

Field Investigating the Role of Slope Ongradient on Interrill Erosion in Some Soil Textures of a Semi-Arid Region of Zanzan Province

Yasin Salehi¹, Alireza Vaezi^{2*}

(Received: June, 2022 Accepted: August, 2024)

Abstract

Interrill erosion is the most common form of soil erosion in arid and semi-arid regions. This study was conducted to investigate the role of soil texture and slope gradient on interrill erosion in the semi-arid region of Zanzan. A total of 32 field experiments were done on four hillslopes with four soil textures (sandy loam, silt loam, sandy clay loam and clay loam) and slope gradients (5, 10, 15 and 20%) under simulated rainfall with an intensity of 40 mm/h with two replications. Runoff and soil loss samples were taken at 5 min intervals from the beginning of runoff, and temporal variation of interrill erosion was determined. The results showed that the highest runoff was in clay loam (8.04 mm) and the lowest value was in silt loam (4.23 mm). As the slope increased from 5% to 20% in sandy loam, silt loam, sandy clay loam and clay loam textures, the intensity of interrill erosion increased by 5.6, 2.6, 1.8 and 2.26 times, respectively. The beginning Interrill erosion occurred 66, 25, 64, and 46% earlier in 20% slope compared to 5% slope for sandy loam, silt loam, sandy clay loam and clay loam textures respectively. In general, the results showed that the slopes of 15 and 20% are the most sensitive slopes and the texture of silt loam and clay loam are the most sensitive textures to interrill erosion. Considering the response of interrill erosion to slope steepness and soil characteristics, it is important to maintain vegetation to inhibit interrill erosion on high slopes. Strengthening soil properties, particularly organic matter content and aggregate stability, is necessary to reduce soil surface destruction downstream.

Keywords: Simulated rain, Soil properties, Vegetation cover, Runoff, Rain intensity

Salehi Y and Vaezi M. 2025. Field investigating the role of slope ongradient on interrill erosion in some soil textures of a semi-arid region of Zanzan province. *Applied Soil Research*, 13(1): 31-46.

1. PhD. Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Zanzan University, Zanzan, Iran

2. Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Zanzan University, Zanzan, Iran

Corresponding Author Email: vaezi.alireza@znu.ac.ir

بررسی نقش شیب بر شدت فرسایش بین‌شیاری در برخی خاک‌های یک منطقه نیمه‌خشک استان زنجان

یاسین صالحی^۱، علی‌رضا واعظی^{۲*}

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۸)

چکیده

فرسایش بین‌شیاری یکی از رایج‌ترین شکل‌های فرسایش خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک به شمار می‌رود. این پژوهش با هدف بررسی نقش شیب بر فرسایش بین‌شیاری در برخی خاک‌های منطقه نیمه‌خشک زنجان به انجام رسید. یک آزمایش صحرایی با ۳۲ واحد آزمایشی در چهار خاک با بافت لوم شنی، لوم سیلتی، لوم رس شنی و لوم رسی و چهار سطح شیب ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد تحت باران شبیه‌سازی شده با شدت ۴۰ میلی‌متر بر ساعت در دو تکرار انجام گرفت. نمونه‌های رواناب و رسوب در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه از آغاز رواناب برداشت و تغییرات زمانی شدت فرسایش بین‌شیاری تعیین شد بر اساس نتایج، روابط معنی‌دار میان فرسایش بین‌شیاری و شیب در خاک‌های مختلف وجود داشت که نشان‌دهنده اعتبار مدل WEPP در برآورد فرسایش بین‌شیاری در این خاک‌ها است. با این وجود، دقت این روابط به توزیع اندازه ذرات خاک بستگی دارد. با افزایش شیب از ۵ درصد به ۲۰ درصد در بافت‌های لوم شنی، لوم سیلتی، لوم رس شنی و لوم رسی، شدت فرسایش بین‌شیاری به ترتیب ۵/۶، ۲/۶، ۱/۸ و ۲/۲۶ برابر افزایش یافت. آغاز فرسایش بین‌شیاری در شیب ۲۰ درصد نسبت به شیب ۵ درصد برای بافت‌های لوم شنی، لوم سیلتی، لوم رس شنی و لوم رسی به ترتیب ۶۶، ۲۵، ۶۴ و ۴۶ درصد زودتر اتفاق افتاد. به‌طور کلی نتایج نشان دادند که شیب‌های ۱۵ و ۲۰ درصد حساس‌ترین شیب‌ها و دامنه‌های با بافت لوم سیلتی و لوم رسی حساس‌ترین دامنه‌ها فرسایش بین‌شیاری هستند. حفظ پوشش گیاهی به ویژه در دامنه‌های با شیب بالا به‌منظور افزایش فرصت نفوذ آب و تقویت ساختمان خاک برای مهار فرسایش بین‌شیاری ضروری است.

واژه‌های کلیدی: باران شبیه‌سازی‌شده، خصوصیات خاک، پوشش گیاهی، رواناب، شدت باران

صالحی ی.، واعظی ع. ر. ۱۴۰۴. بررسی نقش شیب بر شدت فرسایش بین‌شیاری در برخی خاک‌های یک منطقه نیمه‌خشک استان زنجان. تحقیقات کاربردی خاک، جلد ۱۳، شماره ۱. صفحه: ۳۱-۴۶.

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
۲- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران (مکاتبه کننده)

* پست الکترونیک: vaezi.alireza@znu.ac.ir

مقدمه

یکی از مهم‌ترین انواع فرسایش آبی، فرسایش بین‌شیاری است؛ فرسایش بین‌شیاری به جداسازی ذرات خاک در اثر برخورد قطرات باران و انتقال این ذرات توسط پاشمان و جریان سطحی کم‌عمق گفته می‌شود (Kinnell, 2005). اگرچه میزان تلفات خاک در اثر فرسایش شیاری بسیار بیشتر از فرسایش بین‌شیاری است (Zheng *et al.*, 2010) اما به‌طور کلی فرسایش بین‌شیاری در مکان‌هایی مانند مراتع، اراضی غیرقابل کشت و یا اراضی با شیب کم فرایند غالب فرسایشی است. در این‌گونه اراضی، فرسایش بین‌شیاری و پاشمانی بخش عمده فرسایش سطحی خاک را تشکیل می‌دهند (Renzy *et al.*, 2013). این نوع فرسایش تحت تأثیر عوامل مختلفی ازجمله ویژگی‌های بارندگی (قطر قطرات، انرژی جنبشی، مقدار و شدت بارندگی)، ویژگی‌های هیدرولیکی جریان سطحی (سرعت جریان و عمق جریان)، ویژگی‌های خاک (بافت، توزیع اندازه ذرات، مقاومت برشی خاک و رطوبت اولیه) و شرایط سطح زمین (شیب، پوشش گیاهی، ارتفاع و ناهمواری زمین) است (Mahmoodabadi & Cerda, 2013, Issa *et al.*, 2006, Asadi *et al.*, 2011). در مدل پروژه پیش‌بینی فرسایش بین‌شیاری (Water Erosion Prediction Project, WEPP) نقش عامل شیب، شدت باران و نوع خاک در فرسایش بین‌شیاری مورد توجه قرار گرفته است (Flanagan & Nearing, 1995). برای کمی‌سازی نقش عوامل مذکور در فرسایش بین‌شیاری، فرسایش بین‌شیاری را می‌توان در کرت‌های کوچک تحت باران‌های طبیعی یا شبیه‌سازی‌شده موردبررسی قرار داد. با توجه به عدم امکان پیش‌بینی دقیق زمان وقوع باران‌های طبیعی و نبود تکرارپذیری آن‌ها، چاره‌ای جز استفاده از باران‌های شبیه‌سازی‌شده نیست. این ابزار امکان شبیه‌سازی شرایط محیطی و شدت‌های بارش مختلف را در دامنه‌های با ویژگی‌های خاکی متفاوت امکان‌پذیر می‌کند. با این روش صرفه‌جویی بالایی نیز در زمان و هزینه‌های آزمایش خواهد شد (Parsons & Lascelles, 2000).

پژوهش‌های متعددی در سراسر جهان بر روی علل و عوامل مؤثر بر فرسایش بین‌شیاری انجام گرفته است به عنوان مثال شیخ‌ربیع و همکاران (Sheykh Rabiee *et al.*, 2011) در پژوهشی بر روی رواناب و تلفات خاک در واحدهای کاری حوزه آبخیز هیو با استفاده از شبیه‌ساز

باران در ۱۷ واحد کاری گزارش کردند که بیش‌ترین رواناب و تلفات خاک مربوط به سطوح از جنس ماسه-سنگ و کم‌ترین آن‌ها در واحدهای آبرفتی اتفاق افتاد. همچنین با افزایش شیب زمین بر میزان تلفات خاک افزوده شد. علوی نیا و همکاران (Alavinia *et al.*, 2017) در پژوهشی با ایجاد چهار رگبار شبیه‌سازی‌شده با پروفیل متفاوت (صعودی، نزولی، صعودی-نزولی و نزولی-صعودی) در دو بافت شنی و لوم شنی، تغییرات رواناب و رسوب را موردبررسی قرار دادند نتایج نشان داد شدت باران و بافت خاک و تغییر در نوع رگبار به‌صورت معنی‌داری بر میزان رواناب و رسوب اثرگذار بودند. اسلامی و واعظی (Eslami & Vaezi, 2016) به‌منظور بررسی تأثیر اندازه خاکدانه بر تغییرات رواناب و رسوب، پنج کلاس اندازه خاکدانه از یک خاک لوم رسی را تحت ۱۰ رخداد باران (با شدت ثابت ۶۰ میلی‌متر بر ساعت و به مدت ۳۰ دقیقه) با فاصله پنج روز در فلوم‌های فرسایشی موردبررسی قرار دادند. نتایج نشان داد اثر اندازه خاکدانه بر تولید رواناب و رسوب (فرسایش‌پذیری) معنی‌دار بود ($p < 0.05$). همچنین رخدادهای بارندگی اثر معنی‌دار بر تولید رواناب ($p < 0.05$)، رسوب و غلظت رسوب ($p < 0.01$) داشتند. صادقیان و همکاران (Sadeghian *et al.*, 2020) با بررسی اثر ضربه قطرات باران بر ویژگی‌های هیدرولیکی جریان شیاری تحت تأثیر درجه شیب عنوان کردند که با افزایش شیب، برداشت خاک توسط رواناب و ضربه قطرات باران افزایش می‌یابد. آرمسترانگ و همکاران (Armstrong *et al.*, 2011) به منظور بررسی تغییرپذیری فرسایش بین‌شیاری، خاک با بافت لوم سیلتی را در شیب‌های ۳، ۶ و ۹ درصد تحت بارانی شبیه‌سازی‌شده با شدت ۴۷ میلی‌لیتر بر ساعت موردبررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در شیب‌های کم‌تر اثر عواملی همچون میزان رطوبت، زبری سطح، الگوی جریان و عمق جریان بر عامل گرانش زمین غالب بود که موجب شدند شدت فرسایش بین‌شیاری بسیار متغیر باشد. فو و همکاران (Fu *et al.*, 2011) به منظور بررسی تغییرات رواناب و رسوب حاصل از فرسایش بین‌شیاری شیب‌های ۹، ۱۸، ۲۷، ۳۶، ۴۷، ۵۸، ۷۰، ۸۴ و ۱۰۰ درصد را تحت شدت بارندگی ۶۷ میلی‌متر بر ساعت قرار دادند. نتایج نشان داد پاشمان، رسوب و رواناب بین‌شیاری با شیب افزایش می‌یابند و پس از رسیدن به اوج روند آن‌ها کاهش می‌شود. ژینگ و

دهند (Fathi Taperasht, et al, 2022). بیش از نیمی از اراضی کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران تحت کشت دیم هستند (Vaezi & Salehi, 2020; Asadi et al., 2022). ضعف پوشش گیاهی یکی از عوامل مهم انتقال‌پذیری بالای ذرات سطحی خاک از طریق پاشمان و رواناب سطحی در این مناطق است (Saedi et al., 2016). بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که نقش عوامل مختلف مانند درجه شیب سطح و شدت بارندگی بر فرسایش بین‌شیاری توسط پژوهشگران متعددی در سراسر دنیا بررسی شده است. همچنین چنین تحقیقاتی در برخی خاک‌های منطقه نیمه‌خشک در ایران نیز انجام گرفته است. با این وجود اغلب تحقیقات بر روی نمونه‌های دست‌خورده خاک، در شرایط آزمایشگاهی انجام گرفته است. طبیعتاً در چنین شرایطی برخی مؤلفه‌های مؤثر بر تولید رواناب سطحی مانند تخلخل، نسبت منافذ درشت خاک و شدت نفوذ آب دست‌خوش تغییر می‌شوند. همچنین در این شرایط، عوامل مؤثر بر فرسایش‌پذیری بین‌شیاری مانند ساختمان خاک تغییر می‌یابند. این دو عامل موجب می‌شود یافته‌های آزمایشگاهی همچنان با شرایط طبیعی و واقعیت‌های فرسایش بین‌شیاری فاصله داشته باشد. دستیابی به رابطه میان فرسایش بین‌شیاری و شیب، می‌تواند اعتبار مدل WEPP را در خاک‌های منطقه نیمه‌خشک نمایان سازد. از سوی دیگر اطلاعات در مورد زمان وقوع فرسایش بین‌شیاری طی بارندگی و نیز نقش شیب سطح در آن محدود است. اهمیت این اطلاعات در نواحی نیمه‌خشک که از خاک‌های با ساختمان نسبتاً ناپایدار برخوردارند، بسیار بیشتر است. از این‌رو این پژوهش با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز باران در شرایط طبیعی در دامنه‌های با خاک مختلف و شیب متفاوت به منظور بررسی نقش شیب سطح در شدت وقوع رواناب سطحی و فرسایش بین‌شیاری و تعیین روابط میان آن‌ها در دامنه‌های با خاک مختلف در منطقه نیمه‌خشک انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

همکاران (Xing et al., 2016) با بررسی اثر شدت باران و شیب دامنه بر فرایند فرسایش گزارش کردند ضریب رواناب با افزایش شدت بارندگی کاهش و با افزایش شیب افزایش یافت. ارتفاع رواناب و هدررفت خاک با افزایش شدت بارندگی افزایش یافت. وو و همکاران (Wu et al., 2021) تأثیر شیب سطح بر زمان آغاز رواناب و تغییرات سرعت جریان حاصل از فرسایش بین‌شیاری در یک خاک لسی را با استفاده باران شبیه‌سازی‌شده موردبررسی قرار دادند. نتایج بین زمان آغاز رواناب و درصد شیب با استفاده از آماره ضریب تبیین R^2 نشان داد شیب سطح دارای یک رابطه معنی‌دار منفی با زمان آغاز رواناب (R^2 : ۹۷٪ تا ۹۰٪) و رابطه معنی‌دار مثبت با سرعت جریان (R^2 : ۹۷٪ تا ۹۵٪) بود و با افزایش شیب سطح، زمان آغاز رواناب به تدریج کاهش و سرعت جریان به تدریج افزایش یافت. تیلک و همکاران (Telak et al., 2021) گزارش کردند که اثرات زنجیره‌ای کمبود ماده آلی خاک و پایداری خاکدانه‌ها باعث ایجاد تغییرات هیدرولوژیکی در خاک شده و هدررفت آب و خاک را افزایش می‌دهد و همچنین اثر شیب را بر افزایش شدت فرسایش بیشتر می‌کند. وونگ و همکاران (Wang et al., 2022) پژوهشی با هدف پیش‌بینی ظرفیت انتقال رسوب بر پایه خاک‌های با میانگین قطر برابر ۰/۰۹۵ و ۰/۰۴ میلی‌متر طراحی کردند. نتایج نشان داد ظرفیت انتقال رسوب با افزایش دبی واحد و شیب انرژی جریان روندی افزایشی و پیوسته داشت. همچنین تغییرپذیری شدت تولید رواناب دارای یک رابطه معنی‌دار با ضریب تبیین ۹۶ درصد نسبت به تغییرات میزان پایداری و ساختمان خاک بود.

تأثیر فرسایش بین‌شیاری در هدررفت خاک و عناصر غذایی، بخصوص در اراضی کشاورزی مناطق نیمه‌خشک بسیار قابل توجه است. بررسی توزیع مکانی مناطق خشک و نیمه‌خشک نشان می‌دهد حدود ۳۹ درصد (۱۷/۴۰ میلیون کیلومتر) از سطح خشکی‌های کره زمین را مناطق نیمه‌خشک و ۶۱ درصد آن را (۲۶/۳۰ میلیون کیلومتر) نواحی خشک تشکیل می‌دهند (Ahmadi, 1992). همچنین بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی به روش دومارتین ۷۶/۴۰ درصد (۱/۲۴۸ میلیون کیلومتر مربع) از مساحت ایران را مناطق خشک و ۱۹/۶۵ درصد (۰/۳۲۱ میلیون کیلومتر مربع) را مناطق نیمه‌خشک تشکیل می‌دهند.

دامنه‌های مورد مطالعه

آزمایش در چهار دامنه با خاک مختلف و چهار شیب شامل ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد در منطقه با مختصات جغرافیایی $36^{\circ}40'40''$ تا $36^{\circ}41'20''$ عرض شمالی و $48^{\circ}10'23''$ تا $48^{\circ}24'30''$ طول شرقی در محدوده دانشگاه زنجان انجام شد. معیار اولیه و اصلی انتخاب خاک‌ها، تفاوت در بافت خاک بود و آزمایش تجزیه اندازه ذرات معدنی نشان داد که خاک دامنه‌ها دارای بافت شامل لوم شنی، لوم سیلتی، لوم رس شنی و لوم رسی هستند. اگر چه تغییر در بافت خاک، باعث تفاوت در سایر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مانند ساختمان (تشکیل و پایداری خاکدانه)، درصد ماده آلی، هدایت هیدرولیکی، چگالی ظاهری می‌تواند بشود اما در این مطالعه برای بیان نقش نوع خاک و تحلیل آماری، از نام بافت خاک بهره گرفته می‌شود. منطقه مورد مطالعه دارای متوسط بارندگی سالانه در دوره آماری ۱۰ ساله حدود ۲۷۹ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۱ درجه سانتی‌گراد است. این منطقه بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن دارای اقلیم نیمه‌خشک سرد است (Zanjani Jam & Soufi, 2005). رژیم رطوبتی و حرارتی خاک بر اساس اطلاعات نقشه رژیم رطوبتی و حرارتی کشور به ترتیب زیریک^۱ و مزیک^۲ است. در این منطقه بارندگی‌ها اغلب در ماه‌های آبان (۶۶ میلی‌متر)، آذر (۳۹ میلی‌متر)، اسفند (۵۳ میلی‌متر)، فروردین (۳۵ میلی‌متر) و اردیبهشت (۴۱ میلی‌متر) می‌بارد. حدود ۴۵ درصد سطح استان را اراضی مرتعی (۹۷۹۸۷۰/۶ هکتار)، ۳۲ درصد (۷۰۱۹۰۱/۷ هکتار) را دیمزارها، ۶/۶۵ درصد (۱۴۴۸۰۳/۱ هکتار) را اراضی آبی و باغات و ۱۶/۳۵ درصد (۳۵۶۰۱۹ هکتار) را نیز سایر اراضی تشکیل می‌دهند (Deputy of Planning of Zanzan Governorate, 2011). همچنین بر اساس بررسی شدت بارش‌های دوره آماری ۱۰ ساله شدت‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی‌متر بر ساعت دارای بیش‌ترین فراوانی وقوع در منطقه هستند. در این میان شدت‌های ۲۰ و ۴۰ میلی‌متر بر ساعت به‌واسطه قابلیت تخریب خاک سطحی و

تولید رواناب، به‌عنوان شدت‌های فرساینده باران هستند (Beshart & Vaezi, 2015) اراضی منطقه اغلب تحت کشاورزی دیم است و در بیشتر نقاط منطقه، فرسایش آبی به شکل‌های فرسایش سطحی، شیلی، بین‌شیلی و آبکندی دیده می‌شود همچنین خاک‌ها به شدت تحت تأثیر فرسایش پاشماني و بین‌شیلی هستند و پیامدهای آن تولید هرزآب‌های گل‌آلود پایین دست شیب‌ها به هنگام بارندگی و پدیدار شدن سله روی خاک است (Vaezi et al., 2016). خاک‌های نسبتاً ریزبافت و کمبود ماده آلی و ضعف ساختمان خاک از علل حساسیت بالای خاک‌ها به فرایندهای فرسایشی هستند (Lanza et al., 2011).

مشخصات شبیه‌ساز باران

برای انجام این پژوهش یک دستگاه شبیه‌ساز باران با توان ایجاد شدت‌های مختلف باران طراحی و ساخته شد. ابعاد باران‌ساز ۵۰ سانتی‌متر در ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع آن ۱ متر است. در طراحی باران‌ساز، اندازه قطرات باران به طور متوسط از ۱/۲ تا ۲/۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد (Rousseau, 2006). در قسمت بالای دستگاه شبیه‌ساز باران صفحه بارش با ابعاد ۴۰ سانتی‌متر در ۵۰ سانتی‌متر متناسب با ابعاد فلوم مورد استفاده مستقر شد. برای تأمین آب از مخزن ۲۰۰ لیتری بالاتر از سطح قطره‌چکان‌ها با بار آبی ثابت استفاده شد (Salehi & Vaezi, 2024). همچنین جهت تأمین آب مورد نیاز، با محاسبه خروجی آب از نازل‌ها به همان میزان آب هم‌زمان به مخزن اضافه شده و در تمام طول آزمایش بار آبی ثابت فراهم شد. همچنین یک فلوم با طول ۵۰ سانتی‌متر، عرض ۴۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر ساخته شد. جنس دیواره فلوم از صفحات گالوانیزه با ضخامت ۲ میلی‌متر بود که در پایین دست فلوم نیم‌دایره‌ای با قطر ۷ سانتی‌متر برای قرارگیری لوله انتقال رواناب و رسوب ایجاد شد. زمان آغاز رواناب در هر آزمایش ثبت شد. شکل ۱ نمایی از دستگاه شبیه‌ساز باران و فلوم فرسایشی مورد استفاده را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمایی از دستگاه شبیه‌ساز باران و فلوم فرسایشی مورد استفاده
Figure 1. A view of the used a rain simulator and erosion flume

اندازه‌گیری ویژگی‌های فرسایشی

از بارانی با شدت ۴۰ میلی‌متر بر ساعت به دلیل فراوانی نسبتاً بالا (نزدیک به ۴۵۰ مورد طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۰) بر اساس گزارش‌های ایستگاه قلتوق در غرب استان زنجان و قابلیت تخریب خاک سطحی و تولید رواناب در آزمایش‌های فرسایشی استفاده شد (Besharat & Vaezi, 2015). مدت آزمایش با توجه به حداکثر زمان لازم برای رسیدن به جریان پایدار در همه آزمایش‌ها ۶۰ دقیقه در نظر گرفته شد. رواناب و رسوب در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه از آغاز رواناب تا رسیدن به جریان پایدار در ظرف‌های مدرج مجزا جمع‌آوری و حجم و جرم مخلوط رواناب و رسوب (با استفاده از ترازوی دقیق دیجیتالی) اندازه‌گیری شد. مدت آزمایش با توجه به زمان رسیدن به حالت پایدار در همه آزمایش‌ها به مدت ۶۰ دقیقه بود. سپس نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در جایی ساکن قرار داده و پس از ته‌نشست کامل، رسوب به آون انتقال داده شد. پس از خشک‌شدن رسوب، مقدار خاک هدررفته نیز محاسبه شد و با آگاهی از آن و حجم اولیه مخلوط، مقدار غلظت رسوب قابل دستیابی شد. ارتفاع رواناب در هر فلوم برحسب سانتی‌متر از تقسیم حجم رواناب (سانتی‌متر

مکعب) بر مساحت فلوم (سانتی‌متر مربع) به دست آمد (Agha-alizadeh *et al.*, 2020) و برحسب میلی‌متر گزارش گردید. همچنین شدت فرسایش بین‌شیاری از روی رابطه زیر تعیین شد. (رابطه ۱) (Flanagan & Nearing, 1995).

$$D_i = K_i I Q C_s C_v \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$K_i = 2728000 + 19210000 VFS$$

که در آن‌ها D_i شدت فرسایش بین‌شیاری ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$)، K_i فرسایش‌پذیری بین‌شیاری (g s m^{-4})، Q حجم رواناب خروجی در واحد زمان ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)، I شدت بارندگی (m s^{-1})، C_s عامل بدون بعد شیب، C_v عامل پوشش گیاهی و VFS نیز شن بسیار ریز در خاک سطحی (درصد) است.

تعیین ویژگی‌های خاک

نمونه‌برداری خاک به روش نمونه‌برداری مخلوط از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری سطح خاک تهیه و از الک دو میلی‌متر برای انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی عبور داده شد و به آزمایشگاه انتقال داده شد. برای تعیین جرم مخصوص ظاهری خاک، نمونه‌های دست‌نخورده با استفاده از سیلندر فلزی (Gee, 1986) به ارتفاع ۷ سانتی-متر و قطر ۴/۷ سانتی‌متر برداشت شدند. متوسط اندازه

Nielsen, 1994) به دست آمد (این روش در واقع سرعت نفوذ آب در خاک را می‌دهد که سرعت نفوذ نهایی تقریباً معادل با ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع در نظر گرفته می‌شود).

$$I = C_1 t^{\frac{1}{2}} + C_2 t + C_3 t^{\frac{2}{3}} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$K_s \cong (3C_1 \cdot C_3)^{\frac{1}{2}} + C_2 \quad (\text{رابطه ۶})$$

در روابط (۵) و (۶)، I نفوذ تجمعی (سانتی‌متر)، t زمان (دقیقه)، C_1 ، C_2 و C_3 ضرایب معادله فلیپ و K_s هدایت هیدرولیکی اشباع می‌باشند.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

وضعیت نرمال بودن توزیع داده‌ها با رسم هیستوگرام و آزمون شاپیرو-ویلک بررسی شد. آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی برای ۴ شیب و ۴ بافت در ۲ تکرار و در مجموع ۳۲ آزمایش انجام گرفت. برای انجام مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن در نرم‌افزار SPSS انجام شد و برای ترسیم نمودارها از نرم‌افزار Microsoft Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دامنه‌های موردبررسی در جدول ۱ آمده است. با توجه به توزیع اندازه ذرات، خاک دامنه‌ها به ترتیب در چهار گروه بافتی شامل لوم شنی، لوم سیلتی، لوم رس شنی و لوم رسی قرار دارند. از نظر جرم مخصوص ظاهری، خاک‌های لوم شنی، لوم سیلتی و لوم رسی مشابه بودند (۱/۲۵ تا ۱/۲۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب). نتایج اندازه‌گیری پایداری خاکدانه‌ها در برابر آب (با میانگین وزنی قطر ۰/۹۶ تا ۱/۸۶ میلی‌متر و الک خشک (با میانگین وزنی قطر ۰/۴۰ تا ۲/۸۰ میلی‌متر) نشان‌دهنده ضعف ساختمان خاک هستند (Hajabbasi, 1999). پایداری پایین خاکدانه‌های خاک می‌تواند منجر به مقاومت پایین ذرات خاک در برابر عامل فرساینده گردد که با توجه به نتایج خاک‌های لوم شنی و لوم رسی از پایداری پایین و لوم سیلتی و لوم رس شنی پایداری بهتری داشتند. کمترین مقدار ماده آلی خاک مربوط به بافت لوم شنی (۰/۲۴ درصد) و بیش‌ترین آن مربوط به بافت لوم سیلتی (۲/۳۸ درصد) است. ماده آلی خاک با بهبود پایداری خاکدانه‌ها و ساختمان‌سازی

خاکدانه به روش الک خشک با جداسازی خاکدانه‌ها به وسیله سری الک‌ها انجام گرفت در این روش ۱۰۰ گرم از خاکدانه‌ها روی یک سری الک (به ترتیب با اندازه ۴، ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۰۵ میلی‌متر) به طور یکنواخت ریخته شد و در دستگاه شیکر به مدت ۳ دقیقه تکان داده شد. سپس خاکدانه‌های روی هر الک توزین شدند. در نهایت اندازه خاکدانه‌ها در روش الک خشک با استفاده از رابطه میانگین وزنی قطر تعیین شد. (Kemper & Rosenau, 1986)

$$MWD_{dry} = \sum X_i W_i \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن MWD_{dry} میانگین قطر خاکدانه‌ها (میلی‌متر)، X_i میانگین قطر خاکدانه‌ها روی هر الک (میلی‌متر)، W_i جرم خاکدانه‌های بین دو الک به جرم کل خاک (گرم بر گرم) می‌باشد.

در روش الک تر مراحل همانند روش الک خشک بود با این تفاوت که سری الک‌ها در داخل آب تحت تکان‌های مکانیکی به برای مدت یک دقیقه و با سرعت ۲۰ دور در دقیقه قرار گرفتند. سپس خاکدانه‌های روی هر الک جمع‌آوری و درون آن در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک و وزن شدند. پس از جدا سازی شن و سنگ‌ریزه جرم خاکدانه‌های باقی مانده روی هر الک تعیین شد. در نهایت از روابط (۳ و ۴) میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در روش الک تر (MWD_{wet}) محاسبه شد. (Kemper & Rosenau, 1986)

$$MWD_{wet} = \sum X_i W_i \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$W_i = \sum_{n=1}^n \frac{W_i(a+s) - W_i(s)}{W_i(a+s) - \sum_{i=1}^n W_i(s)} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن X_i میانگین قطر خاکدانه‌ها روی هر الک (میلی-متر)، $W_i(a+s)$ جرم خاک باقی مانده روی هر الک (شامل خاک و شن) (گرم) و $W_i(s)$ جرم شن روی هر الک (گرم) می‌باشد.

توزیع اندازه ذرات معدنی خاک (شن، سیلت و رس) به روش هیدرومتری (Gee, 1986)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون با اسیدکلریدریک یک نرمال (Jones, 2001) و محتوای کربن آلی به روش والکی بلاک (Walkley & Black, 1934) تعیین شد و هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از استوانه فلزی مضاعف و از معادله سه‌جمله‌ای فیلپ (روابط ۵ و ۶) (Kutilek &

قطرات باران می‌تواند منجر به کاهش فرسایش خاک شود. کمترین مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک لوم رسی (۸/۶۹ سانتی‌متر بر ساعت) و بیشترین آن در خاک لوم شنی (۱۵/۷۴ سانتی‌متر بر ساعت) بود که نشان می‌دهد از آنجا که خاک لوم شنی در میان خاک‌های دیگر از همه درشت‌تر است، با سرعت بیش‌تری منافذ درشت از آب تخلیه می‌شوند.

منجر به مقاومت خاک نسبت به فرسایش می‌گردد (An *et al.*, 2010). دامنه تغییرات کربنات کلسیم معادل خاک بین ۲۰/۵۰ تا ۲۹/۵۸ درصد بود که نشان از آهکی بودن خاک‌های منطقه دارد. وجود آهک در خاک به دلیل وجود کاتیون‌های تبادلی مانند کلسیم، شرایط را برای هم‌آوری ذرات رس و تشکیل خاکدانه‌ها تقویت می‌کند. هم‌آوری ذرات خاک با ایجاد خاکدانه‌های مقاوم در برابر ضربه

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دامنه‌های موردبررسی

Table 1. Physical and chemical properties of some domain soil studies

Variable	Unit	Hillslope 1	Hillslope 2	Hillslope 3	Hillslope 4
Sand	(%)	59.55	33.90	54.86	26.89
Silt	(%)	30.50	53.60	22.62	35.60
Clay	(%)	10	12.50	22.52	37.51
Soil texture		Sandy loam	Silt loam	Sandy clay loam	Clay loam
BD	g.cm ⁻³	1.28	1.27	1.41	1.25
MWD _{dry}	mm	1.40	2.57	2.80	1.45
MWD _{wet}	mm	0.99	1.86	1.06	0.96
Ks	cm.h ⁻¹	15.74	9.27	11.29	8.69
OM	(%)	0.24	2.38	0.61	0.79
Equiv. CaCO ₃	(%)	29.58	26.83	20.50	23.33

MWD_{dry}: Mean weight diameter of dry aggregate size, MWD_{wet}: Mean weight diameter of stable aggregates, BD: Bulk density, Ks: Saturated hydraulic conductivity, OM: Organic matter

ساختمان، ماده آلی و هدایت هیدرولیکی از عوامل تعیین‌کننده شدت فرسایش هستند و افزایش و کاهش هرکدام می‌تواند منجر به تغییر معنی‌دار در شدت فرسایش شود (Telak *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2020). فرومادی و همکاران واعظی (Foromadi *et al.*, 2022) نیز وابستگی متفاوت بین فرسایش بین‌شیاری و شیب سطح را در خاک‌های مختلف گزارش کردند.

تجزیه واریانس رواناب سطحی و فرسایش بین‌شیاری تحت تأثیر شیب و بافت خاک

جدول ۲ نتایج تجزیه واریانس ارتفاع رواناب سطحی و شدت فرسایش بین‌شیاری تحت تأثیر بافت خاک و شیب سطح نشان داد که تفاوت معنی‌دار بین رواناب سطحی و شدت فرسایش بین‌شیاری از نظر بافت خاک و شیب سطح و اثر متقابل شیب سطح و بافت خاک ($p > 0.001$) وجود دارد (جدول ۲). خصوصیات خاک همچون بافت،

جدول ۲- تجزیه واریانس ارتفاع رواناب سطحی و شدت فرسایش بین‌شیاری تحت تأثیر بافت خاک و شیب

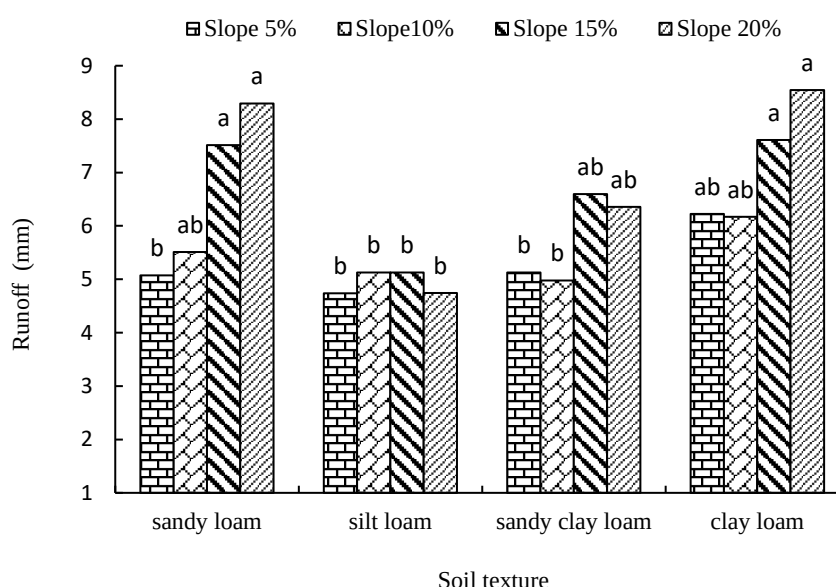
Table 2. Analysis of variance for surface runoff height and interrill erosion intensity under the influence of soil texture and slope

Source	Dependent Variable	Sum of Squares	df	Mean of Squares	F	Significance
Texture	Surface runoff height	22.34	3	7.44	7.73	.00
	Interrill erosion intensity	0.05	3	0.02	3.80	.00
Slope	Surface runoff height	17.93	3	5.97	5.35	.00
	Interrill erosion intensity	0.09	3	0.03	10.32	.00
Texture*slope	Surface runoff height	8.89	9	0.99	0.96	.00
	Interrill erosion intensity	0.03	9	0.01	1.03	.00

خصوصیات خاک بر ارتفاع رواناب اثر گذار بودند و در بافت های مختلف شدت اثر گذاری شیب متفاوت بوده است. به صورتی که هرچه شیب بیش تر می شود میزان تولید رواناب در بافت های لوم رسی و لوم شنی افزایش می یابد در حالی که در خاک لوم رس شنی در ابتدا افزایش و سپس کاهش اندکی را نشان می دهند، اما در بافت لوم سیلتی افزایش شیب منجر به افزایش ارتفاع نشده است. تولید اندک رواناب در خاک لوم سیلتی را می توان با وضعیت بهتر پایداری خاکدانه ها و درصد ماده آلی آن مرتبط دانست (Sun et al., 2021; Sobol et al., 2017). ظرفیت نگهداری آب در لایه سطحی و ارتفاع رواناب تا حد زیادی تحت تأثیر ویژگی های خاک، شیب و بارندگی افزایش یا کاهش یابد (Burns et al., 2001). تیلک و همکاران (Telak et al., 2021; Yazdanpanah et al., 2016) نیز نقش کمبود ماده آلی و عدم پایداری خاکدانه ها را در میزان فرسایش و رواناب تعیین کننده گزارش کرده اند. محققین بسیاری نیز افزایش رواناب با افزایش شیب به دلیل کاهش فرصت نفوذ را گزارش کرده اند (Telak et al., 2021; Vaezi & Salehi, 2020).

اثر متقابل شیب سطح و بافت خاک بر ارتفاع رواناب سطحی

بررسی اثر متقابل شیب سطح و بافت خاک بر ارتفاع رواناب نشان داد که بافت لوم سیلتی در همه شیب ها کمترین ارتفاع رواناب و بافت لوم رسی در همه شیب ها بیشترین ارتفاع رواناب را داشتند. برای شیب ۵ درصد ارتفاع رواناب در بافت لوم رسی حدود ۱/۳۵ برابر نسبت به بافت لوم سیلتی بیشتر بود. در همه دامنه ها ارتفاع رواناب با افزایش شیب سطح از ۵ درصد به ۱۰ درصد افزایش معنی داری نداشت، اما با افزایش شیب سطح به ۱۵ و ۲۰ درصد ارتفاع رواناب بجز در دامنه با بافت لوم سیلتی در دیگر دامنه ها به شدت افزایش یافت و همچنین دامنه تغییر ارتفاع رواناب تحت تأثیر شیب در بافت های لوم شنی، لوم سیلتی، لوم رس شنی و لوم رسی به ترتیب ۷۳، ۹، ۳۰ و ۴۱ درصد بود (شکل ۲). بررسی نتایج نشان می دهد که تغییر ارتفاع رواناب در شیب های پایین (۵ و ۱۰ درصد) عمدتاً وابسته به خصوصیات دامنه ها بوده و خصوصیات مانده انداز و پایداری خاکدانه ها در کنار بافت خاک از عوامل تعیین کننده ارتفاع رواناب بوده اند. با افزایش شیب به ۱۵ و ۲۰ درصد هر دو عامل شیب و



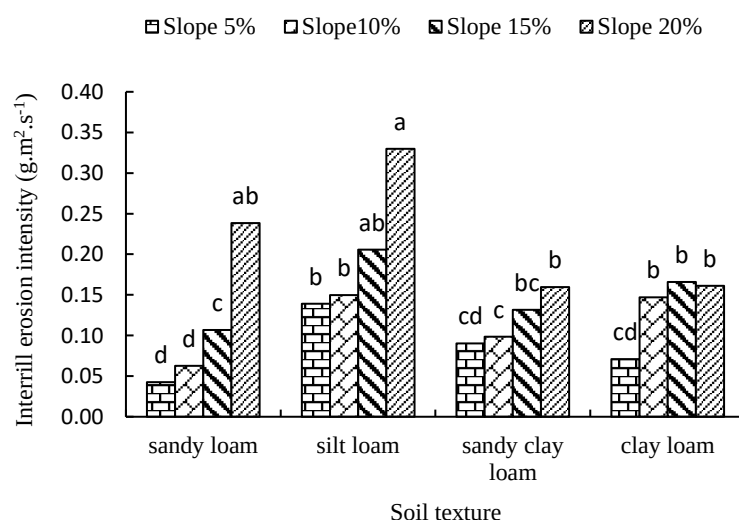
شکل ۲- تغییرات ارتفاع رواناب سطحی تحت تأثیر شیب سطح در بافت های مختلف خاک

Figure 2. Surface runoff height variation under influence of surface slope in different soil textures

اثر شیب سطح و بافت خاک بر فرسایش بین‌شیاری

شکل ۳ اثر شیب سطح بر شدت فرسایش بین‌شیاری در دامنه‌های بافت‌های را مختلف نشان می‌دهد. افزایش شیب در همه دامنه‌ها منجر به افزایش شدت فرسایش بین‌شیاری شد، به صورتی که با افزایش شیب از ۵ درصد به ۲۰ درصد در بافت‌های لوم شنی، لوم سیلتی، لوم رس شنی و لوم رسی به ترتیب ۵/۶، ۲/۶، ۱/۸ و ۲/۲۶ برابر شدت فرسایش بین‌شیاری افزایش یافت. بیش‌ترین شدت فرسایش بین‌شیاری مربوط به بافت لوم سیلتی و در شیب ۲۰ درصد (۰/۳۵۹ گرم در مترمربع بر ثانیه) و کم‌ترین مقدار آن نیز مربوط به بافت لوم شنی و شیب ۵ درصد (۰/۰۴۲ گرم در مترمربع بر ثانیه) بود. دامنه با بافت لوم سیلتی در همه شیب‌ها بیش‌ترین شدت فرسایش بین‌شیاری را نسبت به دیگر دامنه‌ها داشت و در مقابل بافت لوم رسی به جز در شیب ۵ درصد در بقیه شیب‌ها کم‌ترین فرسایش بین‌شیاری را داشت. یافته‌های پیشین نشان می‌دهد خاک‌های با بافت لومی که از درصد سیلت بالاتری برخوردارند با وجود نفوذپذیری بهتر خاک و امکان کمتر تولید جریان سطحی (شکل ۲ الف)، به دلیل چسبندگی اندک میان ذرات و همچنین وجود ساختمان ضعیف و ناپایدار، حساسیت بیشتری به فرسایش بین‌شیاری دارند (Zhang et al., 2020; Lu et al., 2016). در مطالعه حاضر با وجود آن که در خاک لوم سیلتی مقدار تولید رواناب کمتر بود لیکن حساسیت آن به فرایندهای فرسایش بین‌شیاری بیشتر بود. این موضوع بدان دلیل

است که وجود خاکدانه‌های نسبتاً پایدار در این خاک، به دلیل بهبود شدت نفوذ آب باران در خاک، از تولید رواناب زیاد جلوگیری می‌کند اما با ادامه بارندگی و تخریب نسبی ساختمان خاک در اثر باران، ذرات سیلت بیشتری در معرض انتقال توسط جریان سطحی قرار می‌گیرند. ذرات سیلت در مقایسه با سایر ذرات حساسیت بیشتری به انتقال دارند و به این دلیل با تداوم بارندگی، با وجود تولید کمتر رواناب، امکان انتقال این نوع ذرات بیشتر است و در نتیجه رواناب از غلظت رسوب بالایی نسبت به سایر خاک‌ها برخوردار است. یافته‌های سایر محققین در مورد فرسایش پاشمانی نیز نشان می‌دهد خاک با بافت لوم سیلتی بیشتر از دیگر بافت‌ها در معرض فرسایش ناشی از پاشمان قطرات باران بوده است. ذرات رس و سیلت خاک در کنار این که عاملی برای کاهش نفوذپذیری خاک هستند به دلیل انتقال‌پذیری آسان، در افزایش حساسیت‌پذیری به فرسایش مؤثر هستند (Vaezi et al., 2016). شائو و همکاران (Xiao et al., 2017) نیز افزایش میزان جدا شدن و انتقال ذرات رسوب توسط جریان را با افزایش شیب نشان دادند. همچنین وو و همکاران (Wu et al., 2017) نیز نتایجی مبنی بر افزایش معنی‌دار رسوب با افزایش شیب از ۱۰ تا ۲۵ درصد به دلیل افزایش سرعت جریان باران گزارش کردند. زاویه برخورد قطرات باران نیز عاملی دیگر است که با افزایش درجه شیب بیشتر شده، موجب افزایش انرژی وارد بر سطح خاک می‌شود (Salehi & Vaezi, 2024; Defersha & Melesse, 2012).

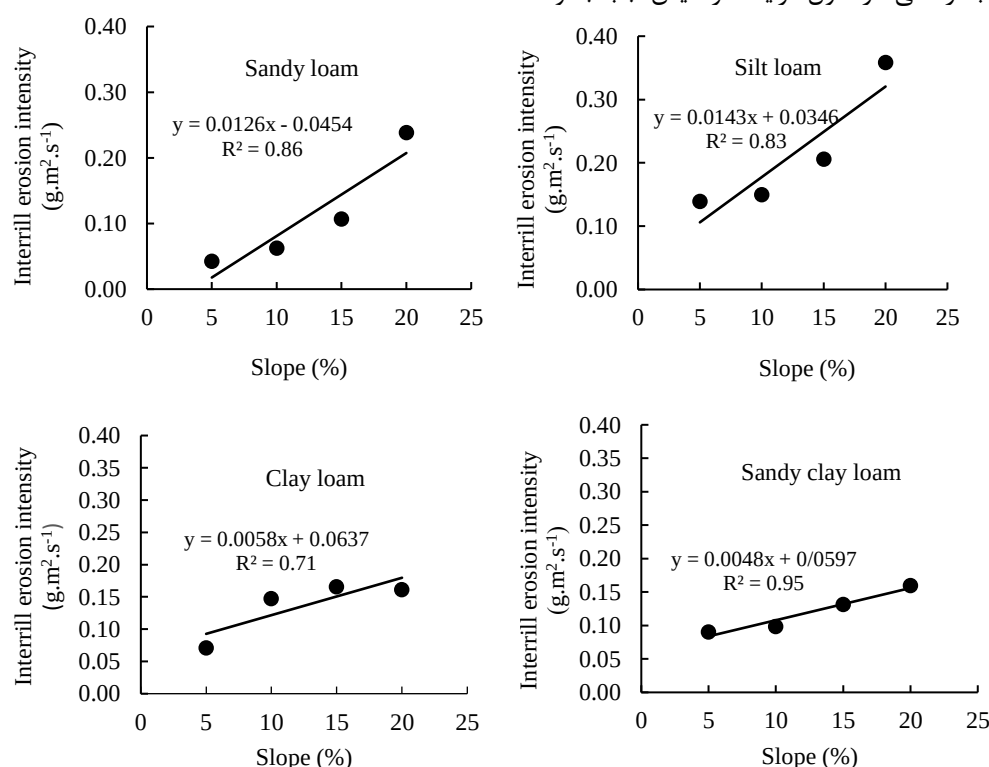


شکل ۳- تغییرات شدت فرسایش بین‌شیاری تحت تأثیر شیب سطح در بافت‌های مختلف خاک

Figure 3. Interrill erosion variation under the influence of surface slope in different soil textures

منتقل نمی‌شوند و عمده ذرات منتقله را ذرات با اندازه متوسط و چسبندگی کم تشکیل می‌دهند (Zhang *et al.*, 2016; Saedi *et al.*, 2016). در مقابل مطالعات دیگر بر روی مواد فرسایش یافته، توزیع‌های متفاوتی از ذرات انتقال یافته را نشان می‌دهند به این صورت که ذرات با دانه‌های بزرگ و کوچک نسبت به ذرات با اندازه متوسط راحت‌تر حمل می‌شوند (Asadi *et al.*, 2011; Wu *et al.*, 2017). واعظی و همکاران و ژانگ و همکاران (Xinge *et al.*, 2017; Vaezi & Bigdeli, 2021; *al.*, 2016) نیز معتقد بودند که انتقال ذرات ریز به ویژه رس و سیلت اگر با پایداری پایین همراه باشند انتقال آن‌ها توسط جریان سطحی بیشتر است و چنین خاک‌هایی حتی در شیب‌های پایین نیز دچار فرسایش بیشتری می‌شوند. گزارش‌ها نیز نشان می‌دهد شدت فرسایش در خاک‌های با ذرات درشت بیشتر به دلیل قابلیت انتقال پایین اندک این گونه ذرات بیشتر تحت تأثیر درجه شیب سطح و شدت جریان تغییر می‌یابد. چینگ و همکاران (Cheng *et al.*, 2008) نیز با مطالعه اثر شیب بر رواناب و رسوب گزارش کردند با افزایش شیب از ۵ درصد به ۲۰ درصد شدت فرسایش بیش از ۶۰ درصد افزایش را نشان داده است.

روند تغییرات شدت فرسایش بین‌شیاری به‌عنوان تابعی از شیب سطح در خاک‌های با بافت مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. روند افزایش شدت فرسایش بین‌شیاری با افزایش شیب در دامنه‌ها نشان از تحت تأثیر قرار گرفتن شدت فرسایش از عامل شیب است. وجود روابط معنی‌دار میان فرسایش بین‌شیاری و شیب نشانگر اعتبار مدل WEPP در خاک‌های مورد بررسی است. ویژگی‌های خاک دامنه به‌ویژه توزیع اندازه ذرات خاک عامل مهمی در تغییرات اعتبار این معادله در خاک‌های مختلف است. ارتباط میان فرسایش بین‌شیاری و شیب سطح در بافت لوم رس شنی بیش‌ترین ($R^2=0.95$) و در بافت لوم رس کم‌ترین ($R^2=0.71$) بود. رابطه شدت فرسایش بین‌شیاری و شیب سطح در بافت لوم رس شنی افزایشی و با نوسان کمی نسبت به شیب خط همراه بود، در حالی که در بافت لوم سیلتی این رابطه نزولی و همراه با نوسان بیشتر نسبت به شیب خط بود. محققین معتقدند که ذرات رس و سیلت به دلیل ساختار آگلومره‌ای که دارند به‌سختی جدا شده و انتقال داده می‌شوند، اما افزایش انرژی بارندگی تحت تأثیر عواملی همچون شیب می‌تواند تخریب این خاکدانه‌ها را سهولت بخشد. با این حال، ذرات درشت نیز به راحتی در طول فرایند فرسایش جابه‌جا و



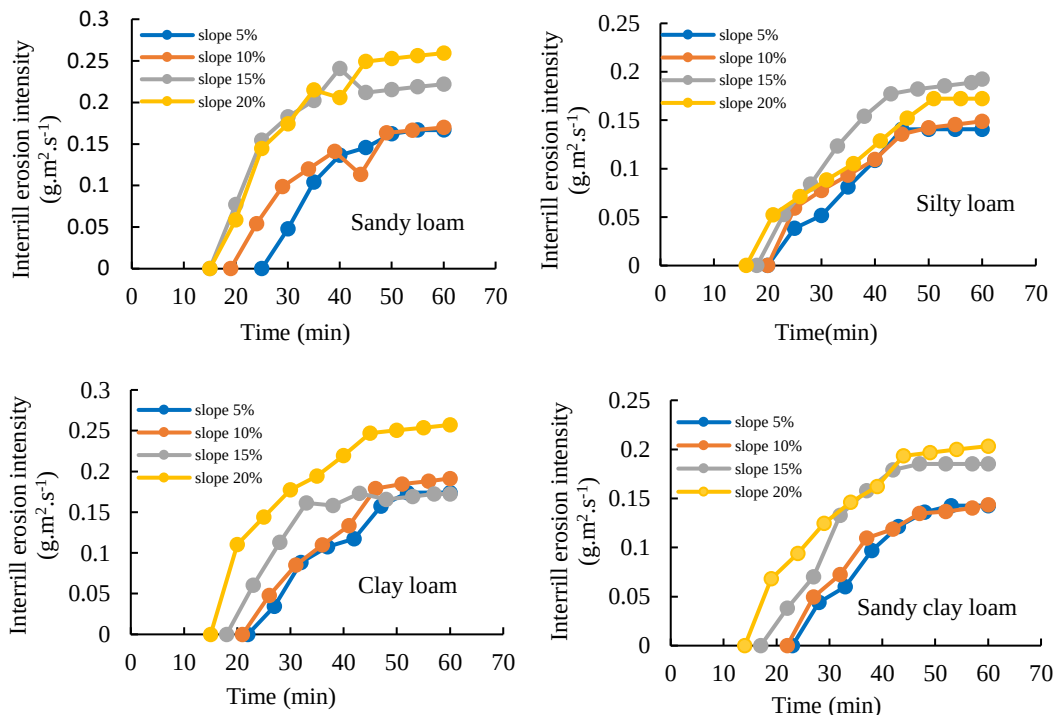
شکل ۴- تغییرات شدت فرسایش بین‌شیاری تحت تأثیر شیب در بافت‌های مختلف خاک

Figure 4. Interrill erosion variation under the influence of slope in different soil textures

تغییرات زمانی فرسایش بین‌شیاری

تغییرات زمانی شدت فرسایش بین‌شیاری تحت تأثیر شیب سطح و بافت خاک در شکل ۵ نشان داده شده است. الگوی تغییرات زمانی شدت فرسایش بین‌شیاری نشان می‌دهد که زمان آغاز هدر رفت خاک تابعی از شیب سطح است و در شیب‌های پایین زمان بیش‌تری برای شروع فرسایش بین‌شیاری لازم است. این تأخیر در آغاز فرسایش بین‌شیاری را می‌توان به امکان ماندن آب بر سطح خاک و فرصت بیشتر آن برای نفوذ نسبت داد. این شرایط به صورت عکس با افزایش شیب از ۵ درصد به ۲۰ درصد رخ داد و فرسایش زودتر آغاز شد. برای بافت لوم شنی، لوم سیلتی، لوم رس شنی و لوم رسی زمان وقوع فرسایش بین‌شیاری در شیب ۲۰ درصد نسبت به شیب ۵ درصد به ترتیب ۶۶، ۲۵، ۶۴ و ۴۶ درصد زودتر اتفاق افتاد. بیش‌ترین میانگین شدت فرسایش بین‌شیاری در شیب ۲۰ درصد و در خاک‌های لوم شنی و لوم رسی هر دو با ۰/۲۵ گرم بر مترمربع در هر ثانیه رخ داد همچنین کم‌ترین مقدار آن نیز در خاک‌های لوم سیلتی و لوم رس شنی هر دو با ۰/۱۴ گرم بر مترمربع در هر ثانیه بود. روند تغییرات شدت فرسایش بین‌شیاری نشان می‌دهد که در اوایل بارندگی افزایش شدت فرسایش بین‌شیاری به نسبت بازه‌های زمانی یکسان ۵ دقیقه‌ای دیگر بیشتر بوده است. این تفاوت را می‌توان به اثر ضربه قطرات باران بر تخریب شدید ساختمان خاک و انسداد منافذ سطح خاک و فراهمی بیش‌تر ذرات فرسایش پذیر در سطح خاک در بازه‌های زمانی اول اولیه نسبت داد. با در نظر گرفتن این شرایط زمانی که شیب افزایش می‌یابد؛ زاویه برخورد قطرات باران و به تبع افزایش نیروی تخریبی آن‌ها نیز افزایش می‌یابد (Wu et al., 2017; Salehi & Vaezi, 2024). در کنار آن با افزایش شیب سطح به دلیل افزایش نیروی گرانش فرصت نفوذ آب در خاک کاهش و رواناب سطحی افزایش می‌یابد (Telak et al., 2021). این شرایط باعث می‌شود که در بازه‌های زمانی یکسان ۵ دقیقه‌ای اول شدت فرسایش در شیب‌های بالاتر به نسبت بیش‌تر از

دیگر شیب‌ها باشد. با گذشت زمان از آغاز بارندگی شدت فرسایش بین‌شیاری به نسبت بازه‌های زمانی یکسان ۵ دقیقه‌ای کاسته شد. شدت فرسایش بسته به شیب سطح و خصوصیات خاک، زمانی که بخش زیادی از ذرات فرسایش‌پذیر خاک منتقل شدند به میزان تقریباً ثابتی می‌رسد (Salehi et al., 2022; Lu et al., 2016; Vaezi, 2023 & Varghaei). در مراحل ابتدایی بارش هدررفت خاک تحت تأثیر مقدار رس خاک است (Foromadi et al., 2022) این مسئله را می‌توان با شروع سریع‌تر فرسایش در خاک‌های با درصد سیلت و رس بالاتر در شیب‌های کم‌تر مشاهده کرد. تغییرات شدت فرسایش بین‌شیاری در بافت‌های لوم شنی و لوم رسی دارای روندی افزایشی بود که می‌توان دلیل این اتفاق را به ضعف ساختمان خاک (جدول ۱)، تخریب سریع‌تر خاکدانه‌ها و انتقال‌پذیری بالای ذرات با توجه به توزیع اندازه ذرات خاک‌ها نسبت داد. پایداری پایین خاکدانه‌ها در بافت‌های لوم شنی و لوم رسی به دلیل ضعف ساختمان خاک نسبت به بافت‌های دیگر و همچنین بالا بودن درصد ذرات فرسایش‌پذیر و قابل انتقال در بافت آن‌ها از عوامل این نتیجه است. اندازه خاکدانه‌ها در بافت‌های لوم رس شنی و لوم سیلتی و وضعیت مطلوب ماده آلی بخصوص در بافت لوم سیلتی محتمل‌ترین عوامل مقابله با هدررفت خاک در این دو بافت هستند (جدول ۱). پایداری خاکدانه می‌تواند جدا شدن ذرات در اثر ضربه قطرات باران را به شدت کاهش دهد (Lu et al., 2016). ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2017) نیز گزارش کرده‌اند که فرسایش در شیب‌های تندتر نسبت به شیب‌های ملایم در طول زمان بارش با شدت بیش‌تری به وقوع می‌پیوندد همچنین فرسایش خاک تا حد زیادی تحت تأثیر ویژگی‌های خاک است. آن و همکاران (An et al., 2012) بیان کردند که فرسایش عمدتاً مبتنی بر جداسازی و جابجایی سیلت و رس است و پایداری خاکدانه‌ها و ساختمان خاک از پارامترهای مؤثر در تغییرات فرسایش در واحد زمان هستند.



شکل ۵- تغییرات زمانی شدت فرسایش بین‌شیاری تحت تأثیر شیب زمین در بافت‌های مختلف خاک

Figure 5. Temporal interrill erosion intensity changes under the influence of slope in different soil textures

نتیجه‌گیری کلی

نتایج بررسی اثر شیب در دامنه‌های با بافت‌های متفاوت نشان داد تولید رواناب و شدت فرسایش بین‌شیاری و تغییرات زمانی آن تحت تأثیر خصوصیات خاک و شیب سطح قرار دارند. وجود روابط معنی‌دار میان فرسایش بین‌شیاری و شیب نشانگر اعتبار مدل WEPP در برآورد فرسایش بین‌شیاری در خاک‌های منطقه نیمه-خشک است. توزیع اندازه ذرات خاک عامل مهمی در تغییرات اعتبار مدل WEPP در این خاک‌ها است. در خاک‌های حاوی ذرات سیلت و رس بیشتر (بافت‌های لوم رسی و لوم سیلتی)، به دلیل پایداری اندک خاکدانه‌ها و بیش‌تر بودن ذرات حساس به فرسایش، شدت فرسایش بین‌شیاری زیاد بود. این خاک‌ها در شیب‌های پایین نیز دچار فرسایش بیشتری شدند. با افزایش شیب، فرصت نفوذ آب باران در خاک کاهش یافت و موجب آغاز سریع‌تر

رواناب، افزایش تولید رواناب سطحی و فرسایش بین‌شیاری شد. الگوی تغییرات زمانی فرسایش بین‌شیاری در شیب‌های تند (مانند ۲۰ درصد) شدیدتر از شیب‌های ملایم (۵ درصد) بود. تغییرات زمانی فرسایش بین‌شیاری در بافت‌های لوم شنی و لوم رسی روند افزایشی شدید و در بافت‌های لوم رس شنی و لوم سیلتی روندی تدریجی داشت. چنین الگویی نشان دهنده اهمیت بررسی تغییرات زمانی فرسایش بین‌شیاری در خاک‌های با بافت مختلف تحت تأثیر درجه شیب است. بر اساس نتایج این پژوهش شیب‌های ۱۵ و ۲۰ درصد حساس‌ترین شیب‌ها و خاک‌های با بافت لوم سیلتی و لوم رسی حساس‌ترین بافت‌ها به فرسایش بین‌شیاری هستند. با توجه به اثرپذیری فرسایش بین‌شیاری از شیب و ویژگی‌های خاک حفظ پوشش گیاهی به ویژه در دامنه‌های با شیب بالا، برای تقویت پایداری خاکدانه‌ها و افزایش فرصت نفوذ آب باران و در نتیجه مهار فرسایش بین‌شیاری ضروری است.

Reference

- Agha-alizadeh F., Abbasi A., and Esmali A. 2020. Determining the Effect of Soil Properties on Runoff and Sediment at Suborder Level Using Principal Components Analysis (Case Study: Ardabil Plain). *Applied Soil Research*, 8(2): 129.141

- Ahmadi H. 1992. Characteristics of Iran's Natural Environment. *Geographic Information Magazine* (Sephr), 2(5): 54-63. (In Persian)
- An J., Zheng F., Lu, J., and Li G. 2012. Investigating the role of raindrop impact on hydrodynamic mechanism of soil erosion under simulated rainfall conditions. *Journal of Soil Science*, 177(8): 517-526.
- An S., Mentler A., Meyer H., and Blume W. H. 2010. Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China. *Catena*, 81: 226-233.
- Armstrong A., Quinton J.N., Heng B. C. P., and Chandler J. H. 2011. Variability of interrill erosion at low slopes. *Journal of Earth Surface Processes and Landforms*, 36(1): 97-106.
- Asadi H., Beshara H., and Gorji, M. 2022. Challenges and Limitations of Soil and Land Resources in Iran. *Land Management Journal*, 10(1): 111-134. (In Persian)
- Asadi H., Moussavi A., Ghadiri H., and Rose C. W. 2011. Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of sediment. *Journal of Hydrology*, 406(1-2): 73-81.
- Besharat F., and Vaezi A. R. 2015. Soil loss under simulated rainfalls rainfall during events on runoff and soil Loss under simulated rainfalls. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 9(29): 8-19. (In Persian)
- Burns D. A., McDonnell J. J., Hooper R. P., Peters N.E., Freer J., Kendall C., and Beven K.J. 2001. Quantifying contributions to storm runoff through end-member mixing analysis and hydrologic measurements at the Panola Mountain Research Watershed (Georgia, USA). *Hydrological Processes*, 15: 1903-1924.
- Cheng Q., Ma W., and Cai Q. 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. *Journal of Geo*, 71: 117-125.
- Defersha M. B., and Melesse A. M. 2012. Effect of rainfall intensity, slope and antecedent moisture content on sediment concentration and sediment enrichment ratio. *Catena*, 90: 47-52.
- Deputy of Planning of Zanjan Governorate. 2011. Zanjan province plan development studies. Zanjan Program and Budget Office press. 150-160. (In Persian)
- Eslami S. and Vaezi. 2016. Runoff and sediment production under the similar rainfall events in deferent aggregate size of an agricultural soil. *Journal of Water and Soil*, 29(6): 1590-1600. (in Persian)
- Fathi Taperasht A., Shafizadeh-Moghadam H., and Kouchakzadeh, M. 2022. 'Spatial-temporal analysis of Iran's climatic classification based on Domarten method and Mann-Kendall test in the statistical period of 1995-2019', *Environmental Sciences*, 20(3): 137-154. (In Persian)
- Flanagan D.C., and Nearing M. A. 1995. USDA Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. NSERL Report No. 10, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, IN 47907-1194.
- Foroumadi M., Vaezi A.R. and Nikbakht J. 2022. Investigating the susceptibility of semi-arid soils with different texture to interrill erosion in relation to slope sharpness in Zanjan Province. *Applied Soil Research*, 10(1): 15-28. (In Persian)
- Fu S., Liu B., Liu H., and Xu L. 2011. The effect of slope on interrill erosion at short slopes. *Catena*, 84(1-2): 29-34.
- Gee G. W. and Bauder J. W. 1986. Particle size analysis. In: Klute, (Ed.) *Methods of Soil Analysis*. Part 1, 2nd ed. *America Society of Agronomy, Madison*. 5. 383-411.
- Hajabbasi M. A. 1999. *Methods and Guidelines For Assessing Sustainable Use of Soil Water Resources in the Tropics*. Ferdowsi University of Mashhad Publication. pp. 222-221
- Issa O. M., Bissonnais Y. L., Planchon O., Favis-Mortlock D., Silvera N., and Wainwright J. 2006. Soil detachment and transport on field-and laboratory-scale interrill areas: erosion processes and the size-selectivity of eroded sediment. *Journal of Earth Surface Processes and Landforms*, 31(8): 929-939.
- Jones J. B. 2001. *Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis*. CRC Press, Boca Raton, FL. 27-160.
- Kemper W.D. and Rosenau R.C. 1986. Aggregate stability and size distribution models. *Geoderma*, 123: 363-371.
- Kinnell P. I. A. 2005. Raindrop impact induced erosion processes and prediction: a review. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(14): 2815-2844.
- Kutilek, M. and D. R. Nielsen. 1994. *Soil hydrology*. Catena Verlag Cremlingen. 370 pp

- Lanza N. L., Newsom H. E. and Osterloo M. M. 2011. The Systematic Effects of Martian Gravity on Hillslope Materials and Mass Movement Processes. In Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts, 42, Pp: 2383
- Lean E. O. 1982. Soil pH and lime requirement. Methods of soil analysis: Chemical and microbiological properties. Pp: 199-224.
- Lu J., Zheng F., Li, G., Bian F., and An J. 2016. The effects of raindrop impact and runoff detachment on hillslope soil erosion and soil aggregate loss in the Mollisol region of Northeast China. *Soil and Tillage Research*, 161: 79-85.
- Mahmoodabadi M., and Cerdà A. 2013. WEPP calibration for improved predictions of interrill erosion in semi-arid to arid environments. *Geoderma*, 204: 75-83.
- Parsons, A.J., Lascelles, B. 2000. Rainfall Simulation in Geomorphology", *Earth Surface Processes and Landforms*. 25(7): 679-689.
- Rousseau, P., Jolivet, V., and Ghazanfarpour, D. 2006. Realistic real-time rain rendering. *Computers and Graphics*. 30: 507-518.
- Sadeghian N, Vaezi A., and Majnooni Haris A. 2020. Effect of raindrops impact on hydraulic properties of the rill flow under slope gradients. *Journal of water and Soil Science*. 24(1) 83-94. (in Persian)
- Saedi T., Shorafa M., Gorji M. and Moghadam B.K. 2016. Indirect and direct effects of soil properties on soil splash erosion rate in calcareous soils of the central Zagross, Iran: A laboratory study. *Geoderma*, 271: 1-9.
- Salehi Y., Moghadam N.K., Lajayer B.A. and Astatkie, T. 2022. Soil conservation using mechanical and non-mechanical methods. In *Soils in Urban Ecosystem* (pp. 219-241). Springer, Singapore
- Salehi Y. and Vaezi A.R. 2024. Investigating the particle size distribution of interrill erosion in different soils under land slope gradient. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 15 (4): 519-534. (in Persian)
- Sheykh Rabiee M.R., Feiznia S. and Peyrowan H. R. 2011. Study runoff and soil lose in map units of Hiv watershed, measurements and comparison at the rainfall simulator scale. *Journal of Geoscience*, 20(80): 57-62. (in Persian)
- Sobol N.V., Gabbasova I.M. and Komissarov, M.A., 2017. Effect of rainfall intensity and slope steepness on the development of soil erosion in the Southern Cis-Ural region (A model experiment). *Eurasian Soil Science*, 53(9): 1098-1104.
- Sun T., Deng, L., Fei K., Fan X., Zhang L., Ni L. and Sun R. 2021. Runoff characteristics and soil loss mechanism in the weathered granite area under simulated rainfall. *Water*, 13(23): 3453.
- Telak L.J., Dugan I. and Bogunovic I. 2021. Soil management and slope impacts on soil properties, hydrological response, and erosion in hazelnut orchard. *Soil Systems*, 5(1): 1-13
- Vaezi A. R. and Salehi Y. 2020. The efficiency of water infiltration models in different land uses of the Tahamchai catchment. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51:5. 1281-1291. (In Persian)
- Vaezi A. R., Gharehdaghi H. and Marzvan S. 2016. The role of slope steepness and soil properties in rill erosion in the hillslopes (a case study: Taham Chai catchment, NW Zanjan). *Journal of water and soil conservation*, 23:4. 83-100. (In Persian)
- Vaezi A.R. and Bigdeli R. 2021. The effect of raindrops impact on soil loss from cultivated farrows in different Soils. *Iranian Journal of Soil and Water Researc*, 51(11) 2815-2825.
- Vaezi A.R. and Varghaei L. 2023. Investigating the effect of cultivated furrow length on rill erosion and eroded grain size in a rainfed field in the Zanja, *Applied soil research*. 11(2): 59-70
- Walkley A. and Black I.A. 1934. Estimation of soil organic carbon by the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37: 29-38.
- Wang J., Gao C., Liu X., and Tan G. 2022. Prediction of dimensionless sediment transport capacity for loess slopes and its response to flow intensity parameters. *Journal of Soils and Sediments*. 22(1): 238-255.
- Watson D. A., and Laflen J. M. 1986. Soil strength, slope, and rainfall intensity effects on interrill erosion. *Transactions of the ASAE*. 29(1): 98-102.
- Wu B., Li, L., Xu L., Wei X., and Li X. 2021. The influence of slopes on interrill erosion processes using loessial soil. *Journal of Soils and Sediments*. 21(11): 3672-3681.
- Wu X., Wei Y., Wang J., Xia J., Cai C., Wu L., Fu Z, and Wei Z. 2017. Effects of erosion degree and rainfall intensity on erosion processes for Ultisols derived from quaternary red clay. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 249: 226-236.

- Xiao H., Liu G., Liu P., Zheng F., Zhang J., and Hu F. 2017. Sediment transport capacity of concentrated flows on steep loessial slope with erodible beds. *Scientific Reports*, 7(1): 23-50.
- Xing W., Yang P., Ren S., Ao C., Li X., and Gao W. 2016. Slope length effects on processes of total nitrogen loss under simulated rainfall. *Catena*, 139: 73-81.
- Yazdanpanah N., Mahmoodabadi M., and Cerda A. 2016. The impact of organic amendments on soil hydrology, structure and microbial respiration in semiarid lands. *Geoderma*, 266: 58-65.
- Zanjani Jam M., and Souf M. 2005. Investigating the relationship between climate and gully areas in Zanjan province. The third national conference on erosion and sedimentation, Tehran
- Zhang P., Yao W., Liu G., Xiao P. and Sun W. 2020. Experimental study of sediment transport processes and size selectivity of eroded sediment on steep Pisha sandstone slopes. *Geomorphology*, 363:107211.
- Zhang X. J. and Wang Z. L. 2017. Interrill soil erosion processes on steep slopes. *Journal of Hydrology*, 548: 652-664.