

بررسی حساسیت خاک‌های با بافت مختلف منطقه نیمه‌خشک به فرسایش بین‌شیاری تحت تأثیر تندی شیب سطح در استان زنجان

مجید فرومدی^{۱*}، علی‌رضا واعظی^۲، جعفر نیکبخت^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۲)

چکیده

فرآیند جدا شدن ذرات خاک به‌وسیله قطرات باران و انتقال آن‌ها بر اثر پاشمان و یا جریان سطحی، نقش اساسی در کاهش باروری خاک و آلودگی آب دارد. درجه شیب دامنه و نوع خاک می‌توانند از عوامل اساسی مؤثر بر فرایندهای فرسایش بین‌شیاری در مناطق نیمه‌خشک باشند؛ بنابراین مشخص شدن اینکه کدام بافت‌های خاک در چنین دامنه‌هایی، حساسیت بیشتری به فرایندهای فرسایش بین‌شیاری دارند، بسیار حائز اهمیت است. این پژوهش نیز به منظور بررسی تأثیر تندی شیب سطح بر شدت فرسایش بین‌شیاری در خاک‌های با بافت مختلف در منطقه نیمه‌خشک انجام گرفت. برای این منظور آزمایش در هشت خاک با بافت مختلف (رس‌سیلتی، رسی، شن‌لومی، شنی، لوم، لوم‌رس‌شنی، لوم‌رسی و لوم‌شنی) در سه درجه شیب (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) تحت باران شبیه‌سازی شده با شدت ثابت ۳۰ میلی‌متر بر ساعت در سه تکرار با مجموع ۷۲ واحد آزمایشی اجرا شد. فرسایش بین‌شیاری در فاصله زمانی یک دقیقه از آغاز رواناب در هر یک از واحدهای آزمایشی اندازه گرفته شد. نتایج نشان داد که فرسایش بین‌شیاری در همه خاک‌ها تحت تأثیر بافت خاک ($P < 0.0001$)، شیب سطح ($P < 0.0001$) و برهم‌کنش میان آن دو ($P < 0.0001$) است. خاک لوم، حساس‌ترین بافت خاک به فرسایش بین‌شیاری (۱۰/۷۶ گرم بر متر مربع بر ثانیه) و خاک شنی مقاوم‌ترین خاک از این نظر (۰/۷۵ گرم بر متر مربع بر ثانیه) بود. در خاک‌های با بافت ریز و متوسط که هدایت هیدرولیکی کم‌تری نسبت به خاک‌های درشت‌بافت داشتند، با وجود ساختمان نسبتاً مناسب، فرسایش بین‌شیاری زیاد بود. این موضوع به دلیل تولید جریان سطحی زیاد و نیز وجود ذرات ریز قابل انتقال بیشتر مانند سیلت بود. با افزایش درصد شیب، مقدار فرسایش بین‌شیاری در همه بافت‌ها به طور معنی‌داری افزایش یافت، با این وجود تأثیر شیب سطح بر وقوع فرسایش بین‌شیاری در خاک‌های ریزبافت بارزتر از خاک‌های درشت‌بافت بود. این موضوع نشان می‌دهد که جلوگیری از فرسایش سطحی در خاک‌های ریزبافت به‌ویژه در دامنه‌های شیبدار در منطقه زنجان ضروری است.

واژه‌های کلیدی: جریان سطحی، ذرات فرسایش‌پذیر خاک، ضربه قطرات باران، غلظت جریان

فرومدی م.، واعظی ع.ر.، نیکبخت ج. ۱۴۰۱. بررسی حساسیت خاک‌های با بافت مختلف منطقه نیمه‌خشک به فرسایش بین‌شیاری تحت تأثیر تندی شیب سطح در استان زنجان. تحقیقات کاربردی خاک، جلد ۱۰، شماره ۱. صفحه: ۱۵-۲۸.

۱- دانشجوی دکتری علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

۲- استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

۳- دانشیار گروه آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

* پست الکترونیک: majidforoumadi89@gmail.com

مقدمه

(سرعت و عمق جریان)، ویژگی‌های خاک (بافت، توزیع اندازه خاکدانه، مقاومت برشی خاک و رطوبت اولیه) و شرایط سطحی زمین (شیب، پوشش گیاهی، پستی و زبری سطح) است (Mahmoodabadi & Cerdà, 2013; Issa *et al.*, 2006). ویژگی‌های باران بیانگر فرسایش‌پذیری باران و جریان سطحی ناشی از آن می‌باشد، در حالی که ویژگی‌های خاک و شرایط سطحی آن، جدایش‌پذیری و انتقال‌پذیری ذرات را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Dimoyiannis *et al.*, 2006). اخیراً در پژوهش‌های فرسایش خاک، به منظور بررسی دقیق‌تر فرآیندهای جدا شدن و انتقال ذرات خاک در اثر بارندگی و یا رواناب، فرسایش بین‌شیاری از فرسایش شیاری تفکیک شده است (Mahmoodabadi *et al.*, 2014; Valmis *et al.*, 2005)؛ از این رو، لازم است طراحی و انجام آزمایش‌های مربوط به فرسایش بین‌شیاری به‌نحوی صورت پذیرد که فرآیند جدا شدن صرفاً در اثر برخورد قطرات باران و انتقال آن‌ها به‌وسیله پاشمان و یا جریان رواناب کم‌عمق انجام شود (Sajjadi & Mahmoodabadi, 2015; Kinnell, 1993).

در زمینه فرسایش بین‌شیاری تاکنون مطالعات متعددی در کشور صورت گرفته است. محمودآبادی و همکاران (Mahmoodabadi *et al.*, 2014) در پژوهشی که به ارزیابی مدل فرآیندی WEPP در برآورد شدت فرسایش بین‌شیاری با استفاده از شبیه‌ساز باران پرداختند نشان دادند که در تنش‌های برشی کم‌تر از آستانه، مدل WEPP تمایل به بیش‌برآورد فرسایش بین‌شیاری دارد. سیفی و همکاران (Seifi *et al.*, 2014) در پژوهشی به بررسی تأثیر اندوده سطحی بر فرسایش بین‌شیاری در شدت بارندگی مختلف در شرایط آزمایشگاهی پرداختند. نتایج نشان داد که تشکیل اندوده سطحی طی بارندگی باعث افزایش مقاومت برشی خاک و کاهش فرسایش‌پذیری بین‌شیاری شد. ژانگ و وانگ (Zhang & Wang, 2017) در پژوهشی به بررسی اثرات متقابل شدت باران و عمق جریان بر روی قدرت انتقال رسوب و توسعه یک مدل فرسایش بین‌شیاری پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش شدت باران و عمق جریان قدرت انتقال رسوب به‌طور قابل توجهی افزایش یافت. کیانی هرچگانی و همکاران (Kiani *et al.*, 2018) در پژوهشی به تحلیل

فرسایش بین‌شیاری یکی از انواع رایج فرسایش ناشی از باران در اراضی کشاورزی است (Kinnell, 2005) که تأثیر معنی‌داری بر هدررفت خاک به‌ویژه ذرات ریز و حاصلخیزی دارد و می‌تواند باعث آلودگی آب‌های سطحی از طریق مواد شیمیایی منتقل شده از اراضی کشاورزی شود (Defersha & Melesse, 2012). قابل ذکر است که بیش‌ترین خسارات ناشی از این نوع فرسایش در خاک‌های حاصلخیزی پایین رخ می‌دهد. کاهش حاصلخیزی زمین با از بین رفتن مواد آلی و مواد غذایی قابل دسترس گیاه، از بین رفتن بذر یا گیاهان جوان، کاهش توانایی خاک در ذخیره آب، رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها، سدها و دریاچه‌ها از جمله مشکلات ناشی از این نوع فرسایش خاک است (Ramos *et al.*, 2003). در این نوع فرسایش، جدا شدن ذرات خاک در اثر برخورد قطرات باران و انتقال این ذرات از طریق پاشمان و جریان سطحی کم‌عمق اتفاق می‌افتد (Asadi & Rouhipour, 2007; Mahmoodabadi & Cerdà, 2013). به طور کلی فرسایش بین‌شیاری در مکان‌هایی مانند اراضی مرتعی، زمین‌های شخم نخورده و یا زمین‌هایی که شیب آن‌ها کم است به‌عنوان فرآیند غالب فرسایش محسوب می‌شود. در فرسایش بین‌شیاری قطرات باران و جریان سطحی حاصل از باران دو عامل مهم در جداسازی و انتقال ذرات از سطح خاک هستند (Hui-Ming & Yang, 2009). در این فرسایش، جریان سطحی نقش انتقال ذرات جدا شده در اثر برخورد قطرات باران را ایفا می‌کند (Mahmoodabadi & Cerdà, 2013). عمق جریان، سرعت جریان و پارامترهای هیدرولیکی جریان (تنش برشی، قدرت جریان و قدرت جریان واحد) برای تعیین قدرت فرسایش‌پذیری جریان کم‌عمق سطحی به کار می‌رود (Hui-Ming & Yang, 2009). در سطوح بین‌شیاری به علت کم بودن درجه و طول شیب و تنش برشی کم جریان، جداسازی ذرات توسط جریان سطحی ناچیز است (Mahmoodabadi & Cerdà, 2013).

فرسایش بین‌شیاری تحت تأثیر عوامل متعددی مانند ویژگی‌های باران (قطر قطرات، انرژی جنبشی، مقدار و شدت باران)، ویژگی‌های هیدرولیک جریان سطحی

شدن این که کدام بافت‌های خاک در چنین دامنه‌هایی، حساسیت بیشتری به فرایندهای فرسایش بین‌شیاری دارند، بسیار حائز اهمیت است. هر چند تحقیقات کلی در زمینه فرسایش بین‌شیاری در منطقه نیمه‌خشک توسط محققان مختلف (Vaezi *et al.*, 2017; Foroumadi & Vaezi, 2019; Foroumadi & Vaezi, 2017) صورت گرفته است، لیکن در مورد تغییرات فرسایش بین‌شیاری در دامنه‌های با خاک و شیب متفاوت تحقیقات زیادی در این نواحی اقلیمی مانند استان زنجان صورت نگرفته است؛ در این استان وجود کمبود بارندگی از یک سو و وجود دوره‌های یخبندان از سوی دیگر، شرایط اقلیمی نیمه‌خشک سرد را در منطقه حاکم کرده است که باعث عدم تشکیل پوشش گیاهی دائمی به‌ویژه در اوایل بهار هنگام وقوع باران‌های پیاپی می‌شود و منجر به وقوع فرسایش سطحی و بین‌شیاری زیاد در دامنه‌ها می‌شود. از این رو در این پژوهش حساسیت برخی خاک‌های منطقه نیمه‌خشک در شمال غرب کشور به فرسایش بین‌شیاری تحت تأثیر درجه شیب سطح در شرایط آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

طراحی آزمایش

این پژوهش در هشت خاک با بافت مختلف (لوم، لومرسی، لومرسی‌شنی، رسی، لوم‌شنی، رس‌سیلتی، شنی و شن‌لومی) در سه سطح شیب (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) تحت باران با شدت ثابت ۳۰ میلی‌متر بر ساعت به مدت یک ساعت در سه تکرار در مجموع با ۷۲ واحد آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی (شیب در سه سطح، بافت خاک در هشت سطح و شدت بارش در یک سطح) انجام شد. علت انتخاب این بافت‌ها و شیب‌ها در این پژوهش، درصد فراوانی آن‌ها در منطقه مورد آزمایش بود. برای انتخاب شدت و مدت مناسب بارندگی نیز، از تحلیل‌های انجام گرفته بر روی ۱۹۶۱ رخداد باران ثبت شده در ایستگاه باران‌نگاری قلمتوق واقع در غرب زنجان طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۰ استفاده شد (Besharat & Vaezi, 2015). بر این اساس شدت بارندگی در منطقه از شدت حدود یک میلی‌متر بر ساعت تا ۱۵۰ میلی‌متر بر ساعت تغییر می‌کند و تداوم آن‌ها بین پنج دقیقه تا بیش از سه ساعت بود. در این بین باران‌های با

حلقه‌های سنجه رسوبی فرسایش بین‌شیاری در رگبارهای پیاپی تحت شرایط آزمایشگاهی پرداختند. نتایج بیانگر افزایش عمق رواناب با افزایش تعداد رگبارهای پیاپی در شدت بارندگی ۳۰ میلی‌متر بر ساعت بود. دینگ و هوآنگ (Ding & Huang, 2017) در پژوهشی به بررسی اثر زبری سطح بر مقدار فرسایش بین‌شیاری و توزیع اندازه ذرات رسوب پرداختند. این آزمایش در دو سطح زبری صورت گرفت. نتایج نشان داد که زبری سطح به طور قابل توجهی شروع رواناب را با تأخیر مواجه می‌سازد اما اثر معنی‌داری بر مقدار رواناب نداشت. همچنین زبری سطح اثر معنی‌داری بر میزان هدررفت خاک نداشت. وو و همکاران (Wu *et al.*, 2018) در پژوهشی به بررسی جداسازی فرآیندهای انتقال و جداسازی در فرسایش بین‌شیاری در شیب‌های مختلف در خاک‌های منطقه لسی در چین پرداختند. نتایج نشان داد که فرآیندهای جداسازی و انتقال هر دو تحت تأثیر درجه شیب و شدت باران قرار گرفتند. همچنین سرعت فرسایش بین‌شیاری و سرعت پاشمان ذرات نیز با افزایش درجه شیب افزایش یافت. واعظی و همکاران (Vaezi *et al.*, 2017) در پژوهشی به بررسی اثر ضربه قطرات باران بر تغییرات خصوصیات فیزیکی خاک و فرسایش آبی در هفت شدت باران شبیه‌سازی شده پرداختند. نتایج نشان داد که شدت تخریب خصوصیات فیزیکی خاک در اثر ضربه قطرات باران افزایش یافت و همچنین فرسایش خاک نیز تحت تأثیر شدت باران در هر دو حالت شرایط خاک (بدون ضربه و با ضربه قطرات باران) قرار گرفت.

فرسایش بین‌شیاری از شکل‌های مهم فرسایش خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. در این مناطق دوره‌های طولانی‌مدت خشکی مانع از استقرار و حفظ پوشش گیاهی می‌شود. از سوی دیگر خاک‌های واقع در مناطق خشک و نیمه‌خشک اغلب کم‌عمق، با مواد آلی کم و ساختمان ضعیف هستند (Vaezi *et al.*, 2017). همچنین کشت محصولات توسط کشاورزان معمولاً در این مناطق غالباً به صورت دیم و در اراضی شیب‌دار صورت می‌گیرد. در چنین شرایطی فرایندهای فرسایش آبی از جمله فرسایش بین‌شیاری و شیاری نقش اساسی در پسررفت خاک به‌ویژه از نظر فرسایش آبی دارند. درجه شیب دامنه و نوع خاک آن می‌توانند از عوامل اساسی مؤثر بر فرایندهای فرسایش بین‌شیاری باشند؛ بنابراین مشخص

نمونه‌برداری خاک

نقاط مختلفی از منطقه که تحت تأثیر فرسایش سطحی ناشی از باران بودند، برای نمونه‌برداری خاک در نظر گرفته شدند. این نقاط بر اساس مشاهده انتقال ذرات ریز و تشکیل بافت درشت و سنگی در خاک‌ها مورد توجه قرار گرفتند چرا که خاک زیرسطحی تحت فرآیندهای فرسایش آبی قرار نمی‌گیرد. در میان این دامنه‌ها، جاهایی که بر اساس روش لمسی از خاکی با بافت متفاوت برخوردار بودند، برای نمونه‌برداری خاک انتخاب شدند. پس از تجزیه آزمایشگاهی نمونه‌های گذرانده شده از الک ۲ میلی‌متری، نسبت به نمونه‌برداری خاک برای انجام آزمایش‌های فرسایش اقدام شد. برای این منظور نمونه‌های خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری برداشت و با الک هشت میلی‌متری غربال شدند (Foroumadi & Vaezi, 2017). غربال خاک‌ها از چنین الکی از این جهت بود که شباهت نمونه‌های گذرانده از الک با خاک طبیعی بیشتر باشد. در نمونه خاک گذرانده از الک، ذرات معدنی درشت (سنگریزه) به صورت دستی برداشت شدند و تنها خاکدانه‌های با قطر کوچک‌تر از هشت میلی‌متر برای انجام آزمایش‌های فرسایش مورد استفاده قرار گرفتند (Foroumadi & Vaezi, 2018). مقداری خاک عبور داده شده از الک دو میلی‌متر نیز برای انجام آزمایش‌های رایج فیزیکی و شیمیایی تهیه گردید و به آزمایشگاه منتقل شد.

شدت حدود ۳۰ میلی‌متر بر ساعت دارای ۲۶ درصد فراوانی هستند که بیش‌ترین درصد فراوانی را به خود اختصاص داده‌اند.

توصیف خاک‌های منطقه

خاک‌های مورد مطالعه در این پژوهش از برخی مناطق استان زنجان شناسایی شد. میانگین درجه حرارت سالانه استان زنجان ۱۵ درجه سانتی‌گراد و متوسط بارندگی سالانه آن نیز ۳۱۵ میلی‌متر است و اقلیم منطقه بر اساس روش دمارتن، نیمه‌خشک می‌باشد. از نظر زمین‌شناسی نیز این منطقه روی رسوبات کواترنری واقع شده است (Abdinezhad *et al.*, 2013). خاک‌های منطقه غالباً دارای بافت متوسط و متمایل به ریز با خاستگاه آهکی هستند و دچار کمبود ماده آلی می‌باشند. اشکال گوناگون فرسایش آبی در عرصه‌های طبیعی و کشاورزی این منطقه به ویژه در دامنه‌ها دیده می‌شود. فرسایش بارانی به عنوان نخستین شکل فرسایش آبی در طبیعت در تغییر خصوصیات فیزیکی خاک سطحی در هر رخداد بارندگی نقش اساسی دارد و سله که از پیامدهای تخریب فیزیکی خاک در اثر باران است، سرتاسر سطح آن را در بر گرفته است. در بسیاری از زمین‌های شیب‌دار، فرسایش شیاری و بین‌شیاری نیز به چشم می‌خورد.



شکل ۱- نحوه نمونه‌برداری خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری

Figure 1. How to sample soil from a depth of zero to 30 cm

تعیین ویژگی‌های خاک

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل توزیع اندازه ذرات (PSD) به روش هیدرومتری تعیین شد (Bouyoucos, 1962). فراوانی ذرات بر اساس روش دانه‌بندی آمریکایی (USDA, 1972) تعیین شد. چگالی ظاهری در نمونه خاک برداشت شده به وسیله سیلندر فلزی با قطر داخلی پنج سانتی‌متر و ارتفاع ۴/۹ سانتی‌متر تعیین شد (Blake & Hartge, 1986). میانگین وزنی قطر خاکدانه (MWD) پایدار در آب بر اساس مقاومت خاکدانه‌ها در آب به روش الک تر (Goh *et al.*, 1993) در خاکدانه‌هایی با قطر کوچک‌تر از شش میلی‌متر با استفاده از دستگاه مکانیکی با نوسان ۳۰ دور در دقیقه به مدت یک دقیقه (Hasanzadeh *et al.*, 2013) تعیین شد. انتخاب زمان یک دقیقه به دلیل ناپایداری زیاد ساختمان خاک‌های منطقه بود که در آزمایش الک تر در زمان بیشتر از آن تفاوتی بین خاک‌ها از نظر پایداری پدیدار نمی‌شد. همچنین متوسط اندازه خاکدانه با جداسازی خاکدانه‌ها به وسیله سری الک‌ها (Kemper & Rosenau, 1986)، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌ها به روش بار ثابت و افتان (Page, 1982)، درصد ماده آلی به روش والکلی-بلک (Walkley & Black, 1947)، درصد کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک (Erskine *et al.*, 2002) و درصد سدیم تبادلی خاک (ESP) نیز به روش استات آمونیوم (Klute, 1986) تعیین شدند.

شبیه‌سازی باران

بررسی حساسیت خاک‌های گوناگون به فرسایش بین‌شیاری در درجات مختلف شیب در شرایط طبیعی امری دشوار است. شبیه‌سازهای باران، ابزارهای مناسبی برای بررسی تغییرات ویژگی‌های خاک تحت فرآیند فرسایش و همچنین ارزیابی تأثیر عوامل محیطی مانند شیب زمین، رطوبت اولیه خاک و شدت باران بر فرسایش خاک هستند (Asadi *et al.*, 2011). در این پژوهش از یک دستگاه شبیه‌ساز باران متحرک با چارچوب فلزی با صفحه بارشی به طول ۱۲۰ و به عرض ۷۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۲۰ سانتی‌متر استفاده شد (شکل ۲). دستگاه شبیه‌ساز باران از قابلیت نوسان ۲۰ دور در دقیقه برخوردار بود. صفحه بارش باران‌ساز از ۴۸۰ قطعه نازل قطره‌ساز تشکیل شده بود. نازل‌ها به فاصله سه سانتی‌متری از هم برای ایجاد بارش یکنواخت باران قرار گرفتند. نازل‌ها توانایی تولید قطراتی با قطر ۲/۱ میلی‌متر را داشتند و یکنواختی مناسبی نیز از قطرات باران‌ساز شاهد بودیم. قطر قطرات باران شبیه‌سازی شده به روش گلوله آردی (Carter *et al.*, 1974) تعیین شد. شدت باران (۳۰ میلی‌متر بر ساعت) با ایجاد توزیع یکنواخت در دستگاه باران‌ساز قابل شبیه‌سازی بود. مدت بارندگی در تمام آزمایش‌ها یکسان و برابر ۶۰ دقیقه در نظر گرفته شد. انتخاب زمان ثابت (۶۰ دقیقه) برای کل آزمایش‌ها به دلیل امکان پایش تغییرات فرسایش بین‌شیاری در زمان نسبتاً طولانی و امکان مقایسه آماری آن‌ها با یکدیگر بود.



شکل ۲- نمایی از دستگاه شبیه‌ساز باران مورد استفاده در پژوهش
Figure 2. View of the rainfall simulator used in the research

اندازه‌گیری فرسایش بین‌شیاری

برای اندازه‌گیری مقدار فرسایش بین‌شیاری از سه فلوم آزمایشی به عرض ۵۰ سانتی‌متر و به طول ۷۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر (Zhang & Wang, 2017) استفاده شد. در کف فلوم از یک لایه شنی با قابلیت زهکشی استفاده شد و در درون آن خاک تا عمق ۱۵ سانتی‌متر قرار گرفت. پس از پر کردن فلوم با خاک، سطح خاک به آرامی تسطیح شد. علت تسطیح آرام خاک در داخل فلوم به دلیل جلوگیری از تغییرات زیاد چگالی خاک بود. برای جلوگیری از خارج شدن خاک از منافذ پایین فلوم، قبل از پر کردن فلوم یک قطعه پارچه توری و منفذدار در انتهای آن قرار داده شد. با توجه به ابعاد دستگاه شبیه‌ساز باران (۷۵ سانتی‌متر × ۱۲۰ سانتی‌متر)، در هر آزمایش دو قطعه فلوم در زیر دستگاه قرار می‌گرفت و تکرار سوم نیز در آزمایشی مجزا مورد بررسی قرار می‌گرفت. فلوم‌های آزمایشی محتوی خاک‌های مختلف تحت باران شبیه‌سازی شده با شدت ۳۰ میلی‌متر بر ساعت به مدت ۶۰ دقیقه قرار گرفتند. در طی مدت بارش، رواناب سطحی و فرسایش ناشی از باران و جریان سطحی حاصل از آن به وقوع پیوست و نشانه‌هایی از ایجاد شیاری طی مدت بارش دیده نشد. رواناب و رسوب حاصل از چنین فرسایشی (فرسایش بین‌شیاری) در فاصله‌های زمانی یک دقیقه به مدت یک ساعت در ظرفی جمع‌آوری شد. مقدار فرسایش بین‌شیاری از مقدار رسوب (گرم) خروجی از هر فلوم طی هر رخداده در واحد سطح (متر مربع) و واحد زمان (ثانیه) به دست آمد.

تحلیل داده‌ها

داده‌ها پیش از انجام تحلیل‌های آماری، از نظر توزیع نرمال با استفاده از تحلیل هیستوگرام و بررسی چولگی و کشیدگی مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به ماهیت آزمایش (فاکتوریل بر اساس عامل نوع خاک و درجه شیب)، تجزیه واریانس داده‌های مربوط به مقدار فرسایش بین‌شیاری در سطوح مختلف شیب (سه سطح شیب) و در بافت‌های مختلف خاک (هشت سطح خاک) با کمک آزمون دانکن انجام گرفت. حساسیت خاک‌های مختلف نسبت به فرسایش بین‌شیاری بر اساس رابطه بین شیب

سطح و فرسایش بین‌شیاری و همچنین ضریب تبیین مربوط به آن‌ها تعیین شد. در تمام این بررسی‌ها، برای تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SPSS (نسخه ۲۰) و برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel (نسخه ۲۰۱۳) استفاده شد.

نتایج و بحث

ویژگی خاک‌های مورد بررسی

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده است. خاک‌ها دارای محتوای بسیار اندک ماده آلی (کم‌تر از یک و نیم درصد) هستند و به دلیل وجود درصد بالایی از آهک (۱۲ تا ۱۴ درصد) در گروه خاک‌های آهکی (Duiker *et al.*, 2001) قرار دارند. مقدار سنگریزه در خاک‌ها از ۰/۰۵ درصد در خاک شنی تا ۱۸/۸ درصد در خاک لوم شنی متغیر است. با افزایش درصد سنگریزه مقاومت خاک در برابر فرسایش بین‌شیاری افزایش می‌یابد زیرا ذرات سنگریزه به دلیل سنگینی به راحتی منتقل نمی‌شوند (Akbari & Vaezi, 2015). خاک‌ها از نظر متوسط اندازه خاکدانه دارای تغییرات زیادی هستند و این ویژگی ساختمانی خاک از ۰/۳۳ میلی‌متر در خاک رسی تا ۲/۳۱ میلی‌متر در خاک لوم‌رسی شنی تغییر می‌کند. پایداری خاکدانه‌ها در آب برای مدت یک دقیقه بسیار پایین (۰/۵۲ تا ۱/۹۲ میلی‌متر) است و نشان از حساسیت بالای خاک به تخریب ساختمان در اثر بارندگی دارد (Mamedov *et al.*, 2001). مقدار سدیم تبادلی در اغلب خاک‌ها از کمتر از ۵ در خاک‌های رس‌سیلتی، لوم‌رسی و شنی تا بین ۵ تا ۱۷ درصد در خاک‌های رسی، لوم‌رسی شنی، لوم‌شنی، لوم و شن‌لومی متغیر است. افزایش سدیم تبادلی خاک در کنار فراوانی اندک ماده آلی و رس از عوامل ضعف خاکدانه‌سازی در خاک‌ها هستند (Refahi, 2007). ضعف پوشش گیاهی و برگشت ناچیز بقایای گیاهی، عامل اصلی کمبود ماده آلی و کاهش درجه تشکیل و پایداری خاکدانه‌ها است. هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌ها از ۰/۹۵ سانتی‌متر بر ساعت در خاک رس‌سیلتی تا ۲۱/۵۹ سانتی‌متر بر ساعت در خاک شنی متغیر بود. بالا بودن این عامل نقش مهمی در کاهش تولید جریان‌های سطحی و بروز فرسایش در خاک‌ها دارد.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه
Table 1. Physical and chemical properties of soil studied

Soil properties	Soil texture							
	Clay	Silty clay	Clay loam	Sandy clay loam	Sandy loam	Loam	Sand	Loamy sand
Sand (%)	0.17	6.01	26.42	55.50	60.16	45.80	92.20	76.00
Silt (%)	39.83	44.27	36.03	22.25	20.59	36.65	3.55	20.00
Clay (%)	60.00	49.72	37.52	22.25	19.25	17.55	4.25	4.00
Gravel (%)	1.76	1.31	8.70	18.20	18.87	15.60	21.24	1.01
Bulk density (g.cm ⁻³)	1.04	1.22	1.17	1.29	1.52	1.20	1.68	1.52
MWD _{wet} (mm)	0.19	0.28	0.52	0.96	1.09	0.97	0.21	1.14
MWD (mm)	0.33	0.38	2.01	2.31	1.86	2.14	0.14	1.92
Saturated hydraulic conductivity (cm.h ⁻¹)	1.80	0.95	5.34	8.22	3.07	2.82	21.59	18.22
OM (%)	0.63	0.74	0.44	0.35	1.43	0.58	0.33	0.47
CaCO ₃ (%)	26.14	22.52	23.26	20.55	14.61	27.85	2.21	12.21
ESP	16.95	1.71	2.17	6.13	5.59	5.12	2.15	5.61

نوع خاک هر دو عاملی مهم در شدت فرسایش بین‌شیاری در خاک‌های منطقه نیمه‌خشک مورد بررسی هستند. برهمکنش معنی‌دار میان آن دو نیز نشانگر نقش مهم و مستقل دو عامل در وقوع فرسایش بین‌شیاری است. به عبارت دیگر شیب سطح در همه خاک‌های منطقه اثری مهم در فرسایش بین‌شیاری دارد.

تغییرات فرسایش بین‌شیاری در خاک‌ها و درجات شیب نتایج تجزیه واریانس اثر بافت خاک و شیب سطح بر مقدار فرسایش بین‌شیاری نشان داد که فرسایش بین‌شیاری تحت تأثیر بافت خاک ($P < 0.0001$)، شیب سطح ($P < 0.0001$) و برهم‌کنش آن دو ($P < 0.0001$) قرار دارد (جدول ۲). این نتیجه بیانگر آن است که شیب سطح و

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر بافت خاک، شیب سطح و برهم‌کنش آن دو بر فرسایش بین‌شیاری

Table 2. The variance analysis effect of soil texture, surface slope and on the interaction of the two on the interrill erosion

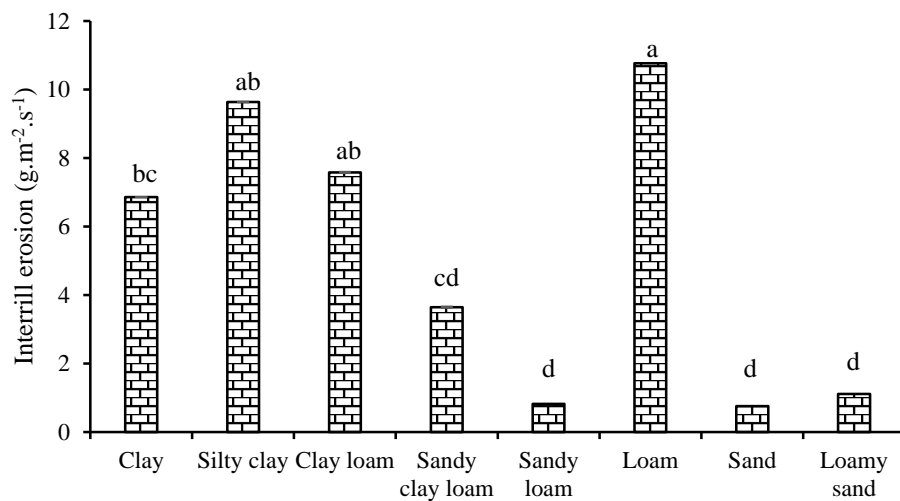
Source	Degrees of freedom	Sum of squares	Mean of squares	Significance level
Soil texture	7	35122.05	5017.43	0.0001
Surface slope	3	24917.37	8305.79	0.0001
Soil texture × Surface slope	21	22419.14	6031.54	0.0001

(رسی، رس‌سیلتی و لوم‌رسی) با وجود این که درصد ذرات سیلت بیشتری نسبت به خاک لوم داشتند، به دلیل وجود ذرات رس بیشتر و در نتیجه امکان چسبندگی بیشتر ذرات خاک، فرسایش بین‌شیاری کم‌تری نسبت به خاک لوم داشتند. در خاک شنی از یک سو هدایت هیدرولیکی اشباع بیشترین بود (۲۱/۵۹ سانتی‌متر بر ساعت) و در نتیجه تشکیل جریان‌های سطحی شدید فراهم نبود و از سوی دیگر به دلیل وجود ذرات درشت زیاد، قابلیت انتقال ذرات توسط جریان‌های سطحی ضعیف ناچیز بود. در خاک لوم به دلیل هدایت هیدرولیکی اشباع بسیار کم

نقش بافت خاک در فرسایش بین‌شیاری نتایج مقایسه میانگین اثر بافت خاک بر فرسایش بین‌شیاری در شکل ۳ نشان داده شده است. میانگین فرسایش بین‌شیاری در بافت‌های مختلف نشان داد که مقدار فرسایش در خاک لوم، رس‌سیلتی، لوم‌رسی، رسی، لوم‌رسی‌شنی، شن‌لومی، لوم‌شنی و شنی به ترتیب برابر با ۰/۷۵، ۱۰/۷۶، ۹/۶۳، ۷/۵۷، ۶/۸۶، ۳/۶۴، ۱/۱۱، ۰/۸۲ و ۰/۷۵ گرم بر متر مربع بر ثانیه بود. علت این موضوع را می‌توان به وجود ذرات سیلت بیشتر در خاک لوم و درصد شن زیاد در خاک شنی ارتباط داد اما خاک‌های ریزبافت

دلیل فقدان چسبندگی و تشکیل واحدهای ساختمانی ضعیف، اندک است در حالی که ذرات درشت‌تر و ریزتر از آن در برابر فرسایش بین‌شیاری مقاوم‌تر هستند (Zhao *et al.*, 2014). واعظی و همکاران (Vaezi *et al.*, 2018) در پژوهشی که در زمینه تغییرپذیری فرسایش سطحی و دانه‌بندی ذرات در شیب‌های شمالی و جنوبی انجام دادند نشان دادند که که شیب‌های جنوبی به دلیل داشتن ذرات سیلت بیشتر، فرسایش سطحی بیشتری نسبت شیب‌های جنوبی داشتند.

(۲/۸۲ سانتی‌متر بر ساعت) و فراوانی ذرات ریز و حساس مانند سیلت و رس شرایط را برای وقوع بیشترین فرسایش بین‌شیاری فراهم کرد. در خاک‌های ریزبافت نیز با وجود ساختمان نسبتاً مناسب، به دلیل محدودیت نفوذ آب به خاک تشکیل جریان‌های سطحی و انتقال ذرات بیشتر بود. در خاک لوم‌شنی نیز به دلیل درصد ماده آلی بالای (۱/۴۳ درصد) آن نسبت به سایر بافت‌ها و به دنبال آن پایداری خاکدانه زیاد، مقدار فرسایش بین‌شیاری آن در این بافت پایین بود. گزارش‌ها نشان می‌دهد که مقاومت ذرات ریز به ویژه سیلت در برابر فرسایش بین‌شیاری به



شکل ۳- مقایسه میانگین فرسایش بین‌شیاری در خاک‌های با بافت مختلف

Figure 3. Comparison of mean interrill erosion in soils with different textures

همه بافت‌های خاک، شیب ۳۰ درصد بالاترین و شیب ۱۰ درصد کم‌ترین میانگین فرسایش بین‌شیاری را نشان دادند. این نتایج با یافته‌های ویلاونگ و همکاران (Vilayvong *et al.*, 2016) مطابقت داشت. آن‌ها گزارش دادند که با افزایش شیب سطح علاوه بر تأثیر قطرات باران بر جداسازی ذرات خاک جریان‌های ناشی از قطرات باران نیز بر جداسازی ذرات اثر می‌گذارند. شن و همکاران (Shen *et al.*, 2016) نیز در پژوهشی که در زمینه فرسایش شیاری در خاک‌های لسی در چین انجام دادند، نشان دادند که فرسایش شیاری به صورت قابل توجهی تحت تأثیر شیب سطح قرار دارد.

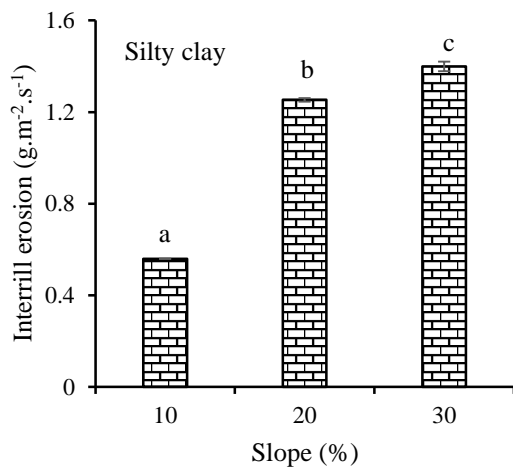
اثر شیب سطح بر فرسایش بین‌شیاری در خاک‌های مختلف

نتایج تجزیه واریانس اثر شیب سطح بر مقدار فرسایش بین‌شیاری در بافت‌های مختلف خاک نشان داد که شیب سطح اثر معنی‌دار بر مقدار فرسایش بین‌شیاری در تمامی بافت‌ها داشت ($P < 0.000$) (جدول ۳). با افزایش شیب از یک سو حجم و قدرت جریان سطحی آب بیشتر شده و از سوی دیگر نقش باران در جداسازی ذرات افزایش می‌یابد و بدین ترتیب فرسایش بین‌شیاری با افزایش شیب غالباً افزایش می‌یابد (Foroumadi *et al.*, 2020). شکل ۴ نمودار مقایسه میانگین فرسایش بین‌شیاری در سه سطح شیب را در بافت‌های مختلف نشان می‌دهد. در

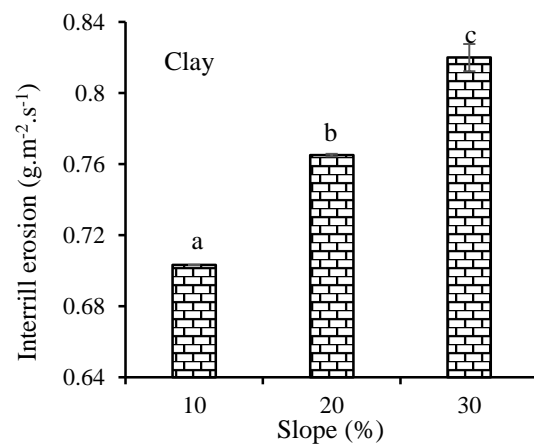
جدول ۳- تجزیه واریانس اثر درجه شیب بر فرسایش بین شیبی در بافت‌های مختلف

Table 3. The variance analysis effect of surface degree on the interrill erosion in different textures

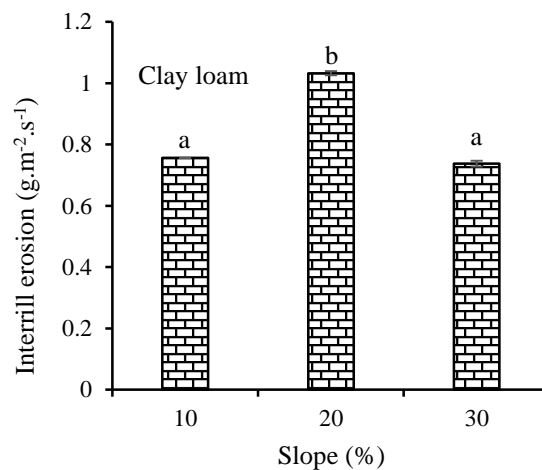
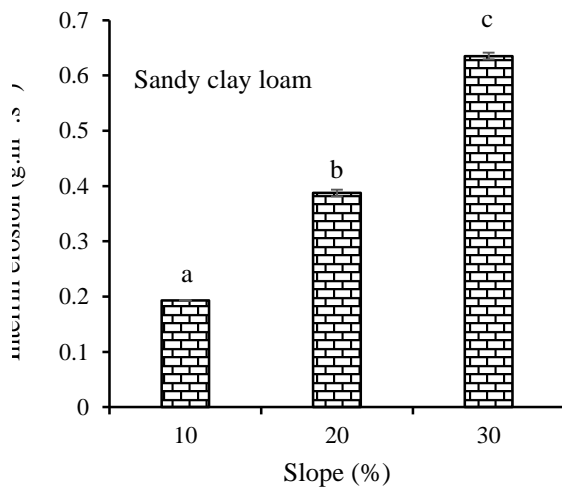
Source	Texture	Degrees of freedom	Sum of squares	Mean of squares	F	Significance level	skewness s	Kurtosis
Slope degree	Clay	2	73.79	36.89	136.91	0.000	-0.06	-1.75
	Silty clay	2	4354.76	2177.38	694.11	0.000	-0.74	-1.70
	Clay loam	2	588.20	294.10	525.50	0.000	0.84	-1.65
	Sandy clay loam	2	1060.23	530.11	1170.64	0.000	0.17	-1.69
	Sandy loam	2	0.93	0.46	7.24	0.000	0.26	-1.07
	Loam	2	1677.10	838.55	285.03	0.000	-0.22	-1.68
	Sand	2	119.03	59.51	36.07	0.000	-0.43	-1.50
	Loamy sand	2	108.16	54.08	226.41	0.000	-0.41	-1.68

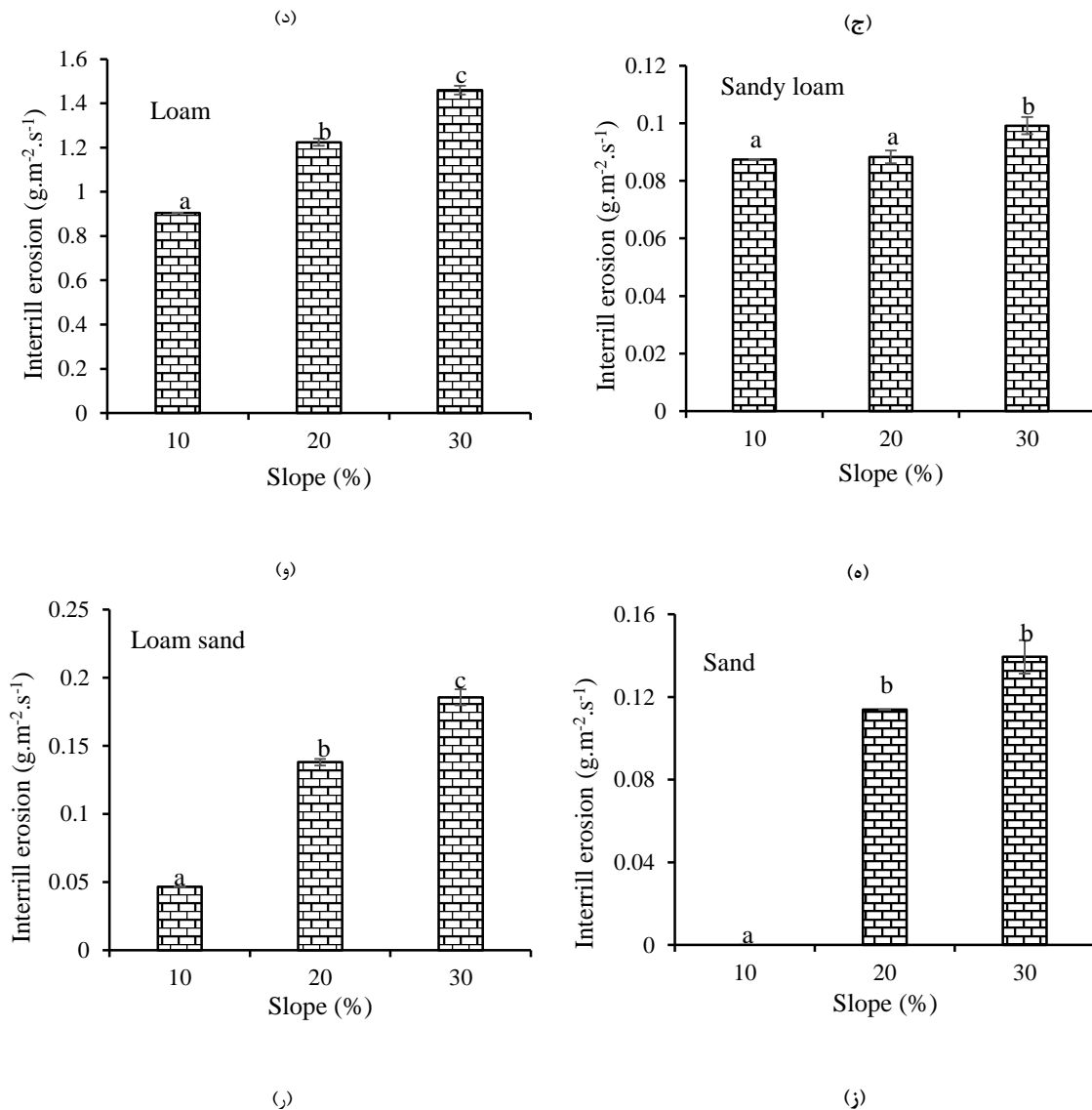


(ب)



(الف)





شکل ۴- مقایسه میانگین فرسایش بین‌شیاری در سطوح مختلف شیب در بافت‌های مختلف خاک
 Figure 4. Comparison of mean interrill erosion at different slope levels in different soil textures

باران در خاک مارنی تحت شدت‌های باران نشان دادند که با افزایش شیب سطح هدرفت خاک افزایش یافت. فرسایش بین‌شیاری در همه بافت‌ها به طور معنی‌داری افزایش یافت با این وجود تأثیر شیب سطح بر وقوع فرسایش بین‌شیاری در خاک‌های ریزبافت بارزتر از خاک‌های درشت‌بافت بود. وجود هدایت هیدرولیکی بالا در خاک‌های درشت‌بافت موجب می‌شود افزایش درجه شیب سطح نیز تأثیر بسیار زیادی بر فرسایش بین‌شیاری نگذارد.

رابطه فرسایش بین‌شیاری و شیب سطح در خاک‌ها
 رابطه بین فرسایش بین‌شیاری و شیب سطح در خاک‌ها نشان داد که در همه خاک‌ها میزان فرسایش با افزایش شیب سطح افزایش یافت (جدول ۴). بیشترین همبستگی میان فرسایش بین‌شیاری و درصد شیب سطح در خاک رسی، لوم‌رسی و لوم ($R^2=0.99$ و $p<0.001$) و کمترین آن در خاک شنی ($R^2=0.88$ و $p<0.05$) مشاهده شد. فرومدی و واعظی (Foroumadi & Vaezi, 2017) نیز با بررسی شدت تخریب فیزیکی خاک در اثر قطرات

جدول ۴- روابط رگرسیونی میان فرسایش بین‌شیاری و درصد شیب سطح در بافت‌های مختلف خاک

Table 4. Regression relationships between interrill erosion and surface slope percentage in different soil textures

Soil texture	Relationships between interrill erosion and surface slope percentage		
	line equation	Determination coefficient (R ²)	Significance level
Clay	$y = 0.0584x + 0.6459$	R ² = 0.99	P<0.001
Silty clay	$y = 0.4202x + 0.2306$	R ² = 0.87	P<0.05
Clay loam	$y = -0.0096x + 0.8612$	R ² = 0.01	P<0.17 ^{ns}
Sandy clay loam	$y = 0.221x - 0.0369$	R ² = 0.99	P<0.001
Sandy loam	$y = 0.0059x + 0.0798$	R ² = 0.80	P<0.08 ^{ns}
Loam	$y = 0.2776x + 0.6409$	R ² = 0.99	P<0.001
Sand	$y = 0.0697x - 0.055$	R ² = 0.88	P<0.05
Loamy sand	$y = 0.0696x - 0.0158$	R ² = 0.96	P<0.05

ns: غیر معنی‌دار

نتیجه‌گیری کلی

سوی دیگر موجودیت ذرات ریز قابل انتقال مانند سیلت بود که موجب شد با وجود برخورداری از ساختمان نسبتاً مناسب، شدت فرسایش بین‌شیاری زیاد باشد. شدت وقوع فرسایش بین‌شیاری در هر خاک تحت تأثیر درصد شیب بود؛ به طوری که در همه خاک‌ها به جز خاک لوم رسی با افزایش شیب از ۱۰ درصد به ۳۰ درصد، فرسایش بین‌شیاری شدیداً افزایش یافت. در خاک لوم رسی، در شیب ۳۰ درصد به دلیل افزایش زاویه شیب و به دنبال آن کاهش ضریب اصطکاک ذرات با سطح خاک، فرسایش بین‌شیاری بیش‌ترین مقدار بود. روند افزایش فرسایش بین‌شیاری با افزایش شیب سطح در خاک‌ها یکسان نبود. به طور کلی این پژوهش نشان می‌دهد که خاک‌هایی که دارای مقادیر بیش‌تری از ذرات سیلت و رس هستند، حساسیت بیش‌تری نسبت به فرسایش بین‌شیاری دارند و نقش درجه شیب سطح بر وقوع فرسایش بین‌شیاری در این خاک‌ها بارزتر از خاک‌های با بافت درشت است.

نتایج این پژوهش نشان داد که فرسایش بین‌شیاری به شدت تحت تأثیر بافت خاک و شیب سطح است. برهم‌کنش معنی‌دار میان این دو عامل از نظر فرسایش بین‌شیاری نشان از نقش اساسی دو عامل مذکور و مستقل از همدیگر در بروز فرسایش بین‌شیاری در منطقه نیمه‌خشک است. خاک لوم با میانگین فرسایش بین‌شیاری ۱۰/۷۶ گرم بر متر مربع بر ثانیه، حساس‌ترین خاک به فرسایش بین‌شیاری و در مقابل خاک شنی با ۰/۷۵ مقاوم‌ترین خاک از این نظر بود. فرسایش بین‌شیاری در خاک‌ها تحت تأثیر توزیع اندازه ذرات، ساختمان خاک و نفوذپذیری بود. در خاک‌هایی با بافت ریز و متوسط که از هدایت هیدرولیکی کم‌تری برخوردار بودند با وجود ساختمان نسبتاً مناسب، فرسایش بین‌شیاری بیشتر بود. این موضوع از یک سو به دلیل توانایی تولید جریان سطحی زیاد هنگام بارندگی و از

References

- Abdinezhad P., Feiznia S., and Peirovan H. 2013. Compare marl soil erodibility in Zanjan Province using simulators rain. *Journal of Soil Research*, 28(2): 408-419. (In Persian)
- Asadi H., and Rouhipour H. 2007. The dynamic of sheet erosion. *In Proceedings of the 10th Iranian Soil Science Congress*, 1256-1257. (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.
- Akbari S., and Vaezi A.R. 2015. Investigating aggregates stability against raindrops impact in some soils of a semi-arid region, North West of Zanjan. *Water and Soil Science*, 25(2): 65-77. (In Persian)
- Besharat F., and Vaezi A.R. 2015. Soil loss under simulated rainfalls rainfall during events on runoff and soil loss under simulated rainfalls. *Iranian Watershed Management Science and Engineering*, 9(29): 9-18. (In Persian)
- Blake G.R, and Hartge K.H. 1986. Bulk Density 1. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods. (Methods of soil analysis1)*, pp. 363-375.

- Bouyoucos G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. *Agronomy Journal*, 54(5): 464-465.
- Carter C.E., Greer J.D., Braud H.J., and Floyd J.M. 1974. Raindrop characteristics in south central United States. *Transactions of the ASAE*, 17(6): 1033-1037.
- 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.
- Dimoyiannis D., Valmis S., and Danalatos N.G. 2006. Interrill erosion on cultivated Greek soils: modelling sediment delivery. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(8): 940-949.
- Ding W., and Huang C. 2017. Effects of soil surface roughness on interrill erosion processes and sediment particle size distribution. *Geomorphology*, 295: 801-810.
- Duiker S.W., Flanagan D.C., and Lal R. 2001. Erodibility and infiltration characteristics of five major soils of southwest Spain. *Catena*, 45(2): 103-121.
- Erskine W.D., Mahmoudzadeh A., and Myers C. 2002. Land use effects on sediment yields and soil loss rates in small basins of Triassic sandstone near Sydney, NSW, Australia. *Catena*, 49(4): 271-287.
- Foroumadi M., and Vaezi A.R. 2017. Physical degradation and particle detachment capacity of rill in relation to rainfall intensity and raindrop impact in a marl soil. *Journal of Water and Soil Science*, 21(2): 263-277. (In Persian)
- Foroumadi M., and Vaezi A.R. 2018. Flow characteristics and rill erodibility in relation to the rainfall intensity in a marl soil. *Iranian Watershed Management Science and Engineering*, 12(40): 11-22. (In Persian)
- Foroumadi M., and Vaezi A.R. 2019. Investigating temporal variation of rill erosion in an erosion-susceptible soil under different rainfall intensities. *Applied Soil Research*, 7(2): 135-147. (In Persian)
- Foroumadi M., Vaezi A.R., and Nikbakht J. 2020. Temporal variation of interrill erosion under different rainfall intensities in semiarid soils. *Iranian Watershed Management Science and Engineering*, 14(48): 59-67. (In Persian)
- Goh T.B., Arnaud R.S., and Mermut A.R. 1993. Aggregate stability to water. *Soil Sampling and Methods of Analysis*, 177-180.
- Hasanzadeh H., Vaezi A.R., and Mohammadi M.H. 2013. Variation of runoff in plot size in soil samples with different texture under rainfall simulated events. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 44(3): 245-254. (In Persian)
- Hui-Ming S., and Yang C.T. 2009. Estimating overland flow erosion capacity using unit stream power. *International Journal of Sediment Research*, 24(1): 46-62.
- 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. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(8): 929-939.
- Kemper W.D., and Rosenau R.C. 1986. Aggregate Stability and Size Distribution, pp 425-442.
- Kiani Harchegani M., Saeidi P., and Sadeghi S.H.R. 2018. Analysis of rating loops of interrill erosion on consecutive storms under laboratory conditions. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(2): 293-302. (In Persian)
- Kinnell P.I.A. 1993. Interrill erodibilities based on the rainfall intensity flow discharge erosivity factor. *Soil Research*, 31(3): 319-332.
- Kinnell P.I.A. 2005. Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: a review. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(14): 2815-2844.
- Klute A., and Dirksen C. 1986. Hydraulic Conductivity and Diffusivity: Laboratory Methods. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods (Methodsofsoilan1)*, pp 687-734.
- Mahmoodabadi M., and Cerdà A. 2013. WEPP calibration for improved predictions of interrill erosion in semi-arid to arid environments. *Geoderma*, 204: 75-83.
- Mahmoodabadi M., Refahi H.G., and Rouhipur H. 2014. Evaluation of WEPP process model for estimating intensity interrill erosion using rainfall simulator. *Iranian Journal of Soil Research*, 27(1): 24-34. (In Persian)
- Mamedov A.I., Levy G.J., Shainberg I., and Letey J. 2001. Wetting rate, sodicity, and soil texture effects on infiltration rate and runoff. *Soil Research*, 39(6): 1293-1305.

- Page A.L. 1982. Method of soil analysis. Part 2: chemical and microbiological properties. Soil Science Society of American Madison, Wisconsin, USA.
- Ramos M.C., Nacci S., and Pla I. 2003. Effect of raindrop impact and its relationship with aggregate stability to different disaggregation forces. *Catena*, 53: 365-376.
- Refahi H.G. 2007. Water Erosion and Conservation. Tehran University Press. pp. 27-132. (In Persian)
- Sajjadi S.A., and Mahmoodabadi M. 2015. Sediment concentration and hydraulic characteristics of rain-induced overland flows in arid land soils. *Journal of soils and Sediments*, 15(3): 710-721.
- Seifi M., Neyshabouri M.R., Rouhipour H., and Ahmadi A. 2014. Effects of surface seal on interrill erodibility at various slopes and rainfall intensities under laboratory conditions. *Water and Soil Science*, 24(1): 55-67. (In Persian)
- Shen H., Zheng F., Wen L., Han Y., and Hu W. 2016. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope. *Soil and Tillage Research*, 155: 429-436.
- United States. Department of Agriculture, 1972. Soil survey laboratory methods and procedures for collecting soil samples. US Government Printing Office.
- Vaezi A.R., Ahmadi M., and Cerdà A. 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.
- Vaezi A.R., Bayat Z., and Foroumadi M. 2018. Variability of surface erosion and particle size distribution in relation to slope aspect and gradient in a semi-arid region in west of Zanjan. *Journal of Water and Soil Science*, 22(2): 1-14.
- Valmis S., Dimoyiannis D., and Danalatos N.G. 2005. Assessing interrill erosion rate from soil aggregate instability index, rainfall intensity and slope angle on cultivated soils in central Greece. *Soil and Tillage Research*, 80(1-2): 139-147.
- Vilayvong K., Yasufuku N., and Ishikura R. 2016. Rainfall-induced soil erosion and sediment sizes of a residual soil under 1D and 2D rainfall experiments. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 218: 171-180.
- Walkley A., and Black I.A. 1947. Determination of organic matter in the soil by chromic acid digestion. *Soil Science*, 63: 251-264.
- Wu B., Wang Z., Zhang Q., and Shen N. 2018. Distinguishing transport-limited and detachment-limited processes of interrill erosion on steep slopes in the Chinese loessial region. *Soil and Tillage Research*, 177: 88-96.
- Zhang X.J., and Wang Z.L. 2017. Interrill soil erosion processes on steep slopes. *Journal of Hydrology*, 548: 652-664.
- Zhao L., Liang X., and Wu F. 2014. Soil surface roughness change and its effect on runoff and erosion on the Loess Plateau of China. *Journal of Arid Land*, 6(4): 400-409.

Investigating The Susceptibility of Semi-arid Soils with Different Texture to Interrill Erosion in Relation to Slope Sharpness in Zanjan Province

Majid Foroumadi^{1*}, Ali Reza Vaezi², Jafar Nikbakht³

(Received: December 2020 Accepted: March 2021)

Abstract

The process of soil particles splash by raindrops and their transport by splash or surface shallow flow is considered as interrill erosion, which can reduce soil fertility and cause surface water pollution. Slope gradient and soil type can be the main factors affecting interrill erosion processes in semi-arid regions; therefore, it is important to determine which soil textures in such slopes are more sensitive to interrill erosion processes. This research was conducted to investigate the effect of surface slope on interrill erosion in different soils. For this purpose, laboratory experiments were carried out on eight soils with different texture (silty clay, clay, sandy loam, sand, loam, sandy clay loam, clay loam, sandy loam) on tree slopes (10, 20 and 30%) under simulated rainfall (a constant intensity of 30 mm.h⁻¹) with three replications (72 test units). The interrill erosion was measured at intervals of one minute from beginning of runoff in each experimental unit. The results showed that interrill erosion in all soils is affected by soil texture ($P < 0.0001$), surface slope ($P < 0.0001$) and their interaction ($P < 0.0001$). Loam soil was the most susceptible to interrill erosion (10.76 g.m⁻².s⁻¹) and sandy soil was the most resistant soil (0.75 g.m⁻².s⁻¹). Surface slope had a significant effect on the amount of interrill erosion in all soils ($P < 0.000$). Also, with increasing the slope percentage, the amount of interrill erosion in all textures increased significantly. This shows that it is necessary to prevent surface erosion in fine textured soils, especially on slopes in Zanjan region.

Key words: Surface flow, Erodible soil particles, Raindrops impact, Flow concentration

Foroumadi M., Vaezi A.R., 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.

1. Ph.D. Student of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan

2. Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan

3. Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan

* Corresponding Author Email: majidforoumadi89@gmail.com