

تعیین عوامل مؤثر بر رشد طولی فرسایش خندقی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز دره کره)

- ❖ علی اکبر نظری سامانی؛ استادیار دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران
- ❖ فاطمه توکلی؛ کارشناس ارشد مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان بوشهر
- ❖ حسن احمدی؛ استاد دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران
- ❖ غلامرضا راهی؛ دانشجوی دکتری آبخیزداری دانشگاه مازندران

چکیده

فرسایش خندقی یکی از مخرب‌ترین اشکال فرسایش آبی است که با رشد و گسترش آن حجم درخور توجهی از خاک از دسترس خارج می‌شود. این فرسایش یک جریان پیچیده ژئومورفولوژی و نشانه فرسایش پیشرفته و تخریب سرزمین است. در این تحقیق با استفاده از عکس‌های هوایی سال‌های ۱۳۴۶ و ۱۳۷۲ و با عملیات میدانی و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) گسترش طولی ۲۵ خندق در منطقه دره کره طی دو دوره زمانی ۱۳۷۲-۱۳۸۷ و ۱۳۴۶-۱۳۷۲ اندازه‌گیری شد. همچنین، برای تعیین عوامل مؤثر بر گسترش طولی خندق‌ها از آنالیزهای رگرسیونی بین گسترش طولی خندق و فاکتورهای توپوگرافی، فیزیکی-شیمیایی خاک، و مورفولوژی خندق استفاده شد. نتایج نشان داد که متوسط گسترش طولی خندق‌ها در دوره‌های ۱۳۴۶-۱۳۷۲، ۱۳۷۲-۱۳۸۷، و میانگین دو دوره به ترتیب ۱،۳۶، ۱،۲۳، و ۱،۳ متر در سال اندازه‌گیری شده است. همچنین، بر اساس تجزیه رگرسیونی، پارامترهایی از قبیل مساحت حوزه آبخیز بالادست خندق، فاصله بالاکند تا مرز حوزه آبخیز، ارتفاع بالاکند، و SAR مهم‌ترین شاخص‌های مؤثر بر رشد طولی خندق‌اند. بر پایه یافته‌ها، فاصله رأس خندق تا مرز حوضه آن به همراه ارتفاع بالاکند به همراه مشاهده حوضچه مستغرق در پای آن می‌تواند معیارهای مناسب و میدانی برای ارزیابی سریع مقدار فعالیت یک خندق جهت اولویت‌بندی کنترل آن در نظر گرفته شود.

واژگان کلیدی: تجزیه رگرسیونی، خندق، رشد طولی، عکس هوایی، فاصله تا رأس، فرسایش.

مقدمه

فرسایش خندقی توسط عکس‌های هوایی بین سال‌های ۱۹۵۷ تا ۱۹۹۳، متوسط مقدار پیشروی خندق‌ها ۰٫۲ متر در سال اندازه‌گیری شد و مقدار بیشینه آن ۰٫۷ تا ۰٫۸ متر در سال به‌دست آمد [۶]. پژوهش‌های انجام‌شده در کشور ایران نیز دامنه وسیعی از عوامل مؤثر بر رشد خندق‌ها را نشان داده است، به عنوان نمونه، یافته‌های پژوهش انجام‌شده در اقلیم خشک استان سمنان نشان داد که سطح حوزه آبخیز بالادست سر خندق و درصد رس از عوامل اصلی گسترش خندق‌هاست [۹]. همچنین، متوسط رشد طولی خندق‌ها در منطقه تحقیق طی سال‌های ۱۳۳۵-۱۳۴۶، ۱۳۴۶-۱۳۷۹، و ۱۳۷۹-۱۳۸۴ معادل ۰٫۲۰۶ متر در سال اندازه‌گیری شده است. در منطقه نیمه‌خشک زنجان نیز رابطه بین رشد طولی خندق‌ها و مقدار کربن آلی، سیلت، مساحت حوزه آبخیز بالادست، نسبت جذب سدیم (SAR) و بارندگی ۲۴ ساعته با رشد طولی خندق معنی‌دار گزارش شده است [۸]. تحقیقات حاصل از بررسی و پیگیری‌های هندسی نیز نشان داد که در جنوب اسپانیا حجم فرسایش خندقی رابطه توانی با مساحت آبخیز بالادست خندق‌ها دارد [۱۷]. از طرف دیگر، هر چه طول دامنه بالای خندق بیشتر باشد، توسعه فرسایش خندقی نیز بیشتر خواهد بود [۱۶]. علاوه بر این، در تحقیقات مختلف دیگری [۹، ۱۸، ۱۴، ۱] با تجزیه و تحلیل‌های آماری عواملی از قبیل درصد نمک‌های محلول، مساحت حوزه آبخیز خندق، طول دامنه، و اختلاف ارتفاع مهم‌ترین متغیر دارای همبستگی معنی‌دار در برآورد رشد طولی و یا حجم خندق ذکر شده است. برای نمونه، بررسی ۳۶ خندق به همراه تجزیه و تحلیل آماری ۱۶ متغیر جمع‌آوری‌شده برای هر خندق و زیرحوضه‌های مربوط به آن‌ها طی دوره ۳۰ ساله با استفاده از عکس‌های هوایی نشان داد که رگرسیون‌های خطی برای برآورد رشد خندق‌ها و

فرسایش خندقی یکی از اشکال تشدیدشونده فرسایش آبی است که توسط دامنه وسیعی از فرایندها کنترل می‌شود. برخی از محققان تعاریف متعددی برای آن ارائه کرده‌اند. به طور کلی، خندق کانالی است با کناره‌های دارای شیب تند و یک پیشانی فرسایشی (بالاکند)^۱ پُرشیب و فعال که به وسیله فرسایش ناشی از جریان سطحی شدید (معمولاً طی یا پس از وقوع باران‌های شدید) یا فرایندهای زیرسطحی ایجاد می‌شود [۱۲]. برخی محققان در تعریف خندق موقعیت مکانی آن را مد نظر می‌گیرند و بر آن‌اند که این نوع فرسایش در شیب‌های حداکثر تا ۱۵ درصد و در دشت‌ها و دشت‌سرها و کمتر روی دامنه‌ها ایجاد می‌شود [۱]. در هر منطقه تعیین عوامل مؤثر بر گسترش خندق‌ها، برای برنامه‌ریزی شیوه کنترل و مقابله با آن، از اهمیت زیادی برخوردار است. برای تعیین عوامل مؤثر بر گسترش طولی خندق‌ها به مقدار رشد طولی آن نیاز است. بدین منظور، کاربرد ابزارها و روش‌های مختلفی رایج است، از قبیل عکس‌های هوایی، پایش میدانی، سن‌سنجی، و پرسشنامه محلی. بر پایه نتایج تحقیقات انجام‌شده، رشد طولی خندق‌ها تحت تأثیر مقیاس زمانی، ویژگی‌های توپوگرافی، اقلیم، و خاک‌شناسی قرار دارد [۱۲، ۱۷] و در محیط‌های مختلف اعداد متفاوتی ارائه شده است. بر اساس یافته‌های حاصل از کاربرد اطلاعات رقومی و اعمال آن‌ها بر روی سه سری عکس هوایی در دو منطقه نیوزیلند، متوسط رشد طولی خندق‌های منطقه ۰٫۷۳ تا ۰٫۱ متر در سال برآورد شده است [۴]. همچنین، تحقیق مذکور نشان داد که عکس‌های هوایی دارای قابلیت مناسبی برای بررسی رشد طولی خندق‌ها هستند. بر اساس یافته‌های به‌دست‌آمده در خصوص اندازه‌گیری میزان

1. Head cut

مهم‌ترین هدف تحقیق جاری تعیین روند رشد طولی فرسایش خندقی در منطقه‌ای خشک برای تعیین مهم‌ترین عوامل محیطی بر آن است. با استفاده از این نتایج می‌توان شاخص‌های مناسبی برای پیش‌بینی وضعیت فعالیت خندق‌ها تعیین کرد و در کوتاه‌ترین زمان، به منظور کنترل و مقابله با رشد آن‌ها، پروژه‌های حفاظت خاک را اجرا کرد.

روش‌شناسی

این تحقیق در حوزه آبخیز دره کره در نزدیکی روستای سمل واقع در پانزده کیلومتری شهرستان برازجان واقع در استان بوشهر انجام پذیرفت. محدوده مطالعاتی بین طول جغرافیایی 7° تا 51° شرقی و عرض جغرافیایی 28° تا 11° تا 29° شمالی واقع شده است. مساحت این حوزه برابر 29750 هکتار است و، بر مبنای مطالعات آبخیزداری سال 1372 ، به سه حوزه کوچک‌تر تقسیم شده است. برای اجرای تحقیق مراحل زیر انجام پذیرفت:

۱. تهیه نقشه‌های توپوگرافی $1:25000$ رقومی از سازمان نقشه‌برداری، عکس‌های هوایی $1:40000$ سال 1372 و $1:20000$ سال 1346 ، و نقشه زمین‌شناسی $1:100000$ برگه برازجان برای تعیین محدوده مورد بررسی بر روی آن‌ها؛

۲. تفسیر چشمی عکس‌های هوایی و استفاده از پایگاه اطلاعات زمینی Google Earth برای تهیه نقشه اولیه پراکنش خندق‌ها و تعیین خندق‌هایی با ابعاد بزرگ (بیشتر از 10 متر) در حوضه؛

۳. از آنجایی که عکس‌های $1:40000$ متعلق به سال 1374 است، برای اطمینان بیشتر، کلیه مناطق شناسایی‌شده پیمایش‌های میدانی شد و نقشه به‌دست‌آمده مورد تدقیق قرار گرفت. سپس، خندق‌های مورد نظر انتخاب شد و ویژگی‌های مختلف شیب، کاربری اراضی، و برداشت نمونه‌های خاک از رأس و قسمت میانی آن‌ها اندازه‌گیری شد؛

روابط غیرخطی برای محاسبه بار رسوبی مناسب‌ترین همبستگی را نشان می‌دهد [۲]. در پایان رابطه زیر برای برآورد میزان متوسط سالانه رشد خندق‌ها پیشنهاد شده است:

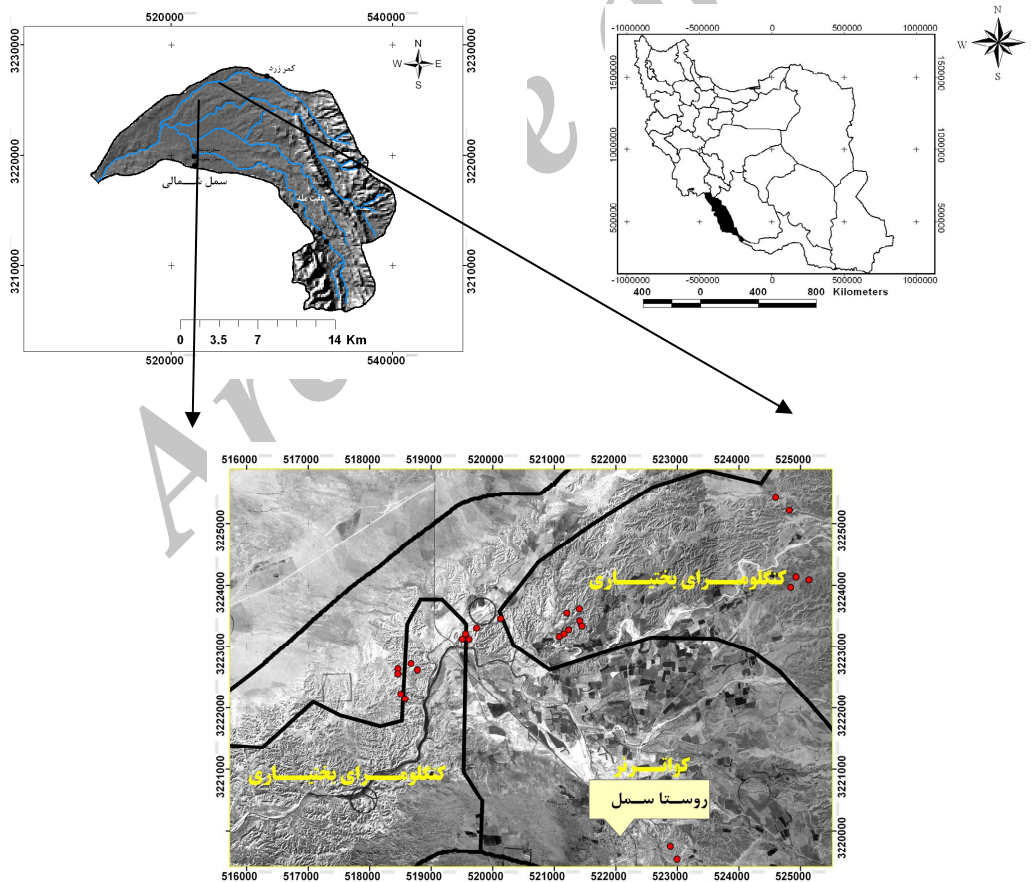
$$GR = -87.87 + 0.04 X_1 - 0.36 X_4 + 110.07 X_9 + 0.07 X_{11}$$

که در آن GR رشد متوسط سالانه خندق است، X_1 سطح حوضه به هکتار، X_4 درصد خاک‌های قهوه‌ای، X_9 نسبت سیلت به رس، و X_{11} عرض خندق به متر.

به طور کلی، از نظر تکامل یک خندق طول عمر آن را می‌توان به دو مرحله تقسیم نمود: در مرحله اول، که نزدیک به 5 درصد زمانی است، در حدود 90 ، 60 ، و 35 درصد از طول، مساحت، و حجم تشکیل می‌شود، در حالی که در مرحله دوم، که مابقی عمر را به خود اختصاص می‌دهد، خندق تقریباً پایدار است و به دنبال افزایش عرض خود است [۱۵]. در مرحله اول بیشتر فرایندهای هیدرولیک جریان و حرکات توده‌ای در دیواره خندق تأثیرگذارند و در مرحله دوم فرایندهای انتقال رسوب و رسوب‌گذاری فعال هستند. بنابراین، با توجه به موارد مذکور، به منظور پیشگیری و کنترل خندق، نخست لازم است، با بررسی رفتار گسترش آن، به درجه فعالیت آن و تعیین مهم‌ترین عوامل مؤثر بر آن اقدام کرد و از طریق تأثیر بر فرایندهای مذکور در بالا عملیات خندق را برنامه‌ریزی کرد. جمع‌بندی تحقیقات قبلی مبین آن است که رفتار خندق‌ها در برابر رشد طولی در مناطق مختلف متفاوت است و این مسئله را می‌توان به دو عامل مقیاس زمانی و عوامل محیطی نسبت داد. به طوری که در بلندمدت رشد خندق‌ها بیشتر برآورد می‌گردد و در بین عوامل محیطی مساحت حوزه آبخیز بالادست خندق و ویژگی‌های خاک‌شناسی مؤثرترند. با توجه به موارد مذکور،

۵۰-۵۰ و ۵۰-۱۰۰ تجزیه شدند. همچنین، کلیه پارامترهای توپوگرافی، نظیر مساحت حوزه آبخیز بالادست و شیب حوزه آبخیز بالادست، و فاکتورهای مورفولوژی خندق، نظیر ارتفاع بالاکنند، طول خندق، عرض متوسط خندق، عمق متوسط خندق، فاصله بالاکنند تا مرز حوزه آبخیز بالادست، و شیب کانال بالادست منتهی به خندق (در فاصله ۲ متری از هدکت خندق به همراه درصد سنگ و سنگریزه حوزه آبخیز بالادست)، برای هر خندق اندازه‌گیری شد. در نهایت، به منظور تعیین مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر بر گسترش طولی خندق از تحلیل همبستگی دو و چندگانه گام به گام استفاده شد و مناسب‌ترین مدل برآورد گسترش طولی خندق‌ها در منطقه مورد مطالعه ارائه گردید.

۴. تهیه ارتوفتو عکس‌های هوایی با استفاده از دیپازیتو و اطلاعات و علائم حاشیه‌ای عکس (Fiducial Mark) به همراه مختصات نقاط شاهد به عنوان نقاط کنترل زمینی (GCP)؛
۵. پس از انتخاب خندق‌های قابل تشخیص بر روی هر دو عکس سال‌های ۱۳۷۲ و ۱۳۴۶، موقعیت رأس خندق‌ها مشخص شد و با استفاده از نرم‌افزارهای Arc GIS 9.3 و Arcview گسترش طولی خندق به همراه پارامترهایی از قبیل مساحت آبخیز بالادست و موقعیت رأس تا خروجی خندق‌ها در دوره فوق به طور مستقیم محاسبه شد (شکل ۱)؛
۶. به منظور ارزیابی تأثیر پارامترهای فیزیکی-شیمیایی خاک بر رشد طولی خندق‌ها، نمونه‌های خاک اخذشده از رأس و کناره خندق‌ها در دو عمق



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی به همراه محل بالاکنند خندق‌های مورد بررسی و جنس سنگ

دارای مخازن نفتی متمرکز بوده و کمتر از نظر تفکیک به جداسازی واحدهای سنگ‌شناسی کواترنری پرداخته است.

نتایج

همان‌طور که جدول ۱ نشان می‌دهد، در دوره ۱۳۷۲-۱۳۴۶ متوسط گسترش طولی خندق‌ها ۱٫۳۶ متر در سال و در دوره ۱۳۷۲-۱۳۸۷ متوسط گسترش طولی خندق‌ها ۱٫۲۳ متر در سال اندازه‌گیری شده است. همچنین، از سال ۱۳۴۶-۱۳۸۷ متوسط رشد طولی خندق‌ها ۱٫۲۹ متر در سال است.

در طی مراحل مطالعات میدانی مشخص شد که بین نقشه‌های سنگ‌شناسی موجود (۱:۱۰۰۰۰۰) و واقعیت زمینی همخوانی وجود ندارد. به طوری که بیشتر بالاکندهای ثبت‌شده بر روی واحد سنگ‌شناسی کنگلومرای بختیاری واقع شده است، در حالی که جنس سنگ این مناطق از کنگلومرای بختیاری نیست، بلکه از رسوبات آبی و بادی کواترنر مربوط به زمان پیشروی ساحل دریاست. این مسئله، از یک سو، مربوط است به مقیاس نقشه‌ها و قدمت آن‌ها و، از سوی دیگر، مرجع تهیه آن‌ها (شرکت نفت). به طوری که شرکت نفت بیشتر بر روی سازندهای

جدول ۱. نتایج حاصل از اندازه‌گیری رشد طولی فرسایش خندقی

خندق	گسترش طولی ۱۳۷۲-۱۳۴۶ متر در سال	گسترش طولی ۱۳۷۲-۱۳۸۷ متر در سال	میانگین گسترش طولی دو دوره متر در سال
۱٫۰۰	۱٫۲۱	۱٫۷۶	۱٫۴۹
۲٫۰۰	۱٫۳۰	۱٫۴۳	۱٫۳۷
۳٫۰۰	۱٫۷۲	۰٫۷۲	۱٫۲۲
۴٫۰۰	۱٫۴۵	۱٫۱۸	۱٫۳۲
۵٫۰۰	۲٫۵۰	۱٫۸۴	۲٫۱۷
۶٫۰۰	۲٫۶۰	۲٫۴۹	۲٫۵۵
۷٫۰۰	۲٫۸۴	۲٫۵۷	۲٫۷۱
۸٫۰۰	۱٫۴۵	۱٫۷۷	۱٫۶۱
۹٫۰۰	۰٫۳۳	۰٫۱۵	۰٫۲۴
۱۰٫۰۰	۱٫۶۷	۱٫۷۲	۱٫۷۰
۱۱٫۰۰	۱٫۵۸	۱٫۷۱	۱٫۶۵
۱۲٫۰۰	۰٫۷۹	۰٫۳۹	۰٫۵۹
۱۳٫۰۰	۰٫۶۵	۰٫۳۲	۰٫۴۹
۱۴٫۰۰	۰٫۶۹	۱٫۱۲	۰٫۹۱
۱۵٫۰۰	۲٫۱۵	۱٫۹۵	۲٫۰۵
۱۶٫۰۰	۰٫۲۲	۰٫۶۶	۰٫۴۴
۱۷٫۰۰	۰٫۷۱	۱٫۶۷	۱٫۱۹
۱۸٫۰۰	۱٫۳۸	۱٫۶۰	۱٫۴۹
۱۹٫۰۰	۱٫۳۶	۱٫۰۶	۱٫۲۱
۲۰٫۰۰	۱٫۴۰	۰٫۴۴	۰٫۹۲
۲۱٫۰۰	۰٫۸۵	۰٫۵۶	۰٫۷۱
۲۲٫۰۰	۱٫۳۱	۱٫۵۴	۱٫۴۳
۲۳٫۰۰	۱٫۲۳	۰٫۲۲	۰٫۷۳
۲۴٫۰۰	۱٫۳۳	۱٫۳۶	۱٫۳۵
۲۵٫۰۰	۱٫۲۹	۰٫۷۰	۱٫۰۰
متوسط	۱٫۳۶	۱٫۲۴	۱٫۳

خاک خندق‌ها به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری فاکتورهای توپوگرافی و مورفولوژی خندق و فیزیکی-شیمیایی

جدول ۲. نتایج حاصل از اندازه‌گیری فاکتورهای توپوگرافی و مورفولوژی خندق

شماره خندق	مساحت حوزه آبخیز خندق (متر مربع) A_i	شیب توپوگرافی % S_a	در صد سنگ و سنگریزه حوزه آبخیز خندق R	ارتفاع هدکت (متر) H	عرض متوسط خندق W_g (متر)	عمق متوسط خندق H_g (متر)	طول خندق L_g (متر)	فاصله هدکت تا مرز حوزه آبخیز (متر) L	شیب کانال بالادست خندق % S_g
۱	۳۶۲۳٫۳	۵-۰	۴٫۵	۱٫۲	۳٫۶	۱٫۳	۷۰	۹۷	۵
۲	۶۸۰٫۵	۵-۰	۴٫۸	۱٫۴	۳٫۶	۱٫۴	۷۶	۳۳	۴
۳	۱۶۴۱٫۷	۲۰-۱۰	۱٫۵	۲٫۷	۳٫۵	۲٫۵	۴۸	۱۵	۱۳٫۸
۴	۲۵۹۴٫۱	۱۰-۵	۱٫۸	۲٫۴	۴٫۵	۲٫۷	۵۰	۳۰	۱۳٫۳
۵	۵۹۵۵٫۸	۱۰-۵	۱٫۵	۱٫۳	۴٫۳	۱٫۳	۴۷	۷۸	۱٫۶
۶	۴۴۷۲٫۲	۱۰-۵	۱٫۶	۱٫۳	۶٫۴	۱٫۹	۶۰	۸۰	۴٫۴
۷	۸۷۸۶٫۹	۲۰-۱۰	۱٫۲	۲٫۵	۵٫۵	۲٫۱	۷۵	۱۱۰	۱۹٫۵
۸	۲۷۰۶٫۹	۱۰-۵	۱٫۴	۱٫۶	۳٫۹	۱٫۸	۶۵	۳۸	۵٫۵
۹	۱۰۹۳٫۸	۵-۰	۱٫۲	۰٫۵	۳٫۷	۱٫۵	۵۳	۱۰	۱۷٫۵
۱۰	۲۸۷۸٫۷	۵-۰	۱٫۳	۰٫۶	۳٫۶	۰٫۹	۵۸	۲۸	۹٫۵
۱۱	۷۳۱۵٫۵	۵-۰	۱٫۵	۰٫۶	۲٫۷	۰٫۹	۴۸	۱۲۵	۷
۱۲	۱۶۲۷٫۴	۱۰-۵	۲٫۸۵	۱٫۳	۴	۱٫۹	۳۹	۴۰	۵
۱۳	۶۳۱۸٫۸	۱۰-۵	۱۵٫۶	۱٫۷۵	۳٫۸	۱٫۷	۴۶	۱۳۵	۸٫۵
۱۴	۲۳۷۰٫۷	۱۰-۵	۲٫۸	۲٫۲	۴٫۴	۱٫۹	۴۵	۳۸	۳٫۳
۱۵	۵۰۱۹٫۲	۲۰-۱۰	۲٫۲	۱٫۱	۴٫۵	۱٫۳	۶۰	۲۰	۲۰٫۵
۱۶	۲۸۸۴٫۴	۲۰-۱۰	۲٫۵	۰٫۹۵	۳٫۵	۱٫۵	۵۶	۲۲	۱۵٫۸
۱۷	۱۵۹۳٫۵	۱۰-۵	۲٫۵	۲٫۲	۳٫۲	۲٫۴	۵۰	۲۵	۹٫۴
۱۸	۲۵۶۰٫۸	۲۰-۱۰	۲٫۳	۱٫۱	۳٫۹	۲٫۶	۳۶	۲۸	۱۸٫۳
۱۹	۳۵۰۰٫۴	۲۰-۱۰	۳	۱٫۱	۴٫۵	۱٫۸	۶۰	۱۵	۲۲٫۵
۲۰	۲۲۰۷٫۸	۲۰-۱۰	۲٫۴	۰٫۵	۵٫۱	۱٫۸	۵۸	۱۴	۲۵
۲۱	۲۵۸۶٫۵	۱۰-۵	۴٫۵	۱٫۵۵	۳٫۹	۱٫۵	۸۰	۲۸	۹
۲۲	۵۴۲۸٫۵	۱۰-۵	۵٫۸	۱٫۸	۴٫۵	۲	۳۹	۱۳۰	۴
۲۳	۵۹۵۱٫۵	۱۰-۵	۶٫۵	۰٫۸	۶٫۷	۱٫۵	۶۶	۱۰۵	۳
۲۴	۳۷۹۹٫۹	۱۰-۵	۷٫۱	۱٫۳	۷٫۴	۱٫۶	۱۰۰	۶۷	۶٫۵
۲۵	۴۸۸۰٫۶	۱۰-۵	۳٫۸	۰٫۷	۴٫۸	۱٫۵	۴۸	۴۰	۶٫۵

جدول ۳. نتایج حاصل از اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی - شیمیایی خاک خندق‌ها

شن	سیت	رس	ESP	SAR	CEC	EC dsm ⁻¹	Ca+Mg meq/lit	Na meq/lit	K Ppm	SP	PH	گج Meq/100	آهک %	مواد آلی %	شماره خندق
۶۶۲۵	۲۱۳	۱۲۴۵	۱۲٫۹۱	۱٫۱۶	۵٫۱۵	۳٫۶۵	۴۵٫۵	۵٫۵	۱۶	۲۹٫۵	۷٫۶۵	۱۱٫۶	۶۳٫۸	۰٫۲۶	۱
۶۹۴	۱۹	۱۱٫۶	۱٫۶	۰٫۴۲	۵٫۳۵	۳٫۰۵	۳۴٫۵	۱٫۷۵	۲۱٫۷۵	۲۹	۷٫۵	۱۴٫۸	۵۹٫۶	۰٫۳۲	۲
۸۳۹	۸	۸٫۱	۱٫۰۱	۰٫۵۳	۴٫۳۵	۲٫۵۵	۳۰	۲	۱۲٫۲۵	۳۴	۷٫۴۵	۲۰٫۶۹۵	۶۰٫۰۵	۰٫۱۹	۳
۷۶۹	۱۳٫۲۵	۹٫۸۵	۱۸٫۷	۹٫۴۴	۳٫۵	۰٫۹۳	۲۳	۴۰٫۵	۱۳٫۷۵	۳۲٫۵	۸٫۱	۴۲٫۲	۶۳٫۱۵	۰٫۱۸	۴
۵۸۴	۲۶	۱۵٫۶	۱۰٫۴	۴٫۵۲	۵٫۷	۳٫۵	۳۹٫۵	۱۹٫۲۵	۱۴٫۲	۳۱	۷٫۸۵	۲۴٫۷	۶۳٫۵۵	۰٫۲۶	۵
۶۸۲	۱۸۰٫۵	۱۳٫۷۵	۱٫۷۵	۱٫۲۹	۴٫۰۵	۵٫۸	۵۶٫۵	۶	۱۴٫۲۵	۲۸٫۵	۷٫۴۵	۵۵٫۱	۷۲٫۹۵	۰٫۲۱	۶
۷۳۴	۱۶٫۵	۱۰٫۱	۲۲٫۲	۱۱٫۳	۷٫۸	۲٫۵۵	۶۶٫۵	۳۲٫۳	۴۱٫۵	۲۸٫۵	۸٫۱	۱۱٫۹۵	۶۴٫۸	۰٫۲	۷
۵۸۴	۳۰٫۷۵	۱۰٫۸۵	۱۷٫۱	۱۰٫۳	۶٫۹	۱۲٫۳	۳۵٫۵	۲۴٫۲	۳۶٫۵	۳۲	۸	۴۹٫۸۵	۶۰٫۴۵	۰٫۱۸	۸
۹۰٫۹	۱٫۵	۷٫۶	۲٫۸۸	۰٫۶	۳٫۲۵	۰٫۵۲	۶	۱٫۱	۱۱٫۲۵	۲۹	۷٫۷	۱۴٫۷۵	۷۰٫۶۵	۰٫۱۱	۹
۸۶	۵٫۷	۸٫۳	۱٫۹۳	۰٫۶۸	۳٫۲۵	۰٫۶۵	۶٫۵	۱٫۲۵	۱۳	۳۰٫۵	۷٫۷۵	۱۳٫۴	۶۵٫۴	۰٫۱۵	۱۰
۸۷٫۹	۵٫۳	۶٫۸	۱٫۸	۰٫۶۳	۳٫۰۵	۰٫۵۵	۵	۱٫۲	۱۶٫۷۵	۲۸٫۵	۷٫۷	۳۰٫۸	۷۵٫۰۵	۰٫۱۴	۱۱
۵۹٫۴	۳۴٫۵	۶٫۱	۵٫۲۷	۰٫۴۶	۵٫۶۵	۲٫۶۲	۲۶	۲	۱۹٫۱۲	۳۳٫۵	۷٫۶	۱۵۴٫۷۵	۶۸٫۲	۰٫۲۱	۱۲
۵۷٫۲۵	۲۸٫۵۵	۱۴٫۱	۱٫۱۹	۰٫۵۹	۵٫۱۵	۱٫۰۵	۹	۱٫۲۵	۱۲٫۵	۳۰٫۵	۷٫۷۵	۱۰٫۵	۷۱٫۰۵	۰٫۱۷	۱۳
۶۳٫۹	۲۵٫۵	۱۰٫۶	۱۲٫۷۹	۳٫۱۴	۵٫۱	۳٫۶۲	۲۷	۱۰٫۵	۲۹٫۵	۳۱	۷٫۶	۲۴٫۰۵	۶۳٫۱۵	۰٫۳۴	۱۴
۶۶۴	۲۶٫۷۵	۶٫۸۵	۳٫۱۵	۲٫۰۴	۴٫۷۵	۳٫۱	۲۹٫۵	۸	۴۱٫۵	۳۰٫۵	۷٫۷۵	۵۱	۶۴٫۴	۰٫۲۹	۱۵
۷۱٫۹	۱۷٫۲۵	۱۰٫۸۵	۳٫۲۳	۱٫۴۳	۴٫۹۵	۲٫۷۶	۲۷	۵٫۵	۳۰٫۲۵	۲۹	۷٫۷	۲۲٫۱۵	۶۰٫۶۵	۰٫۲	۱۶
۷۲٫۶	۱۶٫۱	۱۱٫۳	۱۳٫۴۳	۱٫۹۳	۵٫۱۵	۱٫۸۴	۲۳	۵٫۵	۱۸٫۵	۳۰٫۵	۸	۲۲٫۳	۶۳٫۱۵	۰٫۱۹	۱۷
۶۲٫۲۵	۲۴٫۳	۱۳٫۴۵	۵٫۵۷	۱٫۲۴	۵٫۶۵	۳٫۱	۴۰	۵٫۷۵	۲۸٫۲۵	۳۷	۷٫۹۵	۱۲۹٫۳۵	۵۵٫۰۵	۰٫۲۲	۱۸
۶۳٫۳۵	۲۵٫۶	۱۱٫۰۵	۱٫۴۶	۱٫۳۱	۴٫۸	۱٫۲	۱۱٫۵	۳٫۲۵	۱۸٫۷۵	۳۰٫۵	۷٫۶	۱۳٫۶	۶۶٫۳۵	۰٫۲۶	۱۹
۹۱٫۱۵	۳	۵٫۸۵	۹٫۹۷	۰٫۲۹	۲٫۶	۲٫۴	۳۵٫۵	۱٫۲۵	۲۲٫۵	۲۹٫۵	۷٫۶	۵۵٫۱۵	۶۳٫۸۵	۰٫۱۴	۲۰
۷۵٫۵۵	۱۱٫۱۵	۱۳٫۳	۱٫۷۷	۱٫۱۷	۴٫۸	۳٫۳	۳۲٫۵	۴٫۷۵	۱۳٫۲۵	۳۱	۷٫۵۵	۱۹٫۹۵	۶۴٫۵۵	۰٫۲۴	۲۱
۵۹٫۲۵	۲۲٫۲	۱۷٫۵۵	۱٫۱۴	۰٫۳۳	۵٫۰۵	۲٫۴۵	۲۷٫۵	۱٫۲۵	۱۱٫۵	۳۲٫۵	۷٫۵	۵۶٫۵	۶۴٫۷۵	۰٫۲	۲۲
۵۴٫۱۵	۳۴٫۴۵	۱۱٫۴	۲٫۳۹	۱٫۰۶	۴٫۰۵	۲٫۵۶	۱۷٫۵	۳٫۵	۱۱٫۷۵	۲۸٫۵	۷٫۷	۱۵٫۷	۷۲٫۳	۰٫۲۹	۲۳
۵۵٫۸	۳۳٫۵	۱۱٫۷	۱٫۵۷	۰٫۹۳	۴٫۹۵	۱٫۸۴	۱۶	۲٫۷۵	۱۴٫۷۵	۳۰	۷٫۵۵	۷۱٫۵	۶۴	۰٫۲	۲۴
۶۰٫۶	۲۹٫۱	۱۰٫۳	۱۲٫۵۸	۰٫۸۲	۴٫۷	۱٫۶	۲۲	۳	۱۳٫۵	۲۹٫۵	۷٫۹	۱۴٫۳۵	۶۳٫۳۵	۰٫۳۳	۲۵

جدول ۴. نتیجه رگرسیون خطی چندمتغیره گام به گام بین میانگین گسترش طولی خندق و فاکتورهای محیطی

مدل	B	t	Sig	R ²
۱	ثابت	۱۰۸۱	...	۰٫۲۶
	SAR	۸۵۷	۰۰۹	
۲	ثابت	۵۸۴	۰۲۲	۰٫۴۱۹
	SAR	۹۹۷	۰۰۲	
	At	۷۷۵	۰۲۴	
	ثابت	۲۶۷	۱۶۲	
۳	SAR	۶۳۷	۰۰۷	۰٫۷۱۲
	At	۳۵۰۹	...	
	A1	۳۵۵۶	...	
	ثابت	۰۵۰	۷۷۲	
	SAR	۶۷۳	۰۰۱	
۴	At	۳۷۰۵	...	۰٫۸۰۵
	A1	۴۱۲۰	...	
	L	۰۰۶	۰۰۶	
	ثابت	-۴۶۳	۰۷۸	
	SAR	۵۷۷	۰۰۲	
۵	At	۴۱۶۰	...	۰٫۸۵۶
	A1	۴۶۲۰	...	
	L	۰۰۶	۰۰۱	
	H	۲۹۴	۰۱۸	

A: متوسط گسترش طولی خندق (۱۳۴۶-۱۳۸۷) به متر در سال؛

SAR: نسبت جذب سدیم نمونه‌های خاک؛

A_t: مساحت کل حوزه آبخیز خندق به ایگر؛

A: مساحت حوزه آبخیز بالادست خندق به ایگر؛

L: فاصله رأس خندق تا مرز حوزه آبخیز به متر؛

H: ارتفاع بالاکنند خندق به متر.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری فاکتورهای توپوگرافی و مورفولوژی خندق و فیزیکی-شیمیایی خاک خندق‌ها به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.

بحث و نتیجه‌گیری

فرسایش خندقی شکلی از فرسایش پیش‌رونده به شمار می‌آید که بیشترین سهم تخریب خاک را در اقالیم مختلف به خود اختصاص می‌دهد. رفتار خندق‌ها در برابر نحوه گسترش و میزان رشد آن

جدول ۴ نتایج حاصل از رگرسیون خطی چندمتغیره بین میانگین گسترش طولی خندق در دو دوره (۱۳۴۶-۱۳۸۷) و کلیه فاکتورهای توپوگرافی، مورفولوژی خندق، و نمونه‌های خاک به روش گام به گام را نشان می‌دهد. نتایج جدول فوق نشان‌دهنده معنی‌دار بودن تأثیر SAR، مساحت کل حوزه آبخیز خندق (At)، مساحت حوزه آبخیز بالادست خندق (A1)، و فاصله هدکت تا مرز حوزه آبخیز (L) در سطح ۱ درصد و ارتفاع هدکت (H) در سطح ۵ درصد بر میانگین گسترش طولی خندق به صورت مثبت است، یعنی با افزایش هر کدام از فاکتورهای ذکر شده گسترش طولی خندق افزایش می‌یابد.

با توجه به آنالیزهای رگرسیونی انجام گرفته، مدل زیر برای برآورد گسترش طولی خندق‌ها در منطقه مورد مطالعه ارائه می‌شود.

$$A = 0,057 SAR + 4,16 A_t + 4,62 A_1 + 0,006 L + 0,29 H \quad R^2 = 0,85$$

حساسیت خاک در مقابل نیروی کنش آب بیشتر می‌شود و به تبع آن مقاومت خاک کمتر خواهد شد. تحت این شرایط ذرات خاک دچار پراکندگی می‌شوند و، علاوه بر انحلال مواد محلول، به راحتی توسط جریان‌های زیر قشری حمل می‌شوند و مجاری زیرزمینی سریع‌تر تشکیل می‌شوند. این یافته‌ها با نتایج [۱، ۳، ۱۱، ۱۳] منطبق است. علت اصلی SAR در منطقه را می‌توان به نوع مواد مادری (کوآترنر حاصل از تخریب سازندهای گروه فارس در بالادست) نسبت داد. همچنین، نقش مقدار گچ به همراه سدیم در سازندهای رس و مارن و تأثیر آن بر ازدیاد حساسیت به فرایند پایپینگ و ایجاد خندق و بدلند تأکید شده است [۷]. دیگر پارامتر مؤثر در گسترش خندق ارتفاع بالاکنند و محل ریزش آب است. در پژوهش حاضر نیز ارتفاع بالاکنند به عنوان یکی از متغیرهای تأثیرگذار در مدل نهایی پیش‌بینی وارد شده است. مشابه این یافته در بررسی مدل گسترش بالاکندها بر اساس تلفیق فرایند تخریب ناشی از کنش جریان و ریزش آب از بالاکنند و زیرشویی دیواره Deploey (1989) گزارش شده است [۱۱]، به طوری که محقق مذکور، مجموعه فاکتورهای فرسایش‌پذیری (چسبندگی، مقاومت در برابر نفوذ، و وزن مخصوص ظاهری) دبی جریان و ارتفاع بالاکنند (ریزش آب) را مؤثر ذکر کرده است. با توجه به اهمیت رواناب پر گسترش خندق از یک سو و همچنین تأثیر ارتفاع ریزش جریان در مقدار انرژی تخلیه‌شده به همراه وجود حوضچه مستغرق در پای بالاکنند خندق [۱۱، ۱۲]، می‌توان گفت مساحت آبخیز بالادست خندق (فاصله رأس تا مرز حوضه) به همراه ارتفاع بالاکنند و وجود حوضچه مستغرق در پای آن می‌تواند به عنوان معیارهای مناسب و میدانی برای ارزیابی سریع میزان فعالیت یک خندق به منظور اولویت‌بندی اجرای عملیات کنترل آن باشد.

تحت تأثیر عوامل محیطی مختلف است. در تحقیق جاری، با استفاده از عکس‌های هوایی و بازدیدهای میدانی به همراه قابلیت GIS میزان متوسط رشد طولی خندق‌ها در یک دورهٔ چهار ساله ۱/۳ متر در سال به دست آمد. دلایل زیادبودن گسترش طولی خندق‌ها در منطقه مورد مطالعه نسبت به پژوهش‌های [۹، ۶، ۴] را می‌توان به حساس بودن خاک منطقه (رسوبات حاصل از تخریب سازندهای گروه فارس) و نوع اقلیم منطقه (شدت زیاد بارندگی‌های ۲۴ ساعته)، از یک سو، و همچنین منطبق بودن خندق‌های منطقه بر شبکهٔ زهکش حوزه نسبت داد. نتایج حاصل از تأثیر فاکتورهای مساحت حوزه آبخیز، فاصلهٔ هدکت خندق تا مرز حوزه آبخیز، و ارتفاع هدکت و SAR بر گسترش طولی خندق در منطقه مورد مطالعه با نتایج [۹، ۸، ۱۷، ۱۴، ۱۶] مطابقت دارد. در واقع، هرچه مساحت حوزه آبخیز و فاصلهٔ رأس آن تا مرز حوزه آبخیز خندق بیشتر باشد سطح گیرندهٔ بارندگی بیشتر خواهد شد و، به تبع آن، مقدار رواناب بیشتری (با انرژی بالاتر) ایجاد خواهد شد [۵] و، در نتیجه، گسترش طولی خندق بیشتر می‌شود. یافته‌های تعداد زیادی از پژوهش‌های انجام‌شدهٔ قبلی [۹، ۱۷، ۱۲] نشان داد که از بین کلیهٔ عوامل توپوگرافی عامل مساحت آبخیز بالادست خندق مهم‌ترین پارامتر در برآورد رشد طولی است. معنی‌دار شدن این پارامتر نشان‌دهندهٔ آن است که از بین فرایندهای مختلف (هیدرولیک جریان، پایپینگ، و واریختگی) در منطقهٔ مورد مطالعه رواناب و فرایند هیدرولیک جریان غالب‌ترین فرایند در گسترش فرسایش خندقی است. بنابراین، در کنترل فرسایش خندقی اولین گام برای مهار عمق رواناب است. از طرف دیگر، معنی‌دار شدن عامل SAR مبین تأثیر شرایط شیمیایی زمین در حساسیت خاک به فرسایش است [۱]. با افزایش مقدار SAR در خاک یون سدیم باعث انتشار ذرات ریز به ویژه رس در خاک می‌شود و، در نتیجه،

References

- [1] Ahmadi, H. (1999). *Applied Geomorphology*, Vol. 1 (water erosion), 3rd Edition. University of Tehran Press.
- [2] Ghaffari, A.R. (1998). *Aerospace techniques applied to gully erosion studied in Shahre-kord, Iran*. M.Sc. dissertation, ITC, Enschede, The Netherlands, 113 pp.
- [3] Gutierrez, M., Benito, G. and Rodriguez, J. (1988). Piping in badland areas of the Middle Ebro Basin, Spain. In: Harvey, A.M. and Sala, M. (Eds.), *Geomorphic processes in environments with strong seasonal contrasts. Geomorphic Systems*, Catena Supplement ,13 II, pp. 49-60.
- [4] Harley, D., Ronald, B. and Rose, C. (1999). *Digital elevation models as a tool for monitoring and measuring gully erosion*. ITC, 1 (2-91).
- [5] Leopold L.B., Wolman M.G. and Miller, J.P. (1964). *Fluvial Processes in Geomorphology*. W.H. Freeman: San Francisco.
- [6] Martinez-Casasnovas, J.A. (2003). A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion. *Catena*, 50: 293-308.
- [7] Morgan, R.P.C. (2005). *Soil erosion and conservation*, Blackwell, 316p.
- [8] Mortazaei, G. (2005). Evaluation of the quantitative effects of environmental parameters on occurrence of gully erosion in order to introduce the most relevant estimation model for longitudinal development of gully. PhD thesis, Islamic Azad University, Tehran, 154pp.
- [9] Nazari Samani, A., Ahmadi, H., Mohammadi A., Ghoddousi, J., Salajegheh, A. and Boggs, G. (2010). Factors controlling gully advancement and models evaluation for prediction of gully head advancement (Case study: Hableh Rood Basin, Iran), *Water Resources Management*, 24:1531-1549.
- [10] Poesen, J., Vandaele, K. and van Wesemael, B. (1998). Gully erosion: importance and model implications. In: Boardman, J., Favis-Mortlock, D.T. (Eds.), *Modelling Soil Erosion by Water*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 285-311.
- [11] Poesen, J., Vandekerckhove, L., Nachtergaele, J., Oostwoud Wijdenes, D., Verstraeten, G. and van Wesemael, B. (2002). Gully erosion in dryland environments. In: Bull, L.J., Kirkby, M.J. (Eds.), *Dryland Rivers: Hydrology and Geomorphology of Semi-Arid Channels*. Wiley, Chichester, UK, pp. 229-262.
- [12] Poesen, J.J., Nachtergaele, J. and Verstraeten, G. (2003). Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, 50: 91-133.
- [13] Romero Díaz, A., Marín Sanleandro, P., Sánchez Soriano, A., Belmonte Serrato, F. and Faulkner, H. (2007). The causes of piping in a set of abandoned agricultural terraces in southeast Spain. *Catena*, 69: 282-293.
- [14] Shahrivar, A. (1997). An investigation of effective factors on gully erosion and model invention in Sogh, Dehdasht region. M.Sc. thesis, University of Tehran, 205pp.
- [15] Sidorchuk, A. (1999). GULTEM- the model to predict gully thermoerosion and erosion (theoretical framework). 10th International Soil Conservation Organization Meeting. USDA-ARS and Purdue University.
- [16] Soleiman Por, S., Sofi, M. and Ahmadi, H. (2007). An investigation on effective factors on gully erosion, soil loss and sediment yield in Goraspid region, Fars province. 5th Conference on Engineering Geology and Environment.
- [17] Vandekerckhove, L., Poesen, J. and Govers, G. (2003). Medium Term gully headcut rates in southeast Spain determined from aerial photographs and ground measurements. *Catena*, 50, 329-352.