیدا می‌کند. و این بیشتر به علت اختلاف ارتفاعی است، که کف آبراهه‌ها با زمین‌های اطراف خود دارند، این اختلاف ارتفاع باعث سرعت گرفتن آب‌های سطحی در زمان رسیدن به آبراهه‌ها می‌شود و باعث فرسایش خاک دیواره‌های آن می‌گردد.



شکل ۱۱. تاثیر متغیر عمق آبراهه

### شاخص فاصله از آبراهه

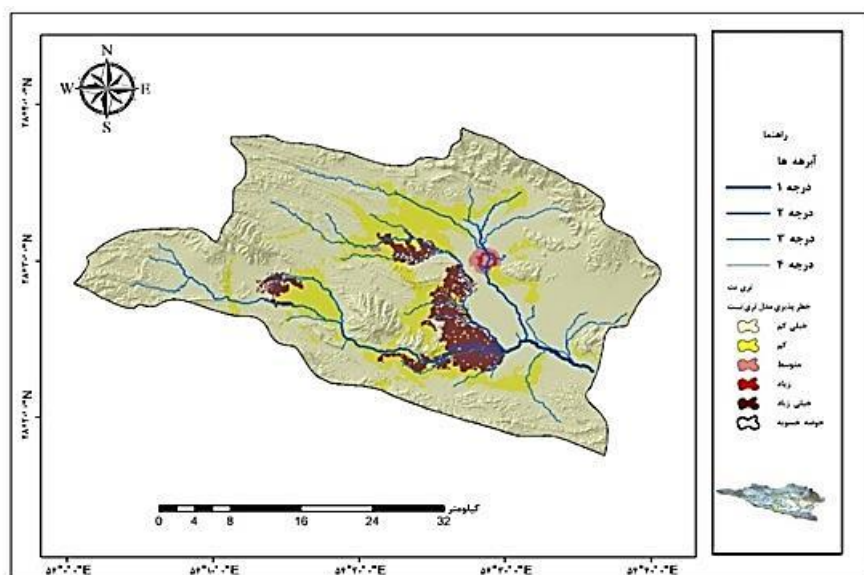
خطر فرسایش خندقی در نزدیکی آبراهه‌ها بیشتر است، زیرا نزدیکی به آنها، مسافت‌های کوتاه‌تری را برای انتقال خاک فرسایش یافته ایجاد می‌کند که باعث کاهش رسوب‌گذاری و افزایش احتمال تشکیل کانال‌های عمیق‌تر توسط جریان متمرکز می‌شود. این شاخص با استفاده از لایه مدل رقومی ارتفاع و در محیط نرم‌افزار SAGA-GIS تهیه گردید. در واقع این شاخص فاصله محدوده‌ی فرسایش آبکندی با آبراهه‌های اطراف آنها را محاسبه می‌نماید. شکل ۱۲ تاثیر فاصله از آبراهه را در فرآیند تشکیل آبکندها نشان می‌دهد. براساس این نمودار نسبت میزان فاصله از آبراهه با فرآیند شکل‌گیری آبکندها به صورت مستقیم می‌باشد. به گونه‌ای که در فواصل نزدیک به آبراهه‌ها میزان تشکیل آبکندها روبه افزایش و با فاصله گرفتن از آبراهه‌ها این فرآیند روند کاهشی به خود می‌گیرد. این شاخص نیز با استفاده از لایه مدل رقومی ارتفاع و در محیط نرم‌افزار SAGA-GIS تهیه گردید. در واقع نواحی نزدیک به آبراهه‌ها دارای پتانسیل بیشتری نسبت به رخدادهای فرسایش آبکندی نسبت به سایر نواحی دارند. در این نمودار افزایش فاصله حدود بیش از ۱۰۰۰ متر احتمال رخداد این نوع فرسایش کاهش می‌یابد.



شکل ۱۲. تاثیر متغیر فاصله از آبراهه

## نقشه‌ی حساسیت فرسایش آبکندی

در این پژوهش، پس از پیش بینی مقادیر متغیر وابسته (وقوع و عدم وقوع فرسایش آبکندی) با استفاده از روش های داده‌کاوی TreeNet، بر اساس ساختار رستری و ارزش های تخصیص داده شده به هر نقطه نمونه برداری شده (نقاط نمونه از متغیر های مستقل و وابسته) پهنه بندی نقشه حساسیت فرسایش آبکندی حوضه آبخیز خسویه در نرم‌افزار ArcGIS 10.8 صورت گرفت (شکل ۱۳).



شکل ۱۳. نقشه حساسیت فرسایش آبکندی حوضه آبخیز خسویه

همانطور که در نقشه پهنه بندی خطر حساسیت فرسایش آبکندی حوضه آبخیز خسویه مشاهده می‌شود، نواحی با خطر زیاد و خیلی زیاد بیشتر در نواحی مرکزی و جنوب حوضه با ارتفاع کمتر نسبت با سایر نواحی می‌باشند. حدود ۶ درصد از حوضه دارای کلاس خطر زیاد و خیلی زیاد می‌باشد در حالی که نواحی با خطر کم و خیلی کم نیز بیشتر در نواحی مرتفع و پرشیب حوضه قرار گرفته‌اند که این نواحی دارای پوشش گیاهی بیشتر نسبت به سایر نواحی می‌باشند (جدول ۶).

جدول ۶. درصد کلاس های مختلف خطر حساسیت فرسایش آبکندی حوضه آبخیز خسویه

| مدل     | کلاس بندی و درصد مساحت هر کلاس |      |       |       |         |
|---------|--------------------------------|------|-------|-------|---------|
|         | خیلی زیاد                      | زیاد | متوسط | کم    | خیلی کم |
| TreeNet | ۵/۴۲                           | ۰/۱۸ | ۰/۴۸  | ۱۴/۶۴ | ۷۹/۲۸   |

## نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر نشان داد که مدل TreeNet به عنوان یکی از الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌تواند با دقت بالایی به شناسایی و پهنه‌بندی نقشه خطر حساسیت فرسایش آبکندی در حوضه آبخیز خسویه در استان فارس استفاده شود. نتایج این تحقیق نشان داد که مناطق با حساسیت با خطر زیاد و خیلی زیاد فرسایش آبکندی، عمدتاً در بخش‌های مرکزی حوضه و در نزدیکی شاخه‌های فرعی رودخانه‌ها و شیب‌های نسبتاً کم متمرکز شده‌اند. که این مناطق نیازمند توجه ویژه و اجرای طرح‌های مدیریت پایدار خاک و آب هستند. نتایج این تحقیق با سایر پژوهش‌ها صورت گرفته در منطقه‌ی مورد مطالعه که از مدل‌های مکسنت و CART استفاده شده است نیز همخوانی دارد (ذاکری‌نژاد و الوندی، ۱۴۰۰؛ ذاکری‌نژاد و همکاران، ۱۴۰۲). تاثیرگذارترین شاخص‌ها در شکل‌گیری آبکندها شاخص ارتفاع بوده، به طوری‌که با احتمال وقوع فرسایش نسبت معکوس دارد. به گونه‌ای که

هرچه ارتفاع کمتر باشد احتمال وقوع رخداد فرسایش خندقی بیشتر است و بالعکس. بیشترین خندق ها در مناطق کم ارتفاع حوضه، ۹۰۰ متر اتفاق افتاده‌اند. با این حال صرفاً ارتفاع کم دلیل بر وقوع فرسایش آبکندی نیست. به علت اینکه کاربری اراضی در مناطق کم ارتفاع به دلیل سکونت، بیشتر دستخوش تغییرات انسانی است، همچنین احداث راهها در مناطق کم ارتفاع بیشتر از مناطق مرتفع صورت گرفته و مهمتر اینکه تمامی آبراهه‌ها در مناطق کم ارتفاع به هم می‌پیوندند خود دلایلی بر وقوع فرسایش خندقی در مناطق کم ارتفاع است مطالعات سایر پژوهش‌ها نیز نشان داده‌اند که با کاهش ارتفاع درصد ایجاد و پراکنش خندق‌ها افزایش پیدا می‌کند (کاناستی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۴؛ پیروی نژاد و همکاران، ۱۳۹۶؛ شهبازی و همکاران، ۱۴۰۰؛ ذاکری نژاد، ۱۳۹۹؛ ذاکری نژاد و همکاران، ۲۰۲۱). در واقع شاخص‌های توپوگرافی می‌تواند نقش مهمی در شدت و رخ داد فرسایش خندقی داشته باشند (خطیبی و کرمی، ۱۳۹۱؛ خطیبی، ۱۳۹۴؛ ذاکری نژاد، ۱۳۹۹). بیشترین کاربری‌های تأثیر گذار در رخداد فرسایش خندقی مراتع ضعیف (نمک‌زارها) و زمین‌های کشاورزی بوده‌اند. معمولاً در مناطق مرتفع به علت ماهیت ارتفاع و نوع زمین‌شناسی این مناطق (اکثراً صخره‌های سنگی) و عدم دسترسی، اراضی کمتر دستخوش تغییرات انسانی می‌باشند. این درحالی است که در مناطق کم ارتفاع به دلیل وجود آب‌های جاری، خاک مناسب، دسترسی آسان و سکونت انسان‌ها، تغییر کاربری اراضی نیز بیشتر صورت می‌گیرد. استفاده بیش از حد از زمین، آبیاری نامنظم که باعث افزایش روان آب در سطح می‌گردد، که این نیز دلیلی محکم بر احتمال وقوع فرسایش خندقی در این مناطق می‌باشد (وٹوقی و همکاران، ۱۴۰۳؛ اسدی نلیوان و همکاران، ۱۴۰۲؛ امانوئل، ۲۰۱۳ و فیلو<sup>۲</sup> همکاران، ۲۰۲۴) در حوضه مورد مطالعه در مناطقی که فرسایش‌پذیری خاک بیشتر است نیز خطر یا حساسیت فرسایش خندقی نیز بیشتر می‌باشد. در این مناطق به علت جنس خاک، عدم وجود پوشش گیاهی مناسب و ارتفاع کم نسبت به بقیه نواحی حوضه، که باعث تجمع آب‌های سطحی می‌شود که موجب تسریع فرسایش آبی می‌گردد. بررسی نوع خاک حوضه مورد مطالعه نیز نشان داد که بیش از ۹۰ درصد حوضه آبخیز خسویه دارای بافت خاک لومی می‌باشد. خصوصیات فیزیکی خاک سطحی نقش مهمی بر روی نفوذ خاک، مقاومت خاک به فرسایش و نرخ رواناب و ایجاد فرسایش خندقی دارد، نتایج این شاخص نیز با تحقیقات خزائی و همکاران، ۱۳۹۱؛ طهماسبی و همکاران، ۱۳۹۵؛ رحمتی و همکاران، ۲۰۱۶؛ ذاکری نژاد ۱۴۰۲ همخوانی دارد. در حالت کلی، مدل‌های یادگیری ماشین با قابلیت‌های خاص خود می‌توانند در شرایط مختلف مورد استفاده قرار گیرند و هر کدام نقاط ضعف و قوت مخصوص به خود را دارند. بطور کلی این پژوهش به ارتقای دانش علمی در حوضه فرسایش آبکندی و کاربرد مدل‌های داده‌کاوی در مدیریت منابع طبیعی کمک کرده و می‌تواند پایه‌ای برای مطالعات آتی در این زمینه فراهم آورد. در پژوهش‌های آتی، بهره‌گیری از الگوریتم‌های جدیدتر و پیشرفته‌تر یادگیری ماشین و استفاده از روش‌های انسامل<sup>۳</sup> در مدل‌سازی یادگیری ماشین می‌تواند به افزایش دقت پیش‌بینی و بهبود پایداری مدل‌ها کمک کند.

## منابع

ابراهیمی محمد، مریم (۱۳۹۴). شناسایی علل وقوع فرسایش خندقی با تأکید بر خصوصیات خاک در حوضه آبخیز آق امام، نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۷ (۲)، ۱-۱۳.

احمدی، حسن (۱۳۸۸). ژئومورفولوژی کاربردی ج ۱ فرسایش آبی، تهران: انتشارات دانشگاه.

الوندی سده، پیروش (۱۴۰۰). پیش‌بینی فرسایش خندقی با استفاده از داده‌های *Tan DEM-X* و مدل حداکثر آنتروپی در حوضه آبخیز خسویه، جنوب شرق استان فارس، پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته ژئومورفولوژی و آمایش محیطی.

امیری، مهدیس؛ پورقاسمی، حمیدرضا؛ قنبریان، غلام‌عباس و افضلی، سید فخرالدین (۱۳۹۸). مدل‌سازی مکانی فرسایش آبکندی حوضه آبخیز مهارلو با استفاده از سناریوهای مختلف و الگوریتم وزن واقعه، مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۱ (۴)، ۱۰۳۲-۱۰۱۶.

1. Conoscenti

2. Filho

3. Ensemble learning

- بیاتی خطیبی، مریم و کرمی، فریبا (۱۳۹۱). ارزیابی پهنه‌های تحت خطر فرسایش خاک در حوضه سراسکندر چای، دامنه‌های شرقی کوهستان سهند با استفاده از مدل USLE و GIS. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*. ۱۶(۴۰)، ۱-۲۳.
- بیاتی خطیبی، مریم (۱۳۹۴). ارزیابی و پیش‌بینی خطر فرسایش خاک در حوضه سراسکندچای با استفاده از مدل USLE و GIS. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*. ۱۹(۵۴)، ۶۱-۸۱.
- پیروزی‌نژاد، سجاد؛ سلیمانی، کریم؛ حبیب‌نژاد، محمود؛ ذاکری‌نژاد، رضا (۱۳۹۶). پیش‌بینی فرسایش آبکندی با استفاده از سنجنده راداری ALOS و مدل Maxent در حوضه الوند. *سنجش از دور GIS/ایران*، ۹(۱۴)، ۹۵-۱۱۰.
- جاویدان، نرگس؛ کاویان، عطاله؛ رجبی، سجاد؛ پورقاسمی، حمیدرضا و جعفریان، زینب (۱۴۰۲). شناسایی مناطق مستعد فرسایش آبکندی و زمین لغزش در قالب نقشه دو خطر با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین در حوزه‌ی آبخیز گرگانرود. *مجله علوم ومهندسی آبخیزداری/ایران*، ۱۷(۶۲)، ۷۵-۸۵.
- رفاهی، حسینقلی (۱۳۹۳). *فرسایش آبی و کنترل آن*، تهران: انتشارات دانشگاه.
- ذاکری‌نژاد، رضا (۱۴۰۲). تهیه نقشه میزان فرسایش و رسوب حوضه آبخیز خسویه با استفاده از مدل USPED و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و مقایسه آن با رخساره‌های فرسایش آبی. *پژوهش‌های فرسایش محیطی*، ۱۳(۳)، ۲۵۶-۲۳۹.
- ذاکری‌نژاد، رضا و الوندی، پریش (۱۴۰۲). پیش‌بینی فرسایش آبکندی با استفاده از داده‌های TanDEM-X و مدل حداکثر آنتروپی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز خسویه). *پژوهش‌های فرسایش محیطی*، ۱۳(۱)، ۹۶-۱۱۳.
- ذاکری‌نژاد، رضا و فلاح، سلمان (۱۴۰۲). ارزیابی خطر فرسایش آبی با استفاده از ترکیب مدل تجدید نظر شده‌ی جهانی فرسایش خاک (RUSLE) و نقشه تراکم آبکندی در حوضه آبخیز علامرودشت استان فارس. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۱۱(۴)، ۲۰۹-۱۸۹.
- ذاکری‌نژاد، رضا (۱۳۹۹). ارزیابی مدل‌های رقومی ارتفاع جهت تهیه نقشه پتانسیل فرسایش آبکندی با استفاده از مدل مکسنت و سامانه اطلاعات جغرافیایی در حوضه آبخیز سمیرم، جنوب استان اصفهان، *نشریه سنجش از دور سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*، ۱۱(۳)، ۱۰۶-۱۲۲.
- ذاکری‌نژاد، رضا؛ کهرانی، عباس و انتظاری، مژگان (۱۴۰۲). ارزیابی حساسیت خاک به فرسایش آبکندی با استفاده از مدل CART و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) (منطقه مورد مطالعه: حوضه آبخیز خسویه استان فارس). *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۱۲(۲)، ۷۳-۹۰.
- شهبازی، علی؛ وکیلی تجربه، فرزانه؛ الوندی، احسان؛ بیات، اصغر و اسدی نلیوان، امید (۱۴۰۰). ارزیابی مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و حداکثر آنتروپی در پهنه‌بندی حساسیت فرسایش آبکندی حوزه آبخیز سد گلستان. *مجله علوم ومهندسی آبخیزداری/ایران*. ۱۵(۵۲)، ۱۲-۲۳.
- طهماسبی‌پور، ناصر؛ رحمتی، امید و قربانی‌نژاد، سمیرا (۱۳۹۴). پیش‌بینی حساسیت به فرسایش آبکندی منطقه سمیره بر اساس مدل عامل قطعیت و تعیین اهمیت عوامل مؤثر بر آن، *اکوهیدرولوژی*، ۳(۱)، ۹۳-۸۳.
- عبداللهی، شیلا؛ نظر‌نژاد، حبیب؛ یعقوب‌زاده، میرحسن و نجفی، سعید (۱۳۹۶). برآورد میزان فرسایش آبکندی و توسعه آنها با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور، *مجله علمی پژوهشی مهندسی اکوسیستم بیابان*، ۶(۱۷)، ۶۹-۷۸.
- غلامی، محمد؛ احمدی، مهدی و محمودی، مهران (۱۳۹۶). تحلیل محدودیت‌های ژئومورفولوژیکی در گسترش کالبدی شهر با تأکید بر فرسایش آبکندی در شهر مهر در جنوب استان فارس، *مجله مخاطرات محیط طبیعی*، ۶(۱۲)، ۱۰۵-۱۲۴.

نیک‌پور، نورالله؛ فتوحی، صمد؛ نگارش، حسین و سیستانی، مسعود (۱۳۹۵). مورفومتری فرسایش آبکندی و عوامل و موثر بر ایجاد و گسترش آن در حوضه دشت چم فاضل در جنوب غرب استان ایلام، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۴ (۱)، ۹۷-۱۱.

و ثوقی، شیماء؛ ذاکری نژاد، رضا و انتظاری، مژگان (۱۴۰۳). پیش‌بینی فرسایش خندقی و شناسایی عوامل موثر بر آن با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی و مدل‌های تغییر اقلیمی BCC-CSM2-MR برای سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۴۰ (مطالعه موردی: حوضه آبخیز علامرودشت). *جغرافیا و برنامه‌ریزی*. ۲۸ (۹۰)، ۱۴۱-۱۶۳. doi: 10.22034/gp.2023.57572.3169

Aboutaib, F., Krimissa, S., Pradhan, B., Elaloui, A., Ismaili, M., Abdelrahman, K & Namous, M. (2023). Evaluating the effectiveness and robustness of machine learning models with varied geo-environmental factors for determining vulnerability to water flow-induced gully erosion. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1207027.

Ahmadi, H. (2009). *Applied geomorphology, water erosion*. University of Tehran Publisher. [In persian]

Abdillahi, S., Nazarnejad, H., Najafi, S. (2018). Estimates of gully erosion and development using GIS and RS. *Desert Ecosystem Engineering*, 6(17), 69-78. [In persian]

Arabameri, A., Pradhan, B., & Rezaei, K. (2019). Gully erosion zonation mapping using integrated geographically weighted regression with certainty factor and random forest models in GIS. *Journal of environmental management*, 232, 928-942. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.11.110>.

Amiri, M., Pourghasemi, H.R., Ghanbarian, G.A., & Afzali, S.F. (2020). Spatial modeling of gully erosion in Maharlou Watershed using different scenarios and Weights-of-evidence algorithm. *Watershed engineering and management*, 11(4), 1016-1032. SID. <https://sid.ir/paper/234818/en>. [In persian]

Bayati, M., Karamy, F. (2012). Assessment of Soil Erosion Risk in Sareskandar Chay Catchment, Eastern Slope of Sahand Mountain Using USLE Model and GIS. *Journal of Geography and Planning*, 16(40), 1-23. [In persian]

Bayati, M. (2016). Assesment and Predicting of Soil Erosion Risk at Semi-Arid Mountain: Intergeration of the USLE Model and GIS Technique for Soil Conservation Planning Case Study: Sareskandarchy Catchment, Eastern Slope. *Journal of Geography and Planning*, 19(54), 61-81. [In persian]

Bammou, Y., (2024). Machine learning models for gully erosion susceptibility assessment in the Tensift catchment, Haouz Plain, Morocco for sustainable development. *Journal of African Earth Sciences*, vol. 213, doi: 10.1016/j.jafrearsci.2024.105229.

Bammou, Y., Benzougagh, B., Abdessalam, O., Brahim, I., Kader, S., Spalevic, V., Sestras, P., Ercisli, S. (2024). Machine learning models for gully erosion susceptibility assessment in the Tensift catchment, Haouz Plain, Morocco for sustainable development. *Journal of African Earth Sciences*, 213, 1-16.

Chenrui, Li., Xin, Yang., Yang, Chen., Xingyu, Zhou., Sijin, Li., Xujia. Cui., Guoan, Tang. (2025). Assessing the influence of geo-environmental factors on discontinuous gully erosion at regional scales: A case study of spoon gullies on the loess plateau of China, *Journal of Environmental Management*, 373, 123940: 0301-4797. doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123940.

Conoscenti, C, Rotigliano, E. (2020). Predicting gully occurrence at watershed scale: Comparing topographic indices and multivariate statistical models, *Geomorphology*, 107123.

Gao, J (2023). *R-Squared (R2) - How much variation is explained?* Research Methods in Medicine & Health Sciences. 5.

Conrad, O. (2006). SAGA. *Entwurf, Funktionsumfang und Anwendung eines Systems für Automatisierte Geowissenschaftliche Analysen*. Ph.D. Thesis, University of Göttingen, Germany.

Filho, J. D. P. M., Guerra, A. J. T., Cruz, C. B. M., Jorge, M. D. C. O., & Booth, C. A. (2024). Machine learning models for the spatial prediction of gully erosion susceptibility in the Piraí Drainage Basin, Paraíba Do Sul Middle Valley, *Southeast Brazil. Land*, 13(10), 1665. doi.org/10.3390/land13101665.

Gholamei, M., Ahmadi, M., Mahmodi, M. (2017). Geomorphological analysis of constraints on the physical development of the city by emphasizing the Gully (Case Study: Mohr City in the southern province of

- Fars). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 6(12), 105-124. doi: 10.22111/jneh.2017.3061. [In persian]
- Hasanuzzaman, Md & Adhikary, Partha Pratim & Shit, Pravat. (2023). Gully Erosion Susceptibility Mapping and Prioritization of Gully-Dominant Sub-Watersheds using Machine Learning Algorithms: Evidence from the Silabati River (tropical river, India). *Advances in Space Research*. 73. 10.1016/j.asr.2023.10.051.
- Hitouri, S., Meriame, M., Ajim, A. S., Pacheco, Q. R., Nguyen-Huy, T., Bao, P. Q. & Varasano, A. (2024). Gully erosion mapping susceptibility in a Mediterranean environment: A hybrid decision-making model. *International Soil and Water Conservation Research*, 12(2), 279-297.
- Javidan, N., Kaviani A., Rajabi, S., Pourghasemi, H R., Jafarian Z. (2023). Identification the areas prone to gully erosion and landslides in the form of two-hazards map using machine learning models in Gorganrood watershed. *Jwmseir*, 17 (62) :75-85. [In persian]
- Lana JC, de. Castro, PTA. Lana, CE. (2022). Assessing gully erosion susceptibility and its conditioning factors in southeastern Brazil using machine learning algorithms and bivariate statistical methods: a regional approach. *Geomorphology* 402:108159.
- Lu, P., Zhang, B., Wang, C., Liu, M., & Wang, X. (2024). Erosion Gully Networks Extraction Based on InSAR Refined Digital Elevation Model and Relative Elevation Algorithm—A Case Study in Huangfuchuan Basin, Northern Loess Plateau, China. *Remote Sensing*, 16(5), 921. <https://doi.org/10.3390/rs16050921>
- Li, J. (2024). Gully erosion susceptibility maps and influence factor analysis in the Lhasa River Basin on the Tibetan Plateau, based on machine learning algorithms, *Catena*, 235. doi: 10.1016/j.catena.2023.107695
- Mohebzadeh, H., Biswas, A., DeVries, B. et al. (2024). Transferability of predictive models to map susceptibility of ephemeral gullies at large scale. *Nat Hazards*, 120: 4527–4561. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06377-0>
- Maulana, E., Sartohadi, J., Setiawan, MA. (2025). Understanding gully erosion development through a geomorphological approach. *Soil & Water Res*. 20(2):84-92. doi: 10.17221/92/2024-SWR.
- Masoudi, M & Zakerinejad, R. (2011). A new model for assessment of erosion using desertification model of IMDPA in Mazayjan plain, Fars province, Iran. *Ecol Environ Conserv*, 17(3): 489–594.
- Nikpour, N., Fotohi, S., Negaresh, H., & Sistani, M. (2017). Morphometric of gully erosion (ditch) and factors affecting the development of the basin plains on southern west Ilam Cham Fazel. *Journal of spatial analysis environmental hazarts*, 4(1), 97-112. Sid. <https://Sid.Ir/Paper/264757/En>. [In persian]
- Nguyen, T-T., Huang, JZ., Nguyen, TT. (2015). Unbiased feature selection in learning random forests for high-dimensional data. *Sci World J*. <https://doi.org/10.1155/2015/471371>.
- Oldeman, L.R. (1994). The global extent of soil degradation, Soil resilience and sustainable land use, CAB International, Wallingford UK, pp 99–118.
- Olaya, V. (2004). *A Gentle Introduction to SAGA GIS*. 1.1 Edition, Olaya Victor and Pineda Javier Editors., Madrid, Spain.
- Refaei, H. (2014). *Water erosion and its control*. Tehran University Publisher. [In persian]
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K. and Yoder, D.C. (1997). *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Agriculture Handbook No. 703, US Department of Agriculture, Washington DC, 1-251.
- Pirozinejad S, Solemani H, Habibnejad M, Zakeriejad R. (2018). Prediction of Gully erosion with ALOS data and Maxent model in Alvand basin, *GIS and RS Iranian National Journal*, 4, 95- 110. [In persian]
- Phinzi, K, Szabo, S. (2024). *Predictive ML for gully susceptibility modeling with geo-environmental covariates: main drivers, model performance, and computational efficienc*. Natural Hazards.
- Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G & Valentin, C. (2003). Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, 50 (2–4), 91–133.
- Shahbazi, A., Vakili tajareh, F., Alvandi, E., Bayat A., Asadi nalivan, O. (2021). Assessment of Artificial Neural Network Models and Maximum Entropy in Zoning of Gully Erosion Sensitivity of Golestan Dam Basin. *Jwmseir*. 15 (52) :12-23. URL: <http://jwmsei.ir/article-1-968-fa.html>. [In persian]

- Salford Predictive Modeler, Random Forests Modeling Basics. (2019). *Minitab, LLC. Salford Predictive Modeler, Introducing TreeNet (Gradient Boosting Machine), Minitab, LLC.*
- Shimin, Ni., Jue Peng, Janguang, Wang., Lianqi, Zhu., Dong, Wang., Chongfa, Cai. (2023). *Impacts of slope morphological evolution on subsequent erosion for a coarse-textured soil*, *Geoderma*, 430. 116320. doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116320.
- Svoray, T., Michailov, E., Cohen A et al. (2012). Predicting gully initiation: comparing data mining techniques, analytical hierarchy processes and the topographic threshold. *Earth Surf Process Landf* 37:607–619.
- Tahmasebipoor, N., Rahmati, O., Ghorbani Nejad, S. (2016). Prediction of gully erosion susceptibility in Seimare region using certainty factor model and importance analysis of conditioning factors. *Journal of Ecohydrology*, 3(1): 83-93. [In persian]
- Van Remortel, R.D. Maichle, R.W. Hickey, R.J. (2024). Computing the LS factor for the Revised Universal Soil Loss Equation through array-based slope processing of digital elevation data using a C++ executable *Comput. Geosci.*, 30 (9): 1043-1053.
- Vosooghy, S., Zakerinejad, R., Entezari, M. (2025). Spatial Prediction of Gully Erosion Using TanDEM-X data and Maximum Entropy Model (A case study: Alamarvdasht watershed, in South of Fars Province). *Journal of Geography and Planning*, 28(90): 391-401. [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 Dinamica Quaternaria*, 37(1): 67- 76.
- Zakerinejad, R., & Maerker, M. (2015). An integrated assessment of soil erosion dynamics with special emphasis on gully erosion in the Mazayjan basin, southwestern Iran. *Natural Hazards*, 79(Suppl 1), 25-50.
- Zakerinejad, R., Omran, A., Hochschild, V., Maerker, M. (2018). Assessment of gully erosion in relation to lithology in the Southwestern Zagros Mountains, Iran using ASTER data, GIS and stochastic modeling. *Geografia Fisica Edinamica Quaternaria*, 41(2), 95-104. doi:https://doi.org/10.4461/ GFDQ.2018.41.15. erosion in the Mazayjan basin, southwestern Iran, *Nat Hazards*.
- Zakerinejad R. (2023). Evaluating the Rate of Soil Erosion and Sedimentation of the Khasoyeh Watershed Using the USPED Model and GIS and its Comparison to Water Erosion Types. *E.E.R.* 13 (3) :239-256 URL: <http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-777-fa.html> [In persian]
- Zakerinejad, R & Alvandi, P. (2023). Spatial Prediction of Gully Erosion Using TanDEM-X data and Maximum Entropy Model (A case study: Khasoyeh watershed, in Southeast of Fars Province). *Quarterly journal of Environmental Erosion Research*, 48(13:1). [In persian]
- Zakerinejad, R., Fallah, S. (2023). Evaluation of Water Erosion Hazard Map Using the Combination of the RUSLE Model and Gully Erosion Density Map in Alamarvdasht Watershed of Fars Province, Iran. *Quantitative Geomorphological Research Journl*, 11 (4): 189-209. [In persian]
- Zakerinejad, R. (2020). Evaluation of of DEMs to the modeling of the potential of gully erosion using Maxent model (Case study: Semirom catchment in the south of Isfahan Province, Iran). *RS & GIS for Natural Resources*, 11(3) (In Persian).
- Zakerinejad, R., Kahrani, A., Entezari, M. (2023). Assessment and Comparison of CART and TreeNet models to Landslide Susceptibility Mapping using SPM Software and Geographic Information System (GIS), (Case study: Kameh Watershed, Southern of Isfahan Province). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 12(37). [In persian]
- Zakerienjad, R., Masoudi, M. (2020). Quantitative mapping of desertification risk using modified MEDALUS model: a case study in the Mazayejan Plain, Southwest Iran. *AUC Geographica* 54(2), 232–239.
- Zakerinejad, R., Christian, S., Volker, H., Michael, M. (2021). Spatial Disterbution of Water Erosion Using Stochastic Modeling in The Southern Isfahan Province, Iran, *Geogr FIS DIN QUAT*, 44 (2), 203–216.
- Zevenbergenl, W. & Thornec, R. (1987). *Quantitative Analysis of Land Surface Topography. Earth Surface Processes and Landforms*, 12, 47-56.