

## تعیین عوامل مؤثر بر رشد طولی خندق‌ها و پیش‌بینی گسترش آن (مطالعه موردی: شهرستان دره‌شهر)

قباد رستمی‌زاد\* - استادیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ایلام  
علی سلاجقه - دانشیار دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران  
علی‌اکبر نظری سامانی - استادیار دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران  
جمال قدوسی - عضو هیات علمی مرکز حفاظت آب‌وخاک

پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۸/۱۴      تأیید نهایی: ۱۳۹۴/۰۴/۰۹

### چکیده

فرسایش خندقی یکی از مخرب‌ترین و پیچیده‌ترین نوع فرسایش آبی می‌باشد. برای مبارزه با این فرسایش باید عوامل مؤثر در توسعه خندق‌ها شناخته شوند. در این تحقیق تعداد ۳۶ خندق در پهنه فرسایشی شهرستان دره‌شهر در شرق استان ایلام انتخاب شدند. این تحقیق باهدف تعیین میزان گسترش طولی خندق و حجم خاک فرسایش یافته در منطقه در دو دوره بین سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۸۱ انجام گرفت. بدین منظور با استفاده از ارتوفتو نمودن عکس‌های هوایی این دو دوره به کمک نرم‌افزار PCI Geomatica خندق‌ها مشخص گردیدند، سپس عوامل زمین‌محیطی مؤثر بر توسعه خندق‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS تعیین گردیدند. بر این اساس میانگین رشد طولی خندق‌ها در طول دوره مطالعه، ۰/۸۵ متر در سال و متوسط حجم خاک فرسایش یافته ۱۸/۸۴ مترمکعب در طول دوره و ۱/۸۸ مترمکعب در سال محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد که گسترش طولی خندق تابعی از طول خندق، نسبت جذب سدیم، درصد شن و میزان انحنای دامنه بوده و گسترش حجمی خندق تابعی از سطح مقطع خندق، درصد آهک و ضریب کشیدگی حوضه آبخیز بالادست خندق می‌باشد. ضریب تبیین ( $R^2$ ) این مدل‌ها به ترتیب ۰/۷۳۶ و ۰/۶۳۴ ارزیابی شد. اعتبارسنجی مدل‌ها نیز با استفاده از میانگین خطای نسبی (MRE)، میانگین توان دوم خطا (MSE) و جذر میانگین توان دوم خطا (RMSE) مورد بررسی قرار گرفت که مقدار آن‌ها به ترتیب برای مدل گسترش طولی خندق ۸/۶۴، ۰/۰۸ و ۰/۸۹ و برای مدل گسترش حجمی خندق ۹/۴۹، ۰/۰۲۴ و ۰/۱۱۵ به دست آمد. نتایج نشان داد مدل‌ها از اعتبار خوبی برخوردار هستند و می‌توان از آن‌ها برای پیش‌بینی میزان پیشرفت طولی و حجمی خندق برای مناطقی با شرایط مشابه منطقه مورد مطالعه بهره گرفت.

واژگان کلیدی: فرسایش خندقی، ارتوفتو، گسترش طولی، انحنای دامنه، اعتبارسنجی

## مقدمه

فرسایش خندقی یکی از مخرب‌ترین نوع فرسایش آبی است که با رشد و گسترش آن حجم قابل‌توجهی از خاک از دسترس خارج می‌شود. این فرسایش به‌عنوان یک جریان پیچیده ژئومورفولوژی و تغییردهنده منظر زمین و تخریب‌کننده محیط‌زیست می‌باشد که ارائه مدل فراگیر و جهانی با توجه به جنبه‌های مختلف آن دشوار به نظر می‌رسد. برای مبارزه با فرسایش خندقی می‌بایست مکانیزم رشد و گسترش ابعاد خندق‌ها به‌ویژه رشد طولی آن‌ها شناخته شود. با توجه به گستره‌های نسبتاً وسیع تحت فرسایش خندقی لازم است راهکارهای مناسب در انطباق کامل با عوامل مؤثر در شکل‌گیری، رشد و گسترش فرسایش خندقی و مدل کاربردی (سازگار با شرایط محیطی و اقدامات عامل انسانی در بهره‌برداری از منابع آب‌وخاک) برای پیش‌بینی رشد طولی خندق‌ها که ابزار اساسی برای برنامه‌ریزی جهت مهار رشد طولی خندق‌ها و پی‌آمدهای ناشی از آن است، تبیین و معرفی شود (عوض‌زاده توکلی، ۱۳۸۸، به نقل از قدوسی، ۱۳۸۲). فرسایش خندقی چندین برابر فرسایش سطحی تولید رسوب دارد که برای مخازن سدهای احداث‌شده و هدر رفت خاک حاصلخیز تولیدشده بسیار مهم می‌باشد (صوفی، ۱۳۸۳). مارتینز و همکاران (۲۰۰۴)، معتقدند که فرسایش خندقی یکی از مهم‌ترین منابع رسوب در مناطق خشک است به طوری که ۵۰ تا ۸۰ درصد رسوبات حاصل از فرسایش آبی را شامل می‌شود. عوض‌زاده توکلی (۱۳۸۸) ارزیابی عوامل مؤثر در گسترش طولی خندق را در استان بوشهر مورد بررسی قرار داد و به این نتیجه رسید که بین مساحت حوضه آبخیز بالادست خندق، فاصله هدکت تا مرز حوضه آبخیز، ارتفاع هدکت و SAR با گسترش طولی خندق ارتباط معنی‌داری وجود دارد. کریمی و همکاران (۱۳۸۶)، در تحقیقی به‌منظور دستیابی به عوامل مؤثر بر تشکیل خندق اقدام به بررسی تغییرات رشد طولی خندق‌ها در مقاطع مختلف زمانی با استفاده از عکس‌های هوایی سال ۱۳۳۵ و ۱۳۴۶ نموده و با تجزیه و تحلیل خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در حوضه آبخیز زهان قاین خراسان به این نتیجه رسیده‌اند که شدت بارش، مساحت حوضه بالادست پیشانی خندق و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک به‌ویژه EC و درصد رس از عوامل عمده تشکیل و گسترش خندق‌ها می‌باشند. محمدی (۱۳۸۵) در پژوهشی در حوضه آبخیز حبله رود در استان سمنان به‌منظور تعیین مناسب‌ترین مدل پیش‌بینی رشد طولی فرسایش خندقی اقدام به بررسی چند زمانه عکس‌های هوایی مربوط به سال‌های ۱۳۳۵، ۱۳۴۶، ۱۳۷۹ و واسنجی مدل‌های FAO، Thompson، SCSII و SCSII نموده و به این نتیجه رسید که سطح حوضه آبخیز بالادست سر خندق و درصد رس از عوامل اصلی گسترش خندق‌ها بوده و مدل SCSII با کمترین درصد خطای نسبی و مطلق مناسب‌ترین مدل برای برآورد رشد طولی خندق‌ها می‌باشد. غفاری و چرخایی (۱۳۷۸)، با مطالعه بر روی ۳۶ خندق و زیر حوضه وابسته به آن‌ها، همچنین تجزیه و تحلیل آماری ۱۶ پارامتر جمع‌آوری‌شده برای هر خندق و زیر حوضه مربوط به آن در یک دوره ۳۰ ساله با استفاده از عکس‌های هوایی نموده و به این نتیجه رسیدند که رگرسیون‌های خطی جهت برآورد رشد خندق‌ها و روابط غیرخطی برای محاسبه بار رسوبی مناسب‌ترین همبستگی را نشان می‌دهند. ایشان همچنین مدلی را برای برآورد میزان متوسط سالانه رشد خندق‌ها پیشنهاد کرده‌اند که در آن سطح حوضه آبخیز بالادست خندق، عرض خندق، نسبت سیلت به رس و درصد خاک‌های قهوه‌ای مؤثر بودند. محمد زارع مهرجردی و همکاران (۱۳۸۶)، در پژوهشی در استان هرمزگان با اندازه‌گیری خصوصیات مرفومتريک خندق‌ها همچنین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک به این نتیجه رسیدند که رخداد شکل‌گیری و گسترش خندق‌ها، رابطه مستقیمی با میزان املاح موجود در خاک، تمرکز رواناب‌های سطحی، خصوصیات افقی خاک، شدت بارندگی و تراکم پوشش گیاهی داشته و سازندهای زمین‌شناسی، نوع خاک، درصد شیب و کاربری اراضی از عوامل اصلی در رشد خندق‌ها به شمار می‌روند. ملیک (۲۰۰۷)، طی بررسی‌های صورت گرفته بر روی خندق‌های کوچک در فلات جنوبی لهستان، به این نتیجه رسیده است که خندق‌های کوچک به روش‌های مختلف در کف دره‌ها و یا در شیب آن‌ها تشکیل می‌شوند. همچنین نرخ متوسط فرسایش خندق‌های کوچک را ۰/۶۳ متر در سال، نرخ متوسط فرسایش خندقی در شیب‌ها را ۰/۵۲ - ۰/۲۱ متر در سال و نرخ متوسط فرسایش خندقی در کف

دره‌ها را ۱/۹۸ - ۰/۱۸ متر در سال برآورد کرده است. وندکخوف و همکاران (۲۰۰۰)، معتقدند که ریزش خاک در اثر توسعه ترک‌های کشتی یکی از مهم‌ترین علل پیشروی هدکت می‌باشد. مارتینز (۲۰۰۳)، با اندازه‌گیری نرخ فرسایش خندقی بین سال‌های ۱۹۵۷ تا ۱۹۹۳ به وسیله عکس‌های هوایی میزان پیشروی خندق‌ها را ۰/۲ متر در سال و ماکزیمم نرخ پیشروی هدکت خندق‌ها را ۰/۷ تا ۰/۸ متر در سال برآورد کرده است.

شهریور (۱۳۷۶)، به منظور بررسی عوامل مؤثر در شکل‌گیری و گسترش خندق‌ها در حوضه آبخیز سوق شهرستان دهدشت اقدام به تجزیه و تحلیل آماری داده‌های جمع‌آوری شده توسط نرم‌افزار SPSS نظیر شیب و مساحت حوضه آبخیز بالادست خندق، شیب کف خندق، نوع سازند زمین‌شناسی، درصد پوشش گیاهی، مقدار رس، ماسه، سیلت، EC و املاح موجود در خاک، شکل هندسی، مقطع عرضی، ارتفاع، طول و عمق خندق به عنوان متغیرهای مستقل و حجم خندق به عنوان متغیر وابسته نموده و رابطه زیر را ارائه کرده است.

$$Y = 3538 X_1 + 136/8 X_2 - 177/6 \quad (1)$$

Y: حجم خندق بر حسب مترمکعب، X<sub>1</sub>: درصد نمک‌های محلول، X<sub>2</sub>: مساحت حوضه آبخیز خندق به هکتار می‌باشد. مسعود سلیمان‌پور و همکاران (۱۳۸۶)، اقدام به تجزیه و تحلیل آماری پارامترهای توپوگرافی، مورفولوژی خندق و فیزیکی-شیمیایی خاک با استفاده از روش گام‌به‌گام در نرم‌افزار SPSS نموده و به این نتیجه رسیدند که رسوب تولیدی ناشی از گسترش خندق‌ها در منطقه گوراسپید فارس تابع پنج متغیر درصد شیب، مساحت حوضه آبخیز، درصد شن، EC و پوشش گیاهی می‌باشد و رواناب زیرسطحی به عنوان فرآیند هیدرولوژیک عمده در گسترش خندق‌های این منطقه نقش دارد. همچنین مدل زیر به منظور محاسبه رسوب تولیدی از خندق‌ها ارائه شده است.

$$Y = -645/01 + 0/007 X_1 - 1/58 X_2 + 91/73 X_5 + 2/15 X_8 + 68/58 X_9 \quad (2)$$

Y: رسوب تولیدی در دوره ۱۳۸۵ - ۱۳۷۳، X<sub>1</sub>: مساحت حوضه آبخیز، X<sub>2</sub>: پوشش گیاهی، X<sub>5</sub>: درصد شیب، X<sub>8</sub>: درصد شن و X<sub>9</sub>: EC می‌باشد.

مریم بیاتی خطیبی (۱۳۸۳)، در پژوهشی با تجزیه و تحلیل آماری پارامترهای توپوگرافی نظیر طول دامنه، اختلاف ارتفاع، فاصله سر خندق از خط الراس، شیب و طول خندق و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، مدل زیر را برای گسترش خندق ارائه نموده است.

$$Y = 9/255 + 0/324 X_1 + 0/569 X_2 \quad (3)$$

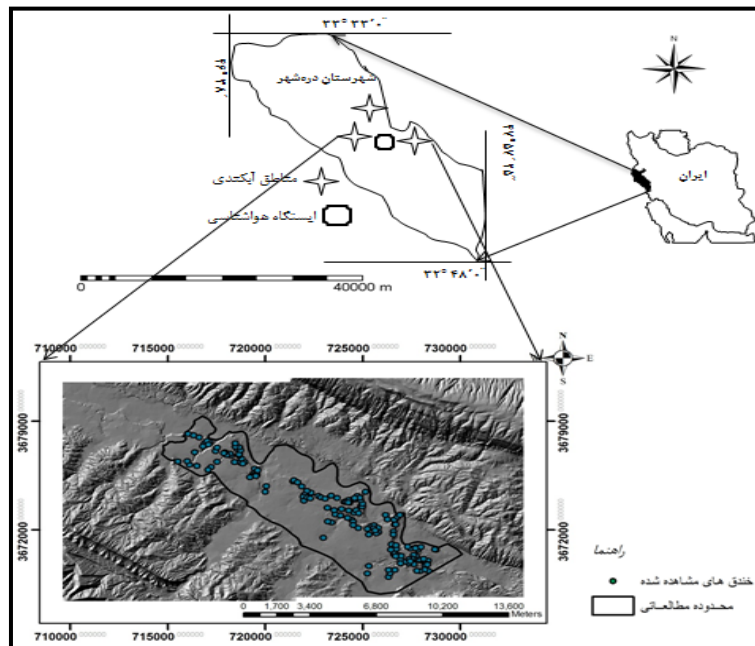
Y: طول خندق، X<sub>1</sub>: اختلاف ارتفاع، X<sub>2</sub>: طول دامنه

با توجه به مطالب فوق، در تحقیق حاضر سعی بر آن بوده است که با بررسی پارامترهای زمین محیطی و فیزیکی - شیمیایی خاک، فاکتورها و فرآیندهای مؤثر در گسترش طولی و حجمی فرسایش خندقی تعیین و سپس اقدام به معرفی مدل مناسب جهت برآورد رشد طولی و حجم خاک فرسایش یافته به وسیله فرسایش خندقی در تطبیق با شرایط منطقه تحقیق شود.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

در تحقیق حاضر پهنه دره شهر مورد بررسی قرار گرفت که این پهنه در شهرستان دره شهر و در شرق استان ایلام واقع گردیده است. محدوده جغرافیایی منطقه مورد مطالعه بین ۰۸° ۳۰' تا ۰۳° ۴۶' ۴۷ طول جغرافیایی و ۱۴° ۱۲' تا ۳۳° ۰۳' عرض جغرافیایی قرار دارد. سازند زمین‌شناسی از رسوبات دریاچه‌ای تشکیل شده که ناشی از زمین‌لغزش بزرگ سیمره است. اقلیم پهنه نیمه خشک سرد است که بر اساس ایستگاه سینوپتیک دره شهر دمای متوسط منطقه ۲۱ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش منطقه ۴۹۷ میلی‌متر است. مساحت پهنه خندقی مورد مطالعه ۵۹۸۸ هکتار، ارتفاع متوسط پهنه از سطح دریا ۴۲۷ متر و شیب متوسط ۱۲ درصد است (شکل ۱).



شکل (۱): موقعیت منطقه مورد مطالعه

## روش تحقیق

### جمع‌آوری و تهیه آمار و اطلاعات

آمار و اطلاعات پایه مورد نیاز شامل نقشه‌های پایه توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰ سازمان‌های جغرافیایی ارتش و سازمان نقشه‌برداری کشور، نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور، نقشه منابع اراضی و خاک‌شناسی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ می‌باشد. داده‌های هواشناسی شامل کلیه ایستگاه‌های باران‌نگاری، باران‌سنجی، دما و تبخیرسنجی در منطقه تحقیق به منظور مشخص نمودن خصوصیات تفصیلی پارامترهای بارش، دما و تبخیر در منطقه و استفاده از آن‌ها در تجزیه و تحلیل هیدرولوژی مناطق خندقی شده مورد استفاده قرار گرفت. خصوصیات مربوط به هریک از نقشه‌های پایه در نقاط آموزشی (تعلیمی) با استفاده از دستگاه GPS در کل منطقه تحقیق شامل سنگ‌شناسی، نوع تراکم پوشش با استفاده از پلات‌های استاندارد ارزیابی مراتع (۱\*۱) متر و ترانسکت، کاربری اراضی، و همچنین اندازه‌گیری شیب در محل نقاط تعلیمی با استفاده از شیب‌سنج انجام گرفت. به این ترتیب در هر یک از نقاط آموزشی (تعلیمی) موارد مذکور مستقیماً از طریق اندازه‌گیری میدانی مشخص شده و در مرحله تجزیه و تحلیل داده‌ها از آن‌ها جهت تعیین خصوصیات مکانی مناطق خندقی شده استفاده شد.

برای رقومی کردن عکس‌های هوایی با استفاده از نرم‌افزار PCI Geomatica V9.1 و اسکن دیپازتو آن‌ها با دقت بسیار بالا و اطلاعات کالیبراسیون دوربین (اعم از فاصله کانونی، مقیاس عکس، شعاع کره زمین در مدل عکس هوایی) و علائم حاشیه‌ای عکس (Fiducial Mark) به همراه مختصات نقاط شاهد (Prick) به عنوان نقاط کنترل زمینی (GCP) عمل شد. در واقع در این روش سعی شد تا با حل مدل ریاضی عکس‌های هوایی جهت ارتباط دادن پیکسل‌ها در یک تصویر به محل واقعی آن‌ها در روی زمین پی برد که به آن روش مدل سخت‌گیرانه<sup>۱</sup> بر پایه هندسه فریم دوربین می‌گویند. پس از انجام مراحل بالا برای هر کدام از عکس‌های هوایی منطقه با انجام عمل ارتوفوتو مجموع عکس‌های هوایی که در مرحله اول نشان‌دهنده فرسایش خندقی بودند به صورت موزاییک در کنار هم قرار داده شدند و تصویری با

<sup>۱</sup>- Rigorous Method

دقت مکانی ۱×۱ متر و خطای (RMSE) کمتر از یک پیکسل به دست آمد. پس از انجام مراحل بالا نقشه وضعیت پراکنش خندق‌ها به همراه مرز حوضه روی هر کدام از عکس‌های هوایی تعیین شد.

### عملیات‌های میدانی (صحرائی)

الف) اندازه‌گیری خصوصیات ژئومتری و توپوگرافی خندق‌ها  
اندازه‌گیری خصوصیات ژئومتری خندق‌ها شامل عمق، طول، عرض بالا و پایین، سطح مقطع، شیب‌جانبی، از طریق نقشه‌برداری در عرصه با استفاده از دوربین نقشه‌برداری توتال در سه مقطع (رأس خندق، میانه و دهانه خروجی خندق) انجام گرفت. سپس به کمک نرم‌افزار AutoCAD و AutoCAD Land Civil3D مدل ابعادی هر یک از خندق‌ها در محیط نرم‌افزار طراحی گردید و بعد از آن مشخصات ژئومتری خندق‌ها استخراج شد. محدوده آبخیز هر خندق از طریق عملیات میدانی (با استفاده از GPS) و همچنین با استفاده از نقشه توپوگرافی و عکس‌های هوایی به منظور تعیین مساحت بالادست هر خندق مشخص شد.

ب) نمونه‌برداری و تعیین فاکتورهای فیزیکی و شیمیایی خاک  
جهت مشخص کردن فاکتورهای خاک‌شناسی در سه مقطع (رأس، وسط و خروجی) در طول هر یک از خندق‌ها و در هر مقطع سه نمونه خاک در بخش سطحی (۵۰-۰ سانتی‌متر)، بخش عمقی (۵۰ تا کف) و کف تهیه گردید که هر نمونه پس از برداشت خاک و همگن‌سازی آن استخراج شد. نمونه‌های خاک پس از برداشت از صحرا در سایه خشک گردیده و سپس با یک چکش چوبی کوبیده و پس از عبور از الک ۲ میلی‌متری به آزمایشگاه منتقل گردید. با انتقال نمونه‌های خاک به آزمایشگاه، آنالیزهای مختلف بر روی آن‌ها انجام گرفت و به ترتیب بافت خاک به روش هیدرومتری بویکس و هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع با دستگاه هدایت سنج الکتریکی EC Meter Genwey مدل ۳۳۱۰ تعیین گردید. اندازه‌گیری مقدار یون سدیم در عصاره اشباع خاک به روش فلاپم فتومتری و اندازه‌گیری مقدار یون کلسیم و منیزیم در عصاره اشباع به روش تیتراسیون برگشتی با ورسین و سپس میزان نسبت جذب سدیم (SAR) محاسبه گردید (رابطه ۴). همچنین تعیین اسیدیته خاک در گل اشباع به وسیله الکتروود شیشه به کمک دستگاه pH سنج مدل ۷۴۴ تعیین شد. مقدار آهک نمونه‌های خاک به روش کلسی‌متری انجام گرفت و جهت اندازه‌گیری مقدار گچ نمونه‌های خاک از روش حذف آب کریستالی استفاده گردید. همچنین مقادیر مواد آلی نمونه‌های خاک از روش اکسیداسیون تر به دست آمد.

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{(Ca + Mg)}{2}}} \quad (4)$$

ج) وضعیت هیدرولوژیکی خندق‌ها  
وضعیت هیدرولوژیکی هر یک از خندق‌ها با استفاده از روش استدلالی در اراضی خندقی شده با در نظر گرفتن دوره‌های بازگشت ۲ تا ۱۰۰ ساله مورد بررسی قرار گرفت (مهدوی، ۱۳۸۴).

$$Q = 1/360 C_i A \quad (5)$$

در این معادله:  $i$ : شدت بارندگی برحسب سانتی‌متر بر ساعت،  $A$ : سطح حوضه (هکتار)،  $C$ : ضریب رواناب،  $Q$ : حداکثر دبی رواناب (مترمکعب در ثانیه) می‌باشد.

برای به دست آوردن شدت‌های بارش با دوره بازگشت‌های مختلف نیز از رابطه بل (۱۹۶۹) استفاده شد (علیزاده، ۱۳۸۹).

$$P_T' = (0.21 \ln(T_{yr}) + 0.52) (0.54 t_{min}^{0.25} - 0.5) P_{10}^{60} \quad (6)$$

در این فرمول  $t$  مدت بارندگی برحسب دقیقه،  $T$  دوره بازگشت برحسب سال،  $P_{10}^{60}$  مقدار باران یک‌ساعته با دوره بازگشت ده سال برحسب میلی‌متر و  $P_T^t$  مقدار باران  $t$  دقیقه‌ای موردنظر برحسب میلی‌متر با دوره بازگشت  $T$  (سال) می‌باشد. مقدار  $P_{10}^{60}$  به‌صورت زیر برای نقاط مختلف ایران محاسبه شده است (علیزاده، ۱۳۸۹).

$$P_{10}^{60} = 2.26(P_{24hr})^{1.1374}(P_{year})^{-0.3072} \quad (7)$$

که در آن  $(P_{24hr})$  متوسط حداکثر بارش‌های ۲۴ ساعته و  $(P_{year})$  متوسط بارندگی سالانه منطقه برحسب میلی‌متر می‌باشد. با استفاده از روابط فوق، بارش با شدت و دوره بازگشت‌های مختلف و همچنین دبی با دوره بازگشت‌های مختلف به دست آمد.

### تجزیه و تحلیل آماری

رابطه بین گسترش طولی و حجمی خندق با خصوصیات زمین محیطی در شرح فوق بر اساس روش‌های تجزیه و تحلیل همبستگی ساده و چندگانه و مدل‌های رگرسیونی مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی همبستگی بین متغیرهای وابسته و مستقل با استفاده از نرم‌افزار SPSS، از ضریب همبستگی پیرسون (چون داده‌ها پیوسته بوده) استفاده شد. لازم به ذکر است که برای این منظور نرمال بودن داده‌ها با استفاده از تست کلموگروف-اسمیرنوف مورد بررسی قرار گرفت که نشان داد داده‌ها نرمال بوده (حدود اعتماد آن‌ها بیشتر از ۰/۰۵) و سپس ماتریکس همبستگی آن‌ها به دست آمد. از این طریق می‌توان پارامترهای مؤثر در گسترش خندق را شناخته و رابطه بین آن‌ها را به دست آورد. برای این منظور از روش‌های رگرسیون چندگانه (گام به گام) جهت به دست آوردن روابط بین متغیرهای مستقل و وابسته استفاده شد.

اعتبارسنجی مدل

برای اعتبارسنجی مدل ساخته و ارائه شده، از اطلاعات خندق‌هایی که قبلاً در ساخت و توسعه مدل از داده‌ها و آمار و اطلاعات آن استفاده نشده، و دارای شرایط محیطی مشابه منطقه بودند استفاده شد. برای این منظور تعداد ۸ خندق در منطقه شناسایی شد و مدل ابداعی در آبخیز خندق‌های انتخاب شده اجرا شده و خروجی آن با داده‌های واقعی (اندازه‌گیری شده در همان خندق) با استفاده از روش‌های مختلف زیر برای تعیین میزان عدم قطعیت محاسبه گردید. برای انجام اعتبارسنجی از شاخص‌های عمومی اعتبارسنجی زیر استفاده گردید.

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \left| \frac{S_{ob} - S_{es}}{S_{ob}} \right| \right) i * 100 \quad (8)$$

میانگین خطای نسبی (MRE)

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_{ob} - S_{es})_i^2 \quad (9)$$

میانگین توان دوم خطا (MSE)

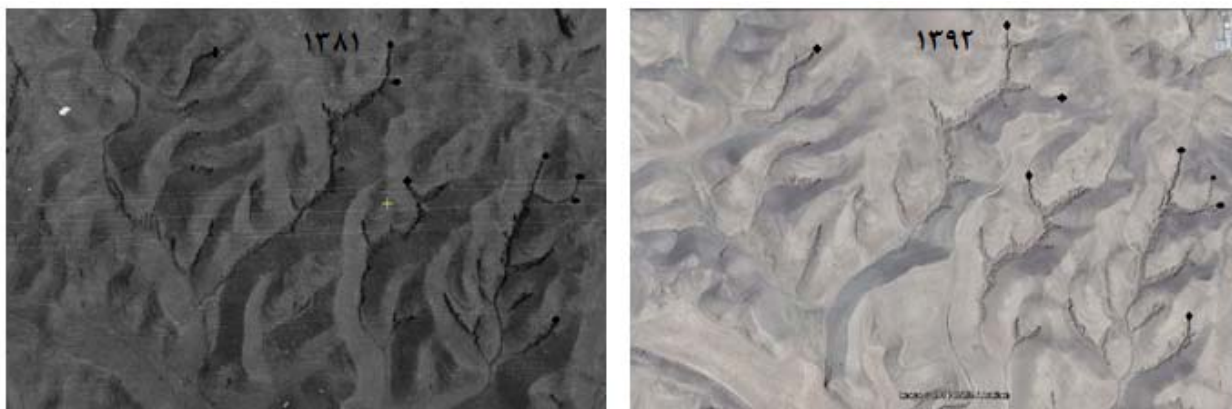
$$RMSE = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_{ob} - S_{es})_i^2 \right)^{1/2} \quad (10)$$

جزر میانگین توان دوم خطا (RMSE)

که در آن‌ها:  $S_{ob}$ : مقدار مشاهده شده و  $S_{es}$ : مقدار محاسبه شده با استفاده از مدل می‌باشد.

### نتایج

بعد از اینکه عکس‌های هوایی مربوط به دوره ۱۳۸۱ و ۱۳۹۲ ارتقو شد، عکس‌ها به‌صورت موزاییک درآورده شدند. سپس با مشخص کردن موقعیت پیشانی خندق‌ها (۳۶ خندق) در عکس‌های هر دو دوره و مقایسه آن‌ها با هم، میزان پیشرفت و گسترش طولی خندق قابل تشخیص می‌باشد (شکل ۲)، که این میزان به راحتی در محیط نرم‌افزار PCI\_Geomatica قابل اندازه‌گیری بوده و برای هر خندق میزان گسترش طولی آن استخراج شد (جدول ۱).



شکل ۲: میزان پیشرفت پیشانی چند خندق که موقعیت آن‌ها بر روی عکس‌های هوایی ۱۳۹۲ و ۱۳۸۱ مشخص شده است.

میزان گسترش حجمی خندق (مقدار حجم خاک فرسایش یافته در طول این دوره ۱۳۹۲-۱۳۸۱)، با اندازه‌گیری سطح مقطع خندق، یکی در محل پیشانی آن و دیگری به فاصله‌ای از پیشانی که خندق در طول این دوره پیشرفت داشته است در محیط AutoCad Land اندازه‌گیری شد. سپس با ضرب متوسط این دو سطح مقطع در فاصله بین آن‌ها (میزان گسترش خندق در طول دوره ۱۳۹۲-۱۳۸۱) مقدار حجم خاک فرسایش یافته محاسبه شد (جدول ۱).

جدول ۱: متوسط گسترش طولی و حجمی خندق‌ها در طول دوره ۱۳۹۲-۱۳۸۱

شماره خندق	متوسط رشد طولی (m/y)	متوسط حجم خاک فرسایش یافته (m <sup>3</sup> /y)	شماره خندق	متوسط رشد طولی (m/y)	متوسط حجم خاک فرسایش یافته (m <sup>3</sup> /y)
1	1.18	2.51	19	1.07	2.76
2	1.00	1.04	20	0.40	0.36
3	1.50	5.44	21	0.45	0.80
4	0.90	4.21	22	1.12	0.18
5	0.85	2.81	23	1.20	0.08
6	0.35	0.78	24	1.02	0.19
7	0.83	3.15	25	0.32	0.39
8	1.21	3.38	26	0.67	0.52
9	0.34	1.29	27	0.35	0.62
10	0.72	4.54	28	0.92	2.16
11	1.03	1.85	29	0.47	1.21
12	0.50	1.60	30	0.39	1.18
13	0.87	1.10	31	0.53	1.78
14	0.96	1.60	32	1.04	2.89
15	1.11	4.11	33	0.98	1.48
16	1.02	0.90	34	1.04	1.86
17	0.93	3.72	35	0.99	0.65
18	1.22	3.51	36	1.24	1.21

### تجزیه و تحلیل آماری

رابطه گسترش طولی و حجمی خندق‌ها با خصوصیات زمین محیطی (توپوگرافی، خاک و هیدرولوژیکی) و خصوصیات ژئومتری خندق‌ها (عمق، طول، عرض بالا و پایین، سطح مقطع، ارتفاع پیشانی و شیب جانبی) بر اساس روش‌های

تجزیه و تحلیل همبستگی ساده و چندگانه و مدل‌های رگرسیونی مورد بررسی قرار گرفت. در جدول همبستگی (\*\*\*) نشان دهنده ضریب همبستگی در سطح ۹۹ درصد و (\*) نشان دهنده ضریب همبستگی در سطح ۹۵ درصد معنی داری است (جدول ۲). البته با توجه به اینکه تعداد متغیرهای مستقل مورد بررسی زیاد بوده و امکان آوردن آن‌ها در ماتریس همبستگی در این مقاله وجود نداشت لذا فقط متغیرهای مستقلی که با متغیرهای وابسته (گسترش طولی و حجمی خندق) همبستگی بالاتر از سطح اعتماد ۰/۰۵ داشتند در این جدول آورده شده‌اند.

جدول ۲: نتایج تجزیه و تحلیل همبستگی متغیرهای وابسته و مستقل در خندق‌های مورد مطالعه (۳۶ خندق)

SAR	CaMg	PH	EC	Lim	Silt	Sand	BE	Cu	Ap	CS	H	Wd	Wu	L	S.V	G.A
.323*	.314*	.150	.290*	-.305*	.067	-.302*	.129	-.298*	.305*	-.003	.017	-.085	.031	.621**	.372*	G.A
-.057	-.148	.356*	.266	-.236	.339*	-.062	.512**	-.301*	-.063	.709**	.638**	.471**	.627**	.286*	1	S.V
-.215	-.073	.280*	.321*	-.147	-.041	-.068	.130	.039	.336*	.060	-.057	.064	.121	1		L
-.224	-.069	.241	.020	.013	-.214	-.136	.330*	-.106	-.355*	.818**	.691**	.525**	1			Wu
-.173	-.048	.378*	-.050	.110	-.370*	-.003	.122	.128	.052	.690**	.453**	1				Wd
-.055	-.067	.366*	.222	-.144	-.336*	.121	.493**	-.292*	-.209	.851**	1					H
-.180	-.113	.376*	.091	.040	-.268	.035	.383*	-.253	-.188	1						CS
-.052	.067	.067	-.111	-.012	-.087	-.030	-.215	.115	1							Ap
-.137	.200	.186	.082	.099	.014	-.002	-.091	1								Cu
-.119	-.204	.650**	.618**	-.026	-.337*	.380*	1									BE
.107	-.059	.097	.193	.243	-.004	1										Sand
.038	.315*	-.441**	-.135	.120	1											Silt
-.321*	-.127	.094	-.095	1												Lim
.181	-.144	.272	1													EC
-.204	-.270	1														PH
-.236	1															CaMg
1																SAR

S.V: گسترش حجمی (میزان حجم خاک فرسایش یافته)، G.A: میزان گسترش طولی خندق، Wu: عرض بالایی خندق، Wd: عرض پایینی، H: عمق خندق، CS: سطح مقطع، Ap: مساحت بالادست پیشانی، Cu: انحنای دامنه، BE: ضریب کشیدگی حوزه آبخیز خندق، Sand: درصد شن، Silt: درصد سیلت، Lim: میزان آهک، EC: هدایت الکتریکی، PH: اسیدیته خاک، Ca+Mg: مجموع کلسیم و منیزیم و SAR: نسبت سدیم تبادلی می‌باشد.

بعد از اینکه همبستگی بین متغیرهای مستقل و وابسته مورد بررسی قرار گرفت، می‌توان پارامترهای مؤثر در گسترش طولی و حجمی خندق را شناخته و رابطه بین آن‌ها را به دست آورد. برای این منظور از روش‌های رگرسیون چند متغیره (روش گام به گام) جهت به دست آوردن روابط بین متغیرهای مستقل و وابسته (گسترش طولی جدول ۳ و گسترش حجمی جدول ۴) استفاده شد.

جدول ۳: نتایج تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره گسترش طولی خندق با متغیرهای مستقل زمین محیطی

Sig.	R <sup>2</sup>	t	Unstandardized Coefficients		Model
			Std. Error	B	
.620		-.501	.154	-.077	(Constant)
.000		7.818	.003	.020	L
.000	0.736	4.574	.117	.536	SAR
.010		-2.756	.005	-.013	Sand
.023		2.398	.132	.316	EC
.041		-2.133	.337	-.718	Curvature

جدول ۴: نتایج تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره گسترش حجمی خندق با متغیرهای مستقل زمین محیطی

Sig.	R <sup>2</sup>	t	Unstandardized Coefficients		Model
			Std. Error	B	
.018		2.484	1.617	4.016	(Constant)
.000		5.311	.103	.547	CS
.024	0.634	-2.368	.050	-.117	Lim
.026		2.329	.378	.880	BE



بنابراین با توجه به نتایج حاصل از جداول همبستگی و تجزیه و تحلیل رگرسیونی، عوامل مؤثر در رشد طولی خندق‌ها مشخص شدند. بر این اساس بین رشد طولی خندق‌های مورد مطالعه به عنوان متغیر وابسته و ویژگی‌های توپوگرافی و فیزیکی - شیمیایی خاک منطقه تحقیق و پارامترهای مرفولوژی خندق به عنوان متغیرهای مستقل، همچنین حجم خاک فرسایش یافته به عنوان متغیر وابسته و ویژگی‌های توپوگرافی، مرفولوژی خندق و فیزیکی - شیمیایی خاک به عنوان متغیرهای مستقل، به روش گام به گام می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مدل‌های رگرسیونی ایجاد شده از نوع خطی بوده است. غفاری و چرخابی (۱۳۷۸) بیان کرده‌اند که رگرسیون‌های خطی جهت برآورد رشد خندق‌ها مناسب‌ترین همبستگی را نشان می‌دهند. به طور کلی مدل مربوط به گسترش طولی و گسترش حجمی خندق به ترتیب به صورت روابط ۱۱ و ۱۲ ارائه می‌شوند.

$$G.A = -0.077 + 0.02(L) + 0.536(SAR) - 0.013(Sand) + 0.316(EC) - 0.718(Cu) \quad (11)$$

$$S.V = 4.016 + 0.547(CS) - 0.117(lim) + 0.88(BE) \quad (12)$$

که در آن: S.V: گسترش حجمی (میزان حجم خاک فرسایش یافته (m<sup>3</sup>))، G.A: میزان گسترش طولی خندق (m)، L: طول خندق (m)، SAR: نسبت جذب سدیم، EC: هدایت الکتریکی خاک، Sand: درصد شن، Cu: انحنای دامنه، CS: سطح مقطع، BE: ضریب کشیدگی حوضه آبخیز خندق و Lim: درصد آهک خاک می‌باشد.

#### اعتبارسنجی مدل

با توجه به آماره‌های ذکر شده، نتایج اعتبارسنجی مدل‌های گسترش طولی و حجمی خندق با استفاده از شاخص‌های آماری مختلف در جدول شماره ۵ و ۶ آورده شده است.

جدول ۵: نتایج اعتبارسنجی مدل گسترش طولی در خندق‌های مورد آزمون

شماره خندق	مقدار اندازه‌گیری شده	مقدار محاسبه شده	RE	MRE	SE	MSE	RMSE
1	1.000	0.871	12.926		0.017		
2	0.830	0.857	3.251		0.001		
3	0.788	0.867	10.053		0.006		
4	1.110	1.122	1.059	8.640	0.000	0.008	0.089
5	1.020	0.932	8.634		0.008		
6	0.910	0.809	11.096		0.010		
7	0.916	0.831	9.245		0.007		
8	1.040	0.906	12.871		0.018		

جدول ۶: نتایج اعتبارسنجی مدل گسترش حجمی در خندق‌های مورد آزمون

شماره خندق	مقدار اندازه‌گیری شده	مقدار محاسبه شده	RE	MRE	SE	MSE	RMSE
1	1.135	0.98	13.918		0.025	0.024	0.155
2	2.910	2.96	1.875		0.003		
3	4.800	4.93	2.608		0.016		
4	3.100	2.87	7.506		0.054		
5	3.200	3.20	0.107		0.000		
6	0.330	0.24	26.087		0.007		
7	1.800	1.55	14.003		0.064		
8	1.500	1.35	9.828		0.022		

### بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به اندازه‌گیری‌های رشد طولی خندق در عرصه و مقایسه آن با مقدار اندازه‌گیری شده از طریق عکس‌های هوایی، میانگین رشد طولی خندق‌ها در سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۸۱،  $0/85$  متر در سال اندازه‌گیری شد. که این نتایج تا حدودی نزدیک به نتایج توکلی (۱۳۸۸) که متوسط رشد طولی خندق‌ها در طول دو دوره (۲۴ ساله،  $1/36$  متر در سال و ۱۶ ساله  $1/23$  متر در سال) برآورد کرده، مطابقت دارد. اما دیگر محققان متوسط رشد طولی خندق در مناطق دیگر را کمتر از این مقدار برآورد کرده‌اند که این اختلاف می‌تواند به دلیل حساسیت بالای منطقه مورد مطالعه به فرسایش، مخصوصاً فرسایش خندقی باشد. محمدی (۱۳۸۵) در دوره ۵۰ ساله،  $0/206$  متر در سال، رونالدز و هارلری (۱۹۹۹)،  $0/1-0/73$  متر در سال، ملیک (۲۰۰۷)،  $0/63$  در خندق‌های کوچک و نرخ متوسط رشد فرسایش خندقی در شیب‌ها را  $0/21-0/52$  و در کف دره‌ها  $0/18-1/98$  متر در سال، مارتینز (۲۰۰۳)، در یک دوره ۳۴ ساله  $0/2$  متر در سال و ماکزیمم نرخ پیشروی هدکت خندق‌ها را  $0/7$  تا  $0/8$  متر در سال برآورد کرده‌اند.

میزان متوسط حجم خاک فرسایش یافته در طول دوره مطالعاتی نیز با توجه به اندازه‌گیری‌های رشد طولی و همچنین ابعاد هندسی خندق (در دو سطح مقطع خندق یکی در محل پیشانی یا هدکت خندق و دیگری به فاصله میزان گسترش طولی پایین‌تر از پیشانی خندق در طول دوره مطالعاتی ۱۳۹۲ - ۱۳۸۱) در عرصه و مقایسه آن با مقدار اندازه‌گیری شده از طریق عکس‌های هوایی، متوسط حجم خاک فرسایش یافته  $18/84$  مترمکعب (در طول دوره) و  $1/88$  مترمکعب در سال محاسبه شد. عوض‌زاده توکلی (۱۳۸۸) متوسط حجم خاک فرسایش یافته را در طول دوره ۴۰ ساله،  $4/12$  مترمکعب در سال، و ندرکخوف و همکاران (۲۰۰۳)، میانگین حجم خاک از دست‌رفته توسط خندق‌ها را  $17/4$  مترمکعب در سال برآورد کردند. سلیمان‌پور و همکاران (۱۳۸۶)، میزان رسوب تولیدی توسط خندق‌ها در استان فارس را  $5/01$  مترمکعب در سال تعیین کردند.

بررسی و ارزیابی نقش فاکتورهای مختلف توپوگرافی و مورفولوژی خندق‌ها نشان‌دهنده وجود ارتباط بین تأثیر مساحت حوضه آبخیز بالادست خندق ( $A_p$ )، طول خندق ( $L$ ) و انحناى دامنه ( $Cu$ ) با رشد طولی خندق‌ها می‌باشد. به طوری که رابطه فاکتورهای مساحت حوضه آبخیز بالادست خندق و طول خندق با رشد طولی خندق رابطه مثبت دارد (با افزایش هر کدام از فاکتورها رشد طولی خندق افزایش می‌یابد). در صورتی که رابطه فاکتور انحناى دامنه با رشد طولی خندق‌ها منفی می‌باشد، یعنی با افزایش انحناى دامنه در خلاف جهت جریان، رشد طولی خندق کاهش می‌یابد. بررسی فاکتورهای فیزیکی - شیمیایی خاک خندق‌ها نشان‌دهنده وجود ارتباط معنی‌دار میان درصد شن ( $Sand$ )، درصد آهک ( $Lim$ )، هدایت الکتریکی ( $EC$ )، مجموع کلسیم و منیزم ( $Ca+Mg$ )، نسبت سدیم تبادلی ( $SAR$ ) با رشد طولی خندق می‌باشد. به طوری که رابطه هدایت الکتریکی ( $EC$ )، مجموع کلسیم و منیزم ( $Ca+Mg$ ) و نسبت سدیم تبادلی ( $SAR$ ) به صورت مثبت بوده (با افزایش هر کدام از فاکتورها رشد طولی خندق افزایش می‌یابد) ولی رابطه فاکتورهای درصد شن ( $Sand$ )،  $EC$  و درصد آهک ( $Lim$ )، با رشد طولی خندق به صورت منفی می‌باشد. چون ذرات شن مقاومت بیشتری در مقابل فرسایش داشته و میزان آهک بالا نیز باعث فولوکوله شدن خاک می‌شود، لذا با افزایش مقدار این پارامترها گسترش طولی خندق کاهش می‌یابد. معنی‌دار شدن تأثیر کلسیم و منیزم در نمونه‌های خاک نشان‌دهنده بالا بودن املاح زیاد و وجود لایه‌هایی با آهک و گچ بالا در خاک منطقه است. زیاد بودن املاح خاک باعث بالا رفتن شوری خاک ( $EC$ ) و تأثیر آن بر رشد طولی خندق می‌شود.

بررسی میانگین گسترش طولی خندق در طول دوره مطالعاتی نشان می‌دهد که خندق ۳ بیشترین میانگین گسترش طولی به میزان  $1/5$  متر در سال را به خود اختصاص داده است. بررسی خصوصیات مورفولوژی و توپوگرافی حوضه آبخیز این خندق نشان داد که بیشترین مساحت حوضه آبخیز ( $20120$  مترمربع) می‌باشد. همچنین میزان مجموع کلسیم و منیزم ( $Ca+Mg$ ) و نسبت سدیم تبادلی ( $SAR$ ) و  $EC$  بالا مربوط به همین خندق می‌باشد که این می‌تواند بیانگر تأثیر

این فاکتورها بر رشد طولی خندق باشد. که این با نتایج محققان دیگر (کریمی ۱۳۸۵، سلیمان پور و همکاران ۱۳۸۶، توکلی ۱۳۸۸، وندکخوف و همکاران ۲۰۰۳) مطابقت دارد.

ارزیابی پارامترهای مختلف توپوگرافی و مرفولوژی خندق نشان‌دهنده وجود ارتباط میان طول خندق ( $L$ )، عرض بالا و پایین خندق ( $W_d$  و  $W_u$ )، ارتفاع پیشانی یا هدکت خندق ( $H$ )، سطح مقطع ( $CS$ )، ضریب کشیدگی حوضه ( $BE$ )، درصد سیلت ( $Silt$ ) و اسیدیته خاک ( $PH$ ) با حجم خاک فرسایش یافته می‌باشد. به طوری که رابطه تمامی پارامترهای ذکر شده با حجم خاک فرسایش یافته به جز انحناى دامنه، به صورت مثبت می‌باشد یعنی با افزایش هر کدام از فاکتورها حجم خاک فرسایش یافته افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد که خندق ۸ بیشترین میانگین حجم خاک فرسایش یافته در طول دوره مطالعاتی را به خود اختصاص می‌دهد. بررسی خصوصیات مرفولوژی این خندق نشان می‌دهد که عرض متوسط و سطح مقطع متوسط این خندق بالا بوده و همچنین دارای بیشترین طول (۶۰ متر) بوده که نشان‌دهنده تأثیر این پارامترها بر حجم خاک فرسایش یافته است. کاپرا و همکاران (۲۰۰۵)، بیان کردند که آنالیزهای رگرسیونی بین حجم مواد فرسایش یافته و پارامترهای مرفولوژیکی، توپوگرافی و هیدرولوژیکی تأیید کننده ارتباط زیاد طول خندق‌های موقتی با حجم مواد فرسایش یافته است. جعفری گرزین و همکاران (۱۳۸۶)، به این نتیجه رسیدند که رشد حجمی خندق‌ها تقریباً در همه موارد با افزایش طول خندق و ارتفاع هدکت افزایش می‌یابد. وندوالقم و همکاران (۲۰۰۵)، در مطالعه‌ای که بر روی خندق‌های کمربند لسی اروپا انجام داده‌اند عنوان کردند که حجم خاک از دست‌رفته در خندق‌های عمیق ۲ برابر خندق‌های کم‌عمق می‌باشد. سلیمان پور و همکاران (۱۳۸۶)، بیان کردند که حجم خاک از دست‌رفته در خندق‌های عمیق استان فارس  $3/3$  برابر خندق‌های کم‌عمق است.

با توجه به نتایج حاصل از جداول همبستگی و تجزیه و تحلیل رگرسیونی عوامل مؤثر در رشد طولی خندق‌ها مشخص شدند. بر این اساس و با توجه به آنالیزهای رگرسیونی انجام‌شده بین رشد طولی و حجم خاک فرسایش یافته خندق‌های مورد مطالعه (به‌عنوان متغیرهای وابسته) و ویژگی‌های توپوگرافی و فیزیکی - شیمیایی خاک منطقه مورد تحقیق و پارامترهای مرفولوژی خندق به‌عنوان متغیرهای مستقل، به روش گام‌به‌گام مدل مربوط به گسترش طولی و گسترش حجمی خندق ارائه گردید (روابط ۱۱ و ۱۲). با توجه به این روابط گسترش طولی خندق تابعی از طول خندق، نسبت جذب سدیم، درصد شن و میزان انحناى دامنه بوده و گسترش حجمی خندق (میزان خاک فرسایش یافته در سال به‌وسیله خندق) تابعی از سطح مقطع خندق، درصد آهک و ضریب کشیدگی حوضه آبخیز بالادست خندق خواهد بود. ضریب تبیین ( $R^2$ ) این مدل‌ها به ترتیب  $0/736$  و  $0/634$  ارزیابی شد. اعتبارسنجی مدل‌ها نیز با استفاده از میانگین خطای نسبی ( $MRE$ )، میانگین توان دوم خطا ( $MSE$ ) و جذر میانگین توان دوم خطا ( $RMSE$ ) مورد بررسی قرار گرفت که مقدار آن‌ها به ترتیب برای مدل گسترش طولی خندق  $0/08$ ،  $0/08$  و  $0/189$  و برای مدل گسترش حجمی خندق  $0/49$ ،  $0/24$  و  $0/115$  به دست آمد که نشان می‌دهند مدل‌ها از اعتبار خوبی برخوردار هستند و از آن‌ها می‌توان برای پیش‌بینی میزان پیشرفت طولی و حجمی خندق برای مناطقی با شرایط مشابه منطقه مورد مطالعه بهره گرفت.

## منابع

- احمدی، حسن. ۱۳۷۸. ژئومورفولوژی کاربردی (فرسایش آبی). جلد اول. انتشارات دانشگاه تهران.
- بیاتی خطیبی، مریم. ۱۳۸۳. تحلیل و بررسی نقش عوامل توپوگرافی و مرفولوژی در خندق زایی (مطالعه موردی: دامنه‌های شمالی قوشه داغ). مجله پژوهش‌های جغرافیایی. شماره ۴۹. ص ۷۵
- بیاتی خطیبی، مریم. ۱۳۸۵. ویژگی‌های خندق‌ها و عوامل کنترل‌کننده فرآیندهای خندق زایی (مطالعه موردی: محدوده بین اهر و مشکین‌شهر). مجله جغرافیا و توسعه. شماره ۷. ص ۱۱۵

- جعفری گرزین، بهنوش؛ صفایی، مهرداد و احمدیان، حسن. ۱۳۸۶. معرفی مدل‌هایی برای پیش‌بینی رشد حجم خندق (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سرخ‌آباد مازندران). مجله پژوهش و سازندگی. شماره ۷۵.
- سلیمان‌پور، سعید؛ صوفی، مجید و احمدی، حسن. ۱۳۸۶. بررسی عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی، تولید رسوب و هدر رفت خاک در منطقه گوراسپید استان فارس. کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست.
- شهرپور، عبدال. ۱۳۷۶. بررسی عوامل مؤثر بر ایجاد فرسایش خندقی و ارائه مدل در منطقه سوق از شهرستان دهدشت. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران.
- صوفی، مجید. ۱۳۸۳. بررسی ویژگی‌های مرفوکلیماتیک آبکندهای استان فارس. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری تهران.
- علیزاده، امین. ۱۳۸۹. اصول هیدرولوژی کاربردی. چاپ سی‌ام. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع). ۹۱۱ صفحه
- عوض‌زاده توکلی، فاطمه. ۱۳۸۸. برآورد میزان گسترش طولی خندق با استفاده از مدل (مطالعه موردی: استان بوشهر). پایان‌نامه ارشد. دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران. ۱۱۱ صفحه
- غفاری، علیرضا و چرخابی، امیرحسین. ۱۳۷۸. پیش‌بینی میزان رشد سالانه فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های رگرسیونی. اولین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست ایران. دانشگاه تربیت‌معلم تهران.
- قدوسی، جمال. ۱۳۸۲. مدل‌سازی مرفولوژی فرسایش خندقی و پهنه‌بندی خطر آن (مطالعه موردی حوضه آبخیز زنجان رود)، رساله دکتری. دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران. ۳۱۸ صفحه.
- کریمی، محمد. ولی سامانی، جمال و قدوسی، جمال. ۱۳۸۶. بررسی عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی و پیش-بینی رشد طولی آن. مجموعه مقالات دهمین کنگره علوم خاک ایران، کرج.
- محمدی، علی‌اصغر. ۱۳۸۵. واسنجی چهار مدل پیش‌بینی رشد طولی فرسایش خندقی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران.
- مهدوی، محمد. ۱۳۸۴. هیدرولوژی کاربردی، جلد دوم. انتشارات دانشگاه تهران
- مهرجردی، زارع؛ صوفی، مجید و چوپانی، سعید. ۱۳۸۶. بررسی عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی در منطقه گزیر استان هرمزگان. مجموعه مقالات دهمین کنگره علوم خاک ایران، کرج.
- نظری سامانی. علی‌اکبر. ۱۳۸۷. بررسی سازوکارهای مؤثر در فرسایش خندقی به‌منظور تعیین آستانه‌های توپوگرافی، رواناب و سهم رسوب حاصل از آن (مطالعه موردی: استان بوشهر). رساله دکتری. دانشکده منابع طبیعی. دانشگاه تهران. ۱۸۱ صفحه.
- Capra, A., Mazzara, L.M., Scicolone, B., 2005. Application of the EGEM model to predict ephemeral gully erosion in Sicily Italy. *Catena* 59 (2005) 133–146.
- Harley, D., Ronald, B., Rose, C., 1999. Digital elevation models as a tool for monitoring and measuring gully erosion. *ITC, Vol. 1, Issue 2-91, pp. 101.*
- Malik, Ireneusz., 2007. Dating of Small gully formation and establishing erosion rates in old gullies under forest by means of anatomical changes in exposed tree roots (Southern Poland). pp.41-82.
- Martinez-Casasnovas, J.A., 2004. Assessment of sidewall erosion in large gullies using multitemporal DEMs and logistic regression analysis. *Geomorphology* 58.305–321.
- Martinez-Casasnovas, J.A., 2003. A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion. *Catena* 50 (2003) 293-308.
- Vandekhechove, L., Poesen, J., Oostwoud wijdenes, D., Nachtegaele, J., Kosmas, C., Roxd, M.J., Figueiredo, T.De., 2000. Thresholds for Gully initiation and sedimentation in Mediterranean Europe, *Earth surface processes and land forms*. 25: 1201-1220.

- Vandekerckhove, L., Poesen, J., Govers, G., 2003. *Medium Term gully headcut rates in southeast Spain determined from aerial photographs and ground measurements. Catena, 50, 329-352.*
- Vandwalleghem, T.J., Poesen, J., Nachtergaele, Vesthraeten G., 2005. *characteristics controlling factors and importance of deep gullies under cropland on loess-derived soils. Geomorphology, Vol 69:76-91.*