

الگوی تغییرات زمانی تولید رواناب و فرسایش شیاری در خاک‌ها و درجات مختلف شیب

علی‌رضا واعظی* و الهام محمدی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۲/۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۹)

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی تغییرات زمانی تولید رواناب و فرسایش شیاری در خاک‌های با بافت مختلف تحت شیب‌های متفاوت انجام شد. بدین منظور یک مطالعه آزمایشگاهی در سه کلاس بافت خاک (لوم، لومرسی و لومرسی شنی) و چهار درجه شیب (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد) در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام شد. تولید رواناب و فرسایش شیاری با استفاده از جریان شبیه‌سازی شده با دبی ثابت ۰/۵ لیتر بر دقیقه در فلومی به ابعاد ۰/۳۲ متر در ۴ متر طی ۳۰ دقیقه اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که تولید رواناب و فرسایش شیاری، تحت تأثیر بافت خاک، درجه شیب و برهمکنش بین آن دو است ($P < ۰/۰۰۱$). در هر سه خاک و هر چهار درجه شیب، رابطه مثبت معنی‌دار بین فرسایش شیاری و رواناب وجود داشت و قوی‌ترین رابطه در خاک لوم ($R^2=۰/۸۶$) و در شیب ۱۵ درصد بود ($R^2=۰/۹۴$). تولید رواناب و فرسایش شیاری طی زمان در خاک‌ها و شیب‌ها دچار تغییر شد. زمان ۱۰ دقیقه، زمان اوج وقوع رواناب و فرسایش شیاری بود. برخلاف رواناب، الگوی افزایش فرسایش شیاری طی زمان، نامنظم و تدریجی بود و تحت تأثیر موجودیت ذرات قابل انتقال خاک قرار داشت. در خاک لومرسی به دلیل ناپایداری ساختمان و موجودیت ذرات ریز، بخش عمده ذرات حساس در همان زمان‌های آغازین منتقل شدند و با گذشت زمان، فرسایش شیاری به الگوی ثابتی رسید. این پژوهش نشان داد که الگوی تغییرات زمانی تولید رواناب و فرسایش شیاری تحت تأثیر نوع خاک (بافت و ساختمان) و شیب سطح قرار می‌گیرند.

واژه‌های کلیدی: پایداری ساختمان، تغییرپذیری زمانی، توزیع اندازه ذرات، ذرات حساس خاک، زمان اوج

۱. گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: vaezi.alireza@znu.ac.ir

مقدمه

فرسایش شیاری یکی از شکل‌های مهم فرسایش آبی در دامنه‌ها است. این فرسایش عبارت از جدا شدن و انتقال رسوب به وسیله جریان متمرکز آب در آبراهه‌ای باریک و فرسایش‌پذیر است (۴). جریان متمرکز آب نقش اساسی در فرسایش شیاری، تشکیل و گسترش شیار دارد؛ به طوری که عمق رواناب و فرایندهای مرتبط با آن از عوامل اصلی توسعه شیار به آبراهه و آبکند است (۲۷). جریان متمرکز زمانی تولید می‌شود که جریان‌های سطحی آب که در حین بارندگی روی سطح دامنه تشکیل می‌شوند و موجد فرسایش بین‌شیاری هستند به دلیل ناهمواری‌های سطح یا وجود گودی، در نقطه‌ای به هم آیند. در این صورت جریان بزرگ در راستای شیب تولید می‌شود که می‌تواند ذرات ریز و درشت را از بستر کنده، منتقل کند. با تداوم این پدیده، آبراهه‌ای باریک و کم عمق (کمتر از ۳۰ سانتی‌متر) روی سطح زمین به وجود می‌آید که به آن شیار گفته می‌شود. معمولاً فرسایش شیاری در شیب‌های تند و در محل‌هایی که طول شیب زیاد باشد، افزایش پیدا می‌کند، دلیل این موضوع افزایش مقدار و سرعت جریان متمرکز آب است (۱۷). ویژگی‌های باران از جمله شدت و مدت آن در تشکیل شیار نقش اساسی دارند (۲۳). ویژگی‌های خاک و شرایط رطوبتی اولیه آن نقش مهمی در مقاومت خاک در برابر جریان متمرکز آب دارد. بافت خاک مهم‌ترین ویژگی خاک در این ارتباط است که به دلایل مختلف از جمله تأثیر بر ساختمان، نگه‌داری آب و نفوذپذیری، اثرات پیچیده‌ای بر فرسایش شیاری دارد (۱۵).

تاکنون مطالعات متعددی در مورد علل و عوامل مؤثر بر فرسایش بین شیاری و شیاری در سراسر جهان انجام گرفته است؛ برای مثال می‌توان به مطالعات شن و همکاران (۲۳) در مورد تأثیر شیب و شدت باران بر فرایندهای فرسایش شیاری، یافته‌های باقریان کلات و همکاران (۳) در مورد تأثیر عوامل محیطی بر فرسایش بین‌شیاری و پژوهش‌های واعظی و وطنی (۲۷) در مورد تغییرات فرسایش شیاری در خاک‌های منطقه

نیمه‌خشک اشاره کرد. همچنین در پژوهشی شن و همکاران (۲۳) نشان دادند که اثرات شدت باران بر روی فرسایش شیاری بسیار بیشتر از اثرات درجه شیب است. قابلیت خاک در تولید رواناب و رسوب طی زمان ثابت نیست بلکه با تغییرات ویژگی‌های خاک و باران تغییر می‌یابد. شدت وقوع انواع فرسایش خاک تحت تأثیر عامل فرساینده، طی زمان تغییر می‌یابد. شدت فرسایش شیاری که عبارت از مقدار خاک هدررفته در واحد سطح و واحد زمان است، نیز طی رخداد بارندگی یا طی زمان وقوع جریان متمرکز دچار تغییر می‌شود. منظور از تغییرات زمانی فرسایش شیاری، تغییرات شدت هدررفت خاک از شیارها در زمان‌های مختلف است. پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که شدت فرسایش شیاری از رخدادی به رخداد دیگر (۱۳) و از فصلی به فصل دیگر (۸) نیز تغییر پیدا می‌کند. اطلاعات اندکی در مورد تغییرات زمانی فرسایش شیاری و دبی جریان طی یک رخداد موجود است. در این راستا اسدی و همکاران (۱) با بررسی تغییرات غلظت رسوب در فرسایش شیاری نشان دادند که غلظت رسوب در دقایق اولیه آزمایش زیاد بود و با گذشت زمان کاهش یافت و در نهایت به حالت پایدار رسید. در مطالعه‌ای دیگر، جین و همکاران (۱۳) نشان دادند که وابستگی فرسایش شیاری به دبی جریان در زمان‌های مختلف طی یک رخداد یکسان نیست؛ به طوری که در زمان‌های اولیه بارندگی، وابستگی فرسایش شیاری به دبی جریان بیشتر است.

فرسایش آبی عامل اصلی تخریب خاک در بیشتر نقاط سطح زمین از جمله در نواحی نیمه‌خشک است. فرسایش شیاری پدیده مهم هدررفت خاک در دامنه‌های شیبدار است. در مناطق نیمه‌خشک، ضعف پوشش گیاهی و ناپایداری ساختمان خاک از جمله عوامل مهم مؤثر بر تولید رواناب و هدررفت خاک طی رگبارهای متوالی هستند (۲۷). مقاومت خاک در برابر فرایندهای فرسایش شیاری به ویژگی‌های فیزیکی آن از جمله بافت و ساختمان خاک بستگی دارد. ویژگی‌های فیزیکی خاک به شدت تحت تأثیر شدت و ضربه قطرات باران و مقاومت

۵/۶، ۲، ۱/۱۸، ۰/۶، ۰/۲۵ و ۰/۱۵ میلی‌متر برای اندازه‌گیری پایداری خاکدانه مورد استفاده قرار گرفت. هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، به مدت یک دقیقه، به روش بار ثابت (۹) اندازه‌گیری شد و پس از کویدن نمونه خاک، درصد سنگریزه (ذرات معدنی با اندازه بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر) به روش وزنی (۱۸) تعیین شد. در نمونه‌های خاک عبور یافته از الک ۲ میلی‌متر نیز مقدار ماده آلی (OM) به روش اکسیداسیون تر (۲۸)، کربنات کلسیم معادل خاک (CaCO_3eqv) به روش تیتراسیون با سود ۰/۵ نرمال (۱۹) اندازه‌گیری شدند.

اندازه‌گیری مقدار جریان و فرسایش شیاری

برای اندازه‌گیری مقدار جریان و فرسایش شیاری، نمونه‌های خاک در فلومی به طول ۴ متر، به عرض ۰/۳۲ متر و به عمق ۰/۳۰ متر ریخته شد (شکل ۲). در مطالعات مختلف از ابعاد مختلفی جهت بررسی فرسایش شیاری استفاده شده است به‌طور مثال جیانگ و همکاران (۱۴) از فلومی با ابعاد $۰/۵ \times ۱/۵ \times ۱۰$ متر و هم‌چنین شن و همکاران (۲۴) نیز از فلومی به ابعاد $۰/۵ \times ۳ \times ۱۰$ متر استفاده کردند. در سه قطعه شیاری (به‌عنوان تکرار) با سطح مقطع سهمی به عمق ۳ سانتی‌متر و عرض ۷ سانتی‌متر و با طول ۴ متر ایجاد شد. با آگاهی از چگالی ظاهری خاک طبیعی، چگالی ظاهری نمونه‌های خاک در داخل فلوم با ایجاد تراکم به مقدار طبیعی رسانده شدند. برای بررسی فرسایش شیاری، از جریان شبیه‌سازی شده با دبی ثابت ۰/۵ لیتر بر دقیقه استفاده شد. این شدت جریان مطابق با حداکثر دبی مورد انتظار در باران‌های شدید منطقه بود و نتایج پیش‌آزمایش نیز نشان داد که چنین شدت جریانی، به‌عنوان آستانه وقوع فرسایش شیاری در خاک‌ها است. هم‌چنین، در مطالعات مختلف از جریان‌هایی با دبی‌های بالاتر که اغلب در رخداد‌های باران نادر با دوره بازگشت طولانی رخ می‌دهد، استفاده شده است که از آن جمله به مطالعات چن و همکاران (۶) با استفاده از شدت جریانی با دبی ۲، ۴ و ۸ لیتر بر دقیقه می‌توان اشاره کرد.

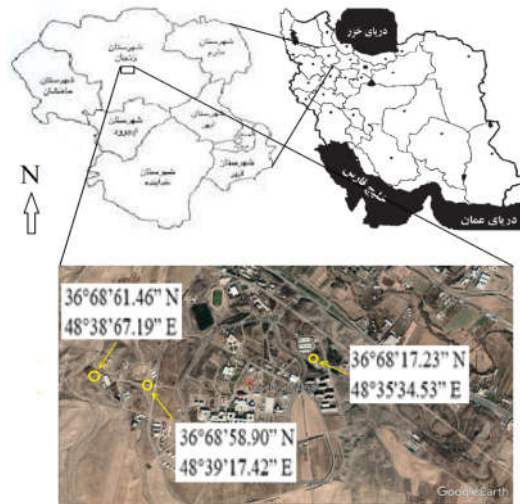
اندازه‌گیری مقدار جریان و فرسایش شیاری از زمان رسیدن

ساختمان خاک تغییر می‌یابد (۲۵). تغییرات ویژگی‌های فیزیکی خاک طی زمان، عامل مهمی در تغییرات شدت فرسایش است. ساختمان خاک به ویژه از نظر پایداری در برابر ضربه قطرات باران می‌تواند در شدت تغییرات زمانی فرسایش مؤثر باشد (۲۶). آگاهی از تغییرات زمانی ویژگی‌های خاک و تعیین زمان بحرانی که در آن بیشترین مقدار فرسایش رخ می‌دهد، بسیار حائز اهمیت است. اطلاعات اندکی در مورد تغییرات زمانی رواناب و فرسایش شیاری در خاک‌های منطقه نیمه‌خشک تحت شیب‌های متفاوت وجود دارد. از این رو پژوهش حاضر با هدف بررسی تغییرات زمانی تولید رواناب و فرسایش شیاری در برخی خاک‌های منطقه نیمه‌خشک و و اثرپذیری آنها از شیب سطح انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری خاک و تعیین ویژگی‌ها

این پژوهش در سه کلاس بافت خاک (لوم، لوم‌رسی، و لوم‌رسی‌شنی) و چهار سطح شیب (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد) به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار به اجرا در آمد. برای این منظور نمونه‌هایی از خاک در دامنه‌های تحت فرسایش شیاری در استان زنجان تهیه شد (شکل ۱). در آزمایشگاه، توزیع اندازه ذرات در خاک‌ها شامل شن خیلی درشت (۱ تا ۲ میلی‌متر)، شن درشت (۰/۵ تا ۱ میلی‌متر)، شن ریز (۰/۱ تا ۰/۲۵ میلی‌متر)، سیلت (۰/۰۵ تا ۰/۰۰۲ میلی‌متر) و رس (کوچک‌تر از ۰/۰۰۲ میلی‌متر) به روش هیدرومتری تعیین و بافت خاک با استفاده از مثلث بافت مشخص شد. انتخاب این خاک‌ها به دلیل سطح گسترش بیشتر آنها در دامنه‌های شیب‌دار منطقه بود (۲۶). برای تعیین چگالی ظاهری خاک، نمونه‌های خاک دست‌نخورده به وسیله سیلندر فلزی برداشت شد (۵). بر این اساس اندازه خاکدانه در نمونه‌های خاک طبیعی به روش الک خشک (۱۶) به‌وسیله سری الک‌های ۸، ۴/۷۵، ۲/۳۶، ۲، ۱/۱۸، ۰/۶، ۰/۳، ۰/۲۵ و ۰/۱۵ میلی‌متری الک شدند. پایداری خاکدانه به روش الک تر در خاکدانه‌های با قطر ۵/۶ تا ۸ میلی‌متر سری الک‌های



شکل ۱. نمایی از منطقه نمونه برداری



شکل ۲. نمایی از فلوم محتوی خاک برای اندازه‌گیری فرسایش شیاری

آب و هدررفت خاک از شیارها، از روش تجزیه واریانس استفاده شد و مقایسه میانگین‌ها برای تمایز بین بافت‌های خاک و شیب‌های سطح و اثرات متقابل آن دو با استفاده از آزمون دانکن در سطح پنج درصد انجام شد. برای این منظور از نرم‌افزار SPSS 24 استفاده شد. همچنین، برای تعیین روابط بین فرسایش شیاری و دبی جریان در شیب‌ها و در خاک‌های مورد بررسی از توابع ریاضی مانند رابطه خطی استفاده شد. ضریب تبیین معادلات (R^2) و سطح معنی‌داری آنها (تا احتمال ۹۵ درصد) با استفاده از نرم‌افزار SPSS 24 تعیین شد. برای رسم نمودارها نیز از نرم‌افزار Excel 2010 استفاده شد.

جریان به انتهای شیار آغاز شد و تا ۳۰ دقیقه پس از آن ادامه یافت. در بازه‌های زمانی ۱ دقیقه، نمونه‌های رواناب و رسوب خروجی از شیار جمع‌آوری شد. حجم کل رواناب به وسیله سطل‌های مدرجی که در خروجی‌های فلوم تعبیه شده بود، تعیین شد. جرم رسوبات پس از خشک شدن در آون (در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت) به دست آمد. در نهایت، مقدار فرسایش شیاری (گرم بر متر مربع بر ثانیه) محاسبه شد.

تحلیل داده‌ها

برای بررسی اثرات بافت خاک و شیب سطح بر تولید جریان

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد بررسی

ویژگی‌های خاک	لومرسی	لومرسی شنی	لوم
Sand (%)	۲۶/۸۸	۵۵/۰۰	۴۵/۷۲
Silt (%)	۳۵/۶۰	۲۲/۵۰	۳۶/۷۷
Clay (%)	۳۷/۵۰	۲۲/۵۰	۱۷/۵۰
Gravel (%)	۸/۷۰	۱۸/۲۰	۱۵/۶۰
BD (g cm ⁻³)	۱/۱۷	۱/۲۹	۱/۲۰
MWD _{dry} (mm)	۱/۰۷	۲/۴۳	۲/۲۲
MWD _{wet} (mm)	۰/۵۲	۰/۹۷	۰/۹۷
K _s (cm h ⁻¹)	۵/۳۴	۸/۲۲	۲/۸۲
CaCO _{3eqv} (%)	۲۳/۳۰	۲۰/۰۰	۲۷/۰۰
OM (%)	۰/۴۴	۰/۳۴	۰/۵۸

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک‌های مورد بررسی

نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. وجود مقدار زیاد کربنات کلسیم معادل در خاک‌ها (بیش از ۱۰ درصد) به دلیل سنگ مادر آهکی خاک‌های منطقه است. خاک‌ها از نظر ماده آلی بسیار فقیر (کمتر از ۰/۰۶ درصد) هستند. بالاترین مقدار سنگریزه در خاک لومرسی شنی معادل ۱۸/۲۰ درصد و کمترین مقدار آن در خاک با بافت لومرسی معادل با ۸/۷۰ درصد است. تغییرات زیادی از نظر چگالی ظاهری بین خاک‌ها وجود ندارد به طوری که مقدار آن از ۱/۱۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب در خاک لومرسی تا ۱/۲۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب در خاک لومرسی شنی متغیر بود. این تغییرات عمدتاً به توزیع اندازه ذرات خاک وابسته است. متوسط اندازه خاکدانه‌ها در خاک‌ها از ۱/۰۷ میلی‌متر در خاک لومرسی تا ۲/۴۳ میلی‌متر در خاک لوم رس شنی متغیر است که نشان از درجه خاکدانه‌سازی ضعیف خاک‌های منطقه است. خاکدانه‌ها، پایداری اندکی در آب دارند و میانگین اندازه آن‌ها بین ۰/۵۲ میلی‌متر در خاک لومرسی و ۰/۹۷ میلی‌متر در خاک لومرسی شنی و لوم است. ماده آلی خاک را مهم‌ترین عامل تشکیل و پایداری خاکدانه‌ها در خاک‌های مناطق خشک و

نیمه‌خشک دانستند (۲۶). با توجه به پایداری اندک خاکدانه‌ها انتظار می‌رود خاک‌ها مقاومت کمی در برابر نیروی‌های فرساینده (آب و غیره) داشته باشند مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک‌ها بسیار متغیر بود و کمترین مقدار آن (۲/۸۲ سانتی‌متر بر ساعت) در خاک لوم و بیشترین مقدار آن (۸/۲۲ سانتی‌متر بر ساعت) در خاک لومرسی شنی است. این ویژگی خاک به شدت تحت تأثیر فراوانی ذرات اولیه، ساختمان و چگالی ظاهری قرار دارد و معمولاً در خاک‌های درشت بافت و حاوی سنگریزه زیاد مانند لومرس شنی بیشتر است.

تغییرات مقدار رواناب و فرسایش شیاری تحت تأثیر بافت

خاک و درصد شیب

در جدول ۲ نتایج تجزیه واریانس اثر شیب و بافت خاک بر رواناب و فرسایش شیاری ارائه شده است. مقدار رواناب و فرسایش شیاری، هر دو تحت تأثیر شیب سطح ($P < 0/001$)، بافت خاک ($P < 0/01$) و برهمکنش بین آن دو ($P < 0/001$) قرار دارند. در بسیاری از پژوهش‌های پیشین اثر شیب زمین بر تولید رواناب و فرسایش شیاری به اثبات رسیده است (۱۰). افزایش شیب زمین با تأثیر بر شیب هیدرولیکی جریان، در افزایش سرعت جریان و در نتیجه نیروی برشی جریان، موجب

جدول ۲. تجزیه واریانس رواناب و فرسایش شیاری

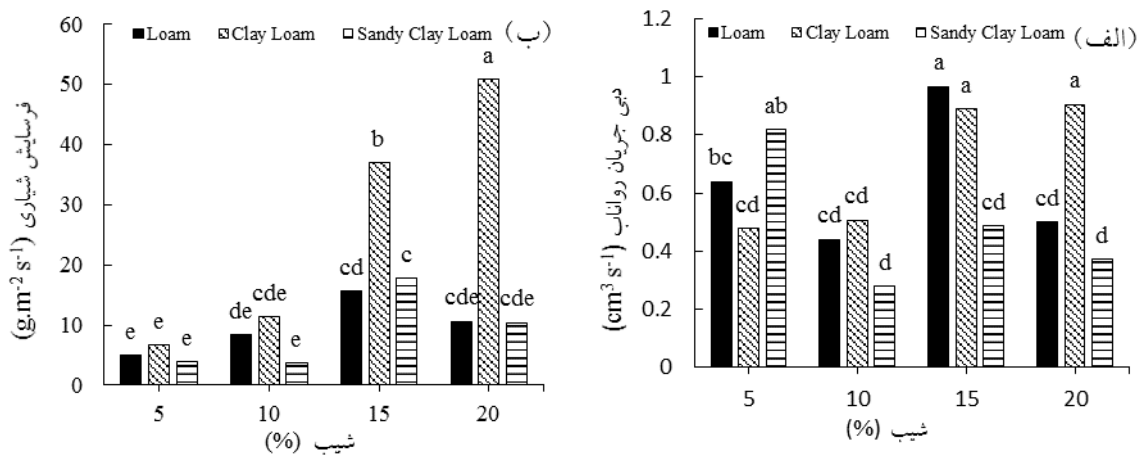
فرسایش شیاری		رواناب		منابع تغییر
میانگین مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	درجه آزادی	
۱۱۶۳/۴۸۸***	۲	۰/۱۳۵**	۲	بافت خاک
۹۰۰/۴۸۸***	۳	۰/۲۱۳***	۳	شیب سطح
۳۰۸/۹۴۳***	۶	۰/۱۴۱***	۶	بافت خاک × شیب سطح
۲۱/۱۵۱	۲۴	۰/۰۱۴	۲۴	خطا

** معنی داری در سطح احتمال ۹۵ درصد ($P < 0/05$) و *** معنی داری در سطح احتمال ۹۹ درصد ($P < 0/001$) است.

۱۰ درصد به دست آمد. بیشترین مقدار فرسایش شیاری در خاک لومرسی ($50/8 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) و شیب ۲۰ درصد و کمترین آن ($3/72 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ و $3/83$) در خاک لومرسی شنی و در شیب ۵ و ۱۰ درصد بود. یکی از عوامل مهم مؤثر بر تغییرات دبی جریان و فرسایش شیاری، نفوذپذیری خاک است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که خاک‌های دارای سرعت نفوذ آب بیشتر، رواناب کمتر (۲۲) و در نتیجه فرسایش کمتری دارند. خاک لومرسی نسبت به خاک لوم فرسایش بیشتری داشت که این نتایج با یافته‌های واعظی و وطنی (۲۷) مطابقت داشت. علت فرسایش بیشتر در خاک لومرسی را می‌توان به درجه خاکدانه‌سازی کم و پایداری اندک خاکدانه‌های آن نسبت به دو خاک دیگر دانست (جدول ۱). میزان دبی جریان با افزایش شیب در هر سه خاک تغییر یافت. مقدار دبی جریان در خاک لوم به‌طور میانگین بیشتر از دو خاک دیگر بود و در شیب ۱۵ درصد، به بیشترین مقدار رسید. نفوذپذیری پایین این خاک عامل مهم مؤثر بر افزایش دبی جریان بود. خاک لومرسی شنی به دلیل وجود تخلخل درشت، دارای هدایت هیدرولیکی اشباع بود و در نتیجه دبی جریان در آن کمترین شد (شکل ۳- الف). مطابق شکل ۳- ب، با افزایش شیب مقدار فرسایش شیاری در هر سه خاک افزایش یافت و بیشترین مقدار در شیب ۲۰ درصد رخ داد. از بین خاک‌ها، خاک لومرسی حساس‌ترین خاک‌ها به فرسایش شیاری بود. حداکثر مقدار فرسایش شیاری مربوط به خاک لومرسی در شیب ۲۰ درصد و کمتر آن در خاک

جداشدن بیشتر ذرات از سطح و افزایش هدررفت خاک از شیارها می‌شود. مقدار هدررفت خاک نیز تحت تأثیر شیب سطح قرار می‌گیرد به‌طوری که ظرفیت انتقال ذرات به وسیله جریان در شیارها که تابعی از نیروی هیدرولیکی جریان می‌باشد، به مجموعه‌ای از عوامل به ویژه تندی شیب شیار بستگی دارد (۲۰). بررسی‌های شائو و همکاران (۳۱) نشان داد که با افزایش شیب میزان جدا شدن و انتقال ذرات رسوب توسط جریان آب افزایش می‌یابد. نقش شیب سطح در افزایش تنش برشی جریان و فرسایش شیاری در مدل پروژه پیش‌بینی فرسایش آبی (WEPP) به اثبات رسیده است (۱۱). نتایج نشان داد که بافت خاک نیز عامل مهم مؤثر بر مقدار جریان و فرسایش شیاری است. تأثیر بافت خاک بر فرسایش شیاری در مدل WEPP در قالب شاخص فرسایش‌پذیری شیاری بیان شده است. در مطالعات زیادی به اثر بافت خاک بر فرسایش شیاری اشاره شده است (۲۱ و ۲۷). بررسی برهمکنش بافت خاک و شیب از نظر تولید جریان و فرسایش شیاری نشان داد که تأثیر شیب بر فرسایش شیاری با تغییر بافت خاک به شدت دچار تغییر می‌شود. به عبارت دیگر، میزان تغییرات فرسایش شیاری با افزایش شیب، در خاک‌های مختلف مشابه نیست.

شکل ۳ نتایج مقایسه میانگین‌ها برای تغییرات دبی جریان و فرسایش شیاری را در شیب‌های مختلف نشان می‌دهد. بیشترین دبی جریان ($0/96 \text{ cm}^3.\text{s}^{-1}$) در شیب ۱۵ درصد و در خاک لوم و کمترین آن ($0/27 \text{ cm}^3.\text{s}^{-1}$) در خاک لومرسی شنی و در شیب



شکل ۳. مقایسه میانگین تغییرات دبی جریان (الف) و فرسایش شیاری (ب) بین خاک‌ها و شیب‌ها

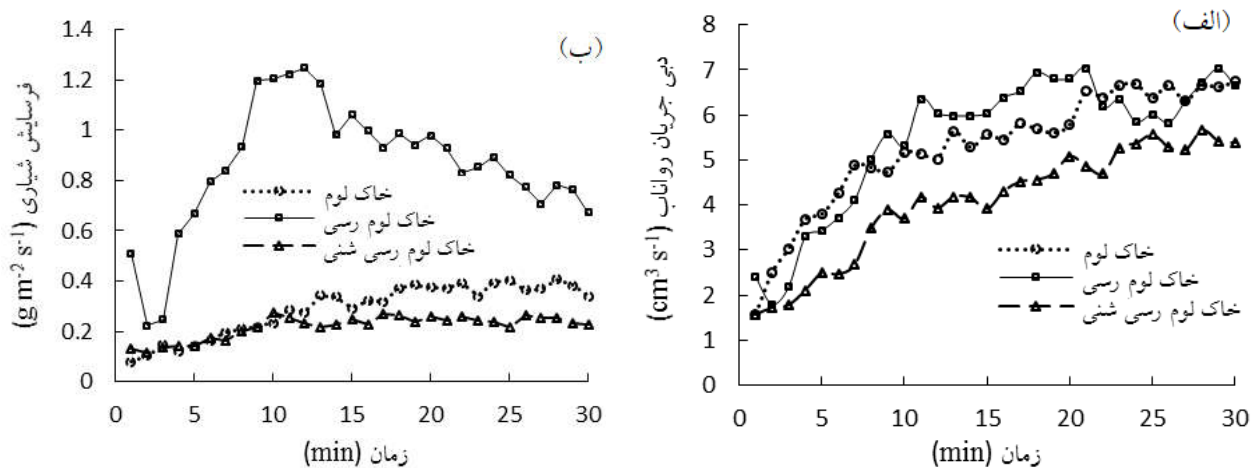
گذشت زمان از آغاز آزمایش، نفوذپذیری خاک محدود می‌شود و مقدار تولید جریان افزایش می‌یابد.

هدررفت خاک از شیارها نیز دچار تغییرات زمانی شد. روند افزایش شدت هدررفت خاک در شیارها، در زمان‌های اولیه وقوع جریان زیاد بود و تا زمان حدود ۱۱ و ۱۲ دقیقه افزایش شدیدی در فرسایش شیاری رخ داد و پس از آن به‌ویژه در خاک لوم و لومرسی‌شنی تغییرات محسوسی نداشت. در خاک لوم و لومرسی‌شنی الگوی تغییرات زمانی فرسایش بسیار شبیه به الگوی تغییرات زمانی دبی جریان بود (شکل ۴-ب). تخریب ساختمان خاک از یک سو و افزایش محتوای رطوبتی خاک از سوی دیگر منجر به وقوع چنین حالتی می‌شود. الگوی تغییرات زمانی فرسایش شیاری در خاک لومرسی بسیار متفاوت از الگوی دبی جریان بود. این نتیجه را می‌توان به ماهیت ذرات تشکیل‌دهنده و ساختمان آن ارتباط داد. بالابودن درصد ذرات سیلت و شن ریز در این خاک، باعث تشکیل زود هنگام سله می‌شود که به نوبه خود موجب افزایش جریان سطحی و قدرت برشی آن می‌شود. کوچک بودن خاکدانه‌ها و ناپایداری آنها در این خاک نیز موجب شد مقاومت آن در برابر عوامل فرساینده کمتر شود.

لومرسی‌شنی در شیب ۵ درصد رخ داده است. وجود ذرات ریز بیشتر در این خاک از یک سو و ساختمان ضعیف آن از سوی دیگر، موجودیت ذرات حساس به انتقال توسط جریان را بیشتر می‌کند و به این دلیل مقدار فرسایش شیاری در آن بیشترین بود.

تغییرات زمانی دبی جریان و فرسایش شیاری در خاک‌ها

بررسی تغییرات زمانی تولید جریان در خاک‌ها نشان داد که الگوی تغییرات دبی جریان در خاک‌ها به‌ویژه در خاک لوم و لومرسی مشابه است (شکل ۴-الف). در هر سه خاک با گذشت زمان، دبی رواناب افزایش یافت. این افزایش تا زمان ۱۱ دقیقه از آغاز آزمایش تندتر و پس از آن روند تدریجی نشان داد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تولید رواناب علاوه بر ویژگی‌های باران به‌ویژه شدت و مدت باران به نوع خاک و شرایط رطوبتی آن بستگی دارد (۳۴). در همین راستا لیو و همکاران (۱۸) نشان دادند که در آغاز بارندگی به دلیل پایین بودن رطوبت خاک، سرعت نفوذ آب به خاک بالا و مقدار رواناب کم است. با گذشت زمان و پر شدن خلل و فرج خاک، سرعت نفوذ کاهش یافته و میزان رواناب تولیدی رو به افزایش و در نهایت به میزان ثابتی می‌رسد. در پژوهش حاضر نیز با



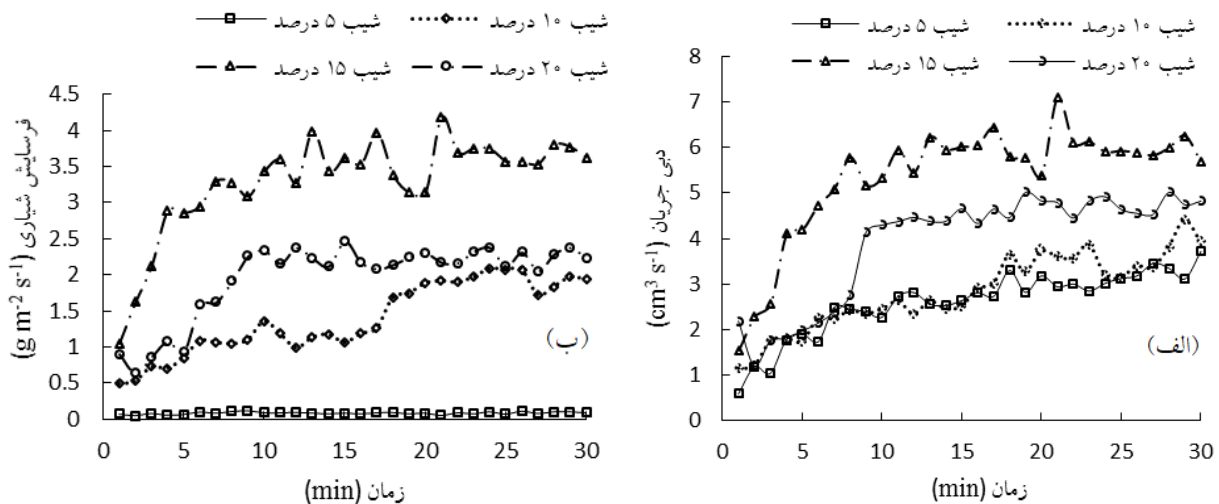
شکل ۴. تغییرات زمانی رواناب (الف) و فرسایش شیاری (ب) در خاک‌های مورد بررسی

کردند که در اواخر دوره بارندگی، به دلیل ثابت شدن شدت نفوذ آب به داخل خاک تغییرات زیادی در شدت تولید رواناب ایجاد نخواهد شد. بررسی‌های لیو و همکاران (۱۸) نیز نشان داد که در آغاز بارندگی به دلیل پایین بودن رطوبت خاک، سرعت نفوذ آب به خاک بالا و مقدار رواناب کم است. در پژوهش حاضر در فاصله زمانی کوتاه از آغاز جریان (۸ تا ۱۰ دقیقه)، مقدار جریان به شدت افزایش می‌یابد اما در ادامه افزایش قابل ملاحظه‌ای در آن دیده نمی‌شود. در مطالعه‌ای آسولین و بن‌هور (۲) بیان کردند که با افزایش شیب سطح، سرعت جریان افزایش یافته، نفوذ آب به داخل خاک کمتر می‌شود در نتیجه میزان تولید رواناب و فرسایش افزایش می‌یابد. پژوهشگران دلیل افزایش رواناب با افزایش شیب را ناشی از تمایل آب برای جاری شدن و کم شدن ذخیره چالاب در اثر افزایش شیب گزارش کردند (۳۳). مطالعات انجام شده در شمال چین نشان داد که با افزایش شیب از ۵ به ۲۵ درجه، تولید رواناب به دلیل کاهش میزان نفوذ و افزایش تشکیل سله افزایش یافته است (۷). روند افزایش شدت هدررفت خاک در شیارها، در زمان‌های اولیه وقوع جریان نیز زیاد بود و تا زمان حدود ۸ تا ۱۰ دقیقه افزایش شدیدی در تولید جریان وجود داشت و پس از آن تغییرات آشکاری مشاهده نشد. الگوی تغییرات زمانی فرسایش شیاری بین شیب‌های مورد بررسی نیز متفاوت بود و در شیب

واعظی و وطنی (۲۷) با مطالعه روی هدررفت خاک در شیارها در خاک‌هایی با بافت مختلف در شرایط آزمایشگاهی نشان دادند که خاک رسی به دلیل نفوذپذیری کم و داشتن ذرات انتقال‌پذیر زیاد نسبت به سایر بافت‌های مورد مطالعه، بیشترین میزان فرسایش شیاری را دارد. شیانگ و همکاران (۳۰) در طی مطالعه‌ای دامنه زمانی ۱ الی ۳۰ دقیقه‌ای را جهت خروج ذرات مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهشگران نشان داد که اگرچه الگوی مشخصی برای تولید رواناب خروج ذرات فرسایش یافته طی زمان وجود ندارد و گاه روند سینوسی دارد اما سیر خروج ذرات خاک، افزایشی است. هم‌چنین وانگ و شی (۲۹) نیز با بررسی تغییرات فرسایش طی زمان (از ۱ تا ۴۸ دقیقه) نشان دادند که با گذر زمان میزان بیشتری از ذرات خاک تحت تأثیر جریان قرار گرفته، فرسایش می‌یابند.

تغییرات زمانی دبی جریان و فرسایش شیاری در شیب‌ها

بررسی تغییرات زمانی تولید جریان و فرسایش شیاری در شیب‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد نشان داد که با افزایش درصد شیب، دبی جریان و هدررفت خاک در شیارها افزایش می‌یابد (شکل ۵). الگوی تغییرات زمانی تولید جریان در شیارها بین شیب ۵ و ۱۰ درصد و نیز میان شیب ۱۵ و ۲۰ درصد به‌طور تقریبی مشابه بود. در مطالعه‌ای گیرمی و همکاران (۱۲) بیان

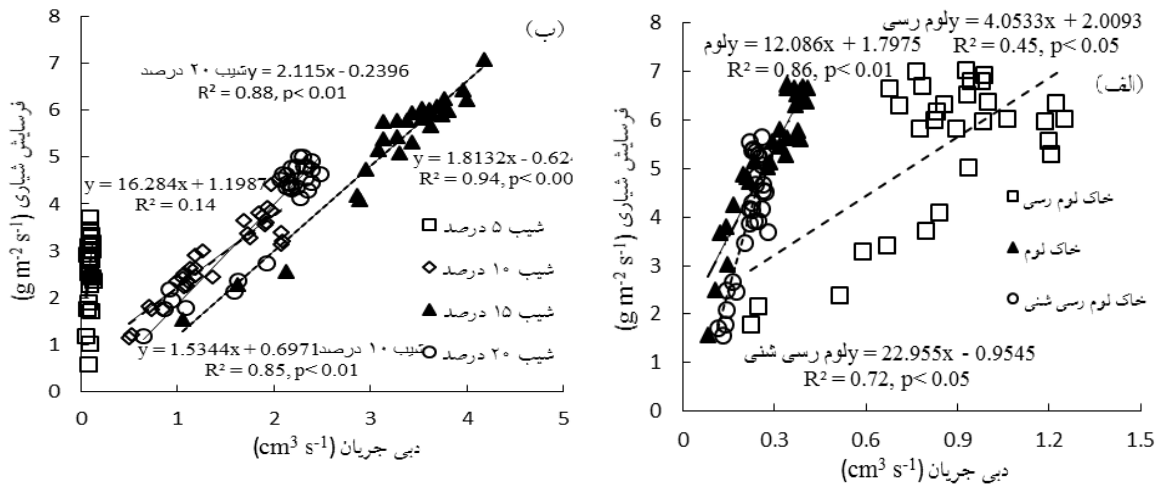


شکل ۵. تغییرات زمانی تولید رواناب (الف) و فرسایش شیاری (ب) در شیب‌های مورد بررسی

روند ثابت در شدت فرسایش شیاری در خاک‌های دارای ذرات درشت بیشتر (لوم و لومرسی‌شنی) و در شیب‌های بالا دانست.

بررسی رابطه بین فرسایش شیاری و تولید جریان در خاک‌ها نشان داد که در هر سه خاک با افزایش مقدار جریان، فرسایش شیاری افزایش می‌یابد (شکل ۶) اما مقدار این وابستگی در خاک لوم بیشتر از دو خاک دیگر است ($P < 0/01$ و $R^2=0/85$). دلیل این موضوع مستعد بودن خاک به تشکیل سله سطحی در این خاک است که سبب کاهش زبری سطح خاک و افزایش سرعت و دبی جریان می‌شود. بررسی رابطه بین فرسایش شیاری و تولید جریان در شیب‌ها نشان داد که در تمام شیب‌ها با افزایش مقدار جریان، مقدار فرسایش شیاری افزایش می‌یابد. این وابستگی در شیب ۱۵ درصد بیشتر از دیگر شیب‌ها بود ($P < 0/001$ و $R^2=0/94$). در شیب‌های کم به دلیل افزایش فرصت نفوذ آب در خاک، مقدار جریان کاهش می‌یابد و به دنبال آن فرسایش شیاری نیز کاهش می‌یابد. در صورتی که در شیب‌های بالاتر با کاهش فرصت نفوذ آب به خاک، مقدار جریان افزایش و در پی آن فرسایش شیاری نیز افزایش می‌یابد.

۱۰ درصد تفاوت اساسی با شیب ۵ درصد مشاهده شد. تغییرات زمانی فرسایش شیاری در شیارها در شیب ۵ درصد ناچیز بود. این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش شیب از ۵ به ۱۰ درصد، فرسایش شیاری افزایش می‌یابد اما پس از آن به دلیل از بین رفتن بخش عمده ذرات حساس به فرسایش در اوایل آزمایش و در نتیجه کاهش موجودیت این ذرات، شدت فرسایش شیاری افزایش محسوس پیدا نمی‌کند. یو و همکاران (۳۲) به بررسی تغییرات جدایش ذرات خاک در زمین‌های کشاورزی در کشور چین پرداختند. این پژوهشگران دریافتند که جدا شدن ذرات خاک به صورت معنی‌داری با گذشت زمان تغییر می‌کند. پژوهش حاضر نشان داد که در اوایل وقوع جریان، بسیاری از ذرات ریز موجود در شیار به آسانی انتقال می‌یابند. تغییر در ریخت‌شناسی شیار به ویژه از نظر شعاع هیدرولیکی مقطع جریان و تغییر پیچ و خم مسیر حرکت جریان نیز عاملی مهم در تغییرپذیری زمانی شدت فرسایش شیاری در خاک‌ها و شیب‌ها در زمان‌های آغازین حرکت آب در شیار بود. در زمان‌های پایانی، وضعیت نیم‌رخ شیار نیز تغییرات زیادی پیدا نمی‌کند. از این رو کاهش موجودیت ذرات حساس به انتقال و ایجاد پایداری در ریخت‌شناسی شیار را می‌توان علل اصلی ایجاد



شکل ۶. همبستگی بین فرسایش شیبی و رواناب در خاک‌ها (الف) و شیب‌های مورد بررسی (ب)

رواناب و فرسایش شیبی است. الگوی تغییرات زمانی رواناب متأثر از نفوذپذیری خاک شیار طی زمان حرکت آب در شیار بود؛ به طوری که در زمان‌های آغازین حرکت آب در شیار، به دلیل کاهش چشمگیر شدت نفوذ آب به خاک، افزایش شدیدی در تولید رواناب رخ داد و پس از مدتی با ایجاد شرایط نفوذ ماندگار آب، شدت تولید رواناب تغییرات زیادی پیدا نکرد. الگوی تغییرات زمانی فرسایش شیبی از یک سو متأثر از الگوی زمانی تولید رواناب بود و از سوی دیگر به موجودیت ذرات حساس قابل انتقال در شیار بستگی داشت. با گذشت زمان از آغاز حرکت آب در شیار، به دلیل افزایش تولید رواناب و نیز فراوانی زیاد ذرات حساس، شدت هدررفت خاک از شیارها بالا بود. پس از گذشت زمان به دلیل وقوع شرایط تقریباً ماندگار در شدت نفوذ آب به خاک و تولید رواناب و نیز کاهش موجودیت ذرات قابل انتقال، فرسایش شیبی به وضعیت تقریباً پایدار رسید و حتی در خاک ریز بافت (لومرسی) کاهش یافت. تغییر در ریخت‌شناسی شیار به ویژه از نظر شعاع هیدرولیکی مقطع جریان و تغییر پیچ و خم مسیر حرکت جریان نیز عاملی مهم در تغییرپذیری زمانی شدت فرسایش شیبی در خاک‌ها و شیب‌های مورد بررسی بود.

نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که بافت خاک و شیب سطح از عوامل بسیار مهم تولید رواناب و فرسایش شیبی هستند. خاک لومرسی به دلیل درجه خاکدانه‌سازی کم و پایداری اندک خاکدانه‌های آن نسبت به دو خاک دیگر بیشترین مقدار تولید رواناب و فرسایش شیبی را داشت. کمترین مقدار این دو متغیر در خاک لومرسی شنی مشاهده شد که دلیل آن تخلخل درشت خاک و هدایت هیدرولیکی اشباع بالای آن بود. مقدار فرسایش شیبی تحت تأثیر مقدار تولید رواناب قرار داشت و روابط قوی‌تر بین این دو متغیر، در خاک لوم و در شیب ۱۵ درصد مشاهده شد. تولید رواناب و فرسایش شیبی در خاک‌ها و شیب‌های مورد بررسی طی زمان تغییر یافتند. الگوی زمانی تولید رواناب در خاک‌های مورد بررسی مشابه بود اما الگوی زمانی فرسایش شیبی تفاوت‌هایی را بین خاک‌ها به‌ویژه بین خاک لومرسی با خاک لوم و لومرسی شنی داشت. همچنین برخلاف تولید رواناب، الگوی زمانی تولید رواناب بین شیب‌های مورد بررسی تفاوت‌هایی داشت. با توجه به الگوی زمانی تغییرات رواناب در خاک‌ها و شیب‌های مورد بررسی می‌توان گفت که زمان حدود ۱۰ دقیقه زمان اوج وقوع بیشترین

منابع مورد استفاده

- Asadi, H., M. Aligoli and M. Gorji. 2017. Dynamic Changes of Sediment Concentration in Rill Erosion at Field Experiments. *Journal of Water and Soil Science* 20(78): 125-139 (in Farsi).
- Assouline, S. and M. Ben-Hur. 2006. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing. *Catena* 66(3): 211-220.
- Bagherian Kalat, A., G. Reza Lashkaripour, M. Ghafoori and A. Abbasi. 2018. Analysis of environmental factors affecting variation in interrill erosion under rainfall Simulation. *Polish Journal of Environmental Studies* 27(4): 22-29.
- Bagnold, R. A. 1966. An Approach to the Sediment Transport Problem from General Physics. US Government Printing Office, Washington, DC.
- Blake, G. R. and K. H. Hartge. 1986. Bulk density. PP. 363-375. In: A. Klute (Ed). *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
- Chen, X. Y., Y. Zhao, B. Mo and H. X. Mi. 2014. An improved experimental method for simulating erosion processes by concentrated channel flow. *Plos One* 9(6): 96-99.
- Cheng, Q., W. Ma and Q. Cai. 2008. The relative importance of soil crust and slope angle in runoff and soil loss: a case study in the hilly areas of the Loess Plateau, North China. *GeoJournal* 71(2): 117-125.
- Dunjó, G., G. Pardini and M. Gispert. 2004. The role of land use-land cover on runoff generation and sediment yield at a microplot scale, in a small Mediterranean catchment. *Journal of Arid Environments* 57 (2): 239-256.
- Fallow, D. J., D. E. Elrick, W. D. Reynolds, N. Baumgartner and G. W. Parkin. 1994. Field measurement of hydraulic conductivity in slowly permeable materials using early-time infiltration measurements in unsaturated media. In: *Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil*, ASTM International, Philadelphia.
- Fang, H., L. Sun and Z. Tang. 2015. Effects of rainfall and slope on runoff, soil erosion and rill development: an experimental study using two loess soils. *Hydrological Processes* 29 (11): 2649-2658.
- Foster, G. R., D. C. Flanagan, M. A. Nearing, L. J. Lane, L. M. Risse and S. C. Finkner. 1995 Hillslope erosion component. PP. 1-11. In: *USDA-Water Erosion Prediction Project (WEPP), Technical Documentation*. West Lafayette, In: USDA-ARS-MWA.
- Girmay, G., B. R. Singh, J. Nyssen and T. Borrosen. 2009. Runoff and sediment-associated nutrient losses under different land uses in Tigray, Northern Ethiopia. *Journal of Hydrology* 376 (1-2): 70-80.
- Jain, M. K., U. C. Kothyari and K. G. Raju. 2005. GIS based distributed model for soil erosion and rate of sediment outflow from catchments. *Journal of Hydraulic Engineering* 131 (9): 755-769.
- Jiang, F., Z. Zhan, J. Chen, J. Lin, M. K. Wang, H. Ge and Y. Huang. 2018. Rill erosion processes on a steep colluvial deposit slope under heavy rainfall in flume experiments with artificial rain. *Catena* 169: 46-58.
- Kaibo, W. and Z. Shangguan. 2012. Simulating the vegetation-producing process in small watersheds in the Loess Plateau of China. *Journal of Arid Land* 4 (3): 300-309.
- Kemper, W. D. and R. C. Rosenau. 1986. Aggregate stability and size distribution. PP. 425-444. In: A. Klute (Ed). *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
- Kothyari, U. C., M. K. Jain and K. G. Ranga Raju. 2002. Estimation of temporal variation of sediment yield using GIS/Estimation of la variation temporelle de l'exportation sédimentaire grâce à un SIG. *Hydrological Sciences Journal* 47(5): 693-706.
- Liu, H., T. W. Lei, J. Zhao, C. P. Yuan, Y. T. Fan and L. Q. Qu. 2011. Effects of rainfall intensity and antecedent soil water content on soil infiltrability under rainfall conditions using the run off-on-out method. *Journal of Hydrology* 396 (1-2): 24-32.
- Parysow, P., G. Wang, G. Gertner and A. B. Anderson. 2003. Spatial uncertainty analysis for mapping soil erodibility based on joint sequential simulation. *Catena* 53(1): 65-78.
- Polyakov, V. O. and M. A. Nearing, 2003. Sediment transport in rill flow under deposition and detachment conditions. *Catena* 51(1): 33-43.
- Romero, C. C., L. Stroosnijder and G. A. Baigorria. 2007. Interrill and rill erodibility in the northern Andean Highlands. *Catena* 70(2): 105-113.
- Santos, F. L., J. L. Reis, O. C. Martins, N. L. Castanheira and R. P. Serralheiro. 2003. Comparative assessment of infiltration, runoff and erosion of sprinkler irrigated soils. *Biosystems Engineering* 86(3): 355-364.
- Shen, H., F. Zheng, L. Wen, Y. Han and W. Hu. 2016. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope. *Soil and Tillage Research* 155: 429-436.
- Shen, H., F. Zheng, L. Wen, J. Lu and Y. Jiang. 2015. An experimental study of rill erosion and morphology. *Geomorphology* 231: 193-201.
- Vaezi, A. R., M. Ahmadi and A. Cerdà. 2017. Contribution of raindrop impact to the change of soil physical properties and water erosion under semi-arid rainfalls. *Science of the Total Environment* 583: 382-392.

26. Vaezi, A. R., S. Akbari and M. H. Mohammadi. 2014. Study of rainfall processes in calcareous soils aggregates under laboratory conditions in NW Zanjan, Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 87: 94-24 (in Farsi).
27. Vaezi, A. R. and A. Vatani. 2015. Determining rill erodibility in some soils in Zanjan Province under simulated rainfall. *Journal of Water and Soil Science* 19(71): 59-68 (in Farsi).
28. Walkley, A. and I. A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37(1): 29-38.
29. Wang, L. and Z. H. Shi. 2015. Size selectivity of eroded sediment associated with soil texture on steep slopes. *Soil Science Society of America Journal* 79(3): 917-929.
30. Xiang, Zh., L. Zhanbin., L. Peng, T. Shanshan, W. Tian and Zh. Hui. 2018. Influences of sand cover on erosion processes of loess slopes based on rainfall simulation experiments. *Journal of Arid Land* 10(1): 39-52.
31. Xiao, H., G. Liu, P. Liu, F. Zheng, J. Zhang, and F. Hu. 2017. Sediment transport capacity of concentrated flows on steep loessial slope with erodible beds. *Scientific Reports* 7 (1): 2350.
32. Yu, Y. C., G. H. Zhang, R. Geng and L. Sun. 2014. Temporal variation in soil detachment capacity by overland flow under four typical crops in the Loess Plateau of China. *Biosystems Engineering* 122: 139-148.
33. Zhao, X., J. Huang, X. Gao, P. Wu and J. Wang. 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: 90-96.
34. Zhao, X., P. Wu, X. Chen, M. J. Helmers and X. Zhou. 2013. Runoff and sediment yield under simulated rainfall on hillslopes in the Loess Plateau of China. *Soil Research* 51(1): 50-58.

Temporal Variation Pattern of Runoff Generation and Rill Erosion in Different Soils and Slope Gradients

A. Vaezi* and E. Mohammadi¹

(Received: April 24-2019; Accepted: February 27-2021)

Abstract

This study was conducted to investigate the temporal variations of runoff and rill erosion in various soil textures under different slope gradients. So, a laboratory experiment was set up in three soil textures (loam, clay loam, and sandy clay loam) and four slope gradients (5, 10, 15, and 20%) using the completely randomized design with three replications. Runoff production and rill erosion were measured at a flume with 4 m×0.32 m in dimensions using a simulated water flow with 0.5 lit min⁻¹ in discharge during 30 min. Results indicated that runoff and rill erosion and their interaction were significantly affected by soil texture and slope gradient ($P < 0.001$). Significant relations were found between rill erosion and runoff both in three soils and four slope gradients, and the strongest relations were in loam ($R^2= 0.86$) and 15% slope gradient ($R^2= 0.94$). Runoff and rill erosion varied considerably in the soil textures and slope gradients during the experiment. A 10-min pick time was found for runoff and rill erosion. In contrast to runoff, rill erosion appeared an irregular and gradual increasing pattern during the experiment which was associated with the frequency of transportable soil particles. Clay loam had more sensitive particles due to a higher percentage of fine particles and weaker structure, and most of them were washed in early times, and finally, rill erosion was reached to a constant pattern. This study revealed that temporal variation patterns of runoff and rill erosion are influenced by soil type (texture and structure) and slope gradient.

Keywords: Structure stability, Temporal variability, Particle size distribution, Sensitive soil particles, Pick time

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Zanjan University, Zanjan, Iran.
*: Corresponding author, Email: vaezi.alireza@znu.ac.ir