

Investigating the Effect of Soil Characteristics on the Expansion of Gully Erosion in the Baron Chaldoran Dam Basin

Yousef Nabipour¹, Habib Nazarnejad^{2*}, Farrokh Asadzadeh³, Chooghi Bairam Komaki⁴

(Resieved: April, 2023 Accepted: September, 2023)

Abstract

The most important issue in understanding gully erosion is the complexity of the process of gully formation and expansion in different climatic conditions and various human actions in exploiting soil, water and plant resources. Understanding and investigating factors contribute to the formation and development of gullies and determining the impact of each factor, can help provide the necessary solutions to predict, control and reduce damages. Considering the significant role of gully erosion in soil loss, especially in the Chaldoran region due to of its fertile agricultural lands and suitable pastures, this research aimed to determine the soil characteristics that influence the expansion of gullies in the region. To achieve this goal, 12 gullies in the study area were selected, and their geomorphometric parameters were measured. Soil samples were taken at distances of 25, 50 and 75% from the gully head at two depths: surface (0 to 30 cm) and subsurface (30 to 60 cm). The average soil properties at these depths for each gully were analyzed to assess their relationship with the geomorphometric characteristics of the gullies. The results showed that organic carbon had the highest correlation with the longitudinal and depth expansion of gullies with correlation coefficient of -0.76 and -0.81 respectively ($p < 0.01$). Following organic matter, TNV and soil silt had the most significant impact on the longitudinal expansion of gullies with correlations of -0.80 and 0.74 ($p < 0.01$). Principal components analysis revealed that organic carbon, TNV and silt played a major role in differentiating gullies based on geomorphometric characteristics. Additionally, the relationship between the longitudinal expansion of gullies and certain soil characteristics such as silt, clay, sand, pH, organic carbon, and TNV could be explained by exponential and power nonlinear relationships.

Keywords: Gully erosion, Gully length, Soil parameters, Chaldoran.

Nabipour Y., Nazarnejad H., Asadzadeh F., and Komaki Ch.B. 2025. Investigating the effect of soil characteristics on the expansion of gully erosion in the Baron Chaldoran dam basin. *Applied Soil Research*, 12(4): 61-73.

1- PhD Candidate Student of Watershed Management Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Urmia University.

2- Associate Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources.

3- Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University.

4- Assistant Professor, Department of Desert Management, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources.

* Corresponding Author Email: h.nazarnejad@gau.ac.ir

بررسی تأثیر ویژگی‌های خاک در گسترش فرسایش خندقی در حوضه سد بارون چالدران

یوسف نبی پور^۱، حبیب نظرنژاد^{۲*}، فرخ اسدزاده^۳، چوقی بایرام کمکی^۴

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۸)

چکیده

مهم‌ترین مسئله در شناخت فرسایش خندقی، پیچیده بودن روند تشکیل و گسترش خندق در شرایط مختلف اقلیمی و اقدامات متفاوت انسانی در بهره‌برداری از منابع خاک، آب و گیاه است. شناخت و بررسی عوامل مؤثر در تشکیل و توسعه خندق و تعیین اثرگذاری هر یک از عوامل، منجر به ارائه راهکارهای لازم جهت پیش‌بینی، مهار و کاهش خسارات وارده می‌شود. با توجه به نقش فرسایش خندقی در میزان هدررفت خاک به‌ویژه در منطقه چالدران به دلیل وجود اراضی حاصلخیز کشاورزی و مراتع مناسب، این پژوهش با هدف مشخص کردن ویژگی‌های خاک مؤثر در گسترش خندق‌های منطقه انجام شده است. بدین منظور با انتخاب ۱۲ خندق در منطقه مورد مطالعه، پارامترهای ژئومورفومتری این خندق‌ها اندازه‌گیری و نمونه‌های خاک مرکب از فواصل ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد از رأس خندق و در دو عمق سطحی (۰ تا ۳۰ سانتی‌متر) و زیرسطحی (۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر)، تهیه شد. میانگین ویژگی‌های خاک در دو عمق نمونه‌برداری برای هر خندق جهت بررسی ارتباط آن‌ها با خصوصیات ژئومورفومتری خندق‌ها مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که از بین ویژگی‌های خاک، کربن آلی به ترتیب با ضریب همبستگی -0.76 و -0.81 ($p < 0.01$) دارای بیشترین همبستگی با گسترش طولی و عمقی خندق‌ها است. پس از ماده آلی، آهک و سیلت خاک به ترتیب با همبستگی -0.80 و -0.74 ($p < 0.01$) بیشترین تأثیر را در گسترش طولی خندق‌ها دارند. نتایج آنالیز مؤلفه‌های اصلی هم بیانگر نقش عمده سه ویژگی کربن آلی، آهک و سیلت در تفکیک خندق‌ها از نظر ویژگی‌های ژئومورفومتری بود. نتایج همچنین نشان داد که رابطه بین گسترش طولی خندق‌ها با برخی از ویژگی‌های خاک مانند سیلت، رس، شن، pH، کربن آلی و آهک در قالب روابط غیرخطی نمایی و توانی قابل تبیین است.

واژه‌های کلیدی: فرسایش خندقی، طول خندق، پارامترهای خاکشناسی، چالدران.

نبی پور، ی.، نظرنژاد، ح.، اسدزاده، ف.، کمکی، چ.ب. ۱۴۰۳. بررسی تأثیر ویژگی‌های خاک در گسترش فرسایش خندقی در حوضه سد بارون چالدران. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۲. شماره ۴. صفحه: ۶۱-۷۳.

۱- دانشجوی مقطع دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه

۲- دانشیار گروه آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۳- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۴- استادیار گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

* پست الکترونیک: h.nazarnejad@gau.ac.ir

مقدمه

فرسایش خاک توسط آب پدیده‌ای به قدمت پیدایش خشکی‌ها در کره زمین است (Ahmadi, 2007) و در سطح بین‌المللی به‌عنوان مهم‌ترین فرآیند تخریب زمین شناخته شده است (Montanarella & Panagos, 2021). فرآیندهای فرسایش خاک در دامنه‌ها به صورت‌های مختلف فرسایش سطحی، شیاری و خندقی به وقوع می‌پیوندد (Borrelli et al., 2017). فرسایش خندقی به دلیل تأثیر عوامل گوناگون، پدیده بسیار پیچیده‌ای است که در تمام مناطق اقلیمی جهان از جمله مناطق خشک و نیمه‌خشک (Azareh, Gurbanov & Ganieva, 2017)؛ (Nicu, Li et al., 2020)؛ (Li et al., 2016)؛ گرمسیری و نیمه گرمسیری (Sidle et al., Luffman & Nandi, 2019)؛ و مدیترانه‌ای (Martins et al., 2020) مشاهده می‌شود و اغلب با طیف وسیعی از تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم همراه است. اثرات مستقیم شامل از دست رفتن زمین، درختان و محصولات زراعی و همچنین کاهش قابلیت تردد است که کشاورزی و استفاده از کاربری‌ها را محدود کرده (Poesen et al., 2003)؛ (Valentin et al., 2005) و همچنین آسیب قابل توجهی به جاده‌ها، ساختمان‌ها و سایر زیرساخت‌ها وارد نموده (Makanzu Imwangana et al., Guerra et al., 2007)؛ (Poesen, et al., 2015) و تلفات خاک و کاهش کیفیت آن (Hayas, Ionita, 2006)؛ (Poesen et al., 2003)؛ (et al., 2017)؛ بیابان‌زایی، آغاز و تشدید سایر فرآیندهای فرسایشی از جمله پایینگ (Bernatek-Jakiel & Poesen, 2018) و زمین‌لغزش (Ionita et al., 2015) و در موارد شدید، تبدیل اراضی به مناطق بدلند (هزار دره) از جمله تبعات فرسایش خندقی را به دنبال دارد (Torri et al., Ballesteros Canovas et al., 2017)؛ (2018). اثرات غیرمستقیم فرسایش خندقی می‌تواند سبب تغییرات در هیدرولوژی حوضه، از جمله پایین آوردن جریان پایه رودخانه و افزایش دبی‌های اوج رواناب شود (Martinel Costa & Bacellar, 2007). علاوه بر اثرات این فرسایش که کاملاً مشهود است، عوامل تأثیرگذار را نمی‌توان محدود به نوع معینی از سازندهای زمین‌شناسی، وضعیت توپوگرافی، خصوصیات خاک، کاربری و استفاده از اراضی، شرایط اقلیمی و

ویژگی‌های خاص آب و هوایی نمود (Khojeh et al., 2012). تشکیل خندق‌ها اغلب با دخالت عوامل انسانی مانند جنگل‌زدایی، آتش‌سوزی در جنگل، سامانه‌های کشت و آبیاری نامناسب، چرای بیش‌ازحد، جاده‌سازی و شهرنشینی مرتبط است. این عوامل نه تنها منجر به تشکیل خندق‌ها و تکامل آن می‌شوند، بلکه ظرفیت فرسایشی آن را نیز افزایش می‌دهند (Valentin et al., 2005).

در مجموع، فرسایش خندقی به شکل‌گیری و گسترش کانال‌های فرسایشی در خاک در نتیجه جریان متمرکز آب اطلاق می‌شود (Poesen et al., 2003). ابعاد خندق‌ها می‌تواند متفاوت باشد (Vanmaercke et al., 2016)؛ (Dube et al., 2020)، یک خندق بر اساس سطح مقطع بحرانی حداقل یک فوت مربع، یعنی به اندازه یک کانال که دیگر نمی‌توان آن را از طریق عملیات خاک‌ورزی معمولی اصلاح کرد، از فرسایش شیاری متمایز می‌شود (Poesen et al., 2003). شدت فرسایش خندقی به برخی ویژگی‌های حوضه در تولید رواناب از جمله مساحت حوضه زهکشی، ویژگی‌های خاک، اندازه و شکل خندق و شیب کانال خندق بستگی دارد (Geyik, 1986).

با وجود اینکه فرسایش خندقی سهم بسیار بالایی در تولید رسوب حوزه‌های آبخیز دارد و یک چالش اساسی در نقاط مختلف زمین است، تاکنون در مقایسه با شکل‌های دیگر فرسایش نظیر فرسایش ورقه‌ای و شیاری کمتر مورد توجه قرار گرفته است و این نوع فرسایش سهم کمی از مجموع تحقیقات فرسایش خاک را به خود اختصاص داده است که دلیل این امر پیچیدگی‌ها و دشواری‌های بررسی این نوع فرسایش در شرایط میدانی است (de Vente et al., Montgomery, 2007)؛ (Poesen et al., 2003)؛ (Borrelli et al., 2017)؛ (2013)؛ (Sidle et al., 2019).

نتایج تحقیق خوجه و همکاران (Khojeh et al., 2012) در خصوص ارتباط خصوصیات خاک و گسترش فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تمر قره‌قوزی استان گلستان با سازند لسی نشان داد خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک به‌ویژه میزان سیلت، املاح محلول و درجه اشباع خاک در شکل‌گیری و گسترش فرسایش خندقی در سازند لسی نقش بسزایی دارد. بالنده و همکاران

گنجایش مخزن ۱۴۰ میلیون مترمکعب احداث شده و پنجمین سد بزرگ استان آذربایجان غربی شناخته می‌شود. این سد منبع شرب و کشاورزی برای سه شهرستان ماکو، پلدشت و شوط است. شواهد بسیاری از وقوع فرسایش خندقی در حوضه بالادست این سد مشاهده شده که نشان‌دهنده حساسیت بالای حوضه نسبت به فرسایش بوده که این امر به نوبه خود سبب تهدید زیرساخت‌های انسانی و منابع آب‌و خاک به‌ویژه انباشت رسوب در مخزن سد بارون شده است. با توجه به اهمیت موضوع و با در نظر گرفتن اینکه تاکنون پژوهش‌های چندانی در این خصوص در حوضه مورد مطالعه صورت نگرفته، این مطالعه با هدف بررسی و شناخت عوامل مؤثر بر وقوع و گسترش فرسایش خندقی و به‌ویژه با تأکید بر روی خصوصیات خاک در این حوضه انجام شده است.

مواد و روش‌ها

- معرفی منطقه مورد مطالعه

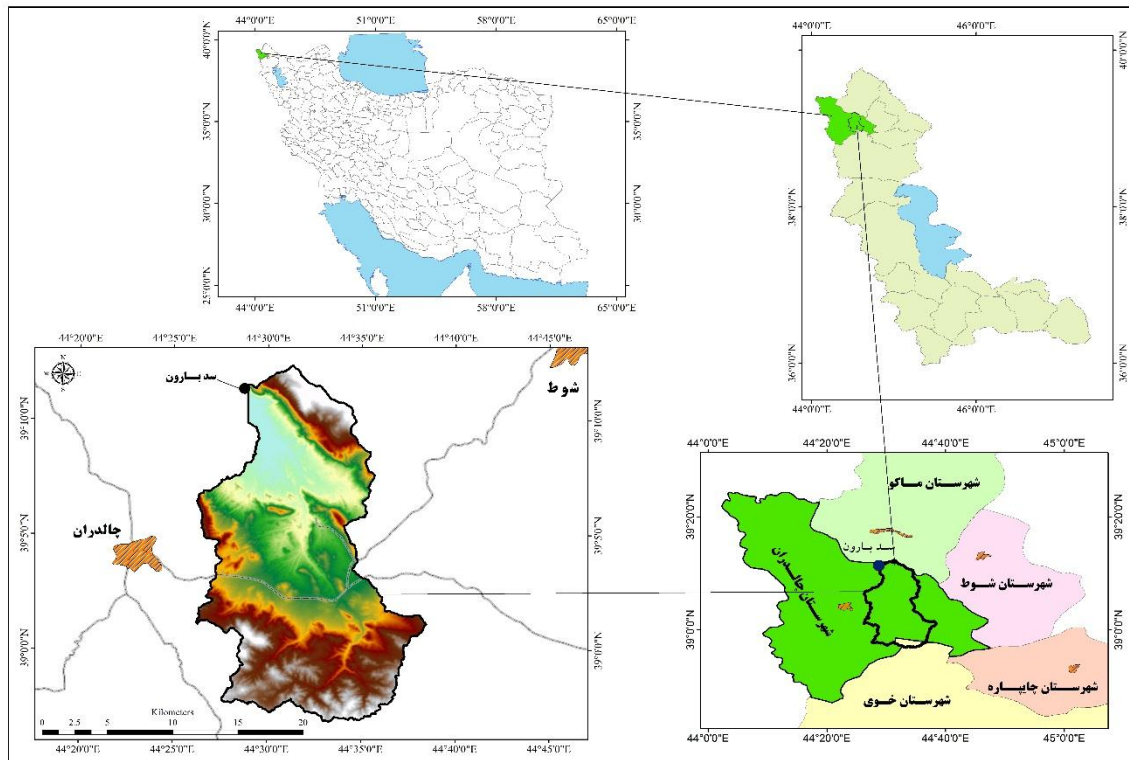
منطقه مورد پژوهش با وسعتی برابر با ۲۹۵/۸۲ کیلومترمربع و ارتفاع متوسط ۲۰۸۸ متر در شمال غربی استان آذربایجان غربی و در محدوده شهرستان چالدران و از نظر جغرافیایی در محدوده‌های ۴۵۱۲۷۸ تا ۴۶۸۹۰۰ طول شرقی و ۴۳۱۱۰۹۰ تا ۴۳۳۹۷۶۶ عرض شمالی قرار دارد. شهرستان چالدران از سمت شمال و غرب با کشور ترکیه، از شرق با شهرستان ماکو و شوط و از جنوب و جنوب شرق با شهرستان‌های خوی و چایپاره همسایه است (شکل ۱).

بر اساس تقسیمات زمین‌شناسی ایران، منطقه مورد مطالعه بخشی از پهنه البرز- آذربایجان است. لیتولوژی غالب منطقه شامل سنگ‌های رسوبی کنگلومرا، مارن و آهک و همچنین سنگ‌های دگرگونی گنایس، مرمر و میگماتیت است. شکل شماره ۱، نقشه منطقه و موقعیت آن در استان آذربایجان غربی و ایران را نمایش می‌دهد.

(Balandeh *et al.*, 2013) نتیجه گرفتند که حد آستانه توپوگرافی تنها عامل تعیین کننده گسترش فرسایش خندقی نبوده و برای تعیین حد آستانه شروع فرسایش خندقی عوامل موثر دیگری از جمله خصوصیات خاک و پوشش گیاهی نیز باید مدنظر قرار گیرد. ون زایل و همکاران (Van Zijl *et al.*, 2014) ارزیابی تأثیر ترکیبی خواص خاک بر فرسایش خندقی را با استفاده از رگرسیون کمی در حوزه آبخیز Lesotho آفریقای جنوبی مطالعه نموده و عوامل ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، کربن آلی خاک و درصد سدیم قابل تبدالی (ESP) را در فرسایش خندقی تأثیرگذار دانستند. اصغری سراسکانرود (Asghari Saraskanroud., 2017) نیز در تحقیق خود تشکیل فرسایش خندقی در سواحل شرقی دریاچه ارومیه را در اثر ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک از جمله هدایت الکتریکی (EC)، بافت خاک، نسبت جذب سدیم محلول (SAR) و pH منطقه نتیجه‌گیری کرد.

با توجه به سوابق مطالعاتی و بررسی‌های انجام شده کاملاً مشخص است که در اثر توسعه و تشکیل خندق مقدار زیادی از خاک اراضی کشاورزی و مرتعی تخریب می‌شود؛ لذا شناخت و بررسی عوامل مؤثر در تشکیل و توسعه آن و تعیین اثرگذاری هر یک از عوامل، منجر به ارائه راهکارهای لازم جهت پیش‌بینی، مهار و کاهش خسارات وارده می‌شود.

تنوع تعداد و میزان تأثیر عوامل مختلف در وقوع این فرسایش از نقطه‌ای به نقطه دیگر متفاوت بوده و سهم مشارکت عوامل در شکل‌گیری آن‌ها در کنار شرایط زمین‌شناسی و آب و هوایی ایجاب می‌کند که پژوهش بیشتری جهت شناسایی هر چه بیشتر عوامل مؤثر در رخداد فرسایش خندقی و میزان مشارکت آن‌ها در شکل‌گیری و رشد و گسترش این پدیده در نقاط مختلف و همچنین تأثیر عوامل بر یکدیگر به مرحله اجرا درآید. به همین دلیل حوزه آبخیز سد بارون در شهرستان چالدران که از کانون‌های مهم فرسایش خندقی در استان آذربایجان غربی است، برای این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. این سد بر روی رودخانه زنگمار با



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در استان آذربایجان غربی و ایران

Figure 1. The geographical location of the study area in West Azerbaijan Province and Iran

خندق در مقاطع ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصدی از سر خندق با یکدیگر مخلوط و یک نمونه مرکب از خاک سطحی برای هر خندق آماده شد. این کار برای نمونه‌های زیرسطحی (۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر) هر خندق مجدداً تکرار شد. نمونه‌ها به آزمایشگاه خاکشناسی منتقل و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی شامل درصد رس و شن و سیلت به روش هیدرومتری، کربن آلی به روش اکسیداسیون مرطوب، آهک کل به روش تیتراسیون برگشتی با NaOH، اسیدیته و هدایت الکتریکی در عصاره اشباع خاک، درصد اشباع خاک به روش گل اشباع، سدیم محلول و نسبت جذب سدیم در عصاره اشباع خاک (Estefan *et al.*, 2013) برای هر دو عمق مورد نمونه‌برداری، تعیین شده و سپس میانگین پارامترهای دو عمق برای بررسی آماری مورد استفاده قرار گرفت.

نمونه‌برداری

به منظور بررسی تأثیر ویژگی‌های خاک بر تشکیل و گسترش خندق‌ها، موقعیت مکانی خندق‌ها در منطقه مورد مطالعه با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی بررسی گردید. با انجام بازدید میدانی، تعداد ۱۲ خندق به طور کاملاً تصادفی از بین خندق‌های موجود در منطقه انتخاب و پس از تعیین موقعیت، ویژگی‌های مورفومتری خندق‌ها تعیین شد (شکل ۲). بدین منظور ابعاد خندق‌ها اعم از طول، عمق، عرض، شیب و سایر عوامل ژئومورفومتری مربوط به خندق‌ها اندازه‌گیری و سپس از سه محل ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد سر خندق (Khojeh *et al.*, 2012) در دو عمق سطحی (۰ تا ۳۰ سانتی‌متر) و زیرسطحی (۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر)، نمونه‌برداری خاک انجام گرفت (Shahab Arkhazlou *et al.*, 2016). نمونه‌های سطحی (۰ تا ۳۰ سانتی‌متر) تهیه شده از هر



شکل ۲- بررسی میدانی خندق‌ها در منطقه مورد مطالعه
Figure 2. Field survey of gullies in the study area

متر و میانگین عرض بالای خندق‌ها ۲ تا ۹ متر بود. شیب خندق‌ها نیز یک تا ۸ درصد است. میانگین طول، عرض بالا، عرض پایین، عمق و شیب خندق‌های مورد بررسی به ترتیب برابر با $۱۱۱/۹$ ، $۴/۸$ ، $۱/۱$ ، $۲/۱$ متر و $۳/۵$ درصد بوده و در بین خصوصیات یادشده، طول خندق با ضریب تغییرات $۱۰۲/۸$ درصد بیشترین و عرض بالایی خندق‌ها با $۳۹/۷$ درصد کمترین تغییرات را در بین خندق‌های مورد بررسی داشتند. بالا بودن ضریب تغییرات ویژگی‌های خندق‌ها حاکی از تنوع بالای خندق‌های انتخاب‌شده است و نشان می‌دهد که خندق‌های منتخب می‌توانند معرف خندق‌های این منطقه باشند.

تجزیه و تحلیل آماری

برای تعیین ارتباط بین میزان فرسایش خندقی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک از روش‌های تجزیه و تحلیل همبستگی و روابط رگرسیونی استفاده شد. بدین منظور ابتدا رابطه بین ویژگی‌های مورفومتری خندق‌ها با میانگین خصوصیات و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد بررسی قرار گرفت و در ادامه آنالیز PCA جهت تعیین مؤلفه‌های اصلی انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از بررسی میدانی ۱۲ خندق منتخب در جدول ۱ نمایش داده شده است. محدوده طول خندق‌های مورد بررسی از $۲۶/۸$ تا ۳۸۴ متر، عمق آن‌ها $۰/۹$ تا ۳

جدول ۱- خصوصیات مورفومتری خندق‌های مورد بررسی

Table 1. Morphometric characteristics of the studied gullies

Gully No.	X	Y	Gully Shape	Gully length (m)	Up Width/Average (m)	Down Width/Average (m)	Depth Average (m)	Gully Slope (%)
1	458349	4332208	V	32.6	4	0.5	1.7	5
2	456388	4332697	U	36.8	3	1	0.9	2
3	454869	4330772	V	47	4	0.7	2.2	5
4	454828	4330522	U	183	5.8	1.1	2.5	1
5	454776	4330287	U	284	4	1	2	1
6	455088	4328248	V	121	2	0.2	1.8	1
7	455066	4328208	V	51.7	3.2	0.55	2.8	5
8	455023	4328204	U	26.8	6	1.5	1.8	7
9	454896	4328215	U	37.3	7	2.5	1.8	5
10	454406	4327229	V	86	5	0.4	1	1
11	454747	4327455	U	384	9	1.8	3	1
12	453962	4325535	U	52.2	5.1	1.8	4	8
Average				111.9	4.8	1.1	2.1	3.5
CV (%)				102.8	39.7	63.5	40.5	74.6

و شیمیایی نمونه‌های خاک در دو عمق و در جدول ۳ نیز آمار توصیفی ویژگی‌های خاک و مورفولوژی ۱۲ خندق مورد بررسی ارائه شده است.

در کنار برآورد ویژگی‌های مورفومتری خندق‌ها، نمونه خاک مرکب نیز از فواصل ۰.۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد از رأس خندق و در دو عمق ۰ تا ۳۰ و ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متری تهیه شد. در جدول ۲ میانگین نتایج ویژگی‌های فیزیکی

جدول ۲- میانگین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک خندق‌ها

Table 2. The average of the physical and chemical characteristics of the soil of gullies

Gully No.	OC	TNV	Sand	Silt	Clay	SP	pH	EC	Na	Ca+Mg	SAR
	%							dS m ⁻¹	(meq l ⁻¹)		(meq l ⁻¹) ^{0.5}
1	0.51	28.95	15.17	24.17	60.67	50.44	7.96	1.03	8.28	5.95	4.80
2	0.61	31.31	36.67	18.50	44.83	37.69	7.90	1.02	7.21	3.47	5.48
3	0.60	26.37	5.83	26.83	67.33	57.81	7.90	1.08	6.96	4.07	4.88
4	0.38	28.35	45.17	30.83	24.00	31.63	8.00	0.76	3.50	5.33	2.15
5	0.43	22.45	50.75	27.25	22.00	31.19	7.96	0.72	2.75	5.72	1.63
6	0.48	24.55	56.33	23.67	20.00	30.75	7.93	0.67	2.01	6.10	1.15
7	0.61	31.08	42.65	20.23	37.12	47.25	7.86	0.81	2.99	7.02	1.60
8	0.69	35.03	34.38	15.25	50.37	57.24	7.82	0.89	3.59	7.57	1.85
9	0.53	26.83	14.17	22.83	63.00	47.35	7.79	0.67	2.94	5.50	1.77
10	0.79	27.43	46.17	28.17	25.67	36.67	7.88	0.67	5.13	5.67	3.04
11	0.23	17.11	58.17	36.00	5.83	32.73	8.03	0.58	4.66	4.33	3.16
12	0.48	25.63	52.50	27.50	20.00	46.76	7.81	0.60	4.98	4.67	3.26

جدول ۳- آمار توصیفی خصوصیات مورفومتری و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک خندق‌ها

Table 3. Descriptive statistics of morphometric characteristics and physical and chemical characteristics of the soil of gullies

Statistics	OC	TNV	Sand	Silt	Clay	SP	pH	EC	Na	Ca+Mg	SAR	Length m	Depth m
	%							dS m ⁻¹	(meq l ⁻¹)		(meq l ⁻¹) ^{0.5}		
Max	0.79	35.03	58.17	36.00	67.33	57.81	8.03	1.08	8.28	7.57	5.48	384.00	3.00
Min	0.23	17.11	5.83	15.25	5.83	30.75	7.79	0.58	2.01	3.47	1.15	26.80	0.90
Average	0.53	27.09	38.16	25.10	36.73	42.29	7.90	0.79	4.58	5.45	2.90	111.87	2.12
SD	0.15	4.60	17.57	5.61	20.15	10.07	0.08	0.18	2.00	1.19	1.47	115.05	0.86
CV (%)	27.87	16.97	46.03	22.36	54.86	23.81	0.95	22.16	43.64	21.77	50.68	102.85	40.54

ویژگی‌های خاک، pH دارای کمترین تغییرات بود. در جدول ۴، نتایج همبستگی خطی پیرسون بین ویژگی‌های مورفومتری و همچنین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها ارائه شده است.

نتایج آمار توصیفی ویژگی‌های خاک نشان می‌دهد که بر اساس ضریب تغییرات ویژگی‌های خاک در ۱۲ خندق مورد بررسی، رس و SAR به ترتیب با ۵۴/۸۶ و ۵۰/۶۸ درصد، بیشترین ضریب تغییرات و در نتیجه پراکندگی را در بین ویژگی‌های خاک از خود نشان می‌دهند. از بین

جدول ۴- نتایج تجزیه و تحلیل همبستگی خصوصیات مورفومتری و خاکشناسی خندق‌ها

Table 4. The results of the correlation analysis of the morphometric and soil characteristics of gullies

	OC	TNV	Sand	Silt	Clay	pH	EC	SP	Na	Ca+Mg	SAR	Length	Depth
OC	1.00												
TNV	0.73**	1.00											
Sand	-0.35	-0.39	1.00										
Silt	-0.65*	-0.84**	0.33	1.00									
Clay	0.49	0.574	-0.96**	-0.57	1.00								
pH	-0.64*	-0.54	0.31	0.63*	-0.45	1.00							
EC	0.39	0.57	-0.71*	-0.49	0.75**	0.00	1.00						
SP	0.48	0.54	-0.74**	-0.50	0.78**	-0.60*	0.55	1.00					
Na	0.18	0.15	-0.51	0.01	0.44	0.13	0.67*	0.38	1.00				
Ca+Mg	0.31	0.43	0.07	-0.45	0.06	-0.27	-0.10	0.21	-0.52	1.00			
SAR	0.13	0.08	-0.45	0.04	0.38	0.14	0.64*	0.29	0.97**	-0.69*	1.00		
Length	-0.76**	-0.80**	0.59*	0.74**	-0.72**	0.75**	-0.52	-0.69*	-0.31	-0.20	-0.25	1.00	
Depth	-0.81**	-0.59*	0.17	0.63*	-0.32	0.48	-0.32	-0.10	-0.25	-0.07	-0.24	0.65*	1.00

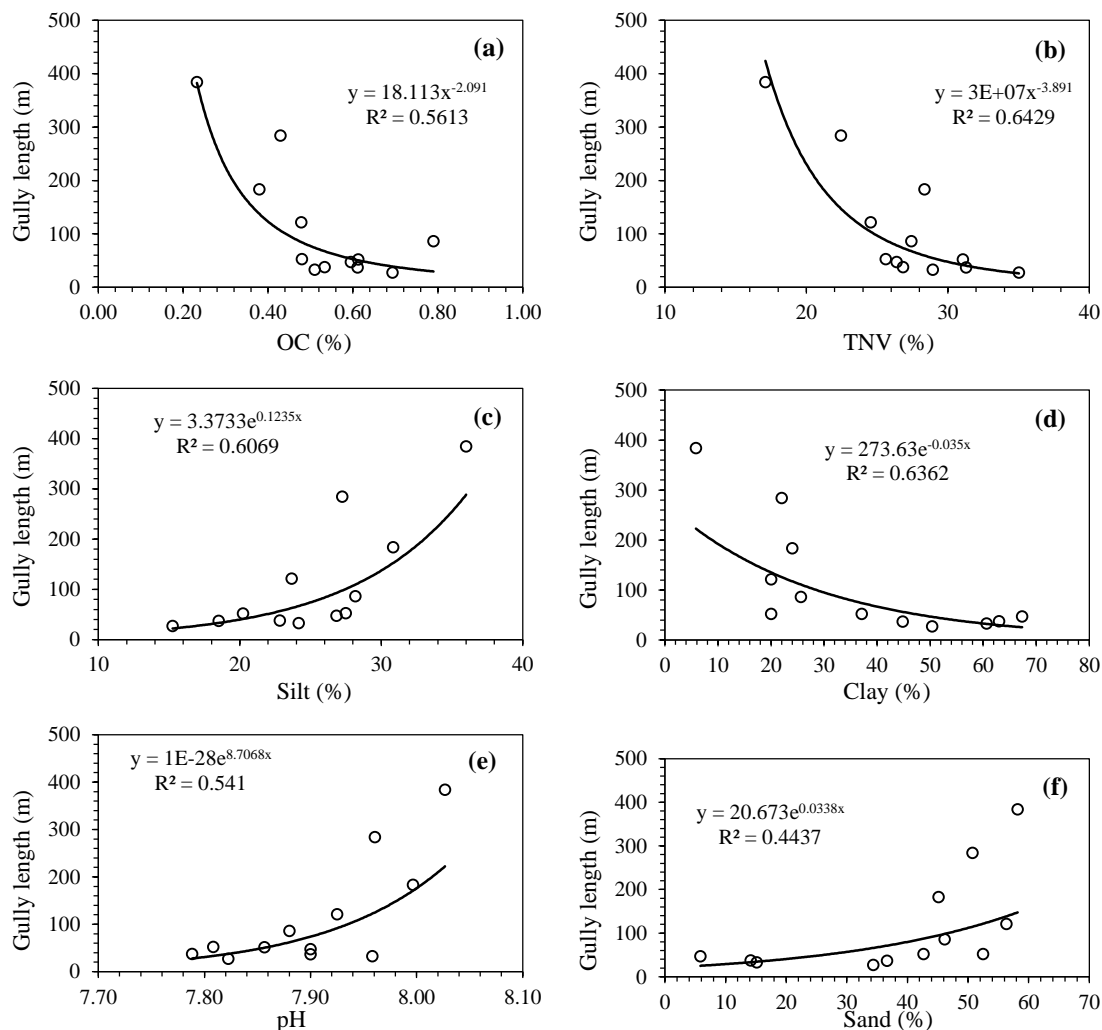
** significant at 99 confidence level; * significant at 95 confidence level

خاک مانع از تشدید فرسایش در منطقه شود (Duiker *et.al*, 2001؛ Niknahad Gharmakher *et.al*, 2013) نقش کمبود مواد آلی خاک در کاهش حاصلخیزی و فرسایش پذیری رابطه بین pH خاک و گسترش طولی خندق‌ها مثبت بوده که نشان‌دهنده افزایش طول خندق‌ها با افزایش مقدار pH خاک است. با توجه به اینکه pH خاک‌های مورد بررسی در محدوده خاک‌های قلیایی متوسط است، به نظر می‌رسد با افزایش pH قابلیت دسترسی عناصر غذایی برای گیاهان کاهش یافته و در نتیجه با کاهش تراکم پوشش گیاهی، شرایط برای گسترش طولی خندق‌ها فراهم شود که با نتایج و یافته‌های دانشنگ و همکاران (Dongsheng *et.al*, 2006) مطابق است. این فرضیه به‌ویژه در شرایطی که pH خاک فاقد رابطه معنی‌دار با گسترش عمقی خندق‌ها باشد، تقویت می‌شود. افزایش میزان سیلت نیز به‌طور معنی‌داری سبب افزایش گسترش طولی و عمقی خندق‌ها شده و نشان می‌دهد که افزایش سیلت سبب افزایش فرسایش پذیری خاک شده و در نتیجه فرسایش

نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که از بین ویژگی‌های خاک، آهک، ماده آلی، pH، سیلت و رس خاک دارای همبستگی بالایی (با سطح اطمینان ۹۹ درصد) با طول خندق‌ها بوده و همچنین عمق خندق‌ها نیز با مقدار ماده آلی در سطح اطمینان ۹۹ درصد دارای همبستگی است. عمق خندق‌های مورد بررسی، با برخی دیگر از ویژگی‌های خاک از جمله مقدار سیلت و آهک نیز در سطح اطمینان ۹۵ درصد دارای همبستگی است. همبستگی منفی گسترش طولی و عمق خندق‌ها با میزان ماده آلی خاک حاکی از افزایش پایداری ساختمان خاک با افزایش مواد آلی خاک که سبب کاهش فرسایش‌پذیری و افزایش حاصلخیزی خاک شده و مانع از فرسایش آن می‌شود. ماده آلی خاک با توجه به ظرفیت نگهداری بالای آب، می‌تواند با جذب و نگهداشت مقدار زیادی از آب بارندگی‌ها، نه تنها مانع از جاری شدن آب بر سطح زمین می‌شود، بلکه درصد قابل توجهی از آب را در عمق مناسب در دسترس ریشه گیاهان قرار داده و ضمن تقویت پوشش گیاهی با افزایش نفوذپذیری

بررسی ارتباط بین ویژگی‌های مورفومتریک خندق‌ها با خصوصیات خاک نشان داد که بین گسترش طولی خندق‌ها و برخی از ویژگی‌های خاک روابط غیرخطی قوی‌تری در مقایسه با همبستگی خطی وجود دارد که این ارتباط در قالب نمودار در شکل ۳ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود روابط بین ماده آلی و آهک با گسترش طولی خندق‌ها به صورت یک رابطه توانی منفی به ترتیب با ضریب تبیین 0.56 و 0.64 ($P < 0.001$) است. رابطه بین مقدار رس و گسترش طولی خندق‌ها نیز در قالب یک رابطه نمایی منفی با ضریب تبیین 0.63 ($P < 0.001$) و همچنین روابط بین مقدار شن، سیلت و pH خاک با گسترش طولی خندق‌ها نیز با توابع نمایی مثبت به ترتیب با ضرایب تبیین 0.44 ، 0.60 و 0.54 ($P < 0.001$) تعیین گردیده است.

خندقی را تشدید می‌نماید. با توجه به اینکه ذرات سیلت از نظر اندازه نسبت به ذرات شن ریزتر هستند، امکان انتقال آن‌ها در مقایسه با ذرات شن توسط جریان رواناب بیشتر بوده و از طرفی ذرات سیلت به دلیل درشت‌تر بودن نسبت به ذرات رس، چسبندگی ذرات رس را نیز ندارند، بنابراین در مقایسه با دو ذره رس و شن، حساسیت بیشتری در مقابل عوامل فرساینده از خود نشان می‌دهند (Soleimanpour *et.al*, 2010). مقدار آهک نیز همبستگی منفی با گسترش طولی و عمقی خندق‌ها نشان داد که این امر می‌تواند به تأثیر مثبت آهک بر افزایش پایداری خاکدانه‌ها و در نتیجه کاهش فرسایش‌پذیری خاک مربوط باشد در این زمینه روستا و همکاران (Roosta *et.al*, 2010) و سادانا و باجوا (Sadana & Bajwa, 1985) نیز نتایج مشابهی را گزارش نموده‌اند.

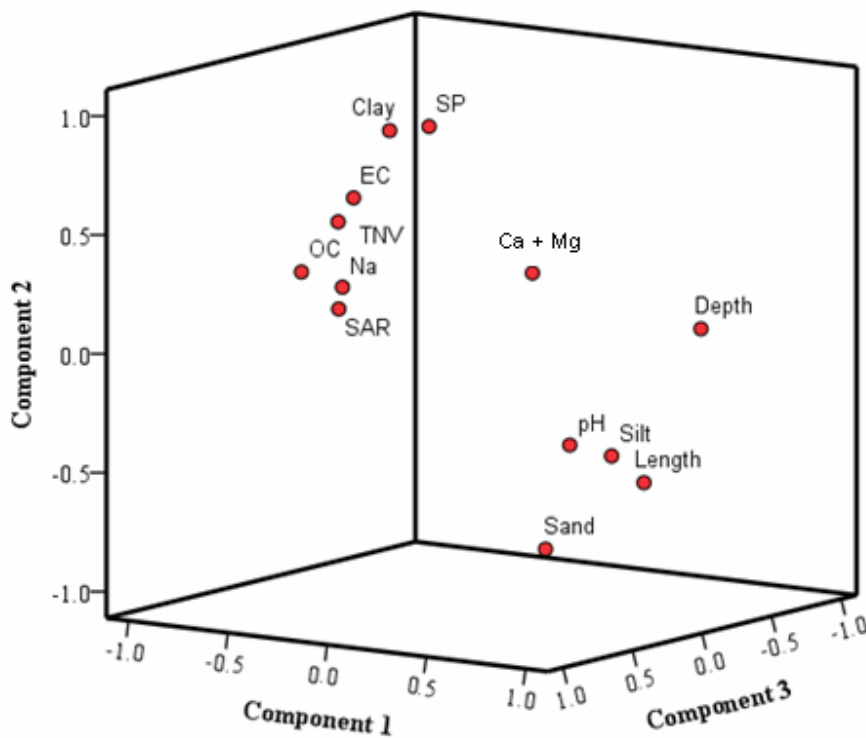


شکل ۳- رابطه بین طول خندق‌ها با درصد کربن آلی (a)، آهک (b)، سیلت (c)، رس (d)، pH (e) و شن (f) خاک
Figure 3. The relationship between gully length with organic carbon (a), TNV (b), Silt (c), Clay (d), pH (e), and Sand (f) of soil

جدول ۴- ماتریس چرخش یافته اوزان مربوط به تجزیه مؤلفه‌های اصلی.

Table 4. Rotated matrix of weights related to principal component decomposition

Variable	PC1	PC2	PC3
OC	-0.89	0.21	0.03
TNV	-0.78	0.41	-0.09
Sand	0.14	-0.89	-0.26
Silt	0.79	-0.37	0.20
Clay	-0.34	0.88	0.17
pH	0.67	-0.32	0.32
EC	-0.29	0.65	0.50
SP	-0.28	0.88	-0.02
Na	-0.08	0.35	0.88
Ca+Mg	-0.30	0.15	-0.79
SAR	-0.06	0.27	0.95
Length	0.78	-0.52	-0.06
Depth	0.92	0.11	-0.26
Eigenvalue	6.42	3.11	1.38
Proportion	49.42	23.96	10.64
Cumulative	49.42	73.38	84.01



شکل ۴- نمودار پراکنش وزن‌های مربوط به ویژگی‌های خاک حول سه مؤلفه اصلی

Figure 4. Distribution chart of weights related to soil characteristics around three main components

مؤلفه‌های اصلی^۱ برای بررسی دقیق‌تر اثرات عوامل مختلف بر گسترش خندق‌ها و همچنین تشخیص

با توجه به همبستگی بالای بین ویژگی‌های خاک با خصوصیات مورفولوژیک خندق‌ها، از روش تجزیه به

^۱ Principal Component Analysis (PCA)

بیشترین همبستگی منفی با گسترش طولی و عمقی خندق‌ها بود. از بین سایر ویژگی‌های خاک نیز، سیلت و رس خاک دارای همبستگی بالایی با گسترش طولی خندق‌ها بوده و عمق خندق‌ها نیز با مقدار سیلت و آهک دارای همبستگی است. بررسی‌ها همچنین نشان داد که ارتباط بین گسترش طولی خندق‌ها با برخی از ویژگی‌های خاک در قالب روابط غیرخطی به شکل روابط توانی و نمایی قابل بیان است. روابط بین ماده آلی و آهک با گسترش طولی خندق‌ها به صورت روابط توانی منفی و همچنین رابطه بین مقدار رس و گسترش طولی خندق‌ها نیز در قالب یک رابطه نمایی منفی قابل تبیین است. همچنین روابط بین مقدار شن، سیلت و pH خاک با گسترش طولی خندق‌ها به صورت توابع نمایی مثبت است. تجزیه مؤلفه‌های اصلی نیز نشان داد که کربن آلی، آهک و سیلت دارای بیشترین تأثیر در تفکیک خندق‌ها از نظر ویژگی‌های ژئومورفومتریک می‌باشند. بر اساس نتایج به نظر می‌رسد که ویژگی‌های ذاتی خاک شامل توزیع اندازه ذرات (درصد شن، سیلت و رس) و آهک اثر مهمی در گسترش فرسایش خندقی در منطقه دارند. به طوری که بالا بودن مقدار سیلت و شن در منطقه باعث کاهش مقاومت خاکدانه‌ها و در نتیجه تشدید فرسایش در منطقه شده است، اما در کنار این ویژگی‌های ذاتی که چندان قابل کنترل نیستند، کربن آلی خاک نیز به عنوان یک ویژگی که می‌توان با مدیریت صحیح خاک در حوزه آبخیز مقدار آن را افزایش داد، نقش قابل توجهی در کنترل گسترش فرسایش خندقی در منطقه دارد. بنابراین اعمال روش‌هایی از مدیریت خاک که منجر به ارتقای ماده آلی در خاک می‌شود، می‌تواند به عنوان یک راهکار در منطقه مدنظر باشد. از جمله این روش‌ها می‌توان به انجام روش‌های کشت حفاظتی در اراضی زراعی و مدیریت چرای دام در اراضی مرتعی اشاره نمود.

ویژگی‌های تأثیرگذار در تفکیک خندق‌ها استفاده شد. نتایج مربوط به آنالیز مؤلفه‌های اصلی در جدول ۴ و نمودار مربوط به وزن‌های ویژگی‌های خاک در مؤلفه‌های اصلی در شکل ۴ ارائه شده است. نتایج آنالیز مؤلفه‌های اصلی نشان داد که سه مؤلفه اول با مقادیر ویژه بیش از یک در مجموع ۸۴ درصد از تغییرات کل داده‌ها را توصیف می‌نمایند که سهم مؤلفه‌های اول، دوم و سوم به ترتیب ۴۹/۴۲، ۲۳/۹۶ و ۱۰/۶۴ درصد است. بر اساس جدول ۴ و شکل ۴ می‌توان گفت که کربن آلی، آهک و سیلت با توجه به وزن بالایی که در مؤلفه اول دارند بیشترین تأثیر را در تفکیک ویژگی‌های خاک و مورفومتری خندق‌ها دارا می‌باشند. پس از آن مقدار رس و درصد اشباع خاک در مؤلفه دوم و در نهایت مقدار سدیم محلول خاک و SAR در مؤلفه سوم به ترتیب نقش‌های بعدی را در تفکیک ویژگی‌های مورفومتری خندق‌ها بر عهده دارند. در مجموع نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی در راستای نتایج تحلیل همبستگی متغیرهای خاک با ویژگی‌های خندق‌ها بوده و نشان‌دهنده اهمیت مقادیر ماده آلی، آهک و سیلت خاک در گسترش ابعاد خندق‌هاست.

نتیجه‌گیری کلی

با توجه به اهمیت و نقش فرسایش خندقی در میزان هدررفت خاک به ویژه در منطقه چالدران به دلیل وجود اراضی حاصلخیز کشاورزی و مراتع بیلاقی مناسب، این پژوهش با هدف مشخص کردن عوامل خاکی مؤثر در گسترش طولی و عمقی خندق‌های منطقه انجام شده است. نتایج نشان داد که گسترش طولی و عمقی خندق‌ها به صورت متفاوتی تحت تأثیر ویژگی‌های خاک قرار می‌گیرند. در بین ویژگی‌های خاک، ماده آلی دارای

References

- Ahmadi H. 2007. Applied Geomorphology. Tehran University, 714 pp. (In Persian)
- Asghari Saraskanroud S., 2017. Analysis of affecting factors on creating Gully in the eastern shores of Urmia Lake, *Geographic Space*, 17(58), 285-301. (In Persian)
- Azareh A., Rahmati O., Rafiei-Sardooi E., Sankey J.B., Lee S., Shahabi H., Ahmad B.B., 2019. Modelling gully-erosion susceptibility in a semi-arid region, Iran: Investigation of applicability of certainty factor and maximum entropy models. *Science of the Total Environment*. 655, 684-696.

- Balandeh N., Ahmadi A., Sokouti R., Darbandi S., 2013. Determination Topographical Threshold Condition for Initiation of Gully Erosion with Using GIS (Case Study: Reyhanlou- West Azerbaijan), *Applied Soil Research*, 1 (2), 1-15.
- Ballesteros Canovas J.A., Stoffel M., Martín-Duque J.F., Corona C., Lucía A., Bodoque J.M., Montgomery D.R. 2017. Gully evolution and geomorphic adjustments of badlands to reforestation. *Scientific Reports*, 7(1), 1-18.
- Bernatek-Jakiel A., Poesen J. 2018. Subsurface erosion by soil piping: significance and research needs. *Earth-Science Reviews*, 185, 1107–1128.
- Borrelli P., Robinson D.A., Fleischer L.R., Lugato E., Ballabio C., Alewell C., Meusburger K., Modugno S., Schütt B., Ferro V., Bagarello V., Oost K.V., Montanarella L., Panagos P. 2017. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature communications*. 8 (1), 1-13.
- de Vente J., Poesen J., Verstraeten G., Govers G., Vanmaercke M., Van Rompaey A., Boix-Fayos C. 2013. Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: where do we stand? *Earth-Science Reviews*. 127, 16–29.
- Dongsheng Y., Xuezheng S., Weindorf. D.C. 2006. Relationships between permeability and erodibility of cultivated acrisols and cambisols in subtropical China. *Soil Science Society of China*, 16(3), 304-311.
- Dube H.B., Mutema M., Muchaonyerwa P., Poesen J., Chaplot V. 2020. A global analysis of the morphology of linear erosion features. *Catena*, 190, 104542.
- Duiker S.W., Flanagan D.C., Lal R. 2001. Erodibility and Infiltration Characteristics of Five Major Soils of Southwest Spain, *Catena*, 45(2), 103-121.
- Estefan G., Sommer R., Ryan J. 2013. Methods of soil, plant, and water analysis. A manual for the West Asia and North Africa region, 3, pp 65-119.
- Geyik M.P. 1986. FAO watershed management field manual Gully control, Food and Agriculture Organization of the United Nations, ROME, No.13/2.
- Guerra A.J., Bezerra J.F., Fullen M.A., Mendonça J.K.S., Sathler R., Lima F.S., Guerra T.T. 2007. Urban gullies in Sao Luis city, Maranhao state, Brazil. In: Casalí, Javier, Giménez, Rafael (Eds.), Progress in Gully Erosion Research. IV International Symposium on Gully Erosion. September 17–19, Pamplona, Spain.
- Gurbanov E.A., Ganieva S.A., 2017. Intensity of gully erosion in arid zone of Azerbaijan republic (by the example of the region of the Mingechaur water reservoir). *Arid Ecosystems*. 7(4), 251–255.
- Hayas A., Vanwalleghem T., Laguna A., Peña Acevedo A., Giráldez J.V. 2017. Reconstructing Long-Term Gully Dynamics in Mediterranean Agricultural Areas. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(1), 235-249.
- Ionita I. 2006. Gully development in the Moldavian Plateau of Romania. *Catena*, 68 (2–3), 133–140.
- Ionita I., Fullen M.A., Zgłobicki W., Poesen J. 2015. Gully erosion as a natural and human-induced hazard. *Natural Hazards*, 79(1), 1–5.
- Khojeh N., Ghoddosi J., Esmaili R. 2012. Investigation of the Relation of Soil Physiochemical Characteristics and Initiation and Expansion of Gully Erosion in Temer Ghareh Khozi Watershed, Golestan Province. *Watershed Management Research*, 3(5), 27-41. (In Persian)
- Li H., Cruse R.M., Liu X., Zhang X. 2016. Effects of topography and land use change on gully development in typical Mollisol region of Northeast China. *Chinese geographical science*, 26(6), 779–788.
- Li Z., Zhang W., Aikebaier Y., Dong T., Huang G., Qu T., Zhang H. 2020. Sustainable Development of Arid Rangelands and Managing Rainwater in Gullies. Central Asia. *Water*, 12 (9), 2533.
- Luffman I., Nandi A., 2019. Freeze-Thaw Induced Gully Erosion: A Long-Term High- Resolution Analysis. *Agronomy* 9(9), 549.
- Makanzu Imwangana F., Vandecasteele I., Trefois P., Ozer P., Moeyersons J. 2015. The origin and control of mega-gullies in Kinshasa (DR Congo). *Catena*, 125, 38–49.
- Martineli Costa F., Bacellar L.D.A.P. 2007. Analysis of the influence of gully erosion in the flow pattern of catchment streams, Southeastern Brazil. *Catena*, 69(3), 230–238.

- Martins B., Meira-Castro A., Nunes A., Lourenço L. 2020. The development of gullies in a Mediterranean environment: The example of the Corgo gully (central Portugal). *Energy Reports*, 6, 794–799.
- Montanarella L., Panagos P. 2021. The relevance of sustainable soil management within the European Green Deal. *Land Use Policy*, 100, 104950.
- Montgomery D. 2007. Soil erosion and agricultural sustainability, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(33), 13268-13272.
- Nicu I.C. 2021. Is digital shoreline analysis system “fit” for gully erosion assessment? *Catena*, 203, 105307.
- Niknahad Gharmakher H., Jafari footami I., Sheidai Karkaj E. 2013. Effect of Enclosure Restoration Practices on Physical and Chemical Soil Properties in Arid Region of Maraveh Tapeh, Golestan Province, *Applied Soil Research*, 1 (2), 114-124.
- Poesen J., Nachtergaele J., Verstraeten G., Valentin C. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, 50 (2–4), 91–133.
- Poesen J., Vandaele K., Van Wesemael B. 1996. Contribution of gully erosion to sediment production. In: *Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives: Proceedings of an International Symposium Held at Exeter, UK, 15 -19 July*, 236. IAHS, p. 251.
- Roosta D.J., Enayati K.A., Vakili A. 2010. Survey effective of individually and combined organic and inorganic substances on the size of aggregates in a saline and sodic soil with silt loam texture. *Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 15(56), 169-179. (In Persian)
- Soleimanpour S.M., Soufi M., Rahimi H. 2010. Determining Effective Factors on Gully Development in Konartakhte Region, Fars Province, *Water and Soil*, 23(1): 131-141. (In Persian)
- Sadana U.S., and Bajwa M.S. 1985. Manganese equilibrium in submerged sodic soils as influenced by application of gypsum and green manuring. *Agriculture Science*. Cambridge, 104, 257-261.
- Shahab Arkhazlou H., Emami H., Haghnia Gh.H., Esmali A., Mahmood Abadi M. 2016. Determining topographic threshold and effect of soil properties on gully development in three region of Ardabil province, *Water and Soil Conservation*, 23(3), 1-24. (In Persian)
- Sidle R.C., Jarihani B., Kaka S.I., Koci J., Al-Shaibani A. 2019. Hydrogeomorphic processes affecting dryland gully erosion: Implications for modelling. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 43(1), 46–64.
- Torri D., Rossi M., Brogi F., Marignani M., Bacaro G., Santi E., Maccherini S. 2018. Badlands and the dynamics of human history, land use, and vegetation through centuries. In: *Badlands Dynamics in a Context of Global Change*. Elsevier, pp. 111–153.
- Valentin C., Poesen J., Li Y. 2005. Gully erosion: impacts, factors and control. *Catena* 63 (2–3), 132–153.
- Vanmaercke M., Poesen J., Van Mele B., Demuzere M., Bruynseels A., Golosov V., Fuseina Y. 2016. How fast do gully headcuts retreat? *Earth-Science Reviews*, 154, 336–355.
- Van Zijl G.M., Ellis F., and Rozanov A. 2014. Understanding the combined effect of soil properties on gully erosion using quantile regression. *South African Journal of Plant and Soil*, 31(3): 163–172.