



دوره‌ی ۳۳، شماره‌ی ۳، شماره‌ی پیاپی ۱۲۸، پاییز ۱۳۹۹، صفحه‌های ۵۳-۶۹  
شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/wmej.2019.127717.1257

# پژوهش‌های آبخیزداری

## پایش مکانی فرسایش تونلی با استفاده از تصاویر هوایی پهپاد در اراضی بادرفت استان گلستان

**نرگس کریمی‌نژاد**

دانشکده‌ی مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

**محسن حسینی‌زاده**

استادیار دانشکده‌ی مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

**حمیدرضا پورقاسمی\***

(نویسنده‌ی مسئول)\* دانشیار بخش مهندسی منابع طبیعی و محیط زیست دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

\*رایانامه‌ی نویسنده‌ی مسئول: hr.pourghasemi@shirazu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۲۶ اذر ۱۳۹۸

تاریخ دریافت: ۲۴ شهریور ۱۳۹۸

### چکیده

فرسایش تونلی از پدیده‌های مهم فرسایش آبی تشدید شونده است که اندرکنشی بسیار شدید با یکدیگر در زمین‌های بادرفتی شرق استان گلستان دارد. در این پژوهش با تأکید ویژه بر داده‌هایی با دقت زیاد از راه برداشت‌های میدانی و تصویرهای پهپاد، عامل‌های تأثیرگذار بر فرسایش تونلی بررسی آستانه‌ی شد. این پژوهش با تصویرهای هوایی پهپاد در محدوده‌ی به وسعت تقریبی ۲۷۰۰ هکتار در زمین‌های بادرفت شرق استان گلستان انجام، و منطقه‌های تأثیر گرفته از فرسایش تونلی شناسایی شد. موقعیت ۸۳۳ فرسایش تونلی با دستگاه موقعیت‌یاب جهانی و تصویرهای تهیه‌شده با پهپاد ثبت شد. پستی‌وبلندی، آب‌شناسی و زیستی متغیرهای مستقل، و فرسایش تونلی متغیر وابسته گرفته شد و تجزیه‌وتحلیل آماری شد. تحلیل پستی‌بلندی نشان داد که بیشینه‌ی تراکم فرسایش تونلی در ارتفاع ۳۵۰-۳۰۰ متر، دامنه‌های شرقی با شیب بیش از ۳۰٪، طول شیب کم‌تر از ۵ متر و در نیم‌رخ طولی و عرضی مقعر رخ داده است. بیشینه‌ی تراکم فرسایش تونلی در بیشینه‌ی مقدار عددی شاخص رطوبت پستی‌وبلندی (بیش‌تر از ۱۲) و در نزدیک‌ترین فاصله به آبراه (کم‌تر از ۱۰۰ متر) بود. عامل‌های زیستی نیز نشان داد که بیشینه‌ی تراکم فرسایش تونلی در کاربری مرتع و در مکان‌هایی یافت می‌شود که این رخساره‌ی فرسایشی به جاده‌ها نزدیک‌تر است. بنابراین توصیه می‌شود که شناسایی کردن رخساره‌ی فرسایشی تونلی با مشاهده‌ها و داده‌های با دقت زیاد انجام شود تا به درک بهتر عامل‌های مؤثر بر رخداد آن‌ها منجر شود.

واژگان کلیدی: استان گلستان، پهپاد، فرسایش تونلی، نهشته‌های بادرفت

## مقدمه

استان گلستان نهشته‌های لسی گسترده‌یی دارد (حدود ۲۰٪) که اطلاعات مفیدی از تغییر اقلیم و تکامل زمین‌نما برای دوره‌ی میانی تا انتهای دوران چهارم در آن است (ونگ و همکاران ۲۰۱۶). تفاوت در مقدار فرسایش خاک‌های بادرفت به توزیع اندازه‌ی ذره‌ها که از جمله مهم‌ترین آن‌ها مقدار لای و رس است نسبت داده می‌شود، به‌طوری‌که با افزایش مقدار رس مقاومت خاک در برابر فرسایش بیش‌تر و با افزایش درصد لای، پایداری در مقابل آن کاهش می‌یابد (زنک و همکاران ۲۰۱۶).

فرسایش تونلی، حفره‌های خطی ناشی از جریان آب متمرکز در خاک و سقوط و شکاف ناگهانی سطح خاک است (فالکنر، ۲۰۱۳؛ برناتک و همکاران ۲۰۱۶) که پاسخی به جریان‌های زیرسطحی دانسته می‌شود. متوسط سالانه‌ی تلفات خاک آن ۲/۳ تا ۴/۶ تن در هکتار گزارش شده است که از تلفات خاک ناشی از فرسایش سطحی و شیاری در کاربری‌های یکسان بیش‌تر است. تلفات خاک فرسایش تونلی ۵-۴ برابر شدیدتر از فرسایش سطحی در پادگانه‌های بادرفتی برآورد شده و فرسایشی تقریباً معادل ۱۰ برابر فرسایش شیاری و ورقه‌یی در کاربری یکسان دارد (وراخترت و همکاران ۲۰۱۰). باوجود اهمیت بررسی فرسایش تونلی، به علت این‌که تا حدی ناشی از فرسایش زیرسطحی است، کم‌تر از سایر فرسایش‌ها به آن توجه شده است (پویزن و همکاران ۲۰۰۳؛ حسینعلی‌زاده و همکاران ۲۰۱۸ الف و ب).

از جمله مواردی که به پیدایش فرسایش تونلی بر سطح زمین کمک می‌کند، ایجاد فرورفتگی در پستی‌وبلندی‌های سطح زمین است که ممکن است علت آن طبیعی (مقعر بودن دامنه)، وجود پوشش گیاهی تنک و یک‌ساله در منطقه‌های نیمه‌خشک، یا فعالیت موجودات در سطح خاک باشد. در زیرسطح نیز بر اثر تمرکز آب و حل شدن مواد و حمل کردن رس، حفره‌هایی درون خاک تشکیل می‌شود. در ادامه جریان آب در زیرسطح جریان فوق بحرانی می‌شود، و باعث ریزش سقف و ظهور فرسایش تونلی در سطح زمین می‌شود (وایلر و مک دونل ۲۰۰۷؛ جونز و همکاران ۲۰۱۰). بنابراین، جریان‌های زیرسطحی باعث تشکیل فرسایش تونلی می‌شود و در ظهور آن‌ها در سطح زمین، انحناهای سطحی دامنه، موجودات زنده و غیره نقش دارد (حسینعلی‌زاده و همکاران ۲۰۱۹). برناتک و

همکاران (۲۰۱۶) گزارش کردند که تأثیر فعالیت‌های زیستی باعث افزایش نفوذ آب به خاک می‌شود و تخلخل زیاد (۰/۲۰-۰/۱۵٪) و چگالی ظاهری کم (۰/۱۸-۰/۳) گرم بر سانتی مترمکعب) بر گسترش فرسایش تونلی مؤثر است. برناتک و رونسکاوالاچ (۲۰۱۸) با بررسی اثر فرآیندی فرسایش تونلی بر توسعه‌ی هدکته‌ها در منطقه‌های نیمه‌مرتفع کوهستانی نشان دادند که وجود تونلی‌ها روی شیب دامنه باعث افزایش توان انرژی می‌شود. این انرژی در پای دامنه به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسد، و در اثر آن فرسایش تونلی به هدکت و درنهایت خندق تبدیل می‌شود. بنابراین برای مدیریت کردن مؤثر فرسایش تونلی نیاز به اطلاعات پستی‌وبلندی سطح زمین با قدرت تفکیک مکانی زیاد از راه تصویرهای هوایی بی‌سرنشین هدایت‌پذیر از دور (پهپاد) و پردازش آن‌ها با نرم‌افزارهایی با کاربرد تهیه‌ی عکس‌های هوایی ضرورت می‌یابد، که می‌تواند برای تعیین کردن کمی توزیع مکانی فرسایش تونلی و تغییر ریخت‌شناسی آن و خصوصیت‌های مؤثر آبخیز در تحول این نوع از فرسایش به‌درستی به‌کار برده شود.

امروزه نرم‌افزارهایی با کاربرد تهیه‌ی عکس‌های هوایی هم‌زمان، چندین عکس گرفته‌شده با پهپاد را مقایسه و به سلول‌های مختلف مشترک در تصویر با محاسبه‌های رایانه‌یی، مختصات‌دهی فضایی (سه‌بعدی) می‌کنند. این کار موجب می‌شود که توده‌یی از نقطه‌های مشترک استخراج‌شده از تصویرها به‌دست آید که مدل سه‌بعدی منطقه‌یی را که از آن تصویربرداری هوایی مناسب شده است تولید می‌کند (وگا و همکاران ۲۰۱۵). به این حجم از نقطه‌های سه‌بعدی که بیرونی‌ترین سطح عارضه‌های مشاهده‌کردنی منطقه را تشکیل می‌دهد داده‌های ابر نقطه‌ها گفته می‌شود. بر مبنای این ابر نقطه‌ها می‌توان به کمک تحلیل نرم‌افزاری، پستی‌وبلندی بستر زمین و مدل رقومی سطح زمین را بازتولید کرد (تزیاو و همکاران ۲۰۱۷). می‌توان با توجه به ثبت تصویرها در طیف دیداری، از شاخصه‌های رنگی نقطه‌های تصویرهای اولیه برای رنگ‌دهی به ابر نقطه‌ها استفاده کرد، به شکلی که در نهایت هر نقطه از ابر نقطه‌ها شش مؤلفه داشته باشد؛ سه مؤلفه‌ی طول و عرض و ارتفاع جغرافیایی در دستگاه مختصات تعریف شده و سه مؤلفه‌ی سنجه‌های رنگی قرمز، سبز و آبی<sup>۱</sup> که در نهایت منجر به رنگی شدن نقطه‌ها تولیدی می‌شود (کلومینا و مولینا ۲۰۱۴). بر همین

سطح زمین شروع کرده‌اند (شکل ۱).

اساس اخیراً محققان کاربرد پهپاد را برای گرفتن تصویرهای سنجش‌ازدور، کاربرد آن‌ها را در تجزیه‌وتحلیل جزئیات دقیق



شکل ۱- تصویرهایی از پهپاد به‌کاررفته در محدوده‌ی پژوهش.

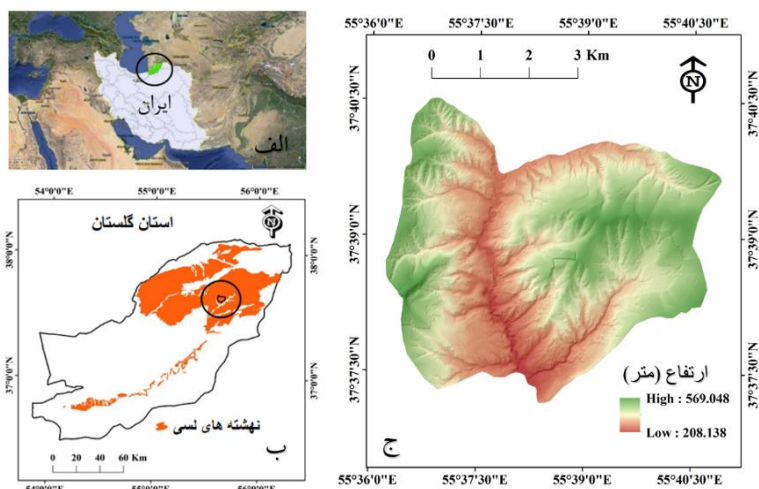
و در نهایت منجر به اتخاذ تصمیم بهتر برای رسیدن به راه‌کارهای مناسب حفاظت آب و خاک شده است.

#### مواد و روش‌ها

##### معرفی محدوده‌ی پژوهش

محدوده‌ی پژوهش از سرشاخه‌های گرگان‌رود، بالادست سد بوستان و بخشی از حوزه‌ی آبخیز آق‌چاتال به وسعت تقریبی ۲۷۰۰ هکتار در زمین بادرفتی، واقع در شرق استان گلستان است. این منطقه در عرض‌های " ۱۷' ۳۹" تا " ۳۶' ۴۲" ۳۷° شمالی و طول‌های جغرافیایی " ۴۹' ۳۶" تا " ۴۳' ۰۶" ۵۵° شرقی با ارتفاع بیشینه و کمینه به ترتیب ۵۷۱/۱۲ و ۲۰۸/۵ متر بیش‌تر از سطح دریا است. اقلیم محدوده با روش دومارتن، نیمه‌خشک و متوسط بارندگی سالانه ۲۸۰ میلی‌متر است (حسینعلی‌زاده و همکاران ۲۰۱۸ الف). نقشه‌ی موقعیت در ایران (الف)، استان گلستان (ب) و محدوده پژوهش (ج) در شکل ۲ و نمایی از آن در شکل ۳ آورده شده است.

در این تحقیق با در نظر گرفتن روش‌ها و شیوه‌های محققان پیشین، به بررسی اثر آستانه‌ی عامل‌های تأثیرگذار بر فرسایش تونلی در زمین بادرفت استان گلستان پرداخته شد. عامل‌های بسیار متنوعی در گسترش فرسایش تونلی مؤثر اند و تأثیر این عامل‌ها از منطقه‌ی به منطقه‌ی دیگر متفاوت است. با توجه به گسترش شدید فرسایش تونلی در زمین بادرفت شمال شرق استان گلستان و آسیب رساندن به زمین کشاورزی و مرتعی مرغوب و نسبت زیاد تولید رسوب در فرسایش تونلی و تغییر چشم‌انداز منطقه، نیاز ضروری بررسی عامل‌های مؤثر در گسترش آن‌ها بیش از پیش ضروری به نظر می‌رسد. علاوه بر آن، فرسایش تونلی نیز همانند بسیاری از پدیده‌های طبیعی پیچیدگی‌هایی دارد که به راحتی در عرصه پیمایش و اندازه‌گیری نمی‌شود. بنابراین، بهترین راه برای شناسایی و بررسی تأثیر جنبه‌های مختلف آن مخصوصاً در منطقه‌های دشوار، روش‌های نوین پژوهش و داده‌هایی با قدرت تفکیک زیاد و به‌روز با تصویرهای پهپاد است. تصویرهای پهپاد با قدرت تفکیک زیاد، تحلیل فضایی و فرآیندی این رخساره را میسر کرده



شکل ۲- نقشه‌ی موقعیت محدوده‌ی پژوهش در ایران (الف)، استان گلستان (ب) و محدوده پژوهش (ج)



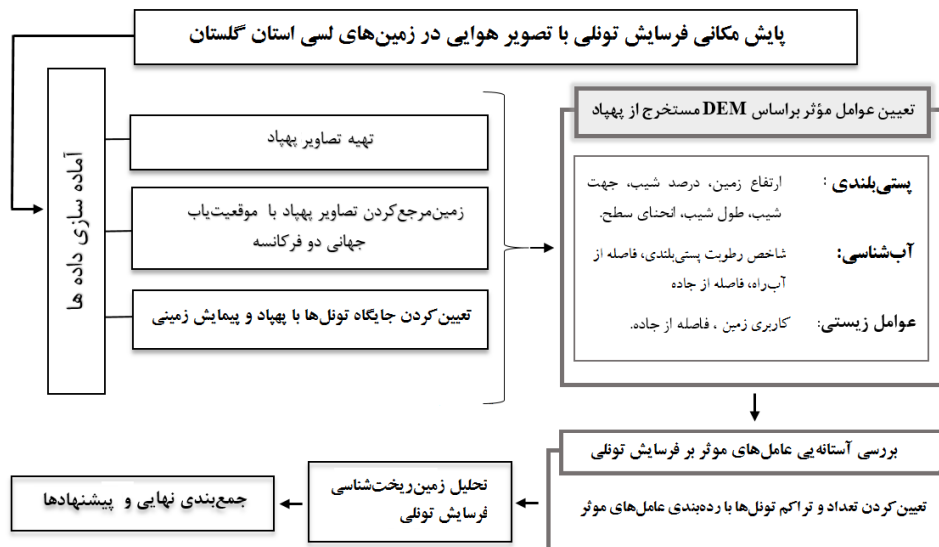
شکل ۳- نمایی از محدوده‌ی پژوهش (مرکز و شمال شرق).

از فرسایش تونلی (شکل ۵) انجام و موقعیت مکانی آن‌ها ثبت شد. به کمک متر نواری، متر لیزری و شاخص، سنجه‌های ریخت‌شناسی (طول، عرض، عمق) همه‌ی فرسایش تونلی محدوده اندازه‌گیری شد.

#### روش‌ها و مراحل انجام تحقیق

##### پیمایش میدانی و تهیه‌ی اطلاعات زمینی

در شکل ۴ نمودار جریان‌ی مراحل انجام پژوهش آورده شده است. پس از تعیین محدوده‌ی پژوهش، با پیمایش میدانی و به‌کاربردن دستگاه موقعیت‌یاب جهانی، آماربرداری صددرصد



شکل ۴- نمودار جریان‌ی مراحل انجام تحقیق.



شکل ۵- تصویرهایی از ثبت مشخصات فرسایش‌های تونلی.

(شکل ۷)، مختصات ۳۲ نقطه با دستگاه موقعیت‌یاب جهانی دو فرکانسی<sup>۲</sup> ثبت و با نرم‌افزار Trimble Business Center پردازش شد (وگا و همکاران ۲۰۱۵؛ ملامبو و همکاران ۲۰۱۷). در این پژوهش، برداشت تصویر (حدود ۵۰۰۰ عکس) در وسعت منطقه (۲۷۰۰ هکتار) با ارتفاع پرواز ۲۰۰ متر از سطح زمین و با سرعت پرواز ۱۰ متر بر ثانیه و هم‌پوشانی مسیره‌های پرواز ۶۵٪ انجام شد (کریمی‌نژاد و همکاران ۲۰۱۹ الف).

#### مراحل تولید مدل رقومی ارتفاع از تصویرهای هوایی پهپاد

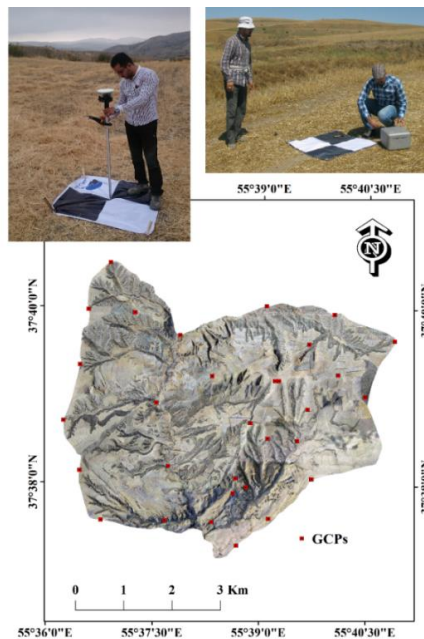
مدل رقومی ارتفاع منطقه از تصویرها و ابر نقطه‌های تهیه‌شده با پهپاد در نقطه‌هایی به اندازه‌ی ۱×۱ متر تهیه شد که شامل این مراحل است:

۱. آماده‌سازی پرواز که شامل دو بخش اصلی است: الف) جانمایی نقطه‌های مهار زمینی (شکل ۶) و ب) آماده‌سازی هم‌پوشانی ملزومات برای انجام عملیات پرواز. پیش از انجام پرواز، برای ثبت دقیق موقعیت مکانی نقطه‌های مهار زمینی





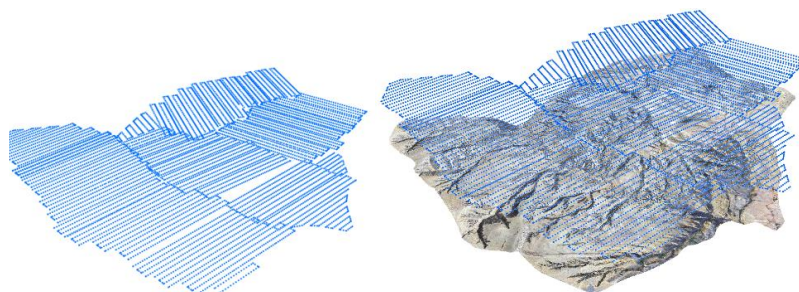
شکل ۶- تصویری از علامت گذاری نقطه‌ها و خواندن با دستگاه موقعیت یاب جهانی دو فرکانسی.



شکل ۷- تصویری از ثبت نقطه‌های مهار زمینی روی تصویر هوایی پهپاد.

مسیرهای هوایی تعریف شده حرکت کرد (شکل ۸) و کل منطقه را پوشش داد (حسینعلی زاده و همکاران ۲۰۱۸ ب).

۲. پس از انجام پژوهش‌های اولیه و تعیین سنجه‌های پرواز، گروه نقشه‌برداری از منطقه تصویربرداری کرد. مسیر پرواز با نرم افزار Pix4d مشخص شد و پرنده به روش خودکار در



شکل ۸. تصویری از خط پرواز پهپاد بر فراز محدوده‌ی پژوهش.

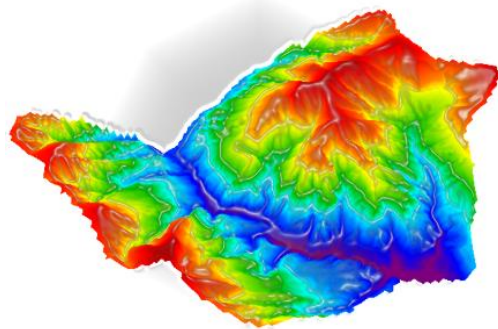
۳. پس از آن که عملیات پرواز، پردازش‌ها شامل توجیه داخلی، نسبی و مطلق خودکار بود که منجر به تهیه‌کردن ابر



شکل ۹- نمونه‌هایی از تصویر برداشته‌ها پهپاد.

۱۰)، ویژگی‌های اولیه و ثانویه‌ی پستی‌بلندی با محاسبه روی مدل رقومی ارتفاع در سامانه‌ی جغرافیایی ساگا<sup>۳</sup> محاسبه و استخراج شد (پورقاسمی و همکاران ۲۰۱۷).

۴. ترسیم و نقشه‌سازی: پس از آن که پردازش تصویرها به پایان رسید، نقشه‌ها از تلفیق کردن خروجی‌های مختلف تولیدشده تهیه شد. پس از تهیه‌ی مدل رقومی ارتفاع سه‌بعدی (شکل



شکل ۱۰- نمونه‌ای از مدل رقومی ارتفاع استخراج شده از پهپاد.

شد (شکل ۱۱) که در نتیجه‌ی آن هر تونل دقیقاً به جایگاه اصلی خود در نقشه انتقال داده و موقعیت دقیق آن برای تحلیل‌های آماری ثبت شد.

قبل از تصویربرداری، نقطه‌های تونلی با بازدید میدانی و با دستگاه موقعیت‌یاب جهانی ثبت شده بود. در این مرحله برای اصلاح موقعیت نقطه‌های برداشته، از تصویر پهپاد به‌کار برده



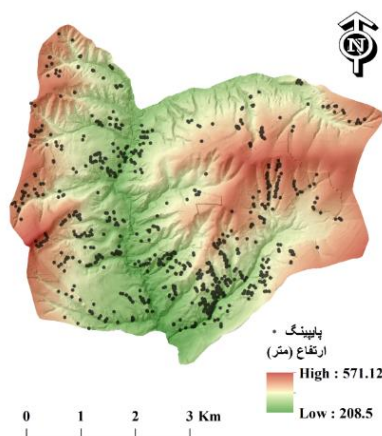
شکل ۱۱- تصویری از انتقال نقطه‌های برداشته با دستگاه موقعیت‌یاب جهانی (نقطه‌های قرمز رنگ) به نقطه‌های شناسایی شده روی تصویر هوایی پهپاد (نقطه‌های سبز رنگ).

### نتایج

#### مشخصات کلی تونل‌ها

پس از انتقال موقعیت‌های برداشته به موقعیت‌های شناسایی شده روی مدل رقومی ارتفاع خروجی از پهپاد، موقعیت ۸۳۳ تونلی روی نقشه مشخص شد (شکل ۱۲).

مشخصات ریخت‌شناسی اندازه‌گیری شده‌ی تونل‌ها در جدول ۱ آورده شده است. تعداد فرسایش تونلی ۸۳۳، طول متوسط آن ۱۴/۵۵ متر، عرض متوسط ۱۰/۲ متر و عمق متوسط آن ۶/۱۷ متر است.



شکل ۱۲- نقشه‌های موقعیت مکانی فرسایش تونلی.

جدول ۱- مشخصات ریخت‌شناسی تونل‌ها.

مشخصات تونل‌ها	بیشینه	متوسط	کمینه
طول (متر)	۸۵	۱۴/۵۵	۰/۵
عرض (متر)	۶۰	۱۰/۲	۰/۴
عمق (متر)	۳۵/۸	۶/۱۷	۰/۵

#### عوامل مؤثر بر فرسایش تونلی

##### عوامل‌های پستی‌بلندی

عوامل‌های پستی‌بلندی بررسی شده شامل ارتفاع، درصد شیب، جهت شیب، طول شیب، نیمرخ طولی دامنه و نیمرخ عرضی

دامنه است (جدول ۲). بیش‌ترین تعداد (۲۳۴) و تراکم فرسایش تونلی (۲۷/۷۲) در رده‌ی ارتفاعی ۳۰۰-۳۵۰ متر و بیش‌ترین درصد شیب در زمین با شیب ۱۵-۵ است. از مجموع کل فرسایش تونلی برداشته بیش‌ترین تعداد ۴۱۹ در



عرضی دامنه نیز صدق می‌کند؛ به طوری که در نیمرخ عرضی دامنه‌های مقعر، بیش‌ترین تعداد و تراکم فرسایش تونلی (۴۸۴، ۰/۴۸) مشاهده می‌شود. با نگاه کلی به عامل‌های پستی‌بلندی بررسی شده در این پژوهش می‌توان به این نکته پی برد که بیشینه‌ی تراکم فرسایش تونلی در ارتفاع ۳۵۰-۳۰۰، شیب بیشینه‌ی بیش از ۳۰٪، طول شیب کم‌تر از ۵ متر و در نیمرخ طولی و عرضی مقعر به وقوع پیوسته است.

رده‌ی شیب ۱۵ تا ۳۰٪ است. علاوه بر این، بیش‌ترین تراکم فرسایش تونلی (۵۱/۷) نیز در شیب بیش از ۳۰٪ مشاهده می‌شود.

نتیجه‌ی جهت شیب نیز نشان داد که پراکنش فرسایش تونلی بیش‌تر در جهت‌های شرق (۱۳۴) و جنوب شرق (۱۳۵) است. بیش‌ترین تعداد و تراکم تونل‌ها در طول شیب کم‌تر از ۵ متر مشاهده می‌شود. زمانی که نیمرخ طولی دامنه مقعر است، پراکنش تونل‌ها (۵۹۳) و تراکم آن‌ها (۰/۴۷) بیشینه است. این نتیجه در ارتباط با نیمرخ

جدول ۲- مشخصات عامل‌های پستی‌بلندی مؤثر بر وقوع فرسایش تونلی.

مشخصات	رده‌ها	تعداد تونل	درصد تونل	تراکم تونل‌ها	مساحت (هکتار)	مساحت منطقه (%)
ارتفاع (m)	< ۲۵۰	۴	۰/۴۷	۰/۰۶	۶۸/۷۴	۷/۲
	۲۵۰-۳۰۰	۲۰۵	۲۴/۲۸	۵/۶۵	۳۶/۲۹	۳/۱۳
	۳۰۰-۳۵۰	۲۳۴	۲۷/۷۲	۰/۴۷	۵۰/۱۰۱	۴/۱۸
	۳۵۰-۴۰۰	۱۵۷	۱۸/۶	۰/۲۹	۵۴۹/۶۹	۲۰/۱
	۴۰۰-۴۵۰	۱۳۷	۱۶/۲۳	۰/۲۶	۵۲۳/۳۵	۱۹/۲
	> ۴۵۰	۱۰۷	۱۲/۶۷	۰/۱۵	۷۱۷/۶۵	۲۶/۳
شیب (%)	< ۵	۳۳	۰/۰	۰/۱۴	۲۳۳/۱۵	۸/۵
	۵-۱۵	۱۹۹	۱۱/۵	۰/۱۵	۱۲۸۴/۰۹	۴۷/۰
	۱۵-۳۰	۴۱۹	۳۶/۷	۰/۴۸	۸۶۷/۱۹	۳۱/۸
	> ۳۰	۱۸۱	۵۱/۷	۵/۲۷	۳۴۳/۷	۷/۱۲
جهت شیب	مسطح	۶	۰/۷۱	۰/۷۷	۷/۷	۰/۲۸
	شمال	۸۰	۹/۴۶	۰/۲۳	۳۳۹/۱۲	۱۲/۴۲
	شمال شرق	۹۱	۱۰/۷۶	۰/۲۹	۳۱۲/۱۲	۱۱/۴۳
	شرق	۱۳۴	۱۵/۸۵	۰/۳۷	۳۵۲/۹	۱۲/۹۲
	جنوب شرق	۱۳۵	۱۵/۹۷	۰/۳۷۶	۳۵۸/۹	۱۳/۱۴
	جنوب	۱۰۳	۱۲/۱۸	۰/۳۲	۳۱۸/۹۸	۱۱/۶۸
	جنوب غرب	۹۵	۱۱/۲۴	۰/۳۴	۲۷۴/۳۱	۱۰/۰۴
	غرب	۱۰۲	۱۲/۰۷	۰/۳	۳۲۷/۵	۱۲/۳۶
	شمال غرب	۹۹	۱۱/۷۱	۰/۲۳	۴۲۸/۵۹	۱۵/۶۹
طول شیب (m)	< ۵	۴۱۶	۴۹/۲۸	۰/۲۲	۱۸۹۳/۹	۷۶/۷
	۵-۱۰	۳۴۱	۴۰/۴	۰/۴۹	۶۹۶/۷۹	۲۰/۴
	۱۰-۲۰	۷۰	۸/۲۹	۰/۵۲	۱۳۵/۴۶	۲/۸
	۲۰-۴۰	۳	۰/۳۵	۰/۹۸	۳/۰۶	۰/۱
	> ۴۰	۰	۰	۰	۰/۲۵	۰/۰
نیمرخ طولی دامنه	مقعر	۵۹۳	۷۰/۲۶	۰/۴۷	۱۲۴۹/۵۶	۴۵/۱۱
	محدب	۲۱۰	۲۴/۸۸	۰/۱۶	۱۲۷۸/۵۵	۴۶/۱۵
	مسطح	۳۵	۴/۱۴	۰/۱۷	۲۰/۷۶	۷/۲۸
نیمرخ عرضی دامنه	مقعر	۴۸۴	۵۷/۳۴	۰/۴۸	۱۰۱۳/۹۱	۳۶/۶
	محدب	۲۷۸	۳۲/۹۳	۰/۲۴	۱۱۶۶/۳۳	۴۲/۱
	مسطح	۶۱	۷/۲۲	۰/۱۱	۵۴۲/۶۲	۱۹/۵۸

### عامل‌های آب‌شناسی

است که به آبراه‌ها نزدیک‌تر اند. علاوه بر آن، تونل‌ها در منطقه‌هایی که تراکم آبراه‌ها ۳/۳-۲/۲ (کیلومتر بر کیلومتر مربع) بود، پراکنش بیش‌تری (۲۱۹) نشان دادند، در حالی که با افزایش تراکم آبراه‌ها، از تعداد تونل‌ها کاسته شده است تا جایی که در محدوده‌ی ۹/۹-۸/۸، تعداد فرسایش تونلی به صفر رسید. با نگاه کلی به عامل‌های آب‌شناسی می‌توان به این نکته پی برد که بیشینه‌ی تراکم فرسایش تونلی، در بیشینه‌ی مقدار عددی شاخص رطوبت پستی‌بلندی (بیش‌تر از ۱۲) و در نزدیک‌ترین فاصله نسبت به آبراه (کم‌تر از ۱۰۰ متر) به وقوع پیوسته است.

در جدول ۳ عامل‌های آب‌شناسی شامل شاخص رطوبت پستی‌بلندی، فاصله از آبراه و تراکم آبراه‌ها محاسبه شده است. تراکم فرسایش تونلی (۰/۹) در جاهایی با شاخص رطوبت پستی‌بلندی بیش‌تر (بیش از ۱۲) به بیشینه‌ی مقدار عددی خود رسیده است. نتیجه‌ی این تحقیق در ارتباط با عامل فاصله از آبراه نیز نشان داد که در فاصله‌های کم‌تر از ۱۰۰ متر تعداد فرسایش تونلی (۴۹۷) بسیار بیش‌تر از سایر فاصله‌ها است. هر چه فاصله از آبراه بیش‌تر شده تعداد فرسایش تونلی کاهش یافته است. به عبارت دیگر بیش‌ترین تراکم و پراکنش این نوع فرسایش در مکان‌هایی بیش‌تر

جدول ۳- مشخصات عامل‌های آب‌شناسی مؤثر بر وقوع فرسایش تونلی.

مشخصات	رده‌ها	تعداد تونلی	% تونلی	تراکم تونلی‌ها	مساحت (هکتار)	مساحت منطقه (%)
شاخص رطوبت پستی-بلندی	< ۸	۳۲۸	۳۸/۸۶	۰/۲۵	۱۲۹۹/۹۹	۴۶/۹۳
	۸-۱۲	۳۳۰	۳۹/۰۹	۰/۲۶	۱۲۵۶/۳۲	۴۵/۳۵
	> ۱۲	۱۵۶	۱۸/۴۸	۰/۹	۱۷۲/۹۶	۶/۲۴
فاصله از آبراه (متر)	< ۱۰۰	۴۹۷	۵۸/۸۸	۰/۳۵	۱۴۰/۱۲۱	۵۰/۵۸
	۱۰۰-۲۰۰	۲۷۹	۳۳/۰۵	۰/۳۴	۸۱۳/۰۶	۲۹/۳۵
	۲۰۰-۳۰۰	۶۳	۷/۴۶	۰/۱۸	۳۴۳/۶۶	۱۲/۴
	۳۰۰-۴۰۰	۵	۰/۵۹	۰/۰۳	۱۷۲/۲	۶/۲۱
	> ۴۰۰	۰	۰	۰	۳۹/۸۷	۱/۴۳
تراکم آبراه (کیلومتر بر کیلومتر مربع)	۰-۱/۱	۹۳	۱۱/۰۱	۰/۱۴	۶۵۷/۸۹	۲۳/۷۵
	۱/۱-۲/۲	۱۴۱	۱۶/۷	۰/۳۲	۴۴۲/۱۵	۱۵/۲۴
	۲/۲-۳/۳	۲۱۹	۲۵/۹۴	۰/۳۹	۵۶۴/۹۱	۲۰/۳۹
	۳/۳-۴/۴	۱۷۰	۲۰/۱۴	۰/۴	۴۲۶/۴۴	۱۵/۳۹
	۴/۴-۵/۵	۱۲۸	۱۵/۱۶	۰/۳۶	۳۵۰/۴۳	۱۲/۶۵
	۵/۵-۶/۶	۷۲	۸/۵۳	۰/۳۶	۲۰۰/۷۶	۷/۲۴
	۶/۶-۷/۷	۲۰	۲/۳۶	۰/۳۱	۶۴/۹۳	۲/۳۴
	۷/۷-۸/۸	۱	۰/۱۱	۰/۰۵	۲۰/۱۴	۰/۷۲
	۸/۸-۹/۹	۰	۰	۰	۲/۴۷	۰/۰۸

### عامل‌های زیستی

در کاربری کشاورزی همراه بوده است، به طوری که ۱۹۵ فرسایش تونلی در کاربری کشاورزی به ثبت رسید. به عبارت دیگر حدود ۷۶/۵٪ از فرسایش تونلی در مرتع و ۲۳/۵٪ آن‌ها در کاربری کشاورزی بوده است. در حالی که زمین مرتعی ۴۱٪ از مساحت کل منطقه را شامل می‌شود و سطح زیر کشت کشاورزی در حدود ۵۹٪ است. با در نظر گرفتن

در جدول ۵ عامل‌های زیستی مرتبط با تعداد و درصد نقطه‌هایی که در آن فرسایش تونلی روی داده در ارتباط با عامل‌های کاربری زمین و فاصله از جاده‌ها آورده شده است. در بازدیدها دیده شد که در کاربری مرتعی ۶۳۶ فرسایش تونلی روی داده است. این اندازه با کاهش چشم‌گیری

کاهش یافته و بیش‌ترین پراکنش این نوع فرسایش در منطقه‌هایی مشاهده شده است که به جاده‌ها نزدیک‌تر اند. بنابراین بیشینه‌ی تعداد فرسایش تونلی، در کاربری مرتع و در مکان‌هایی است که این رخساره‌ی فرسایشی به جاده‌ها نزدیک‌تر است. هر چند در فاصله‌های کم‌تر از ۱۰۰ متر از جاده می‌توان شاهد تراکم کم‌تری از فرسایش تونلی نسبت به فاصله‌های ۲۰۰-۱۰۰ متر بود.

تراکم تونل‌ها (۰/۵۷) در کاربری مرتع در مقایسه با تراکم فرسایش تونلی (۰/۱۲) در کاربری کشاورزی نیز می‌توان گفت که کاربری مرتع تأثیر بسزایی بر پراکنش این فرسایش در این تحقیق داشت. نتیجه‌ی این بررسی در ارتباط با عامل انسانی فاصله از جاده‌ها نشان داد که در فاصله‌های کم‌تر از ۱۰۰ متر تعداد فرسایش تونلی (۳۶۹) بیش‌تر از سایر فاصله‌ها است. به عبارت دیگر هر چه فاصله از جاده‌ها بیش‌تر شده است، تعداد فرسایش تونلی

جدول ۴- مشخصات عامل‌های زیستی مؤثر بر وقوع فرسایش تونلی.

مشخصات	کلاس‌ها	تعداد تونلی	درصد تونلی	تراکم تونلی‌ها	مساحت (هکتار)	مساحت منطقه (درصد)
کاربری اراضی	مرتع	۶۳۶	۷۶/۵۳	۰/۵۷	۱۱۲۴/۵	۴۱/۲
	کشاورزی	۱۹۵	۲۳/۴۶	۰/۱۲	۱۶۰۵/۶۳	۵۸/۸
فاصله از جاده (متر)	< ۱۰۰	۳۶۹	۴۳/۷۲	۰/۳	۱۲۱۹/۸۶	۴۵/۷
	۱۰۰-۲۰۰	۳۱۳	۳۷/۰۸	۰/۳۸	۸۱۵/۴	۳۰/۲۲
	> ۲۰۰	۱۶۲	۱۹/۱۹	۰/۲۳	۶۹۳/۶۵	۲۴/۰۶

تفکیک مکانی بسیار زیادی شده است که منجر به کاربرد پهپادها همچون ابزاری مناسب برای پیمایش و نظارت میدانی می‌شود (کوکیرو و همکاران ۲۰۱۸). تا به حال چندین محقق مدل رقومی سطحی را با دقت سانتی‌متر و با قدرت تفکیک مکانی زیاد (مستخرج از تصویر پهپادها) برای برآورد کردن حجم، اندازه‌گیری اندازه‌ی فرسایش، تجزیه و تحلیل ریخت‌شناسی و نظارت بر خندق‌ها علاوه بر سامانه‌های عکس‌برداری، به کار بسته‌اند (اویلر-اولتمانز و همکاران ۲۰۱۲؛ مارزولف و همکاران ۲۰۱۱؛ پتر و همکاران ۲۰۱۴؛ حسینعلی‌زاده و همکاران ۲۰۱۸ الف و ۲۰۱۹). از این‌رو، به کارگیری این روش‌ها در تحقیقات رخساره‌های فرسایشی (تونلی، هدکت، خندق و ...) برای توسعه و به کارگیری روش‌های مناسب برای نظارت و درک بهتر از ایجاد این نوع از فرسایش‌ها و بررسی تغییر آن‌ها در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف، ضرورتی اساسی است. استدانسته می‌شود (استوکر و همکاران ۲۰۱۰؛ کاستیلو و همکاران ۲۰۱۴؛ زو و همکاران ۲۰۱۹).

پستی‌بلندی از سنجه‌های تأثیرگذار در تشکیل خاک‌های منطقه است که مقدار آب واردشده در خاک، نگهداری آب در خاک، کاهش مواد از خاک با فرسایش و حمل مواد محلول در آب موجود در خاک از نقطه‌ی به نقطه‌ی دیگر را

#### بحث

بسیاری از یافته‌ها در زمین‌ریخت‌شناسی بر مبنای تجربه و مهارت محقق بنا شده‌اند و این خطر است که انتظارات و نتیجه‌گیری بر اساس روش ذهنی، بر تفسیر نهایی تأثیر بگذارد. علاوه بر آن، بسیاری از سامانه‌های زمین‌ریختی در طبیعت چند متغیری است و رابطه‌های پیچیده و یا تأثیرهای ناخطی همراه با سازوکارهای بازخورد دارد؛ بنابراین روش داده‌برداری مناسب برای کاهش دادن خطا در تصمیم‌گیری همراه با افزایش سطح عینیت، به‌قالب درآوردن و آزمودن فرضیه‌ها امری است که نیاز به توجه ویژه دارد. نکته‌ی مهمی که سامانه‌ی پهپاد را از دیگر روش‌های تهیه‌ی نقشه متمایز می‌سازد، پردازش‌های خودکار تصویر است که سرعت تهیه‌ی نقشه را بسیار افزایش می‌دهد (کریمی‌نژاد و همکاران ۲۰۱۹ الف). پهپاد، دسترسی به جزئیات با دقت بیش‌تر را آسان‌تر کرده (کلومینا و مولینا ۲۰۱۴) و در نتیجه بینش جدیدی در تحقیقات تحول زمین‌ریخت‌شناسی ایجاد کرده است. جمع‌آوری اطلاعات انعطاف‌پذیر با هزینه کم‌تر، یکی دیگر از مزیت‌های کاربرد این سامانه‌ها است (زو و همکاران ۲۰۱۹). پیش‌رفت‌های هم‌زمان در قدرت بینایی رایانه و نقشه‌برداری هوایی دیجیتال، باعث تولید بسیار سریع و آسان مدل‌های دیجیتال سطحی با دقت و قدرت

می‌شود. بدین ترتیب بیش تر تونل‌ها پی‌درپی در دامنه‌های مقعر اتفاق می‌افتد. به بیان دیگر، تحدب و تقعر دامنه با مهار حرکت آب و روان‌آب و تأثیر بر زه‌کشی و نگه‌داری آن در خاک، تأثیر زیادی بر تغییرپذیری ویژگی‌های خاک در زمین شیب‌دار دارند. پژوهش‌های زیادی نشان داده است که عمق خاک و واکنش‌های انحلالی در آن از دامنه‌های محدب به طرف دامنه مسطح و سپس انحنای مقعر شیب افزایش یافته است (سیبرت و همکاران ۲۰۰۷).

این تحقیق در ادامه‌ی تحقیق حسینعلی‌زاده و همکاران (۲۰۱۸ الف) در تحلیل الگوی نقطه‌یی فرسایش‌های تونلی در منطقه‌یی به مساحت ۷۰۰ هکتار در حوزه‌ی آق‌چاتال-استان گلستان است. آن‌ها نشان دادند که الگوی مکانی تونل‌ها در کل عرصه خوشه‌یی است. حسینعلی‌زاده و همکاران (۲۰۱۸ ب) در تحلیل فضایی الگوی نقطه‌یی و بررسی رابطه‌های متقابل بین فرسایش تونلی با عارضه‌های خطی در شمال شرق استان گلستان نشان دادند که عارضه‌ی خطی جاده رابطه‌ی مثبت و معنی‌داری با فرسایش تونلی دارد و با کم شدن فاصله از جاده‌ها تعداد تونل‌ها کاهش یافته است. کریمی‌نژاد و همکاران (۲۰۱۹ ب) تأثیر عامل‌های خاک‌شناسی، آب‌شناسی و پستی‌بلندی بر در نظرگیری عامل‌های کاربری زمین و فاصله از جاده‌ها بر پراکنش تونل‌ها نشان دادند که کاربری زمین، شیب، و لای به‌ترتیب مهم‌ترین نقش را در فرسایش تونلی دارند.

تشکیل و توسعه‌ی آبراه در ارتباط مستقیم با رطوبت و بارندگی (مخصوصاً در دامنه‌های شمالی) است. در محدوده‌ی پژوهش، بارندگی به دلیل بودن پوشش گیاهی مناسب در سطح‌های شیب‌دار منجر به ایجاد جریان زیرسطحی شده است که بر فرسایش تونلی تأثیر مثبتی دارد. با گسترش زیرسطحی رخساره‌های فرسایشی تونلی به سوی آبراه در یک دامنه‌ی معین، هدکت تشکیل شده و با توسعه‌یافتن بیش تر آن‌ها در درون آبراه‌ها و تبدیل شدن به خندق، دو دامنه‌ی مجزا در سطح منطقه ایجاد می‌شود و پس از آن هر دامنه شرایط پستی‌بلندی و آب‌شناسی متفاوتی خواهد داشت. بنابراین برای درک بهتر فرآیند تشکیل فرسایش تونلی و تبدیل آن‌ها به سایر رخساره‌های فرسایشی باید بر جریان‌های زیرسطحی تمرکز بیش‌تری داشت.

در تجزیه و تحلیل نتیجه‌ی تأثیر کاربری زمین بر فرسایش تونلی می‌توان نشان داد که پوشش گیاهی در درون و پیرامون تونل‌های در کاربری مرتعی بیش تر به گونه‌های علفی خودرو و یک‌ساله، نیزار، علف‌ها، درختچه‌های انار، سیاه‌تلو و انجیر وحشی اختصاص دارد. این پوشش‌های

تعیین (توری و پویزن ۲۰۱۴) و نقش مهمی در تعادل خاک (خاک‌سازی و فرسایش) بازی می‌کند (ناپن و پویزن ۲۰۱۰). ویژگی‌های پستی‌بلندی مانند طول، جهت، انحنا و زاویه‌ی شیب، مقدار روان‌آب، و زه‌کشی بر توزیع مکانی جریان‌های سطحی و زیرسطحی و به دنبال آن تراکم آبراه‌ها تأثیرات معنی‌داری می‌گذارد (تسوی و همکاران ۲۰۰۴). شیب دامنه از محرک‌های اصلی در ناپایداری و گسیختگی شیب‌ها است. شیب زمین با تغییر اثر نیروی جاذبه، مقاومت برشی، نیروی برشی، جریان زیرسطحی آب، نفوذپذیری و زاویه‌ی استقرار بر مواد دامنه‌یی تأثیر می‌کند. افزایش شیب باعث افزایش نیروی مخرب و ناپایداری و گسیختگی دامنه‌ها می‌شود (حسینعلی‌زاده و همکاران ۲۰۱۹). براساس گزارش فرانکل و همکاران (۲۰۱۲)، در شیب‌های ملایم، زمان لازم برای نفوذ آب افزایش و نیروی لازم برای فروریزی خاک کاهش می‌یابد و شرایط مساعدی برای نفوذ و انحلال آب در خاک لایه‌ی منطقه فراهم می‌شود و جریان‌های زیرسطحی بیش‌تری شکل می‌گیرد.

عامل جهت شیب از راه تبخیر و تعرق بر فرآیندهای آب‌شناسی اثر می‌گذارد. جهت دامنه، بیش‌تر در تکرار چرخه‌های انجماد-ذوب و دوره‌های تر-خشک در منطقه‌های مرتفع‌تر بر توده‌های خشک خاک اثر دارد. جهت دامنه در اقلیم نیمه‌خشک فلات باد رفت محدوده‌ی پژوهش نیز با حفظ رطوبت در دامنه‌های شمالی، نقش مهمی در تکامل خاک بازی می‌کند؛ به‌طوری‌که تقریباً جهت‌های جنوبی بی پوشش گیاهی و در مقابل، دامنه‌های شمالی با پوشش گیاهی متراکم است (ملکی و همکاران ۲۰۱۸). تحقیقات ملکی و همکاران (۲۰۱۸) در بخشی از فلات بادرفتی استان گلستان نشان داده است که تجمع بیش‌تر آبراه‌ها در دامنه‌های شمالی منجر به حفظ بیش‌تر رطوبت و متعاقباً تشکیل خاک‌های اینسپتی‌سولز و در دامنه‌ی جنوبی باعث ایجاد خاک‌های انتی‌سولز با تکامل و عمق کم خاک شده است. همسو با این نتیجه، تکا و همکاران (۲۰۱۵) و لوزانو-گارسیا و همکاران (۲۰۱۶) نیز وجود تراکم آبراه و رطوبت بیش‌تر در جهت‌های شمالی را عامل اصلی حفظ پوشش گیاهی، وجود خاک‌های باکیفیت و تکامل زیادتر و فرسایش پذیری کم‌تر دانستند.

علاوه بر درصد و جهت شیب، علت نتیجه‌های مشاهده‌شده در رابطه با انحنای سطحی را می‌توان به استحکام کم‌تر دامنه‌های مقعر از دامنه‌های محدب نسبت داد. دامنه‌های مقعر در نگه‌داری و تمرکز آب‌های زیرسطحی نقش بیش‌تری دارند، که باعث به-وجودآمدن فشار سریع آب در منهدا

## نتیجه‌گیری

محدوده‌ی بادرفت در این پژوهش منطقه‌ی پستی‌وبلندی منحصربه‌فرد و پیچیده با کاربری‌های کشاورزی و مرتعی در منطقه‌ی نیمه‌خشک است. از آن‌جا که احتمال ناپایداری‌های دامنه‌ی در این محدوده زیاد است، در این تحقیق عامل‌های پستی‌بلندی، آب‌شناسی و زیستی مؤثر بر وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ی بررسی شد. برای تعیین کمی توزیع مکانی فرسایش تونلی و تغییر ریخت‌شناسی آن‌ها و خصوصیت‌های مؤثر در تحول این نوع از فرسایش‌ها، نیاز به اطلاعات پستی‌وبلندی با قدرت تفکیک مکانی زیاد احساس شد. برای این کار از هواپیمای بی‌سرنشین هدایت‌پذیر از راه دور (پهپاد) بهره‌گیری شد، زیرا این ابزار سنجش از دور توانایی جمع‌آوری اطلاعات پستی‌بلندی و عوارض گوناگون با قدرت تفکیک مکانی زیاد در هر مقیاسی از سطح‌های دامنه‌ی را دارد.

تحلیل‌های این پژوهش نشان داد که فرسایش تونلی از دو جنبه بر محیط‌زیست تأثیر می‌گذارد. این پدیده با روی کرد فرسایشی، موجب نابودی بستر خاک به دلیل تخریب افق‌های زیرین خاک، تشدید تخلیه‌ی روان‌آب‌های سطحی، و کاهش حجم جریان آب‌های زیرزمینی با کوتاه کردن ارتباط بین منطقه‌های بالادست و پایین‌دست می‌شود. از این رو ضروری است که تحقیقات بیش‌تری بر گسترش و پیش‌روی فرسایش تونلی با داده‌های دقیق و روش‌های آمار-مکانی مناسب انجام شود.

علاوه بر آن، فرسایش تونلی با روی کرد اکوزمین‌ریخت‌شناسی بستر مناسبی برای رشد گیاهانی مانند انار وحشی و سیاه‌تلو ایجاد کرده است و با توسعه یافتن شبکه‌های زه‌کشی، به سوی اوج (کلیماکس) حرکت می‌کند. بنابراین فرسایش تونلی هم به‌شکل تهدید، شدت تخریب سرزمین را تسریع می‌کند، و هم به‌شکل فرصت، بستر مناسبی را برای رشد گیاهان مهیا می‌کند.

بنابراین شیوه‌ی تبدیل شدن تهدید به فرصت یا به‌عکس از نوع مدیریت منطقه تبعیت می‌کند، که در مدیریت منطقه‌های خشک و نیمه‌خشک است و می‌تواند افق تازه‌ی-ی برای سیاست‌گذاری، برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری پیش روی مدیران بگذارد. تأکید ما بر اصل پیچیدگی سازوکارهای فرسایش تونلی و عامل‌های مؤثر بر آن است؛ زیرا باور ما این است که ماهیت رخساره‌ی فرسایشی تونلی پیچیده است و به آسانی تسلیم محاسبه‌های سطحی دانشمندان نمی‌شود.

گیاهی با به‌دام‌انداختن و نفوذ دادن جریان‌های سطحی موجب انحلال در خاک زیرسطحی می‌شود.

در زمین کشاورزی، سطح زیر کشت دیم شامل گونه‌هایی مانند گندم، جو و کلزا است. شرایط زمین کشاورزی در منطقه برای کشت دیم بسیار مناسب است، پس کشاورزان به این کشت بسیار رو می‌آورند. بازدیدهای میدانی نشان می‌دهد که بسیاری از کشاورزان در تلاش اند که به محض دیدن رخساره‌های فرسایشی مانند تونل در زمین کشاورزی، به سرعت آن را با خاک پر کنند تا مانع توسعه و گسترش آن‌ها شوند. نتیجه‌ی این پژوهش با جلالی و همکاران (۲۰۱۸) در فراوانی رخداد تونل‌ها در کاربری مرتعی مطابقت دارد.

آن‌ها نیز نشان دادند که کاربری زمین بیش‌ترین تأثیر را بر وقوع تونل‌ها دارد و تونل‌ها در مرحله‌های اولیه‌ی شکل‌گیری، با ابزارهای کشاورزی و شخم‌زدن از بین می‌روند، و از پیش‌روی آن‌ها در این کاربری جلوگیری می‌شود.

بنابراین بیش‌ترین اندازه‌ی فرسایش در درجه‌ی اول در مرتع و در درجه‌ی دوم در کاربری کشاورزی است. با توجه به وجود روستاهای دارنده‌ی ساکن در محدوده‌ی پژوهش، جاده‌های متعدد خاکی و آسفالتی برای دسترسی به روستاها و کشت محصولات مختلف در زمین کشاورزی احداث شده که باعث برش دامنه‌ها شده است. از طرف دیگر، عامل‌هایی مانند انتخاب‌نکردن مناسب مکان‌های ساخت جاده، شیب دادن نامناسب، و به‌کارنگرفتن یا قرار ندادن زه‌کش‌های مناسب در جاده که منجر به اختلال در عبور روان‌آب بارش در سطح جاده می‌شود را نیز می‌توان از عامل‌های مؤثر در وقوع برخی فرسایش‌های تونلی در اطراف جاده‌ها دانست.

پیشنهاد می‌شود از فن‌آوری پهپاد در شرایط اقلیمی و زمین‌محیطی متفاوت بهره‌گیری شود.

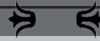
به‌کاربردن مدل‌های فیزیک محور، بررسی اثر عامل‌های زیستی (مانند موجودات حفار) بر شکل‌گیری فرسایش تونلی، بررسی افق‌های زیرسطحی خاک در مکان‌های بود و نبود فرسایش تونلی، و تعیین حجم تلفات خاک ناشی از فرسایش تونلی با تصویرهای پهپاد، از دیگر پیشنهادها پژوهشی است. علاوه بر آن، عملیات حفاظتی برای جلوگیری از تمرکز روان‌آب‌های منطقه‌های بالادست، مهندسی زیستی در داخل فرسایش تونلی برای تثبیت و جلوگیری از گسترش بیش‌تر آن‌ها در مرتع و به‌کارگیری ابزارهای کشاورزی، تغییر در نوع کاربری زمین بادرفتی و عملیات زیرساختی مانند جاده‌سازی بر اساس توان سرزمین و با مشاوره‌ی کارشناسان از جمله پیشنهادهای اجرایی در مهار یا مدیریت کردن فرسایش تونلی است.



- Bernatek-Jakiel A, Kacprzak A, Stolarczyk M. 2016. Impact of soil characteristics on piping activity in a mountainous area under a temperate climate (Bieszczady Mts., Eastern Carpathians). *Catena*. 141 (0341–8162): 117–129.
- Bernatek-Jakiel A, Wrońska-Wałach D. 2018. Impact of piping on gully development in mid-altitude mountains under a temperate climate: A dendrogeomorphological approach. *Catena*. 165 (0341–8162): 320–332.
- Castillo C, Taguas EV, Zarco-Tejada P, James MR, Gómez JA. 2014. The normalized topographic method: an automated procedure for gully mapping using GIS. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(15): 2002–2015.
- Colomina I, Molina P. 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 92 (0924–2716): 79–97.
- Cucchiario S, Cavalli M, Vericat D, Crema S, Llana M, Beinat A, Marchi L, Cazorzi F. 2018. Monitoring topographic changes through 4D-structure-from-motion photogrammetry: Application to a debris-flow channel. *Environmental Earth Sciences*. 77(18): 632–652.
- Faulkner H. 2013. Badlands in marl lithologies: A field guide to soil dispersion, subsurface erosion and piping-origin gullies. *Catena*. 106 (0341–8162): 42–53.
- Frankl A, Poesen J, Deckers J, Haile M, Nyssen J. 2013. Gully head retreat rates in the semi-arid highlands of Northern Ethiopia. *Geomorphology*. 173 (0169–555X): 185–195.
- Hosseinalizadeh M, Kariminejad N, Campetella G, Jalalifard A, Alinejad M. 2018 a. Spatial point pattern analysis of piping erosion in loess-derived soils in Golestan Province, Iran. *Geoderma*. 328 (0016–7061): 20–29.
- Hosseinalizadeh M, Kariminejad N, Alinejad M. 2018b. An application of different summary statistics for modelling piping collapses and gully headcuts to evaluate their geomorphological interactions in Golestan Province, Iran. *Catena*. 171 (0341–8162): 613–621.
- Hosseinalizadeh M, Kariminejad N, Rahmati O, Keesstra S, Alinejad M, Mohammadian Behbahani A. 2019. How can statistical and artificial intelligence approaches predict piping erosion susceptibility?. *Science of the Total Environment*. 646 (0048–9697): 1554–1566.
- Jalalifard A, Hosseinalizadeh M, Komaki ChB, Azim Mohseni M. 2018. Modeling of piping erosion in loess lands. *Journal of Environmental Erosion Research*. 4(32): 1–18. (In Persian).
- Jones JAA. 2010. Soil piping and catchment response. *Hydrological processes*. 24(12): 1548–1566.
- Kariminejad N, Hosseinalizadeh M, Pourghasemi HR, Bernatek-Jakiel A, Campetella G, Ownegh M. 2019a. Evaluation of factors affecting gully headcut location using summary statistics and the maximum entropy model: Golestan Province, NE Iran. *Science of the Total Environment*. 677 (0048–9697): 281–298.
- Kariminejad N, Hosseinalizadeh M, Pourghasemi HR, Bernatek-Jakiel A, Alinejad M. 2019b. GIS-based susceptibility assessment of the occurrence of gully headcuts and pipe collapses in a semi-arid environment: Golestan Province, NE Iran. *Land Degradation & Development*. 30 (18): 2163–2380.
- Knapen A, Poesen J. 2010. Soil erosion resistance effects on rill and gully initiation points and dimensions. *Earth Surface Processes Landform*. 35 (2): 217–228.
- Lozano-Garcia B, Parras-Alcantara L, Brevik EC. 2016. Impact of topographic aspect and vegeta-

- tion (native and reforested areas) on soil organic carbon and nitrogen budgets in Mediterranean natural areas. *Science of the Total Environment*. 544 (0048–9697): 963–970.
- Maleki S, Khormali F, Bodaghabadi MB, Mohammadi J, Hoffmeister D, Kehl M. 2018. Role of geomorphic surface on the above-ground biomass and soil organic carbon storage in a semi-arid region of Iranian loess plateau. *Quaternary International*. 134 (3–4): 178–189.
- Marzolf I, Ries JB, Poesen J. 2011. Short-term versus medium-term monitoring for detecting gully-erosion variability in a Mediterranean environment. *Earth Surface Processes and Landforms*. 36(12): 1604–1623.
- Mlambo R, Woodhouse I, Gerard F, Anderson K. 2017. Structure from motion (SfM) Photogrammetry with drone data: A low cost method for monitoring greenhouse gas emissions from forests in developing countries. *Forests*. 8 (3): 68–72.
- Peter KD, d'Oleire-Oltmanns S, Ries JB, Marzolf I, Hssaine AA. 2014. Soil erosion in gully catchments affected by land-levelling measures in the Souss Basin, Morocco, analysed by rainfall simulation and UAV remote sensing data. *Catena*. 113 (0341–8162): 24–40.
- Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G, Valentin C. 2003. Gully erosion and environmental change: Importance and research needs. *Catena*. 50(2–4): 91–133.
- Pourghasemi HR, Yousefi S, Kornejady A, Cerdà A. 2017. Performance assessment of individual and ensemble data-mining techniques for gully erosion modeling. *Science of the Total Environment*. 609 (0048–9697): 764–775.
- Seibert J, Stendahl J, Sorensen R. 2007. Topographical influences on soil properties in boreal forests. *Geoderma*. 141(1–2): 139–148.
- Stöcker C, Eltner A, Karrasch P, 2015. Measuring gullies by synergetic application of UAV and close range photogrammetry—A case study from Andalusia, Spain. *Catena*. 132 (0341–8162): 1–11.
- Teka K, Nyssen J, Teha N, Haile M, Deckers J. 2015. Soil, land use and landform relationship in the Precambrian lowlands of northern Ethiopia. *Catena*. 131(0341–8162): 84–91.
- Torri D, Poesen J. 2014. A review of topographic threshold conditions for gully head development in different environments. *Earth Science Reviews*. 130 (0012–8252): 73–85.
- Trimble Business Center. 2008. T.B.C Release 2: Capability to Efficiently Edit, Process, and Adjust Geospatial Data. Trimble Business Center, Ohio, U.S.A. [www.trimble.com](http://www.trimble.com). UNISDR. 2009. Terminology on Disaster Risk Reduction. United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR): Geneva, Switzerland.
- Tsui CC, Chen ZS, Hsieh CF. 2004. Relationships between soil properties and slope position in a lowland rain forest of southern Taiwan. *Geoderma*. 123(1–2): 131–142.
- Tziavou O, Pytharouli S, Souter J. 2017. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based mapping in engineering geological surveys: Considerations for optimum results. The address for the corresponding author was captured as affiliation for all authors. *Engineering Geology*. 232 (0013–7952): 12–21.
- Vega F, Ramírez F, Siaz M, Rosua F. 2015. Multi-temporal imaging using an unmanned aerial vehicle for monitoring a sunflower crop. *Bio-systems Engineering*. 132 (1537–5110): 19–27.
- Verachtert E, Van Den Eeckhaut M, Poesen J, Deckers J. 2010 Factors controlling the spatial distribution of soil piping erosion on loess-derived soils: A case study from central Belgium. *Geomorphology*, 118 (0169–555X): 339–348.
- Wang X, Wei H, Khormali F, Taheri M, Kehl M,

- Frechen M, Lauer M, Chen M. 2016. Grain-size distribution of Pleistocene loess deposits in northern Iran and its palaeoclimatic implications. *Quaternary International*. In Press. *Quaternary international*, 429 (1040–6182): 41–51.
- Weiler M, McDonnell JJ. 2007. Conceptualizing lateral preferential flow and flow networks and simulating the effects on gauged and ungauged hillslopes. *Water Resources Research*. 43(3): 1–13.
- Xu Q, Kou P, Wang C, Yunus AP, Xu J, Peng S, He C. 2019. Evaluation of gully head retreat and fill rates based on high-resolution satellite images in the loess region of China. *Environmental Earth Sciences*. 78(15): 465–480.
- Zhang Y, Wua Y, Liu B. 2006. Characteristics and factors controlling the development of ephemeral gullies in cultivated catchments of black soil region, Northeast China. *Soil & Tillage Research*. 96 (0167–1987): 28–41.



## ***Watershed Management Research***

VOL. 33, No. 3, Ser. No: 128, Autumn 2020, pp. 53-69  
DOI: 10.22092/wmej.2019.127717.1257

### **A Review of Spatial Monitoring of Piping Collapse Using Unmanned Aerial Vehicle in Loess-Derived Soils in the Golestan Province**

**Narges Kariminejad**

Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Dept. of Watershed & Arid Zone Management, Gorgan, Iran

**Mohsen Hosseinalizadeh**

Assistant Professor, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Dept. of Watershed & Arid Zone Management, Gorgan, Iran

**Hamid Reza Pourghasemi**

(Corresponding Author)\* Associate Professor, Department of Natural Resources and Environmental Engineering, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

Corresponding Author Email: [hporghasemi@gmail.com](mailto:hporghasemi@gmail.com)

Received: 15 September 2019

Accepted: 17 December 2019

#### **Abstract**

Piping erosion is an influential landform of intensified water erosion that interact with each other in the loess-derived soils of the Province of Golestan (NE Iran). This study attempts to emphasize the use of high-precision data through field surveys and UAV images, and then to establish a threshold to study the factors that affect piping erosion. The present study was carried out using photogrammetric drones in an area of approximately 2700 hectares in the loess lands in the east of the Province of Golestan and identified areas affected by piping erosion. A total of 833 pipes were recorded using the GPS and the orthophoto images from the UAV. Topographic, hydrological, and biological factors were treated as independent variables and piping erosion as dependent variables through statistical analyzes. The topographic factors indicated that the maximum density of piping occurred at altitudes of between 300–350 m, at maximum slope of more than 30%, at slope length less than 5m, and in concave tracts and profile curvatures. Regarding the hydrological factors, the maximum piping density occurred at the maximum numerical value of the topographic wetness index (more than 12), and at the closest distance to waterways (less than 100m). Biological factors indicated that the maximum density of pipes is in the rangelands and where this erosional facies is closest to the roads. Therefore, it can be suggested that an accurate identification of the piping erosion is facilitated through ground observations aided by high-precision areal photography and understanding causative factors developing them.

■ **Keywords:** Golestan province, Loess-derived soils, Piping, Unmanned aerial vehicle ■