

تأثیر شیب سطح بر انتخاب پذیری ذرات در فرسایش پاشمانی در خاک‌های مختلف

مجید فرومدی^{۱*}، علی‌رضا واعظی^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۲۲)

چکیده

فرسایش پاشمانی نخستین نوع فرسایش آبی بوده که توسط ضربه قطرات باران بر سطح خاک ایجاد می‌شود. قطرات باران می‌توانند ذرات خاک را از جا کنده و جابه‌جا کنند. انتقال ذرات در اثر پاشمان قطرات به عوامل متعددی از جمله نوع خاک و شرایط شیب بستگی دارد. اگرچه اطلاعاتی در مورد نقش این دو عامل در فرسایش پاشمانی در دسترس بوده اما انتخاب‌پذیری ذرات در فرسایش پاشمانی موضوعی است که نیاز به بررسی بیشتر به‌ویژه در خاک‌های منطقه نیمه‌خشک دارد. این پژوهش به منظور بررسی تغییرات فرسایش پاشمانی و انتخاب‌پذیری ذرات در خاک‌های مختلف تحت تأثیر شیب سطح انجام گرفت. برای این منظور آزمایش در سه خاک با بافت مختلف (لوم، لومرسی و لومرس‌شنی) در چهار شیب (صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) تحت باران شبیه‌سازی شده با شدت ثابت ۳۰ میلی‌متر بر ساعت در سه تکرار در مجموع با ۳۶ واحد آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. بر اساس نتایج بیش‌ترین مقدار فرسایش پاشمانی در خاک لومرسی (۱۰۵/۰۷ گرم بر متر مربع در دقیقه) و کم‌ترین مقدار آن در خاک لومرس‌شنی (۸۰/۲۸ گرم بر متر مربع در دقیقه) رخ داد. با افزایش شیب، شدت فرسایش پاشمانی افزایش یافت. به‌طور کلی انتخاب‌پذیری ذرات در اثر پاشمان تحت تأثیر بافت خاک، شیب سطح و برهم‌کنش آن دو قرار گرفت. سیلت حساس‌ترین ذره به پاشمان بود، به‌طوری‌که حدود ۵۷ درصد ذرات پاشمان‌یافته را در برگرفت و در مقابل شن با حدود شش درصد از سهم پاشمان، مقاوم‌ترین ذره به فرآیند پاشمان بود. در تمامی بافت‌ها (به‌جز بافت لوم) انتخاب‌پذیری ذرات سیلت در سطوح مختلف شیب بیش‌تر از سایر ذرات بود. در خاک لوم انتخاب‌پذیری ذرات رس بیش‌تر از ذرات سیلت بوده که علت این موضوع پایین بودن مقدار ذرات رس در نمونه اولیه خاک لوم بود.

واژه‌های کلیدی: تخریب خاکدانه، توزیع اندازه ذرات، شبیه‌ساز باران، ضربه قطرات باران

فرومدی م.، واعظی ع. ۱۳۹۹. تأثیر شیب سطح بر انتخاب‌پذیری ذرات در فرسایش پاشمانی در خاک‌های مختلف. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۸، شماره ۲. صفحه: ۹۹-۱۱۱.

۱- دانشجوی دکتری علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان

۲- استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان

*پست الکترونیک: majidforoumadi89@gmail.com

مقدمه

یکی از مهم‌ترین اثرات برخورد قطرات باران بر سطح خاک، تخریب خاکدانه‌ها می‌باشد. پایداری خاکدانه که مقاومت ذرات خاک را در برابر جدا شدن نشان می‌دهد، در شدت تخریب خاکدانه در اثر ضربه قطرات باران نقش مهمی دارد (Refahi, 2007). پایداری اندک خاکدانه‌ها منجر به تخریب آسان آن‌ها، تراکم خاک، ایجاد سله، کاهش نفوذپذیری آب به خاک، افزایش رواناب و فرسایش خاک می‌شود (Steiner & Williams, 1996). پاشمان ذرات به‌عنوان پیامد دیگر برخورد قطرات باران بر سطح خاک است. هنگامی که قطره باران به سطح خاک برخورد می‌کند، اولین مرحله فرسایش یعنی جداسازی ذرات خاک شروع می‌شود. در ادامه به دلیل خیس شدن ذرات و کاهش چسبندگی آن‌ها، جدا شدن ذرات به‌وسیله قطرات باران آسان می‌شود (Bafkar & Mojaradi, 2007). فرآیند پرتاب ذرات خاک به پیرامون، بر اثر برخورد قطرات باران به سطح خاک، پاشمان ذرات خاک نامیده می‌شود که منجر به تراکم و کاهش نفوذپذیری خاک می‌شود. عوامل زیادی مقدار پاشمان و نوع مواد منتقل‌شده را تحت تأثیر قرار می‌دهند. بافت خاک از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر فرسایش پاشمانی و تولید رسوب است. مطالعات نشان داده است که خاک‌های با بافت ریز دارای چسبندگی زیادی بوده و در نتیجه جدا شدن ذرات آن‌ها مشکل است؛ با این وجود رسوبات حاصل از آن‌ها به راحتی منتقل می‌شوند و در مقابل در خاک‌های درشت‌بافت، ذرات سریع‌تر و راحت‌تر جدا می‌شوند و در عین حال رسوبات تشکیل‌شده، به‌سختی منتقل و رواناب کم‌تری نسبت به خاک‌های ریزبافت تولید می‌کنند (Vaezi, 2014; Zhao et al., 2014). گزارش‌ها نشان می‌دهد بین مقدار سیلت یک خاک و فرسایش‌پذیری آن ارتباط نزدیکی وجود دارد. هر چه مقدار سیلت خاک بیشتر باشد، فرسایش‌پذیری آن افزایش می‌یابد. به‌طور کلی ذرات سیلت و شن بسیار ریز (ذراتی بین دو تا ۲۰۰ میکرون)، فرسایش‌پذیری بالایی دارند (Hasanzadeh et al., 2013). عوامل فرساینده نیز به نوبه خود در تعیین نوع ماده منتقل‌شده مؤثر می‌باشد. شدت و انرژی جنبشی باران نیز از جمله عوامل اصلی هدرفت خاک می‌باشد. فرآیندهای فرسایش خاک عامل دیگر تعیین‌کننده دانه‌بندی مواد

رسوب یافته هستند (Walling, 1988). فرسایش پاشمانی و تخریب ناشی از آن تحت تأثیر عوامل مختلفی از قبیل فرساینده‌گی باران، شیب سطح، شرایط سطح خاک و خصوصیات ذاتی خاک (توزیع اندازه ذرات، پایداری خاکدانه‌ها و مواد آلی) می‌باشد (Kinzel, 2005). بخش بزرگی از پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه فرسایش پاشمانی با استفاده از فنجان‌های پاشمان بدون بررسی انتخاب‌پذیری ذرات پاشمان یافته انجام شده است. در میان پژوهش‌های انجام شده بر روی فرسایش پاشمانی به نقش بافت خاک، مواد آلی خاک و درجه شیب تأکید بیش‌تری شده است. بلیانی و همکاران (Baliani et al., 2018) در پژوهشی به بررسی تغییرپذیری فرسایش پاشمانی از تندی شیب در خاک‌های با بافت مختلف پرداختند. نتایج نشان داد که فرسایش پاشمانی به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر شیب سطح قرار گرفت. کیانی هرچگانی و صادقی (Kiani-Harchegani & Sadeghi, 2017) در پژوهشی به بررسی اثر رگبارهای متوالی بر مؤلفه‌های فرسایش پاشمانی طی دو شدت مختلف بارندگی در شرایط آزمایشگاهی پرداختند. نتایج نشان داد که مؤلفه‌های پاشمان بالادست با پایین‌دست در شدت‌های بارندگی ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت در توالی‌های مختلف اختلاف معنی‌دار نداشتند. بلیانی و واعظی (Baliani & Vaezi, 2017) در پژوهشی به بررسی فرسایش پاشمانی در ارتباط با شدت باران و محتوای رطوبت پیشین خاک در بافت‌های مختلف خاک با استفاده از باران شبیه‌سازی‌شده پرداختند. نتایج نشان داد تفاوت‌های معنی‌دار بین بافت‌های خاک، سطوح محتوای رطوبت پیشین و شدت باران ($p < 0.001$) وجود دارد. قزل سفلو و همکاران (Ghezelseflu et al., 2017) در پژوهشی به بررسی اثر پلی‌اکریل‌آمید در کنترل فرسایش پاشمانی در زمان‌های مختلف بارش پرداختند. نتایج نشان داد که بین مقادیر مختلف پلی‌اکریل‌آمید در زمان‌های مختلف بارندگی از لحاظ کاهش میزان پاشمان اختلاف معنی‌دار آماری وجود دارد. هنربخش و حیای (Honarbakhsh & Hayavi, 2017) در پژوهشی به مطالعه آزمایشگاهی فرسایش پاشمانی در بافت‌های مختلف خاک با استفاده از شبیه‌ساز باران پرداختند. نتایج نشان داد که بین شدت پاشمان در کلاس‌های بافتی در شدت‌های ۶۵ و

نشده است. با آگاهی از این موضوع می‌توان حساسیت خاک‌های مختلف به فرآیند پاشمان و همچنین علت حساسیت بالای خاک به فرآیند پاشمان را بر مبنای انتقال‌پذیری ذرات خاک تشخیص داد. از این رو در این پژوهش نقش شیب سطح بر میزان فرسایش پاشمانی و نیز انتخاب‌پذیری ذرات اولیه تحت تأثیر این دو عامل در برخی نمونه‌های خاک منطقه نیمه‌خشک در شمال غرب کشور مورد بررسی قرار گرفت.

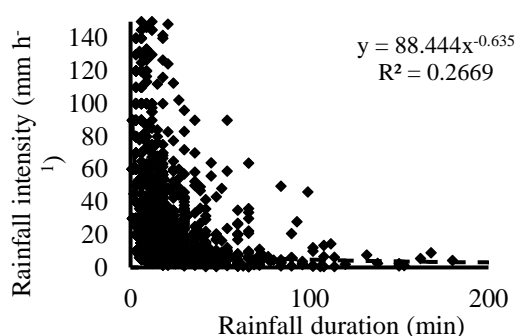
مواد و روش‌ها

طرح آزمایشی

این پژوهش در سه خاک با بافت مختلف (لوم، لومرسی و لومرسی‌شنی) در چهار سطح شیب (صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) تحت باران با شدت ثابت ۳۰ میلی‌متر بر ساعت در سه تکرار در مجموع با ۳۶ واحد آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. برای انتخاب شدت مدت مناسب بارندگی، از تحلیل‌های انجام گرفته روی ۱۹۶۱ رخداد باران ثبت شده در ایستگاه باران‌نگاری قلتوق 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 شدت ۱۵۰ میلی‌متر بر ساعت تغییر می‌کند و تداوم آن‌ها بین پنج دقیقه تا بیش از سه ساعت می‌باشد (شکل ۱). باران‌های رایج در منطقه دارای شدتی حدود ۳۰ میلی‌متر بر ساعت (با حدود ۲۶ درصد فراوانی) با مدت بین ۷/۵ و ۱۵ دقیقه (با حدود ۳۲ درصد فراوانی) می‌باشند. خاک‌های مورد مطالعه در این پژوهش از مناطق مختلف استان زنجان شناسایی گردید. این منطقه در ارتفاع ۱۳۲۹ متری از سطح دریا با طول جغرافیایی $35^{\circ} 5' 48'' E$ و عرض جغرافیایی $39^{\circ} 57' 36'' N$ قرار دارد. میانگین بارندگی سالانه ۳۱۵ میلی‌متر و اقلیم منطقه به روش دمارتن، نیمه‌خشک می‌باشد. از نظر زمین‌شناسی این منطقه بر روی رسوبات کواترنری واقع شده است (Abdinezhad et al., 2013). خاک منطقه به شدت تحت تأثیر فرسایش پاشمانی است و سله که از پیامدهای این نوع فرسایش می‌باشد، سرتاسر سطح آن را در بر گرفته است. در بسیاری از زمین‌های شیب‌دار فرسایش شیاری و خندقی نیز به

۱۲۰ میلی‌متر بر ساعت تفاوت معنی‌دار وجود داشت. غلامی و کریمی (Gholami & Karimi, 2018) در پژوهشی به بررسی اثر مدت بارندگی و رطوبت خاک بر تغییرات پاشمان خاک پرداختند. نتایج نشان داد که متغیرهای مدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک بر مقادیر پاشمان کل و خالص معنی‌دار بود ($p < 0.01$). چنگ و همکاران (Cheng et al., 2008) مقدار فرسایش پاشمانی را در چهار نوع خاک با استفاده از کاسه پاشمان مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد خاکدانه‌های دارای محتوای ماده آلی زیاد کم‌ترین مقدار فرسایش پاشمانی را دارند. یائو و همکاران (Yao et al., 2018) در پژوهشی به بررسی اثر پوشش گیاهی و شدت باران بر فرسایش پاشمانی در چین پرداختند. نتایج نشان داد که پوشش گیاهی نقش بسیار مهمی در مقدار فرسایش پاشمانی ایفاء می‌کند و همبستگی منفی معنی‌داری ($p < 0.01$) با فرسایش پاشمانی داشت. همچنین شدت باران نیز اثر معنی‌داری ($p < 0.01$) بر مقدار فرسایش پاشمانی داشت. خلیلی‌مقدم و همکاران (Khalili Moghadam et al., 2015) در پژوهشی به بررسی فرسایش پاشمانی در چهار کاربری اراضی (مرتع، مرتع تخریب‌شده، زمین آبی و دیم) پرداختند. نتایج نشان داد که مقدار فرسایش پاشمانی در چهار کاربری مختلف اختلاف معنی‌دار داشتند و در این میان کاربری مرتع تخریب‌شده و مرتع چرا نشده به ترتیب دارای بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار فرسایش پاشمانی بودند. فرسایش ناشی از قطرات باران 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 (Lal, 1990). از سوی دیگر خاک‌های واقع در مناطق خشک و نیمه‌خشک اغلب کم‌عمق، با مواد آلی کم و ساختمان ضعیف می‌باشند (Lal, 2000). با بررسی مطالعات انجام شده در این زمینه می‌توان این‌گونه جمع‌بندی نمود که هرچند تحقیقات کلی در مورد نقش درجه شیب یا شدت باران بر میزان فرسایش پاشمانی مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته است، با این حال تحقیقات دقیق در مورد انتقال‌پذیری و انتخاب‌پذیری هر یک از ذرات اولیه یا حساسیت آن‌ها در مقابل انتقال به‌وسیله فرسایش پاشمانی موضوعی است که به‌دقت شناخته

چشم می‌خورد. این منطقه یکی از منابع مهم تولید رسوب در حوزه آبخیز سفیدرود می‌باشد (Vaezi & Gharehdaghi, 2013).



شکل ۱- منحنی شدت- مدت باران‌ها در ایستگاه قلتوق زنجان برای سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۰

Figure 1. Intensity-duration curves rainfalls in Qoltuq station, Zanzan for 2001-2011 (Besharat & Vaezi, 2015)

در خاکدانه‌هایی با قطر کوچک‌تر از ۶ میلی‌متر با استفاده از دستگاه مکانیکی با نوسان ۳۰ دور در دقیقه به مدت یک دقیقه (Hasanzadeh *et al.*, 2013)، متوسط اندازه خاکدانه با جداسازی خاکدانه‌ها به وسیله سری الک‌ها (Kemper & Rosenau, 1986)، هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار ثابت (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

شبیه‌سازی باران ابزارهای مناسبی برای بررسی تغییرات خاک تحت فرآیند فرسایش و همچنین ارزیابی شرایط محیطی مانند شیب زمین، رطوبت اولیه خاک و شدت باران از نظر فرسایش خاک می‌باشند (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 ۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۲۰ سانتی‌متر استفاده شد (شکل ۲). دستگاه شبیه‌ساز باران با تجهیز به دستگاه الکتروموتور دارای قابلیت نوسان ۲۰ دور در دقیقه و به فاصله پنج سانتی‌متر نوسان خطی داشت. 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

نمونه‌برداری خاک

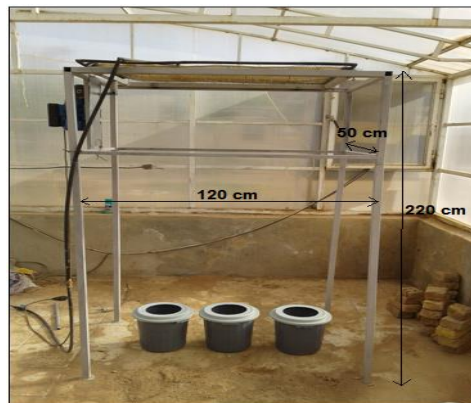
نمونه‌های خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری برداشت و با الک هشت میلی‌متری غربال شدند (Foroumadi & Vaezi, 2017). علت عبور خاک از الک هشت میلی‌متری شباهت نمونه‌های عبور داده شده از این الک با خاک طبیعی است. انتخاب عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر بر اساس مشاهده انتقال ذرات ریز و تشکیل بافت درشت و سنگی در خاک‌ها بود چراکه خاک زیرسطحی کم‌تر تحت فرآیندهای فرسایشی قرار می‌گیرد. در نمونه خاک گذرانده از الک، ذرات اولیه (سنگریزه) به صورت دستی برداشت شدند و تنها خاکدانه‌های با قطر کوچک‌تر از هشت میلی‌متر برای انجام آزمایش‌های فرسایش مورد استفاده قرار گرفتند. مقداری خاک عبور داده شده از الک دو میلی‌متر نیز برای انجام آزمایش‌های معمول فیزیکی و شیمیایی تهیه و به آزمایشگاه منتقل شد.

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 برداشت‌شده به وسیله سیلندر فلزی با قطر داخلی ۵ 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)

باران‌ساز قابل شبیه‌سازی بود. مدت بارندگی در تمام آزمایش‌ها یکسان و برابر ۳۵ دقیقه بود. این مدت بر مبنای پیش‌آزمایش در نمونه‌های خاک برای وقوع فرآیند فرسایش سطحی انتخاب گردید

توانایی تولید قطراتی با قطر ۲/۱ میلی‌متر را داشتند. قطر قطرات باران شبیه‌سازی‌شده به روش گلوله‌آردی تعیین شد (Carter et al., 1974). شدت باران (۳۰ میلی‌متر بر ساعت) با ایجاد توزیع یکنواخت در دستگاه



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

باران شبیه‌سازی‌شده با شدت ۳۰ میلی‌متر بر ساعت به مدت ۳۵ دقیقه قرار گرفتند. کاسه‌های پاشمان درون ظرف‌های پلاستیکی به قطر ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر قرار داده شدند. ذرات پاشمان یافته از کاسه‌های پاشمان در داخل ظرف‌های پلاستیکی جمع‌آوری و جرم کل ذرات پاشمان یافته پس از خشک شدن در آون در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس اندازه‌گیری شدند (شکل ۳ ب). شدت فرسایش پاشمانی بر اساس جرم خاک پاشمان یافته در واحد سطح کاسه پاشمان و واحد زمان به دست آمد.

اندازه‌گیری فرسایش پاشمانی

برای اندازه‌گیری مقدار فرسایش پاشمانی از کاسه‌های پاشمان مشابه با کاسه‌های پاشمان مورگان (Morgan, 1978) استفاده شد. این کاسه‌ها به ارتفاع ۲/۵ سانتی‌متر و قطر ۱۰ سانتی‌متر و مساحت ۷۸/۵ سانتی‌متر مربع بودند (شکل ۳ الف). در قسمت پایین کاسه منافذ کوچکی به منظور زهکشی آب نفوذ یافته در خاک تعبیه شده بود (Morgan, 1978). برای جلوگیری از خارج شدن خاک از منافذ کاسه، قبل از پر کردن ظروف یک قطعه پارچه توری و منفذدار در انتهای آن قرار داده شد. کاسه‌های پاشمان محتوی خاک‌های مختلف تحت



(b)



(a)

شکل ۳- نمایی از کاسه‌های پاشمان مورد استفاده در پژوهش (a) و سطل پلاستیکی (b)
Figure 3. View of the splash bowls used in the research (a) and plastic bucket (b)

تعیین شد (Bouyoucos, 1962). پس از جمع‌آوری کل ذرات پاشمان یافته، ابتدا ذرات شن با استفاده از الک ۰/۰۵ میلی‌متری جدا شدند. سپس درصد ذرات سیلت و

تعیین انتخاب‌پذیری ذرات پاشمان یافته برای محاسبه انتخاب‌پذیری ذرات پاشمان یافته ابتدا توزیع اندازه ذرات پاشمان یافته به روش هیدرومتری

ویژگی خاک‌های مورد مطالعه

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده است. خاک‌ها دارای محتوای بسیار اندک ماده آلی (کمتر از یک درصد) بوده و به دلیل وجود درصد بالایی از آهک (۱۲ تا ۱۴ درصد) در گروه خاک‌های آهکی (Duiker *et al.*, 2001) قرار دارند. پایداری خاکدانه‌ها در آب برای مدت یک دقیقه بسیار پایین (۰/۵۲ تا ۰/۹۷ میلی‌متر) بوده و نشان از حساسیت بالای خاک به تخریب ساختمان در اثر بارندگی دارد (Mamedov *et al.*, 2001). ضعف پوشش گیاهی و برگشت ناچیز بقایای گیاهی، عامل اصلی کمبود ماده آلی و کاهش درجه تشکیل و پایداری خاکدانه‌ها است. با توجه به مقدار بالای سدیم تبادلی خاک در دو خاک لوم و لوم‌رس‌شنی، این ویژگی خاک به‌عنوان عامل اصلی ناپایداری خاکدانه‌ها و فروپاشی آن‌ها در این خاک‌ها بود.

رس نیز به‌وسیله هیدرومتر در نمونه تعیین شد. از رابطه زیر نیز برای محاسبه انتخاب‌پذیری ذرات پاشمان یافته استفاده شد (Vaezi *et al.*, 2017):

$$(1) \quad \text{درصد ذره پاشمان یافته در رسوب} = \frac{\text{انتخاب‌پذیری ذرات}}{\text{درصد همان ذره در خاک}}$$

تجزیه و تحلیل داده‌ها

داده‌ها قبل از انجام آنالیزهای مربوط به آزمایش، از نظر نرمال بودن با استفاده از تحلیل هیستوگرام و بررسی چولگی و کشیدگی مورد بررسی قرار گرفتند. تجزیه واریانس داده‌های مربوط به مقدار پاشمان و نوع ذرات پاشمان یافته در خاک‌های مختلف و در سطوح مختلف شیب با کمک آزمون دانکن انجام گرفت. 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

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

Soil properties	Soil texture		
	Loam	Clay loam	Sandy clay loam
Sand (%)	45.80	26.42	55.50
Silt (%)	36.65	36.06	22.25
Clay (%)	17.55	37.52	22.25
Gravel (%)	15.60	8.70	18.20
Bulk density (g.cm ⁻³)	1.20	1.17	1.29
MWD (mm)	2.14	2.01	2.31
MWD _{wet} (mm)	0.97	0.52	0.96
Saturated hydraulic conductivity (cm.h ⁻¹)	2.82	5.34	8.22
OM (%)	0.58	0.44	0.35
CaCO ₃ (%)	27.85	23.26	20.55
ESP	5.12	2.17	6.13

پاشمان در خاک لوم‌رسی، لوم و لوم‌رس‌شنی به ترتیب برابر با ۱۰۵/۰۷، ۱۰۴/۳۱ و ۸۰/۲۸ گرم بر متر مربع در دقیقه بود. پژوهش‌های پیشین نیز نشان می‌دهد که مقاومت ذرات سیلت در برابر فرسایش پاشمانی به دلیل جرم مخصوص نسبتاً پایین، فقدان قابلیت چسبندگی و تشکیل واحدهای ساختمانی ضعیف، پایین بوده و ذرات درشت‌تر و ریزتر از آن در برابر فرسایش پاشمانی مقاوم‌تر هستند (Zhao *et al.*, 2014) و همین امر

فرسایش پاشمانی در خاک‌ها در شیب‌های مختلف نتایج تجزیه واریانس اثر بافت خاک و شیب سطح بر مقدار فرسایش پاشمانی نشان داد که فرسایش پاشمانی تحت تأثیر بافت خاک ($p < 0.000$)، شیب سطح ($p < 0.001$) و برهم‌کنش آن دو ($p < 0.05$) قرار دارد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین اثر بافت خاک در شکل ۴ الف نشان داده شده است. میانگین فرسایش پاشمانی در بافت‌های مختلف نشان داد که مقدار

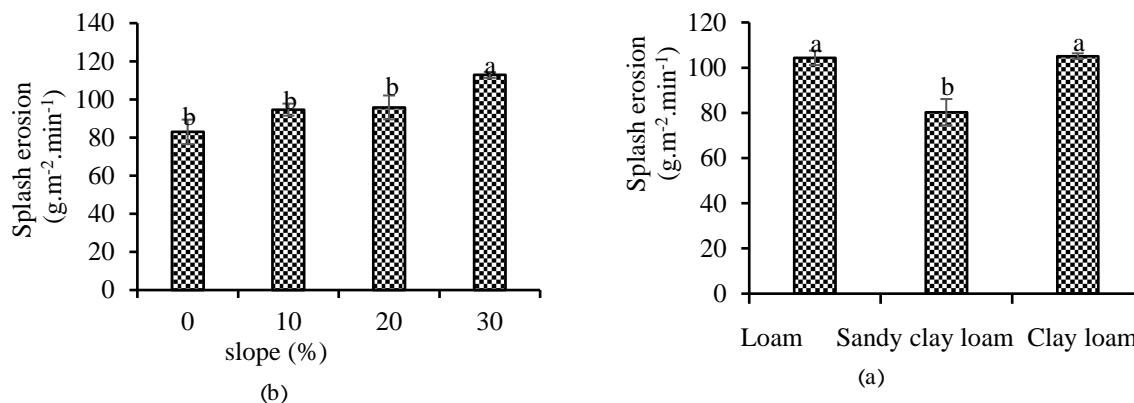
و ویلاونگ و همکاران (Kamalu, 1994; Vilayvong *et al.*, 2016) مطابقت داشت. آن‌ها گزارش دادند که با افزایش شیب سطح علاوه بر تأثیر قطرات باران بر جداسازی ذرات خاک جریان‌های ناشی از قطرات باران نیز بر جداسازی ذرات اثر می‌گذارند.

موجب بالاتر بودن مقدار فرسایش پاشمانی در خاک لومرسی شد. همچنین میانگین فرسایش پاشمانی در سطوح مختلف شیب نشان داد که با افزایش درصد شیب مقدار فرسایش پاشمانی افزایش یافت اما این افزایش در سه سطح شیب صفر، ۱۰ و ۲۰ درصد معنی‌دار نبود (شکل ۴ ب). این نتایج با یافته‌های کامالو

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

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

Variation resource	Degree of freedom	Mean of squares	Significance
Soil texture	2	179.89	0.000
Surface slope	3	102.99	0.001
Soil texture× Surface slope	6	56.84	0.05



شکل ۴- مقایسه میانگین فرسایش پاشمانی در بافت‌های مختلف (الف) و سطوح مختلف شیب (ب)

Figure 4. Comparison of the mean splash erosion in different textures (a) and different levels of slope (b)

شیب سطح بود. این نتایج با یافته‌های بلیانی و همکاران (Baliani *et al.*, 2018) که بیان داشتند افزایش درصد شیب باعث افزایش مقدار فرسایش پاشمانی می‌شود مطابقت داشت. بالاتر بودن میانگین فرسایش پاشمانی در شیب ۳۰ درصد نسبت به سایر سطوح شیب مورد آزمایش ممکن است به این دلیل باشد که با افزایش زاویه شیب از صفر تا ۳۰ درصد، زاویه شیب از زاویه مقاومت در برابر حرکت ذرات ساکن بر سطح بزرگ‌تر شود و سقوط و حرکت رو به پایین ذرات به‌واسطه جریان ناشی از قطرات باران آغاز شود (Lal, 2000).

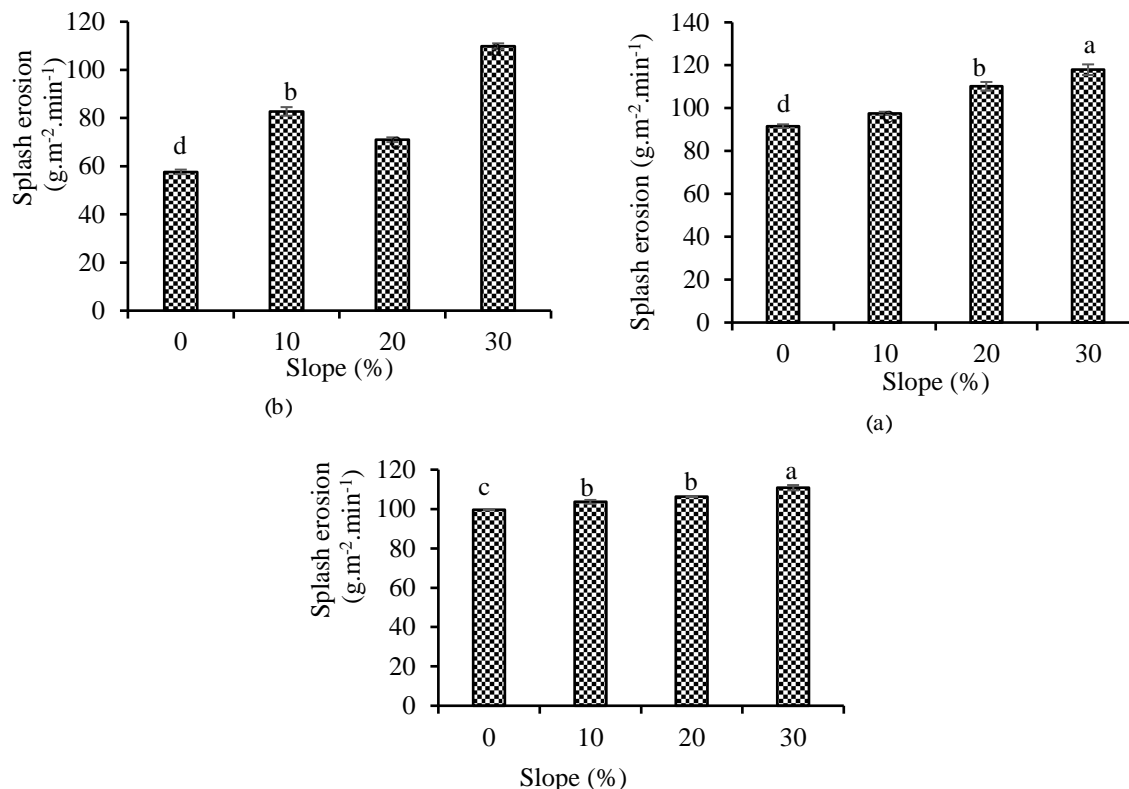
تأثیر درجه شیب بر فرسایش پاشمانی در بافت‌های مختلف

نتایج تجزیه واریانس اثر شیب سطح بر مقدار فرسایش پاشمانی در بافت‌های مختلف نشان داد که شیب سطح اثر معنی‌دار بر مقدار فرسایش پاشمانی در تمامی بافت‌ها داشت ($p < 0.000$) (جدول ۳). شکل ۵ نمودار مقایسه میانگین فرسایش پاشمانی در چهار سطح شیب را در بافت‌های مختلف نشان می‌دهد. در تمامی بافت‌ها شیب ۳۰ درصد بالاترین و شیب صفر درصد کم‌ترین میانگین فرسایش ناشی از قطرات باران را نشان دادند. در میان سه بافت خاک مورد مطالعه خاک لومرسی دارای کم‌ترین تغییرات فرسایش پاشمانی در سطوح مختلف

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

Table 3. The variance analysis effect of slope gradient on the splash erosion - in different texture

Variation resource	texture	Degree of freedom	Mean of squares	Significance
Slope gradient	Clay loam	3	4.99	0.000
	Loam	3	32.23	0.000
	Sandy clay loam	3	111.47	0.000



شکل ۵- مقایسه میانگین فرسایش پاشمانی در سطوح مختلف شیب در بافت لوم (الف) لومرس‌شنی (ب) و لومرسی (ج)
Figure 5. Comparison of the mean of splash erosion in different levels of slope in Loam (a) Sandy clay loam (b) and Clay loam (c)

ذرات شن، سیلت و رس به ترتیب ۵/۸۱، ۵۶/۸۳ و ۳۷/۳۶ درصد از سهم ذرات پاشمان یافته را شامل شدند. درجه شیب در هر بافت نیز اثر قابل‌توجهی بر نوع ذرات پاشمان یافته داشت (جدول ۵). به‌طورکلی در تمامی شیب‌ها بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار ذرات پاشمان‌یافته مربوطه به ذرات سیلت و شن بود و با افزایش درجه شیب سهم ذرات شن افزایش پیدا کرد. در پژوهشی والتا و همکاران (Valette *et al.*, 2006) بیان کردند که قطرات باران پس از برخورد با سطح خاک به دلیل ضربه مکانیکی خود باعث تخریب خاکدانه، ایجاد سله، کاهش نفوذپذیری و در نتیجه افزایش هدررفت ذرات فرسایش‌پذیر از جمله ذرات سیلت می‌شود.

انتقال‌پذیری ذرات خاک در شیب‌های مختلف

نتایج تجزیه واریانس اثر بافت خاک، شیب سطح و برهم‌کنش آن دو بر نوع ذرات پاشمان یافته نشان داد که بافت خاک، شیب سطح و برهم‌کنش آن دو اثر قابل‌توجهی بر نوع ذرات پاشمان یافته در بافت‌های مختلف داشت (جدول ۴). از میان ذرات پاشمان یافته تنها شن تحت تأثیر شیب سطح و برهم‌کنش بافت و شیب سطح قرار نگرفت. شکل ۶ مقایسه میانگین ذرات پاشمان یافته در بافت‌های مختلف را نشان می‌دهد. بالاترین درصد شن، سیلت و رس پاشمان یافته به ترتیب در بافت‌های لوم، لومرس‌شنی و لومرسی مشاهده شد. به‌طورکلی ذرات سیلت حساسیت بیش‌تری نسبت به ضربه قطرات باران داشتند و درصد بیش‌تری از ذرات پاشمان یافته را در هر سه بافت به خود اختصاص دادند.

جدول ۴- تجزیه واریانس اثر بافت خاک، شیب سطح و برهم‌کنش آن دو بر نوع ذرات پاشمان یافته

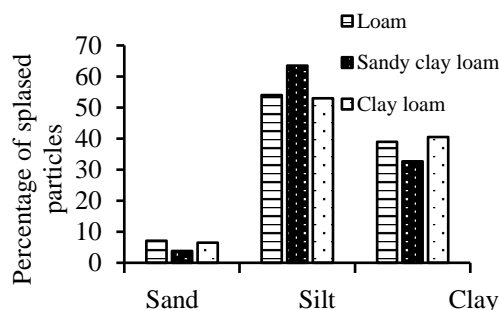
Table 4. The variance analysis effect of soil texture, surface slope and interaction of the two on the type of splashed particles

Variation resource	Primary particles	Degree of freedom	Mean of squares	Significance
Soil texture	Sand	2	36.03	0.000
	Silt	2	403.01	0.000
	Clay	2	205.86	0.000
Surface slope	Sand	3	6.91	0.15
	Silt	3	288.41	0.000
	Clay	3	211.43	0.000
Soil texture× Surface slope	Sand	6	46.19	0.24
	Silt	6	56.24	0.01
	Clay	6	86.84	0.05

جدول ۵- تجزیه واریانس اثر درجه شیب بر نوع ذرات پاشمان یافته در بافت‌های مختلف

Table 5. The variance analysis effect of slope gradient on the type of splashed particles in different texture

Variation resource	Texture	Primary particles	Degree of freedom	Mean of squares	Significance
Slope gradient	Clay loam	Sand	3	10.11	0.000
		Silt	3	32.22	0.000
		Clay	3	54.33	0.000
	Loam	Sand	3	4.31	0.001
		Silt	3	18.89	0.05
		Clay	3	12.08	0.05
	Sandy clay loam	Sand	3	5.01	0.001
		Silt	3	158.77	0.001
		Clay	3	121.55	0.001

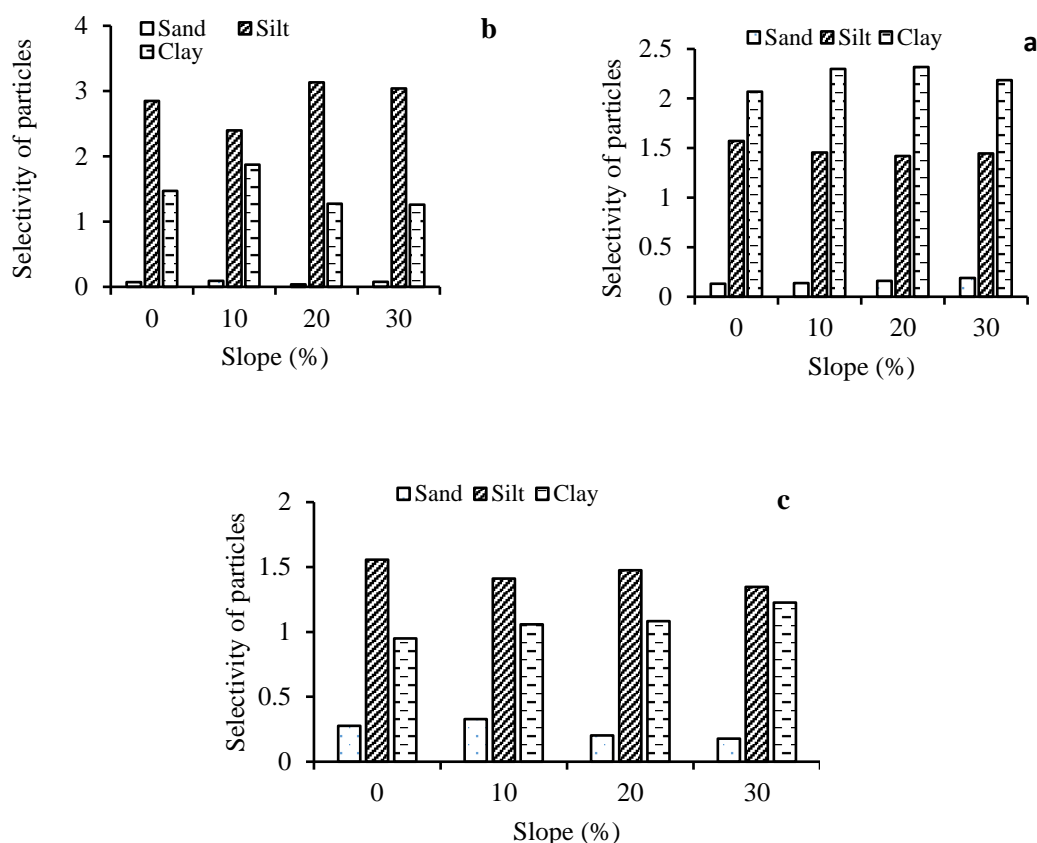


شکل ۶- مقایسه میانگین ذرات پاشمان یافته در بافت‌های مختلف

Figure 6. Comparison of the mean of splashed particles in different texture

ذرات شن در سطوح مختلف شیب بسیار کم‌تر از سایر ذرات پاشمان یافته بود که علت این موضوع را می‌توان سنگین بودن ذرات شن و قابلیت انتقال‌پذیری کم این ذرات دانست. بلیانی و واعظی (Baliani & Vaezi, 2017) نیز در پژوهشی که به بررسی حساسیت بافت‌های مختلف به فرسایش پاشمانی پرداختند دریافتند که بافت سیلتی و شنی به ترتیب حساس‌ترین و مقاوم‌ترین بافت‌ها نسبت به فرسایش پاشمانی بودند.

انتخاب‌پذیری ذرات پاشمان یافته در شیب‌های مختلف شکل ۷ میانگین انتخاب‌پذیری ذرات پاشمان یافته در سطوح مختلف شیب را نشان می‌دهد. بر این اساس در تمامی بافت‌ها (به جزء خاک لوم) انتخاب‌پذیری ذرات سیلت در سطوح مختلف شیب بیش‌تر از سایر ذرات بود. در خاک لوم انتخاب‌پذیری ذرات رس بیش‌تر از ذرات سیلت بود که علت این موضوع پایین بودن مقدار ذرات رس در نمونه اولیه خاک بود. هم‌چنین انتخاب‌پذیری



شکل ۷- مقایسه میانگین انتخاب‌پذیری ذرات پاشمان یافته در سطوح مختلف شیب در بافت لوم (الف)، لوم‌رسی (ب) و لوم‌رسی (ج)

Figure 7. Comparison of the mean of selectivity of splashed particles in different levels of slope in Loam (a) Sandy clay loam (b) and Clay loam (c)

باران و فرسایش پاشمانی در تمامی بافت‌ها داشتند که علت این موضوع مقاومت ناچیز ذرات سیلت نسبت به فرسایش می‌باشد. انتخاب‌پذیری ذرات سیلت نیز در سطوح مختلف شیب در بافت لوم‌رسی و لوم‌رسی بیشتر از سایر ذرات پاشمان یافته بود. به‌طورکلی این پژوهش نشان می‌دهد که خاک‌هایی که دارای مقادیر بیشتری از ذرات سیلت و رس می‌باشند حساسیت بیشتری نسبت به فرسایش پاشمانی و ضربه قطرات باران در آغاز بارندگی داشته و زمینه را برای وقوع سیلاب‌های ویرانگر در مناطق خشک و نیمه‌خشک فراهم می‌کنند.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که فرسایش پاشمانی به‌شدت تحت تأثیر بافت خاک، شیب سطح و برهم‌کنش بین آن دو قرار داشت. بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار فرسایش پاشمانی به ترتیب در خاک لوم‌رسی و لوم‌رسی مشاهده شد. به‌طورکلی مقدار فرسایش پاشمانی در سطح بدون شیب به دلیل اصابت تعداد کم‌تر بر سطح خاک کم‌ترین مقدار بود. در شیب ۳۰ درصد به دلیل افزایش زاویه شیب و به دنبال آن کاهش ضریب اصطکاک ذرات از پیش جدا شده با سطح خاک، فرسایش پاشمانی بیش‌ترین مقدار بود. هم‌چنین ذرات سیلت بیش‌ترین حساسیت را نسبت به ضربه قطرات

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., 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.
- Bafkar H.R., and Mojaradi A. 2007. Water and soil conservation. Razi University Press. Page 11-35. (In Persian)
- Baliani A., and Vaezi A.R. 2017. The susceptibility of different texture soils to splash erosion under different rainfall intensity and antecedent water content. *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(2): 67-85. (In Persian)
- Baliani A., Vaezi A.R., and Emami H. 2018. Variability of splash erosion from slope gradient and soil properties. *Iran-Watershed Management Science and Engineering*, 12(41): 95-104. (In Persian)
- Besharat F., and Vaezi A. R. 2015. Soil loss under simulated 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. (methodsofsoilan1)*, 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.
- Cheng Q., Cai Q., and Ma W. 2008. Comparative study on rain splash erosion of representative soils in China. *Chinese Geographical Science*, 18(2): 155-161.
- 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.H.M.A.D., 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)
- Ghezelseflu N., Boroghani M., and Soltani S. 2017. The effect of polyacrylamide for splash erosion control in rainfall different durations. *Iranian Journal of Irrigation and drainage*, 11(5): 763-771. (In Persian)
- Gholami L., and Karimi N. 2018. Effect of rainfall duration and soil moisture on changes of splash erosion. *Iran-Watershed Management Science and Engineering*, 12(42): 91-101. (In Persian)
- Goh T.B., Arnaud R.S., and Mermut A.R. 1993. Aggregate stability to water. *Soil Sampling and Methods of Analysis*, pp. 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)
- Honarbaksh A., and Hayavi F. 2017. Experimental study of splash erosion in different soil textures using rainfall simulator. *Quantitative Geomorphological research*, 6(3): 151-162. (In Persian)
- Kamalu C. 1994. The effect of slope length and inclination on the separate and combined actions of rainsplash and runoff. In *Conserving soil resources: European perspectives. Selected papers from the First International Congress of the European Society for Soil Conservation*. CAB INTERNATIONAL, pp. 143-149.
- Kemper W.D., and Rosenau R.C. 1986. Aggregate stability and size distribution. pp. 425-442.
- Khalili Moghadam B., Jabarifar M., Bagheri M., and Shahbazi E., 2015. Effects of land use change on soil splash erosion in the semi-arid region of Iran. *Geoderma*, 241: 210-220.
- Kiani-Harchegani M., and Sadeghi S.H.R. 2017. Effects of consecutive storms on splash erosion components for two different rainfall intensities under laboratory conditions. *Ecohydrology*, 4(3): 837-846. (In Persian)

- 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)* (methods of soil analysis 1). pp. 687-734.
- Lal R. 1990. Soil erosion in the tropics: principles and management. McGraw-Hill Inc. pp. 13-99.
- Lal R. 2000. Physical management of soils of the tropics: priorities for the 21st century. *Soil Science*, 165(3): 191-207.
- 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.
- Morgan R.P.C. 1978. Field studies of rainsplash erosion. *Earth Surface Processes*, 3(3): 295-299.
- Page A.L. 1982. Method of soil analysis. Part 2: chemical and microbiological properties. Soil Science Society of American Madison, Wisconsin, USA. pp. 125-141.
- Refahi H.G. 2007. Water erosion and conservation. Tehran University Press. pp. 27-132. (In Persian)
- Steiner K.G., and Williams R. 1996. Causes of soil degradation and development approaches to sustainable soil management. Weikersheim, Germany: Margraf Verlag. 93 p.
- United States. Department of Agriculture. 1972. Soil survey laboratory methods and procedures for collecting soil samples. US Government Printing Office. pp. 44-96.
- Vaezi A.R. 2014. Modeling runoff from semi-arid agricultural lands in Northwest Iran. *Pedosphere*, 24(5): 595-604.
- Vaezi A.R., Abbasi M., Keesstra S., and Cerdà A. 2017. Assessment of soil particle erodibility and sediment trapping using check dams in small semi-arid catchments. *Catena*, 157: 227-240.
- Vaezi A.R., and Gharehdaghi H. 2013. Quantification of rill erosion development in Marl soils of Zanzanroud watershed in North West of Zanzan, Iran. *Journal of Water and Soil*, 27(5): 872-881. (In Persian)
- Valette G., Prévost S., Lucas L., and Léonard J. 2006. SoDA project: A simulation of soil surface degradation by rainfall. *Computers and Graphics*, 30(4): 494-506.
- 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.
- Walling D.E. 1988. Erosion and sediment yield research some recent perspectives. *Journal of Hydrology*, 100(1-3): 113-141.
- Yao J.J., Cheng J.H., Zhou Z.D., Sun L., and Zhang H.J. 2018. Effects of herbaceous vegetation coverage and rainfall intensity on splash characteristics in northern China. *Catena*, 167: 411-421.
- 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.

Effect of Surface Slope on the Selectivity of Particles in Splash Erosion in Different Soils

Majid Foroumadi^{1*}, Ali Reza Vaezi²

(Received: April 2019 Accepted: June 2019)

Abstract

Splash erosion is the first type of water erosion caused by the impact of rain drops on the soil surface. Rain drops can disperse and move soil particles. Particles which transfer is effected by raindrop splash depends on several factors, including the soil type and the slope conditions. Although information on the role of these two agents splash erosion is available, but the selectivity of particles in splash erosion is a subject that needs further investigation, especially in the semi-arid region soils. This study was conducted to investigate the effects of splash erosion and selectivity of particles in different soils under the influence of slope. For this purpose, experiments were carried out in three different soils (Loam, Clay loam, Sandy clay loam) on four slopes (0, 10, 20 and 30%) under a simulated rain with constant intensity of 30 mm.h⁻¹ in three replications, with a total of 36 units in the form of a completely randomized design. According to the results, the highest and the lowest amount of splash erosion were in the clay loam soil (105.07 g.m⁻².min⁻¹) and the sandy clay loam soil (80.28 g.m⁻².min⁻¹), respectively. With increasing the gradients, the intensity of splash erosion increased. In general, the selectivity of particles in the splash erosion was affected by the soil texture, the slope of the surface, and the interaction between of them. Silt was the most sensitive particle to splash, accounting for almost 57% of the splashed particles, and against the sand with almost 6% contribution to the splash was the most resistive particle. In all textures (except the loam texture), the selectivity of the silt particles at different levels of the gradient was greater than the rest. In the loam soil, clay particles were more selective than the silt particles, most likely due to the lower amount of clay particles in the original soil samples.

Keywords: Aggregate breakdown, Impact of raindrop, Particle soil distribution, Rainfall simulator

Foroumadi M., Vaezi A.R. 2020. Effect of surface slope on the selectivity of particles in splash erosion in different soils. *Applied Soil Research*, 8(2): 99-111.

1. Ph.D. Student of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan (Corresponding Author)

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

* Corresponding Author Email: majidforoumadi89@gmail.com