



## An Investigation on Gully Erosion in Iran and its Relationship to Erosion and Sediment Yield in Second-order Watersheds

Zahra Abdollahpour<sup>1</sup> | Aliakbar Nazari Samani<sup>1\*</sup> | Mahmoud ArabKhedri<sup>2</sup>

1. Department of Arid and Mountainous Region Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
2. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.  
Correspond E-mail: [aknazari@ut.ac.ir](mailto:aknazari@ut.ac.ir)

### Article Info

**Article type:**  
Research Article

**Article history:**  
Received: 28 Oct. 2025  
Revised: 19 Jan. 2026  
Accepted: 02 Feb. 2026  
Published online: 01 Jul. 2026

**Keywords:**  
*Golestan province,*  
*Land degradation,*  
*Total erosion,*  
*Specific sedimentation,*  
*Vulnerability.*

### Abstract

Understanding the processes of soil degradation, including erosion, is crucial for its conservation, given the lengthy process of soil formation. Among various forms of soil erosion, the damage caused by mass movement and gully erosion is particularly significant at the watershed scale. This phenomenon is considered an objective and key criterion for assessing the severity of land degradation. The current research aims to determine the extent of gully erosion across Iran and investigate its relationship with climatic elements (temperature and precipitation) and its impact on erosion and sedimentation at the watershed scale. Initially, a primary database on gully erosion was established through a review of articles, theses, reports, projects, and consultations with specialists, followed by the use of Google Earth and field visits for validation. By integrating the gully erosion layer with provincial boundaries, climate (De-Martonne), and second-order watersheds, the extent of gully erosion in each of these areas was determined. Finally, the relationship between climatic elements, total erosion and sedimentation, and specific sediment yield with gully erosion at the second-order watershed scale was examined. The results indicate that the total area affected by gully erosion is 4,464,978 hectares. Golestan Province, the semi-humid climate, and the Gorganrud-Qarasu watershed have the highest relative density of gully erosion, with values of 17.3, 1.45, and 22.27, respectively. The relationship between specific sediment yield, total erosion and sedimentation, and the area affected by gully erosion is significant and positive, with an increase of one unit in gully erosion area leading to an increase of 209.81 tons per square kilometer per year in sediment yield. Therefore, to determine the vulnerability degree of second-order watersheds and prioritize regions requiring soil conservation measures, factors such as the status of agricultural land use, presence of dams, road conditions, and elements at risk should be considered, alongside the likelihood of gully erosion occurrence.

**Cite this article:** Abdollahpour, Z., Nazari Samani, A.A., Arab Khedri, M. (2026). Investigation of gully erosion status in Iran and its relationship with erosion and sedimentation in second-order watersheds. *Journal of Range & Watershed Management*, 79 (2), 169-189. DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2026.405124.1854>



## EXTENDED ABSTARCT

**Introduction:** Gully erosion is one of the threats to the balance of ecosystem resources. This threat is not limited to land degradation, soil destruction, and the inability to carry out agricultural activities. Rather, the occurrence and spread of this type of erosion exacerbates flooding, the displacement of a significant volume of sediments, and the resulting consequences, making land unusable. In the context of comprehensive assessment of gully erosion in Iran, the Phase 1 gully erosion morphoclimatic project was first carried out in 20 provinces in the 1990s, and based on its findings, over one million, one hundred and eighteen thousand hectares of agricultural and rangeland lands in the Phase 1 provinces had suffered from gully erosion. Gully erosion has been reported in large areas of more than 500 hectares nationwide, 1.42 million hectares. The aforementioned projects have been based on visual interpretation of satellite images with low accuracy and also on expert knowledge only. This research showed that in practice, gully erosion covers 3,207,314 hectares of the country. Every year, a lot of money is spent to reduce the spread of gullies, and it takes a long time to repair the damage caused by such a phenomenon. Therefore, understanding the exact factors that cause gullies to spread is effective in reducing the costs of its management. According to the aforementioned information and the research conducted, there is no uniform and accurate information about the spread of gully erosion across the country, different climates, and climate characteristics in watersheds. And given that the damages caused by gully erosion in Iran are unknown, it is necessary to first assess its current status at the national level in the form of different climates and watersheds, and then, based on the sensitivity and vulnerability of watersheds, effective solutions to reduce sediment and control this erosion should be presented.

**Materials and Methods:** In this study, while analyzing the research conducted in the field of gully erosion, an attempt has been made to update the distribution status of gully erosion across the country. For this purpose, the initial baseline of the gully erosion status was determined based on the study and review of articles, theses, reports, plans, and meetings with relevant experts, and finally, using Google Earth, and verified as much as possible through field visits. By combining the gully erosion layer with the province, climate (De Martonne), and all second order watersheds, the extent of gully erosion in each was determined, and finally, the relationship between climatic variables, erosion and total and specific sediment with gully erosion at the level of second order watersheds was investigated. Basically, the preparation and display of land surface contour maps is based on the MLD scale and index. Therefore, the minimum visible surface and continuity of the feature and phenomenon are desired. Therefore, since the ditch is a longitudinal feature, the connection of the ridge and the body of the ditch is the criterion for action. Also, based on the desired scale, the minimum distance between two polygons with gully erosion should be more than 3-5 millimeters on the map scale. It should be noted that in most previous studies, the entire area or watershed with gully erosion was considered, but in the revision of the existing map, an attempt was made to focus only on the surfaces where this phenomenon and the slope exist. This study includes three parts: determining the extent of gully erosion in different provinces, different climates, and the second order watersheds areas of the Temaab division. In order to evaluate the relationship between climatic conditions, area and amount of erosion and sedimentation at the second-order watersheds, the latest maps prepared by the Iranian Water Resources Management Company as well as reports updating the status of water resources in second order watersheds and determining the amount of erosion and sedimentation based on hydrometric stations and the EPM model were used. Given that the relative frequency percentage alone cannot be used to determine significance, the relative density index was used.

**Results and Discussion:** The area of gully erosion in this study was found to be about 3,207,314 hectares, which accounts for roughly two percent of Iran's area. Since the maximum area of gully erosion can cover up to 10 percent of a land surface, this area, despite representing two percent of Iran's surface, is still highly significant. By relative area, the two provinces of Khorasan Razavi and Golestan rank first in gully erosion area; however, based on the relative density index, Ilam and Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad provinces have higher proportions. The high gully erosion area in these provinces, which are located in the Zagros zone, can be attributed to the presence of the Aghajari, Gachsaran, Ilam formations and gypsiferous and saline marls, along with climatic conditions. Iran, given its diverse climates, has eight climate types according to the De Martonne method: very humid 1, very humid 2, semi-humid, humid, dry, Mediterranean, semi-arid, and hyper-arid, with the greatest extent of gully erosion occurring in the dry climate, covering 1,125,131 hectares. The reason for the large area of gully erosion in this climate is the large extent of arid climates in Iran. About 90 percent of the country has an arid or semi-arid climate. Therefore, to better understand the role of climate on gully erosion, it is preferable to use the results of the Relative Concentration Index. Based on the relative density index, the semi-humid climate accounts for the highest amount of gully erosion. This climate combines features of both humid and arid climates, which facilitates erosional processes. Among the second-order watersheds, the Qara Qum watershed has the highest amount of gully erosion. Since part of this watershed lies within Iran, it is not possible to judge the entire

watershed. Also, using the level of gully erosion cannot be an appropriate criterion, and the relative area of the watersheds being compared must be considered. Therefore, based on the relative watershed density index, Qareh-Su has the highest value for the Gorganrud watershed. Results of the correlation between gully erosion and climatic characteristics indicate that with increasing precipitation and temperature, the amount of gully erosion increases. In Iran, as precipitation and temperature rise, climatic conditions tend to shift from arid and hyper-arid regions toward Mediterranean climates, and consequently the volume, intensity, and kinetic energy of surface runoff increase, indirectly affecting the occurrence and expansion of gully erosion through their impact on vegetation cover and soil permeability. Additionally, based on regression coefficients, the relationship between evaporation and transpiration and gully erosion was negative; however, a more detailed evaluation of the scatter of its data points showed that up to about 2000 mm of potential evapotranspiration this relationship is direct and increasing, and with further increases in potential evapotranspiration (resulting from rising temperature) and decreased soil moisture it leads to reduced vegetation cover and increased gully erosion. But beyond about 2000 mm, because these areas lie in arid regions with low rainfall, the contribution of water-driven erosion from runoff is actually reduced.

**Conclusion:** The results showed that, based on the relative density index, Golestan Province, the semi-humid climate, and the Qarasu-Gorganrud second-order watershed exhibit the highest relative density of gully erosion, and the relationship between specific sediment and erosion and total sediment with gully erosion area is significant. The above results can be used in the next phase to determine the vulnerability ranking of second-order watersheds and to prioritize affected areas that require soil conservation measures. To determine the vulnerability degree of gully erosion, variables such as agricultural land-use status, presence of dams, road conditions, and exposed elements at risk should be considered.

**Keywords:** Golestan province, Land degradation, total erosion, specific sedimentation, vulnerability

**Article Type:** Research Article

**Acknowledgement:** Sincere thanks are extended to all colleagues and contributors who supported and collaborated in the advancement of this research.

**Conflicts of interest:** The authors of this article declare no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.



## واکاوی وضعیت فرسایش خندقی در ایران و ارتباط آن با فرسایش و رسوبدهی حوزه‌های آبخیز درجه ۲

زهرا عبدالله پور<sup>۱</sup> | علی اکبر نظری سامانی<sup>۱\*</sup> | محمود عرب خدری<sup>۲</sup>

۱. گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران  
۲. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران  
رایانامه: [aknazari@ut.ac.ir](mailto:aknazari@ut.ac.ir)

### چکیده

### اطلاعات مقاله

شناخت فرآیندهای هدررفت خاک از جمله فرسایش با توجه به فرآیند بسیار طولانی تشکیل خاک، برای حفاظت از آن اهمیت دارد. در میان انواع اشکال فرسایش خاک، تخریب ناشی از حرکت توده‌ای و فرسایش خندقی، در مقیاس حوزه آبخیز اهمیت بیشتری دارد. این پدیده به عنوان معیار کلیدی و عینی برای ارزیابی شدت تخریب سرزمین در نظر گرفته می‌شود. هدف از پژوهش جاری تعیین گستره این فرسایش در سطح سرزمین ایران و تعیین ارتباط آن با عناصر اقلیمی (دما و بارش) و تأثیر آن بر فرسایش و رسوب در مقیاس حوزه‌های آبخیز است. بدین منظور ابتدا پایگاه اولیه وضعیت فرسایش خندقی بر پایه واکاوی مقاله‌ها، پایان‌نامه‌ها، گزارش‌ها، طرح‌ها و برگزاری جلسه با متخصصان مربوطه و در پایان استفاده از پایگاه Google Earth تعیین و با بازدید میدانی تا حد امکان تدقیق شد. با تلفیق لایه فرسایش خندقی با محدوده استان‌ها، اقلیم (دومارتن) و حوزه‌های آبخیز درجه ۲ تماب، میزان گسترش فرسایش خندقی در هریک از آن‌ها مشخص شد و در پایان به بررسی رابطه بین عناصر اقلیمی، فرسایش و رسوب کل و رسوب ویژه با فرسایش خندقی در سطح حوزه‌های آبخیز درجه ۲ اقدام شد. نتایج نشان داد که سطح کل فرسایش خندقی ۴۴۶۴۹۷۸ هکتار است. استان گلستان، اقلیم نیمه مرطوب و حوزه آبخیز قره‌سوگرگانرود به ترتیب با میزان تراکم نسبی ۱۷/۰۳، ۱/۴۵ و ۲۲/۲۷ بیشترین فرسایش خندقی را دارند و رابطه بین رسوبدهی ویژه و فرسایش و رسوب کل با سطح فرسایش خندقی معنی‌دار و افزایشی بوده و با افزایش یک واحد سطح فرسایش خندقی میزان رسوبدهی ۲۰۹/۸۱ تن بر کیلومتر مربع در سال افزایش یافته است. بنابراین برای تعیین درجه آسیب‌پذیری حوزه‌های درجه ۲ و اولویت‌بندی مناطق نیازمند اقدامات حفاظت خاک، باید بر پایه عناصر در معرض خطر و احتمال رخداد فرسایش خندقی عمل کرد و همچنین، متغیرهایی همچون وضعیت کاربری اراضی کشاورزی، وجود سد، وضعیت جاده‌ها و عناصر در معرض خطر باید مورد توجه قرار گیرند.

### نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۱۰

### کلیدواژه‌ها:

استان گلستان،  
تخریب اراضی،  
فرسایش کل،  
رسوب ویژه،  
آسیب‌پذیری.

**استناد:** عبدالله پور؛ زهرا، نظری سامانی؛ علی اکبر، عرب خدری؛ محمود (۱۴۰۵). واکاوی وضعیت فرسایش خندقی در ایران و ارتباط آن با فرسایش و رسوبدهی حوزه‌های آبخیز درجه ۲. نشریه مرتع و آبخیزداری، ۷۹ (۲)، ۱۶۹-۱۸۹.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2026.405124.1854>



© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

## ۱. مقدمه

از میان انواع مختلف فرسایش خاک، فرسایش خندقی یکی از موارد مهم و تهدیدکننده تعادل منابع تخریب اکوسیستم است. به طوری که این تهدید تنها محدود به از بین رفتن منظر زمین، تخریب اراضی و از بین بردن خاک و عدم امکان فعالیت‌های کشاورزی و بهره‌برداری اقتصادی از عرصه‌های طبیعی نمی‌شود، بلکه رخداد و گسترش این نوع فرسایش، جاری شدن تندآب‌ها و سیل، جابجایی حجم قابل توجهی از رسوبات و پیامدهای ناشی از آن و بالاخره غیر قابل استفاده شدن اراضی را تشدید می‌کند. فرسایش خندقی نقش مهمی در گل‌آلودگی منابع آب پایین‌دست و هدررفت عناصر غذایی خاک دارد (Poesen et al., 2003؛ ابراهیمی، ۲۰۱۸). همچنین قابل ذکر است که اگرچه فرسایش خندقی کمتر از پنج درصد سطح حوزه‌های آبخیز ایران را تحت تأثیر قرار می‌دهد، ولی با توجه به شرایط مختلف، می‌تواند از ۱۰ تا ۹۴ درصد سهم کل رسوب یک حوضه را شامل شود (Poesen et al., 2003). نظری سامانی و همکاران (۲۰۱۱) نیز سهم رسوب حاصل از فرسایش خندقی در حوزه‌های آبخیز دارای مساحت کمتر از ۵۰۰ هکتار را تا حد ۹۵ درصد برآورد نموده است.

فرسایش خندقی حاصل تعامل پیچیده‌ای از عوامل طبیعی، مانند بارندگی، خاک و توپوگرافی و تأثیرات انسانی از جمله تغییرات کاربری اراضی و توسعه زیرساخت است (Valentin et al., 2005؛ Castillo & Gómez, 2016). فرسایش خندقی پدیده‌ای معمول در آب و هوای مناطق مختلف خصوصاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که مناطق وسیعی با شرایط مورفولوژیک، خاکشناسی و آب و هوایی متفاوت را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Zakerinejad and Mearker, 2014؛ غلامی و همکاران، ۲۰۱۷).

یکی از عوامل مهم و مؤثر بر گسترش فرسایش خندقی اقلیم است که مطالعه آن به منظور مدیریت و کنترل این نوع فرسایش ضروری است. اقلیم با تأثیر بر میزان بارش، نوع بارش (باران و برف) و همچنین دما، به طور مستقیم بر میزان رواناب و فرسایش خندقی تأثیر می‌گذارد. بارش‌های شدید و متناوب، با افزایش رواناب، باعث افزایش فرسایش خندقی می‌شوند. نوع بارش نیز بر میزان شدت گسترش فرسایش خندقی تأثیرگذار است. برف، بیشتر در فصل‌های سرد و زمان‌های ذوب، بر فرسایش خندقی اثر می‌گذارد و به میزان شیب، سرعت ذوب و نوع خاک بستگی دارد همچنین باران، به دلیل داشتن سرعت و شدت بالای آب، نسبت به برف تأثیر بیشتری بر گسترش فرسایش خندقی دارد (Rodzik et al., 2007). دما از طریق اثر بر سرعت تبخیر آب از خاک و کاهش رطوبت بر میزان فرسایش خندقی تأثیرگذار است. کاهش رطوبت خاک باعث ضعف ساختمان و افزایش شکنندگی خاک می‌شود که این امر ایجاد فرسایش خندقی را تسهیل می‌کند (Fang & Guo, 2015).

صوفی (۲۰۰۴) در بررسی علل و ویژگی‌های فرسایش خندقی در پنج استان ایران اعلام می‌دارد که خندق‌ها در شرایط اکولوژیک و اقلیم‌های خاصی تمرکز دارند و در شیب‌های کمتر از ۱۵ درصد و اطراف اراضی زراعی عمدتاً دیمزارها ایجاد شده‌اند. تأثیر اقلیم بر فرسایش خندقی بسیار حیاتی است، زیرا مناطق با اقلیم متفاوت، الگوهای فرسایش خندقی مختلف را نشان می‌دهند و همچنین در مناطقی که دارای تغییرات بارندگی بیشتری هستند، رخداد فرسایش شدیدتر است (Olivier et al., 2023). این پیچیدگی نیازمند رویکردهای مدیریت یکپارچه زمین برای رفع مؤثر چالش‌های فرسایش خندقی است (رحمتی و همکاران، ۲۰۱۷).

تشدید این شکل فرسایش بر اثر فعالیت‌های انسانی نظیر تغییر کاربری اراضی، کشاورزی غیراصولی، چرای زیاد دام، جنگل‌زدایی صورت می‌گیرد (راهی و همکاران، ۲۰۲۱).

ارزیابی اثرات فرسایش خندقی نشان داده است که خندق‌ها نقش مهمی بر کیفیت سرزمین (منابع آب، خاک، پوشش گیاهی و سیمای سرزمین) دارند به طوری که واندکرکو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۰)؛ پوزن<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۳) تراکم خندق‌ها را به عنوان شاخص مناسبی برای ارزیابی شدت بیابانزایی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مدیران‌های اعلام کرده‌اند. زیرا خندق‌ها به طور همزمان سبب تخریب خاک و منابع آب می‌شوند. این نوع فرسایش در مواردی که بهره‌برداری از منابع خاک و آب مبتنی بر اصول صحیح و متناسب با توان طبیعی

<sup>1</sup> Vandekerckhove

<sup>2</sup> Poesen

شرایط محیطی نباشد، موجب تغییرات قابل ملاحظه در منظر زمین و پیامدهای زیان بار اقتصادی و اجتماعی می‌شود (قدوسی، ۲۰۰۳). خسارت‌های فرسایش خندقی به صورت برجا و برون منطقه‌ای در قالب حوزه آبخیز قابل درک است و متعاقباً تحت شرایط اقلیمی مختلف متفاوت است. بر پایه نتایج پژوهش‌های پوزن<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۹۶)، مارتنز کاساسنواز<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۳)، شلبرگ<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۳)، مارتین مورنو<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۴)، صوفی (۲۰۰۴)، وانمرک<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۲۱) و گورفی<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۲۵) فرسایش خندقی از عمده‌ترین عوامل رسوب‌گذاری پشت سدها و آبراهه‌ها است و سهم خسارت آن در تخریب سرزمین قابل ملاحظه است. در زمینه ارزیابی فراگیر فرسایش خندقی در ایران اولین بار در دهه ۱۳۷۰ پروژه مورفوکلیماتیک فرسایش خندقی فاز ۱ در ۲۰ استان انجام شد و بر پایه یافته‌های آن بالغ بر یک میلیون و یکصد و هجده هزار هکتار از اراضی زراعی و مرتعی استان‌های فاز ۱ دچار فرسایش خندقی شده بودند (صوفی، ۱۹۹۱).

علی‌رغم وجود پژوهش‌های متعدد در ایران، تاکنون بررسی‌های جامعی در زمینه یکپارچه‌سازی کلیه منابع موجود (اعم از پلایان‌نامه‌ها، گزارش‌های تحقیقاتی و مشاوره‌ای) برای تعیین توزیع مکانی این فرسایش در سطح کشور مورد توجه نبوده است. تنها بررسی یکپارچه‌سازی شده متعلق به صوفی و همکاران (۲۰۲۰) مبنی بر اینکه فرسایش خندقی در عرصه‌های بزرگ با مساحت بیشتر از ۵۰۰ هکتار در سطح کشور، ۱/۴۲ میلیون هکتار گزارش شده، بوده است. همچنین به منظور اولویت‌بندی مناطق اجرای عملیات حفاظت خاک نیاز است تا از جنبه خطر و آسیب‌پذیری نیز بهره‌گیری شود. به عنوان نمونه بر پایه مدل‌های تجربی و امتیاز عاملی همچون MPSIAC<sup>۷</sup> با در نظر گرفتن شرایط متوسط در یک منطقه (ثبات دیگر عامل‌ها) و تغییر امتیاز وضعیت عامل‌های X8, X9 ناشی از حضور فرسایش خندقی مقدار تولید رسوب برآوردی مدل تا حد ۲/۵ برابر افزایش خواهد داشت. در صورت لحاظ کردن عوامل دیگر مانند فرسایش‌پذیری خاک، شیب و دیگر شرایط، قدر مسلم این مقدار بسیار بیشتر خواهد شد. به عنوان نمونه افزایش مقدار فرسایش در منطقه دشتیاری در محدوده اراضی متأثر از این فرسایش طی دوره ۸۸-۱۳۳۵ به مقدار ۱۵۶ میلیون تن برآورد شده است.

با توجه به مطالب گفته شده و پژوهش‌های انجام شده، تاکنون اطلاعات یکسان و دقیقی پیرامون گسترش فرسایش خندقی در سطح کشور، اقلیم‌های مختلف و ویژگی‌های اقلیم در حوزه‌های آبخیز وجود ندارد و نظر به ناشناخته بودن خسارت‌های ناشی از فرسایش خندقی در ایران نیاز است تا در ابتدا نسبت به ارزیابی وضعیت موجود آن در سطح کشور در قالب اقلیم‌های مختلف و حوزه‌های آبخیز اقدام شود و سپس نسبت به حساسیت و آسیب‌پذیری حوزه‌های آبخیز، راهکارهای مؤثری برای کاهش رسوب و کنترل این فرسایش ارائه شود. با توجه به گستره بررسی حاضر که در سطح کشور می‌باشد، بر اساس سهولت دسترسی به اطلاعات، حوزه‌های آبخیز درجه ۲ برای تحلیل داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

بنابراین هدف از پژوهش جاری در درجه اول تعیین و تدقیق وضعیت فرسایش خندقی در سطح کشور است و سپس نقش ویژگی‌های اقلیمی بر تغییرات الگوی مکانی آن، مورد واکاوی قرار گرفت. در پایان نسبت به اولویت‌بندی اجرای عملیات حفاظت خاک و آبخیزداری در برابر فرسایش خندقی در حوزه‌های آبخیز درجه ۲ با توجه به آسیب‌پذیری سرزمین به این فرسایش اهتمام ورزیده شد.

## ۲. مواد و روش‌ها

این تحقیق در سطح کل کشور ایران انجام شد. برای تهیه و تدقیق نقشه پراکنش خندق‌ها بر پایه نتایج بررسی‌های قبلی اقدام شد. در مرحله نخست برای شناسایی مناطق تحت تأثیر فرسایش خندقی از طریق جستجوهای اینترنتی، کتابخانه‌ای و فردی بر روی گزارشات، پایان‌نامه‌ها

<sup>1</sup> Poesen

<sup>2</sup> Martínez-Casasnovas

<sup>3</sup> Shellberg

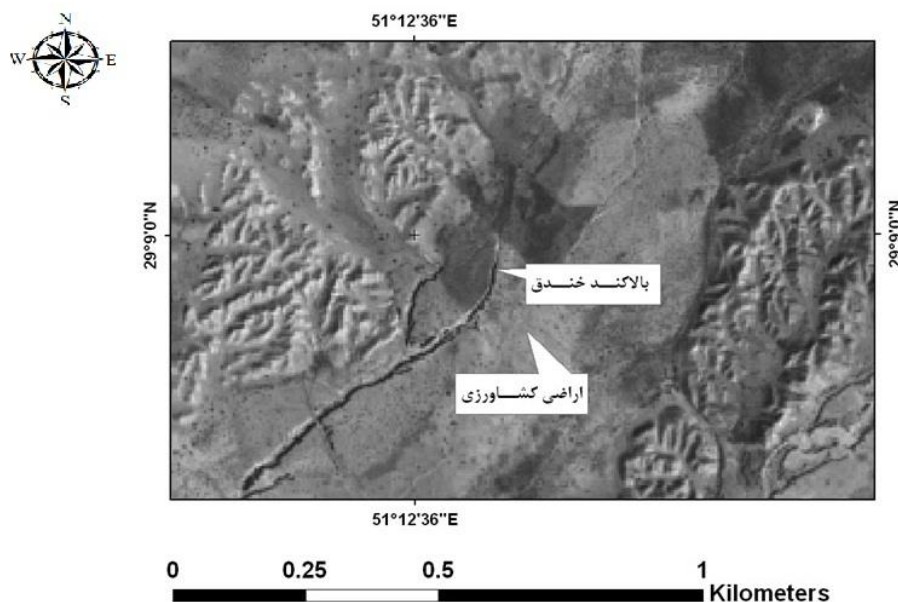
<sup>4</sup> Martín-Moreno

<sup>5</sup> Vanmaercke

<sup>6</sup> Gourfi

<sup>7</sup> Modified Pacific SouthWest Inter-Agency Committee

و سایر منابع مرتبط، آمارهای مورد نیاز فراهم و در طول اجرای این پژوهش به تکمیل آن پرداخته شد (جدول ۱). در مجموع نزدیک به ۱۷۱ منبع علمی معتبر مورد ارزیابی قرار گرفت. با مکاتبه یا ارتباط مستقیم با محققان، استادان و کارشناسان در زمینه فرسایش خندقی نسبت به جمع‌آوری موقعیت مکانی موقعیت‌های موجود فرسایش خندقی در سطح کشور اقدام شد. به‌عنوان مثال مراجعه به سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور و پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری و بهره‌گیری از متون منتشرشده علمی، پایگاه اولیه وضعیت فرسایش خندقی تهیه شد. لازم به ذکر است که منابع و اطلاعات بر اساس معیارهایی همچون وجود کار میدانی، بهره‌گیری از عکس هوایی موجود (۴۰۰۰۰) و پایگاه گوگل ارث مورد ارزیابی اولیه قرار گرفتند. در ادامه با بررسی تفسیری مبتنی بر پایگاه گوگل ارث در مناطق بررسی شده و همچنین بهره‌گیری از نقشه موقعیت سازندهای حساس به فرسایش در ایران (سازندهای مارن، گل‌سنگ و لس و شیل) به طور مجدد اراضی خندقی و مرز آنها مورد بازبینی قرار گرفت. لازم به ذکر است که فرسایش خندقی یک پدیده‌ای است که از نظر ابعاد و شکل در منابع مختلف با معیارهای مختلفی تعریف شده است. لیکن بر پایه بیشتر تحقیقات (احمدی، ۲۰۰۷؛ نظری سامانی، ۲۰۱۷) منظور از خندق اشکال خطی حاصل از فرسایش آبی با وجود بالاکنده<sup>۱</sup> است که اغلب، نقطه شروع آن در اراضی کم شیب رخ می‌دهد (شکل ۱).



شکل ۱. فرسایش خندقی شامل کانال اصلی و بالاکنده خندق (head cut)

اصولاً در تهیه نقشه اشکال سطح زمین و نمایش آن بر پایه مقیاس و شاخص MLD<sup>۲</sup> عمل می‌شود. بنابراین حداقل سطح قابل نمایش و پیوستگی عارضه و پدیده، مورد نظر می‌باشد. لذا چون خندق عارضه طولی می‌باشد بنابراین متصل بودن بالاکنده و بدنه خندق، ملاک عمل است. همچنین بر پایه مقیاس مورد نظر (۵۰۰۰۰۰)، مساحت کمتر از ۶۲۵ هکتار قابل نمایش نخواهد بود و حداقل فاصله بین دو پلیگون دارای فرسایش خندقی باید بیشتر از ۳-۵ متر در مقیاس نقشه باشد. همچنین لازم به ذکر است که فرسایش خندقی به صورت یک مجموعه از اشکال خطی در سرزمین گسترش می‌یابد و بنابراین حالت شبکه‌ای و پیوستگی بین این عارضه مورد نظر است. شاخص تراکم خندق در واحد سطح برای بیان شدت فرسایش خندقی استفاده می‌شود.

<sup>۱</sup> Head cut

<sup>۲</sup> Minimum legible delineation

جدول ۱. تعداد منابع مورد بررسی پیرامون موضوع پژوهش

منابع	تعداد مورد بررسی
مقاله‌های داخلی	۷۷
مقاله‌های بین الملل	۳۰
پایان نامه‌ها	۴۰
گزارش‌های طرح‌های پژوهشی	۳۱

لازم به ذکر است که در بیشتر بررسی‌های قبلی کل محدوده یا حوزه آبخیز دارای عارضه فرسایش خندقی مورد توجه بوده است ولی در تدقیق نقشه موجود سعی شد تنها بر سطوحی که این عارضه و بالاکنند<sup>۱</sup> وجود دارد مورد توجه قرار گیرد. این بررسی شامل سه بخش تعیین وسعت فرسایش خندقی در استان‌های مختلف، اقلیم‌های مختلف و حوزه‌های درجه ۲ تقسیم‌بندی تماب است. به منظور ارزیابی رابطه بین شرایط اقلیمی، مساحت و مقدار فرسایش و رسوب در سطح حوزه‌های آبخیز درجه ۲ تماب براساس آخرین نقشه‌های تهیه شده توسط شرکت مدیریت منابع آب ایران و همچنین گزارش‌های به‌روزرسانی وضعیت منابع آب حوزه‌های آبخیز درجه ۲ و تعیین مقدار فرسایش و رسوب مبتنی بر ایستگاه‌های هیدرومتری و مدل EPM<sup>۲</sup> (عرب‌خداری و همکاران، ۲۰۱۶) عمل شد. با توجه به اینکه درصد فراوانی نسبی به تنهایی نمی‌تواند برای تعیین اهمیت به کار برده شود بر پایه شاخص تراکم نسبی عمل شد. شرح جزئی گام‌های انجام پژوهش به قرار زیر است:

## ۱-۲. میزان گسترش فرسایش خندقی در استان‌های مختلف

برای این منظور نقشه پراکنش فرسایش خندقی و نقشه استان‌های کشور روی هم‌گذاری شد و میزان فرسایش خندقی در هر استان مشخص شد و سپس میزان تراکم نسبی از طریق رابطه ۱ محاسبه شد.

$$\text{رابطه ۱)} \quad \text{تراکم نسبی} = \frac{\text{درصد مساحت فرسایش خندقی به مساحت استان}}{\text{درصد مساحت استان در کشور}}$$

## ۲-۲. بررسی میزان گسترش فرسایش خندقی در اقلیم‌های مختلف

برای این بررسی ابتدا از نقشه اقلیم کل کشور بر اساس روش دومارتن (خلیلی و حجام، ۱۳۷۱) و به روز شده در مطالعات بهنگام سازی (۱۳۹۴) استفاده شد و با روی هم‌گذاری نقشه‌های پراکنش فرسایش خندقی و اقلیم در سطح کشور، مساحت فرسایش خندقی در هر اقلیم مشخص شد. نهایتاً ارتباط بین اقلیم‌های مختلف و فراوانی خندق‌ها مورد بررسی و محاسبه قرار گرفت. برای بررسی میزان فرسایش خندقی بر اساس مساحت هر اقلیم در سطح کشور نیز از شاخص تراکم نسبی استفاده گردید که در رابطه ۲ آورده شده است:

$$\text{رابطه ۲)} \quad \text{تراکم نسبی} = \frac{\text{درصد مساحت فرسایش خندقی به مساحت اقلیم}}{\text{درصد مساحت اقلیم در کشور}}$$

## ۳-۲. ارزیابی میزان گسترش فرسایش خندقی در حوزه‌های آبخیز درجه ۲

برای این بررسی نقشه پراکنش فرسایش خندقی و نقشه حوزه‌های آبخیز درجه ۲ با هم تلفیق شدند و مساحت فرسایش خندقی در هر حوزه آبخیز درجه ۲ مشخص گردید سپس به منظور از بین بردن تأثیر عامل مساحت در تغییر میزان فرسایش خندقی از شاخص تراکم

<sup>۱</sup> Head cut

<sup>۲</sup> Erosion Potential Method

نسبی نیز محاسبه شد. که در رابطه ۳ آورده شده است

$$\text{تراکم نسبی} = \frac{\text{درصد مساحت فرسایش خندقی به مساحت حوزه آبخیز درجه ۲}}{\text{درصد مساحت حوزه درجه دو کشور}} \quad (\text{رابطه ۳})$$

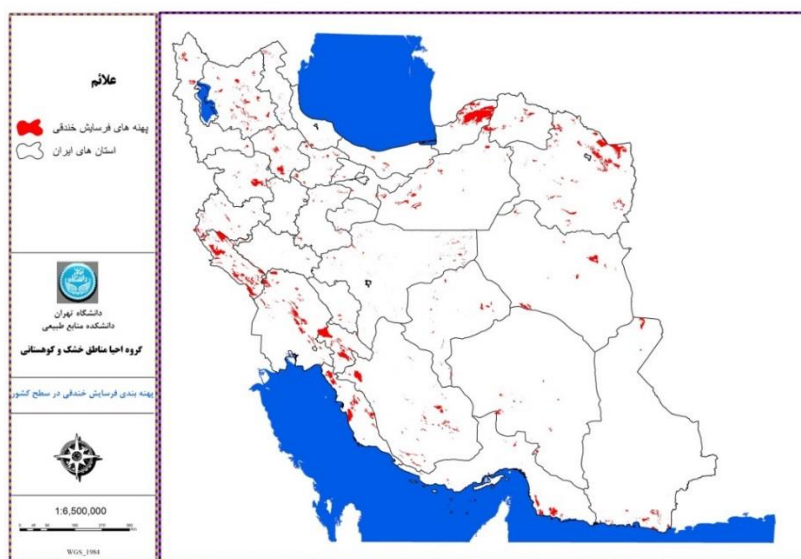
## ۲-۴. واکاوی همبستگی بین فرسایش خندقی با برخی عوامل اقلیمی، فرسایش و رسوب در حوزه‌های آبخیز درجه ۲ تماب

به منظور بررسی رابطه بین ویژگی‌های اقلیمی و فرسایش و رسوب کل و رسوب ویژه با مساحت فرسایش خندقی در حوزه‌های آبخیز درجه ۲ از رهیافت تجزیه رگرسیون استفاده شد. در این بررسی مساحت فرسایش خندقی به عنوان متغیر وابسته و ویژگی‌های اقلیمی از قبیل میانگین بارندگی، دما و تبخیر و تعرق پتانسیل به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شد. همچنین در بررسی دیگر مقدار رسوب کل و رسوب ویژه به عنوان متغیر وابسته و مساحت فرسایش خندقی به عنوان متغیر مستقل بررسی شد. در این تحلیل بر اساس شاخص ضریب تبیین و ضرایب رگرسیون نسبت به تعیین شدت و ماهیت رابطه پرداخته شد.

## ۳. یافته‌های پژوهش

### ۳-۱. بررسی پراکنش خندق‌ها در استان‌های مختلف

در شکل ۲ وضعیت فرسایش خندقی در سطح کشور آورده شده است. بررسی‌ها نشان داد که میزان کل فرسایش خندقی در سطح کشور ۴۴۶۴۹۷۸ هکتار بوده است که بیشترین میزان فرسایش خندقی به مساحت ۵۵۴۰۶۸ هکتار در استان خراسان رضوی است. لازم به ذکر است که بر اساس بررسی‌های قبلی وسعت این پدیده تنها در حدود کمتر از نیمی از مقدار سطح به‌دست آمده، بوده است (صوفی و همکاران، ۲۰۲۰) و همچنین در نقشه مذکور کلیه سطح اراضی به عنوان پهنه فرسایش خندقی بیان شده بودند. همان‌طور که از جدول ۲ مشخص است فرسایش خندقی در رتبه‌های بعدی در استان سیستان و بلوچستان به مساحت ۴۲۳۷۹۹ هکتار و نیز استان‌های گلستان، ایلام، خوزستان، بوشهر، فارس، کهگیلویه و بویر احمد، سمنان و آذربایجان شرقی به ترتیب با مساحت‌های ۴۱۸۳۹۳، ۳۵۵۹۲۵، ۳۱۸۵۹۷، ۳۰۹۶۳۹، ۲۹۵۲۳۱، ۲۱۱۴۵۲، ۱۷۸۰۱۶ و ۱۵۷۹۸۳ هکتار مشاهده شده است.



شکل ۲. پراکنش فرسایش خندقی در سطح کشور

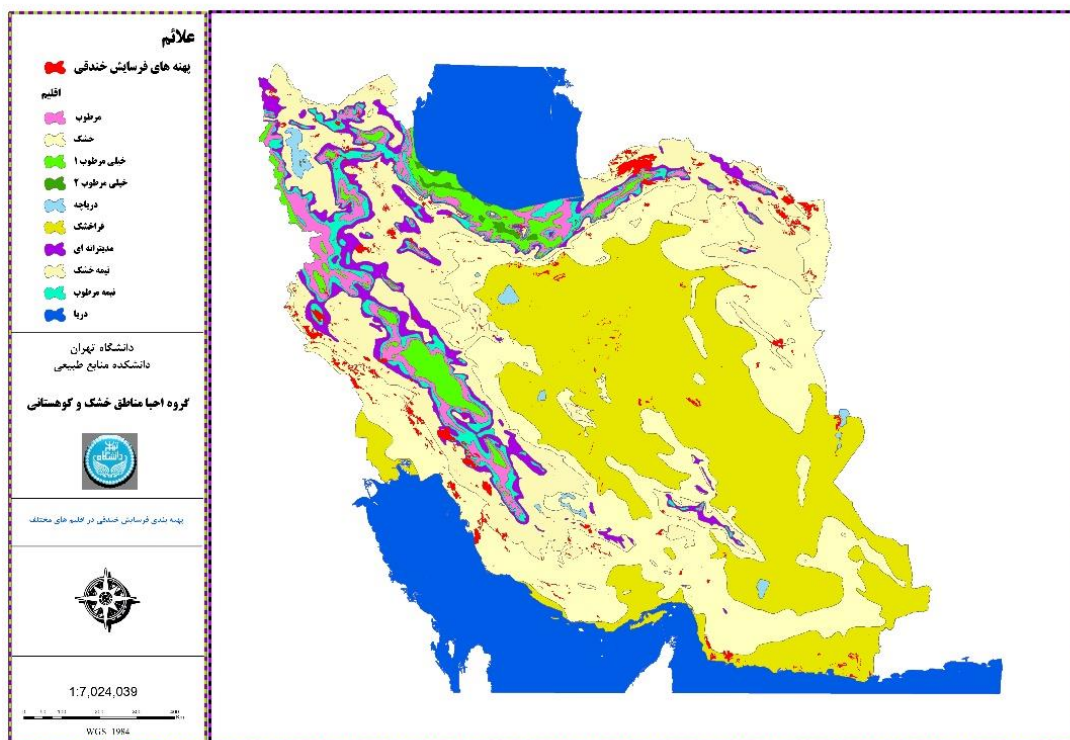
همچنین درصد مساحت فرسایش خندقی نسبت به مساحت هر استان نیز بررسی شد که نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است. بررسی‌ها نشان داد که ۲۰/۴۳ درصد مساحت استان گلستان را فرسایش خندقی دربرگرفته است و سپس به ترتیب استان‌های ایلام و کهگیلویه و بویراحمد با ۱۷/۷۵ و ۱۳/۶۴ درصد پس از استان گلستان بیشترین درصد فرسایش خندقی را نسبت به استان مربوطه نشان می‌دهند. اهمیت فرسایش خندقی در این استان‌ها از یکسو به وضعیت اراضی کشاورزی در استان گلستان و از سوی دیگر سد کرخه در پایین دست استان ایلام می‌باشد.

جدول ۲. درصد مساحت فرسایش خندقی نسبت به مساحت هر استان

نام استان	مساحت استان در کشور (هکتار)	مساحت فرسایش خندقی در هر استان (هکتار)	درصد مساحت فرسایش خندقی به مساحت استان	درصد استان در کشور	تراکم نسبی
آذربایجان شرقی	۴۵۵۷۴۳۲/۶	۱۵۷۹۸۳/۱۳	۳/۴۷	۲/۸	۱/۲۴
آذربایجان غربی	۳۷۴۹۹۲۱/۵	۵۷۰۸۵/۷۱	۱/۵۲	۲/۳	۰/۶۶
اردبیل	۱۷۹۷۷۵۳/۴	۴۹۱۰۰/۱۵	۲/۷۳	۱/۱	۲/۴۸
اصفهان	۱۰۶۸۴۰۰۱/۹	۷۵۵۲۳/۷۷	۰/۷۱	۶/۵	۰/۱۱
البرز	۵۱۸۵۷۶/۸	۶۴۵۵/۵۵	۱/۲۴	۰/۳	۴/۱۵
ایلام	۲۰۰۵۳۴۹/۹	۳۵۵۹۲۵/۱۱	۱۷/۷۵	۱/۲	۱۴/۷۹
بوشهر	۲۲۹۷۲۹۹/۱	۳۰۹۶۳۹/۶۴	۱۳/۴۸	۱/۴	۹/۶۳
تهران	۱۳۵۳۶۷۹/۱	۸۵۲۴/۲۴	۰/۶۳	۰/۸	۰/۷۹
چهارمحال و بختیاری	۱۶۲۲۴۹۲/۷	۱۲۳۹۹/۷۴	۰/۷۶	۱/۰	۰/۷۶
خراسان جنوبی	۱۴۸۹۵۳۹۳/۸	۱۰۸۰۳۸/۸۴	۰/۷۳	۹/۱	۰/۰۸
خراسان رضوی	۱۱۷۵۳۱۸۶/۱	۵۵۴۰۶۸/۴۲	۴/۷۱	۷/۲	۰/۶۵
خراسان شمالی	۲۸۲۹۲۱۰/۲	۱۲۲۰۶۰/۹۶	۴/۳۱	۱/۷	۲/۵۴
خوزستان	۶۴۳۶۷۷۴/۵	۳۱۸۵۹۷/۷۵	۴/۹۵	۳/۹	۱/۲۷
زنجان	۲۱۷۴۲۹۹/۰	۱۲۰۷۵۳/۵۸	۵/۵۵	۱/۳	۴/۲۷
سمنان	۹۷۴۵۱۲۷/۱	۱۷۸۰۱۶/۶۹	۱/۸۳	۶/۰	۰/۳۰
سیستان و بلوچستان	۱۷۹۳۶۲۳/۹	۴۲۳۷۹۹/۱۳	۲/۳۶	۱۱/۰	۰/۲۱
فارس	۱۲۲۳۷۱۲۳/۲	۲۹۵۲۳۱/۴۲۱	۲/۴۱	۷/۵	۰/۳۲
قزوین	۱۵۶۰۵۲۰/۵	۴۸۶۷۴/۰۲۵۹۹	۳/۱۲	۰/۹	۳/۴۷
قم	۱۱۴۴۲۱۹/۰	۱۴۲۱۳/۱۴۳۲	۱/۲۴	۰/۷	۱/۷۷
کردستان	۲۹۱۱۳۵۱/۵	۱۱۹۶۷۹/۰۰۳	۴/۱۱	۱/۷	۲/۴۲
کرمان	۱۷۹۷۸۴۴۲/۴	۹۸۴۷۰/۰۶۸۹۱	۵/۴۸	۱۱/۰	۰/۵۰
کرمانشاه	۲۵۰۵۴۸۴/۷	۷۶۱۲۸/۴۸۵۹۳	۳/۰۴	۱/۵	۲/۰۳
کهگیلویه و بویراحمد	۱۵۴۹۸۸۴/۴	۲۱۱۴۵۲/۲۶۲	۱۳/۶۴	۰/۹	۱۵/۱۶
گلستان	۲۰۴۷۴۳۶/۹	۴۱۸۳۹۳/۶۴۰۵	۲۰/۴۳	۱/۲	۱۷/۰۳
گیلان	۱۴۰۳۲۵۹/۱	۷۲۴۳/۷۸۲۲۴۷	۰/۵۲	۰/۸	۰/۶۵
لرستان	۲۷۹۹۶۹۶/۶	۳۱۸۳۶/۹۴۹۶۸	۱/۱۴	۱/۷	۰/۶۷
مازندران	۲۳۷۴۳۱۵/۹	۲۳۷۱۰/۴۶۴۳۶	۱/۰۰	۱/۴	۰/۷۱
مرکزی	۲۹۱۵۴۱۲/۰	۳۳۳۷۵/۷۰۹۹	۱/۱۴	۱/۸	۰/۶۴
هرمزگان	۷۱۳۰۴۷۰/۷	۱۳۶۰۵۹/۵۰۳۴	۱/۹۱	۴/۴	۰/۴۳
همدان	۱۹۳۳۳۴۹/۳	۳۵۰۹۶/۰۵۴۴۸	۱/۸۲	۱/۱	۱/۶۵
یزد	۷۳۵۰۲۰۵/۶	۵۷۴۴۱/۱۶۱۶۶	۰/۷۸	۴/۵	۰/۱۷

**۲-۳. بررسی پراکنش خندق‌ها در اقلیم‌های مختلف**

در شکل ۳ و جدول ۳ پراکنش فرسایش خندقی در اقلیم‌های مختلف آورده شده است. بررسی‌ها نشان داد که بیشترین میزان فرسایش خندقی به مساحت ۱۴۸۶۳۹۶/۳۴ هکتار در اقلیم خشک می‌باشد.



شکل ۳. پراکنش فرسایش خندقی در اقلیم‌های مختلف

همچنین تراکم نسبی فرسایش خندقی در اقلیم‌های مختلف بررسی شد که اقلیم نیمه مرطوب با ۱/۴۵، بیشترین تراکم نسبی را داشته است.

جدول ۳. مساحت و درصد فرسایش خندقی نسبت به مساحت اقلیم‌های مختلف در سطح کشور

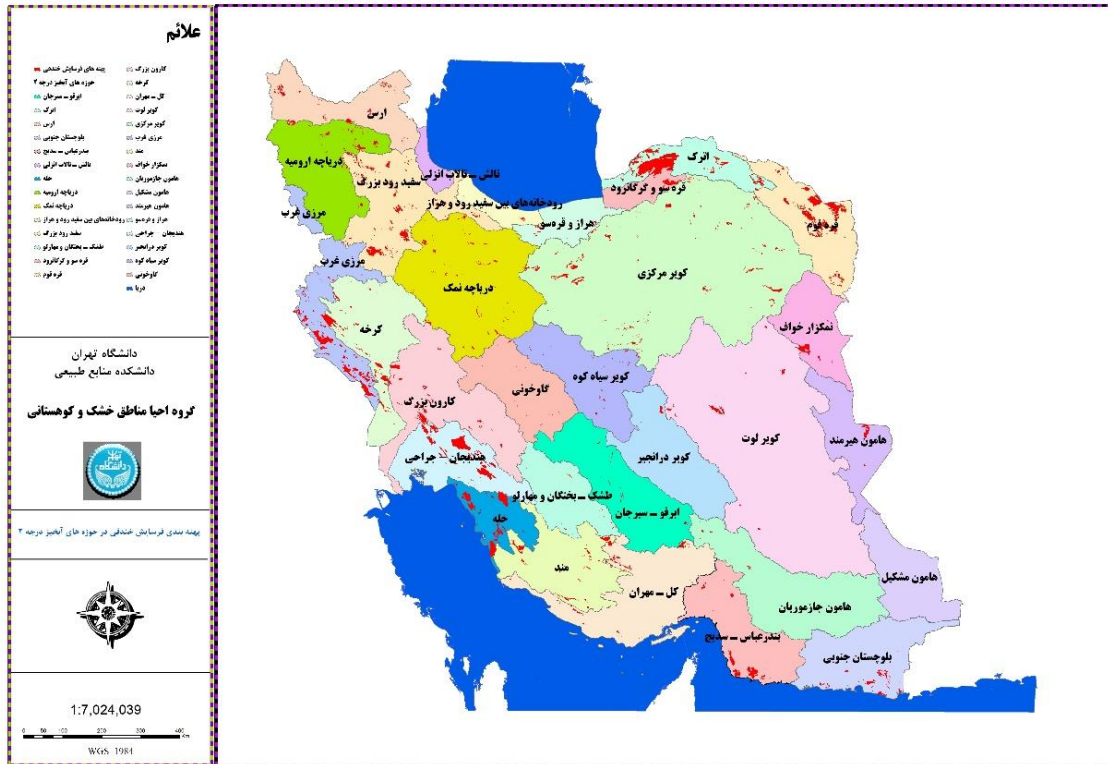
اقلیم	مساحت اقلیم در کشور (هکتار)	مساحت فرسایش خندقی در هر اقلیم (هکتار)	درصد مساحت فرسایش خندقی به مساحت اقلیم	درصد اقلیم در کشور	تراکم نسبی
مرطوب	۵۹۲۹۱۰۷/۱	۶۱۳۲۵/۶۵	۱/۰۳	۳/۶	۰/۲۸
خشک	۴۷۴۹۶۸۴۲	۱۴۸۶۳۹۶/۳۴	۳/۱	۲۹/۳	۰/۱۰
خیلی مرطوب ۱	۴۹۷۸۰۸۹/۶	۱۵۴۶۱/۱۸	۰/۳۱	۳/۰	۰/۱۰
خیلی مرطوب ۲	۳۵۸۷۹۱/۵	۷۵۵/۹۱	۰/۲۱	۰/۲	۱/۰۵
فراخشک	۵۷۱۵۵۱۹۹/۱	۷۶۷۷۳/۲۹	۱/۳۴	۳۵/۳	۰/۰۳۸
مدیترانه ای	۸۴۵۷۳۷۰/۹	۳۲۹۳۹۴/۸۲	۳/۸۹	۵/۲	۰/۷۴
نیمه خشک	۳۱۷۱۴۲۴۲/۹	۱۵۱۷۳۰۲/۲۶	۴/۷۸	۱۹/۶	۰/۲۴
نیمه مرطوب	۵۶۷۱۸۰۶/۱	۲۸۸۱۷۹/۵۹	۵/۰۸	۳/۵	۱/۴۵

### ۳-۳. بررسی پراکنش خندق‌ها در حوزه‌های آبخیز درجه ۲ تماب

در جدول ۴ و شکل ۴ میزان فرسایش خندقی در حوزه‌های آبخیز درجه ۲ آورده شده است. حوزه آبخیز قره‌قوم با مساحت ۲۳۳۰۳۶/۹۸ هکتار بیشترین میزان فرسایش خندقی را دارد و حوزه آبخیز قره‌سو و گرگان بیشترین مقدار تراکم نسبی با مقدار ۲۲/۲۷ را داشت. در حوزه آبخیز قره‌قوم وجود اقلیم خشک و نیمه‌خشک و سازندهای سست و حساسی همچون لس، شیل و مارن مبین وجود مساحت زیاد فرسایش خندقی است. در حوزه آبخیز قره سو گرگان نیز حضور اراضی کشاورزی بسیار زیاد و همچنین سازندهای زمین‌شناسی سست از جمله سنگ آهک مارنی، شیل و لس موجب مستعدشدن اراضی به حضور فرسایش خندقی شده‌است.

جدول ۴. مساحت و درصد فرسایش خندقی در حوزه‌های آبخیز درجه ۲ در سطح کشور

تراکم نسبی	درصد حوزه آبخیز درجه ۲ در کشور	درصد مساحت فرسایش خندقی به مساحت حوزه آبخیز درجه ۲	مساحت فرسایش خندقی در هر حوزه آبخیز درجه ۲ (هکتار)	مساحت حوزه آبخیز درجه ۲ در کشور (هکتار)	حوزه آبخیز درجه ۲
۰/۵۴	۳/۱	۱/۶۸	۸۷۴۷۴/۲۹	۵۱۹۲۹۸۰/۳	دریاچه ارومیه
۰/۷۴	۱/۹	۱/۴۱	۴۴۶۰۸/۴۴	۳۱۴۵۴۰۷/۰	طشک - بختگان و مهارلو
۰/۲۴	۵/۷	۱/۳۸	۱۲۸۵۵۵/۲۸	۹۲۷۴۹۳۸/۵	دریاچه نمک
۰/۷۷	۲/۰	۱/۵۵	۵۱۱۶۰/۲۴	۳۳۰۰۵۶۴/۱	نمکزار خواف
۸/۲۲	۱/۶	۱۳/۱۵	۳۴۸۵۸۶/۱۷	۲۶۴۹۷۱۹/۴	اترک
۱/۱۵	۲/۴	۲/۷۶	۱۱۰۶۶۷/۹۷	۴۰۰۸۵۳۹/۵	ارس
۱۲/۰۲	۱/۳	۱۵/۶۳	۳۳۳۵۶۵/۱۴	۲۱۳۳۲۵۷/۸	حله
۰/۶۸	۴/۰	۲/۷۴	۱۸۲۵۸۹/۲۰	۶۶۵۲۴۸۰/۱	کارون بزرگ
۱/۲۱	۳/۱	۳/۷۶	۱۹۵۰۶۹/۹۷	۵۱۷۹۰۸۱/۱	کرخه
۱/۰۵	۲/۹	۳/۰۷	۱۴۷۴۶۸/۷۶	۴۷۹۷۸۰۶/۷	مند
۱/۰۱	۱/۱	۱/۱۲	۲۱۰۴۱/۶۸	۱۸۷۸۷۴۳/۰	هراز و قره سو
۲/۰۲	۳/۰	۶/۰۸	۲۹۸۴۹۸/۱۹	۴۹۰۸۵۹۰/۸	بلوچستان جنوبی
۰/۹۸	۲/۷	۲/۶۷	۱۲۰۶۸۸/۲۶	۴۵۱۸۴۳۶/۶	بندرعباس و سدیج
۰/۹۱	۰/۶	۰/۵۵	۶۰۰۲/۶۴	۱۰۹۰۸۲۱/۸	سفید رود - هرز
۳/۲۱	۲/۵	۸/۰۳	۳۲۷۴۶۹/۲۷	۴۰۷۷۷۱۴/۶	جراحی و هندیجان
۲۲/۲۷	۰/۸	۱۷/۸۹	۲۳۳۰۳۶/۹۸	۱۳۰۱۹۸۵/۷	قره سو و گرگانرود
۰/۴۴	۳/۸	۱/۷۱	۱۰۷۹۴۰/۱۱	۶۳۲۵۱۶۵/۸	کل، مهران
۳/۳۱	۲/۴	۷/۹۵	۳۱۲۰۶۲/۲۴	۳۹۲۲۹۵۲/۵	مرزی غرب
۱/۵۸	۳/۶	۵/۷۱	۳۳۸۷۹۸/۰۸	۵۹۲۷۰۷۶/۸	سفیدرود بزرگ
۳/۷۲	۲/۷	۱۰/۰۶	۴۴۶۰۶۰/۲۵	۴۴۳۱۵۵۴/۱	قره قوم
۰/۱۷	۳/۵	۰/۶۲	۳۵۵۴۴/۱۳	۵۷۱۱۶۹۳/۵	ابرقو - سیرجان
۰/۱۵	۲/۹	۰/۴۴	۲۱۳۷۰/۳۲	۴۸۴۷۳۱۷/۶	کویر سیاه کوه
۰/۰۲	۱۲/۶	۰/۳۵	۷۲۷۰۵/۴۰	۲۰۶۱۸۸۰۲/۷	کویر لوت
۰/۰۹	۱۳/۹	۱/۲۵	۲۸۳۷۱۳/۷۴	۲۲۶۲۹۶۸۷/۷	کویر مرکزی
۰/۰۸	۳/۱	۰/۲۷	۱۳۷۶۶/۲۹	۵۰۶۷۵۷۱/۵	کویرهای درانجیر
۰/۱۶	۲/۵	۰/۴۲	۱۷۲۰۹/۳۹	۴۱۴۴۶۵۹/۵	گاوخونی
۰/۲۳	۴/۲	۰/۹۸	۶۸۴۱۴/۷۵	۶۹۷۶۹۵۵/۷	هامون جازموربان
۰/۹۳	۲/۰	۱/۹۲	۶۴۴۹۶/۱۱	۳۳۵۴۱۰۴/۴	هامون هیرمند



شکل ۴. پراکنش فرسایش خندقی در حوزه‌های آبخیز درجه ۲

### ۳-۴. بررسی همبستگی بین سطح فرسایش خندقی با ویژگی‌های اقلیمی و رسوب

به منظور ارزیابی رابطه فوق کلیه داده‌ها در قالب حوزه‌های آبخیز درجه دو مورد تلفیق و تحلیل قرار گرفت. در جدول (۵) ویژگی‌های دما، بارش و تبخیر و تعرق در حوزه‌های درجه ۲ ارائه شده است.

نتایج تجزیه همبستگی بین ویژگی‌های اقلیمی و فرسایش خندقی نشان داده رابطه معنی‌داری بین متغیرهای اقلیمی با سطح فرسایش خندقی وجود دارد ( $p < 0.05$ ). که رابطه رگرسیون بین مساحت فرسایش خندقی و ویژگی‌های اقلیمی (میانگین بارندگی، میانگین تبخیر و تعرق و میانگین دما) به شرح زیر است (رابطه ۴):

$$Y = -93/33 X_1 + 8748/52 X_2 + 336/22 X_3 + 129118/38 \quad \text{(رابطه ۴)}$$

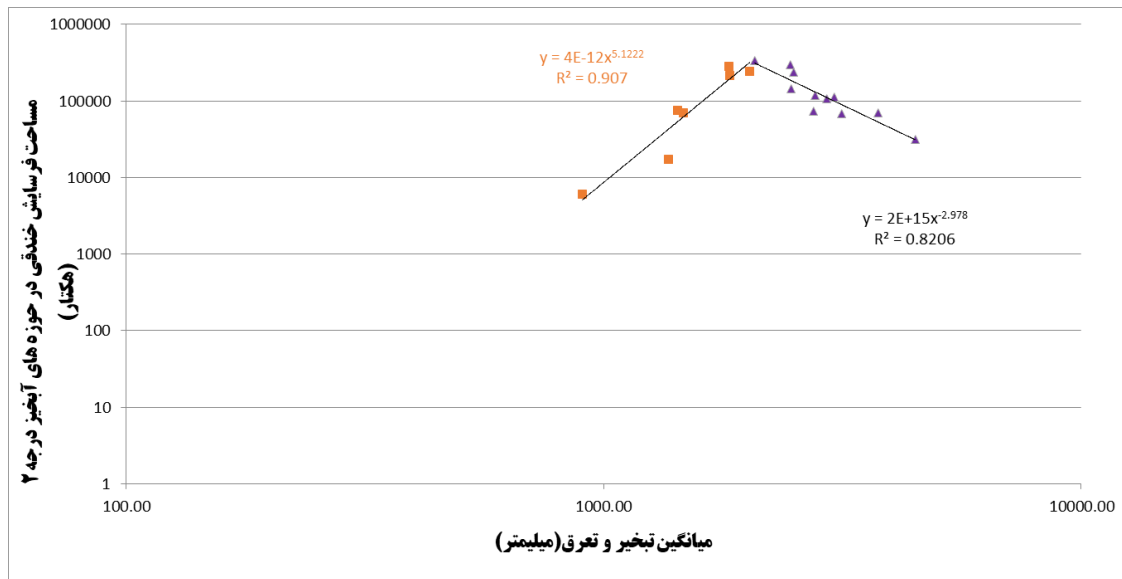
که در آن  $y$  معادل مساحت فرسایش خندقی در حوزه‌های آبخیز درجه ۲،  $X_1$  معادل میانگین تبخیر و تعرق،  $X_2$  معادل میانگین دما و  $X_3$  معادل میانگین بارندگی است.

ویژگی‌های اقلیمی به دلیل تأثیر بر جریان متمرکز آب‌سطحی و زیرسطحی، فرایند فرسایش خندقی را زیر تأثیر قرار می‌دهند (Anderson et al., 2021). با افزایش میزان بارندگی، مساحت فرسایش خندقی نیز افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش میزان بارندگی، پتانسیل تولید رواناب سطحی نیز افزایش می‌یابد و به تبع آن قدرت تخریب آب بیشتر خواهد شد. در مورد دما نیز با افزایش دما، به دلیل افزایش تبخیر و تعرق، مقدار آب در دسترس برای گیاهان کمتر و در نتیجه به دلیل کاهش پوشش گیاهی، مقاومت خاک کمتر خواهد شد و بنابراین شرایط برای رخداد خندق بیشتر خواهد شد.

رابطه فرسایش با عناصر اقلیمی همچون دما و بارش، ماهیتی پیچیده و آستانه‌ای دارد. به بیان دیگر در محدوده مقدار بارش صفر تا ۴۵۰ میلی‌متر با افزایش بارش، مقدار فرسایش افزایش می‌یابد و در محدوده ۴۵۰ تا ۷۰۰ به دلیل ظهور پوشش گیاهی نیمه انبوه رابطه فوق معکوس می‌شود (Morgan, 2005). لذا برای تعیین ماهیت رابطه و آستانه‌های فرسایش نمی‌توان تنها با روش‌های خطی عمل کرد. با توجه به اینکه بین مساحت فرسایش خندقی و میزان تبخیر و تعرق همبستگی معکوس می‌باشد بنابراین بین مساحت فرسایش خندقی و این ویژگی اقلیمی به طور جداگانه تحلیل همبستگی انجام شد (شکل ۵).

جدول ۵. ویژگی‌های اقلیمی در حوزه‌های آبخیز درجه ۲ در سطح کشور (شرکت مدیریت منابع آب، ۱۳۹۴)

میانگین بارندگی (میلی‌متر)	میانگین دما (سانتی‌گراد)	میانگین تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی‌متر)	مساحت فرسایش خندقی (هکتار)	حوزه‌های آبخیز درجه ۲
۳۶۱/۹	۲۲/۵	۲۹۳۳/۷	۱۹۶۵۶۲/۹	حله
۶۳۱/۱	۱۸/۶	۲۴۶۱/۰	۲۹۴۴۳۷/۵۲	جراحی و هندیجان
۱۵۳/۶	۲۷/۵	۲۹۲۶/۵	۱۰۶۷۴۰/۹۹	بندرعباس و سدیح
۱۴۱/۲	۱۹/۹	۳۳۳۸/۱	۹۶۶۰/۲۹	هامون جازموربان
۲۴۶/۷	۱۳/۱	۲۴۰۰/۵	۷۸۵۱۶/۳	دریاچه نمک
۳۱۵/۳	۱۰/۶	۲۰۲۳/۹	۲۴۵۸۴۰/۸	سفیدرود بزرگ
۳۱۰/۷	۷/۴	۱۴۲۷/۰	۷۵۱۸۷/۹	دریاچه ارومیه
۲۹۴/۲	۱۴/۵	۲۰۶۶/۹	۳۳۷۶۲۶/۶	قره قوم
۴۱۷/۸	۱۵/۱	۱۸۳۴/۹	۲۱۷۰۳۴/۸	قره سو و گرگانرود
۲۷۴/۳	۱۵/۳	۱۸۳۱/۰	۲۸۴۸۳۵/۱	اترک
۲۵۴/۴	۱۹/۸	۲۷۴۶/۱	۷۴۱۳۴/۳	کل، مهران
۲۷۱/۴	۲۲/۳	۳۰۴۱/۶	۱۱۲۷۴۰/۵	مند
۴۵۸/۷	۲۱/۷	۲۷۷۲/۴	۱۱۹۲۶۳/۵	کارون بزرگ
۴۲۸/۰	۱۹/۴	۲۴۶۷/۷	۱۴۲۶۸۱/۰	کرخه
۳۶۶/۶	۲۱/۸	۳۰۴۸/۰	۲۹۸۶۰۵/۸	مرزی غرب
۲۶۵/۴	۱۳/۷	۲۱۵۷/۳	۸۲۲۰/۰	طشک - بختگان و مهارلو
۲۵۱/۴	۱۳/۶	۲۹۴۹/۶	۷۱۱۷/۲	گاوخونی
۱۷۹/۳	۱۷/۱	۳۲۰۳/۴	۱۹۸۴۰/۶	ابرقو - سیرجان
۱۱۰/۷	۲۷/۰	۳۱۵۳/۵	۶۸۷۹۵/۲	بلوچستان جنوبی
۱۰۶/۷	۱۹/۰	۲۹۹۹/۸	۲۱۴۰۱/۳	کویر سیاه کوه
۱۶۴/۹	۱۵/۹	۳۲۲۵/۹	۱۱۵۷۴/۴	کویرهای درانجیر
۱۹۳/۶	۱۹/۷	۳۷۵۰/۲	۷۰۳۶۵/۹	کویر لوت
۳۸۷/۳	۲۲/۳	۴۴۹۱/۰	۳۱۶۹۵/۲	هامون هیرمند (گودزره)
۱۸۴/۵	۱۶/۵	۲۵۰۱/۷	۲۳۷۵۲۲/۲	کویر مرکزی
۵۸۵/۱	۷/۴	۱۳۶۴/۷	۱۷۴۶۱/۴	هراز و قره سو
۳۴۵/۹	۸/۷	۱۴۷۰/۶	۶۹۸۰۶/۷	ارس
۲۱۴/۷	۱۲/۳	۲۴۸۸/۴	۴۰۳۲۴/۶	نمکزار خواف
۴۸۶/۹	۸/۷	۹۰۰/۴	۶۰۰۲/۶	سفید رود - هراز



شکل ۵. همبستگی بین فرسایش خندقی و میزان تبخیر و تعرق پتانسیل (بر حسب میلی‌متر) ( $n=28$ )

با توجه به ماهیت الگوی پراکنش تا محدوده تبخیر و تعرق ۲۰۰۰ میلی‌متر، رابطه فرسایش خندقی و تبخیر و تعرق پتانسیل، مستقیم و افزایشی است و بعد از آن رابطه معکوس است. در واقع در ایران مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل زیاد، در مناطق خشک و فراخشک می‌باشد. به بیان دیگر با افزایش مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل، مقدار بارش نیز در ایران کم می‌شود و موجب غلبه فرآیندهای فرسایش بادی بر فرسایش آبی می‌باشد.

همچنین برای درک بهتر خسارت‌های فرسایش خندقی در حوزه‌های آبخیز درجه ۲ بین میزان رسوب کل در هر حوزه آبخیز درجه ۲ و نیز مساحت فرسایش خندقی از روش‌های تحلیل همبستگی بهره‌گیری شد. با توجه به پیچیدگی این رابطه سعی شد تا انواع روش‌های خطی و غیر خطی مورد ارزیابی قرار بگیرد. بنابراین مدل‌های رگرسیونی خطی، لگاریتمی، درجه ۲، مرکب و توانی بررسی شد و مدل توانی بیشترین میزان ضریب تبیین را دارا بود.

نتیجه تجزیه همبستگی بین میزان رسوب کل و سطح فرسایش خندقی نشان داده رابطه معنی‌داری ( $p=0/003$ ) بین رسوب کل با سطح فرسایش خندقی وجود دارد. که رابطه رگرسیون بین مساحت فرسایش خندقی و رسوب کل به شرح زیر است:

$$Y = 19480/94 X^{0/56} \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن  $Y$  معادل رسوب کل بر حسب تن در سال؛  $X$  معادل سطح فرسایش خندقی در حوزه‌های آبخیز درجه ۲ بر حسب هکتار است.

همچنین نتیجه تجزیه همبستگی بین مقدار رسوب ویژه و فرسایش خندقی نشان داد رابطه معنی‌داری ( $p=0/006$ ) بین رسوب ویژه با سطح فرسایش خندقی وجود دارد (رابطه ۶).

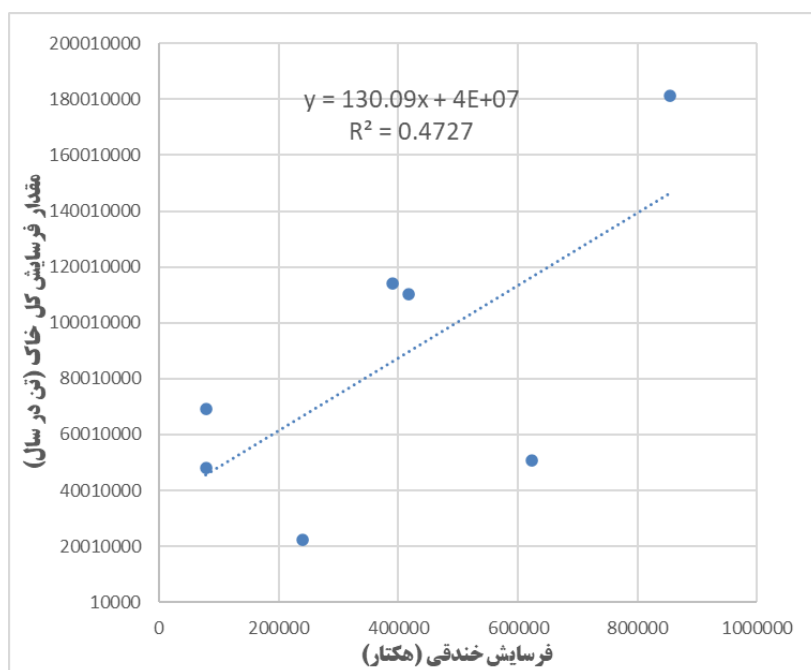
$$Y = 0/001 X + 209/81 \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در آن  $Y$  معادل رسوب ویژه بر حسب تن بر کیلومتر مربع در سال و  $x$  سطح فرسایش خندقی در حوزه‌های آبخیز درجه ۲ است. نظر به اینکه بیشتر ایستگاه‌های هیدرومتری در مناطق کوهستانی واقع شده‌اند و از سوی دیگر برخی در پایین دست سدهای بزرگ هستند لذا در عمل امکان برآورد کل رسوب دشت و کوهستان فراهم نیست. در حالیکه تمرکز فرسایش خندقی بیشتر در مناطق کم‌شیب

می‌باشد، بنابراین برای ارزیابی رابطه بین مقدار فرسایش خاک و مساحت فرسایش خندقی از مقدار اصلاح شده برآورد فرسایش خاک مبتنی بر تلفیق داده‌های بندهای رسوب‌گیر و سدهای مخزنی با نتایج حاصل از نقشه فرسایش خاک EPM استفاده شد (عرب خدری و همکاران، ۲۰۱۶). برای این منظور حوزه‌های آبخیز درجه ۲ بر اساس رفتار رسوبدهی به هفت منطقه همگن تقسیم‌بندی شد. نتایج رابطه همبستگی بین فرسایش خاک و سطح فرسایش خندقی در این حالت حاکی از رابطه معنی‌دار ( $R^2 = 47\%$ ) است (شکل ۶).

$$Y = 130.09x + 40000000 \quad \text{رابطه (۷)}$$

که در این رابطه  $x$  معادل مساحت فرسایش خندقی بر حسب هکتار و  $y$  معادل مقدار فرسایش خاک بر حسب تن در سال است. در واقع با افزایش یک واحد مساحت فرسایش خندقی مقدار فرسایش خاک در سطح حوزه‌های آبخیز تا حد  $130.09$  واحد افزایش می‌یابد.



شکل ۶. همبستگی بین فرسایش خاک و فرسایش خندقی

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش ضمن بررسی کلیه منابع چاپ شده و تدقیق زمینی و میدانی، بعد از دو دهه نقشه وضعیت فرسایش خندقی در سطح کشور تهیه و تدقیق شد. یافته‌های نشان می‌دهد که مساحت فرسایش خندقی حدود  $4464978$  هکتار است، که معادل حدود ۳ درصد از مساحت کشور ایران است. از آنجائیکه از منظر طبقه‌بندی کمی شدت فرسایش خندقی عدد آستانه  $2/2\%$  معادل طبقه با شدت زیاد فرسایش خندقی است و از منظر تکامل سرزمین فرسایش خندقی می‌تواند تا  $15-10$  درصد سطح یک حوزه آبخیز را به خود اختصاص دهند (احمدی، ۱۳۸۵)، بنابراین وضعیت فرسایش خندقی در سطح ایران در شرایط حاد قرار دارد و نیازمند توجه به این شکل تشدید از تخریب سرزمین می‌باشد. البته تغییرات مکانی آن در مناطق مختلف ایران به دلیل گوناگونی شرایط محیطی دارای ضریب تغییرات بسیار زیادی است. از طرف دیگر نتایج نشان داد که تنها بر پایه شاخص مساحت نسبی نمیتوان اهمیت یک عامل را تعیین کرد و نیاز است تا از

شاخص‌های دیگر مانند نسبت تراکمی مساحت خندق استفاده کرد. فرسایش خندقی به منزله مخاطره طبیعی در ایران از این جهت حائز اهمیت است که خسارات فراوانی را از طریق هدررفت خاک و انباشت رسوبات در مخزن سدهای ذخیره‌ای، کانال‌های آبرسانی، بستر رودخانه‌ها و سطح اراضی کشاورزی به کشور وارد می‌آورد.

همان‌طور که در بخش نتایج بیان شد بیشترین میزان فرسایش خندقی مربوط به استان‌های خراسان رضوی و گلستان به ترتیب با مساحت ۴۳۴۳۸۰ و ۳۹۷۱۴۴ هکتار می‌باشد. از دلایل فراوانی خندق در این دو استان، وجود سازندهای حساس به فرسایش مانند لس‌ها به عنوان مهمترین عامل، شناخته شده است. وجود تشکیلات حساس با میان‌لایه‌های شیل بیشترین اثرگذاری را در ایجاد خندق‌ها در منطقه شورلق خراسان رضوی داشته است (مهربان و همکاران، ۲۰۱۷). وجود سازندهای حساس کواترنری و به ویژه لس‌ها، سازندهای شیل و مارن در کنار تراکم زیرساخت جاده‌ای و اراضی کشاورزی و مراتع فقیر بیشترین تأثیر را بر حساسیت به فرسایش خندقی در حوزه آبخیز شمال شرق ایران داشتند (عمادالدین و همکاران، ۲۰۲۱؛ اسدی نلیوان و همکاران، ۲۰۲۳). اگرچه بر پایه مساحت نسبی، دو استان خراسان رضوی و گلستان در جایگاه اول مساحت فرسایش خندقی هستند لیکن بر پایه شاخص تراکم نسبی، استان‌های ایلام و کهگیلویه و بویراحمد دارای نسبت بیشتری هستند که علت مساحت بالای فرسایش خندقی در این استان‌ها که در زون زاگرس قرار دارند را می‌توان وجود سازندهای آغاجاری، گچساران، ایلام و مارن‌های گچی و نمکی در کنار شرایط اقلیمی بیان کرد (مرادی، ۲۰۱۲).

بر پایه یافته‌ها، با اتکا به روش دومارتن هشت نوع اقلیم شامل: خیلی مرطوب ۱، خیلی مرطوب ۲، نیمه‌مرطوب، مرطوب، خشک، مدیترانه‌ای، نیمه‌خشک و فراخشک در ایران وجود دارد؛ که بیشترین گسترش فرسایش خندقی در اقلیم خشک با مساحت ۱۱۲۵۱۳۱ هکتار است. مهمترین دلیل زیاد بودن مساحت فرسایش خندقی در این اقلیم، گسترش زیاد آن در ایران است. حدود ۶۷ درصد کشور دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک است. بنابراین بهتر است برای درک بهتر نقش اقلیم بر فرسایش خندقی، از نتایج شاخص تراکم نسبی استفاده شود. بر پایه شاخص تراکم نسبی اقلیم نیمه مرطوب بیشترین میزان فرسایش خندقی را به خود اختصاص داده است. این نوع اقلیم ترکیبی از ویژگی‌های اقلیم مرطوب و خشک را دارد که باعث تسهیل فرآیندهای فرسایشی می‌شود. ترکیب ناپایداری آب و خاک، همراه با پوشش گیاهی ضعیف و شدت بارش در زمان‌های مشخص، سبب می‌شود که در اقلیم نیمه‌مرطوب میزان فرسایش خندقی زیاد باشد. همچنین در این اقلیم فعالیت‌های انسانی به‌ویژه کشاورزی دیم غالب می‌باشد. در ایران بسیاری از دیمزارها در این محدوده اقلیمی قرار دارند و شخم نامناسب و بدنبال آن تخریب پوشش گیاهی طبیعی خاک، منجر به آغاز جریان سطحی شده و این رواناب موجب گسترش خندق می‌شود. در مطالعات شیخی و همکاران (۲۰۲۴) و نیز شادفر و صوفی (۲۰۲۵) بیشترین رخداد فرسایش خندقی در اقلیم نیمه‌خشک بیان شد که علت عدم تطابق آن با پژوهش حاضر عدم استفاده از شاخص تراکم نسبی بوده است.

در بین حوزه‌های آبخیز درجه ۲، حوزه آبخیز قره‌قوم بیشترین میزان فرسایش خندقی را دارد. با توجه به اینکه بخشی از این حوضه در ایران قرار گرفته است بنابراین امکان قضاوت برای کل حوزه آبخیز فراهم نیست. همچنین استفاده از سطح فرسایش خندقی نمی‌تواند معیار مناسبی باشد و باید مساحت نسبی حوزه‌های آبخیز مورد مقایسه قرار گیرد. بنابراین بر پایه شاخص تراکم نسبی حوزه آبخیز قره‌سو گرگان‌رود، بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است. بیشترین مساحت حوضه به کاربری کشاورزی و کمترین آن به کاربری مسکونی اختصاص دارد؛ در کنار این عامل حضور سازندهای حساس به فرسایش (مانند لس، مارن آهکی و شیل) موجب شده است تا شرایط تشکیل و توسعه فرسایش خندقی در این حوضه زیاد باشد.

نتایج حاصل از همبستگی بین فرسایش خندقی با عناصر اقلیمی دما، بارش و تبخیر و تعرق نشان می‌دهد که با افزایش بارندگی و دما میزان فرسایش خندقی افزایش می‌یابد که با نتایج الیوبر<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۳) و چن<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۲۵) نیز مطابقت دارد. مقادیر متوسط بارندگی و دمای هوا، هر دو از عوامل مؤثر بر وضعیت فرسایش باران، تولید رواناب و نوع و میزان تراکم پوشش گیاهی هستند. در ایران با افزایش بارش و دما شرایط اقلیمی از مناطق خشک و فراخشک به اقلیم‌های مدیترانه‌ای میل می‌کند و در نتیجه حجم، شدت

<sup>1</sup> Olivier

<sup>2</sup> Chen

و انرژی جنبشی رواناب‌های سطحی بیشتر می‌شود و به‌طور غیرمستقیم بر رخداد و گسترش فرسایش خندقی از طریق تأثیر بر پوشش گیاهی و نفوذپذیری خاک مؤثر می‌باشند (پوزن<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۳). علاوه بر این بر پایه ضرایب رگرسیون، رابطه بین تبخیر و تعرق با فرسایش خندقی دارای رابطه پیچیده و آستانه‌ای است. ارزیابی وضعیت پراکنش آبر نقاط نشان‌داد تا محدوده ۲۰۰۰ میلی‌متر تبخیر و تعرق پتانسیل، رابطه سطح خندق و تبخیر و تعرق، مستقیم و افزایشی است و با افزایش میزان تبخیر و تعرق پتانسیل (ناشی از افزایش دما) و کاهش رطوبت خاک موجب کاهش پوشش گیاهی و افزایش فرسایش خندقی خواهد شد (ونمرک و همکاران، ۲۰۱۶)؛ لیکن در محدوده بیشتر از ۲۰۰۰ میلی‌متر به دلیل واقع شدن در مناطق بیابانی و کمبود بارش در عمل سهم فرسایش‌های آبی ناشی از رواناب کمتر می‌شود. بنابراین دلیل کاهش مقدار فرسایش خندقی در محدوده تبخیر و تعرق پتانسیل بیشتر از ۲۰۰۰ میلی‌متر به دلیل متغیر ثانویه شرایط اقلیمی و قرارگرفتن در مناطق خشک و فراخشک و کاهش بارندگی است.

آگاهی از میزان سهم رسوبات ناشی از فرایندهای مختلف در حوزه‌های آبخیز امکان شناسایی، مقایسه و اولویت‌بندی حوزه‌های مختلف را فراهم می‌سازد (حکیم خانی و عرب‌خداری، ۲۰۰۶). بر پایه ارزیابی رگرسیون، بین سطح فرسایش خندقی با سه شاخص رسوب کل، رسوب ویژه و فرسایش کل، رابطه معنی‌داری وجود دارد. به‌طوریکه با افزایش یک واحد سطح فرسایش خندقی میزان رسوبدهی ۲۰۹/۸۱ افزایش یافته است و همچنین با افزایش یک واحد مساحت فرسایش خندقی مقدار فرسایش خاک در سطح حوزه‌های آبخیز تا حد ۱۳۰/۰۹ واحد افزایش می‌یابد و نیز بیشترین شیب خط متعلق به رابطه بین فرسایش کل و سطح فرسایش خندقی است؛ بنابراین انتظار می‌رود با افزایش مقدار فرسایش کل، سهم فرسایش خندقی نیز به شدت افزایش یابد. از این‌رو با توجه به اینکه بیشترین مقدار فرسایش کل در حوزه‌های آبخیز کل مهران، مند، حله، بلوچستان جنوبی و بندرعباس سدیج ارزیابی شده است (عرب‌خداری و همکاران، ۲۰۱۶)، بنابراین نقش فرآیند فرسایش خندقی در این حوضه‌ها بیشتر است.

بر اساس سطح کل فرسایش خندقی، حوزه آبخیز قره‌قوم واقع در استان خراسان رضوی، حوزه آبخیز مرزی‌غرب واقع در استان‌های ایلام، کرمانشاه، کردستان و استان آذربایجان غربی و حوزه آبخیز جراحی‌هندیجان واقع در استان‌های خوزستان، کهگیلویه و بویراحمد و فارس و بر اساس شاخص تراکم نسبی، حوزه‌های آبخیز قره‌سو گرگانرود، حله و اترک دارای بیشترین اهمیت نسبی هستند. با توجه به موارد ذکر شده و اهمیت این فرآیند تخریب، نیاز است تا در برنامه‌های اجرایی و اولویت‌بندی اقدامات مقابله با فرسایش خندقی در سطح حوزه‌های آبخیز نسبت به معرفی شاخص‌ها و معیارهای مناسب برای ارزیابی آسیب‌پذیری سرزمین در مقیاس حوزه آبخیز اهتمام ورزیده شود. در این زمینه توصیه می‌شود تا بر پایه مفهوم ریسک و تلفیق دو معیار آسیب‌پذیری (احتمالی رخداد و شدت رخداد) و عناصر در معرض خطر عمل شود. نظر به گسترده بودن عامل عناصر در معرض خطر می‌توان از شاخص‌های مناسبی برای ارزیابی آسیب‌پذیری بهره‌گیری کرد. برای این منظور با واکاوی نتایج پژوهش‌های قبلی، معیارهایی برای ارزیابی درجه آسیب‌پذیری سرزمین در جدول ۶ گردآوری شد. بنابراین، باید در بررسی‌های بیشتر نسبت به ارائه روشی جامع در سطح کشور برای اولویت‌بندی مناطق مختلف بر پایه احتمال رخداد و درجه آسیب‌پذیری اقدام شود تا بتوان برنامه‌های اجرایی و اولویت‌بندی اقدامات مقابله با فرسایش خندقی انجام شود. به دلیل نبود نقشه یکپارچه دقیق از فرسایش خندقی در سطح کشور و اهمیت مهار و پایش این نوع فرسایش با توجه به میزان خسارت آن، پیشنهاد می‌شود در سطح کشور بر اساس دستورالعمل و ضوابط یکسان با بازه زمانی مشخص این نقشه در تمام استان‌ها و یا حوزه‌های آبخیز تهیه و به‌روزرسانی شود و همچنین مساحت ۴۴۶۴۹۷۸ هکتار فرسایش خندقی بدست آمده در این پژوهش بر اساس منابع، اسناد موجود و مطالعات انجام شده است که مساحت حدود ۱۱۳/۰۳-۵۰۶۷۰ هکتار (معادل ۳۰/۷۴ درصد) از کل ایران را شامل می‌شود؛ بنابراین انتظار می‌رود سطح فرسایش خندقی از این مقدار بیشتر باشد.

جدول ۶. شاخص و عناصر در معرض خطر ارزیابی آسیب‌پذیری سرزمین به فرسایش خندقی

<sup>1</sup> Poesen

نوع خسارت و آسیب پذیری سرزمین	عناصر در معرض خطر	شاخص‌های مؤثر بر آسیب‌پذیری سرزمین به فرسایش خندقی	
تخریب زیستگاه جانوران و گیاهان و کاهش عملکرد محصولات، کاهش ارزش زمین، کاهش عملکرد زمین‌های زراعی، کاهش حاصلخیزی خاک	کشاورزی (زراعت) کشاورزی (باغ) چنگل مرتع	کاربری اراضی	اگبنا <sup>۱</sup> (۲۰۱۲) شیرانی (۲۰۲۱)
خطر جانی و مالی برای انسان‌ها، کاهش ارزش زمین	مناطق مسکونی	تراکم جاده‌ها فاصله از جاده‌ها	شادفر و صوفی (۲۰۲۵)
تخریب جاده‌ها	جاده‌ها و راه‌های مواصلاتی	زیرساخت‌ها و سازه‌ها	گومزگویتبارز <sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۵)
پر شدن مخازن سدها واز دست دادن عملکرد سدها	سدها و سازه‌های آبی	تراکم جمعیت	شادفر و صوفی (۲۰۲۵)
از بین رفتن خطوط انتقال و انرژی	فاصله از خطوط انتقال و انرژی	عرب عامری و همکاران (۲۰۱۹)	شیرانی (۲۰۲۱)، اگبنا (۲۰۱۲)
کم شدن و کوچ جمعیت	جمعیت	آبراهه	ابوتیب <sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۲۳)
تخریب بستر آبراهه	فاصله از آبراهه		
تخریب بستر آبراهه	تراکم آبراهه		

## References

- Aboutaib, F., Krimissa, S., Pradhan, B., Elaloui, A., Ismaili, M., Abdelrahman, K., Eloudi, H., Ouayah, M., Ourribane, M. & 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.
- Ahmadi H. (2007). *Applied geomorphology*, volume 1, water erosion, Tehran University Press. 688 p. (in Persian).
- Anderson, R.L., Rowntree, K.M. & Le Roux, J.L. (2021). *An interrogation of research on the influence of rainfall on gully erosion*. *Catena*, 105482.
- Arabameri, A., Rezaei, K & Yamani, M. (2019). *Assessment land susceptibility to gully erosion using ensemble data-mining techniques (Case study: Shahroud Basin) evidence and fluid and solid inclusion studies*. *Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES*, Vol. 28, No.111.
- Arab Khedri, M., Shadfar, S. & Sokoti Oskoui, R. (2016). *Auditing water erosion figures and determining its permissible amount in the country*. *Soil Conservation and Watershed Management Research Institute*. (in Persian).
- Asadi Nalivan, O., Rabet, A., Vakili tajareh, F., Ramezani, M., Momeni, M. & Heydari, K. (2023). *Zoning gully erosion susceptibility using ANN, CART and RF models*. *Watershed Engineering and Management*, 15(2), 155-171. doi: 10.22092/ijwmse.2022.356379.1920. (in Persian).
- Castillo, C. & Gomez J.A. (2016) *A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches*. *Earth Science Reviews*.160; 300–319.
- Chen, Y., De Geeter, S., Poesen, J., Matthews, F., Campforts, B., Borrelli, P., Panagos, P., & Vanmaercke, M. (2025). *Global patterns of gully occurrence and their sensitivity to environmental changes*. *International Soil and Water Conservation Research*.
- Ebrahimi, M. (2018). *Identification of causes of the occurrence of gully erosion with emphasis on soil-related factors, case study: Agh Imam Watershed*. *Journal of Soil and Water Resources Conservation*, 7(2): 1-13 (in Persian).
- Emadodin, S., Omidi, M., Arekhi, S. & Karam, A. (2021). *Assessment the Gully Erosion Risk in Quyjoq watershed*. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 10(30), 17-34. doi: 10.22111/jneh.2020.34212.1662. (in Persian).
- Fang, H., & Guo, M. (2015). *Aspect-induced differences in soil erosion intensity in a gullied hilly region on the Chinese Loess Plateau*. *Environmental Earth Sciences*, 74(7), 5677–5685. <https://doi.org/10.1007/S12665-015-4648-4>.

<sup>1</sup> Ogbonna

<sup>2</sup> Gómez-Gutiérrez

<sup>3</sup> Aboutaib

- Gholami, M., Ahmadi, M. & Mahmoodi, 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).
- Gómez-Gutiérrez, Á., Conoscenti, C., Angileri, S. E., Rotigliano, E., & Schnabel, S. (2015). *Using topographical attributes to evaluate gully erosion proneness (susceptibility) in two Mediterranean basins: Advantages and limitations*. *Natural Hazards*, 79, 291–314.
- Gourfi, A., Vanmaercke, M., Poesen, J., de Vente, J., Aqnouy, M., Taibi, A. N., & Briak, H. (2025). *Soil erosion and sediment yield in Africa: Processes and factors*. *Journal of African Earth Sciences*, 227, Article 105622.
- Hakim khani, Sh. & Arab khedri, M. (2006). *Regression analysis between suspended sediment and hydrogeomorphological characteristics of Lake Urmia basin*. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*. 37 (4): 231-223. (in Persian).
- Khalili, A. & Hejam, S. (1992). *Studies of the National Water Master Plan*. Jamab Consulting Engineers. (in Persian).
- Mar Tinez, Casasnovas, A., Anton Fernandes, C. & Ramos, M.C. (2003). *Sediment production in large gully of the Mediterranean area (NE Spain) from high- resolution digital elevation models and geographical information system analysis*. *Earth Surface Processes and Landforms*. Published by Wiley and British Society for Geomorphology.
- Martín-Moreno, C., Fidalgo Hijano, C., Martín Duque, J.F., González-Martín, J.A., Zapico, I., & Laronne, J. (2014). *The Ribagorda sand gully (east-central Spain): Sediment yield and human-induced origin*. *Geomorphology* 224, 122-138.
- Mehraban, M., Golkarian, A., & Khosravi, K. (2017). *Evaluating gully erosion sensitivity using maximum entropy model (Case study: Shourleq region, Khorasan Razavi province)*. Third National Conference on Soil and Watershed Conservation.
- Moradi, Kh. (2012). *Modeling gully erosion and its risk zoning in the Deira watershed of the Alvand River*. Master's thesis, University of Isfahan, Isfahan. (in Persian).
- Morgan, R.P.C. *Soil Erosion and Conservation, 3rd edition*. Blackwell Publishing, Oxford, 2005. 304 pp.
- Nazari Samani, A.A. (2017). Investigating effective mechanisms in gully erosion in order to determine the thresholds of topography, runoff and the contribution of sediment resulting from it (Doctoral thesis, University of Tehran, Karaj), (In Persian).
- Nazari Samani, A., Wasson, R. J., & Malekian, A. (2011). *Application of multiple sediment fingerprinting techniques to determine the sediment source contribution of gully erosion: Review and case study from Boushehr province, southwestern Iran*. *Journal Name*, 35(3), pages.
- Ogbonna, J. U. (2012). *Understanding gully erosion vulnerability in Old Imo State using geographic information system and geostatistics*. *American Journal of Geographic Information System*, 1(3), 66–71.
- Olivier, G., Van De Wiel, M. J., & de Clercq, W. (2023). *Predicting gully erosion susceptibility in South Africa by integrating literature directives with regional spatial data*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 48, 2661–2681.
- Poesen, J., Nachtergale J. & Verstrac. G. (2003). *Gully erosion and environmental change: importance and research needs*. *Catena* 50: 91-133.
- Poesen, j., Vandaele, k., & Van Wesemael, B. (1996). *Contribution of gully erosion to sediment production on cultivated lands and rangelands*. *Proceeding of the Exeter Symposium*. Association of Hydrological Sciences. pp: 251-266
- Qudousi, J. (2003). *Gully erosion modeling and its risk zoning: a case study of the Zanjanroud watershed*, Doctoral dissertation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran. (In Persian).
- Rahi, G.H., Kaviani, A., Soleimani K. & Pourghasemi, H. (2021). *Effect of topographic threshold conditions for gully head development in different use, case study: Boushehr Province*. *Journal of Range and Watershed Management*, 47(1): 69-81.
- Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi H.R. & Feizizadeh. B. (2017). *Evaluating the influence of geo-environmental factors on gully erosion in a semi-arid region of Iran: an integrated framework*. *Science of the Total Environment*, 579: 913–927.
- Rodzic, J., Furtak, T., & Zglobicki, W. (2007). *Influence of snowmelt and heavy rainfalls on water and sediment yield from loess gully catchment (Lublin upland – Poland)*. *Universidad Pública de Navarra / Nafarroak*.
- Shadfar, S. & Sofi, M. (2025). *Causes of Gully Erosion and Damages Caused by it in Iran*. *Watershed Management Research*. 38(2): 147.
- Shellberg, J.G., Brooks, A.P. & Rose, C.W. (2013). *Sediment production and yield from an alluvial gully in northern Queensland, Australia*. *Earth Surface Processes and Landforms*. 38, 1765 1779.

- Sheikhi, Z., Nazari Samani, A. A., Karimi, H., & Bayat, R. (2024). An Investigation on Topographic Threshold of Gully Erosion in the Iran Based on Meta-Analysis. *Journal of Range & Watershed Management*, 78 (2), 174-187.
- Shirani, K. (2020). *Gully Erosion Mapping and Susceptibility Assessment Using Statistical and Probabilistic Methods*. *Journal of Water and Soil Science*, 25 (2).
- Soufi, M. (2004). *A study of morphoclimatic characteristics of gullies in fars province, final report of research plan*. Institute of soil conservation and watershed management, SBN 83.1153.
- Soufi, M., Bayat, R., & Charkhabi, A. (2020). *Gully erosion in Iran: Characteristics, processes, causes, and land use*. In E. Editor(s) (Ed(s).), *Gully Erosion Studies from India and Surrounding Regions* (pp. 357–368).
- Studies on updating the water resources balance in the study areas of the whole country. (2015). Iran Water Resources Management Company, Ministry of Energy. (in Persian).
- Soufi, M. (1991). *Morphoclimatic survey and classification of Iranian gullies (Phase 1)*. Final report of the research project. Publications of the Soil Conservation and Watershed Management Research Institute. (In Persian).
- Valentin, C., Poesen J. & Li, G. (2005). *Gully erosion: impacts, factors and control*. *Catena*, 63: 132–153.
- Vandekerckhove, L., Poesen, J., Oostwoud Wijdenes, D., Gyssls, G., Beuselinck L., & Deluna, E., (2000). *Characteristics and controlling factors of bank gullies in two semi-arid Mediterranean environments*, *Journal of Geomorphology*, 33, pp 37-58
- Vanmaercke, M., Poesen, J., Van Mele, B., Demuzere, M., Bruynseels, A., Golosov, V., RodriguesBezerra, J.F. *et al.* (2016). *How fast do gully headcuts retreat?* *Earth-Science Reviews* 154, 336–355.
- Vanmaercke, M., Panagos, P., Vanwalleghem, T., Hayas, A., Foerster, S., Borrelli, P., & Poesen, J. (2021). *Measuring, modelling and managing gully erosion at large scales: A state of the art*. *Earth-Science Reviews*, 218, Article 103637.
- Zakerinejad, R. & Maerker, M. (2014). *Prediction of Gully erosion susceptibilities using detailed terrain analysis and maximum entropy modeling: a case study in the Mazayejan Plain, Southwest Iran*. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 37(1): 67- 76.