

An Investigation on Topographic Threshold of Gully Erosion in the Iran Based on Meta-Analysis

Zeinab Sheikhi¹  | Aliakbar Nazari Samani^{1*}   | Haji Karimi² | Reza Bayat³

1. Department of Arid and Mountainous Region Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
2. Department of Rang and Watershed, Faculty of Agriculture, University of Ilam, Ilam, Iran.
3. Soil Conservation and Watershed Research Institute, Karaj, Iran.
Email: aknazari@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 25 Jun. 2024
Revised: 06 Dec. 2024
Accepted: 11 Dec. 2024
Published online: 01 Jun. 2025

Keywords:
Area,
Climate,
Landuse,
Rainfal,
Slope.

Abstract

Gully erosion is a typically threshold process which is important in land degradation and sediment contribution. Having knowledge on driving conditions and affected lands by gullies are crucial for land degradation management. In this research to prepare the gully erosion map over Iran land mass about scientific references (article, thesis and report) were investigated in order to scrutinizing of spatial data base and gully map. Location of 2719 gully headcuts under different climate and land use were identified. Environmental attributes including: soil, climate, rainfall and temperature were collected through using of DEM (12.5 and 30 m), and landuse by using of maps, scientific reports, research studies were extracted. The frequency of gullies was investigated in relation to literature investigation. Topographic threshold conditions were determined and the relative frequency of gully area under mentioned environmental factors were analyzed. The results show that the total gully area in Iran is about 1,328,852 ha. The most occurrence of this erosion is in semi-arid climates, with annual rainfall is 250-350 mm, high silt content, low slope (<5%) and under dry farming landuse. The lowest threshold coefficient (α) in both arid and semi-arid climates is related to ranglands. The β coefficient varies from 0.06 to 0.37 in arid climate and from 0.002 to 0.46 in semi-arid climate, which is indicating of mixing process (surface and subsurface) on gully developing. The resistance of sandy soils (due to permeability) and clay soils (due to cohesion) is higher than silty ones. The degradation of canopy cover and runoff generating are two main driving forces, which will be more important under climate change in the near future.

Cite this article: Sheikhi, Z., Nazari Samani, A., Karimi, H., Bayat, R. (2025). An Investigation on Topographic Threshold of Gully Erosion in the Iran Based on Meta-Analysis. *Journal of Range & Watershed Management*, 78 (2), 173-187. DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2024.378536.1774>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

تحلیل آستانه توپوگرافی فرسایش خندقی در کشور بر پایه فراتحلیل داده‌های موجود

زینب شیخی^۱ | علی اکبر نظری سامانی^{۱*} | حاجی کریمی^۲ | رضا بیات^۳

۱. گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

رایانامه: aknazari@ut.ac.ir

۲. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.

۳. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، کرج، ایران.

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۳/۱۱

فرسایش خندقی فرآیندی آستانه‌ای است که نقش مهمی در تخریب اراضی و تولید رسوب دارد. شناخت شرایط و اراضی تحت وقوع آن به عنوان یکی از مهمترین شاخص‌های شناسایی تخریب اراضی است. در این پژوهش به منظور تهیه نقشه فرسایش خندقی در سطح کشور با بررسی مقاله‌ها، پایان‌نامه‌ها و گزارش طرح پژوهشی نسبت به تدقیق موقعیت فرسایش خندقی و ایجاد پایگاه مکانی اقدام شد. موقعیت ۲۷۱۹ خندق در هر اقلیم و کاربری شناسایی شد. متغیرهای خاکی، اقلیم، بارندگی، دما و کاربری اراضی با استفاده از بررسی متون علمی-پژوهشی و مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ و ۳۰ متری استخراج شد. آستانه توپوگرافی و درصد فراوانی خندق‌ها در ارتباط با عوامل مذکور تعیین شد. یافته‌های حاصل بیانگر ۱۳۲۸۸۵۲ هکتار گستره خندق‌ها در سطح کشور است. اگرچه در عمل مساحت فوق بسیار بیشتر از این می‌باشد. بیشترین رخداد خندق در اقلیم نیمه‌خشک، طبقه بارندگی ۳۵۰-۲۵۰ میلی‌متر در سال، مقدار زیاد سیلت، شیب کمتر از ۵ درصد و کاربری زراعت دیم است. بیشترین حد آستانه (ضریب α) در هر دو اقلیم خشک و نیمه‌خشک مربوط به کاربری مرتع است. دامنه ضریب β (متأثر از نوع فرآیند) در اقلیم خشک از ۰/۰۶ تا ۰/۳۷ و در اقلیم نیمه خشک از ۰/۰۰۲ تا ۰/۴۶ متغیر است. در خاک‌های ماسه‌ای به دلیل قابلیت نفوذ بیشتر و در خاک‌های رسی به دلیل قابلیت چسبندگی، مقدار مقاومت در برابر فرسایش خندقی بیشتر از خاک‌های سیلتی است. تخریب پوشش سطحی و رواناب دو نیروی محرک مهم در رخداد خندق است و تحت شرایط تغییر اقلیم در آینده اهمیت بیشتری پیدا خواهند کرد.

کلیدواژه‌ها:

اقلیم،

بارندگی،

شیب،

کاربری اراضی،

مساحت.

استناد: شیخی، زینب، نظری سامانی، علی اکبر، کریمی، حاجی، بیات، رضا (۱۴۰۴). تحلیل آستانه توپوگرافی فرسایش خندقی در کشور بر پایه فراتحلیل داده‌های موجود. نشریه مرتع و آبخیزداری،

۷۸ (۲)، ۱۷۳-۱۸۷.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2024.378536.1774>

© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

فرسایش خندقی از انواع فرسایش آبی و فرآیندی پیچیده است که به صورت رشد قهقراپی موجب تخریب خاک و تشدید تخلیه رواناب می‌شود (نظری سامانی، ۱۳۸۶). خندق آبراهه‌ای نسبتاً دائمی، دارای دیواره جانبی که در زمان بارندگی، جریان آب به صورت موقت از آن عبور می‌کند (مورگان^۱، ۱۹۹۸). گسترده‌گی کشور ایران از نظر مکانی و اقلیمی و اهمیت فرسایش خندقی در تخریب خاک و سرزمین موجب شده است تا شرایط رخداد و عوامل مؤثر بر وقوع این نوع فرسایش در مناطق مختلف متفاوت باشد. از سوی دیگر نقش آن در تولید رسوب در مقیاس حوزه آبخیز بسیار قابل اهمیت است. به منظور بررسی فراوانی خندق‌ها در ارتباط با عوامل مؤثر لازم است تا ضمن جمع‌آوری اطلاعات مناطق مستعد خندق، نسبت به نقشه فرسایش خندقی در سطح کشور اقدام شود. بدین منظور در چند دهه اخیر مطالعاتی در این زمینه صورت گرفته است. امیری (۱۳۹۷) در حوزه آبخیز کلوچه بیجار در استان کردستان با هدف تعیین عوامل مؤثر در ایجاد فرسایش خندقی پژوهشی انجام داد و نشان داد که در ایجاد فرسایش خندقی کمترین تأثیر، سنگ‌شناسی، ژئومورفولوژی و نفوذپذیری و بیشترین تأثیر نیز مربوط به شیب، تراکم و فاصله از رودخانه است. افشاری و همکاران (۱۳۹۸) نیروی برشی و سرعت آب را از عوامل مهم در گسترش خندق‌های منطقه بیان کرد و با افزایش شیب به طور قابل توجهی بر میزان خندق‌ها افزوده می‌شود. راهی و همکاران (۱۴۰۰) به منظور ارائه مدلی برای پیش‌بینی فعالیت خندق‌ها و تعیین نقش کاربری اراضی بر شرایط آستانه فعالیت خندق‌ها در استان بوشهر تحقیقی انجام دادند و بیان کردند که مقدار ضریب β به هم نزدیک و از $۰/۲۳۳$ تا $۰/۲۰۵$ است ولی ضریب آستانه متفاوت بوده که مقدار آن برای کاربری کشاورزی $۵/۷۴$ و برای کاربری مرتع $۱۰/۶۵$ تخمین زدند. شهبازی و همکاران (۱۴۰۱) در هر اقلیم یک تا سه منطقه خندقی به عنوان هدف تعیین و در هر یک از آنها یک خندق معرف و دو تکرار شناسایی کردند و با عملیات میدانی و بازدید میدانی شناسنامه خندق‌ها را تکمیل کردند. همچنین در بین عوامل مؤثر در ایجاد و گسترش خندق‌ها، شدت بارندگی، شیب، فرسایش‌پذیری خاک به عنوان عوامل طبیعی و تخریب پوشش گیاهی بالادست حوزه، تغییر کاربری و بهره‌برداری نامناسب به عنوان عوامل انسانی در گسترش فرسایش خندقی اشاره کردند. ذاکری‌نژاد والوندی (۱۴۰۲) در استان فارس با استفاده از تصاویر گوگل ارث و بررسی‌های میدانی به پهنه‌بندی فرسایش خندقی در حوزه آبخیز خسویه پرداختند و نتایج حاصل از پژوهش آن‌ها نشان داد که شاخص ارتفاع، کاربری اراضی، پوشش گیاهی و عمق آبراهه، مؤثرترین شاخص‌ها در ایجاد فرسایش خندقی است. سعیدیان و همکاران (۱۴۰۲) در پژوهشی با عنوان بررسی عملکرد مدل بیشینه آنتروپی در تعیین عوامل مؤثر محیطی در ایجاد فرسایش خندقی در مناطق نیمه‌خشک بیان کردند که نوع اقلیم، سنگ‌شناسی، بارش و نوع خاک مهم‌ترین عوامل محیطی تأثیرگذار در فرسایش خندقی است.

اوکورو^۲ و همکاران (۲۰۱۳) با هدف ارائه یک مدل برای تخمین هدررفت خاک در حوزه‌ای در ایالات ایماواری^۳ تحقیقی انجام دادند که دقت بالایی برای تخمین هدررفت خاک داشت به گونه‌ای که میزان $۷۶/۱۵$ تن را برای پر بارش‌ترین ماه سال در منطقه تخمین زدند که کمتر از ۲ تن، با میزان فرسایش ناشی از معادله جهانی خاک اختلاف داشت و تأثیر عمق بارش در گسترش فرسایش خندقی را نشان داد. توری و پوزن^۴ (۲۰۱۴) منظور بررسی شرایط آستانه توپوگرافی در محیط‌های مختلف با مرور بیش از ۳۹ مقاله، ۶۳ گزارش و استاندارد کردن روابط به بررسی شرایط آستانه توپوگرافی در محیط‌های مختلف پرداختند و رابطه $S > \alpha A^{-\beta}$ یا $SA^{\beta} > \alpha$ برای رأس خندق‌های ناشی از جریان زمین از مجموعه داده‌های جمع‌آوری‌شده در بخش‌های مختلف جهان استخراج کردند. آن‌ها بیان کردند نوع استفاده از زمین، ضریب α را که نشان‌دهنده آستانه است، به طور واضحی تحت تأثیر قرار می‌دهد ولی به نظر نمی‌رسد ضریب β را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین بیان کردند، کمترین مقدار α متعلق به کشاورزی و بعد مرتع است که مقدار آن را می‌توان بر اساس ویژگی‌های خاک، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی و ضریب CN تعیین کرد. آن‌ها یک مدل فیزیکی نیز برای پیش‌بینی سر خندق در شرایط محیطی مختلف برآورد کردند.

1. Morgan

3. Okoro

4. Emoavery

5. Torri & Poesen

اینگرید^۱ و همکاران (۲۰۱۵) طی تحقیقی در آپالاشین، بیان نمودند که تداوم بارش نسبت به سایر ویژگی‌های بارش نقش بیشتری در تشکیل و گسترش خندق‌های منطقه دارد. امیری و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از الگوریتم یادگیری ماشین در حوزه آبخیز مهارلو به بررسی روابط بین عوامل مؤثر در ایجاد فرسایش خندقی پرداختند و از بین ۱۶ عامل مؤثر کاربری اراضی، فاصله از رودخانه و درصد رس را بیشترین عوامل مؤثر در ایجاد فرسایش خندقی نشان دادند. آن‌ها همچنین اقدامات حفاظتی و مدیریتی به ویژه در آغاز فرسایش خندقی را از عوامل مهم کنترل فرسایش خندقی بیان کردند. عرب عامری و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از تکنیک‌های آماری، شاخص آنتروپی، سبش از دور و GIS به مدل‌سازی فرسایش خندقی در استان سمنان پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که ارتفاع، شیب و سنگ‌شناسی، شرایط را برای ایجاد فرسایش خندقی در منطقه ایجاد کرده است. صوفی و همکاران (۲۰۲۰) در تحقیقی با استفاده از عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای و اندازه‌گیری میدانی نشان دادند که خندق‌ها در اقلیم‌های نیمه‌خشک، خشک و مدیترانه‌ای غالب هستند و رواناب سطحی فرآیند هیدرولوژیکی غالب در تشکیل خندق‌ها است. همچنین چرای بی‌رویه و تغییر کاربری اراضی از مرتع و جنگل به اراضی زیرکشت را عامل اصلی فرسایش خندقی بیان کردند. شن^۲ و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از پایگاه Google Earth و پیمایش‌های میدانی به پیش‌بینی، تجزیه و تحلیل و تعیین پارامترهایی که بیشترین تأثیر را بر فرسایش آب‌کندی دارد پرداختند و بیان کردند که نقشه حساسیت فرسایش خندقی حاصل از نتایج تحقیقات آن‌ها برای حفاظت خاک و کنترل فرسایش خندقی ناشی از فعالیت‌های انسانی، قابل استفاده است. وی^۳ و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی با هدف بررسی مکانیسم تشکیل خندق به بررسی رابطه بین ویژگی‌های خاک و فرسایش خندقی در نیمه‌گرمسیری کشور چین پرداختند. این پژوهش با استفاده از نمونه‌برداری از مناطق خندقی و غیر خندقی انجام شد و دریافتند که آب و هوای مرطوب با شرایط بارندگی بالا سبب کاهش کیفیت خاک و ایجاد فرسایش خندقی می‌شود.

با توجه به مطالب بیان شده در ارتباط با پژوهش‌های مختلف در این زمینه، گستره مناطق لسی در ایران و حاصلخیزی آن‌ها به دلیل وجود کانی‌های رسی موجود در آن از یکسو و پیچیدگی عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی، لازم است که تحقیقات بیشتری در سطح کشور انجام شود تا سهم مشارکت عوامل اشاره شده را که می‌تواند از خندق‌های یک منطقه به منطقه‌ای دیگر متفاوت باشد، شناسایی و بررسی کرد. در همین راستا مهم‌ترین اهداف این تحقیق شامل: ۱) شناسایی مناطق تحت تأثیر خندق بر اساس مطالعات پیشین و تهیه نقشه محدوده‌های دارای فرسایش خندقی در سطح کشور به صورت دقیق‌تر ۲) بررسی فراوانی خندق‌ها در ارتباط با اقلیم، سنگ‌شناسی، شیب، کاربری اراضی، بارندگی و ذرات خاک از اهداف مهم این تحقیق است. نتایج این پژوهش می‌تواند در درک بهتر این نوع فرسایش به همراه ایجاد پایگاه داده مناسب برای پژوهش‌های دیگر همچون تعیین آسیب‌پذیری به این فرآیند تخریب و ارزیابی خسارت آن در سطح کشور مورد استفاده قرار بگیرد.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. موقعیت جغرافیایی منطقه

کشور ایران ۱۶۴۸۱۹۵ کیلومتر مربع مساحت دارد و با مختصات ۳' ۲۵° تا ۴۷' ۳۹° عرض شمالی و ۵' ۴۴° تا ۱۸' ۶۳° طول شرقی در غرب آسیا قرار گرفته است. تعداد ۳۹ پایان‌نامه، ۱۱۱ مقاله همایشی، کنفرانسی، علمی-پژوهشی و ۲۵ طرح از پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری و مراکز تحقیقاتی منابع طبیعی و آبخیزداری مورد استفاده قرار گرفت.

1. Ingrid

2. Chen

3. Wei

۲-۲. روش پژوهش

نخست به منظور روش‌شناسی و تهیه اطلاعات پایه، اقدام به جمع‌آوری منابع علمی، طرح‌ها، مقاله‌ها و گزارش‌های پژوهشی در ارتباط با فرسایش خندقی در سطح کشور شد. با شناسایی مناطق مستعد خندق به کمک تصاویر هوایی، استخراج ویژگی‌های مربوط به آن و تعیین مرز مناطق مستعد خندق با ترسیم پلیگون در پایگاه اطلاعاتی Google Earth پهنه‌های خندقی از مناطق غیر خندقی جدا شد. خندق‌ها در مسیرهای زهکشی طبیعی، پرتگاه‌ها و شیارها با استفاده از ویژگی‌هایی اعم از دیواره عمودی پیشانی خندق، شیب تند و کمی محدب، خفرشدگی مناطق و وجود بالاکنند قابل تشخیص هستند. در شکل (۱) نمونه‌ای از تصویر ماهواره‌ای خندق‌های مطالعاتی در پایگاه اطلاعاتی Google Earth آمده است. همچنین برای تهیه نقشه‌های موضوعی فرسایش خندقی و تعیین مساحت بالادست مناطق خندقی مشخص شده به نرم‌افزار Arc GIS انتقال داده شد. سپس نقشه فرسایش خندقی ایران در این پژوهش به صورت دقیق‌تر تهیه شد. عوامل مؤثر بر خندق، فراوانی فرسایش خندقی در ارتباط با کاربری اراضی، اقلیم، بارندگی، خاک و طبقات شیب مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در این پژوهش با تهیه نقشه طبقه‌بندی اقلیمی ایران از پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور و همپوشانی با خندق‌های مطالعاتی، میزان درصد فراوانی خندق در هر اقلیم بررسی شد.

بافت خاک و میزان درصد ذرات آن با استفاده از مطالعات پیشین، مقاله‌ها و گزارش‌های پژوهشی در بسیاری از خندق‌ها مشخص شد. شیب خندق‌های مطالعاتی در این پژوهش در ۵ طبقه، از طبقات ۵-، ۱۲-، ۳۰-۱۲، ۶۰-۳۰ و بیشتر از ۶۰ درصد تعیین و مورد مقایسه قرار گرفت. میزان درصد فراوانی خندق‌ها در پنج کاربری غالب جنگل، مرتع، بایر، زراعت آبی و زراعت دیم (نقشه کاربری/پوشش اراضی سازمان جنگل‌ها و مراتع، ۱۳۸۲) مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل از درصد فراوانی خندق‌های مطالعاتی در هر کاربری بیان شد. به منظور بررسی دقیق‌تر، نمودار شاخص Fr برای فاکتورهای اقلیم، کاربری اراضی و شیب تعیین شد که فراوانی وقوع خندق‌ها را نسبت به مساحت، بر اساس شاخص تراکم نسبی یا Fr با توجه به رابطه (۱) بیان می‌کند.

$$Fr = \frac{A_T/A_L}{N_T/N_L} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن A_T : مساحت کل (هکتار)، A_L : مساحت پارامتر مورد مطالعه، N_T : تعداد کل خندق و A_T : تعداد خندق پارامتر مورد مطالعه تعیین محل ایجاد رأس خندق یکی از عوامل مهم در حفاظت خاک است که عوامل مختلفی به عنوان عوامل آستانه‌ای، در ایجاد فرسایش خندقی نقش دارند. در هر منطقه برای دو عامل شیب و مساحت، آستانه‌ای وجود دارد که از جمله عوامل مؤثر برای تجمع رواناب کافی در شروع و گسترش خندق‌ها به حساب می‌آیند.

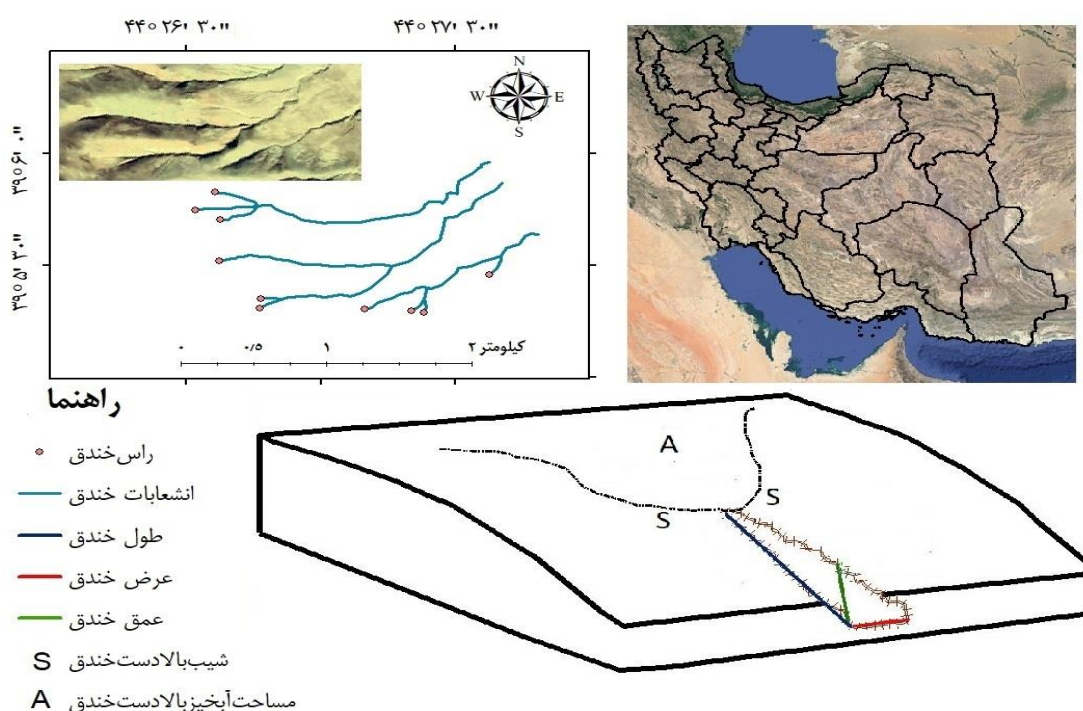
پژوهشگران متعددی برای تعیین حدود آستانه توپوگرافی از روابط رگرسیونی استفاده کرده‌اند که در آن با استفاده از یک رابطه توانی بین شیب و مساحت هر خندق، آستانه توپوگرافی تعیین می‌شود. به منظور محاسبه آستانه توپوگرافی بر اساس شیب - مساحت رابطه‌ای ارائه شده است (وندکروف و همکاران به نقل از رستمی‌زاد، ۱۳۹۳) که امکان تشخیص مناطق با قابلیت فرسایش خندقی را فراهم می‌کند (رابطه ۲).

$$S = \alpha A^{-\beta} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن S : شیب بالادست در نقطه شروع یا پیشانی توسعه خندق (درصد)، A : مساحت بالادست خندق (هکتار) و α, β : ضرایب تجربی معادله هستند که در شرایط محیطی مختلف، متفاوت‌اند.

α بیانگر مقدار آستانه است که با خاک، اقلیم، سنگ‌شناسی و نوع پوشش در ارتباط است. β توانی است که مرتبط با فرآیندهای غالب در فرسایش خندقی است و اگر کمتر از ۰/۲ باشد بیانگر فرآیند زیرسطحی و حرکات توده‌ای است، در صورتیکه مقدار بیشتر از ۰/۲ بیانگر

رواناب سطحی است (وندکخوف و همکاران به نقل از احمدی، ۱۳۹۸). همچنین اگر مقدار β منفی باشد، بیانگر رواناب سطحی و در صورتیکه منفی بودن، رواناب زیرسطحی غالب است (نظری سامانی و همکاران، ۲۰۰۹). تعیین اثرات تغییر اقلیم و کاربری زمین بر میزان پراکنش خندق‌ها یکی از موضوع‌های قابل اهمیت در مباحث مربوط به فرسایش خندقی است. در هر اقلیم و کاربری مشخص یک آستانه برای تشکیل خندق وجود دارد که مقدار آن می‌تواند بر اساس شیب و مساحت بالادست در هر محل تعیین شود. بنابراین پس از تعیین کاربری اراضی خندق‌های مطالعاتی در سطح اقلیم خشک و نیمه‌خشک، اقدام به تعیین شیب و مساحت بالادست راس هر خندق در محیط نرم‌فزار Arc GIS شد. بدین منظور با استفاده مدل قومی ارتفاعی ۱۲/۵ متری (در مواردی که مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متری موجود نبود، از مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متری استفاده شد). شیب راس هر خندق در محیط نرم‌فزار Arc GIS تعیین شد. همچنین مساحت آبخیز بالادست هر خندق نیز در محیط نرم‌فزار Arc GIS با استفاده از نقشه جریان تجمعی تعیین شد. به منظور تعیین معادله آستانه توپوگرافی به بررسی (۱) رابطه شیب - مساحت آبخیز بالادست خندق‌ها در اقلیم خشک در هر کاربری اراضی (۲) رابطه شیب - مساحت آبخیز بالادست خندق‌ها در اقلیم نیمه‌خشک در هر کاربری اراضی و (۳) تعیین ویژگی‌های مربوط به دما، بارندگی و متغیرهای خاکی در سطح اقلیم خشک و نیمه‌خشک در هر کاربری اراضی، پرداخته شد.



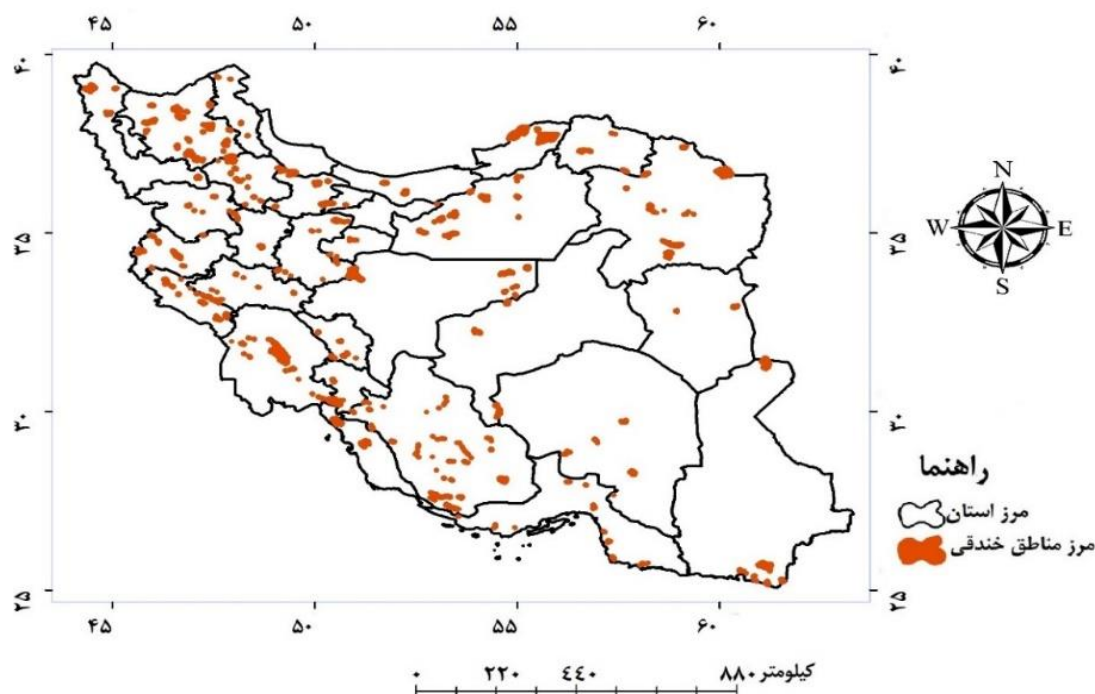
شکل ۱. نمونه‌ای از تصویر ماهواره‌ای خندق‌های مطالعاتی در پایگاه Google Earth (منطقه ریحانلو، استان آذربایجان غربی)

و معرفی ویژگی‌های مورفومتری بر اساس تصویر شماتیک یک خندق

۳. یافته‌های پژوهش

بر اساس نقشه فرسایش خندقی کشور حاصل از پژوهش حاضر در شکل (۲) مساحت به‌دست آمده با استفاده از Google Earth، ۱۳۲۸۸۵۲ هکتار است که گویای تقریبی مساحت خندق‌های موجود در ایران است و ۸/۰۶ درصد از مساحت کشور را شامل می‌شود. قدر مسلم مساحت اراضی خندقی در ایران بسیار بیشتر از این مقدار می‌باشد و نیاز به پایش سطح بیشتری از کشور است. نمودارهای بارندگی، اجزای ذرات خاک، اقلیم، طبقات شیب و کاربری اراضی به دست آمده از این تحقیق در شکل (۳)، درصد فراوانی

خندق‌ها در دو طبقه همباران ۲۵۰-۳۰۰ و ۳۵۰-۳۰۰ میلی‌متر در سال است که ۳۰/۰۱ درصد خندق‌های مطالعاتی را شامل می‌شود. فراوانی هر یک از اجزای ماسه، سیلت و رس در ارتباط با خندق‌های مورد مطالعه بیانگر این است که ۴۱/۱۶ درصد از خندق‌های موجود دارای میزان سیلت ۳۰-۴۰ درصد و ۳۷/۲۰ درصد از خندق‌ها دارای میزان ماسه ۳۰-۴۰ درصد و ۴۳/۷۶ درصد خندق‌ها دارای میزان رس ۲۰-۳۰ درصد هستند. همچنین بیشترین میزان وقوع خندق‌ها ابتدا در اقلیم نیمه‌خشک سپس در اقلیم خشک است و به ترتیب ۴۵/۷۸ و ۳۸/۷۲ درصد از خندق‌های مطالعاتی را شامل می‌شود که در مجموع ۸۴/۳۴ درصد از خندق‌های مورد بررسی در اقلیم نیمه‌خشک و خشک وجود دارد. دیگر اقلیم‌های مورد بررسی نیز شامل اقلیم‌های مدیترانه‌ای، نیمه‌مرطوب، مرطوب و بسیار مرطوب هستند که ۱۵/۶۶ درصد از خندق‌های مطالعاتی را شامل می‌شود. کمترین میزان فراوانی خندق‌ها مربوط به اقلیم بسیار مرطوب است که ۰/۱۱ درصد از خندق‌های مورد بررسی را در برمی‌گیرد.

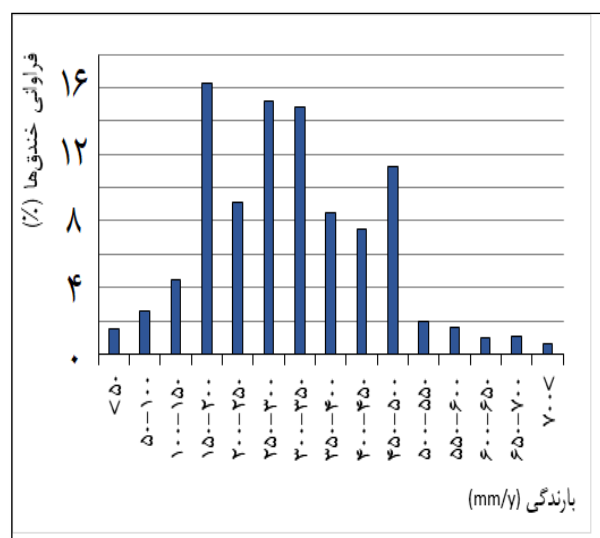
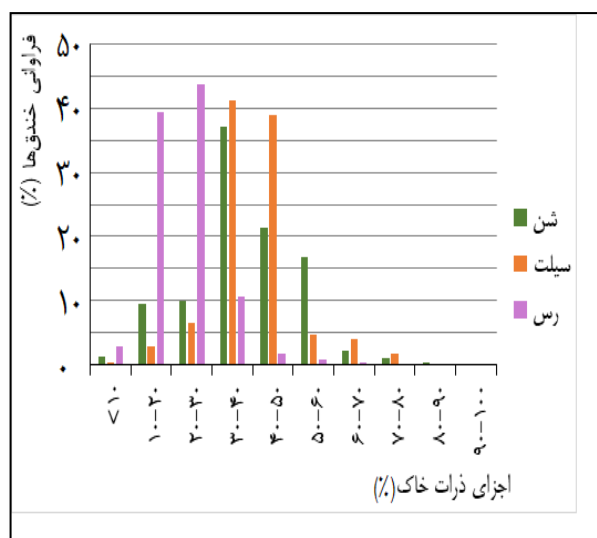


شکل ۲. محدوده‌های دارای فرسایش خندقی در ایران (منبع: حاصل از یافته‌های پژوهش حاضر)

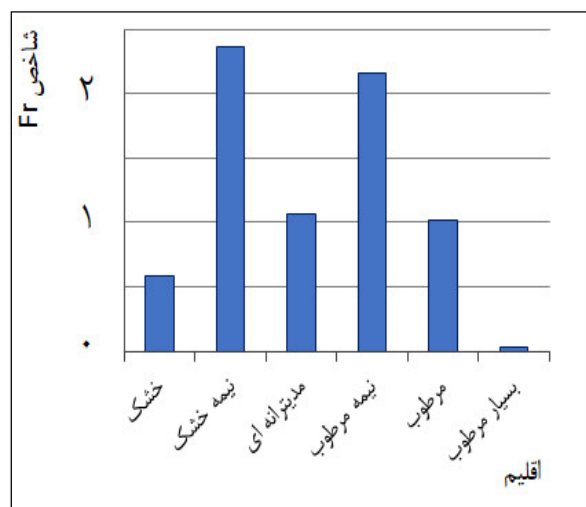
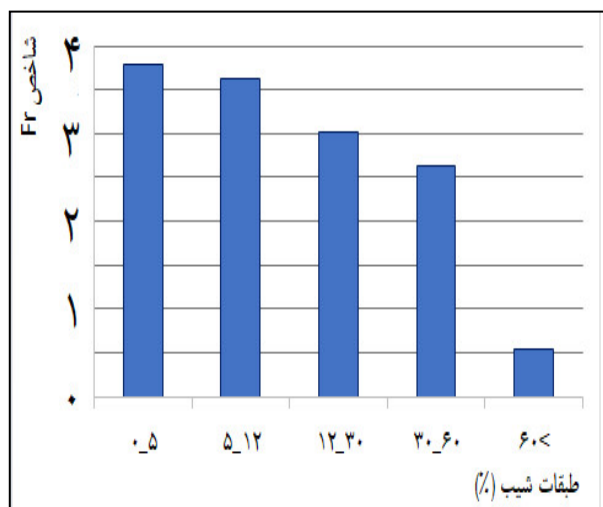
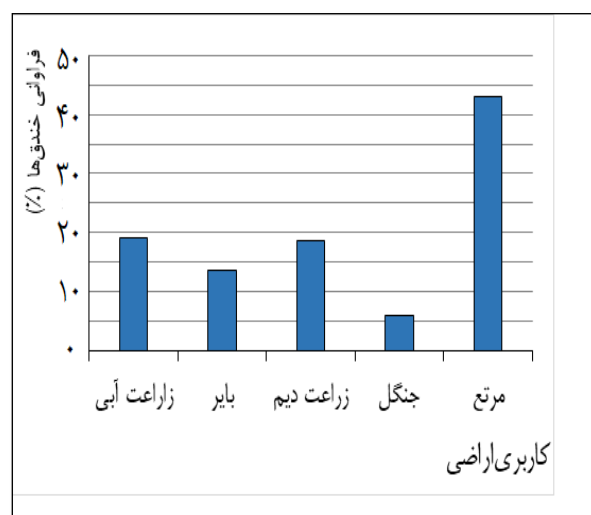
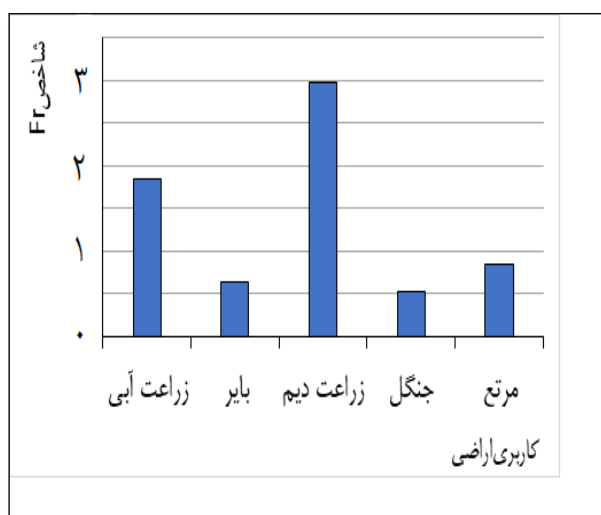
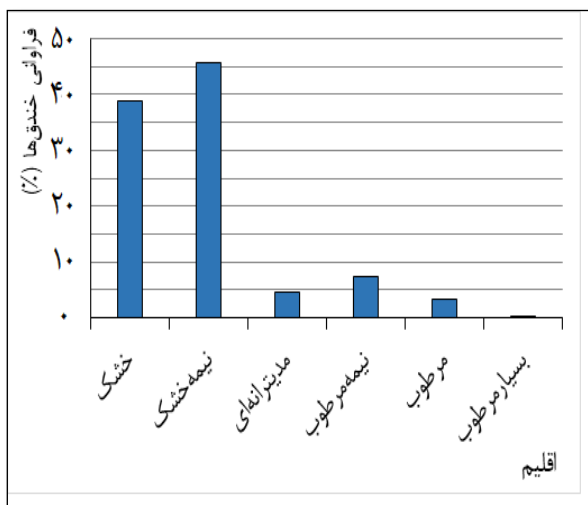
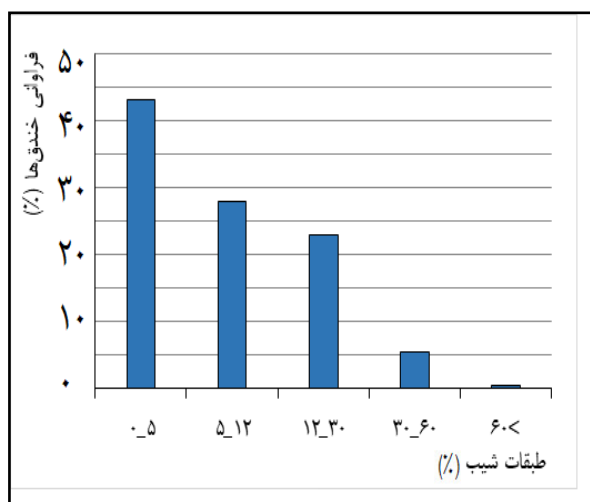
بیشترین فراوانی رخداد خندق‌ها در طبقه شیب ۵-۰ و کمترین فراوانی رخداد خندق‌ها در طبقات شیب بیشتر از ۳۰ درصد است. با فرض ثابت بودن دیگر عوامل به علت وقوع فرسایش خندقی در طبقه شیب ۵-۰ که ۴۳/۰۶ درصد از خندق‌های مورد بررسی را شامل می‌شود، می‌توان این طبقه از شیب را به عنوان شیب بحرانی در رخداد فرسایش خندقی بیان کرد. بیشترین میزان وقوع خندق‌ها در اراضی مرتعی و شامل ۴۲/۹۹ درصد از خندق‌های مورد بررسی است. کمترین میزان فراوانی خندق‌ها نیز در کاربری جنگل است که ۵/۹۲ درصد از خندق‌های مطالعاتی را شامل می‌شود. دیگر کاربری‌ها نیز شامل کاربری‌های بایر، زراعت آبی و زراعت دیم است. نتایج حاصل از فراوانی وقوع خندق‌ها در ارتباط با شاخص Fr برای کاربری اراضی در شکل (۳) بیانگر بیشترین میزان وقوع خندق‌ها در کاربری زراعت دیم است. بررسی شاخص Fr در ارتباط با شیب و اقلیم، تفاوتی در نتایج حاصل، ایجاد نکرد.

بر اساس ویژگی‌های حاصل از خندق‌های مورد بررسی در هر کاربری اراضی با استفاده از تطبیق در نرم‌افزار Arc GIS در جدول (۱)

بیشترین و کمترین میانگین بارندگی سالانه خندق‌ها در کاربری زراعت دیم و زراعت آبی است بیشترین میزان دما در کاربری بایر و کمترین میزان دما در کاربری زراعت دیم است. بیشترین میانگین عمق خندق‌ها در کاربری مرتع و کمترین میانگین عمق خندق‌ها در کاربری جنگل و زراعت دیم است. بیشترین و کمترین میانگین عرض خندق‌ها به ترتیب در کاربری مرتع و زراعت دیم است. بیشترین میزان میانگین درصد ماسه، سیلت و رس در کاربری‌های بایر، جنگل و زراعت دیم است و کمترین میانگین درصد ماسه، سیلت و رس در کاربری زراعت آبی است. ویژگی‌های حاصل از خندق‌های مورد بررسی در هر اقلیم با استفاده از تطبیق در نرم‌افزار Arc GIS نیز در جدول (۲) بیانگر این است که بیشترین میانگین دمای خندق‌ها در اقلیم خشک و کمترین میانگین دمای خندق‌ها در اقلیم مرطوب است. با توجه به اینکه در اقلیم بسیار مرطوب داده‌ای برای عرض و عمق خندق‌ها موجود نبود، از بین دیگر اقلیم‌های مورد مطالعه، بیشترین و کمترین میانگین عمق خندق‌ها به ترتیب در اقلیم نیمه‌خشک و نیمه‌مرطوب است و بیشترین و کمترین میانگین عرض خندق‌ها نیز به ترتیب در اقلیم مرطوب و اقلیم خشک است. بیشترین میانگین درصد ماسه، سیلت و رس در اقلیم‌های خشک، نیمه‌خشک و مدیترانه‌ای است و کمترین میزان میانگین درصد ماسه، سیلت و رس در اقلیم نیمه‌خشک، نیمه‌مرطوب و خشک است. نتایج تحقیقات حاصل از بررسی آستانه توپوگرافی شیب-مساحت بالادست خندق‌ها در محیط Excel برای اقلیم خشک در هر کاربری اراضی در جدول (۳) و جدول (۴) نشان‌دهنده این است که بیشترین مقدار ضریب α در اقلیم خشک، کاربری مرتع و کمترین مقدار ضریب α در اقلیم خشک، کاربری جنگل است که بیانگر مقدار آستانه توپوگرافی در این کاربری‌ها است. بنابراین آستانه توپوگرافی در اقلیم خشک، کاربری جنگل نسبت به سایر کاربری‌های اقلیم خشک کمتر است و آستانه توپوگرافی در اقلیم خشک، کاربری مرتع نسبت به سایر کاربری‌های اقلیم خشک بیشتر است. نمای رابطه در اقلیم خشک در هر کاربری اراضی منفی است. کمترین مقدار ضریب β در اقلیم خشک، کاربری جنگل است. بیشترین ضریب β نیز در اقلیم خشک، کاربری زراعت دیم و دارای نمای رابطه منفی است. بیشترین و کمترین میانگین بارندگی سالانه خندق‌ها در اقلیم خشک-کاربری زراعت دیم و اقلیم خشک-کاربری بایر است. بیشترین و کمترین میانگین عمق خندق‌ها به ترتیب در اقلیم خشک، کاربری مرتع و اقلیم خشک کاربری، زراعت دیم است. بیشترین و کمترین میانگین عرض خندق‌ها به ترتیب در کاربری جنگل و زراعت دیم است. بیشترین میزان میانگین درصد ماسه، سیلت و رس در اقلیم خشک-کاربری بایر، اقلیم خشک-کاربری زراعت دیم و اقلیم خشک-کاربری زراعت دیم است. کمترین میزان میانگین درصد ماسه، سیلت و رس در اقلیم خشک-کاربری بایر، اقلیم خشک-کاربری مرتع و اقلیم خشک-کاربری بایر است.



شکل ۳. نمودار درصد فراوانی خندق‌ها در ارتباط متغیرهای خاکی، بارندگی، شیب، اقلیم و کاربری اراضی



نتایج حاصل از بررسی آستانه توپوگرافی شیب- مساحت بالادست خندق‌ها برای اقلیم نیمه‌خشک در هر کاربری اراضی در جدول (۵) و جدول (۶) بیشترین مقدار ضریب α در اقلیم نیمه‌خشک، کاربری مرتع است و کمترین مقدار ضریب α در اقلیم نیمه‌خشک، کاربری بایر است که بیانگر مقدار آستانه توپوگرافی در اقلیم نیمه‌خشک در این کاربری‌ها است. کمترین مقدار ضریب β نیز در اقلیم نیمه‌خشک، کاربری زراعت آبی و بیشترین ضریب β در اقلیم نیمه‌خشک، کاربری زراعت دیم است و منفی است. بیشترین و کمترین میانگین بارندگی سالانه خندق‌ها در اقلیم نیمه‌خشک- کاربری جنگل و اقلیم نیمه‌خشک- کاربری مرتع است. بیشترین میانگین سالانه دما در اقلیم نیمه‌خشک، کاربری بایر و کمترین میانگین سالانه دما در اقلیم نیمه‌خشک، کاربری جنگل است. بیشترین و کمترین میانگین عمق خندق‌ها به ترتیب در اقلیم نیمه‌خشک، کاربری زراعت دیم و اقلیم نیمه‌خشک، کاربری بایر است. بیشترین و کمترین میانگین عرض خندق‌ها به ترتیب در اقلیم نیمه‌خشک، کاربری زراعت دیم و اقلیم نیمه‌خشک کاربری بایر است. بیشترین میزان میانگین درصد ماسه، سیلت و رس در اقلیم نیمه‌خشک- کاربری مرتع، اقلیم نیمه‌خشک- کاربری جنگل، اقلیم نیمه‌خشک- کاربری زراعت دیم است و کمترین میزان میانگین درصد ماسه، سیلت و رس در اقلیم نیمه‌خشک، کاربری جنگل، اقلیم نیمه‌خشک، کاربری زراعت دیم و اقلیم خشک، کاربری زراعت آبی است. بیشترین مساحت آبخیز بالادست در اراضی جنگلی است. آستانه توپوگرافی شیب- مساحت بالادست خندق‌ها در اقلیم خشک در کاربری‌های زراعت آبی، مرتع، بایر و جنگل دارای نمای رابطه منفی و فرآیند هیدرولوژیک مؤثر به صورت سطحی و زیر سطحی است. همچنین آستانه توپوگرافی شیب- مساحت بالادست خندق‌ها در اقلیم خشک در کاربری زراعت دیم و ضریب β بیشتر از ۰/۲ است و فرآیند هیدرولوژیک غالب به صورت رواناب سطحی است. آستانه توپوگرافی شیب- مساحت بالادست خندق‌ها در اقلیم نیمه‌خشک- کاربری‌های مرتع، بایر، جنگل زراعت آبی دارای نمای رابطه منفی و فرآیند هیدرولوژیک مؤثر به صورت سطحی- زیرسطحی است. نمای رابطه در اقلیم نیمه‌خشک، کاربری زراعت آبی مثبت و فرآیند غالب زیرسطحی است. همچنین نمای رابطه در اقلیم نیمه‌خشک، کاربری زراعت دیم منفی و ضریب β بیشتر از ۰/۲ است و فرآیند غالب به صورت سطحی است.

جدول ۱. نتایج ویژگی‌های مربوط به دما، بارندگی، متغیرهای خاکی و مورفومتری خندق‌ها در کاربری اراضی مختلف

کاربری اراضی	میانگین بارندگی سالانه (mm)	میانگین دما ($^{\circ}\text{C}$)	میانگین ماسه (%)	میانگین سیلت (%)	میانگین رس (%)	دامنه ماسه (%)	دامنه سیلت (%)	دامنه رس (%)	میانگین عمق (m)	میانگین عرض (m)
زراعت آبی	۱۲۶/۵۴	۱۷/۱۷	۸/۳۲	۷/۹	۴/۶۱	۵۲/۴۶	۵۸/۷۲	۵۴/۷۶	۱/۵۶	۲/۸۹
مرتع	۳۲۴/۷۱	۱۵/۹۰	۳۷/۹۲	۳۸/۶۹	۲۳/۳۸	۷۳	۷۱	۶۳/۰۳	۲/۳۲	۴/۳۳
بایر	۱۸۳/۱۷	۲۱/۰۳	۴۴/۴۲	۳۹/۶۰	۱۵/۹۷	۵۱/۶۸	۳۶/۷۲	۳۷/۸۸	۱/۶۵	۴/۲۹
جنگل	۳۹۸/۱۵	۱۷/۱۳	۳۱/۱	۴۴/۹۹	۲۳/۹	۴۶/۵	۶۹/۵	۴۱/۲	۰/۳	۲
زراعت دیم	۴۱۴	۱۳/۱۳	۳۵/۶۹	۳۸/۲۸	۲۶/۰۱	۷۶/۸	۶۴/۸۳	۸۲/۵	۰/۳	۰/۸

جدول ۲. نتایج ویژگی‌های مربوط به دما، بارندگی، متغیرهای خاکی و مورفومتری خندق‌ها در شرایط اقلیمی

اقلیم	میانگین بارندگی سالانه (mm)	میانگین دما ($^{\circ}\text{C}$)	میانگین ماسه (%)	میانگین سیلت (%)	میانگین رس (%)	دامنه ماسه (%)	دامنه سیلت (%)	دامنه رس (%)	میانگین عمق (m)	میانگین عرض (m)
خشک	۲۲۱/۳۸	۲۰/۶۴	۴۲/۹۶	۳۹/۸۷	۱۷/۱۶	۶۹/۷۶	۷۳/۲۲	۵۷/۴۶	۲/۳۳	۴
نیمه‌خشک	۳۵۲/۶۲	۱۴/۸۹	۳۳/۳۳	۴۱/۴	۲۵/۲۵	۷۵/۸	۷۱	۸۲/۵	۲/۶۴	۵/۲۱
مدیترانه‌ای	۳۸۶/۳۶	۹/۴۵	۳۳/۴۹	۳۳/۴۷	۳۳/۰۲	۲۰	۱۷	۲۰	۱/۸۵	۴/۵۷
نیمه‌مرطوب	۵۳۸/۱۱	۱۰/۷۵	۴۲/۹	۳۱/۰۶	۲۶/۰۳	۳۵	۳۰	۱۲/۹	۱/۱۸	۶/۶۵
مرطوب	۵۷۹/۶۹	۹/۲۸	۴۲/۷۵	۳۳/۳۷	۲۳/۸۷	۵۵	۳۷	۲۴	۱/۲۷	۷/۰۴
بسیار مرطوب	۹۱۱/۹۱	۱۰/۴۸	*	*	*	*	*	*	*	*

جدول ۳. نتایج حاصل از نمودارهای آستانه توپوگرافی فرسایش خندقی در اقلیم خشک در هر کاربری اراضی

کاربری اراضی	میانگین مساحت بالادست (ha)	میانگین شیب (%)	ضریب α	ضریب β	نمای رابطه	فرآیند هیدرولوژیک غالب	R^2	معادله آستانه توپوگرافی
زراعت آبی	۴/۱۷	۴/۴۷	۳/۳۱	۰/۰۶۵	منفی	سطحی - زیرسطحی	۰/۰۲	$S = ۳/۳۱ X^{-۰/۰۶۵}$
مرتع	۱/۶۲	۶/۰۶	۵/۲۱	۰/۰۷۱	منفی	سطحی - زیرسطحی	۰/۰۱	$S = ۵/۲۱ X^{-۰/۰۷۱}$
بایر	۲/۲۸	۴/۹۱	۳/۱۶	۰/۰۶۹	منفی	سطحی - زیرسطحی	۰/۰۱	$S = ۳/۱۶ X^{-۰/۰۶۹}$
جنگل	۱/۳۲	۳/۲۱	۲/۴۷	۰/۰۰۶	منفی	سطحی - زیرسطحی	۰/۱	$S = ۲/۴۷ X^{-۰/۰۰۶}$
زراعت دیم	۱/۰۷	۷/۷	۴/۲۱	۰/۳۷	منفی	سطحی	۰/۰۴	$S = ۴/۲۱ X^{-۰/۰۳۷}$

جدول ۴. نتایج ویژگی‌های مربوط به دما، بارندگی، متغیرهای خاکی و مورفومتری خندق‌ها در اقلیم خشک در کاربری اراضی مختلف

کاربری اراضی	میانگین سالانه بارندگی (mm)	میانگین دما ($^{\circ}C$)	میانگین ماسه (%)	میانگین سیلت (%)	میانگین رس (%)	دامنه ماسه (%)	دامنه سیلت (%)	دامنه رس (%)	میانگین عمق (m)	میانگین عرض (m)
زراعت آبی	۲۲۵/۲۱	۲۰/۰۵	۳۸/۶۸	۴۱/۱۹	۲۰/۱۱	۴۷/۷۲	۵۸/۷۲	۵۴/۷۶	۲/۰۳	۳/۰۵
مرتع	۲۴۲/۶۱	۲۰/۷۱	۴۳/۲	۳۸/۵۰	۱۸/۲۶	۶۵/۷۶	۵۸/۷۲	۵۰/۴۵	۲/۸۵	۴/۱۴
بایر	۱۸۴/۴۳	۲۰/۹۴	۴۵/۲۵	۳۹/۵۵	۱۵/۱۹	۴۵/۲۸	۳۶/۶۵	۲۲/۱۸	۱/۸۵	۵/۷۵
زراعت دیم	۲۹۴/۱۲	۱۹/۳۷	۳۴/۵۸	۴۲/۲۴	۲۳/۱۶	۶۱/۷۶	۵۴/۶۶	۴۲/۴	۱/۸۳	۳/۵۱

جدول ۵. نتایج حاصل از نمودارهای آستانه توپوگرافی فرسایش خندقی در اقلیم نیمه‌خشک در کاربری اراضی مختلف

کاربری اراضی	میانگین مساحت بالادست (ha)	میانگین شیب (%)	ضریب α	ضریب β	نمای رابطه	فرآیند هیدرولوژیک غالب	R^2	معادله آستانه توپوگرافی
زراعت آبی	۴/۱۷	۴/۴۷	۸/۱۹	۰/۰۰۲	مثبت	زیرسطحی	۰/۰۰۲	$S = ۸/۱۹ X^{۰/۰۰۲}$
مرتع	۱/۶۲	۱۲/۷۴	۹/۷۸	۰/۱	منفی	سطحی - زیرسطحی	۰/۰۰۴	$S = ۹/۷۸ X^{-۰/۰۱}$
بایر	۲/۶۹	۹/۵۳	۱/۷۸	۰/۲	منفی	سطحی - زیرسطحی	۰/۵۳	$S = ۱/۷۸ X^{-۰/۰۲}$
جنگل	۵/۱۸	۱۱/۸۴	۷/۴۹	۰/۰۴	منفی	سطحی - زیرسطحی	۰/۰۰۵	$S = ۷/۴۹ X^{-۰/۰۰۴}$
زراعت دیم	۱/۹۶	۸/۸۰	۱/۷۹	۰/۴۶	منفی	سطحی	۰/۱۱	$S = ۱/۷۹ X^{-۰/۰۴۶}$

جدول ۶. نتایج مربوط به دما، بارندگی، متغیرهای خاکی و مورفومتری خندق‌ها در اقلیم نیمه‌خشک در کاربری اراضی مختلف

کاربری اراضی	میانگین بارندگی سالانه (mm)	میانگین دما ($^{\circ}C$)	میانگین ماسه (%)	میانگین سیلت (%)	میانگین رس (%)	دامنه ماسه (%)	دامنه سیلت (%)	دامنه رس (%)	میانگین عمق (m)	میانگین عرض (m)
زراعت آبی	۳۳۸/۲۵	۱۶/۰۲	۳۳/۱۵	۴۳/۸۶	۲۲/۹۷	۴۸/۱	۴۰/۵	۲۱/۳۴	۲/۷۹	۵/۲۱
مرتع	۳۳۴/۹۵	۱۴/۵۶	۳۴/۷	۳۸/۸۸	۲۶/۴۱	۷۳	۷۱	۵۹/۷۳	۲/۱۵	۴/۷۵
بایر	۳۷۱/۶۴	۱۷/۹۰	۳۴/۳۷	۳۹/۵۶	۲۶/۰۵	۷۵/۸	۶۹	۸۲/۵	۱/۹۹	۴/۳۷
جنگل	۴۲۴/۵۸	۱۶/۸۴	۳۰/۰۹	۴۵/۱۶	۲۴/۷۳	۳۷/۵	۴۸/۲۵	۲۶/۷۵	۳/۳۷	۴/۴۳
زراعت دیم	۳۷۲/۶۱	۱۳/۷۴	۳۴/۴۴	۳۸/۵۹	۲۶/۹۵	۷۵/۸	۶۴/۸۳	۸۲/۵	۳/۶۲	۶/۶۹

۴. بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به وضعیت اقلیم کشور که بیشترین وسعت آن را اقلیم خشک و نیمه‌خشک تشکیل می‌دهد و از آنجایی که ایجاد و توسعه خندق‌ها در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک سرعت بیشتری دارد، کاهش نزولات جوی زمینه تشکیل و توسعه خندق‌ها را در سطح زمین ایجاد کرده است. هر یک از عوامل مؤثر در وقوع فرسایش مثل اقلیم، خاک و نوع استفاده از اراضی دارای آستانه وقوع متفاوتی هستند که به طور قابل توجهی در رخداد فرسایش خندقی نقش دارند. با شناخت عوامل مؤثر بر آستانه فرسایشی، می‌توان پارامترهای دخیل در فرسایش را شناخت و جهت جلوگیری از ایجاد آن اقدام نمود.

بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش مساحت خندق‌های موجود در سطح کشور ۱۳۲۸۸۵۲ هکتار است و با نتایج صوفی و همکاران (۲۰۲۰) که مساحت خندق‌های ایران را در مطالعات خود ۱۴۰۰۰۰۰ هکتار تخمین زدند، نزدیک است. آنچه مسلم است محدوده شناسایی شده در این پژوهش فقط شامل اراضی است که توسط عارضه خندق اشغال شده است و پهنه اراضی متأثر شده نمی‌باشد. لذا در عمل سطح واقعی اراضی خندقی شده در ایران بسیار بیشتر از این مقدار است و نیاز به انجام پایش و بازبینی بیشتر می‌باشد. بیشترین میزان وقوع خندق‌ها به دلیل شرایط بارندگی، پوشش کمتر و الگوهای رگباری در اقلیم نیمه‌خشک است. در پژوهش‌های شه‌بازی و همکاران (۱۴۰۱) و سعیدیان و همکاران (۱۴۰۲) اقلیم نیمه‌خشک از عوامل مؤثر در تشکیل و توسعه خندق‌ها بیان شده است. بر اساس بررسی‌های انجام شده در طبقات بارندگی کمتر از ۵۰، ۱۰۰-۵۰ و ۱۵۰-۱۰۰ میلی‌متر در سال به دلیل کمبود پوشش گیاهی و بارندگی، فراوانی فرسایش خندق‌ها نسبت به طبقه بارندگی ۲۵۰-۲۰۰ کمتر است. سپس به دلیل تأثیر پوشش کم در طبقه همباران ۲۰۰-۱۵۰ میلی‌متر در سال، فراوانی خندق‌ها ۱۶/۲۵ درصد از خندق‌های مطالعاتی را شامل می‌شود. در طبقه ۲۵۰-۲۰۰ میلی‌متر در سال، به دلیل اثرات پوشش گیاهی، کاهش وقوع خندق‌ها مشاهده شد و مجدد در طبقات ۳۰۰-۲۵۰ و ۳۵۰-۳۰۰ میلی‌متر در سال به علت فرساینده‌گی بارندگی و تغییرات پوشش گیاهی، فرسایش افزایش می‌یابد. پس از آن در طبقات همباران ۵۰۰-۳۵۰ میلی‌متر در سال نیز به علت اثر حاصل از افزایش فرساینده‌گی، افزایش فرسایش مشاهده شد. اما در طبقات بارندگی بیشتر از ۷۰۰ میلی‌متر در سال به دلیل افزایش مجدد اثرات پوشش، کاهش میزان پراکنش خندق‌ها مشاهده شد. بنابراین میزان بارندگی ۳۵۰-۲۵۰ میلی‌متر در سال نقش قابل توجهی در فراوانی وقوع فرسایش خندقی در ایران دارد و بیشترین تأثیر در ایجاد و توسعه خندق‌ها را دارد. در نتیجه بارندگی‌های ۳۵۰-۲۵۰ میلی‌متر می‌تواند بیانگر ارتفاع یا مقدار مشخصی از بارندگی در تشکیل و توسعه فرسایش خندق باشد. صوفی و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهش خود بیان کردند که کمترین وقوع رخداد خندق‌ها مرتبط با طبقات بارندگی زیر ۱۰۰ و بالای ۱۰۰۰ میلی‌متر در سال است و بیان کردند که ۲۲ درصد وقوع خندق‌ها در طبقه بارندگی ۳۰۰-۲۰۰ میلی‌متر در سال است. بعلاوه بیان کردند که ۱۷ درصد از وقوع خندق‌ها در طبقه ۵۰۰-۶۰۰ میلی‌متر در سال و ۱۶ درصد نیز در طبقه بارندگی ۱۰۰۰-۶۰۰ میلی‌متر در سال رخ می‌دهد. این نتایج با نتایج حاصل از تحقیق سازگار است. از آنجایی که میزان بارندگی در کاربری جنگل کمتر از کاربری زراعت دیم است، می‌توان بیان کرد که در مناطق جنگلی با بارندگی در محدوده‌های کم، پوشش زیر اشکوب ضعیف است و رخداد خندق بیشتر است. نتایج حاصل از بررسی کاربری اراضی در ارتباط با رخداد فرسایش خندقی بیانگر بیشترین فراوانی وقوع خندق‌ها در کاربری زراعت دیم است. زنجانی جم (۱۳۹۲) و صابر چناری و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهش‌های خود بیان کردند که بیشترین وقوع فرسایش خندقی در کاربری مرتع است که با نتایج حاصل از این پژوهش مطابقت ندارد ولی با نتایج شه‌بازی و همکاران (۱۴۰۱) و سعیدیان و همکاران (۱۴۰۲) مبنی بر فراوانی وقوع خندق‌ها در اراضی زراعی همخوانی دارد. از آنجایی که خندق‌ها در شیب‌های ۵-۰ گسترش بیشتری دارند، بنابراین اکثر خندق‌ها در مناطقی کم‌شیب تشکیل شده‌اند. در نتیجه در دامنه‌های با شیب زیاد، فرصت کافی برای نفوذ آب وجود ندارد و آبراهه‌ها با پیوستن به هم و ایجاد رواناب به سمت مناطق با شیب کم جریان می‌یابند، به همین دلیل در مناطق با شیب زیاد امکان تشکیل فرسایش خندقی کم است. یافته‌های این پژوهش با نتایج حاصل از پژوهش‌های یمانی و همکاران (۱۳۹۲)، عبدالمی (۱۳۹۴)، راهی و همکاران (۱۴۰۰) و ذاکری‌نژاد و الوندی (۱۴۰۲) که بیانگر وقوع فرسایش خندقی در شیب‌های پایین است، همخوانی دارد. نتایج حاصل از این تحقیق در ارتباط با درصد ذرات خاک نشان‌دهنده بالابودن میزان درصد سیلت در وقوع خندق‌های مطالعاتی است. به عبارتی در خاک‌های ماسه‌ای به دلیل قابلیت نفوذ

بیشتر و در خاک‌های رسی به دلیل قابلیت چسبندگی، میزان مقاومت در برابر فرسایش بیشتر از خاک‌های سیلتی است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت فراوانی سیلت موجب حساسیت بیشتر نسبت به فرسایش می‌شود. با توجه به این نتایج با افزایش میزان ماسه تا حدی، میزان وقوع خندق‌ها بیشتر می‌شود. عبارتی وجود ذرات ماسه به علت چسبندگی کمتر، مقاومت زیادی در برابر فرسایش ندارند که منجر به واگرایی خاک می‌شود و در مجاورت با آب، انسجام خود را از دست می‌دهد، این امر سبب کاهش نفوذ و ظرفیت نگهداری آب در خاک می‌شود. در نتیجه مقاومت برشی خاک افزایش می‌یابد و زمینه ایجاد فرسایش را فراهم می‌کند. این نتایج با نتایج مددی و همکاران (۱۴۰۱) و اوکلی^۱ و همکاران (۲۰۲۱) مبنی بر ارتباط مستقیم بین میزان ماسه و وقوع فرسایش خندقی مطابقت دارد. افزایش میزان سیلت در خاک نیز سبب افزایش وقوع فرسایش خندق‌ها شده است به گونه‌ای که با افزایش میزان سیلت در خاک به محض دریافت رطوبت، ذرات به راحتی تخریب شده و فرسایش می‌یابد که با نتایج ژانگ^۲ و همکاران (۲۰۲۰) همخوانی دارد. ذرات رس در فراوانی رخداد خندق‌ها تأثیر کمتری دارند به گونه‌ای که به علت چسبندگی و ریز بودن خاکدانه‌ها مقاومت برشی خاک کاهش یافته و قابلیت نگهداری آب در خاک افزایش می‌یابد. در نتیجه رس‌ها منبسط و منافذ آن‌ها بسته می‌شود و سبب کاهش نفوذپذیری و تشکیل خندق می‌شود که با نتایج تحقیقات قلجایی (۱۳۹۲) و اصغری و همکاران (۲۰۱۷) مطابق است.

ابعاد خندق‌ها می‌تواند از عوامل تشخیص فرسایش خندقی از آبراهه‌ای باشد. افزایش عرض خندق نشان‌دهنده وجود جریان‌های غیرمتمرکز، سیلابی و گسترش آن بعد از بارش باران در طول زمان است که میزان سرعت و شدت بارندگی‌های هر منطقه را بیان می‌کند (نورمحمدی و حق‌زاده، ۲۰۱۴). یکی از دلایل کمتر بودن آستانه توپوگرافی در اقلیم خشک، کاربری جنگل نسبت به سایر کاربری‌های اقلیم خشک، می‌تواند به علت پوشش زیر اشکوب ضعیف در کاربری مذکور باشد. از آنجایی که طول و عرض خندق‌ها در کاربری زراعت دیم نسبت به دیگر کاربری‌ها در اقلیم خشک کمتر است، می‌توان بیان کرد که عواملی دیگری اعم از خاک یا دیگر آستانه‌ها در خندق‌های کاربری زراعت دیم در اقلیم خشک دخیل هستند. آستانه توپوگرافی در اقلیم نیمه‌خشک بعد از کاربری مرتع، در کاربری زراعت آبی به علت اثرات پوشش و بقایای گیاهی بیشتر از کاربری‌های دیگر است. همچنین به علت فقدان پوشش، کمترین آستانه توپوگرافی در اقلیم نیمه‌خشک، کاربری بایر است. بیشترین مقدار قدر مطلق ضریب β در اقلیم نیمه‌خشک مربوط به کاربری بایر است که برابر $0/2-$ است و بیانگر فعال بودن فرایندهای رواناب سطحی و زیرسطحی در این مناطق است. در اقلیم خشک نیز بیشترین ضریب β مربوط به کاربری زراعت دیم و بیشتر از $0/4$ و بیانگر رواناب سطحی است. در واقع در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل فعال بودن سازوکار تولید رواناب هورتونی (مازاد نفوذ) مهمترین عامل خداد فرسایش ناشی از جریان متمرکز عمق رواناب است. بیشترین مساحت آبخیز بالادست در اراضی جنگلی است، به عبارتی برای رخداد خندق به مساحت بیشتر و به تبع آن رواناب بیشتری نیاز است. میانگین درصد شیب در کاربری مرتعی در اقلیم نیمه‌خشک بیشتر از کاربری زراعت دیم است که نشان می‌دهد تشکیل خندق‌ها در کاربری مرتع در شیب‌های بالاتر رخ می‌دهد و مطابق با نتایج حاصل از پژوهش آقارسی و همکاران (۲۰۱۴) است. با توجه به نتایجی که حاصل شد، آستانه شیب-مساحت بالادست کاربری‌ها در اقلیم خشک، کاربری مرتع در مقایسه با کاربری کشاورزی (اعم از زراعت آبی و دیم) دارای ضریب آستانه بالاتری است که بیان‌کننده مقاومت بیشتر کاربری مرتع است و با نتایج راهی و همکاران (۱۴۰۰) مطابقت دارد.

فرسایش خندقی سبب خسارات زیادی در هر منطقه می‌شود و عوامل زیادی در ایجاد آن نقش دارند. عدم شناخت این عوامل سبب عدم موفقیت طرح‌های کنترل فرسایش می‌شود. بنابراین با تهیه نقشه مناطق مستعد خندق و شناخت عوامل مؤثر بر وقوع آن، می‌توان پارامترهای دخیل در فرسایش را مورد توجه قرار داد و جهت جلوگیری از ایجاد آن اقدام نمود. نبود پوشش گیاهی، وجود اراضی لخت و بدون پوشش، رعایت نکردن اصول درست کشاورزی، جاده‌سازی و طرح‌های عمرانی، زمان کافی برای ایجاد حفره‌ها، کانال‌ها و انحلال در خاک‌های با حساسیت بالا و مارن‌ها را ایجاد کرده است و سبب پیشروی سریع خندق‌ها در سطح زمین می‌شوند. با توجه به رابطه آستانه توپوگرافی خندق‌ها در هر دو اقلیم مورد مطالعه، ضرایب α و β دارای وضعیت مختلفی هستند که هر کدام به نوعی در رواناب

1. Ocheli

2. Zhung

سطحی و زیرسطحی در ارتباط هستند در این پژوهش مشخص شد که ایجاد خندق‌های کاربری زراعت دیم و بایر نسبت به دیگر کاربری‌های اقلیم نیمه‌خشک بیشتر است و یکی از دلایل آن پایین بودن آستانه توپوگرافی حاصل از این تحقیق است. مقدار α برای کاربری مرتع در سطح هر دو اقلیم خشک و نیمه‌خشک بیشترین مقدار آستانه را نسبت به دیگر کاربری‌های مورد مطالعه دارد که به ترتیب در اقلیم خشک ۵/۲۱ و در اقلیم نیمه‌خشک ۹/۷۸ است. با توجه به نتایج حاصل از درصد ذرات خاک خندق‌های مورد مطالعه در هر اقلیم و کاربری به‌ویژه نسبت بالای سیلت به علت حساسیت زیاد سیلت نسبت به فرسایش، شرایط مناسبی را برای پیشروی طولی و عرضی خندق‌ها به‌وجود آورده است. همچنین بالا بودن مقدار سیلت و درصد شیب در اقلیم خشک-کاربری زراعت دیم سبب شده است رواناب سطحی فرصت نفوذ در خاک نداشته باشد و سبب ایجاد خندق در سطح این کاربری شود. مقدار β نیز بیانگر این است که در تشکیل خندق‌ها در بیشتر کاربری‌های مورد مطالعه در هر دو اقلیم خشک و نیمه‌خشک، هم رواناب سطحی و هم رواناب زیرسطحی موثر است. هم‌چنین توان منفی رابطه شیب-مساحت بالادست خندق‌ها به‌استثنای زراعت آبی و دیم در سطح اقلیم نیمه‌خشک، بیانگر این است که بین شیب و مساحت بالادست خندق‌های مورد مطالعه در هر اقلیم و کاربری رابطه معکوس برقرار است. به‌عبارتی با افزایش مساحت آبخیز بالادست راس خندق، رواناب نیز افزایش یافته است و سبب ایجاد خندق در شیب‌های کمتر شده است.

با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان بیان کرد، فرسایش خندقی رخدادی آستانه‌ای است که در صورت ایجاد شرایط در هر منطقه‌ای قابلیت تشکیل دارد. بنابراین به منظور کنترل و پیشگیری فرسایش خندقی اولویت با مناطق دارای آستانه‌های حساسیت پذیرتر است. از این‌رو با توجه به اینکه ضریب α در اقلیم خشک مربوط به کاربری زراعت دیم است و کمترین مقدار را نسبت به سایر کاربری‌ها دارد، اولویت اجرای طرح‌های حفاظت خاک در این اراضی بیشتر است. با توجه تراکم زیاد خندق‌ها، وسعت منطقه مطالعاتی در این پژوهش و شرایط خاص تشکیل خندق در هر منطقه، تعیین آستانه توپوگرافی خندق‌ها تنها یکی از عوامل دخیل در تعیین شروع خندق‌ها است. لذا به منظور تعیین نقش مهم خندق در تولید رسوب و شناخت عوامل ایجاد آن، لازم است علاوه بر آستانه توپوگرافی، دیگر آستانه‌های موثر مانند عوامل هیدرولیکی، پوشش گیاهی و دیگر خصوصیات خاک مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به غالب بودن بافت سیلتی و نوع کاربری و تخریب پوشش گیاهی پیشنهاد می‌شود به منظور کنترل فرسایش خندقی نسبت به تقویت پوشش گیاهی و بهینه کردن کاربری اراضی اقدام گردد.

References

- Abdulahi, Sh. (2014). *The role of watershed management practices in morphological changes of gullies in idelou watershed* (Master thesis, Urmia University, Urmia). (In Persian).
- Afshari, M. (2018). *Evaluation The role of land use changes on the development of hydrological erosion in Darb Khazineh watershed* (Master thesis, Yazd University, Yazd). (In Persian).
- Agharazi, H., Davudirad, A., Mardian, M., & Soufi, M. (2014). Investigation of area slope threshold of gullies in Zahirabad Shazand, Watershed-Markazi Province. *Jornal of Watershed Engineering and Management*, 6(1), 1-9. (In Persian).
- Ahmadi, Z. (2018). *Longitudinal growth of gully erosion using centralized protocol model EGEM* (Master thesis, University of Tehran, Karaj). (In Persian).
- Amiri, M., Pourghasemi, H. R., Ghanbarian, GH.A., & Afzali, S.F. (2019). Assessment of the importance of Gully erosion effective factors using Boruta algorithm and its spatial modeling and mapping using three machine learning algorithms. *Geoderma* 340, 55 – 69.
- Amiri, Z. (2019). *Spatial prediction of gully susceptibility erosion in Kolocheh of Bijar* (master thesis, University of Kordestan, Kordestan). (In Persian).
- Arabameri, A., Pradhan, B., & Tien Bui, D. (2020). Spatial modelling of gully erosion in the Ardib River Watershed using three Statistical-based techniques. *Catena* 190, 104545.
- Asgharisaraskanroud, S., Zeinali, B., & Mohammadnejad, V. (2017). Analysis physical and chemical properties of soil and morphometric impacts on gully erosion, *Journal of Desert*, 22 (2), 157-166.

- Bayat, R., Ali Nejadian Bidabadi, A., Soufi, M., Maleki, A., & Akbarpour, A.M. (2021). Determining the factors affecting soil loss caused by waterholes, case study: Fathabad-Boinzahra. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 13(2), 445-459. (In Persian).
- Chen, W., Chakraborty, R., Chandra Pal, S., Sahana, M., & Janizadeh, S. (2021). Evaluation of different boosting ensemble machine learning models and novel deep learning and boosting frame work for headcut gully erosion susceptibility. *Journal of Environmental management* 284, 112015.
- Ingrid, E. L., Arpita, N., & Spiegel, T. (2015). Gully morphology, hillslop erosion, and pricipitation charactristics in the Appalachin Vally and Ridge province, southeastern USA. *Catena* 133, 221-232.
- Morgan, R.P.C., & Dietrich, W.E. (1988). Channel Initiation and the problem of Landscape scale. *Science* 255, 826-830.
- Okoro, B. C.1., Ibearughbulem, O. H., & Agunwamba, J.C.3. (2013). Gully Erosion Control along NWORIE River in Owerri, IMO Stat-A Deterministic Model Approach, *Journal of Modern Engineering Research* 3(3), 1774-1782.
- Madadi, A., Asghari Saraskanroud, S., & Marhamat, M. (2021). Evaluation of the effect of physical and chemical properties of soil on the formation and expansion of gully erosion in watershed of the Salt River. *Journal of Environmental erosion research*. 10 (4), 75-95. (In Persian).
- 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).
- Ocheli, A., Ogbe, O. B., & G. O. Aigbadon, G.O. (2021). Geology and geotechnical investigations of the Anambra Basin, Southeastern Nigeria implication for gully erosion Hazards. *Journal of Environmental system research*, 10(23), 1-27.
- Qaljaei, A. 1. (2013). *Investigating the Cause of Gully Erosion in Joshghan and Kamo Region, Isfahan province* (Master thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan), (In Persian).
- Rahi, G., Kavian, A.A., Soleimani, K., & Pourqasmi, H. (2021). Determining the role of land use and soil in the topographic threshold of the development of ditches in Bushehr province. *Journal of Natural Resources of Iran* 74 (1), 69-81. (In Persian).
- Rostamizad, Q., Tavakoli, M., & Nazari Samani, A.A. (2015). Determining the location of gully erosion based on the geomorphological threshold and factors affecting it (case study: Chamjab Dereshahr, Ilam). *Journal of Environmental Erosion Research*, 5(1), 44-57. (In Persian).
- Saidian, H., Shirani, K., Selajgeh, A., & Ahmadi, R. (2023). Investigating the performance of the entropy maximum model in determining the importance of the effective environmental factors in creating gully erosion in semi-arid area. *Journal of New approaches in water engineering and environmental*. 2 (1), 130-144. (In Persian).
- Saber Chenari, K., Bahremand, A.R., Bardi Sheikh, V., & Bayram Komaki, Ch. (2015). Zoning of gully erosion risk using Dempster-shefer model, Qarnaveh watershed, Golestan province. *Journal of Ecohydrology*. 3 (2). 219-321. (In Persian).
- Shahab Arkhazloo, H., Emami, H., Haghian, G. H., & Esmali, A. (2017). Determination the most important physical and mechanical soil properties on increasing cross sections in Ardebil province. *Journal of Water and Soil*, 30 (6), 2060-2077. (In Persian).
- Shahbazi, Kh., Parvizi, Y., & Kalehui, M. (2022). Morphometric factors of the expansion of trench erosion and its climatic zoning in Kermanshah province. *Journal of Watershed engineering and management*. 14(4), 528-548. (In Persian).
- Soufi, M., Bayat, R., & Charkhab, A. H. (2020). Gully erosion in IR Iran: characteristics, processes, causes, and land use. *Gully Erosion Studies from India and Surrounding Regions*, 357-368.
- Torri, D., & Poesen, J. (2014). A review of topographic threshold conditions for gully head development in different environments. *Journal of Earth-Science Reviews* 130, 73-85.
- Wei, Y., Cai, Ch., Gua, Zh., & J.Wang. (2022). Linkage between aggregate Stability of granitic Soils and the permanent gully erosion subtropical China. *Soil and Tillage Research* 221, 105411.
- Yamani, M., Zamanzadeh, S.M., & Ahmadi, M. (2013). Analysis of Factors Affecting the Formation and Development of Gully Erosion: A Case Study of Kahoor Plain in Fars Province. *Journal of geographical Research on desert Areas*.1 (1). 53-84. (In Persian).
- Zakerinejad, R., & Alvandi, P. (2023). Spatial Prediction of gully erosion using TanDEM-X data Entropy Model (Case study: Khasuyeh, watershed in Southeast of Fars Province). *Journal of Environmental Erosion Research*. 13(1). 96-113.
- Zanjanijam, M., Soufi, Bayat, R., & Rasouli, M. (2012). Investigation on morpho on climatic characteristics of gullies in order to classify gully affected regions in Zanjan province Iran. *Journal of Watershed Management Research* 26 (1). 2-10. (In Persian).
- Zhung, S. Y., Zhuo, M. N., Xie, Z. Y., Yuan, Z. J., Wang, Y. T., Hung, B., liao, Y. S., Li, D. Q., & Wang, Y. (2020). Effects of near soil surface components on soil erosion on steep granite red soil colluvial deposits, *Geoderma* 365, 114203.