

الگوی تغییرات زمانی رواناب و رسوب سطحی و فرسایش تونلی در خاک سیلت لوم تحت شیب‌های مختلف با استفاده از باران‌ساز مصنوعی

سهیلا اسمعیلیان^۱، مهدی پژوهش^{۱*}، نسرین قرهی^۲، خدایار عبداللهی^۱ و غلامرضا شمس^۳

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۸/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۹)

چکیده

مطالعه فرایند فرسایش خاک و ارزیابی عوامل مؤثر در آن از مهم‌ترین پیش‌نیازهای مدیریت صحیح منابع آب و خاک است. پژوهش حاضر به منظور بررسی مجموع رواناب و رسوب سطحی و تونلی با استفاده از باران‌ساز مصنوعی بر روی خاک سیلت لوم در آزمایشگاه انجام شد. برای انجام این پژوهش ابتدا خاک از منطقه مورد نظر جمع‌آوری و به آزمایشگاه منتقل شد. آزمایش‌ها در یک مخزن خاک مستطیل‌شکل همراه با سه تونل در شیب‌های ۲، ۶، ۱۰، ۱۴ و ۱۸ درصد و تحت باران شبیه‌سازی شده با شدت ۳۰ میلی‌متر بر ساعت به مدت ۶۰ دقیقه انجام شد. برای تحلیل نتایج نمودارهای مربوطه در محیط Excel رسم شد. همچنین برای بررسی همبستگی بین مقادیر رواناب و رسوب در هر شیب از آزمون همبستگی اسپیرمن در نرم‌افزار SPSS استفاده شد. نتایج نشان داد که با افزایش شیب مجموع رواناب و رسوب سطحی و تونلی در طی زمان افزایش داشت. برای نمونه در شیب دو درصد مقدار رواناب و رسوب در دقایق ابتدایی آزمایش از صفر به مقدار ۳/۱ لیتر و ۲۶/۲ گرم بر مترمربع در پایان آزمایش رسید. همچنین ضریب همبستگی بین رواناب و رسوب نیز در شیب‌ها به ترتیب برابر با ۰/۹۸، ۰/۶۲، ۰/۴، ۰/۹۳ و ۰/۱۵ بوده است. باتوجه به سطح معناداری، رابطه بین دو متغیر در برخی از شیب‌ها معنادار و در برخی دیگر به دلیل وجود ریزش در خاک معنادار نبوده است.

واژه‌های کلیدی: فرسایش آبی، فرسایش سطحی، آزمون همبستگی اسپیرمن، باران شبیه‌سازی شده

۱. گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

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

۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

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

مقدمه

خاک یکی از با ارزش‌ترین منابع حیاتی و مهم‌ترین منبع تولید مواد غذایی در جهان است (۲۳). فرسایش خاک فرایندی ژئومورفیک بوده که می‌تواند منجر به تلفات خاک، کاهش حاصلخیزی اراضی، از بین رفتن تجهیزات و ایجاد خسارت‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی شود (۲۲). یکی از انواع فرسایش، آبی بوده که شامل فرایندهای جداسازی، انتقال و رسوب ذرات خاک توسط قطرات باران و جریان رواناب است (۱۳). یکی از شکل‌های مهم فرسایش آبی، فرسایش سطحی بوده که منجر به جدا شدن ذرات از لایه نازک خاک سطحی در اثر ضربه قطرات باران یا جریان سطحی کم عمق می‌شود (۷). فرسایش تونلی از جمله فرسایش‌های آبی بوده که رخداد آن سبب تغییرات بارز در منظر زمین و تخریب محیط زیست می‌شود. این نوع فرسایش نتیجه فعالیت جریان زیرسطحی بوده که در اثر انحلال منجر به توسعه تونل‌های زیرسطحی و در نهایت فرسایش خندقی می‌شود (۲). فرسایش تونلی باتوجه‌به عملکرد پیچیده تشکیل و مشکلات اندازه‌گیری در مقایسه با فرسایش سطحی، کمتر مطالعه شده است (۲۰، ۲۲). طبق مطالعات انجام شده، عوامل متعددی بر شدت فرسایش سطحی اثر می‌گذارند. این عوامل شامل ویژگی‌های خاک (بافت، ساختمان، رطوبت و ...)، ویژگی‌های باران (مقدار، شدت و اندازه قطرات) و شرایط زمین مثل شیب و پوشش گیاهی است (۸). مطالعه‌ای که به بررسی عوامل مؤثر در فرسایش آبی پرداخته است، نشان داد که شیب و پوشش گیاهی نقش مهمی در مقدار فرسایش داشته‌اند (۱۲). شیب از جمله عواملی بوده که با تأثیر بر میزان تولید جریان و در نتیجه نیروهای فرساینده خاک، میزان فرسایش را تحت تأثیر قرار می‌دهد. شد کلی با افزایش شیب، قدرت جریان و همچنین فرساینده‌گی آن افزایش می‌یابد (۶، ۳۱). همچنین شیب می‌تواند نفوذ، رواناب و عملکرد رسوب را تحت شرایط بارندگی با تغییر رطوبت اولیه خاک تغییر داده و بر رواناب و رسوب ایجاد شده تأثیر داشته باشد (۲۷). چن و همکاران (۵) در مطالعه‌ای به مدلسازی اثر

شیب و توپوگرافی بر رواناب و بار رسوب پرداختند. نتایج نشان داد که شیب اثر قابل توجهی بر رطوبت خاک و رواناب ایجاد شده دارد ($P < 0/001$). در مطالعه دیگری 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 بوده است ($R^2 = 0/94$) (۲۵). سوهوا و همکاران (۱۴) در پژوهشی به بررسی اثر شیب بر فرسایش در شیب‌های کوتاه پرداختند. نتایج نشان داد که شیب اثر عمده بر جدایش ذرات و انتقال آن‌ها به خصوص در زمان وقوع جریان‌های ضعیف می‌گذارد. مطالعه دیگری توسط محمد خان و همکاران (۱۹) با هدف تعیین رابطه شدت فرسایش با درصد شیب در حوزه آبخیز سد لتیان انجام شده است. نتایج حاکی از آن بوده که شیب‌های ۲۰ تا ۴۰ درصد بیشترین سهم را در امر فرسایش داشته‌اند. در شیب‌های کمتر کم‌بودن شیب باعث کم‌شدن فرسایش و در شیب‌های بیشتر وجود توده‌های سنگی و عدم وجود خاک از عوامل اصلی کم‌شدن فرسایش به شمار می‌روند. در زمینه فرسایش تونلی نیز مطالعاتی انجام شده که حاکی از آن بوده که متوسط سالانه هدررفت خاک ناشی از فرسایش تونلی در محدوده ای از لهستان ۲/۳ الی ۴/۶ تن در هکتار گزارش شده که نسبت به تلفات خاک ناشی از فرسایش سطحی و شیب‌های در کاربری‌های یکسان بیشتر است (۲۶). ویلسون (۲۹) در پژوهشی که به بررسی مکانیزم ایجاد جریان ثابت از طریق تونل خاکی پیوسته پرداخت، نشان داد که غلظت رسوب برای جریان تونل به تنهایی تا حدودی زیاد بوده و مقدار کل تلفات خاک در حالت همراه با بارش بسیار بیشتر بوده است. مطالعه‌ای توسط وراکرت و همکاران (۲۶) انجام شد که به بررسی فاکتورهای مؤثر بر توزیع مکانی فرسایش تونلی در خاک‌های لسی پرداخته شده است. نتایج حاکی از آن است که فرسایش

جغرافیایی بین $23^{\circ} 50' 50''$ تا $24^{\circ} 50' 50''$ طول شرقی و $21^{\circ} 08' 32''$ تا $21^{\circ} 09' 32''$ عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). ارتفاع متوسط این منطقه ۲۱۸۱ متر (میانگین سطح دریا) بوده است. متوسط دمای سالانه از $8/5-$ تا 13 درجه سانتی‌گراد متغیر بوده و متوسط بارندگی سالانه ۳۲۱ میلی‌متر است. خاک موردنظر از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری برداشته و به آزمایشگاه منتقل شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. بافت خاک به روش هیدرومتری و جرم مخصوص ظاهری به روش سیلندر تعیین شد. برای اندازه‌گیری ماده آلی خاک نیز از روش تیتراسیون استفاده شد (۲۴).

مطالعات آزمایشگاهی

پس از انتقال خاک جمع‌آوری شده به آزمایشگاه، خاک توسط الک دو میلی‌متری الک شده و در داخل مخزن آزمایش ریخته شد. خاک موجود در مخزن به صورت دولایه بوده که ۵ سانتی‌متر پایین بستر خاک به عنوان لایه غیرقابل نفوذ با بافت لومی رسی و ۱۵ سانتی‌متر خاک بالای لایه غیرقابل نفوذ با بافت سیلتی لوم است (شکل ۲).

مخزن آزمایش از پلکسی‌گلاس شفاف به عرض ۱۰۰، طول ۱۵۰، عمق ۵۰ و ضخامت یک سانتی‌متر ساخته شد (۲۹). برای ایجاد تونل در خاک سه لوله پلاستیکی به قطر یک سانتی‌متر و طول ۱۵۰ سانتی‌متر قبل از پرکردن مخزن خاک به دقت روی لایه غیر قابل نفوذ در طول بستر خاک قرار گرفت. پس از پر کردن مخزن با خاک، لوله‌های پلاستیکی از زیرخاک بیرون کشیده و سه تونل به قطر یک سانتی‌متر ایجاد شد (۲۸، ۲۹). به منظور آماده‌سازی خاک برای انجام آزمایش‌ها، خاک تا زمان رسیدن به چگالی خاک مرجع شد متناوب مرطوب و خشک شده است.

همان‌طور که در شکل ۳- الف نشان داده شده است، مخزن خاک روی یک پایه آهنی قرار گرفته که بواسطه جک هیدرولیکی قابلیت قرارگیری در شیب‌های مخالف را دارد. از آنجا

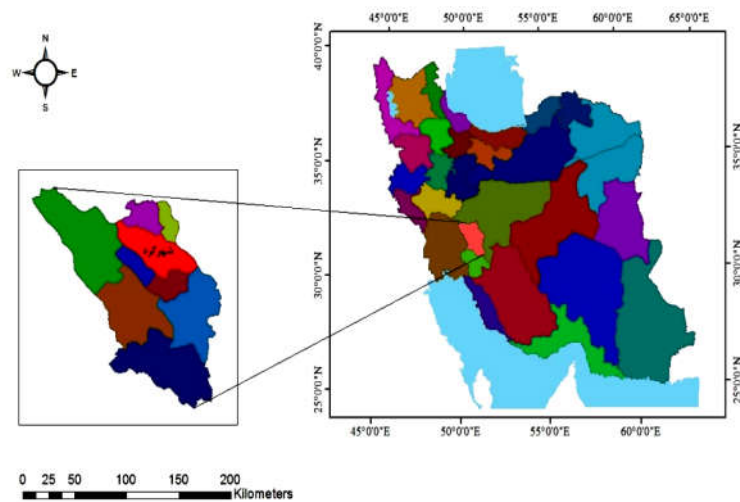
تونلی بر روی دامنه‌های مقعر به طرز چشمگیری و با تجاوز شیب از هشت درصد افزایش یافته است. اثرات ریشه گیاهان بر روی پدیده فرسایش تونلی در خاک‌های شنی توسط برناتک ژاکیل و همکاران (۳) مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که ریشه گیاهان در کاهش مقدار فرسایش تونلی در خاک‌های شنی حتی در ترازهای هیدرولیکی زیاد (کمتر از یک متر) بسیار مؤثر بوده است. جونز (۱۶) در پژوهشی نشان داده است که در برخی از مناطق، تونل‌های خاک حدود ۵۰ درصد در دبی رودخانه‌ها سهم داشته است. همچنین ژئو و همکاران (۳۳) در مطالعه‌ای در شمال چین به این نتیجه رسیدند که فرسایش تونلی ۱۰ درصد کل تلفات رواناب را شامل می‌شود و بزرگ بودن ابعاد تونل‌ها ممکن است نماینده شرایط در بسیاری از محیط‌های خشک و نیمه خشک باشد.

باتوجه به مطالعات انجام شده می‌توان دریافت که فرسایش سطحی و تونلی از فرایندهای مهم تخریب زمین در جهان و ایران بوده که تحت تأثیر عوامل گوناگون در آبخیزها به شکل‌های مختلف تشکیل و توسعه می‌یابد. فرسایش تونلی یکی از جالب‌ترین و نادرترین اشکال فرسایش بوده و در هر شرایط آب‌وهوایی می‌تواند تشکیل شود، اما شرایط ایجاد آن ناشناخته است. از آنجایی که فرسایش تونلی نسبت به سایر رخساره‌های فرسایش آبی کمتر مورد توجه قرار گرفته است، بررسی آن حائز اهمیت است. این مطالعه با هدف بررسی الگوی زمانی تولید رواناب و رسوب سطحی و تونلی از خاکی با بافت سیلت لوم تحت شیب‌های مختلف با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی انجام شده است. باتوجه به محدود بودن پژوهش‌های آزمایشگاهی در این زمینه، این مطالعه می‌تواند پایه مناسبی برای پژوهش‌های بعدی در رابطه با فرسایش تونلی باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه نمونه برداری خاک

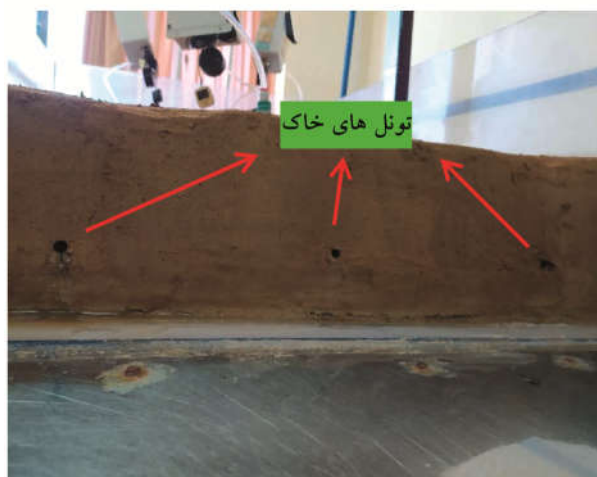
برای انجام پژوهش، خاک سیلت لوم به‌عنوان بافت خاک غالب در زمین‌های دست‌نخورده در محدوده دانشگاه شهرکرد واقع در استان چهارمحال و بختیاری جمع‌آوری شد. این منطقه از نظر



شکل ۱. موقعیت مکانی منطقه نمونه برداری خاک



شکل ۲. لایه‌های تشکیل دهنده خاک مورد مطالعه



(ب)



(الف)

شکل ۳. الف) تجهیزات به کار رفته برای انجام آزمایش ها، و ب) نمای دید بخش انتهایی مخزن خاک

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک مورد بررسی

بر اساس درصد شن، سیلت و رس به دست آمده و مثلث بافت خاک، خاک مورد استفاده دارای بافت سیلت لوم بود. مقدار کربن آلی ۰/۰۶ درصد و جرم مخصوص ظاهری ۱/۵ گرم بر سانتی متر مکعب بود (جدول ۱).

بررسی روند تولید رواناب و رسوب در شیب‌های مورد بررسی

روند تولید رواناب و رسوب در شیب دو درصد به صورت افزایشی بود. در ۱۵ دقیقه اول آزمایش به دلیل خشک بودن خاک و شیب کم، تمامی بارش جذب خاک شده و روانابی ایجاد نشد. اولین مقدار ثبت شده رواناب در دقیقه ۲۰ و با مقدار رواناب ۰/۱ لیتر بود. این مقدار در طول زمان به تدریج افزایش داشت و در انتها به مقدار ۰/۵ لیتر رسید (شکل ۴). به عبارت دیگر در شیب دو درصد رواناب از ابتدا تا انتهای آزمایش افزایش نسبتاً ملایمی داشت که دلیل آن را می‌توان زیاد بودن نفوذ آب به خاک به دلیل کم بودن سرعت رواناب دانست. واعظی و همکاران (۲۴) نیز در مطالعه‌ای به این نتیجه رسیدند که با احتمال ۹۹ درصد، شیب بر زمان آغاز رواناب تأثیر داشته و طولانی‌ترین زمان ظهور رواناب مربوط به شیب‌های کم بوده است.

در شیب یادشده، مجموع رسوب سطحی و تونلی جمع‌آوری شده در واحد سطح نیز با گذشت زمان افزایش یافت؛ به طوری که اولین مقدار رسوب ثبت شده در دقیقه ۲۰ برابر با ۰/۹ گرم بر مترمربع بود و در دقیقه‌های پایانی آزمایش به بیشترین مقدار خود برابر با ۵/۳ گرم بر مترمربع رسید. کم بودن مقدار رواناب و عدم جابه‌جایی ذرات خاک از دلایل کم بودن رسوب در شیب دو درصد بوده است. همان‌طور که در نمودار مشخص است، مقادیر بیشینه رواناب و رسوب شد همزمان و در انتهای زمان آزمایش به وقوع پیوسته است. نتایج آزمون همبستگی اسپیرمن نشان داد که ضریب همبستگی بین رواناب و رسوب در شیب دو درصد برابر با ۰/۹۸۴ و مقدار معناداری نیز ۰/۰۰۰ بود؛ بنابراین می‌توان گفت با اطمینان ۹۹ درصد بین رواناب و رسوب در شیب دو درصد رابطه مثبت قوی و معنادار وجود دارد (جدول ۲).

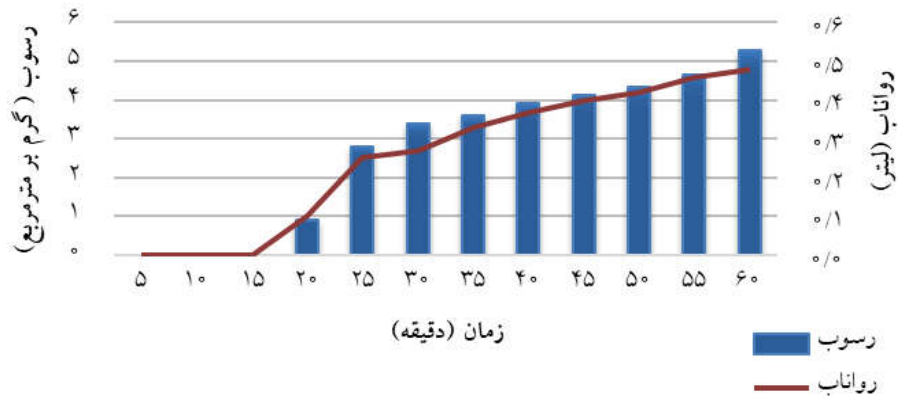
که وقوع رخداد‌های طبیعی باران (شدت و مدت بارش) به دقت قابل پیش‌بینی نیست؛ بنابراین برای شبیه‌سازی بارش و بررسی میزان تولید رواناب و رسوب از یک دستگاه شبیه‌ساز باران استفاده شد (شکل ۳- الف). این دستگاه از یک سطح بارش به ابعاد یک‌دریک و نیم متر تشکیل شده که در ارتفاع ۱۸۰ سانتی‌متری از سطح زمین قرار داشت. 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 شدت یکنواخت بر سطح خاک تحت آزمایش شدت‌تقلی برخورد می‌کرد. برای شبیه‌سازی فرسایش و انجام آزمایش‌ها در هر شیب ابتدا رطوبت اولیه خاک با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج اندازه‌گیری و در صورت رسیدن به مقدار مرجع آزمایش انجام شد. پس از پایان هر آزمایش دوباره خاک موجود در مخزن اصلاح شده و تمامی موارد قبل از جمله تر و خشک شدن‌های متناوب و اندازه‌گیری رطوبت تا رسیدن به مقدار مرجع اعمال شد و سپس آزمایش مربوط به شیب بعد انجام شد. شدت بارندگی موردنظر نیز ۳۰ میلی‌متر بر ساعت بوده که در محدوده شدت‌های بارش منطقه مورد مطالعه قرار داشت. آزمایش‌ها در شیب‌های ۲، ۶، ۱۰، ۱۴ و ۱۸ درصد انجام شد. لازم به ذکر است که برای کمینه کردن خطاهای آزمایش، هر آزمایش با سه بار تکرار انجام و در نهایت میانگین تکرارها در نظر گرفته شد (۱۱). مدت‌زمان انجام هر آزمایش یک ساعت بوده و نمونه‌های رواناب با فواصل پنج دقیقه‌ای جمع‌آوری و مقدار رسوبات نیز پس از ته‌نشین شدن و کشیدن آب اضافی و خشک شدن اندازه‌گیری شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای بررسی الگوی تغییرات زمانی تولید رواناب و رسوب، ابتدا نمودارهای مربوطه در محیط Excel نسخه ۲۰۱۳ رسم شد. همچنین برای بررسی همبستگی بین مقادیر رواناب و رسوب در هر شیب از آزمون همبستگی اسپیرمن در نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ استفاده شد.

جدول ۱. مشخصات خاک مورد مطالعه

هدایت الکتریکی ($ds m^{-1}$)	pH	کربن آلی (%)	چگالی ($gr cm^{-3}$)	کربنات کلسیم (%)	بافت	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)
۰/۴۱	۷/۶	۰/۰۶	۱/۵	۵۵/۶	سیلت لوم	۲۱	۶۰/۵	۱۸/۵



شکل ۴. روند تغییرات رواناب و رسوب در شیب دو درصد

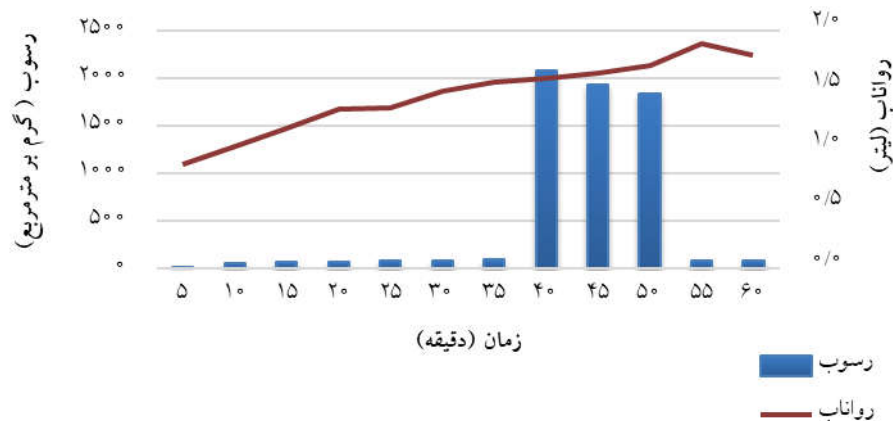
جدول ۲. نتایج آزمون همبستگی اسپیرمن برای رواناب و رسوب در شیب دو درصد

رسوب	رواناب		
۰/۹۸۴**	۱	ضریب همبستگی	
۰/۰۰۰	.	Sig.	رواناب
۱۲	۱۲	تعداد	
۱	۰/۹۸۴**	ضریب همبستگی	همبستگی اسپیرمن
.	۰/۰۰۰	Sig.	رسوب
۱۲	۱۲	تعداد	

** همبستگی در سطح ۰/۰۱ (۲ دنباله) معنی دار است.

خاک قسمت جلو پلات رخ داد که منجر به افزایش ناگهانی مقدار رسوب شد (شکل ۵). این ریزش‌ها به دلیل کاهش مقاومت خاک در برابر جریان سطحی و تونلی بوده که به دلیل وجود ذرات سیلت در خاک اتفاق افتاد. وجود ذرات سیلت به عنوان ذرات حساس به فرسایش منجر به افزایش حساسیت خاک به فرسایش شده و در نتیجه شرایط را برای ایجاد ریزش‌هایی که در نهایت به فرسایش خندقی منجر می‌شود، مهیا کرده است (۱۸). مجموع رسوب جمع‌آوری شده در ابتدای

در شیب شش درصد نیز همانند شیب قبلی، رواناب در طول زمان در حال افزایش بود و در انتهای آزمایش به بیشترین مقدار خود برابر با ۱/۹ لیتر رسید (شکل ۵). در این شیب بر خلاف شیب دو درصد، رواناب از همان دقایق اولیه شروع شد و با گذشت زمان شدت تولید آن نیز افزایش یافت. جورغلامی و همکاران (۱۷) نیز نشان دادند که با افزایش شیب از ۵ به ۲۵ درصد مقدار رواناب از ۲/۴۵ به ۶/۴۳ میلی‌متر افزایش داشت. در این شیب در زمان‌های بین ۴۰ تا ۵۰ دقیقه ریزش‌هایی در



شکل ۵. روند تغییرات رواناب و رسوب در شیب شش درصد

واعظی (۱۰) نیز در مطالعات خود به نتایجی همسو با این نتایج دست یافتند و به افزایش میزان هدررفت خاک در پی افزایش شیب اشاره کردند.

مطابق با جدول ۴، بین مقادیر رواناب و رسوب همبستگی مثبت وجود داشت، اما این رابطه معنادار نبوده است.

شکل ۸ نشان می‌دهد رواناب در شیب ۱۴ درصد با شیب ملایمی افزایش یافت؛ به طوری که از ۲/۶ لیتر در ابتدا شروع و به بیشترین مقدار خود که برابر با ۳/۲ لیتر بود، رسید. باتوجه به اینکه شدت بارندگی در طول مدت زمان انجام آزمایش ثابت بود (۳۰ میلی‌متر بر ساعت)، تولید رواناب تحت تأثیر تغییرات زمانی نفوذ آب به خاک قرار داشت. با گذشت زمان از آغاز بارندگی، با افزایش محتوای رطوبتی خاک، به تدریج نفوذپذیری خاک کاهش یافت. پژوهشگرانی از جمله گیرمای و همکاران (۱۵) به نتایجی مشابه در این مورد دست یافتند.

باتوجه به شکل ۸، تولید رسوب نیز همانند رواناب روند افزایشی داشت. کمترین مقدار رسوب ایجاد شده (۷۰/۳ گرم بر مترمربع) همزمان با کمترین رواناب بود که در پنج دقیقه ابتدایی از شروع آزمایش به وقوع پیوست. بیشترین مقدار رسوب تولیدی در انتهای آزمایش بود که به دلیل افزایش شیب و کاهش فرصت نفوذ آب باران و در نتیجه افزایش رواناب و حمل رسوب توسط آن بود. نتایج بررسی عوامل مؤثر بر فرسایش خاک در بلژیک نیز نشان داد که بین درصد شیب با

آزمایش برابر با ۲۴/۷ گرم بر مترمربع بوده که روند صعودی داشت و در زمان ۴۰ دقیقه اولین ریزش به وقوع پیوست. این ریزش باعث افزایش مقدار رسوب تا حدود ۲۰۰۰ گرم بر مترمربع در زمان بین ۴۰ تا ۵۰ دقیقه شد. بعد از آن مقدار رسوب کاهش یافت و در انتهای آزمایش مقدار ۸۰/۹ گرم بر مترمربع به ثبت رسید. ریزش‌ها در شکل ۶ قابل مشاهده است.

باتوجه به جدول همبستگی (جدول ۳)، می‌توان دریافت که رابطه مثبت بین مقادیر رواناب و رسوب در این شیب وجود داشت که این رابطه در سطح ۰/۰۵ معنادار بوده است ($r = 0.620$, $P\text{-Value} < 0.05$).

مطابق با شکل ۷، مقدار رواناب جمع‌آوری شده از سطح خاک در شیب ۱۰ درصد دارای حجمی بیشتر از شیب‌های قبلی بوده که به دلیل افزایش سرعت رواناب و کاهش نفوذپذیری خاک در اثر افزایش شیب بود (۱۷). مقدار اولیه رواناب خروجی از سطح خاک در مقایسه با شیب‌های قبل بیشتر و برابر با ۱/۸ لیتر بود که در انتهای آزمایش به مقدار ۲/۵ لیتر رسید.

مقادیر رسوب جمع‌آوری شده نیز به دلیل ریزش‌های متعدد در طول مدت زمان انجام آزمایش دارای تغییراتی بود و بین ۴۴/۱ تا ۹۳/۴ گرم بر مترمربع نوسان داشت. لازم به ذکر است که بیشترین مقدار رسوب در زمانی رخ داد که مقدار رواناب از ۱/۸ به ۲/۱ لیتر رسید و مقدار رسوب بیشتری را با خود حمل کرد. پژوهشگرانی از جمله کانتون و همکاران (۴) و اسلامی و

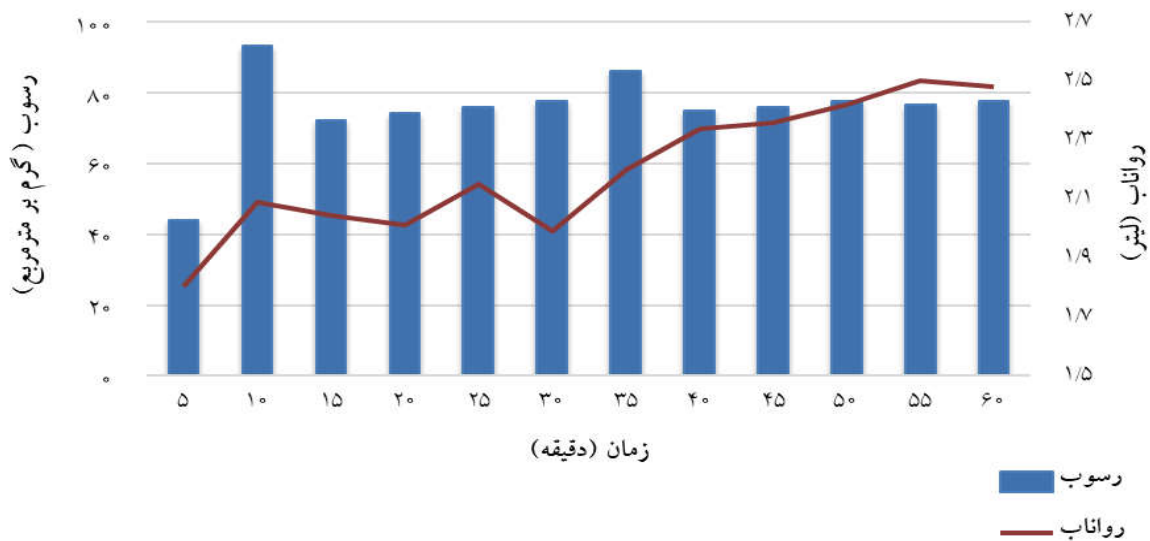


شکل ۶. ریزش در قسمت جلوی خاک در شیب شش درصد

جدول ۳. نتایج آزمون همبستگی اسپیرمن برای رواناب و رسوب شیب شش درصد

رسوب	رواناب		
۰/۶۲۰*	۱	ضریب همبستگی	
۰/۰۳۲	.	Sig.	رواناب
۱۲	۱۲	تعداد	
۱	۰/۶۲۰*	ضریب همبستگی	همبستگی اسپیرمن
.	۰/۰۳۲	Sig.	رسوب
۱۲	۱۲	تعداد	

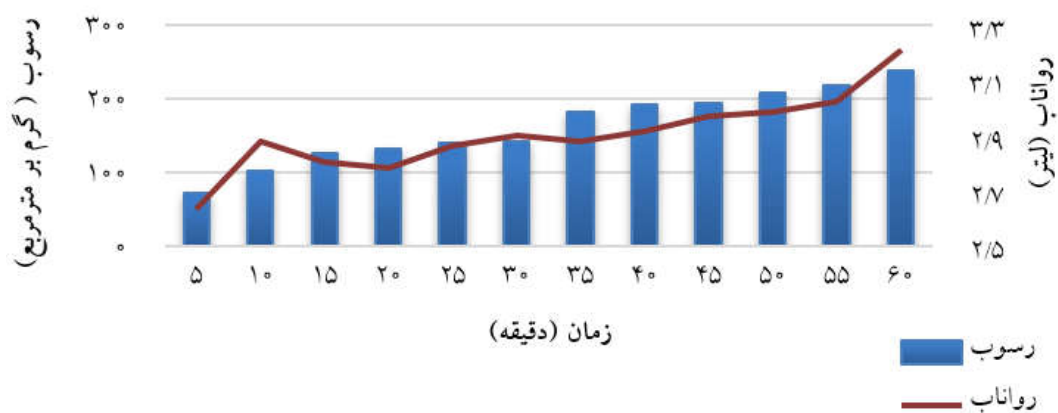
* همبستگی در سطح ۰/۰۵ (۲ دنباله) معنی دار است.



شکل ۷. روند تغییرات رواناب و رسوب در شیب ۱۰ درصد

جدول ۴. نتایج آزمون همبستگی اسپیرمن برای رواناب و رسوب شیب ۱۰ درصد

رسوب	رواناب			
۰/۳۹۹	۱	ضریب همبستگی		
۰/۱۹۹	.	Sig.	رواناب	
۱۲	۱۲	تعداد		
۱	۰/۳۹۹	ضریب همبستگی		همبستگی اسپیرمن
.	۰/۱۹۹	Sig.	رسوب	
۱۲	۱۲	تعداد		



شکل ۸. روند تغییرات رواناب و رسوب در شیب ۱۴ درصد

ذخیره چالاب در اثر افزایش شیب گزارش کردند (۳۲). در پنج دقیقه اول از شروع آزمایش، مقدار رسوب برابر با ۸۱ گرم بر مترمربع بود و در انتها به ۸۳۲/۲ گرم بر مترمربع رسید. در این شیب سه ریزش دیده شد که در بازه‌های زمانی دوم، چهارم و یازدهم بود (شکل ۱۰). این ریزش‌ها منجر به افزایش مقدار رسوب و در بیشترین حالت برابر با ۱۵۷۳/۳ گرم بر مترمربع شد. پژوهشگرانی از جمله اکوئه و همکاران (۹) و زارع و همکاران (۳۰) نیز در مطالعات خود به افزایش میزان هدررفت خاک در پی افزایش شیب اشاره کردند.

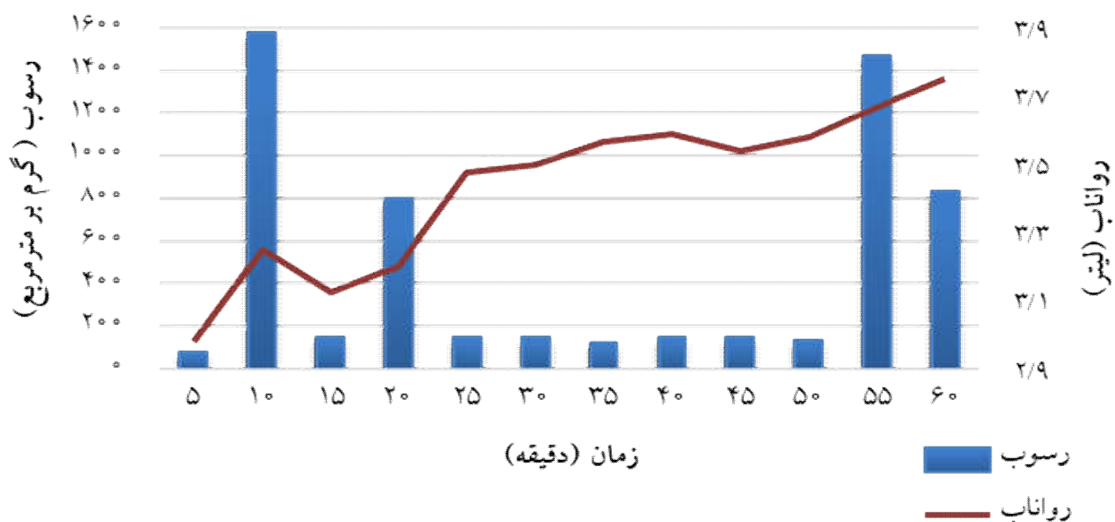
مطابق با نتایج حاصل از همبستگی بین مقادیر رواناب و رسوب رابطه مثبت وجود داشت؛ اما این رابطه به دلیل ریزش‌های اتفاق افتاده و افزایش مقدار رسوب در برخی از زمان‌ها چندان قوی و معنادار نبود (جدول ۶).

رواناب و فرسایش خاک همبستگی مثبت وجود دارد (۲۱). جدول ۵ نتایج همبستگی بین مقادیر رواناب و رسوب را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که بین این مقادیر رابطه مثبت و قوی وجود داشت که این رابطه در سطح یک صدم نیز معنادار است. مقادیر رواناب در شیب ۱۸ درصد نیز همانند شیب‌های قبلی روند افزایشی همراه با نوسانات را در طول مدت‌زمان انجام آزمایش نشان داد (شکل ۹). این مقدار از ۳ لیتر شروع شد، به تدریج افزایش یافت و در دقایق پایانی با مقدار ۳/۸ لیتر به اوج خود رسید. عباسی و همکاران (۱) نیز در پژوهشی نشان دادند که با افزایش درصد شیب، حجم رواناب شد معناداری زیاد می‌شود. همچنین یافته‌های پژوهشگران با استفاده از شبیه‌ساز باران مؤید تأثیر مثبت شیب بر حجم رواناب است (۵). پژوهشگران دلایل افزایش ضریب رواناب با افزایش شیب را ناشی از تمایل آب برای جاری شدن و کم شدن

جدول ۵. نتایج آزمون همبستگی اسپیرمن برای رواناب و رسوب شیب ۱۴ درصد

رسوب	رواناب		
۰/۹۳۰**	۱	ضریب همبستگی	
۰/۰۰۰	.	Sig.	رواناب
۱۲	۱۲	تعداد	
			همبستگی اسپیرمن
۱	۰/۹۳۰**	ضریب همبستگی	
.	۰/۰۰۰	Sig.	رسوب
۱۲	۱۲	تعداد	

** همبستگی در سطح ۰/۰۱ (۲ دنباله) معنی دار است.



شکل ۹. روند تغییرات رواناب و رسوب در شیب ۱۴ درصد



شکل ۱۰. ریزش اتفاق افتاده در شیب ۱۴ درصد همراه با موقعیت لوله‌های موجود در خاک

جدول ۶. نتایج آزمون همبستگی اسپیرمن برای رواناب و رسوب شیب ۱۸ درصد

رسوب	رواناب		
۰/۱۵۶	۱	ضریب همبستگی	
۰/۶۲۸	.	Sig.	رواناب
۱۲	۱۲	تعداد	
۱	۰/۱۵۶	ضریب همبستگی	همبستگی اسپیرمن
.	۰/۶۲۸	Sig.	رسوب
۱۲	۱۲	تعداد	

نتیجه گیری

ریزش‌ها به دلیل کاهش مقاومت خاک در برابر جریان سطحی و تونلی بوده که به دلیل وجود ذرات سیلت در خاک اتفاق افتاد. ذرات سیلت منجر به افزایش حساسیت خاک به فرسایش شده و در نتیجه شرایط را برای ایجاد ریزش‌هایی که در نهایت به فرسایش خندقی منجر می‌شود، مهیا کرده است؛ بنابراین می‌توان دو شیب یادشده را شیب‌های مستعد به فرسایش خندقی دانست. در شیب ۶ درصد ریزش‌ها بین ۴۰ تا ۵۰ اتفاق افتاد، اما در شیب ۱۸ درصد سه ریزش دیده شد که در بازه‌های زمانی دوم، چهارم و یازدهم بود.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از زحمات آقای دکتر علی مختاری که ما را در مراحل ساخت تجهیزات و انجام مطالعات آزمایشگاهی یاری کردند، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

نتایج نشان داد که با افزایش شیب مجموع رواناب و رسوب سطحی و تونلی در طی زمان افزایش داشت. در شیب دو درصد مدت‌زمان ظهور رواناب طولانی‌تر بود و پس از ۲۰ دقیقه از شروع آزمایش رواناب در سطح خاک جاری شد. اما در شیب‌های بیشتر از همان دقایق ابتدایی آزمایش رواناب خروجی دیده شد. با افزایش شیب تمایل بیشتر آب برای جاری شدن و کم‌شدن ذخیره چالابی منجر به افزایش رواناب شده است. مقدار رسوب نیز به دلیل کم‌بودن جریان رواناب و عدم جابجایی ذرات در دقایق اولیه کم بود. پس از گذشت زمان مقدار رسوب افزایش یافت که دلایل اصلی افزایش رسوب افزایش رواناب، شسته شدن ذرات ریز از سطح خاک و همچنین تولید رسوب از تونل‌های موجود در خاک به‌واسطه جاری شدن آب در تونل‌ها بر اثر نفوذ آب از سطح خاک بود. در دو شیب ۶ و ۱۸ درصد ریزش‌هایی به ثبت رسید که این

منابع مورد استفاده

1. Abbasi, M., A. Najafinejad, V. BerdiSheikh, M. AzimMohseni. 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* 4(24):104-24.
2. Bernatek-Jakiel, A., J. Poesen. 2018. Subsurface erosion by soil piping: Significance and research needs. *Earth-Science Reviews* 185:1107-28.
3. Bernatek-Jakiel, A., W. Vannoppen, J. Poesen. 2017. Assessment of grass root effects on soil piping in sandy soils using the pinhole test. *Geomorphology* 295:563-71.

4. Cantón, Y., A. Solé-Benet, C. Asensio, S. Chamizo, J. Puigdefàbregas. 2009. Aggregate stability in range sandy loam soils relationships with runoff and erosion. *Catena* 77(3):192-9.
5. Chen, T., J. Shu, L. Han, G. Tian, G. Yang, J. Lv. 2022. Modeling the effects of topography and slope gradient of an artificially formed slope on runoff, sediment yield, water and soil loss of sandy soil. *Catena* 212:106060.
6. Defersha, M., S. Quraishi, A. Melesse. 2011. The effect of slope steepness and antecedent moisture content on interrill erosion, runoff and sediment size distribution in the highlands of Ethiopia. *Hydrology and Earth System Sciences* 15(7):2367-75.
7. Descroix, L., J. G. Barrios, D. Viramontes, J. Poulencard, E. Anaya, M. Esteves, et al. 2008. Gully and sheet erosion on subtropical mountain slopes: Their respective roles and the scale effect. *Catena* 72(3):325-39.
8. Dlamini, P., G. Orchard, S. Jewitt, P. Lorentz, T. L., V. Chaplot. 2011. Controlling factors of sheet erosion under degraded grasslands in the sloping lands of KwaZulu-Natal, South Africa. *Agricultural Water Management* 98(11):1711-8.
9. Ekwue, E., C. Bharat, 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(2):236-43.
10. Eslami, S., A. 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):1590-600.
11. Esmailian, S., M. Pajouhesh, N. Gharahi, K. Abdollahi. 2023. Investigation of the Surface and Tunnel Runoff and Sediment Production in Saline-Sodic Soil under Different Slopes. *Journal of Water and Soil Science* 27(3):293-303.
12. Esmailian, S., A. Talebi, M. Esmailian. 2018. Prioritizing the Effective Factors on Surface Erosion Using USLE-M Integrated Model and System Dynamic (A Case Study: Sanganeh Research Center, Khorasan Razavi). *Journal of Water and Soil Science* 22(1): 71:84.
13. Flanagan, D. Erosion encyclopedia of soil science. Marcel Dekker Publishers, New York; 2002.
14. Fu, S., B. Liu, H. Liu, L. Xu. 2011. The effect of slope on interrill erosion at short slopes. *Catena* 84(1-2):29-34.
15. Girmay, G., B. R. Sing, J. Nyssen, T. Borrosen. 2009. Runoff and sediment-associated nutrient losses under different land uses in Tigray, Northern Ethiopia. *Journal of Hydrology* 376:70-80.
16. Jones, J. 2010. Soil piping and catchment response. *Hydrological Processes* 24(12):1548-66.
17. Jourgholami, M., S. Karami, F. Tavankar, A. Lo Monaco, R. Picchio. 2020. Effects of slope gradient on runoff and sediment yield on machine-induced compacted soil in temperate forests. *Forests* 12(1):49.
18. Mohammad Ebrahimi, M. 2017. Identification of causes of the occurrence of Gully erosion with emphasis on soil-related factors (case study: Agh Imam watershed). *Journal of Water and Soil Resources Conservation* 7(2): 1:14.
19. Mohammad Khan, S., H. Ahmadi, S. Feiznia, A. Salajeghe. 2010. Investigation of the effect of slope on the intensity of water erosion rate (Case study: Latian watershed). *Watershed Management Research Journal (Pajouhesh & Sazandegi)* 89:73-81.
20. Moradi, A., S. Emadodin, A. Sedaghat. 2022. Assessment of Tunnel Erosion in Cheshmeh Lee Village in Golestan Province. *Quarterly Journal of Environmental Erosion Research* 49(1):248-76.
21. Nyssen, J., D. Vermeersch. 2010. Slope aspect affects geomorphic dynamics of coal mining spoil heaps in Belgium. *Geomorphology* 123(1-2):109-21.
22. Poesen, J. 2018. Soil erosion in the Anthropocene: Research needs. *Earth Surface Processes and Landforms* 43(1):64-84.
23. Vaezi, A., H. Bahrami, M. Sadeghi, M. Mahdian. 2007. Study of factors affecting erodibility based on the universal soil loss equation in calcareous soils. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources* 14(5):55-66.
24. Vaezi, A., M. Kord, M. Mahdian. 2017. Temporal variability of runoff production under the effect of slope in soils with different textures. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 48(1):77-85.
25. Vaezi, A., E. Mohammadi. 2022. Temporal Variation Pattern of Runoff Generation and Rill Erosion in Different Soils and Slope Gradients. *JWSS-Isfahan University of Technology* 25(4):19-31.
26. Verachtert, E., M. Van Den Eeckhaut, J. Poesen, J. Deckers. 2010. Factors controlling the spatial distribution of soil piping erosion on loess-derived soils: A case study from central Belgium. *Geomorphology* 118(3-4):339-48.
27. Wang, J., L. Chen. 2021. The effect of hillslope geometry on Hortonian rainfall-infiltration-runoff processes. *Journal of Hydrology* 594:125962.
28. Wilson, G., R. Cullum, M. Römken. 2008. Ephemeral gully erosion by preferential flow through a discontinuous soil-pipe. *Catena* 73(1):98-106.
29. 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(14):1858-66.
30. Zare, K. M., A. Najafinejad, N. Noura, A. Kavian. 2012. Effects of slope and soil properties on runoff and soil loss using rainfall simulator, Chehel-chai watershed, Golestan province.

31. Zhang, K., S. Li, W. Peng, B. Yu. 2004. Erodibility of agricultural soils on the Loess Plateau of China. *Soil and Tillage Research* 76(2):157-65.
32. Zhao, X., J. Huang, X. Gao, P. Wu, W. J. 2014. Runoff features of pasture and crop slopes at different rainfall intensities, antecedent moisture contents and gradients on the Chinese Loess Plateau: A solution of rainfall simulation experiments. *Catena* 119:90-6.
33. Zhu, T., S. Luk, Q. Cai. 2002. Tunnel erosion and sediment production in the hilly loess region, North China. *Journal of Hydrology* 257(1-4):78-90.

Temporal Variation Pattern of Runoff and Surface Sediment and Piping Erosion in Silt Loam Soil under Different Slopes Using Artificial Rain Simulator

S. Esmailian¹, M. Pajoohesh^{1*}, N. Gharahi², K. Abdollahi¹ and Gh. Shams³

(Received: November 3-2023 ; Accepted: January 29-2024)

Abstract

Studying the process of soil erosion and evaluating its effective factors is one of the most important prerequisites for proper management of soil and water resources. This study was conducted to investigate the production of surface and pipe runoff and sediment using artificial rainfall on silt loam soil in the laboratory. So, the soil was collected from the study area and transported to the laboratory. Laboratory experiments were performed on a soil bed in a rectangular flume with three pipes, at slopes of 2%, 6%, 10%, 14%, and 18% under simulated rain (30 mm/h) for one hour. Related graphs were drawn in Excel to analyze the results, and Spearman's correlation test was used in SPSS software to check the correlation between runoff and sediment values in each slope. The results showed that with the increase in slope, the sum of surface and pipe runoff and sediment increased over time. For example, in a slope of 2%, the runoff and sediment in the initial moments of the experiment increased from 0 to 1.3 liters and 26.2 g m⁻² at the end of the experiment. Also, the correlation coefficient between runoff and sediment in the slopes was 0.98, 0.62, 0.4, 0.93, and 0.15, respectively, which was significant in some, but in others, it was not significant because of soil loss.

Keywords: Water erosion, Surface erosion, Spearman's correlation test, Simulated rain

1. Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Science, University of Shahrekord, Sharekord, Iran.

2. Department of Environmental Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Science, University of Shahrekord, Sharekord, Iran.

3. Department of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, University of Shahrekord, Sharekord, Iran.

*: Corresponding author, Email: drpajoohesh@gmail.com