

نقش خصوصیات خاک و آستانه توپوگرافی بر فرسایش خندقی در حوضه آبخیز رودخانه شور (شهرستان مهر)

عقیل مددی* - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی.
صیاد اصغری سراسکانرود - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی.
مه‌ری مرحمت - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۲۵ تأیید نهایی: ۱۴۰۰/۱۱/۱۴

چکیده

فرسایش خندقی از دلایل عمده تخریب زمین و از بین رفتن خاک در سراسر جهان است. بخشی از حوضه مورد مطالعه تحت تاثیر فرسایش خندقی قرار گرفته است، از پیامدهای آن می‌توان به بهم خوردن تعادل اکولوژیک منطقه، به خطر افتادن منابع زیستی اشاره کرد که این امر مطالعه در مورد فرسایش خندقی در منطقه را ضروری کرده است. هدف این پژوهش، بررسی تاثیر ویژگی‌های خاک و آستانه توپوگرافی بر فرسایش خندقی در حوضه آبخیز رودخانه شور (شهرستان مهر) بوده است. بدین منظور، ۱۵ خندق به صورت تصادفی برای نمونه‌برداری و مورفومتری انتخاب شد. سپس با استفاده از تحلیل خوشه‌ای، خندق‌ها بر اساس ویژگی‌های ژئومتری به روش Ward و مقیاس مجذور فاصله اقلیدسی خوشه‌بندی شدند. از رگرسیون چند متغیره برای نمایش تاثیر ویژگی‌های خاک استفاده شد. همچنین برخی ویژگی‌های خندق‌ها نظیر شیب متوسط (S) و مساحت (A) حوضه آبخیز راس خندق‌ها به وسیله نرم افزار Arc-GIS بر روی نقشه‌های توپوگرافی مشخص شد. با توجه به نتایج تحلیل خوشه‌ای، خندق‌ها در سه گروه طبقه‌بندی شدند و برای آنالیزهای آماری از گروه یک استفاده شد. نتایج نشان داد در گسترش طولی و سطح مقطع خندق‌ها به ترتیب میزان ماسه (۹/۲۹۹) (۷/۱۶۲)، نسبت جذب سدیم (۷/۹۶۷) (۵/۷۶۹) و مواد خنثی‌شونده (۶/۱۸۵) (۵/۲۴۰) ضریب تاثیر بیشتری در ایجاد و گسترش خندق داشته‌اند. این در حالی است که وجود مواد آلی به ترتیب با مقادیر (۳/۰۵۸) (-۳۹۰) و پتاسیم (۴۱۰) (-/۴۱۰) مانع از گسترش فرسایش خندقی در منطقه می‌گردد. با توجه به نتایج فرمول آستانه توپوگرافی منطقه ($S=6759.756A^{-.556}$) فرآیند رواناب سطحی به عنوان فرآیند غالب هیدرولوژیکی موثر بر گسترش فرسایش خندق‌ها شناخته شد. این نتایج نشان دهنده‌ی تاثیر نوع سازند زمین‌شناسی (نسبت جذب سدیم، مواد خنثی‌شونده و ماسه) و ویژگی‌های حوضه آبخیز راس خندق در تولید رسوب ناشی از فرسایش خندقی است که برآیند این عوامل موجب گسترش طولی و سطح مقطع خندق‌ها در منطقه مورد مطالعه می‌گردد.

واژگان کلیدی: تحلیل خوشه‌ای، خصوصیات خاک، فرسایش خندقی، مورفومتری، هیدرولوژیک.

مقدمه

فرسایش خندقی به عنوان یکی از شکل‌های متداول فرسایش باعث تغییر شکل سطح زمین می‌شود و گسترش آن از دلایل عمده تخریب زمین و از بین رفتن خاک در سراسر جهان است (عرب عامری، ۱۳۹۸). زمانی که یک خندق ایجاد می‌گردد، اگر شرایط محیطی به درستی مدیریت و کنترل نشود، اقدامات ساده نمی‌تواند مانع از گسترش آن شود (روتا و زوکت، ۲۰۱۳). فرسایش خندقی موجب تخریب اراضی به ویژه در اقلیم خشک و نیمه خشک جهان می‌گردد (دوتروایک و همکاران، ۲۰۱۲). از جمله پیامدهای ناشی از فرسایش خندقی می‌توان به کاهش حاصلخیزی خاک، دخالت در عملیات کشت و کاهش کیفیت مناطق خندقی است (دلپا و همکاران، ۲۰۱۲). همچنین می‌توان تغییر شکل زمین به صورت ناگهانی را از پیامدهای ناشی از فرسایش خندقی به شمار آورد. حساسیت شروع به فرسایش خندقی را می‌توان با مفهوم آستانه ژئومورفیک ارزیابی کرد (توری و پوزن، ۲۰۱۴؛ توری و همکاران، ۲۰۱۸). یک آستانه ژئومورفیک وضعیت مهمی است که در آن یک فرم زمین دچار تغییر ناگهانی می‌شود. چنین تغییراتی می‌تواند توسط برخی از عوامل خارجی مانند آب و هوا یا فعالیت‌های انسانی ایجاد شود که ثبات شکل زمین را در یک آستانه خارجی (به عنوان مثال بارندگی، هیدرولیک رواناب، استفاده از زمین و پوشش زمین) برهم می‌زند، یا به دلیل تغییر در یک آستانه ذاتی، که می‌تواند پس از تغییر تدریجی شکل زمین (مثلاً هوازدگی) پیش برود (پاتون و شوم، ۱۹۷۵). برای اولین بار پاتون و شوم (۱۹۷۵) آستانه توپوگرافی را بر مبنای رابطه شیب (S) و مساحت بالادست خندق (A) به عنوان عوامل تاثیرگذار بر جریان رواناب مورد بررسی قرار دادند. بر این اساس، شیب بحرانی که موجب ایجاد برش در سطح خاک می‌شود به میزان جریان رواناب بستگی دارد. از آنجایی که اندازه‌گیری رواناب کار آسانی نیست، مساحت را به جای آن استفاده کردند. استفاده از روابط شیب و مساحت به عنوان تنها مدل استفاده برای پیش‌بینی فرسایش خندقی کافی نیست و می‌بایست سایر عوامل نیز در نظر گرفته شود (راهی و همکاران، ۱۴۰۰). در داخل و خارج از کشور مطالعات زیادی درباره فرسایش خندقی انجام شده است که نشان می‌دهد در هر منطقه، پارامترهای مختلفی می‌تواند بر فرسایش خندقی اثرگذار باشد. علی‌رغم حساسیت بالا حوضه آبخیز شور به فرسایش خندقی و با توجه به خطرات ناشی از این نوع فرسایش برای زیرساخت‌های انسانی و منابع آب و خاک، تاکنون مطالعات اندکی در این منطقه صورت گرفته است (صفاری و همکاران، ۱۳۹۸).

حوضه آبخیز رودخانه شور در شهرستان مهر (استان فارس) بخصوص دشت‌های دامنه‌ی واقع در شرق حوضه تا روستای چاهو به شدت تحت تاثیر فرسایش خندقی قرار دارد. نوسان زیاد بارش در دوره‌های مختلف، بارش‌های شدید رگباری در برخی از فصول سال، ضعف یا نبود پوشش گیاهی سطح زمین در بعضی نقاط باعث شده خندق‌های زیادی شکل گیرد. همچنین به سبب دخالت انسان مانند چرای مفرط، شخم زدن زمین‌ها در جهت شیب، حرکت وسایل نقلیه و ماشین‌آلات کشاورزی در زمین‌ها و مراتع و غیره فعالیت آن به مرحله بحرانی رسیده است. این امر موجب تخریب زمین‌های کشاورزی، راه‌های ارتباطی و سیستم آبیاری منطقه می‌شود و سالانه مقادیر زیادی از خاک این منطقه از طریق ایجاد و توسعه خندق فرسایش یافته و از دسترس خارج می‌گردد و از بازده کشاورزی منطقه کاسته می‌شود (شکل ۸، ۹، ۱۰). از دیگر آثار آن معضلات اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی می‌باشد. در این تحقیق با بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و همچنین تعیین آستانه توپوگرافی سعی بر آن شده است که عوامل موثر بر فرسایش خندقی شناسایی و با پیش‌بینی دقیق‌تر، خسارات ناشی از آن تا حد امکان جلوگیری شود.

در زمینه فرسایش خندقی مطالعات زیادی با روش‌های مختلفی صورت گرفته است که هر کدام دارای نتایج متفاوتی از یکدیگر است. اما نتایج پژوهش‌های انجام شده از گذشته تا به امروز نشان دهنده‌ی رشد خندق‌ها و تخریب خاک در

مناطق می باشد که به برخی از آن‌ها اشاره شده است (جدول ۱).

جدول ۱: برخی مطالعات انجام شده در ایران و جهان

نویسندگان	عنوان	منطقه مورد مطالعه	هدف بررسی	روش	نتیجه گیری
سلیمان پور و همکاران (۱۳۸۶)	فرآیند غالب هیدرولوژیک در گسترش خندق‌ها	اقلیم‌های مختلف استان فارس (فداغ، نیریز، کنار تخته، گورسپید، میشان، دژگرد)	در چه اقلیم‌های و دارای چه ویژگی‌های مساحت و شیب، خندق‌های استان فارس گسترش بیشتری دارد.	آستانه توپوگرافی	فرآیند هیدرولوژیک زیرسطحی سبب گسترش فرسایش خندقی می‌گردد.
بالنده و همکاران (۱۳۹۲)	تعیین شرایط آستانه توپوگرافی گسترش فرسایش خندقی	حوضه آبخیز ریحانلو- آذربایجان غربی	پیش‌بینی احتمال وقوع فرسایش خندقی	سیستم اطلاعات جغرافیایی	آستانه توپوگرافی تنها عامل تعیین کننده فرسایش خندقی نیست
اصغری (۱۳۹۶)	تحلیل عوامل موثر در شکل‌گیری و گسترش فرسایش خندقی	حاشیه شرقی سواحل دریاچه ارومیه، استان آذربایجان غربی	تاثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و ویژگی‌های اقلیمی منطقه در جهت ایجاد خندق زایی	اندازه‌گیری مورفومتری و آزمایشگاهی	شکل‌گیری فرسایش خندقی تحت تاثیر عوامل اقلیمی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های منطقه است.
صفاری و همکاران (۱۳۹۸)	تاثیر ویژگی‌های خاک بر مورفولوژی و گسترش فرسایش خندقی	حوضه رودخانه مهران لامرد، استان فارس	ارتباط بین متغیرهای موثر در فرسایش خندقی با مورفولوژی خندق‌ها	GIS و داده‌های سنجش از دور	خندق‌های U شکل با خندق‌های حد واسط U و V شکل از نظر ویژگی‌های OC, SAR, EC, TNV, با هم تفاوت دارند

کاهش همبستگی عمق خندق‌ها با عرض در سازندهای فرسایش پذیر و افزایش همبستگی عمق با عرض خندق در سازندهای مقاوم	رگرسیون دو متغیره	عمق خندق‌های متوسط ابزاری برای پیش‌بینی عرض متوسط خندق‌ها در رسوبات زمین‌شناسی	زیر فلات آیدا-آنکپا در شمال مرکزی کشور نیجریه	ارتباط بین عمق و عرض خندق‌ها در سازندهای مختلف	آلیمونو اوپاراکو و ترونگلوار ^۱ (۲۰۱۸)
فرسایش خندقی تحت تأثیر غالب جریان زمینی است	اندازه‌گیری مورفومتری، تحلیل خوشه‌ی و تحلیل عاملی	شرایط توپوگرافی برای توسعه فرسایش خندقی در محیط‌های مورد مطالعه	استان‌های فارس، زنجان، مرکزی و گلستان	آستانه توپوگرافی فرسایش گالی در ایران	صوفی و همکاران ^۲ (۲۰۲۰)
عقب نشینی سرخندق بیشتر از عمق آن بوده و همچنین جریان زمینی موجب فرسایش می‌گردد.	UAV (فتوگرامتری هوایی) و بررسی‌های میدانی	حل مسئله محاسبه دقیق آستانه‌های توپوگرافی منطقه ای و نرخ توسعه خندق‌ها.	حاشیه‌ی فلات لس، کشور چین	بررسی و نظارت طولانی مدت فرسایش خندقی و آستانه توپوگرافی	گوان و همکاران ^۳ (۲۰۲۱)
پایین بودن آستانه توسعه سر خندق	اندازه‌گیری‌های میدانی	ابتدا ساخت خطوط آستانه توپوگرافی بحرانی، و بعد از آن برای توصیف شرایط آستانه توپوگرافی خندق‌های دائمی در دشت راره	دشت راره، کشور هندوستان	بهترین روش برای تخمین آستانه‌های توپوگرافی فرسایش خندقی چیست؟	مجی و همکاران ^۴ (۲۰۲۱)

روش تحقیق

منطقه مورد پژوهش

محدوده مورد مطالعه حوضه آبخیز رودخانه شور در قسمت شرق و شمال شرقی شهرستان مَهر است که با ۱۰۱۳۵۰ هکتار وسعت، در جنوب استان فارس واقع شده است. این حوضه آبخیز بین ۲۷ درجه، ۲۷ دقیقه و ۲۲ ثانیه تا ۲۷ درجه، ۴۹ دقیقه و ۴۱ ثانیه عرض شمالی و ۵۲ درجه، ۲۴ دقیقه و ۵۸ ثانیه تا ۵۲ درجه، ۵۹ دقیقه و ۱۴ ثانیه طول شرقی قرار گرفته است.

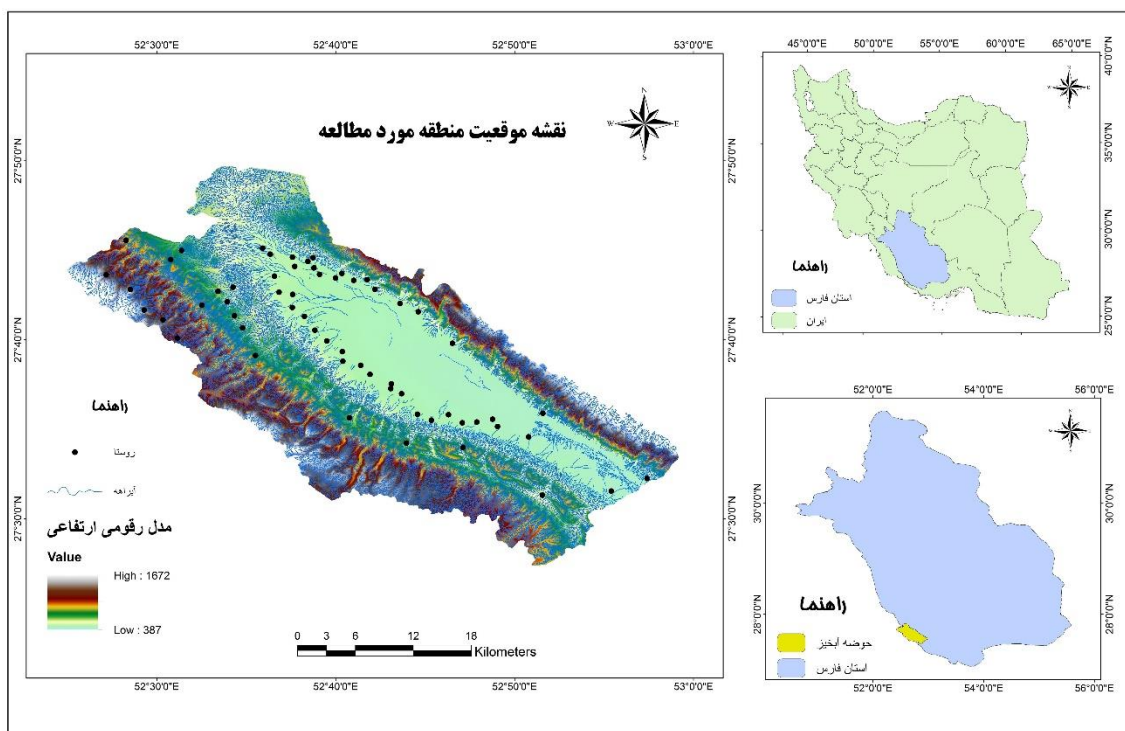
1. Alimonu oparaku& Terungwa Iwar

2. Soufi et al

3. Guan et al

4. Majhi et al

از نظر تقسیمات حوضه‌های آبریز کشور، محدوده مطالعاتی جزء زیرحوضه‌های آبریز رودخانه شور و مهران می‌باشد که در نهایت وارد خلیج فارس می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت جغرافیای حوضه آبخیز رودخانه شور (شهرستان مهر)

این حوضه دارای تابستان‌های خیلی گرم و طولانی و زمستان‌های معتدل و کوتاه بوده و دارای میانگین بارندگی سالیانه حدود ۲۵۰-۲۰۰ میلی‌متر، متوسط درجه حرارت سالیانه ۲۳ درجه سانتیگراد و متوسط تبخیر سالانه ۲۵۰۰ میلی‌متر می‌باشد که در تعیین اقلیم به روش دومارتن اصلاح شده در اقلیم خشک بیابانی معتدل قرار می‌گیرد. بررسی‌ها نشان می‌دهد تنها چهار ماه سال یعنی از آذر تا اسفند دوره مرطوب و بقیه هشت ماه سال دوره خشک منطقه می‌باشد (اداره کل هواشناسی استان فارس، ۱۳۹۹).

در حوضه آبخیز مورد مطالعه تعداد هفت سازند زمین‌شناسی، یک پاره سازند و شش تیپ از نهشته‌های عهد حاضر از قدیم به جدید است (جدول ۲). خندق‌های تشکیل شده در منطقه بر روی نهشته‌های کواترنری بخصوص پادگانه‌های جوان آبرفتی که عموماً کم ارتفاع، دانه ریزتر از پادگانه‌های قدیمی و سخت‌شدگی کمتری دارند. این نهشته‌ها به طور معمول در پیوستگی با مخروط افکنه‌های جوان بوده و اغلب دشت‌های کم ارتفاع را می‌سازند. این نهشته بخش عمده دشت مرکزی حوضه را تشکیل داده است. این در حالی است که مخروط افکنه‌های جوان به صورت لکه‌های در پیرامون دشت مرکزی حوضه نمایان شده است.

جدول ۲: مساحت و درصد گسرش واحدهای رسوبی حوضه

نماد واحد رسوبی	نام واحد رسوبی	مساحت در حوضه (هکتار)	درصد مساحت از کل
Bgp	بنگستان	۴۴۸۱/۱۹	۴/۴۲
GU-Pd	پابده-گورپی	۱۴۶۹/۸۵	۱/۴۵
As	آسماری	۲۳۴۳۰/۲۹	۲۳/۱۳
As-LSD	سازند آسماری به صورت مواد لغزش یافته قدیمی	۲۷۴/۷	۰/۲۷
Gs	گچساران	۱۳۲۴۴/۶۵	۱۳/۰۷
Mn	میشان	۸۷۸۶/۸۱	۸/۶۷
Grm	پاره سازند گوری	۴۲۳۱/۶۹	۴/۱۸
Aj	آغاچاری	۴۸۸۱/۱۹	۴/۸۲
BK	بختیاری	۵۵۰۹/۵۶	۵/۴۴
Qc	نهبشته‌های کنگلومرای سخت شده	۱۸۶۷/۳۲	۱/۸۴
Qt1	پادگانه‌های آبرفتی قدیمی	۲۲۱۸/۴۸	۲/۱۹
Qt2	پادگانه‌های آبرفتی جوان	۱۷۹۱۳/۴۲	۱۷/۶۷
Qf2	نهبشته‌های مخروط افکنه‌ی جوان	۸۹۱۴/۸	۸/۸
Qcf	پهنه‌های رسی و سیلتی	۳۳۱۷/۱۹	۳/۲۷
Qal	رسوبات رودخانه‌ی عهد حاضر	۸۱۲/۱	۰/۸
Total		۱۰۱۳۵۳/۸۸	۱۰۰

پارامترهای مهم فیزیوگرافی حوضه از جمله مساحت، ارتفاع متوسط، بلندترین و پایین‌ترین نقطه حوضه، طول آبراهه، ضریب گرادیلپوس، مستطیل معادل، زمان تمرکز و میانگین وزنی شیب کل حوضه در جدول (۳) بیان شده است.

جدول ۳: پارامترهای مهم فیزیوگرافی حوضه

۱۰۱۳۵۰	مساحت (هکتار)
۱۰۵۰/۵	ارتفاع متوسط (متر از سطح دریا)
۱۶۷۲	بلندترین نقطه حوضه (متر از سطح دریا)
۳۸۷	پایین‌ترین نقطه حوضه (متر از سطح دریا)
۷۱/۳	طول آبراهه اصلی (کیلومتر)
۱/۶۳ که بیانگر کشیدگی شکل حوضه و در نتیجه کاهش اوج هیدروگراف است.	ضریب گرادیلپوس
طول مستطیل معادل برابر با ۸۰/۰۷ و عرض آن برابر با ۱۲/۶۶ کیلومتر می‌باشد.	مستطیل معادل
روش کریبیج ۸/۴ ساعت و از روش ویلیامز-برانزلی ۱۹/۳ ساعت	زمان تمرکز در محل خروجی حوضه
۳۱	میانگین وزنی شیب کل حوضه (درصد)

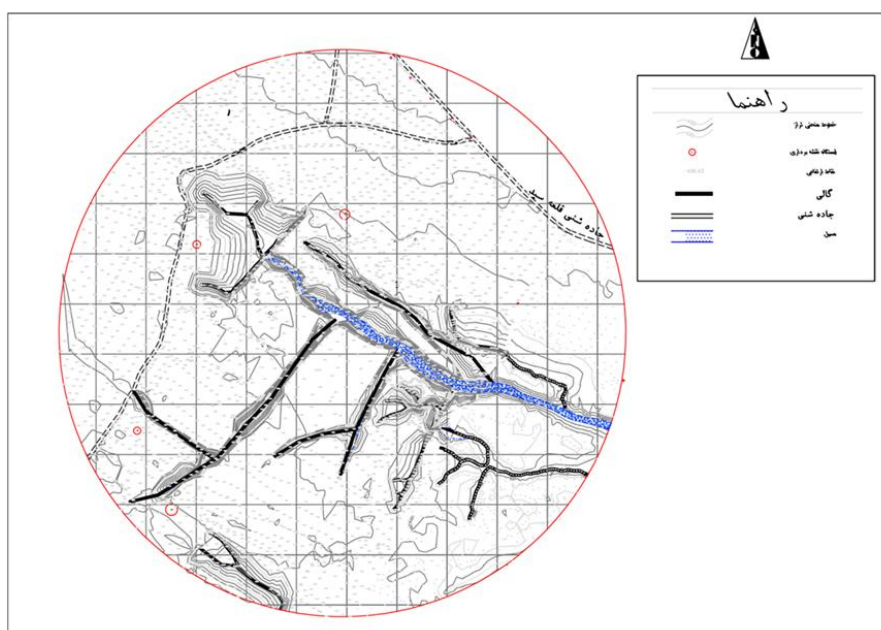
در محدوده مطالعاتی تیپ کوه‌ها، تپه‌ها، دشت‌های دامنه‌ی، اراضی پست، واریزه‌های بادبزی شکل سنگریزه دار و همچنین آبرفت‌های سنگریزه‌دار مشاهده شد. در این حوضه بیشتر خندق‌ها در دشت‌های دامنه‌ی واقع در شرق حوضه تا روستای چاهو بوده و دارای خاک‌های عمیق با بافت متوسط تا سنگین و بدون سنگریزه می‌باشد. این اراضی نسبتاً مسطح و دارای شیبی بین صفر تا هفت درصد بوده که از مواد واریزه‌ی و آبرفتی ریزدانه به وجود آمده که در برخی قسمت‌ها دارای شوری متوسط تا زیاد می‌باشد. این اراضی از زهکشی نسبتاً ضعیف، میزان فرسایش زیاد خصوصاً فرسایش خندقی برخوردار می‌باشد. کاربری غالب این اراضی را مراتع با پوشش ضعیف تا متوسط همراه با درختان پراکنده تشکیل داده است و در برخی قسمت‌ها نیز زراعت آبی و باغ دیده می‌شود. با توجه به عمق، بافت، شوری و قلیائیت و میزان نفوذپذیری خاک پتانسیل تولید رواناب در این اراضی عمدتاً زیاد و باعث شکل‌گیری فرسایش خندقی می‌گردد (اداره کل منابع طبیعی استان فارس، ۱۳۹۵) (شکل ۲، ۳، ۴).



شکل ۳: نمایی از تجمع املاح شور و قلیای در شرق حوضه



شکل ۲: رویش درختچه‌های شوره‌گز در مسیل‌ها در شرق حوضه



شکل ۴: نقشه برداری تعدادی از خندق‌های موجود در منطقه

مواد و روش‌ها

مواد تحقیق

به منظور شناسایی اولیه ویژگی‌های طبیعی حوضه و جمع‌آوری مباحث نظری از نقشه‌های پایه‌ی توپوگرافی (مقیاس ۱:۲۵۰۰۰) سازمان نقشه‌برداری کشور و نقشه زمین‌شناسی (مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰)، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور استفاده شد. از نقشه DEM منطقه برای استخراج شبکه زهکشی و داده‌های توپوگرافی مانند ارتفاع، شیب، جهت دامنه استفاده شد. برای رسم نقشه‌های ذکر شده از نرم افزار ArcMap نسخه ۱۰٫۳ استفاده گردید. با تهیه فایل اکسل نقشه‌برداری خندق‌ها و ورود اطلاعات به نرم افزار AutoCAD نقشه شماره ۴ که قسمتی از نقشه‌های خندق است، ترسیم گردید. همچنین از داده‌های سینوپتیک و باران‌سنجی ایستگاه‌های گله‌دار، بیرم، فداغ، لامرد (جهاد)، باغان (خنج)، جهادمهر، علام‌همچنین از داده‌های سینوپتیک و باران‌سنجی ایستگاه‌های گله‌دار، بیرم، فداغ، لامرد (جهاد)، باغان (خنج)، جهادمهر، علام‌مروودشت، لامرد، کاریان، عماده، فیشور و دیده‌بان در بازه زمانی ۱۳۹۹-۱۳۷۵ سازمان هواشناسی استان فارس جهت تعیین نوع اقلیم استفاده گردید. استفاده از دوربین عکاسی جهت تهیه عکس نیز قابل ذکر است.

روش تحقیق

در این تحقیق با توجه به اهداف از روش‌های متعددی استفاده شده است که در ادامه به تشریح هر کدام پرداخته شده است.

مطالعات میدانی

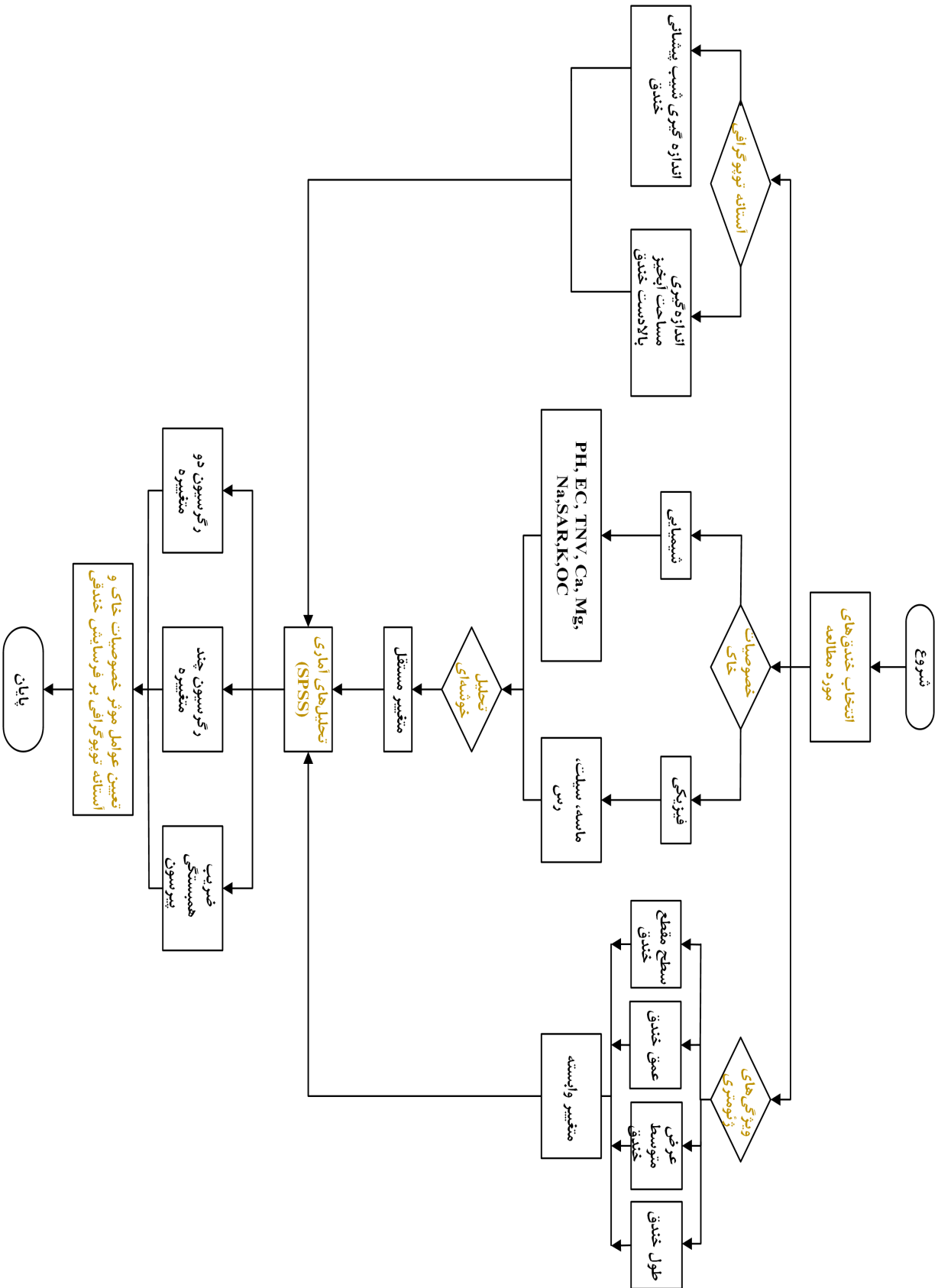
با حضور در منطقه و ثبت موقعیت ۴۰ خندق به وسیله‌ی GPS استفاده گردید. از بین خندق‌ها ۱۵ خندق به طور تصادفی از قسمت راس، میان و انتهای قسمتی از حوضه که در آن خندق ایجاد شده است، انتخاب و عملیات زیر بر روی آن‌ها انجام گرفت.

۱. اندازه‌گیری طول، عرض، عمق، مساحت حوزه بالادست خندق‌ها، شیب
۲. نمونه‌برداری خاک از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر هر خندق: نمونه‌ها قبل از ارسال به آزمایشگاه در هوای آزاد خشک و با الک دو میلی‌متری الک شدند.

مطالعات آزمایشگاهی

نمونه‌های خاک برداشت شده از منطقه در آزمایشگاه جهت آنالیز ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مورد ارزیابی قرار گرفت. برای تعیین بافت خاک، از روش هیدرومتری، مقدار PH و EC به ترتیب با استفاده از دستگاه‌های EC meter و PH meter اندازه‌گیری شد. ماده آلی (به روش واکلکی-بلاک)، پارامترهای کلسیم، منیزیم و پتاسیم (به روش تیتراسیون)، مواد خنثی شونده^۱ (به روش کلسیمتری) و سدیم (به روش فلاپم فتومتری) اندازه‌گیری شد. نسبت جذب سدیم (SAR) براساس نسبت بین کاتیون‌های کلسیم و منیزیم با سدیم محاسبه گردید (اصغری، ۱۳۹۶). فرآیند پژوهش به صورت شماتیک در شکل ۵ نمایش داده شده است.

¹: Total Neutralizing Value



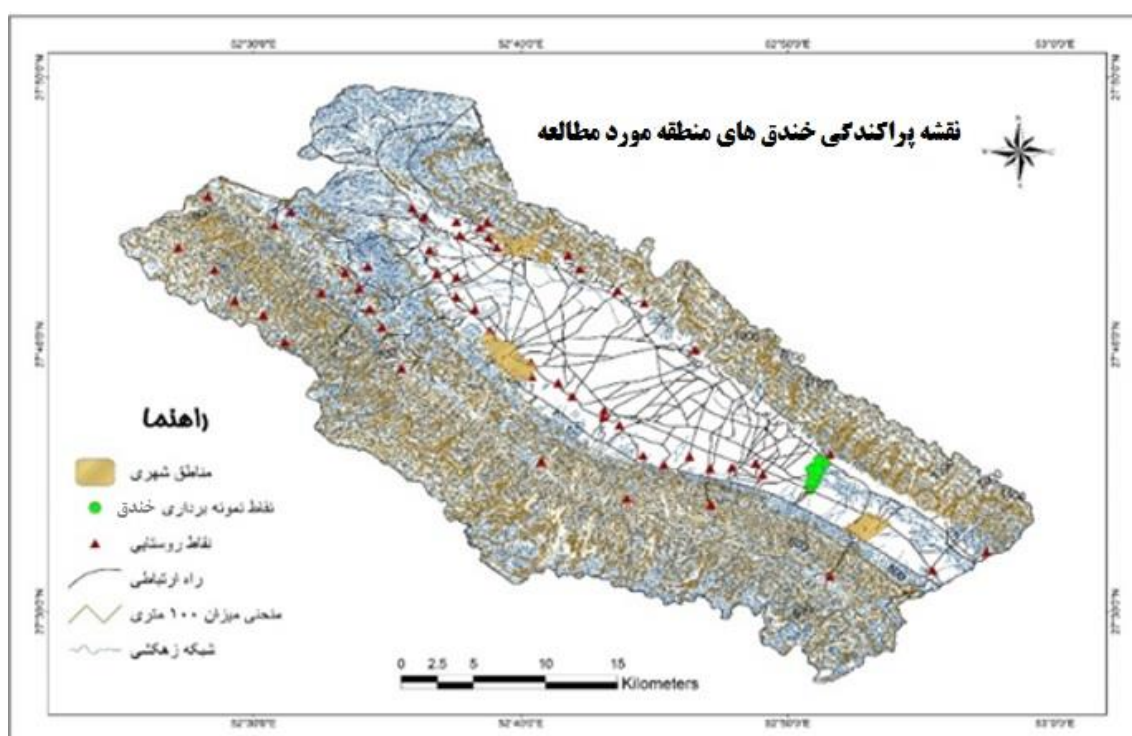
شکل ۵: فرآیند پژوهش

آستانه توپوگرافی

پس از انتخاب خندق‌های نمونه و ثبت موقعیت هر کدام به وسیله ی GPS و انتقال اطلاعات به محیط ArcGIS و اضافه کردن سایر لایه‌ها نقشه پراکندگی خندق‌ها ترسیم شد. از آنجایی که در منطقه مورد مطالعه فقط قسمتی از حوضه فرسایش خندقی رخ داده است نقاط برداشت شده به وضوح قابل مشاهده نمی‌باشد (شکل ۶). برای اندازه‌گیری شیب متوسط (S) و مساحت (A) حوضه آبخیز راس خندق‌ها به وسیله نرم افزار Arc-GIS بر روی نقشه‌های توپوگرافی مشخص شد. سپس با حضور در منطقه و اندازه‌گیری مساحت بالادست حوضه خندق‌ها پس از مشخص نمودن نقاط ارتفاعی برای استفاده از GPS و برای اندازه‌گیری شیب بالای هر خندق از شیب سنج استفاده گردید (جدول ۴). برای بررسی آستانه توپوگرافی پاتوم و شوم (۱۹۷۵) رابطه (۱) را مطرح کردند و به دلیل مشکل بودن اندازه‌گیری میزان رواناب پارامتر مساحت را جایگزین کردند.

$$S = aA^b \quad \text{رابطه (۱)}$$

S شیب، A مساحت در بالای پیشانی خندق و a , b ضرایب محیطی هستند.



شکل ۶: نقشه پراکندگی خندق در حوضه آبخیز

جدول ۴: مورفومتری خندق‌های حوضه آبخیز رودخانه شور، شهرستان مهر

شماره خندق	طول جغرافیا یی (U) (TM)	عرض جغرافیا یی (UT) (M)	ویژگی های ارتفاع (متر)	طول خندق (متر)	عرض متوسط خندق (متر)	عمق متوسط خندق (متر)	سطح مقطع (متر مربع)	حجم خندق (متر مکعب)	محیط خندق (متر)	مساحت حوضه آبخیز راس خندق (متر مربع) A	میانگی ن شیب حوضه آبخیز راس خندق (درصد) S
۱	۶۸۵۳۸ ۵	۳۰۵۱۹ ۳۲	۳۹۷	۱۵۰	۶/۴۰	۱/۲۰	۷/۶۸	۱۱۵۲	۵۹۷	۴۸۹۷	۴/۱
۲	۶۸۲۵۹ ۸	۳۰۵۱۵ ۴۰	۴۰۲	۱۰۰	۷/۴۰	۱/۱۰	۸/۱۴	۸۸۸	۵۷۱	۱۶۹۹	۴/۵
۳	۶۸۳۰۱ ۰	۳۰۵۲۶ ۲۷	۴۰۴	۳۰	۱/۶۰	۴	۶/۴۰	۱۲/۲۰ ۷	۶۷۴	۳۶۷۴	۵/۲
۴	۶۸۷۷۸ ۲ /۴۱	۳۰۴۹۷ ۲۳ /۷۶	۳۹۰	۱۵۰	۷/۲۰	۱	۷/۲۰	۱۰۸۰	۵۷۶	۳۱۱۷	۳/۷
۵	۶۸۸۵۴ ۹	۳۰۴۸۳ ۶۹	۳۸۷	۱۹۰	۱۰	۱/۹۰	۹	۱۷۱۰	۴۵۳	۳۵۰۴	۳/۲
۶	۶۸۶۱۰ ۰	۳۰۵۱۱ ۱۳	۳۹۴	۹۵	۶	۱/۵۰	۹	۸۵۵	۸۷۹	۱۹۴۷	۵/۳
۷	۶۸۵۷۱ ۱	۳۰۵۱۷ ۰۲	۴۰۲	۱۸	۳	۲/۵۰	۷/۵۰	۱۳۵	۱۰۵۱	۴۵۷۹	۴/۱
۸	۶۸۴۶۳ ۴	۳۰۵۰۸ ۳۹	۴۰۹	۲۸۰	۶/۵۰	۲	۱۳	۳۶۴۰	۷۳۶	۳۲۰۷	۵/۲
۹	۶۸۴۶۹ ۳	۳۰۵۲۳ ۲۶	۳۹۵	۴۵	۴/۸۰	۱/۳۰	۱/۴۴	۶۴/۸۰	۸۳۲	۴۲۵۲	۵
۱۰	۶۸۳۸۳ ۶	۳۰۵۳۰ ۳۲	۴۰۵	۳۱۰	۱۰	۱/۲۰	۱۲	۳۷۲۰	۶۸۷	۲۰۱۸	۵/۱
۱۱	۶۸۳۷۱ ۲	۳۰۵۱۶ ۰۳	۴۰۸	۵۶	۷/۴۰	۱/۵۰	۳/۷۰	۲۰/۲۰ ۷	۹۸۱	۲۷۱۹	۵
۱۲	۶۸۲۷۰ ۳	۳۰۵۳۶ ۳۱	۴۰۴	۱۸۰	۱۱/۷	۲/۲۰	۲۵/۷۴	۴۶/۲۰ ۳۳	۶۰۸	۳۳۸۲	۵/۳
۱۳	۶۸۲۲۶ ۲	۳۰۵۱۶ ۵۸	۴۱۷	۵	۳/۵۰	۱/۳۰	۱/۰۵	۵/۲۲	۹۶۴	۳۷۶۸	۶/۷
۱۴	۶۸۲۲۲ ۹	۳۰۵۲۲ ۱۱	۴۱۲	۸۰	۸/۵۰	۱	۸/۵۰	۶۸۰	۶۳۱	۴۸۹۷	۵/۲

تجزیه و تحلیل‌های آماری

تحلیل خوشه‌ای خندق‌ها به روش Ward و برای استاندارد کردن داده‌ها به روش Z-Score، گروه‌بندی با روش طبقاتی تجمعی و مقیاس مجذور فاصله اقلیدسی، توسط نرم‌افزار SPSS صورت گرفت. در این تحقیق، خوشه‌بندی بر اساس خصوصیات مورفومتری انجام شد و خوشه‌ای که تعداد بیشتری از خندق‌ها در آن قرار گرفته است، تمامی عملیات شاخص‌های پراکندگی و رگرسیون بر روی آن خوشه انجام گرفت. برای بررسی رابطه آستانه توپوگرافی تمام خندق‌ها به کار برده شده است. در حوضه مورد مطالعه، برای بررسی ویژگی‌های مورفومتری و ویژگی‌های خاک خندق با طول و سطح مقطع خندق‌ها، ابتدا برای نرمال بودن داده‌ها از آزمون کلموگرواف-اسمیرنوف استفاده شد. پس از تایید نرمال بودن داده‌ها، از آزمون همبستگی پیرسون و رگرسیون چند متغییره استفاده شد که این آزمون‌ها در نرم‌افزار SPSS انجام شد.

نتایج و بحث

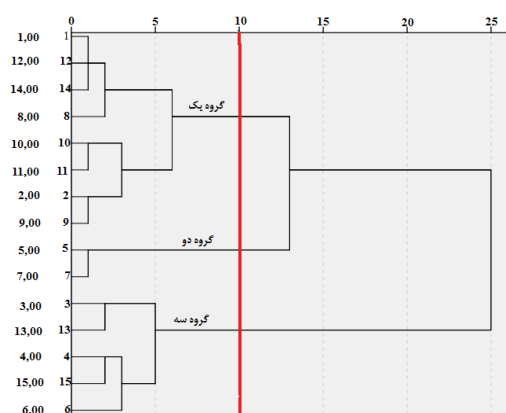
اندازه‌گیری‌های خصوصیات خاک و همچنین ویژگی‌های ژئومتری با استفاده از روش‌های ذکر شده صورت پذیرفت. شاخص‌های پراکندگی ۱۵ خندق در جدول (۵) ذکر شده است.

جدول ۵: شاخص‌های پراکندگی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و ویژگی‌های ژئومتری در ۱۵ خندق

CS	D	W	L	SAR	OC	Na	Ca	Mg	K	TNV	EC	PH	Clay	Silt	Sand	
۸/۳۴	۱/۳۹	۶/۵۳	۱۱۹/۲	۲۹/۲۸	۱/۲۹۶	۴۲/۵	۱۹۹/۳	۲۲۸	۲۵۶/۴	۶۶	۱۶۸	۷/۵۱	۱۱/۴۶	۲۷/۱۳	۶۱/۴	میانگین
۱/۰۵	۱/۳	۱/۶	۵	۲۳/۳۳	۱/۲۱	۳۴۵	۱۶۳	۱۹۰	۱۷۹	۵۹	۱۲۰	۷/۲۲	۸	۲۴	۵۹	حداقل
۲۵/۷۴	۴	۱۱/۷	۳۱۰	۳۳/۶۱	۱/۴۵	۴۹۹	۲۳۸	۲۸۳	۳۹۵	۷۸	۲۶۰	۸/۰۱	۱۵	۳۱	۶۵	حداکثر
۱/۵۱	۱/۲۴۸	۱/۷۳۱	۲۳/۵۵	۱/۸۷۵	۱/۰۲	۱۴/۰۷	۵/۸۸	۷/۶۳	۱۷/۴۲	۱/۳۸	۱/۳۸	۱/۰۷	۱/۴۹۸	۱/۵۷	۱/۴۶۳	انحراف از معیار
۰/۷	۱/۶۹	۱/۴۳	۱/۷۶	۱/۱۱	۱/۲۶	۱/۱۲	۱/۱۱	۱/۱۲	۱/۲۶	۱/۰۸	۱/۰۸	۱/۰۳	۱/۱۶	۱/۰۸	۱/۰۲	ضریب تغییرات

L: طول خندق (متر)، W: عرض متوسط خندق (متر)، D: عمق خندق (متر)، CS: سطح مقطع خندق (مترمربع)، Sand: درصد شن، Clay: درصد رس، Silt: درصد سیلت، PH: اسیدیته خاک، EC: هدایت الکتریکی، TNV: مواد خنثی شونده (درصد)، K: پتاسیم (میلی اکی والان بر کیلوگرم)، Mg: منیزیم (میلی اکی والان بر لیتر)، Ca: کلسیم (میلی اکی والان بر لیتر)، Na: سدیم محلول (میلی اکی والان بر لیتر)، OC: مواد آلی (درصد)، SAR: نسبت جذب سدیم.

نتایج حاصل از تحلیل خوشه‌بندی نشان داد که خندق‌ها در سه گروه طبقه‌بندی شدند که از لحاظ خصوصیات فیزیکی خاک (بافت خاک) و خصوصیات شیمیایی (مواد آلی، سدیم، کلسیم، منیزیم، EC, TNV, PH) در گسترش راس خندق همسان هستند. از آنجایی که بیشتر از ۵۳ درصد خندق‌ها در گروه یک قرار گرفته است جهت تجزیه و تحلیل‌های آماری مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۷).



شکل ۷: طبقه‌بندی خندق‌ها با استفاده از تحلیل خوشه‌ای

با بررسی و تحلیل همبستگی و مدل‌های رگرسیون چندگانه رابطه بین متغیرهای وابسته و مستقل انجام گرفت. عوامل مورفومتری شامل طول خندق، عرض متوسط خندق، عمق خندق و سطح مقطع را به عنوان متغیر وابسته و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک را به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از همبستگی پیرسون بین متغیرها در جدول (۵) بیان شده است. نتایج نشان می‌دهد که طول و عرض خندق‌ها با متغیر سدیم ($1/866$) و SAR ($1/826$) رابطه بسیار قوی داشته است در حالی که با متغیر اسیدیته خاک ($-2/258$) دارای رابطه منفی است (جدول ۶)

جدول ۶: یافته‌های حاصل از همبستگی متغیرهای وابسته و مستقل

پارامتر	L	W	D	CS	Sand	Silt	clay	PH	EC	TNV	K	Mg	Ca	Na	OC	SAR
L	۱	/۸۵۵	/۷۱۶	/۷۸۳	/۱۵۳	/۰۸۸	/۰۵۶	-/۲۵۸	/۳۴۵	/۱۶۶	-/۲۴۶	/۱۹۶	/۳۴۷	/۸۶۶	-/۰۴۷	/۸۲۶
W		۱	/۷۶۴	/۸۴۹	/۰۱۱	/۱۰۵	-/۱۱۸	-/۲۲۱	/۴۱۷	/۲۲۳	-/۱۶۸	/۱۹۶	/۴۸۱	/۹۲۲	-/۱۲	/۸۳۹
D			۱	/۹۸۰	/۱۶۸	/۰۰۹	/۱۶۹	/۰۹۹	/۶۴۱	/۵۱۰	-/۳۸۰	/۲۴۵	/۳۴۰	/۸۲۳	-/۱۱۷	/۷۶۸
CS				۱	/۱۶۱	/۰۵۳	/۱۰۷	/۰۴۰	/۶۴۳	/۴۸۲	-/۳۲۲	/۲۹۴	/۴۲۵	/۸۸۰	-۱	/۷۹۳
Sand					۱	-/۶۳۱	-/۳۰۰	/۱۳۵	-/۲۰۲	-/۴۰۴	-/۱۱۵	-/۲۰۱	/۲۲۵	-/۱۶۵	-/۰۴۵	-/۱۵۰
Silt						۱	-/۵۵۱	-/۲۸۷	/۱۷۰	/۲۴۶	/۳۴۰	/۱۷۹	/۰۴۳	/۲۲۶	-/۲۹۲	/۱۶۸
clay							۱	/۲۰۷	/۰۰۸	/۱۳۳	-/۲۹۴	-/۰۰۴	-/۲۹۵	-/۱۰۱	/۴۰۸	-/۰۴۵
PH								۱	-/۰۷۲	-/۳۳۵	-/۱۴۱	-/۳۴۳	-/۴۸۷	-/۲۳۲	-/۲۱۷	-/۰۱۹
EC									۱	/۶۶۵	-/۵۶۳	/۵۳۷	/۳۰۱	/۴۴۸	-/۲۷۵	/۲۷۰
TNV										۱	-/۲۶۱	/۶۲۶	/۴۱۸	/۳۵۸	-/۱۳۳	/۰۹۷
K											۱	/۰۳۴	-/۲۷۹	-/۰۵۰	-/۱۹۲	-/۰۳۷
Mg												۱	/۲۸۶	/۳۱۲	-/۵۱۲	-/۰۵۰
Ca													۱	/۳۹۹	-/۰۷۸	/۱۲۴
Na														۱	-/۱۹۶	/۹۱۲
OM															۱	-/۰۳۰
SAR																۱

سپس با استفاده از رگرسیون چند متغیره، رابطه بین متغیرهای مستقل با متغیر طول خندق در جدول (۷) و سطح مقطع خندق در جدول (۸) مشخص شد. در رابطه با طول خندق، متغیرهای ماسه ($۹/۲۹۹$)، نسبت جذب سدیم ($۷/۹۶۷$) و مواد خنثی شونده ($۶/۱۸۵$) بیشترین نقش را در گسترش طولی خندق‌ها دارد.

جدول ۷: یافته‌های تحلیل رگرسیون استاندارد شده و استاندارد نشده برای متغیرهای ویژگی‌های خاک و گسترش طولی خندق

sig	t	ضرایب غیر استاندارد			مدل	R ²	R	متغیر
		Beta	Std.Error	B				
/۴۸۷	-/۷۹۰		۱۲۱۶/۱۹۴	-۲۰۰/۹۶۱	(C)			
/۲۸۲	-/۳۰۹	-/۲۲۷	۷/۱۰۳	۹/۲۹۹	Sand			
/۹۶۶	/۰۴۶	/۰۱۰	۹/۵۷۶	/۴۴۳	Silt			
/۶۵۸	-/۴۸۹	-/۱۰۸	۶/۳۵۵	-۳/۴۸۲	PH			
/۴۶۳	-/۸۴۰	-/۲۴۴	/۴۹۷	/۴۱۷	EC			
/۱۶۷	-/۸۱۷	-/۴۲۱	۳/۴۰۴	۶/۱۸۵	TNV	/۷۸۴	/۹۷۷	L
/۲۸۵	-/۲۹۹	-/۳۵۰	/۳۱۵	-/۴۱۰	K			
/۲۱۹	/۱/۵۵۰	/۱/۳۲۵	۲/۲۸۵	۳/۵۴۰	Mg			
/۳۵۷	/۱/۰۸۶	/۷۳۶	۲/۳۴۷	۲/۵۵۰	Ca			
/۴۶۲	-/۸۴۱	-/۴۸۷	۴/۲۸۶	۳/۶۰۴	Na			
/۵۴۳	/۶۸۴	/۱۶۳	۸/۵۲۳	-۳/۰۵۸	OC			
/۳۲۳	/۱/۱۸۰	۳/۱۳۳	۶/۸۴۲	۷/۹۶۷	SAR			

Dependent Variable: L

در رابطه با سطح مقطع خندق متغیرهای ماسه (۷/۱۶۲)، نسبت جذب سدیم (۵/۷۶۹) و مواد خنثی شونده (۵/۲۴۰) بیشترین نقش را در گسترش سطح مقطع دارند.

جدول ۸: یافته‌های تحلیل رگرسیون استاندارد شده و استاندارد نشده برای متغیرهای ویژگی‌های خاک و سطح مقطع

sig	t	ضرایب غیر استاندارد			مدل	R ²	R	متغیر
		Beta	Std.Error	B				
/۱۶۷	/۱/۸۱۷		۳۹۵/۶۵۰	۷۱۴/۷۱۸	(C)			
/۶۶۵	-/۴۷۹	-/۰۸۹	۲/۲۸۰	۱/۰۹۱	Silt			
/۰۷۳	۲/۷۱۴	/۵۴۱	۲/۶۳۸	۷/۱۶۲	Sand			
/۰۱۴	-۵/۱۴۵	-/۹۸۳	۱/۱۷۱	-۳/۱۹۵	PH			
/۰۶۴	۲/۸۶۲	/۰۱۴	/۱۸۲	/۵۲۱	EC			
/۰۲۶	-۴/۰۹۲	-/۱۱۸۷	۱/۲۸۰	۵/۲۴۰	TNV	/۷۵۲	/۹۷۳	CS
/۸۰۳	/۲۷۲	/۰۸۴	/۱۰۹	-/۰۳۰	K			
/۴۰۸	-/۹۶۰	-/۸۸۱	/۷۳۷	/۷۰۸	Mg			
/۵۲۵	-/۷۱۲	-/۵۱۳	/۷۵۰	/۵۳۴	Ca			
/۷۷۷	/۳۰۹	/۹۶۵	۱/۳۶۰	/۴۲۰	Na			
/۰۸۳	۲/۵۵۸	/۸۴۶	/۱۵۲	-/۳۹۰	OC			
/۷۸۸	-/۲۹۴	-/۸۱۶	۱۹/۶۱۵	۵/۷۶۹	SAR			

Dependent variable: CS

با در نظر گرفتن نتایج حاصل از شکل‌گیری روابط رگرسیون بین طول و عرض خندق‌ها و ویژگی‌های خاک مشاهده می‌شود که همبستگی معنی‌داری بین آن‌ها وجود دارد که بیانگر پراکندگی و تخریب خاک در محل ایجاد خندق در

منطقه مورد مطالعه می‌باشد. در نهایت مدل پیش‌بینی گسترش طولی و عرضی خندق‌ها با در نظر گرفتن ویژگی‌های خاک از روابط زیر قابل مقایسه می‌باشد.

$$L = 9.299 (\text{Sand}) + 0.443 (\text{Silt}) - 3.482 (\text{PH}) + 0.417 (\text{EC}) + 6.185 (\text{TNV}) - 0.410 (\text{K}) + 3.540 (\text{Mg}) + 2.550 (\text{Ca}) + 3.604 (\text{Na}) - 3.058 (\text{OM}) + 7.967 (\text{SAR}).$$

$$CS = 7.162 (\text{Sand}) + 1.091 (\text{Silt}) - 3.195 (\text{PH}) + 0.521 (\text{EC}) + 5.240 (\text{TNV}) + 0.030 (\text{K}) + 0.708 (\text{Mg}) + 0.534 (\text{Ca}) + 0.420 (\text{Na}) - 0.390 (\text{OM}) + 5.769 (\text{SAR}).$$

آستانه توپوگرافی

مقادیر a (۶۷۵۹/۷۵۶)، β (-/۵۵۶)، R^2 (۰/۲۵۶)، sig (۰/۰۳۱) محاسبه شد و مقدار $Y = 6759.756X^{-0.556}$ با بررسی رابطه شیب و مساحت بدست آمد.

بحث

شرایط زمین‌شناسی منطقه زمینه ایجاد فرسایش خندقی را فراهم کرده است به این صورت که گسترش زیاد رسوبات آبرفتی پلیوسن و کواترنر شامل تراس‌های آبرفتی قدیم و جدید و شامل رسوبات ریزدانه (ماسه، سیلت و رس) می‌باشد که این رسوبات دارای ساختمان ضعیف و تحکیم نیافته است. همچنین وجود مواد محلول در سازندهای زمین‌شناسی منطقه است. بافت خاک عموماً لوم شنی و لوم سیلت شنی است. وجود همبستگی مثبت بین ماسه، طول و عرض متوسط خندق‌ها نشان دهنده وجود بافت ریز در نتیجه زیاد شدن ظرفیت نگهداری آب در خاک، کاهش چسبندگی ذرات و انتقال آن‌ها می‌گردد. به عبارتی دیگر رطوبت کم نشان دهنده ظرفیت بالای نگهداری آب در هنگام بارندگی است و همین امر موجب ترک خوردگی خاک می‌گردد. که این مساله با یافته‌های اوچلی و همکاران^۱ (۲۰۲۱)، سه‌ها و همکاران^۲ (۲۰۲۱)، پوئسن و همکاران^۳ (۲۰۰۳) همخوانی دارد. همبستگی مثبت بین طول و عرض خندق با مقدار سیلت بیانگر بالا بودن این مقدار در بافت خاک که موجب ناپایداری و ریزش خاک می‌گردد. خاک‌های سیلتی دارای دانه‌بندی خوبی می‌باشند اما با دریافت رطوبت به سرعت از هم پاشیده می‌شود و در نتیجه ذرات به راحتی فرسایش می‌یابند. این نتایج با یافته‌های شادفر (۱۳۸۹)، ولکر^۴ (۲۰۱۱)، ژانگ و همکاران^۵ (۲۰۲۰) تطابق دارد. مقدار رس که در تمامی نمونه‌های برداشت شده بین ۸ تا ۱۵ متغیر بوده دارای همبستگی مثبت با گسترش طولی و عرضی خندق بوده است. در خندق‌های که مقدار رس کمتر از ۱۰ درصد بود دارای ساختمان ناپایدار و بدلیل چسبندگی پایین در مقابل باران و رواناب دارای مقاومت پایینی بوده است. با ریز بودن بافت خاک گنجایش بیشتری برای ذخیره آب در خاک بوجود می‌آید در نتیجه رس‌ها منبسط شده و منافذ آن بسته می‌شود. این امر موجب کاهش نفوذپذیری و شکل‌گیری رواناب‌های سطحی می‌گردد. با گذشت زمان این رواناب‌ها بستر خود را عمیق کرده و باعث شکل‌گیری آبراهه‌ها می‌گردد که با افزایش ابعاد این آبراهه‌ها منجر به شکل‌گیری خندق‌ها می‌گردد (ایستانبولوگلو و همکاران^۶، ۲۰۰۶). این نتایج با نتایج اصغری و همکاران^۷ (۲۰۱۷)، شهاب‌آرخازلو و اصغری (۱۳۹۹)، مطابقت دارد. وجود همبستگی مثبت بین اسیدپته خاک و گسترش طولی خندق بیان‌کننده بازی بودن خاک منطقه است که این عامل باعث می‌شود خاک‌ها پراکنده و با آب باران و رواناب

^۱-Ocheli et al

^۲-Saha et al

^۳-Poesen et al

^۴-Volker

^۵-Zhung et al

^۶-Istanbulluoglu et al

^۷-Asghari et al

حاصل از آن حمل و از منطقه خارج گردد همچنین این عامل اثر منفی بر رشد و گسترش پوشش گیاهی داشته و در نتیجه با کاهش پوشش گیاهی، فرسایش خندقی در منطقه افزایش پیدا می‌کند. این نتایج با نتایج ابراهیمی (۱۳۹۵)، بشارتی (۱۳۹۷) همخوانی دارد. متغییر EC دارای همبستگی مثبت با گسترش طولی و عرضی خندق‌ها دارد هرچه این مقدار بیشتر باشد، غلظت نمک در خاک بالاتر است که این امر موجب به وجود آوردن شرایط شکل‌گیری و توسعه فرسایش به‌خصوص فرسایش تونلی و فروریختن سقف تونل‌ها می‌گردد. این نتایج با نتایج چه‌اوتامان و همکاران^۱ (۲۰۲۰) و سلیمان پور و همکاران (۱۳۹۸) مطابقت دارد و با نتایج زمان زاده و احمدی (۱۳۹۲) تطابق ندارد به این صورت که با بالا بودن مقدار هدایت الکتریکی در رسوبات پایین دست محدوده مورد مطالعه، فرسایش خندقی کمتری رخ داده است. همبستگی مثبت بین مواد خنثی شوند و گسترش طولی و عرضی خندق وجود دارد که این مقدار مواد آهکی به منشا زمین شناسی بستگی دارد و اینکه چه میزان کربنات کلسیم و منیزیم در یک تن خاک آهکی وجود دارد. مقدار این دو کربنات، مقدار مواد خنثی شونده (TNV) را بیان می‌کند. بخش اعظم خاک‌های مناطق خشک ایران از خاک‌های آهکی، آهکی شور یا شور قلیایی تشکیل شده است. بنابراین در تجزیه‌های شیمیایی مقدار مواد خنثی شونده از اهمیت زیادی برخوردار است. بالا بودن این مقدار در خاک تاثیر بسزایی در فرسایش انحلالی دارد و با نتایج صفاری و همکاران (۱۳۹۸) همخوانی دارد. اما با نتایج رستمی زاده و خانبابایی (۱۳۹۸)، عوض زاده توکلی (۱۳۸۸) در تضاد است. به این صورت که با افزایش این عامل مانع از گسترش خندق می‌گردد. وجود رابطه منفی بین گسترش طولی و عرضی خندق با پتاسیم نشان دهنده انسجام و پایداری پایین خاک می‌باشد. از آنجایی که خاک منطقه دارای بافت شنی است پتاسیم موجود در خاک به وسیله آبشویی از بین می‌رود. که این نتایج با نتایج کازابالا-گونزالس و همکاران^۲ (۲۰۲۱)، دنگ و همکاران^۳ (۲۰۱۷)، اولوبارن و همکاران^۴ (۲۰۱۸) همخوانی دارد. مثبت بودن همبستگی بین گسترش طولی و عرضی خندق با کلسیم و منیزیم بیانگر وجود مقدار زیاد املاح در خاک می‌باشد. که این املاح با آب حل می‌شوند و باعث ایجاد فرسایش خندقی می‌گردد. که این نتایج با نتایج زارع و همکاران (۲۰۲۰)، اولوبانجو اولوبانجو^۵ (۲۰۱۸) تطابق دارد و با نتایج عنایتی و همکاران (۱۳۹۰)، سادانا و باجوا^۶ (۱۹۸۵) تطابق ندارد به این علت که افزایش این پارامترها موجب کاهش ابعاد خندق‌ها شده است. بین سدیم و گسترش طولی و عرضی خندق‌ها رابطه مثبت وجود دارد زیرا با افزایش سدیم گسترش خندق سریع‌تر رخ می‌دهد. دلیل این امر آزاد شدن سدیم و جایگزین شدن آن با کلسیم و پتاسیم و افزایش پخش شدگی خاک است. سدیم موجب انحلال خاک و زمینه‌گسترش فرسایش خندقی را فراهم می‌سازد. نسبت جذب سدیم (SAR) نشان دهنده تاثیر سدیم در پراکندگی و تخریب خاکدانه‌ها می‌باشد (شهرپور و همکاران، ۱۳۹۱). بین گسترش طولی و عرضی خندق با نسبت جذب سدیم رابطه مثبت وجود دارد. این ویژگی زمانی موجب موجب تخریب خاک می‌گردد، که مقدار آن بالای ۱۵ باشد. بدلیل شستشویی کمتر خاک در منطقه، املاح سدیم در لایه‌های فوقانی بیشتر از کلسیم و منیزیم می‌باشند و مقدار SAR در منطقه چشمگیر می‌شود. بالا بودن این عامل موجب تخریب و فرسایش خاک می‌گردد زیرا یون سدیم دارای شعاع یونی هیدراته بزرگی است و باعث جذب مولکول‌های آب می‌گردد و بعد از جذب متورم شده و باعث کاهش نفوذپذیری خاک می‌گردد (شکل ۳ و ۸). این نتایج با نتایج اسماعیل نژاد و همکاران (۱۳۹۱)، رستمی زاده و خان بابایی (۱۳۹۵)، اصغری (۱۳۹۶) نیسی و همکاران (۱۳۹۶) مطابقت دارد. این در حالی است که با نتایج زمان زاده و احمدی (۱۳۹۲) تطابق وجود ندارد به این صورت که با افزایش مقدار SAR

1- Che othaman et al

2- Casabella- Gonzalz et al

3- Deng et al

4- Ollobarren et al

5- Olubanjo & Olubanjo

6- Sadana & Bajwa

گسترش خندق‌ها کمتر شده است. همچنین با نتایج آقار ضی و همکاران (۱۳۹۳) نبود تطابق با نتایج را بیان می‌کند به این علت که خندق‌های ایجاد شده در منطقه مورد مطالعه ناشی از تمرکز جریان و فرسایش خطی است که در ارتباط با بافت خاک (لومی) می‌باشد و خاک منطقه فاقد املاح و شوری است. رابطه منفی بین مواد آلی با گسترش طولی و عرضی خندق‌ها وجود دارد از بین بردن پوشش گیاهی موجب تخریب خاک می‌گردد. از آنجایی که مواد آلی موجب بهبود شرایط فیزیکی خاک می‌گردد (از عوامل موثر در تشکیل ساختمان خاک، بهبود نفوذپذیری خاک، تهویه خاک را متعادل و مانع فرسایش خاک) می‌گردد. با توجه به تاثیر املاح سدیم و تخریب زمین‌های کشاورزی به علت فرسایش و خشک‌سالی‌های پی در پی باعث کاهش ماده آلی در خاک منطقه گشته است. این نتایج با نتایج باقریان کلات (۱۳۹۸)، ون و همکاران^۱ (۲۰۲۱) همخوانی دارد (شکل ۹).



شکل ۹: کمبود پوشش گیاهی در مناطق فرسایش



شکل ۸: فرسایش خندقی در ضلع شرقی حوضه

پیش‌روی و گسترش خندق‌ها در سال‌های اخیر در منطقه مورد مطالعه بیشتر نمایان شده است. مراحل رشد و گسترش خندق‌های مورد مطالعه در سال‌های مختلف نشان داد که پلان عمومی خندق‌ها پنجه‌ای شکل است که نشان دهنده‌ی تاثیر رواناب سطحی بر رشد و گسترش آن‌ها بوده است. پلان پیشانی خندق‌ها عموماً مدور، عمودی و غار مانند و شاخه‌ی تقسیم شدند. سطح مقطع عرضی عموماً U مانند و در بعضی خندق‌ها V شکل بوده است. با توجه به اینکه در مناطق کم شیب (صفر تا هفت درصد)، نوع رسوبات منطقه (بافت لومی سنی)، املاح زیاد، مواد آلی کم و رواناب حاصل از بارندگی به داخل خاک نفوذ کرده و موجب انحلال سدیم، آهک، کلسیم و منیزیم می‌گردد. به همین دلیل در این مناطق خندق‌های عمیق به علت پدیده تونلی شدن به وجود می‌آید. عبارتی دیگر منطقه دارای آب و هوای خشک می‌باشد در فصل خشک ترک‌ها و شکاف‌های در سطح زمین ایجاد می‌گردد و با ایجاد بارش‌های ناگهانی و با شدت زیاد، آب وارد این شکاف‌ها شده و به درون زمین نفوذ می‌کند و در جهت شیب زمین و با انحلال مواد محلول موجب شکل‌گیری پپ‌های زیر زمینی می‌گردد که عامل مهمی در انتقال مواد انحلال‌پذیر و رسوب به شبکه‌های جاری می‌گردد. م‌شاهدات صحرائی نشان داد که بیشتر خندق‌ها در رسوبات انحلال‌پذیر شکل گرفته است به این صورت که گسترش خندق‌ها در محدوده‌ی سر خندق‌ها به صورت حفره‌ی از ناحیه میانی تا زیرین انحلال و ریزش می‌کند و سرخندق به یک مرتبه فرو می‌ریزد و باعث گسترش خندق می‌گردد (شکل ۱۰، ۱۱ و ۱۲).

توان منفی b در رابطه آستانه توپوگرافی نشان دهنده‌ی نقش رواناب‌های سطحی در تشکیل خندق می‌باشد. رابطه منفی نشان می‌دهد که با افزایش مساحت حوضه زهکشی، شیب زمین کاهش می‌یابد. عبارتی دیگر با گسترده شدن حوضه آبخیز راس خندق‌ها، رواناب بیشتر شده و تنش برشی جریان زیاد شده است که این امر موجب شستشوی خاک گشته و با توجه به بافت سبک خاک باعث گسترش راس خندق‌ها بر اثر فرسایش قهقراپی می‌گردد (شکل ۱۰). همچنین هر چقدر

¹: Wen et al

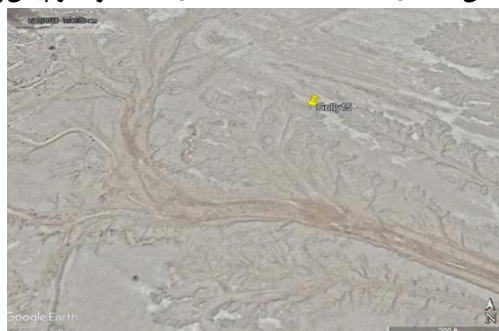
مقدار ضریب a بیشتر باشد نشان دهنده‌ی بالا بودن شرایط آستانه است. به علت کوچک بودن ضریب تعیین (۲۵۶) سایر عوامل مانند ویژگی‌های خاک، پوشش گیاهی، عوامل اقلیمی منطقه برای مشخص نمودن عوامل موثر در فرسایش خندقی باید در نظر گرفته شود. این نتایج با نتایج یثربی و همکاران (۱۳۹۲)، شهبازی و همکاران (۱۳۹۸) همخوانی دارد و عدم تطابق با نتایج سلیمان پور و همکاران (۱۳۸۹) به علت مثبت شدن مقدار رابطه توانی، فرآیند رواناب زیر سطحی باعث گسترش خندق‌ها در منطقه کنار تخته استان فارس شده است. به طور کلی فرسایش متاثر از دو نیروی محرک و نیروی مقاوم است. با توجه به نتایج فرسایش در خاک‌های غیر چسبنده، ناشی از نیروی رانشی اعمال شده بر ذرات و دانه‌های خاک می‌باشد به عبارتی نتایج بیانگر تحلیل نیروی مقاوم یا همان فرسایش پذیری در منطقه است.



شکل ۱۱: نمونه از پیش‌روی و توسعه خندق تا سال ۲۰۱۱



شکل ۱۰: نمونه از رشد و گسترش خندق تا سال ۲۰۰۳



شکل ۱۲: نمونه از گسترش خندق‌های پنجه‌ی شکل تا سال ۲۰۲۰

نتیجه‌گیری

فرسایش خندقی سهم عمده‌ی در تخریب خاک دارد. پیشروی سریع فرسایش خندقی در منتهی الیه شرقی حوضه علاوه بر تخریب سطح وسیعی از اراضی کشاورزی و مرتعی حوضه، خطری جدی برای چند روستا خصوصاً روستاهای قلعه سید و چاهو و حتی بخشی از شهر مَهر به شمار می‌آیند نتایج حاصل از گسترش طولی و سطح مقطع خندق‌ها نشان‌دهنده‌ی تاثیر بالای نسبت جذب سدیم، مواد خنثی شونده، سدیم محلول در خاک در ایجاد و گسترش فرسایش خندقی می‌باشد. این در حالی است که مواد آلی و پتاسیم مانع از ایجاد و گسترش فرسایش خندقی می‌گردد. همچنین بافت خاک عمدتاً شنی و لومی می‌باشد و شن در همه نمونه‌ها بالاترین درصد را دارد. ذرات ماسه موجب تضعیف ساختمان خاک گشته و با وجود آب انسجام خود را از دست داده و لایه‌های زیرین دچار انحلال و سپس سطح بالای خندق فرو می‌ریزد و باعث توسعه خندق می‌گردد. نتایج حاصل از آستانه توپوگرافی نشان داد که رواناب‌های سطحی موجب ایجاد فرسایش خندقی می‌گردد. به این صورت که هر چه شیب منطقه کم باشد مساحت بالا دست بیشتر بوده و رواناب بیشتری تولید و با پایداری پایین خاکدانه‌ها به راحتی شسته و با ایجاد دره‌ها در طی مسیر باعث ایجاد فرسایش خندقی می‌گردد. براساس نتایج تحقیق پیشنهاد می‌گردد با توجه به بالا بودن مقدار سدیم ابتدا باید اصلاح شیمیایی و استفاده از کاتیون‌های دو ظرفیتی (مانند

کلسیم با سدیم) انجام گیرد و سپس اقدام به اصلاح و ایجاد پوشش گیاهی در منطقه کرد. با توجه به تولید زیاد رواناب های سطحی می توان از روش های مکانیکی شامل ایجاد بندهای موقتی، بندهای سنگی، بندهای خاکی در انتهای خندق ها، اقدام به جمع آوری رواناب کرد. پیشنهاد می شود برای بررسی کامل تر فرسایش خندقی منطقه از روش های تلفیقی مانند روش های آماری دو متغییره (ضریب اطمینان) و الگوریتم حداکثر آنتروپی برای مدل سازی استفاده کرد.

منابع

- آقارزی، ح، داودی راد، ع، ا، مردیان م، و صوفی، م، ۱۳۹۳. بررسی آستانه مساحت شیب خندق ها در حوضه آبخیز ظهیر آباد شازند-استان مرکزی، مهندسی و مدیریت آبخیز، دوره ۶، شماره ۱، صص ۹-۱.
- اداره کل هواشناسی استان فارس، ۱۳۹۹.
- اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان فارس معاونت آبخیزداری.
- اسماعیل نژاد، ل، سیدمحمدی ج، و بخشی پور، ر، ۱۳۹۱. تاثیر ویژگی های فیزیکی، شیمیایی و کانی شناسی خاک بر مورفولوژی آبکندها در اراضی مارنی جنوب استان گیلان، پژوهش های آبخیزداری، دوره ۲۵، شماره ۲، صص ۱۶-۷.
- اصغری، ص، ۱۳۹۶. تحلیل عوامل موثر بر خندق زایی در حاشیه شرقی سواحل دریاچه ارومیه، فضایی جغرافیایی، دوره ۱۷، شماره ۵۸، صص ۳۰۱-۲۸۵.
- باقریان کلات، ع، ۱۳۹۸. تحلیل میزان فرسایش و رسوب ناشی از رخساره های فرسایشی حوضه با مدل شبیه ساز باران، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۸، شماره ۲، صص ۸۵-۷۱.
- بالنده، ن، احمدی، ع، سکوتی ر، و دربندی، ص، ۱۳۹۲. تعیین شرایط آستانه توپوگرافی گسترش فرسایش خندقی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز ریحانلو - آذربایجان غربی)، تحقیقات کاربردی خاک، جلد ۱، شماره ۲، صص ۱۵-۱.
- بشارتی، ب، عابدینی م، و اصغری، ص، ۱۳۹۷. بررسی و تجزیه و تحلیل عوامل موثر بر ایجاد و توسعه فرسایش خندقی در حوضه آبخیز شور چای. تحقیقات جغرافیایی، دوره ۳۳، شماره ۲، صص ۲۲۲-۲۰۶.
- راهی، غ، کاویان، ع، سلیمانی ک، و پورقاسمی، ح، ۱۴۰۰. تعیین نقش کاربری اراضی و خاک بر آستانه توپوگرافی توسعه خندق ها در استان بوشهر، مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران، دوره ۷۴، شماره ۱، صص ۸۱-۶۹.
- رستمی زاده ق، و خانبابایی، ز، ۱۳۹۸. ارزیابی تاثیر ویژگی های فیزیکی - شیمیایی خاک بر میزان فرسایش خندقی، فرسایش محیطی، دوره ۹، شماره ۴، صص ۵۱-۳۵.
- رستمی زاده ق، و خانبابایی، ز، ۱۳۹۵. ارزیابی تاثیر ویژگی های فیزیکی - شیمیایی خاک بر گسترش فرسایش خندقی (مطالعه موردی: شهرستان دره شهر)، محیط زیست و مهندسی آب، دوره ۲، شماره ۴، صص ۳۸۹-۳۷۶.
- زمان زاده م، و احمدی، م، ۱۳۹۲. تاثیر ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک در شکل گیری و گسترش فرسایش خندقی (مطالعه موردی: فارس، منطقه دشت کهور لامرد)، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۲، شماره ۲، صص ۱۵۶-۱۳۵.
- سلیمان پور، م، صوفی، م، روستا م.ج، و شادفر، ص، ۱۳۹۸. محاسبه حجم خاک از دست رفته ناشی از فرسایش خندقی و برآورد هزینه های اقتصادی آن (مطالعه موردی: حوزه آبخیز قاضیان استان فارس)، علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، دوره ۱۳، شماره ۴۶، صص ۱۲۱-۱۱۲.
- سلیمان پور، م، صوفی م، و احمدی، م، ۱۳۸۹. بررسی آستانه توپوگرافی و عوامل موثر بر رسوب زایی و گسترش خندق ها در منطقه نیریز استان فارس، مرتع و آبخیزداری (منابع طبیعی ایران)، دوره ۶۳، شماره ۱، صص ۵۳-۴۱.
- سلیمان پور، م، صوفی م، و احمدی، ح، ۱۳۸۶. بررسی فرآیند غالب هیدرولوژیک در گسترش خندق ها با استفاده از آستانه توپوگرافی در اقلیم های مختلف استان فارس، همایش زمین شناسی کاربردی و محیط زیست، دوره ۳، صص ۸-۱.
- شادفر، ص، ۱۳۹۰. بررسی فرسایش خندقی با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی در شهرستان رودبار استان گیلان، پژوهش های محیطی، دوره ۱، شماره ۳، صص ۳۰-۱۶.

- شهاب آرخالزوح، واصغری، ش.، ۱۳۹۹. برآورد فرسایش خندقی بر پایه معادلات REGEM و اصلاح ضرایب آن در استان اردبیل، تحقیقات کاربردی خاک، دوره ۸، شماره ۱. صص ۱۶۲-۱۷۳.
- شهبازی، خ.، خسروشاهی، م.، حشمتی م.، وقیطوری، م.، ۱۳۹۹. مقایسه نقش سازند زمین‌شناسی و عوامل توپوگرافی در آستانه‌های فرسایش خندقی، پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، دوره ۱۱، شماره ۲۱، صص ۲۶۹-۲۵۹.
- شهریور، ع.، دیون سونگ، ک.، جزوب، ش.، انور ع.، و صوفی، م.، ۱۳۹۱. نقش هدایت الکتریکی (EC) و نسبت جذب سدیم (SAR) در گسترش فرسایش خندقی در مناطق نیمه خشک استان کهگیلویه و بویراحمد، پژوهش در علوم کشاورزی، دوره ۸، شماره ۱، صص ۱-۱۲.
- صفاری، ا.، کرم، ا.، شادفر ص.، واحمدی، م.، ۱۳۹۸. تاثیر ویژگی‌های خاک بر مورفولوژی و گسترش فرسایش خندقی (مطالعه موردی: حوضه رودخانه مهران لامرد، فارس)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۸، شماره ۱، صص ۱۴۶-۱۳۰.
- عرب‌عامری، ع.، رضایی خ.، ویمانی، م.، ۱۳۹۸. ارزیابی حساسیت زمین نسبت به فرسایش خندقی با تکنیک داده‌کاوی گروهی مطالعه موردی: حوضه شاهرود، علوم زمین، دوره ۲۸، شماره ۱۱۱، صص ۱۳۹-۱۵۰.
- عنایتی، ک.، روستا م.ج.، و وکیلی، آ.، ۱۳۹۰. بررسی آثار جداگانه و توأم مواد آلی و معدنی بر اندازه خاکدانه‌ها در یک خاک شور و سدیمی با بافت سیلت لوم، علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، دوره ۱۵، شماره ۵۶، صص ۱۶۹-۱۷۸.
- عوض زاده توکلی، ف.، ۱۳۸۸. برآورد میزان گسترش طولی خندق با استفاده از مدل (مطالعه موردی: استان بوشهر)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
- محمد ابراهیمی، م.، جوادی م.ر.، و خواه مهدی، و.، ۱۳۹۵. تعیین عوامل موثر در رخداد فرسایش خندق پنجه‌ای در حوزه آبخیز آق امام (۲)، آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، دوره ۳۰، شماره ۶، صص ۱۹۷۸-۱۹۹۲.
- نیسی، س.، خلیلی مقدم ب.، و ذرتی پور، ا.، ۱۳۹۶. مدل‌سازی عوامل موثر بر رشد طولی خندق‌های مارنی و تعیین سهم تولید رسوب حاصل از آن‌ها (مطالعه موردی: حوزه درب خزینه خوزستان)، مرتع و آبخیزداری (منابع طبیعی ایران)، دوره ۷۰، شماره ۲، صص ۵۴۱-۵۳۱.
- یثربی، ب.، صوفی، م.، میرنیا خ.، و محمدی، ج.، ۱۳۹۲. بررسی تاثیر ویژگی‌های توپوگرافی و خاک بر گسترش آبکندهای جبهه ی در کاربری کشاورزی مطالعه موردی: استان ایلام، مهندسی و مدیریت آبخیز، دوره ۵، دوره ۱، صص ۴۰-۳۱.
- Alimonu oparaku, L., & Terungwa lwar, R. (2018). Relationships between average gully depths and widths on geological sediments underlying the Idah-Ankpa Plateau of the North Central Nigeria. *International soil and water conservation research*, 6(1), 43-50.
- Asgharisaraskanroud, S., Zeinali, B., & Mohammadnejad, V. (2017). Analysis physical and chemical properties of soil and morphometric impacts on gully erosion. *Desert*, 22-2, 157-166.
- Casabella-Gonzalez, M.J., Borselli, L., & Garcla-Meza, J.V. (2021). Soil horizon erodibility assessment in an area of Mexico susceptible to gully erosion. *Journal of southAmerican earth sciennces*, 111, 103497.
- Che Othaman, N.N., Mdisa, M.N., Ismail, R.C., Ahmad, M. I., and Hui, C.K. (2020). Factors that affect soilelectrical conductivity(EC)system for smart farming application. *AIP conference proceedings* 2203,020055-6.
- Deng, Y., Cai, Ch., Xia, D., Ding, Sh., Chen, J., & Wang, T. (2017). Soil atterbering limits of different weathering profiles of the collapsing gullies in the hilly granitic region of southern China. *Soil earth*, 8, 499-513.
- Dlapa, P., Chrenkova, K., Mataix-Solera, J., & Simkovic, I. (2012). Soil profile improvement as a byproduct of gully stabilization measures. *Catena*, 92, 155-161.
- Dotterweich, M., Rodzik, J., Zgtobicki, W., Schmitt, A., Schmidtchen, G., & Brok, H-R. (2012). High resolution gully erosion and sedimentation processes, and land use changes

- since the Bronze Age and future trajectories in the Kazimierz Dolny area (Naleczow Plateau, SE-Poland). *CATENA*, 95, 50-62.
- Guan, Y., Yang, Sh., Zhao, Ch., Lou, H., Chen, K., Zhang, Ch., & Wu, B. (2021). Monitoring long-term gully erosion and topographic thresholds in the marginal zone of the Chinese Loess Plateau. *Soil and Tillage Research*, 205, 104800.
 - Istanbuluoglu, E., Rafeal, L., & Flores-Cervantes, H. (2005). Implication of bank failures and fluvial erosion for gully development: field observation and modeling. *Geophysical Research*, 110, 1014-1029.
 - Majhi, A., Nyssen, J., & Verdoodt, A. (2021). What is the best technique to estimate topographic thresholds of gully erosion? Insights from a case study on the permanent gullies of Rarh plain, India. *Geomorphology*, 375, 107547.
 - Ocheli, A., Ogbe, O.B., & Aigbadon, G.O. (2021). Geology and geotechnical investigations of the Anambra Basin, Southeastern Nigeria: implication for gully erosion Hazards. *Environmental system reaserch*, 10(23), 1-27.
 - Ollobarren, P., Campo-Bascos, M., Gimenze, R., & Casall, J. (2018). Assessment of soil factors controlling ephemeral gully erosion on agricultural fields. *Earth surface processes and landforms*, 1-50.
 - Olubanjo, O.O., & Olobanjo, A.M. (2018). The effect of gully erosion in Ilara-Mokin, Ondo State, Negeria. *Ijesrt*, 205-218.
 - Poeson, J., Nachtergeale, J., Verstreaten, G., & Valentin, C. (2003). Gully erosion environmental change: importance and research needs. *Catena*, 50, 91-133.
 - Rotta, C.M.S., & Zuquette, L.V. (2013). Erosion feature reclamation in urban areas: typical unsuccessful examples from Brazil. *Environ Earth Sci.* 72, 535-555.
 - Sadna, U., & Bajwa, M. (1985). Manganese equilibrium in submerged sodic soils as influenced by application of gypsum and green manuring. *The journal of agricultural science*, 104(2), 257-261.
 - Saha, A., Chandra pal, S., Arabameri, A.R., Chowdhuri, I., Rezaie, F., Chakraborty, R., Roy, P., & Manisa, SH. (2021). Optimization modelling to establish false measures implemented with ex-situ plant species to control gully erosion in monsoon-dominated region with novel in situ measurements. *Enviromental management*, 287, 112284.
 - Soufi, M., Bayat, R., Davudirad, A., Zanjanijam, M., & Esael, H. (2020). Topographic thresshod of gully erosion in Iran: a case study of Fars, Zanjan, Markazi and Golestan provinces. *Gully erosion studies from India and surrounding regions*, 381-392.
 - Torri, D., poesen, J., Rossi, M., Amici, V., Spennacchi, D., & Cremer, C. (2018). Gully head modelling: A Mediterranean badland case study. *Earth surface processes and landforms*, 43, 2547-2561.
 - Torri, D., & Poesen, J. (2014). A review of topographic threshold conditions for gully head development in different environments. *Earth-Science Reviews*, 130, 73-85.
 - Volker, P. (2011). Soil erosion in the Swiss midlands: Results of a 10 year field survey. *Geomorphlogy*, 124(1), 32-41.
 - Wen, H., Ni, Sh., Wang, J., & Cai, Ch. (2021). Changes of soil quality induced by different vegetation restoration in the collapsing gully erosion areas of southern China. *International soil and water conservation research*, 9, 195-206.
 - Zare, M., Soufi, M., Nejabat, M., & Pourghasemi, H.R. (2020). The topographic threshold of gully erosion contributing factors. *Research square*, 1-30.
 - 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* 356.