

## بررسی تولید رواناب و رسوب سطحی و تونلی در خاک شور و سدیمی تحت شیب‌های مختلف

سهیلا اسمعیلیان<sup>۱</sup>، مهدی پژوهش<sup>۲\*</sup>، نسرين قرهی<sup>۳</sup> و خدایار عبداللهی<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۲/۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۴/۲۰)

### چکیده

آگاهی از میزان تغییرات رواناب و رسوب در شیب‌های مختلف می‌تواند در مدل‌سازی تولید رواناب و رسوب مفید واقع شود. از این‌رو این پژوهش با هدف بررسی تولید رواناب و رسوب سطحی و تونلی در خاک شور و سدیمی تحت شیب‌های مختلف انجام شد. برای انجام این پژوهش خاک شور و سدیمی جمع‌آوری و به آزمایشگاه منتقل شد. آزمایش‌ها روی خاک در یک مخزن مستطیل شکل در شیب‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد و تحت باران شبیه‌سازی شده با شدت ۳۰ میلی‌متر بر ساعت به مدت یک ساعت انجام شد. برای بررسی اثر شیب بر تولید رواناب و رسوب از روش تجزیه واریانس استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح پنج درصد و با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شد. نتایج نشان داد که تفاوت معنی‌دار بین شیب‌ها از نظر رواناب ( $P < 0/001$ ) و رسوب ( $P < 0/001$ ) وجود داشت. در دقایق اولیه آزمایش به دلیل عدم وجود رطوبت در خاک مقدار رواناب کم بود اما با گذشت زمان بر مقدار آن اضافه شد که دلیل آن مسدود شدن منافذ خاک در اثر فرایند پراکندگی ذرات به واسطه وجود یون سدیم و کاهش نفوذپذیری بود. همچنین در دقایق پایانی، جریان خروجی از تونل دیده شد که این جریان تنها در شیب ۱۰ و ۱۵ درصد اتفاق افتاد. مقدار رسوب نیز در دقایق اولیه کم بوده که دلیل آن را می‌توان کم بودن مقدار رواناب و عدم جابه‌جایی ذرات رسوب دانست، اما پس از گذشت زمان مقدار آن افزایش یافت که دلایل اصلی افزایش رسوب را می‌توان کاهش نفوذپذیری، افزایش رواناب و در نتیجه شسته شدن ذرات ریز از سطح خاک دانست.

واژه‌های کلیدی: فرسایش سطحی، فرسایش تونلی، آنالیز واریانس، باران شبیه‌سازی شده

۱. گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.
۲. گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.
۳. گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: drpajooesh@gmail.com

## مقدمه

فرسایش آبی یک مسئله مهم زیست‌محیطی در سراسر جهان بوده که می‌تواند منجر به تلفات خاک، کاهش حاصل‌خیزی اراضی، از بین رفتن تجهیزات و ایجاد خسارت‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی شود (۲۰). فرسایش خاک یک فرایند پیچیده بوده که تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی است، از عوامل طبیعی می‌توان به اقلیم، توپوگرافی، هیدرولوژی، خاک و پوشش گیاهی اشاره کرد (۲، ۲۴). این فرایند ممکن است توسط هر دو جریان سطحی و زیرسطحی به‌وجود آید. در سال‌های اخیر بیشتر مطالعات در زمینه فرسایش آبی و تولید رسوب، بر فرایندهای سطحی ناشی از بارش باران و رواناب مانند فرسایش سطحی، شیاری، آبراهه‌ای و گالی تمرکز کرده‌اند. همچنین مطالعات رواناب در مقیاس پلات نیز به‌طور عمده روی فرایندهای فرسایش سطحی تمرکز داشته (۷، ۱۹) و مقدار فرسایش بدون در نظر گرفتن فرسایش زیرسطحی برآورد شده است (۲۳). در صورتی که فرسایش درونی و زیرسطحی نیز ممکن است سهم بسزایی در تولید رسوب یک منطقه داشته باشد. با توجه به بررسی منابع موجود، فرسایش زیرسطحی و ایجاد تونل (Pipe) در خاک در هیچ‌یک از مدل‌های فرسایش رسوب از قبیل USLE، RUSLE، WEPP، EUROSEM یا SIDASS در نظر گرفته نشده است. فرسایش تونلی (Piping Erosion) نتیجه فعالیت جریان زیرسطحی بوده که منجر به توسعه تونل‌های زیرسطحی و در نهایت فرسایش خندقی می‌شود (۴، ۲۰). این نوع از فرسایش تحت شرایط مختلف اقلیمی، زمین‌شناسی، توپوگرافی، سنگ‌شناسی و کاربری اراضی رخ داده و اثرهای قابل توجهی بر فرایندهای هیدرولوژیک، فرسایش خاک و بار رسوب، پایداری دامنه و دیگر مسائل زیست‌محیطی دارد. به‌دلیل ماهیت زیرسطحی فرسایش تونلی، تونل‌ها در این نوع فرسایش به‌آسانی قابل شناسایی و کنترل نیستند و فقط زمانی در سطح زمین قابل شناسایی بوده که سقف آن‌ها فروریخته و یا قسمت‌های ابتدایی و انتهایی آن‌ها در سطح زمین ظاهر شده باشد (۶). در مقایسه با

دیگر شکل‌های فرسایش آبی تعداد مطالعات در مورد فرسایش تونلی کم و مطالعات در مورد سازوکارها، فاکتورها، مدل‌ها و روش‌های جلوگیری از این پدیده بسیار محدود بوده، که دلیل اصلی آن به‌طور عمده سختی و پیچیدگی مطالعه این نوع فرسایش است (۲۰). در مطالعه انجام شده توسط جونز (۱۶) نتایج نشان داد که در برخی از مناطق، تونل‌های خاک حدود ۵۰ درصد در دبی رودخانه‌ها سهم داشته است. ویلسون (۲۶) در پژوهشی که به بررسی سازوکار ایجاد جریان ثابت از طریق تونل خاکی پیوسته پرداخت، نشان داد که غلظت رسوب برای جریان تونل به تنهایی به نسبت زیاد بوده و مقدار کل تلفات خاک در حالت همراه با بارش بسیار بیشتر است.

در مطالعه‌ای با هدف بررسی تغییرات زمانی تولید رواناب و فرسایش در خاک‌هایی با بافت مختلف تحت شیب‌های متفاوت، به این نتیجه رسیدند که تولید رواناب و فرسایش، تحت تأثیر بافت خاک، درجه شیب و برهمکنش بین آن دو بوده است ( $P < 0/001$ ). در سه خاک و چهار درجه شیب، رابطه مثبت معنی‌دار بین فرسایش و رواناب وجود داشت و قوی‌ترین رابطه در خاک لوم ( $R^2 = 0/86$ ) و در شیب ۱۵ درصد بود ( $R^2 = 0/94$ ) (۲۱).

جلالی‌فر و همکاران (۱۵) به مدل‌سازی فرسایش تونلی در اراضی لسی پرداخته و به این نتیجه رسیدند که متغیرهای کاربری اراضی، مقاومت خاک، جهت جغرافیایی، شکل شیب، درصد شیب و اسیدیته خاک بیشترین تأثیر را در رخداد فرسایش تونلی به خود اختصاص داده است. گیگلو و قضاوی (۱۴) در مطالعه‌ای به ارائه مدل رگرسیونی از طریق بررسی عوامل موثر زمین‌محیطی و ویژگی‌های خاک بر رخداد فرسایش آبکندی پرداختند. نتایج حاصل از ماتریس همبستگی بین گسترش طولی آبکند و عوامل مورد بررسی نشان داد که ویژگی‌های فیزیکی حوضه آبخیز مشرف، ویژگی‌های مورفومتری آبکند و ویژگی‌های خاک در شکل‌گیری و گسترش فرسایش آبکندی در آبخیز موثر است. حساسیت زیاد خاک نسبت به ایجاد تونل‌ها با مقادیر نمک‌های محلول در

مطالعه نشان داد که ریشه گیاهان در کاهش مقدار فرسایش تونلی در خاک‌های شنی حتی در ترازهای هیدرولیکی زیاد (کمتر از یک متر) بسیار مؤثر بود.

دردی پور و همکاران (۱۱) در مطالعه‌ای به بررسی اثر شوری و سدیم بر فرسایش‌پذیری، انتقال رسوب و کیفیت پایاب حاصله در سه نوع خاک متفاوت پرداختند و به این نتیجه رسیدند که انتقال رسوب در خاک‌های تحت تیمار سدیم هشت برابر افزایش یافت. اندازه متوسط قطر خاکدانه یا ذرات خاک فرسایش یافته با افزایش نسبت جذب سطحی سدیم خاک، کاهش یافت. بنابراین غلظت زیاد سدیم موجب تضعیف خاکدانه‌ها و پراکنش آن‌ها در برابر بارندگی شد. همچنین شوری و غلظت نمک‌ها در رواناب حاصل از خاک‌های تیمار شده با سدیم با گذشت زمان به صورت نمایی کاهش یافت. همچنین دسیر و مارین (۱۹) در مطالعه‌ای دریافتند که در خاک‌های شور و سدیمی به دلیل وجود مقادیر زیاد نمک‌های محلول و غلظت زیاد سدیم، خاکدانه‌ها تضعیف شده و حساسیت آن‌ها در برابر فرسایش افزایش یافته است.

پاسخ خاک در برابر فرایندهای فرسایشی بسیار پیچیده است و با تغییر خصوصیات خاک مانند ساختمان و شرایط آن می‌تواند متفاوت باشد. این پاسخ را می‌توان در خاک‌هایی با خصوصیات شیمیایی متمایز از نظر مقدار شوری و سدیم تحت باران شبیه‌سازی شده پیش کرد. بنابراین این مطالعه به منظور بررسی روند تولید رواناب و رسوب حاصل از فرسایش سطحی و تونلی در خاک شور و سدیمی با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی انجام شد. این مطالعه می‌تواند گزینه مناسبی برای توسعه بیشتر پژوهش‌ها به منظور بررسی رابطه بین سایر پارامترهای مؤثر در فرسایش تونلی و مقدار رسوب حاصل از آن باشد. همچنین با توجه به اهمیت فرسایش سطحی و تونلی و پژوهش‌های آزمایشگاهی محدود در این زمینه، این مطالعه می‌تواند پایه مناسبی برای مطالعات آتی در زمینه فرسایش تونلی مانند پیش‌بینی توسعه تونل‌ها، شبیه‌سازی تولید رسوب، انتقال و رسوب‌گذاری در تونل‌های خاک باشد.

خاک و وجود خاک‌های واگرا مرتبط است. همچنین شواهد زیادی وجود دارد که نشان می‌دهد میزان سدیم در خاک (هم در نسبت جذب سدیم و هم در درصد سدیم تبادل) ممکن است حساسیت خاک‌ها به پراکندگی و ایجاد فرسایش تونلی را افزایش دهد (۳). مطالعه دیگری که توسط کریم پوریحان و همکاران (۱۷) انجام شده است به بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سازند قرمز بالایی در ایجاد و توسعه شکل‌های فرسایش تونلی پرداختند. نتایج نشان داد که دو فاکتور بافت خاک و خصوصیات شیمیایی خاک‌ها از قبیل EC، pH، SAR و ESP تأثیر بیشتری نسبت به فاکتورهای دیگر داشت. ویلسون و همکاران (۲۵) به بررسی فرسایش خندقی توسط جریان از طریق تونل‌های حاکی ناپیوسته پرداختند و به این نتیجه رسیدند که کل تلفات خاک به وسیله فرسایش سطحی همراه با باران و جریان تونلی به صورت ترکیبی حدود چهار برابر بیشتر از بارش به تنهایی است. همچنین تحت شرایط بارش به همراه جریان تونل، تلفات خاک از طریق تلفات توده‌ای نزدیک به ۲۰ بار بیشتر از فرسایش ورقه‌ای ناشی از بارش به تنهایی است. وراکرت و همکاران (۲۲) به بررسی فاکتورهای مؤثر بر توزیع مکانی فرسایش تونلی در خاک‌های لسی پرداخت. نتایج حاکی از آن است که احتمال فرسایش تونلی روی دامنه‌ها به طرز چشم‌گیری در شکل مقعر پروفیل شیب و با تجاوز شیب از هشت درصد افزایش یافت. همچنین مناطق دارای لایه‌های سطحی لس روی لایه به نسبت نازک از رس‌های هم‌جنس تمایل بیشتری برای فرسایش تونلی داشت و خصوصیات خاک اهمیت کمتری در وقوع این فرسایش داشت. اثرهای ریشه گیاهان روی پدیده فرسایش تونلی در خاک‌های شنی مورد ارزیابی قرار گرفت (۵). آزمایش‌ها در ترازهای هیدرولیکی مختلف (مثل ۵۰، ۱۸۰، ۳۸۰ و ۱۰۲۰ میلی‌متر) انجام شد و نتایج نشان داد که ترازهای هیدرولیکی رابطه مستقیم با دبی جریان تونل و غلظت رسوب داشت، اگرچه وجود ریشه گیاهان (تراکم ریشه) رابطه منفی با این خصوصیات از تونل‌های حاکی داشت. در مجموع، این

## مواد و روش‌ها

## منطقه نمونه برداری خاک

ورزنه یک شهر کویری مرکزی در استان اصفهان است (شکل ۱). از نظر جغرافیایی بین ۲۰° ۳۲' تا ۳۴' ۳۲° عرض شمالی و ۵۰° ۵۲' و ۵۲° ۵۲' طول شرقی قرار دارد. میانگین ارتفاع در این منطقه ۱۴۷۷ متر (میانگین سطح دریا) بوده و همانند اکثر نقاط ایران مرکزی، آب و هوای کاملاً خشک و کویری دارد. متوسط نرخ تبخیر سالانه ۳۲۶۵ میلی‌متر است. خاک شور و سدیمی استفاده شده از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری برداشته و به آزمایشگاه منتقل شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. برای این منظور بافت خاک به روش هیدرومتری تعیین شد. جرم مخصوص ظاهری به روش سیلندر مشخص شد. مقادیر pH و هدایت الکتریکی (EC) با استفاده از pH متر و EC متر اندازه‌گیری شد. مقدار یون سدیم نیز با استفاده از دستگاه فلیم فتومتر (۹) تعیین شد. همچنین برای اندازه‌گیری ماده آلی خاک از روش تیتراسیون استفاده شد.

## مطالعات آزمایشگاهی

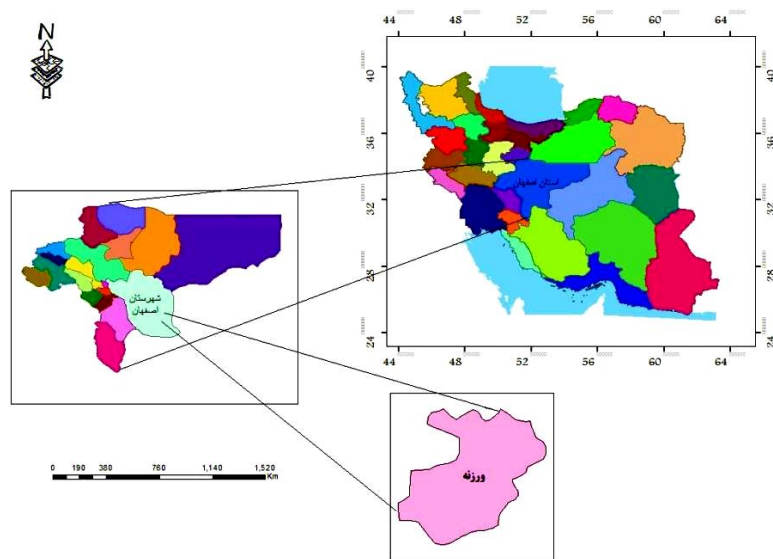
آزمایش‌ها روی خاک در یک مخزن مستطیل شکل در شیب‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد انجام شد. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، خاک موجود در مخزن به صورت دو لایه بوده که ۵ سانتی‌متر پایین بستر خاک به‌عنوان لایه غیرقابل نفوذ با بافت لومی رسی و ۱۵ سانتی‌متر خاک بالای لایه غیرقابل نفوذ است.

مخزن مورد استفاده از پلکسی گلاس شفاف به ضخامت یک سانتی‌متر ساخته شد. برای ایجاد تونل در خاک یک لوله پلاستیکی به قطر یک سانتی‌متر و طول ۱۵۰ سانتی‌متر قبل از پر کردن مخزن خاک به‌طور دقیق روی لایه غیرقابل نفوذ در طول بستر خاک قرار گرفت. پس از پر کردن مخزن با خاک، لوله

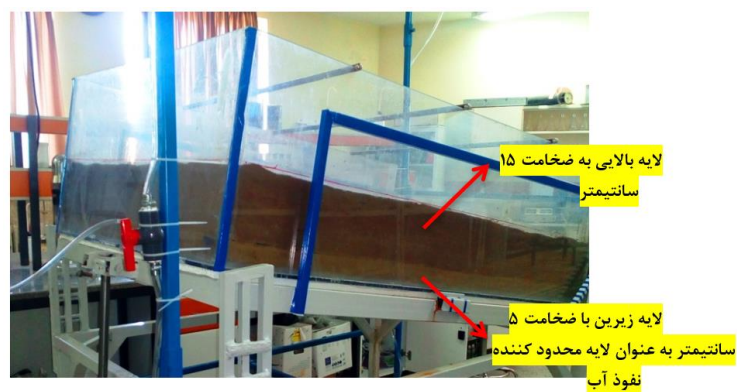
پلاستیکی از زیر خاک بیرون کشیده و تونلی به قطر یک سانتی‌متر ایجاد شد. به‌منظور آماده‌سازی خاک برای انجام آزمایش‌ها، خاک تا زمان رسیدن به چگالی خاک مرجع به‌طور متناوب مرطوب و خشک شد.

همان‌طور که در شکل ۳-الف نشان داده شده است، مخزن خاک روی یک پایه آهنی قرار گرفته که به‌واسطه جک هیدرولیکی قابلیت قرارگیری در شیب‌های مخالف را دارد. از آنجا که وقوع رخدادهای طبیعی باران (شدت و مدت بارش) به دقت قابل پیش‌بینی نیست، بنابراین برای شبیه‌سازی بارش و بررسی میزان تولید رواناب و رسوب از یک دستگاه شبیه‌ساز باران استفاده شد (شکل ۳-الف). این دستگاه از یک سطح بارش به ابعاد یک در یک و نیم متر تشکیل شده که در ارتفاع ۱۸۰ سانتی‌متری از سطح زمین قرار داشت. این دستگاه توانایی تولید قطراتی با قطر حدود ۲/۵ میلی‌متر با شدت‌های متغیر (از ۳۰ تا ۱۲۰ میلی‌متر در ساعت) را دارا بود. آب تحت فشار ثابت به صفحه بارش وارد شده و به‌طور یکنواخت بر سطح خاک تحت آزمایش به‌طور ثقلی برخورد می‌کرد. شدت بارش برابر با ۳۰ میلی‌متر در ساعت بود که بر مبنای شدت‌های فرساینده باران در منطقه به‌دست آمد (۱۳). همچنین این شدت بارندگی در محدوده شدت‌های باران منطقه قرار داشت. اولین بارش ایجاد شده روی سطح خاک در شرایط به‌طور کامل هوا خشک بود و در دفعات بعدی، رطوبت اولیه خاک قبل از بارش باران با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج اندازه‌گیری شد.

گفتنی است که هر آزمایش سه بار تکرار و در نهایت تعداد نه آزمایش انجام شد. مدت زمان انجام هر آزمایش یک ساعت بود و نمونه‌های رواناب با فواصل پنج دقیقه‌ای جمع‌آوری شد. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است رواناب سطحی و تونلی به‌طور جداگانه جمع‌آوری شد. مقدار رسوبات نیز پس از ته‌نشین شدن و کشیدن آب اضافی و خشک شدن آن‌ها اندازه‌گیری شد.



شکل ۱. موقعیت مکانی شهر ورزنه



شکل ۲. لایه‌های تشکیل دهنده خاک مورد مطالعه



(ب)



(الف)

شکل ۳. (الف) تجهیزات به کار رفته در انجام آزمایش‌ها، و (ب) نمای دید بخش انتهایی مخزن خاک



شکل ۴. جمع‌آوری رواناب سطحی و تونلی

### تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای بررسی اثر شیب بر تولید رواناب و رسوب از روش تجزیه واریانس استفاده شد و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح پنج درصد انجام شد. به این منظور از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ استفاده شد. همچنین تغییرات تولید رواناب و رسوب تحت تأثیر شیب‌های مختلف به صورت نمودارهایی با استفاده از نرم‌افزار Excel نسخه ۲۰۱۳ رسم شد. پیش از تحلیل داده‌ها، نرمال بودن توزیع داده‌های رواناب و رسوب جداگانه مورد بررسی قرار گرفت.

### نتایج و بحث

#### ویژگی‌های خاک مورد بررسی

بر اساس نتایج به دست آمده و مثلث بافت خاک، خاک مورد استفاده دارای بافت لومی، مواد آلی ۲/۲ درصد و جرم مخصوص ظاهری ۱/۱۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود. pH خاک برابر با ۶/۸۲ و بر اساس طبقه‌بندی‌ها این خاک به دلیل زیاد بودن مقادیر EC (۳۱۸/۴ دسی‌زیمنس بر متر) و مقدار یون سدیم (۲۸۲۱/۴ میلی‌اکی‌والان بر لیتر) در دسته خاک‌های شور و سدیمی و رده اریدیسول قرار گرفت (جدول ۱).

#### تغییرات رواناب و رسوب در شیب‌های مورد بررسی

با توجه به جدول ۲، نتایج آنالیز واریانس نشان داد که شیب اثر معناداری بر تولید رواناب ( $P < 0/001$ ) و رسوب ( $P < 0/001$ )

داشت. دلیل این موضوع، افزایش سرعت رواناب و فقدان فرصت کافی برای نفوذ در شیب‌های بیشتر نسبت به شیب‌های کمتر بود. عباسی و همکاران (۱) نیز در پژوهشی نشان دادند که با افزایش درصد شیب حجم رواناب به طور معناداری زیاد می‌شود. اکوئه و همکاران (۱۲) و زارع و همکاران (۲۷) نیز در مطالعات خود به افزایش میزان هدررفت خاک در پی افزایش شیب اشاره کردند. شکل ۵ روند تولید رواناب را در بارش ۳۰ میلی‌متر بر ساعت و در سه شیب ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد نشان داده است. بر اساس نتایج با افزایش شیب تولید رواناب نیز افزایش یافت.

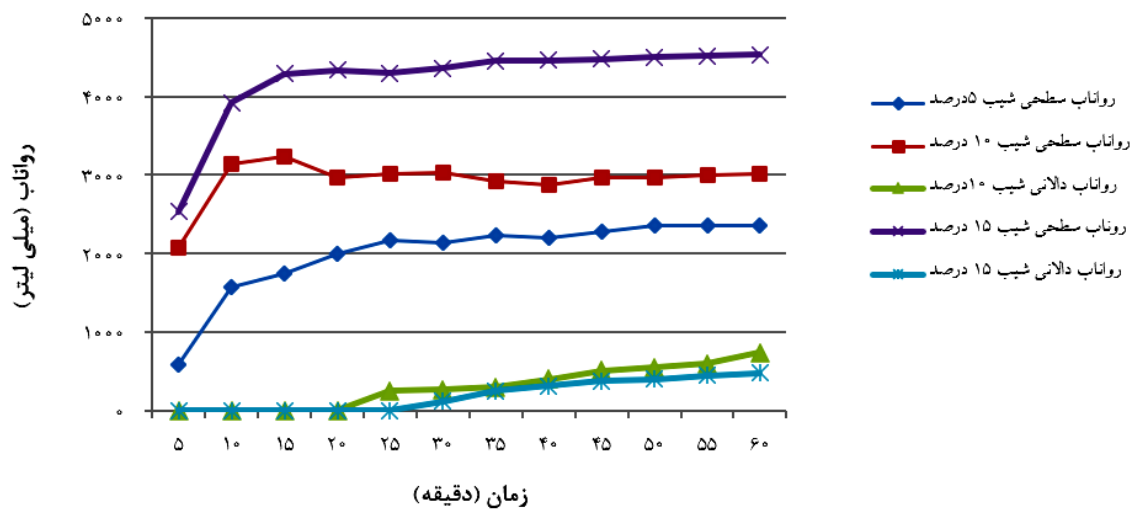
همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، در هر سه شیب، در اولین مقطع زمانی ۵ دقیقه‌ای مقدار رواناب کم بود و بعد به صورت ناگهانی افزایش یافت که می‌توان دلیل آن را خشک بودن خاک و تخریب کم ساختمان خاک و در نتیجه تولید رواناب کم در دقایق اولیه آزمایش دانست. شیب ۵ درصد کمترین مقدار رواناب سطحی را به خود اختصاص داد. در شیب ۱۰ و ۱۵ درصد نیز در دقایق اولیه مقدار تولید رواناب کم بود و به تدریج با گذشت زمان بر مقدار آن اضافه شد. دلیل اصلی افزایش رواناب، سدیم موجود در خاک بود که منجر به پراکندگی ذرات و مسدود شدن منافذ خاک شد که موجب کاهش نفوذپذیری، افزایش رواناب و در نهایت افزایش پتانسیل فرسایش خاک شد. این موضوع با یافته‌های دسیر و مارین (۱۰) مطابقت داشت. همچنین کم بودن مقدار نفوذ آب داخل خاک باعث شد که در دقایق اولیه بارش

جدول ۱. مشخصات خاک مورد مطالعه

درصد سدیم تبادل	نسبت جذب سدیم	مقدار یون سدیم	هدایت الکتریکی	pH	مواد آلی	چگالی بافت	رس	سیلت	شن
ESP	SAR	(meq lit <sup>-1</sup> )	(ds m <sup>-1</sup> )		(%)	(gr cm <sup>-3</sup> )	(%)	(%)	(%)
>15	>13	2821/4	318/4	6/82	0/69	1/16	لوم	44	48

جدول ۲. آنالیز واریانس یکطرفه اثر شیب روی رواناب و رسوب

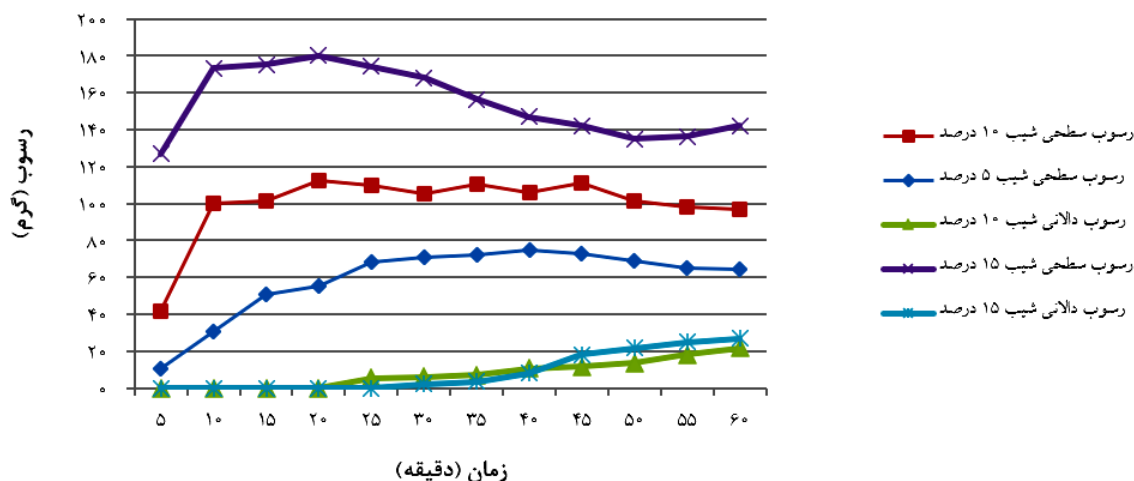
درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	آماره F	سطح معنی داری
DF	Sum of Squares	Mean Square	F	Significance
۲	۳۳۷۴۴۹۷۱/۹۳۲	۱۶۸۷۲۴۸۵/۹۶۶	۶۱/۶۷۶	۰/۰۰۰
۳۳	۹۰۲۷۶۹۳/۶۷۶	۲۷۳۵۶۶/۴۷۵		
۳۵	۴۲۷۷۲۶۶۵/۶۰۷			
-----				
۲	۶۴۵۵۷/۲۸۲	۳۲۲۷۸/۶۴۱	۸۷/۱۳۱	۰/۰۰۰
۳۳	۱۲۲۲۵/۲۴۱	۳۷۰/۴۶۲		
۳۵	۷۶۷۸۲/۵۲۳			



شکل ۵. مقادیر رواناب در شیب‌های مختلف

آب به راحتی می‌تواند روی این شیب حرکت نماید. شکل ۶ روند تولید رسوب را نشان داده است. همان‌طور که واضح است مقدار رسوب نیز در دقایق اولیه کم بود و پس از گذشت زمان افزایش یافت که دلیل آن را می‌توان کم بودن مقدار رواناب و عدم جابه‌جایی ذرات رسوب در دقایق اولیه آزمایش دانست. بر اساس نتایج با گذشت زمان به دلیل تخریب بیشتر خاک و

هیچ‌گونه جریانی از تونل خاک خارج نشود، اما با گذشت زمان در دقایق پایانی جریان خروجی از تونل دیده شد که این جریان تنها در شیب ۱۰ و ۱۵ درصد اتفاق افتاد. همان‌طور که در شکل ۵ مشخص است، این جریان در شیب ۱۰ درصد زودتر به وقوع پیوست. علت این امر را می‌توان شیب دانست، زیرا در شیب ۱۰ درصد آب به اندازه کافی فرصت نفوذ داشته و هم اینکه



شکل ۶. مقادیر رسوب در شیب‌های مختلف

افزایش رسوب (P<۰/۰۰۱) و رسوب (P<۰/۰۰۱) داشت. در اولین مقطع زمانی ۵ دقیقه‌ای مقدار رواناب کم بود و بعد به‌صورت ناگهانی افزایش یافت که می‌توان دلیل آن را خشک بودن خاک، تخریب کم ساختمان خاک و در نتیجه تولید رواناب کم در دقایق اولیه آزمایش دانست. سدیم موجود در خاک نیز منجر به تخریب ساختمان خاک، پراکندگی ذرات و مسدود شدن منافذ خاک شد که موجب کاهش نفوذپذیری، افزایش رواناب و در نهایت افزایش پتانسیل فرسایش خاک شد. همچنین کم بودن مقدار نفوذ آب به داخل خاک باعث شد که در دقایق اولیه بارش هیچ‌گونه جریانی از تونل خاک خارج نشود، اما با گذشت زمان در دقایق پایانی جریانی خروجی از تونل دیده شد که این جریان تنها در شیب ۱۰ و ۱۵ درصد اتفاق افتاد. مقدار رسوب نیز در دقایق اولیه کم بود که دلیل آن را می‌توان کم بودن مقدار رواناب و عدم جابه‌جایی ذرات رسوب دانست اما پس از گذشت زمان مقدار آن افزایش یافت که دلایل اصلی افزایش رسوب را می‌توان افزایش رواناب، پراکندگی ذرات خاک به واسطه وجود یون سدیم و در نتیجه شسته شدن ذرات ریز از سطح خاک دانست.

### سپاسگزاری

بدین وسیله از زحمات آقای دکتر علی مختاری که ما را در انجام مطالعات آزمایشگاهی یاری فرمودند کمال تشکر و قدردانی را داریم.

افزایش رطوبت اولیه، مقدار خاک فرسایش یافته و در نتیجه تولید رسوب نیز افزایش یافت. همچنین دلایل اصلی افزایش رسوب را می‌توان کاهش نفوذپذیری، افزایش رواناب، پراکندگی خاکدانه‌ها بر اثر وجود سدیم در خاک و در نتیجه شسته شدن ذرات ریز از سطح خاک دانست. به طوری که کومار و داس (۱۸) بیان کردند، رسوب دهی یک خاک در هر زمان تحت تأثیر باران و رواناب حاصل از آن قرار دارد. پژوهشگرانی از جمله کانتون و همکاران (۸) و اسلامی و واعظی (۱۳) نیز در مطالعات خود به نتایجی همسو با این نتایج دست یافتند و به افزایش میزان هدررفت خاک در پی افزایش شیب اشاره کردند.

همزمان با ایجاد رواناب تونلی، رسوب تونلی نیز ایجاد شده و از قسمت انتهایی تونل به بیرون منتقل شده است. مقدار رسوبات تونلی در ابتدا کم بوده و با گذشت زمان و نفوذ بیشتر آب باران در خاک و در نتیجه افزایش رواناب جاری در تونل بر مقدار آن اضافه شده است. برخلاف رواناب تونلی که در شیب ۱۰ درصد مقدار بیشتری نسبت به شیب ۱۵ درصد داشت، رسوب تونلی در شیب ۱۵ درصد مقادیر بیشتری نسبت به شیب ۱۰ درصد داشت که می‌توان دلیل آن را شیب زیاد و سرعت بیشتر جریان رواناب و در نتیجه انتقال بیشتر ذرات رسوب دانست.

### نتیجه‌گیری

نتایج آنالیز واریانس نشان داد که شیب اثر معناداری بر تولید رواناب



## منابع مورد استفاده

1. Abbasi, M., A. Najafinejad, V. B. Sheikh and M. Azim Mohseni. 2017. Investigating land use and slope effects on soil properties, runoff and sediment using rainfall simulator case study of Kechik watershed in Golestan Province. *Quarterly Journal of Environmental Erosion Research, Hormozgan University* 6(4): 104-124 (in Persian).
2. Anache, J. A., D. C. Flanagan, A. Srivastava and E. C. Wendland. 2018. Land use and climate change impacts on runoff and soil erosion at the hillslope scale in the Brazilian Cerrado. *Science of the Total Environment* 622: 140-51.
3. Beckedahl, H., J. Jones and U. Hardenbicker. 2022. Soil Piping: Problems and Prospects. PP. 43-217. *In: Applied Geomorphology and Contemporary Issues*, Springer.
4. Bernatek-Jakiel, A. and J. Poesen. 2018. Subsurface erosion by soil piping: Significance and research needs. *Earth-Science Reviews* 185:1107-28.
5. Bernatek-Jakiel, A., W. Vannoppen and J. Poesen. 2017. Assessment of grass root effects on soil piping in sandy soils using the pinhole test. *Geomorphology* 295: 563-71.
6. Bernatek, A. 2015. The influence of piping on mid-mountain relief: a case study from the Polish Bieszczady Mts.(Eastern Carpathians). *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences* 10: 107-120.
7. Boix-Fayos, C., M. Martínez-Mena, E. Arnau-Rosalén, A. Calvo-Cases, V. Castillo and J. Albaladejo. 2006. Measuring soil erosion by field plots: Understanding the sources of variation. *Earth-Science Reviews* 78: 267-85.
8. Cantón, Y., A. Solé-Benet, C. Asensio, S. Chamizo and J. Puigdefábregas. 2009. Aggregate stability in range sandy loam soils relationships with runoff and erosion. *Catena* 77: 192-9.
9. Chapman, H. and P. Pratt. 1978. Methods of Analysis for soils, plants and waters. *University of California Los Angeles*, 150-179.
10. Desir, G. and C. Marín. 2013. Role of erosion processes on the morphogenesis of a semiarid badland area. Bardenas Reales (NE Spain). *Catena* 106: 83-92.
11. Dordipour, E., H. Ghadiri and J. Hussein. 2007. The influence of salinity and sodicity on soil erodibility, sediment transport and downstream water quality from three contrasting soils. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources* 14(4): 41-52 (In Persian).
12. Ekwue, E., C. Bharat and K. Samaroo. 2009. Effect of soil type, peat and farmyard manure addition, slope and their interactions on wash erosion by overland flow of some Trinidadian soils. *Biosystems Engineering* 102: 236-43.
13. Eslami, S. F. and A. R. Vaezi. 2016. Runoff and Sediment Production under the Similar Rainfall Events in Different Aggregate Sizes of an Agricultural Soil. *Journal of Water and Soil* 29(6): 1590-1600 (In Persian).
14. Giglou, F. and B. R. Ghazavi. 2018. The role of physicochemical characteristics of gully soil and environmental factors of its upper-catchment area in the expansion of gully erosion. *Journal of Water and Soil Science* 22(3): 273-86 (In Persian).
15. Jalali Fard, A., M. Hossein Alizadeh, Ch. B. kamki and M. Azim Mohseni. 2016. A brief survey of piping erosion in the loess deposits of Akli Agzali, Golestan province. *In: The Second National Conference on Sustainable Management of Soil and Environmental Resources (Quality, Health and Safety)*, Kerman, Iran (In Persian).
16. Jones, J. 2010. Soil piping and catchment response. *Hydrological Processes* 24: 1548-1566.
17. KarimPour, M. and N. Mashhadi. 2003. Investigating the physical and chemical characteristics of the Upper Red Formation in the creation and development of tunnel erosion forms (PIPING). *Desert* 8(1): 20-23 (In Persian).
18. Kumar, A., G. Das. 2000. Dynamic model of daily rainfall, runoff and sediment yield for a Himalayan watershed. *Journal of Agricultural Engineering Research* 75: 189-93.
19. Maetens, W., M. Vanmaercke, J. Poesen, B. Jankauskas, G. Jankauskiene and I. Ionita. 2012. Effects of land use on annual runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean: A meta-analysis of plot data. *Progress in Physical Geography* 36: 599-653.
20. Poesen, J. 2018. Soil erosion in the Anthropocene: Research needs. *Earth Surface Processes and Landforms* 43: 64-84.
21. Vaezi, A. and E. Mohammadi. 2022. Temporal Variation Pattern of Runoff Generation and Rill Erosion in Different Soils and Slope Gradients. *Journal of Water and Soil Science* 25(4): 19-31 (In Persian).
22. Verachtert, E., M. Van Den Eeckhaut, J. Poesen and J. Deckers. 2010. Factors controlling the spatial distribution of soil piping erosion on loess-derived soils: A case study from central Belgium. *Geomorphology* 118: 339-48.
23. Verheijen, F. G., R. J. Jones, R. Rickson and C. Smith. 2009. Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. *Earth-Science Reviews* 94: 23-38.
24. Wei, W., L. Chen, L. Yang, B. Fu and R. Sun. 2012. Spatial scale effects of water erosion dynamics: Complexities, variabilities, and uncertainties. *Chinese Geographical Science* 22: 127-43.
25. Wilson, G., R. Cullum and M. Römkens. 2008. Ephemeral gully erosion by preferential flow through a discontinuous soil-pipe. *Catena* 73: 98-106.
26. Wilson, G. V. 2009. Mechanisms of ephemeral gully erosion caused by constant flow through a continuous soil-pipe. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*

34: 1858-66.

27. Zare, K. M., A. Najafinejad, N. Noura and A. Kavian. 2012. Effects of slope and soil properties on runoff and soil loss using rainfall simulator, Chehel-chai watershed, Golestan province. *Journal of Water and Soil Conservation* 19(2): 165-178 (In Persian).

## Investigation of the Surface and Tunnel Runoff and Sediment Production in Saline-Sodic Soil under Different Slopes

S. Esmailian<sup>1</sup>, M. Pajooresh<sup>1\*</sup>, N. Gharahi<sup>2</sup> and Kh. Abdollahi<sup>1</sup>

(Received: April 25-2023 ; Accepted: July 11-2023)

### Abstract

Awareness of the number of changes in runoff and sediment on different slopes can be useful in modeling the production of runoff and sediment. Therefore, this study was conducted to investigate the production of surface and tunnel runoff and sediment in saline and sodic soils on different slopes. Saline-sodic soil was collected and transported to the laboratory. Laboratory experiments were performed on a soil bed in a rectangular flume at three different slopes (5%, 10%, and 15%) under simulated rain (30 mm/h) for one hour. An analysis of variance was used to investigate the effect of slope on runoff and sediment production, and the means were compared using Duncan's test at the five percent level using SPSS version 26 software. The results showed that there was a significant difference between the slopes of the runoff ( $P < 0.001$ ) and sediment ( $P < 0.001$ ). In the first minute of the experiments, due to the lack of moisture in the soil, the amount of runoff was low, but over time, the amount of runoff increased. It is because the pores are blocked by the dispersion of soil particles owing to the presence of sodium ions, which ultimately leads to a decrease in permeability. Similarly, in the last few minutes, outflow from the tunnel was observed, and this flow occurred only on slopes of 10% and 15%. The amount of sediment was also low in the first few minutes, which could be related to the low amount of runoff and the lack of sediment particle removal. Nonetheless, after the lapse of time, its amount increased, and the primary reasons were reduced permeability, increased runoff, and removal of fine particles from the soil surface.

**Keywords:** Surface erosion, Tunnel erosion, Analysis of variance, Simulated rainfall

---

1. Department of Natural Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Chaharmahal and Bakhtiari, Iran

2. Department of Environment engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Chaharmahal and Bakhtiari, Iran

\*: Corresponding author, Email: drpajooresh@gmail.com