



دانشگاه گوارن کشاورزی و منابع طبیعی اراک

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و چهارم، شماره دوم، ۱۳۹۶
<http://jwsc.gau.ac.ir>

حساسیت خاک‌ها با بافت متفاوت به فرسایش پاشمانی تحت تأثیر شدت باران و محتوای رطوبتی پیشین

*علی بلیانی^۱ و علیرضا واعظی^۲

^۱دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشگاه زنجان، دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه زنجان

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۴/۲۷

چکیده

سابقه و هدف: فرسایش پاشمانی به‌عنوان نخستین فرآیند فرسایش خاک شناخته می‌شود که نتیجه متلاشی شدن سطح خاک توسط قطرات باران است. فرسایش پاشمانی فرآیندی پیچیده شامل جدا شدن ذرات خاک توسط قطرات باران و به دنبال آن انتقال پاشمانی بخشی از ذرات جدا شده است. کمی‌سازی فرسایش پاشمانی در خاک‌ها با بافت مختلف برای ترکیب‌های گوناگونی از شدت باران و محتوای رطوبت پیشین (Antecedent moisture content, AMC) به‌منظور درک فرآیندهای فرسایش پاشمانی ضروری است. پژوهش‌های فرسایش پاشمانی در شرایط مزرعه اغلب پرهزینه و زمان‌بر است. شبیه‌سازی باران به‌طور وسیع به‌عنوان روشی مؤثر برای برآورد فرسایش پاشمانی در طیف وسیعی از عوامل مرتبط با فرسایش بارانی به‌کار گرفته شده است. این پژوهش به‌منظور بررسی فرسایش پاشمانی در ارتباط با شدت باران و محتوای رطوبت پیشین خاک در بافت‌های مختلف خاک با استفاده از باران شبیه‌سازی‌شده انجام گرفت.

مواد و روش‌ها: فرسایش پاشمانی در سه بافت خاک (شن، سیلت و رس) و چهار سطح AMC (از حالت هوا خشک تا اشباع) با استفاده از چهار شدت باران شبیه‌سازی‌شده (۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی‌متر در ساعت) اندازه‌گیری شد. برای این منظور ۴۸ واحد آزمایشی در سه تکرار طراحی شد و با استفاده از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی مورد تحلیل قرار گرفت. واحدهای آزمایشی عبارت از جعبه‌هایی به ابعاد ۳۵ سانتی‌متر × ۲۵ سانتی‌متر با عمق ۵ سانتی‌متر بود. فرسایش پاشمانی با جمع‌آوری ذرات پاشمان‌یافته طی هر باران و سپس خشک کردن آن‌ها در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد برای مدت ۲۴ ساعت اندازه‌گیری شد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک با استفاده از روش‌های رایج آزمایشگاهی تعیین شدند. داده‌های فرسایش پاشمانی با استفاده از آزمون دانکن برای مقایسه اثرات بافت خاک، شدت باران و محتوای رطوبت پیشین بر فرسایش پاشمانی تجزیه و تحلیل شد. داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.2 تحلیل و نمودارها با استفاده از نرم‌افزار SigmaPlot 12.0 به‌دست آمد.

یافته‌ها: تفاوت‌های معنی‌دار فرسایش پاشمانی در بین بافت‌های خاک ($P < 0.001$)، سطوح AMC ($P < 0.001$) و شدت باران ($P < 0.001$) مشاهده شد. بیش‌ترین فرسایش پاشمانی در بافت سیلت مشاهده شد (به‌طور متوسط ۲۵۷/۲ گرم بر مترمربع) که این موضوع می‌تواند به‌دلیل قابلیت جداشدن آسان ذرات سیلت و انتقال‌پذیری آسان آن‌ها توسط

* مسئول مکاتبه: alibaliani63@gmail.com

قطرات برگشت یافته باران باشد. خاک شنی مقاومت‌ترین بافت خاک از نظر فرسایش پاشمانی بود. مقدار پاشمان در این خاک از ۳۵/۴۳ تا ۱۵۲/۷۰ گرم بر مترمربع تغییر کرد. تفاوت‌های معنی‌داری از نظر برهم‌کنش بافت خاک با شدت باران ($P < 0/001$)، بافت خاک با سطوح AMC ($P < 0/001$) و شدت باران با سطوح AMC ($P < 0/001$) مشاهده شد. فرسایش پاشمانی تحت تأثیر مثبت شدت باران قرار گرفت. نتایجی متفاوت از نظر تأثیر AMC بر فرسایش پاشمانی بین خاک‌ها مشاهده شد. با افزایش AMC مقدار فرسایش پاشمانی در خاک سیلتی افزایش یافت در حالی‌که خاک رسی روندی کاهشی با افزایش AMC نشان داد. خاک شنی تفاوتی بارز از نظر فرسایش پاشمانی با افزایش AMC نشان نداد. فرسایش پاشمانی همچنین تحت تأثیر برهم‌کنش سه متغیر مورد بررسی (بافت خاک، شدت باران و AMC) قرار گرفت. بیش‌ترین فرسایش پاشمانی (۴۴۱/۲۰ گرم بر مترمربع) در خاک سیلتی دارای رطوبت پیشین ۵۰ درصد اشباع و تحت باران با شدت ۴۰ میلی‌متر بر ساعت مشاهده شد. کم‌ترین فرسایش پاشمانی (۳۵/۴۳ گرم بر مترمربع) نیز مربوط به خاک شنی دارای رطوبت ۵ درصد اشباع (هوا خشک) و تحت باران با شدت ۱۰ میلی‌متر بر ساعت بود.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که خاک سیلتی، حساس‌ترین بافت خاک از نظر فرسایش پاشمانی می‌باشد. به‌علاوه تغییرات مقدار فرسایش پاشمانی بافت سیلت از سایر بافت‌ها بیش‌تر بود. مقدار فرسایش پاشمانی هر خاک را می‌توان با استفاده از دیاگرام به‌دست آمده بر مبنای شدت باران و رطوبت پیشین پیش‌بینی کرد.

واژه‌های کلیدی: پاشمان خاک، پراکنش ذرات خاک، خصوصیات سطح خاک، قطر هندسی اندازه ذرات

مقدمه

فرسایش پاشمانی^۱ یک فرآیند پیچیده شامل جدا شدن ذرات خاک توسط ضربه قطرات باران بر سطح خاک و به‌دنبال آن انتقال ذرات پاشمان یافته است (۲۶ و ۲۷). فرسایش پاشمانی و تخریب ناشی از آن تحت تأثیر عوامل مختلفی شامل فرساینده‌گی باران، شیب، شرایط سطح خاک و خصوصیات ذاتی خاک (توزیع اندازه ذرات، پایداری خاک‌دانه‌ها و مواد آلی) می‌باشد (۲، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۴ و ۳۳). فرسایش پاشمانی یک خطر جدی برای زمین‌های کشاورزی و غیرکشاورزی در مناطق مرطوب (به‌علت بارش‌های با شدت بالا) و نیمه‌خشک (به‌علت پوشش گیاهی ضعیف) است (۷ و ۱۱). پژوهش‌های مختلفی در زمینه عوامل مؤثر بر فرسایش پاشمانی صورت گرفته است. در این راستا گوانسه (۱۹۸۱) اثر سه نوع خاک،

چهار شدت باران، پنج شیب و اثرات متقابل آن‌ها را روی جدا شدن و انتقال ذرات به‌صورت پاشمان بررسی کرد و نشان داد که جدا شدن و انتقال پاشمانی ذرات خاک با افزایش شدت باران افزایش معنی‌داری داشت و شدت فرسایش پاشمانی خاک‌ها به‌ترتیب رس < شن < لوم‌رس بود (۲۱). واعظی و همکاران (۲۰۱۵) حساسیت خاک‌دانه‌ها در خاک‌های با بافت متفاوت به فرآیندهای فرسایش بارانی را مورد بررسی قرار دادند و بیان داشتند که شدت پاشمان تحت تأثیر توزیع اندازه ذرات خاک قرار دارد و افزایش درصد ذرات سیلت و رس و کاهش درصد ذرات شن به‌شدت افزایش می‌یابد (۳۱). یوسفی و همکاران (۲۰۱۵) تخریب خاک‌دانه‌ها و فرسایش پاشمانی را در دو نوع کاربری شامل جنگل با بافت لوم‌سیلتی و کشاورزی با بافت لوم‌رسی سیلتی (با میانگین ۵۰ درصد سیلت) در حوضه دشتگل مسجدسلیمان

1- Splash erosion

می‌گیرد (۱۴). در این زمینه ترومن و برادفورد (۱۹۹۰) جدا شدن ذرات به صورت پاشمان در پنج خاک با محدوده بافتی لومی‌شنی تا رسی را تحت باران شبیه‌سازی‌شده و اثر AMC در دو حالت رطوبت نزدیک اشباع و رطوبت هوا خشک مورد بررسی قرار دادند و بیان داشتند کل پاشمان برای خاک رسی در حالت هوا خشک بیش‌تر از رطوبت نزدیک به اشباع است و در همه خاک‌های مورد پژوهش آن‌ها به‌جز لوم سیلتی، AMC منجر به افزایش فرسایش پاشمانی شد. پژوهش‌ها نشان دادند علاوه بر بافت خاک مقدار AMC خاک به‌عنوان یک متغیر اثرگذار، بر فرآیندهای جدا شدن و انتقال ذرات خاک به‌وسیله قطرات باران مؤثر است (۳۰). هرچه رطوبت خاک افزایش یابد انبساط غیریکنواخت ذرات و تخریب ساختمان خاک ضعیف‌تر و تشکیل سله کندتر صورت می‌گیرد و به‌دنبال آن فرسایش خاک کاهش می‌یابد (۱۳). فرآیند پاشمان باعث حرکت ذراتی از خاک می‌شوند که نیروی هم‌چسبی کمی دارند (۳۷). اهمیت AMC بر فرسایش خاک در پژوهش‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. در این زمینه واتانگ و همکاران (۱۹۹۶) تأثیر شش نوع شدت باران و مقدار AMC را بر پاشمان خاک در خاک اکسی‌سول در منطقه هاوایی با استفاده از معادله عمومی پاشمان بررسی کردند و نشان دادند که AMC تأثیری بر مقدار پاشمان خاک در دو حالت مرطوب و خشک ندارد با این وجود تغییر انرژی جنبشی تأثیر معنی‌داری بر مقدار پاشمان دارد. آن‌ها در نهایت رابطه ۱ را ارائه دادند:

$$SP = 14.29EFD^{1.013} \quad R^2 = 0.94 \quad (1)$$

که در آن، SP نشان‌دهنده پاشمان ذرات متلاشی شده (بر حسب $\text{Kg m}^{-2} \text{time}^{-1}$) و EFD^3 چگالی شار انرژی باران (W m^{-2}) است (۳۵). در مورد اثرهای AMC گزارش‌های متناقضی ارائه شده است. لادو و

بررسی کردند و نشان دادند با افزایش مدت و شدت بارش فرسایش پاشمان و تخریب خاک‌دانه‌ها افزایش یافت. همچنین برای بارانی با شدت ۷۵ میلی‌متر بر ساعت با مدت ۱۵ دقیقه مقدار فرسایش پاشمانی در حدود ۴۰ گرم بر مترمربع بود (۳۸). درویشان و همکاران (۲۰۱۵) تأثیرپذیری زمان شروع و ضریب رواناب از شدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک^۱ (AMC) در کرت‌های آزمایشگاهی در یک خاک با بافت شنی‌لومی با شدت‌های ۳۰ تا ۹۰ میلی‌متر بر ساعت به مدت ۱۰ تا ۱۵ دقیقه بررسی کردند و بیان داشتند ضریب رواناب با شدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک رابطه معنی‌داری دارد (۳). کیانی هرچگانی و همکاران (۲۰۱۵) اثر شدت باران و شیب را بر فرسایش ناشی از قطرات باران در یک خاک لوم‌رسی‌شنی بررسی کردند و نشان دادند که رابطه مقدار پاشمان پایین‌دست، بالادست و کل با شدت بارش در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار بود (۹). ویی و همکاران (۲۰۱۵) فرسایش پاشمانی را در مخلوط شن و رس (در دو حالت مرطوب با ۱۰ رطوبت درصد و خشک) در بارش‌هایی با شدت ۶۰ میلی‌متر بر ساعت اندازه‌گیری و ارتباط آن با توزیع اندازه ذرات خاک را بررسی کردند و نشان دادند فرسایش پاشمان به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر توزیع اندازه ذرات^۲ (PSD) بود. به‌علاوه بیان داشتند فرسایش پاشمانی در حالت خشک بیش از حالت مرطوب بود و با چسبندگی ذرات خاک ارتباط منفی داشت (۳۶). مورگان (۲۰۰۱) با استفاده از فنجان‌های پاشمان، پاشمان ۱۲ کلاس بافتی خاک را مورد بررسی قرار داد و گزارش داد که خاک شنی بیش‌ترین و خاک رسی کم‌ترین مقدار پاشمان را در محل بین‌شیاری دارد (۱۶ و ۱۷). فرسایش پاشمانی در کنار عوامل مختلف، تحت تأثیر محتوای رطوبت پیشین خاک (AMC) نیز قرار

1- Antecedent moisture content

2- Particle size distribution

3- Energy flux density (EFD)

سطوح مختلف رطوبتی با بافت‌های متفاوت از نظر پدیده پاشمان انجام نگرفته است و در بیش‌تر پژوهش‌های پیشین فرسایش پاشمانی در یک یا دو حالت محتوای رطوبت پیشین و شدت بارش ثابت (به‌عنوان نمونه شدت ۶۰ میلی‌متر بر ساعت) گزارش شده است و تغییرات فرسایش پاشمانی بافت‌های متفاوت با تغییرات شدت باران و محتوای رطوبت پیشین به‌طور پیوسته کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. از این‌رو پژوهش حاضر با هدف بررسی حساسیت خاک‌های با بافت مختلف به فرسایش پاشمان، اثر رطوبت پیشین و شدت بارندگی بر فرسایش پاشمانی و اثرات متقابل بین عوامل مذکور انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

طرح آزمایشی و نمونه‌برداری خاک: پژوهش پیش‌رو در چهار سطح رطوبتی (هوا خشک، یک چهارم اشباع، نیمه‌اشباع و رطوبت اشباع) تحت چهار شدت باران (۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی‌متر بر ساعت) در سه خاک با بافت مختلف در سه تکرار در مجموع با ۱۴۴ واحد آزمایشی در قالب طرح فاکتوریل با طرح کاملاً تصادفی انجام شد. سه خاک با بافت مختلف شامل شنی و رسی در ۵۰ کیلومتری غرب زنجان و سیلتی در حوضه آبخیز پرسپولیس استان فارس شناسایی شد و از عمق صفر تا ۲۵ سانتی‌متر نمونه خاک برداشت شد (جدول ۱).

به‌منظور جداسازی سنگ و قلوه‌سنگ و آماده‌سازی نمونه‌های خاک، نمونه‌ها از الک شماره ۳/۸ اینچ (حدود ۱۰ میلی‌متر) عبور داده شد (شکل ۱). اگرچه مطالعات پاشمان از ابعاد کوچک مانند فنجان‌های پاشمان (۱۳) تا ابعاد بزرگ مانند سطوح پاشمان (۵) قابل انجام است با این وجود در صورت استفاده از فنجان‌های پاشمان (به قطر ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر) موجب نادیده‌شدن نقش قطره باران در انتقال ذرات جداسازی‌شده

همکاران (۲۰۰۴) گزارش دادند که نه تنها سرعت مرطوب شدن بلکه مقدار AMC نیز در اندازه نیروهای تخریب‌کننده خاک‌دانه تعیین‌کننده هستند و از این‌رو موجب تخریب ساختمان سطح خاک و در نتیجه تشکیل سله می‌شوند. این نیروها چنانچه مقدار آب خاک کاهش یابد بزرگ‌تر می‌شوند. بنابراین تشکیل سله و کاهش نفوذپذیری خاک در خاک‌های خشک‌تر قابل انتظار خواهد بود (۶ و ۱۱). لیو و همکاران (۲۰۱۱) اثرات سه شدت بارندگی و سه مقدار رطوبت پیشین را بر نفوذپذیری و تشکیل سله خاک تحت شرایط باران شبیه‌سازی بررسی کردند و نشان دادند با افزایش رطوبت و شدت بارندگی به‌ترتیب نفوذپذیری کاهش و فرسایش افزایش یافت (۱۳). برخی پژوهش‌ها نشان دادند که افزایش AMC به‌طور معنی‌داری پراکنش ذرات خاک در اثر قطرات باران به‌صورت پاشمان، رواناب و رسوب دریافتی را کاهش می‌دهند (۴ و ۲۸). دفرشا و ملس (۲۰۱۲) تأثیر سه شدت بارندگی را بر خاک‌های رسی و لومی‌رسی‌شنی با مقادیر رطوبت اولیه خاک خشک^۱ (AD) و مرطوب^۲ (PW) بر سه سطح شیب بررسی کردند و نشان دادند که خاک مرطوب در هر سه شدت بارندگی، غلظت رسوب را به‌صورت خطی و تا یک سوم نسبت به حالت خشک کاهش می‌دهد (۴). آنگولا مارتینز و همکاران (۲۰۱۲) با مطالعه فرسایش پاشمانی در شرایط طبیعی تنها از عامل فرساینده‌گی باران در مدل فرسایش پاشمانی خود استفاده کردند و بیان داشتند که این مورد به‌دلیل هزینه زیاد و زمان‌بر بودن پژوهش‌های فرسایش پاشمانی در شرایط طبیعی می‌باشد (۱). به‌طورکلی بررسی پژوهش‌های پیشین بیانگر نتایجی متناقض در مورد تأثیر رطوبت پیشین بر فرسایش خاک می‌باشد. تاکنون مطالعه‌ای دقیق در مورد حساسیت بافت‌های خاک مناطق نیمه‌خشک در

1- Air dry
2- Pre-wetted

(۱۹۹۰) استفاده گردید (۳۰ و ۳۲). جعبه‌های پاشمان دارای قابلیت نفوذ بوده و در کف آن‌ها از یک لایه فیلتر شنی استفاده شد (۳۱). جرم مخصوص ظاهری خاک در نقاط تحت نمونه‌برداری به وسیله سیلندر فلزی به قطر ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر (۲۸) تعیین شد. برای رسیدن جرم مخصوص ظاهری خاک داخل جعبه‌های پاشمان به شرایط طبیعی، نمونه‌های خاک در چند مرحله از زیر جعبه اشباع و در شرایط هوای آزاد خشک شدند. بعد از هر مرتبه اشباع از زیر و خشک نمودن، جرم مخصوص ظاهری تا نزدیک شدن به جرم مخصوص ظاهری خاک طبیعی مجدداً اندازه‌گیری شد.

با قطره باران می‌شود (۱۰). به علاوه در سطوح پاشمان با ابعاد بزرگ (۵۰ سانتی‌متر × ۱۰۰ سانتی‌متر) تعداد ذرات بازگشتی بر سطح تحت فرسایش بارانی بالا خواهد بود و در هر دو مورد فنجان‌های پاشمان و سطوح پاشمان مقدار فرسایش پاشمانی اندازه‌گیری شده با مقدار واقعی متفاوت خواهد بود (۱۰). جهت رفع این مشکل در این پژوهش از جعبه‌های پاشمان به ابعاد ۳۵ سانتی‌متر × ۲۵ سانتی‌متر با عمق پنج سانتی‌متر (این ابعاد بزرگ‌تر از ابعاد فنجان‌های پاشمان و کوچک‌تر از سطوح بزرگ پاشمان می‌باشد) مشابه با شیوه پژوهش وان‌دیجک و همکاران (۲۰۰۳) و ترومن و برادفورد

جدول ۱- مختصات UTM نمونه خاک‌های مورد آزمایش.

Table 1. UTM coordinates of Soil samples sites.

موقعیت مکانی (Location)	عرض جغرافیایی (Latitude)	طول جغرافیایی (Longitude)	بافت خاک (Soil texture)
حوزه آبخیز زنجانرود (Zanjanroud Watershed)	4093535	242719	شن (Sand)
۴۰ کیلومتری مرودشت، فارس (40 km from Marvdasht, Fars)	3332263	650149	سیلت (Silt)
۶۰ کیلومتری غرب زنجان (60 kilometers west of Zanjan)	4094477	241187	رس (Clay)



شکل B (ب)



شکل A (الف)

شکل ۱- جعبه‌های پاشمان قرار گرفته داخل تشتک جهت اشباع‌سازی به روش موئینگی (الف) خشک شدن نمونه‌های خاک در معرض هوا برای رساندن به رطوبت موردنظر (ب).

Figure 1. The splash boxes placed in the pans for capillary saturation (A) and air drying the boxes for achieving the interested soil moisture content (B).

۱/۷۲ به درصد مواد آلی تبدیل شد (۳۴). درصد کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی با استفاده از اسید هیدروکلریک ۱ نرمال (۱۹) تعیین شد (جدول ۲).

شبیه‌سازی باران: به منظور شبیه‌سازی باران داده‌های شدت باران ایستگاه‌های سینوپتیک مربوط به شرکت سهامی مدیریت منابع آب ایران در دوره آماری ۱۰ ساله (۱۳۷۶ تا ۱۳۸۶) استفاده شد و پس از تحلیل داده‌ها، چهار شدت بارش با استفاده از منحنی‌های شدت-مدت و فراوانی ایستگاه‌های باران‌سنجی شمال‌غرب (استان‌های زنجان، اردبیل، آذربایجان غربی و شرقی) کشور شامل شدت‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی‌متر بر ساعت استخراج شد. از یک دستگاه باران‌ساز طراحی شده در گلخانه علوم خاک دانشگاه زنجان با ابعاد یک در دو متر با ارتفاع سه متر که توان تولید بارش‌های با شدت‌های نزدیک به شرایط باران طبیعی داشت بهره گرفته شد و یکنواختی بارش‌ها در طول و عرض سطح زیر دستگاه باران‌ساز اندازه‌گیری و تنظیم شد (شکل ۲). ارتفاع باران‌ساز با توجه به اندازه قطرات باران (به‌طور متوسط از ۱/۲ تا ۲/۲ میلی‌متر) با کمک معادله سرعت حد باران (۲۳)، ۳ متر انتخاب شد (شکل ۲). جهت تامین آب از مخزن با حجم ۲۰۰ لیتر بالاتر از سطح قطره‌چکان‌ها با بار آبی ثابت استفاده شد. چهار شیر آب در خروجی مخزن جهت تنظیم فشار (هر شیر آب برای تنظیم یک شدت بارش) برای دستیابی به چهار شدت بارش مختلف به مدت ۱۵ دقیقه (مدت زمانی که در منطقه مورد مطالعه بارش‌های موردنظر فراوانی بیشتری داشتند) تعبیه شد.

اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک‌ها: در نمونه‌های خاک درصد شن، سیلت و رس به روش هیدرومتری (۲۸) اندازه‌گیری شدند و قطر هندسی اندازه ذرات^۱ (Dg) بر اساس روش شیرازی و بورسما (۱۹۸۴) تعیین شد (رابطه‌های ۲ و ۳).

$$Dg = \exp a \quad (2)$$

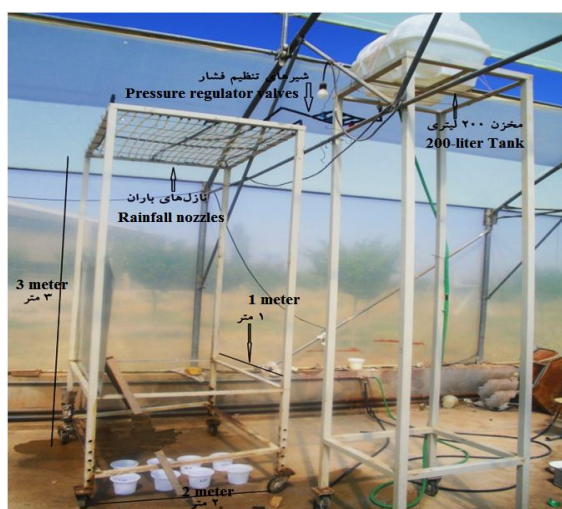
$$a = 0.01 \sum_{i=1}^n f_i \ln M_i \quad (3)$$

که در آن‌ها، Dg قطر هندسی اندازه ذرات بر حسب میلی‌متر، ضریب ۰/۰۱ برای تبدیل درصد فراوانی ذرات به اجزا، n تعداد گروه‌های جدا شده خاک (به‌عنوان مثال رس، سیلت و شن)، fi درصدی از جرم کل خاک که قطرهای معادل و یا کم‌تر از Mi (قطر ذرات) دارند و ln لگاریتم طبیعی است (۲۷). جرم مخصوص ظاهری در نمونه‌های برداشت‌شده به‌وسیله سیلندر فلزی به قطر ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر (۲۸) تعیین شد. رطوبت اشباع با قرار دادن نمونه‌های خاک در حوضچه آب به مدت ۴۸ ساعت تعیین شد (۲۸). رطوبت هوا خشک با قرارگیری نمونه‌های اشباع در شرایط سایه و با کمک منحنی آب‌زدایی تا رسیدن به رطوبت ثابت تعیین شد (۲۸). مقدار سنگ‌ریزه خاک‌ها با جداسازی ذرات اولیه با قطر ۲ تا ۸ میلی‌متر و تعیین نسبت جرمی آن‌ها در خاک، تعیین شد (۲۸). واکنش خاک به‌وسیله pH متر در نسبت ۱:۲ آب و خاک تعیین شد. برای تعیین شوری یا هدایت الکتریکی خاک ابتدا عصاره گل اشباع تهیه شد و به کمک دستگاه EC متر (مدل JENWAY ساخت کشور انگلستان)، EC خاک در عصاره گل اشباع قرائت شد (۲۷). مقدار کربن آلی خاک به روش والکلی و بلاک تعیین و با ضریب

1- Geometric particle-size diameter

جدول ۲- برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک.
Table 2. Some physical and chemical properties of soil samples.

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی یادتهای خاک													
Soil textures physical and chemical properties													
کربنات کلسیم (%) (Calcium carbonate equivalent (%))	ماده آلی (%) (Organic matter (%))	واکنش خاک (pH)	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر) (Ece (dS m ⁻¹))	سنگریزه (%) (Gravel (%))	رطوبت اشباع (%) (Saturation moisture (%))	رطوبت هوا (%) (Air-dried moisture (%))	خشک (%) (Bulk density (g cm ⁻³))	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب) (Bulk density (g cm ⁻³))	قطر هندسی اندازه ذرات (میلی متر) (Dg (mm))	درصد رس (Clay (%))	درصد سیلت (Silt (%))	درصد شن (Sand (%))	یادتهای خاک (Soil textures)
48.75	0.60	7.50	0.54	0.01>	0.48	0.02	1.25	0.002	12.00	84.00	4.00	سیلت (Silt)	
25.00	1.00	7.40	16.67	0.01>	0.65	0.04	1.05	0.018	63.30	24.35	12.35	رس (Clay)	
7.50	0.47	7.2	1.43	5	0.25	0.01	1.70	0.774	2.00	3.00	95.00	شن (Sand)	



شکل ۲- دستگاه باران‌ساز طراحی و استفاده شده در این پژوهش.

Figure 2. Rainfall simulator device was designed and used in this study.

تجزیه و تحلیل داده‌ها: پیش از تحلیل داده‌ها، نرمال بودن توزیع آماری داده‌ها با تحلیل آماره‌های چولگی^۱ و کشیدگی^۲ و نرمال بودن داده‌ها با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف بررسی شدند. برای این منظور از نرم‌افزار SPSS Statistics 20 (۱۸) استفاده شد. تجزیه واریانس داده‌ها، مقایسه میانگین‌ها و تفاوت آماری بین تیمارها (بافت‌های خاک، شدت‌های باران و یا درجات شیب سطح) با استفاده از آزمون دانکن در محیط SAS 9.4 (۲۵) تحلیل شدند و سپس جهت ترسیم شکل‌های دوبعدی داده‌ها فرسایش پاشمانی از نرم‌افزار SigmaPlot 12.0 (۲۹) استفاده شد.

نتایج و بحث

فرض صفر مبنی بر نرمال بودن داده‌ها فرسایش بارانی با شاخص کولموگروف-اسمیرنوف معادل ۰/۰۹ در سطح ۰/۰۵ درصد تأیید گردید. مقدار شاخص چولگی و کشیدگی داده‌های مربوط به مقدار فرسایش پاشمانی در خاک‌های مورد بررسی تحت تأثیر محتوای رطوبت پیشین و شدت باران، به ترتیب ۱/۰۱ و ۰/۱۷۴ در بازه (۲ و -۲) بود که

اعمال سطوح رطوبتی به خاک‌ها: از آن‌جا که حالت هوا خشک کم‌ترین رطوبت موجود در خاک در شرایط طبیعی و حالت اشباع بالاترین مقدار رطوبت موجود در خاک نزدیک به شرایط طبیعی می‌باشد، به‌علاوه به دلیل آن که رسیدن رطوبت خاک به حالت هوا خشک و اشباع کامل خاک طبیعی امری مشکل و مستلزم دقت بسیار بالا می‌باشد با این وجود در این پژوهش تلاش شد سطوح رطوبتی نزدیک به شرایط رطوبت طبیعی اعمال شود، بنابراین چهار سطح رطوبتی شامل هوا خشک (به‌طور میانگین ۵ درصد اشباع)، یک چهارم اشباع (۲۵ درصد اشباع)، نیمه‌اشباع (۵۰ درصد اشباع) و رطوبت اشباع (۱۰۰ درصد اشباع) بر روی نمونه‌ها اعمال شد. حالت اشباع با قرار دادن نمونه‌ها درون آب مقطر و اشباع خاک از زیر حاصل شد و سپس برای حصول سایر سطوح رطوبتی، نمونه‌های اشباع در شرایط سایه تا رسیدن به رطوبت‌های پایین‌تر قرار داده شدند (شکل ۱). در این پژوهش تیمارهای هوا خشک، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درصد اشباع با استفاده از رابطه ۴ تعیین شد:

$$AMC (\%) = \frac{\text{رطوبت خاک}}{\text{رطوبت اشباع}} \times 100 \quad (4)$$

1- Skewness

2- Kurtosis

بود و فرض صفر مبنی بر یکسان بودن میانگین داده‌های فرسایش پاشمانی رد شد و نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین داده‌های فرسایش پاشمانی می‌باشد (جدول ۳).

بیانگر نرمال بودن توزیع داده‌ها بودند (۸). تحلیل‌های آماری فرسایش پاشمانی در تیمارهای مورد بررسی نشان داد که اثرات مستقیم شامل بافت خاک، شدت بارش و محتوای رطوبت پیشین و اثرات متقابل این عوامل بر مقدار پاشمان در سطح ۱ درصد معنی‌دار

جدول ۳- تحلیل واریانس اثرات اصلی و متقابل متغیرها بر مقدار پاشمان.

Table 3. Analysis of variance of the main and interaction of variables on the amount of sediment production.

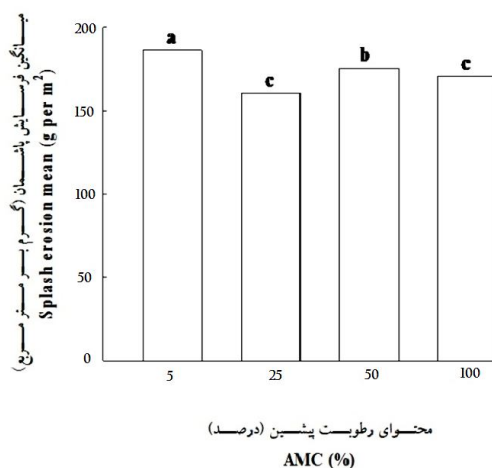
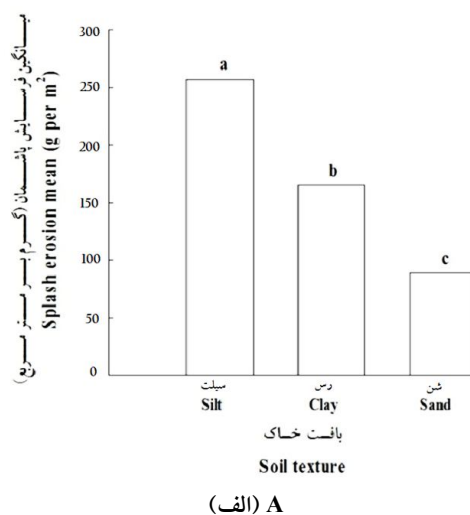
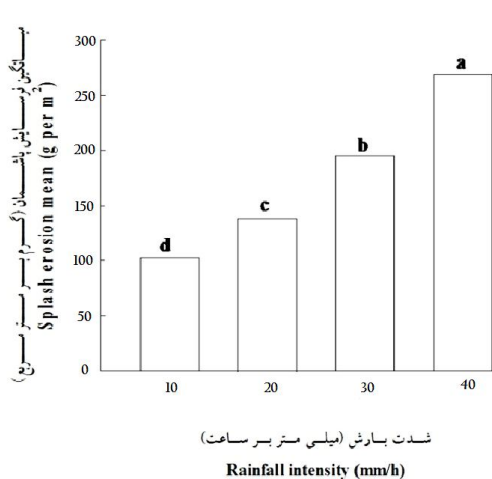
معنی‌داری (Significance)	مقدار F** (F** Value)	میانگین مربعات (Mean Square)	درجه آزادی (Degree of freedom)	منابع تغییر (Sources of Variations)
<0.001	1100.60	2618.84	2	بافت خاک (Soil texture)
<0.001	506.48	1205.29	3	شدت بارش (Rainfall intensity)
<0.001	12.43	29.28	3	محتوای رطوبت پیشین (Antecedent moisture content)
<0.001	52.14	123.97	6	بافت خاک × شدت بارش (Rainfall intensity × Soil texture)
<0.001	113.36	271.01	6	بافت خاک × محتوای رطوبت پیشین (Antecedent moisture content × Soil texture)
<0.001	7.78	18.53	9	شدت بارش × محتوای رطوبت پیشین (Antecedent moisture content × Rainfall intensity)
<0.001	15.32	37.69	18	بافت خاک × شدت بارش × محتوای رطوبت پیشین (Antecedent moisture content × Rainfall intensity × Soil texture)

(۲۰۰۱) که در ۱۲ کلاس بافت خاک تحت باران با دو شدت ۶۰ و ۸۰ میلی‌متر بر ساعت انجام گرفت، مغایرت داشت. آن‌ها نتیجه گرفتند که مقدار فرسایش پاشمان در بافت‌ها به صورت شن < رس < سیلت می‌باشد. به علاوه این نتایج با یافته‌های گوانسه (۱۹۸۱) که بیان داشت مقدار فرسایش پاشمان بافت رس بیش از بافت شن است مطابقت داشت. وی نشان داد که به‌طور کلی مقدار فرسایش پاشمان از ترتیب رس < شن < لوم رس پیروی می‌کند. با افزایش شدت باران، مقدار فرسایش پاشمانی به‌دلیل افزایش انرژی جنبشی (عامل فرساینده خاک) به‌طور معنی‌داری ($P < 0.001$) تحت تأثیر قرار گرفت و افزایش یافت. این نتایج با یافته‌های دفرشا و ملس

نتایج مقایسه میانگین اثرات بافت خاک، شدت بارش و محتوای رطوبت پیشین (AMC) در شکل (۳) نشان داده شده است. تفاوتی معنی‌دار بین سه بافت خاک از نظر مقدار میانگین پاشمان مشاهده شد ($P < 0.001$). میانگین فرسایش پاشمان خاک‌ها نشان داد که مقدار پاشمان خاک از الگوی سیلت < رس < شن پیروی می‌کند. گزارش‌های پیشین نیز نشان می‌دهد که مقاومت ذرات سیلت در برابر فرسایش پاشمانی به‌دلیل جرم مخصوص نسبتاً پایین، فقدان قابلیت چسبندگی و تشکیل واحدهای ساختمانی ضعیف، پایین است و ذرات درشت‌تر و ریزتر از آن در برابر فرسایش پاشمانی مقاوم‌تر هستند (۲۲). با این وجود نتایج حاصل با یافته‌های مورگان و همکاران

میانگین فرسایش پاشمانی را نشان داد. این نتایج با یافته‌های ویی و همکاران (۲۰۱۵) که بیان داشتند فرسایش پاشمان خاک مرطوب به‌علت چسبندگی بالاتر از خاک خشک کم‌تر می‌باشد مطابقت داشت. به‌علاوه این نتایج با یافته‌های ترومن و برادفورد (۱۹۹۰) مطابقت داشت. آن‌ها بیان کردند که در حالت هوا خشک فرسایش پاشمانی بیش‌تر از حالت اشباع است.

(۲۰۱۲) تحت باران‌های با شدت ۵۵ تا ۱۲۰ میلی‌متر بر ساعت مطابقت داشت. مقدار پاشمان همچنین تحت تأثیر محتوای رطوبت پیشین خاک (AMC) قرار گرفت. در سطوح ۲۵ و ۱۰۰ درصد AMC از نظر آماری اختلاف معنی‌داری با هم نشان ندادند. با این وجود تفاوت آن‌ها از نظر مقدار پاشمان با حالت‌های رطوبتی هوا خشک و نیمه‌اشباع (۵۰ درصد اشباع) معنی‌دار بود. حالت هوا خشک به‌دلیل پایین بودن نیروهای هم‌چسبی و دگرچسبی ذرات خاک بالاترین



شکل ۳- مقایسه میانگین فرسایش پاشمانی به روش دانکن برای بافت‌های خاک (الف)، شدت‌های بارش (ب) و محتوای رطوبت پیشین (ج).

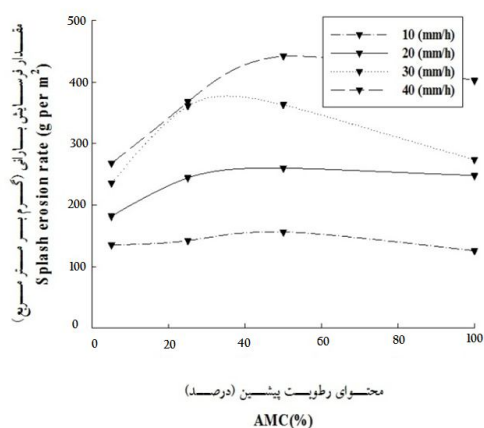
Figure 3. Mean comparison of the splash erosion in Duncan method for soil textures (A), rainfall intensities (B) and antecedent moisture contents (C).

تأثیر رطوبت پیشین خاک بر فرسایش پاشمانی: نتایج پژوهش نشان داد که خاک سیلتی بالاترین و خاک شنی کمترین مقدار پاشمان را داشت (شکل ۴). این نتایج بر خلاف یافته‌های مورگان (۲۰۰۱) بود که نشان داد خاک شنی بالاترین و خاک رسی کمترین مقدار پاشمان را داشت. شاید دلیل این تفاوت ناشی از شرایط متفاوت آزمایشی باشد زیرا در بررسی‌های این پژوهشگر از فنجان‌های پاشمانی با قطر ۱۰ سانتی‌متر و در حالت هوا خشک استفاده شده است، دلیل دوم شاید به سبب توزیع متفاوت اندازه ذرات در بافت‌های شنی و رسی در پژوهش حاضر با آزمایش مورگان (۲۰۰۱) باشد. با افزایش شدت بارش از ۱۰ تا ۴۰ میلی‌متر بر ساعت، مقدار فرسایش پاشمانی افزایش یافت که این نتایج با یافته‌های سایر پژوهشگران (۳، ۹ و ۱۱) که بیانگر افزایش فرسایش پاشمانی با افزایش شدت باران بود مطابقت داشت (شکل ۴). افزایش شدت بارش و به دنبال آن تغییرات پاشمان در چهار شدت بارش تعیین و نتایج برای رطوبت‌ها و بافت‌های متفاوت در شکل ۴ نشان داده شده است. به‌طور میانگین در حالت هوا خشک در خاک رسی و شنی به‌ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین پاشمان مشاهده شد. این نتایج با یافته‌های واعظی و همکاران (۲۰۱۵) مطابقت داشت آن‌ها بیان داشتند که با افزایش درصد رس و سیلت خاک‌ها، مقدار پاشمان به‌دلیل کوچک بودن این ذرات و امکان پراکنش آسان آن‌ها افزایش می‌یابد. با افزایش محتوای رطوبت پیشین در خاک شنی تغییرات قابل‌توجهی در مقدار پاشمان مشاهده نشد. با این وجود در خاک رسی در حالت هوا خشک بیش‌ترین پاشمان مشاهده شد و با افزایش محتوای رطوبت پیشین فرسایش پاشمانی کاهش یافت (شکل ۳). این نتایج با یافته‌های ترومن و برادفورد (۱۹۹۰) مطابقت داشت آن‌ها نشان دادند که با افزایش رطوبت خاک از حالت هوا خشک به

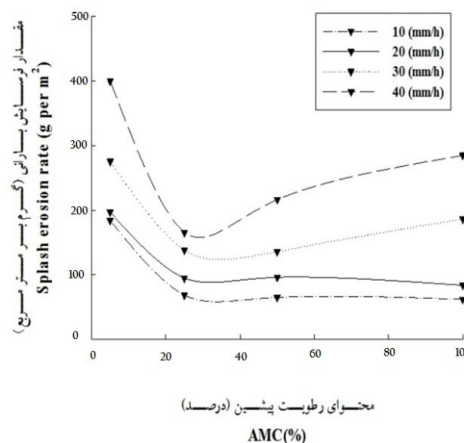
اشباع فرسایش پاشمانی خاک لوم‌رسی و رسی کاهش یافت. دلیل کاهش فرسایش پاشمانی خاک رسی با افزایش محتوای رطوبت پیشین ممکن است به برهم‌کنش‌های نیروهای هم‌چسبی و دگرچسبی به‌علاوه انبساط غیریکنواخت ذرات مربوط باشد و این گونه بیان داشت، زمانی که خاک رسی در حالت هوا خشک در معرض برخورد قطرات باران قرار گرفتند به‌دلیل ماهیت ذرات خود به سرعت تخریب ساختمان رخ داده است (۱۳). علاوه بر این به‌دلیل خشک بودن ذرات خاک رسی نیروهای هم‌چسبی و دگرچسبی در پایین‌ترین مقدار خود قرار داشته‌اند. با این وجود خاک شنی به‌دلیل فقدان ویژگی انقباض و انبساط ذرات و نداشتن ساختمان، تغییر رطوبت تأثیر کمی بر تغییر رفتار ذرات در برابر ضربه قطرات باران نشان داد. همچنین ممکن است در مورد خاک رسی با افزایش رطوبت (شکل ۴ رطوبت ۲۵ درصد اشباع) پدیده انبساط غیریکنواخت ذرات کاهش یافته و نیروهای هم‌چسبی و دگرچسبی در سطح بالاتری نسبت به حالت هوا خشک قرار داشته باشند. بنابراین ضربه قطرات باران مقدار کم‌تری از ذرات خاک را جدا و پراکنده کرده است (شکل ۴ الف). با این وجود در مورد خاک شنی تغییر رطوبت تأثیر چندانی بر مقدار پاشمان نداشت (شکل ۴ ج) که این نتایج با یافته‌های واتانگ و همکاران (۱۹۹۶) مطابقت داشت آن‌ها فرسایش پاشمانی یک خاک اکسی‌سویل (خاک درشت‌بافت) را در دو حالت هوا خشک و مرطوب بررسی کردند و نشان دادند که رطوبت پیشین خاک تأثیری بر مقدار پاشمان ندارد. خاک سیلتی در بین این سه بافت بیش‌ترین مقدار پاشمان را با افزایش رطوبت نشان داد (شکل ۴ ب). در مجموع با توجه به نتایج، در یک شدت بارش ثابت اندازه ذرات بیش‌ترین تأثیر را بر مقدار پاشمان ناشی از قطرات باران نشان داد (شکل‌های ۴ و ۵). از Dg به‌عنوان ویژگی کمی برای

همان‌گونه که در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است این روند برای همه بافت‌های مورد پژوهش صادق نبود. در خاک سیلتی با افزایش محتوای رطوبت پیشین، مقدار پاشمان تا رطوبت ۵۰ درصد اشباع روندی افزایشی نشان داد و سپس کاهش یافت. محدود بودن آزمایش‌های برادفورد و ترومن (۱۹۹۱) و لیو و همکاران (۲۰۱۱) از نظر تعداد بافت‌ها و سطوح رطوبتی، ممکن است دلیل تفاوت نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های این پژوهشگران باشد.

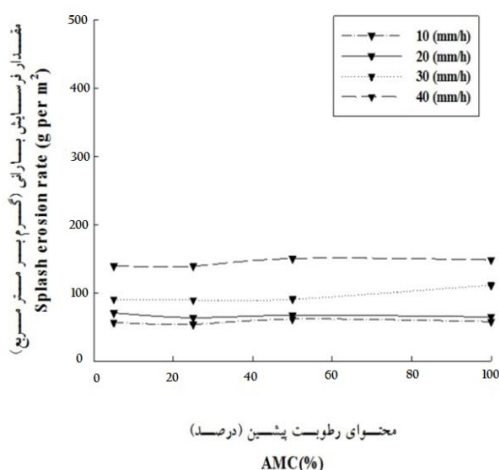
توصیف توزیع اندازه ذرات خاک برای ارزیابی فرسایش پاشمانی خاک‌ها استفاده شد. تأثیر محتوای رطوبت پیشین بر فرسایش پاشمانی در خاک با $Dg=0/773$ (میلی‌متر) کم‌تر بود. در حالی‌که این تأثیر در خاک با Dg کوچک‌تر (میلی‌متر) $Dg=0/02$ آشکارتر بود (جدول ۱). در پژوهش‌های برادفورد و ترومن (۱۹۹۱) و لیو و همکاران (۲۰۱۱) بیان داشتند که با افزایش محتوای رطوبت پیشین خاک، فرسایش پاشمانی کاهش می‌یابد. با این وجود



(ب) B



(الف) A



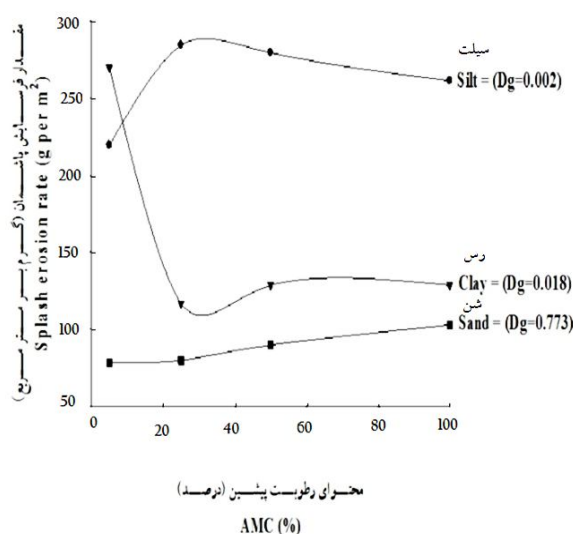
(ج) C

شکل ۴- فرسایش پاشمانی تحت تأثیر محتوای رطوبت پیشین در رس (الف)، سیلت (ب) و شن (ج).

Figure 4. Splash erosion in relation to AMC in clay (a), silt (b) and sand (c).

با Dg پایین‌تر (خاک سیلت) فرسایش پاشمانی بالاتری را در حالت مرطوب نشان دادند. به‌طور کلی مشاهده شد جرم مخصوص ظاهری ویژگی مناسب خاک برای توصیف فرسایش پاشمانی نبود. شاخص قطر هندسی اندازه ذرات معرفی مناسب برای بیان تغییرات فرسایش پاشمانی در بافت‌ها بود. خاک با بافت رس (میلی‌متر $Dg=0/018$) پاشمان کم‌تر و خاک با بافت سیلت (میلی‌متر $Dg=0/002$) پاشمان بالاتری را در حالت مرطوب نشان دادند. به‌علاوه مشاهده شد که برای خاک سیلت و رس در حالت هوا خشک جرم مخصوص ظاهری کنترل‌کننده مقدار پاشمان در برابر ضربه قطرات باران بود و هنگامی که AMC خاک افزایش یافت Dg نسبت به جرم مخصوص ظاهری در تفسیر نتایج به‌دست آمده در حالت مرطوب در بافت‌ها نقش بارزتری از خود نشان داد. اگرچه تغییر AMC در شدت بارش میانگین (شکل ۴) موجب تغییرات زیاد در فرسایش پاشمانی خاک سیلتی و رسی شد با این وجود تأثیر آن بر تغییرات پاشمان خاک با بافت شن کم‌تر بود. ترتیب افزایش مقدار پاشمان بافت‌ها در حالت مرطوب با افزایش Dg رابطه عکس نشان داد. هرچه Dg ذرات افزایش یافت مقدار پاشمان خاک کاهش نشان داد (شکل ۵).

شکل ۵ میانگین پاشمان تحت تأثیر رطوبت پیشین در سه بافت مختلف را نشان می‌دهد. با افزایش محتوای رطوبتی در خاک رسی (میلی‌متر $Dg=0/018$)، مقدار فرسایش پاشمانی کاهش یافت. این نتایج با یافته‌های دفرشا و ملس (۲۰۱۲) مطابقت داشت آن‌ها نشان دادند که فرسایش پاشمانی خاک رسی و لومی‌رسی‌شنی در حالت اشباع به‌صورت خطی و تا یک‌سوم نسبت به حالت هوا خشک کاهش می‌یابد. خاک با بافت شنی (میلی‌متر $Dg=0/0773$) نسبت به بافت رس و سیلت میانگین پاشمان کم‌تری را نشان داد دلیل این موضوع شاید به سبب جرم مخصوص بالاتر ذرات شن بوده باشد، زیرا برای جابه‌جایی این ذرات انرژی جنبشی بالاتری نسبت به دیگر ذرات نیاز است (۱۱). خاک سیلتی (میلی‌متر $Dg=0/002$) علی‌رغم داشتن جرم مخصوص بالاتر نسبت به خاک رسی با افزایش AMC فرسایش بالاتری از خاک رس را نشان داد دلیل این تفاوت ممکن است بدین‌علت باشد که نیروهای هم‌چسپی و دگرچسپی ذرات در خاک سیلتی نسبت به خاک رسی در سطح پایین‌تری قرار دارند. به‌علاوه برآیند نیروهای هم‌چسپی و دگرچسپی ذرات در خاک سیلتی با افزایش رطوبت خاک روند کاهشی را نشان می‌دهد (۱۲). بافت‌های با Dg بالاتر فرسایش پاشمانی کم‌تر و بافت‌های



شکل ۵- تغییرات فرسایش پاشمانی در شدت بارش میانگین برای بافت‌های مختلف خاک با محتوای رطوبتی پیشین متفاوت.

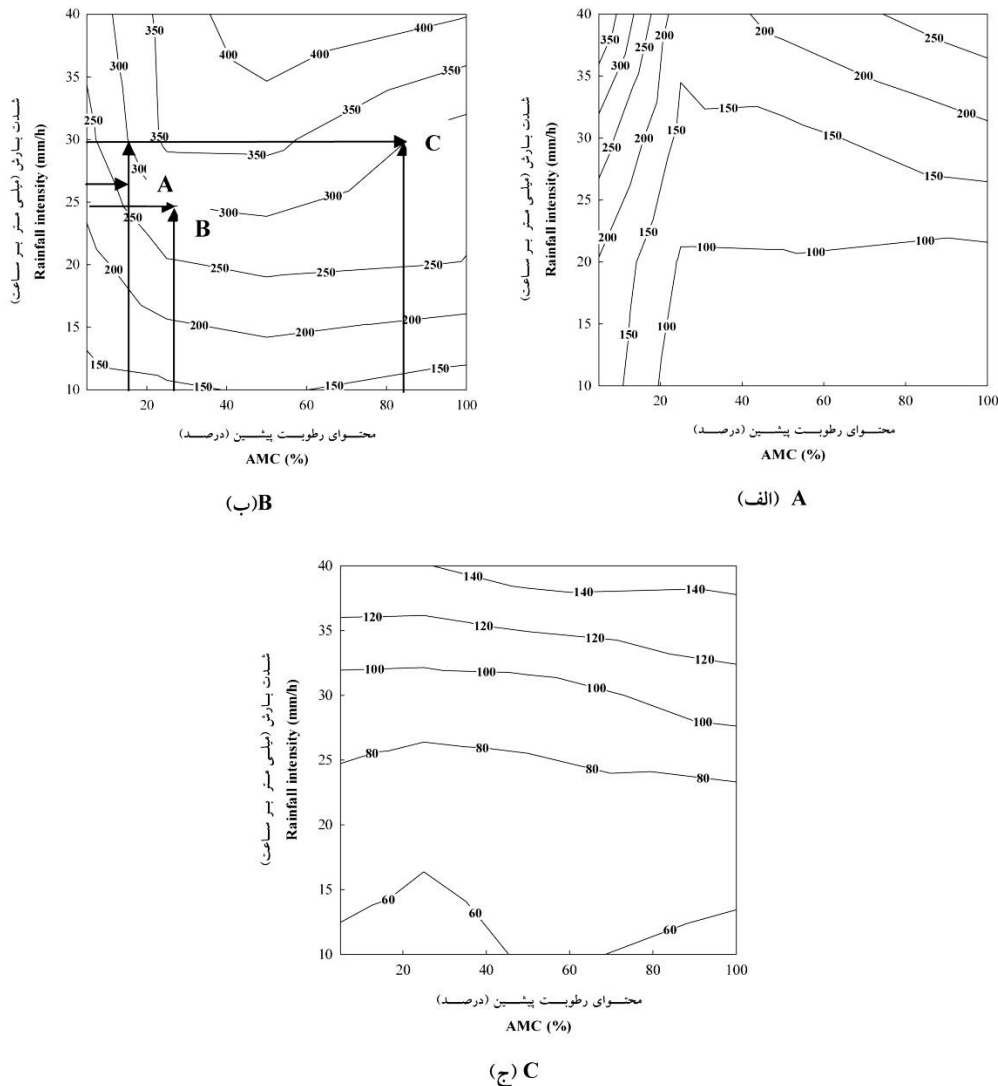
Figure 5. Variations of splash erosion in mean rainfall intensity for different soil textures and varied antecedent moisture content.

و ۸۵ درصد AMC برای وقوع این مقدار خاک پاشمان یافته پیش‌بینی شد. این ترکیب از شدت بارش و رطوبت ذکر شده ممکن است به برهم‌کنش‌های نیروهای تشدیدکننده و مقاومت‌کننده در برابر عامل فرساینده مربوط باشد و این گونه توجیه نمود که در رطوبت‌های پایین یا همان نقطه A به دلیل ایجاد یک لایه ترکیبی از هوا و رطوبت برآیند نیروهای هم‌چسبی و دگرچسبی به‌گونه‌ای بوده است که ذرات خاک با قدرت بیشتری در کنار یکدیگر نگه داشته شده‌اند (۱۰) و با افزایش مقدار رطوبت خاک برآیند این نیروها به‌گونه‌ای تغییر کرده است که ذرات خاک با شدت بارش کم‌تر و به‌عبارتی با انرژی فرساینده کوچک‌تری (نقطه B) از یکدیگر جدا می‌شوند (۱۲). این نتایج با یافته‌های لیو و همکاران (۲۰۱۱) که بیان داشتند افزایش رطوبت خاک منجر به افزایش پاشمان خاک می‌شود، مطابقت داشت. در ادامه با افزایش رطوبت همان‌طور که در نقطه C شکل (۶) نشان داده شده است مقدار انرژی لازم برای جدا کردن ذرات خاک افزایش می‌یابد. دلیل این تغییر ممکن است

فرسایش پاشمانی برای سایر شدت‌های باران و سطوح رطوبت پیشین در بافت‌های خاک: فرسایش پاشمانی برای سایر سطوح شدت باران و محتوای رطوبتی پیشین از برآزش نمودارهای دوبعدی بر داده‌های فرسایش پاشمان هر بافت حاصل شد. از اتصال نقاط با فرسایش پاشمانی برابر خطوط هم‌پاشمان به‌دست آمد (شکل ۶). شکل‌های دوبعدی (شکل ۶) تغییرات فرسایش پاشمانی از حالت هوا خشک تا اشباع کامل و از بارش با شدت ۱۰ تا ۴۰ میلی‌متر در ساعت را پوشش می‌دهند. به‌عنوان مثال در شکل (۶ ب) مربوط به خاک سیلتی خط مقدار پاشمان ۲۵ گرم خاک از ترکیب حالت‌های متفاوتی از شدت بارش و AMC تشکیل یافته است که با سه نقطه A، B و C نشان داده شده است. برای تولید ۳۰۰ گرم رسوب به مدت ۱۵ دقیقه (مدت زمان اعمال شدت‌های بارش) در یک خاک سیلتی ترکیب‌های از ۱- شدت ۳۰ میلی‌متر بر ساعت بارش و ۱۰ درصد AMC ۲- شدت ۲۵ میلی‌متر بر ساعت بارش و ۳۰ درصد AMC ۳- شدت ۳۰ میلی‌متر بر ساعت بارش

است (۱۰) و مقدار جدا شدن ذرات خاک در اثر اصابت قطرات باران را کاهش داده است.

به واسطه ایجاد یک لایه نازک آب بر سطح ذرات خاک بوده باشد که این لایه نازک آب به عنوان یک سپر حفاظتی طبیعی در برابر قطرات باران عمل کرده



شکل ۶- مقدار فرسایش پاشمانی برای شدت‌های باران و میزان رطوبت‌های پیشین به‌طور پیوسته در خاک رس (الف)، سیلت (ب) و شن (ج) (خطوط نشان‌دهنده مقدار پاشمان خاک است).

Figure 6. The splash erosion rate continuously for rainfall intensities and antecedent moisture contents in clay (a), silt (b) and sand (c) (contour lines show the amount of soil splash).

پاشمان ذرات در خاک سیلتی و کم‌ترین آن در خاک شنی مشاهده شد. نبود چسبندگی قوی بین ذرات سیلت از یک طرف و قابلیت انتقال آسان‌تر آن‌ها از سوی دیگر موجب شد در بافت سیلتی بر خلاف دو

نتیجه‌گیری کلی

پژوهش حاضر نشان داد که بافت خاک، محتوای رطوبت پیشین و شدت باران هر کدام به‌طور جداگانه بر فرسایش پاشمانی مؤثر بودند. بیش‌ترین مقدار

می‌باشد. الگوی تأثیر شدت باران بر افزایش فرسایش پاشمانی با افزایش رطوبت پیشین در سه بافت مورد پژوهش مشابه بود. این نتیجه بیانگر نقش مهم شدت باران در تمام بافت‌های خاک در فرسایش پاشمانی می‌باشد به طوری که با افزایش شدت باران در هر سه بافت، مقدار فرسایش پاشمانی افزایش یافت. به طور کلی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که خاک سیلتی، حساس‌ترین بافت از نظر پدیده پاشمان است. این بافت به ویژه در شرایطی که رطوبت پیشین بالاتری داشته و تحت باران شدید قرار گیرد بیش‌ترین مقدار پاشمان را ایجاد می‌کند. در مقابل خاک شنی بیش‌ترین مقاومت را در برابر فرسایش پاشمانی نشان می‌دهد و حساسیت آن به پاشمان با افزایش رطوبت پیشین یا افزایش شدت بارندگی کم‌ترین است. بدین ترتیب می‌توان برای هر خاک مورد پژوهش دیاگرامی برای پیش‌بینی فرسایش پاشمانی بر اساس رطوبت پیشین و شدت باران مورد نظر ترسیم و مورد استفاده قرار داد.

بافت دیگر، شدت فرسایش پاشمانی بالا باشد. با افزایش شدت بارندگی، مقدار فرسایش پاشمانی تحت تأثیر قرار گرفت و به شدت افزایش یافت. اگرچه رطوبت پیشین خاک نیز عاملی مؤثر بر مقدار فرسایش پاشمانی بود ولی فرسایش پاشمانی روند کاهشی مشخصی با افزایش رطوبت پیشین نشان نداد. بیش‌ترین مقدار پاشمان در رطوبت هوا خشک و کم‌ترین آن در رطوبت اشباع مشاهده شد. نقش رطوبت پیشین بر فرسایش پاشمانی در خاک‌های مختلف متفاوت بود. کم‌ترین تأثیر رطوبت پیشین بر فرسایش پاشمانی در خاک شنی مشاهده شد. این نتیجه بیانگر آن است که پاشمان‌پذیری ذرات درشت عمدتاً تحت تأثیر ماهیت ذره قرار دارد. در خاک رسی با افزایش محتوای رطوبتی پیشین، مقدار پاشمان روندی تقریباً کاهشی را نشان داد در حالی که در خاک سیلتی روندی افزایشی مشاهده شد. این نتیجه به دلیل افزایش چسبندگی ذرات خاک رسی و کاهش چسبندگی ذرات خاک سیلتی با افزایش رطوبت

منابع

1. Angulo-Martinez, M., Begueria, S., Navas, A., and Machin, J. 2012. Splash erosion under natural rainfall on three soil types in NE Spain. *Geomorphology*. 38: 44. 175-176.
2. Assouline, S., and Ben-Hur, M. 2006. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing. *Catena*. 66: 211-220.
3. Darvishan, A.V., Dadeghi, S., Homaei, M., and Arabkhedri, M. 2015. Affectability of runoff threshold and coefficient from rainfall intensity and antecedent soil moisture content in laboratorial erosion plots. *Iran. Water Res. J.* 8: 15. 41-49. (In Persian)
4. 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: 4752.
5. Ellison, W.D. 1944. Studies of raindrop erosion. *Agricultural Engineering*. 25: 131-136.
6. Froese, J.C., Cruse, R.M., and Ghaffarzadeh, M. 1999. Erosion mechanics of soils with an impermeable subsurface layer. *Soil Science Soc. Amer. J.* 63: 1836-1841.
7. Hudson, N. 1995. *Soil conservation*. No. 3. Ed. BT Batsford.
8. Joanes, D.N., and Gill, C.A. 1998. Comparing measures of sample skewness and kurtosis. *J. Royal Stat. Soc. Series D (The Statistician)*. 47: 1. 183-189.
9. Kiani Harchegani, M., Sadeghi, H.R., and Asadi, H. 2015. Comparative Analysis of the Effects of Rainfall Intensity and Experimental Plot Slope on Raindrop Impact Induced Erosion (RIIE). *Iran. J. Soil Water Res.* 46: 4. 631-640. (In Persian)

10. Kinnell, P.I.A. 2005. Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: a Review. *Hydrological Process*. 19: 2815-2844.
11. Lado, M., Ben-Hur, M., and Shainberg, I. 2004. Soil wetting and texture effects on aggregate stability, seal formation and erosion. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 68: 6. 1992-1999.
12. Lal, R. 1994. Soil erosion research methods. CRC Press. Landforms. 3: 295-299.
13. Liu, H., Lei, T.W., Zhao, J., Yuan, C.P., Fan, Y.T., and Qu, L.Q. 2011. Effects of rainfall intensity and antecedent soil water content on soil infiltrability under rainfall conditions using the run off-on-out method. *J. Hydrol.* 396: 1. 24-32.
14. Mamedov, A.I., Huang, C., and Levy, G.J. 2006. Antecedent moisture content and aging duration effects on seal formation and erosion in smectitic soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 70: 3. 832-843.
15. Morgan, R. 1978. Field studies of rainsplash erosion. *Earth Surface. Process*. 3: 295-299.
16. Morgan, R.P.C. 2001. A simple approach to soil loss prediction: a revised Morgan- Morgan-Finney model. *Catena*. 44: 4. 305-322.
17. Morgan, R.P.C., Quinton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J.W.A., Auerswald, K., Chischi, G., Torri, D., and Styczen, M.E. 1998. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*. 23: 527-44.
18. Norusis, M.J. 2011. SPSS for Windows. Base System User's Guide, Release 7.5. Chicago.
19. Page, A.L., Miller, R.H., and Jeeney, D.R. 1992. Methods of soil analysis, part 2. Chemical and Mineralogical Properties. SSSA Pub., Madison, 1159p.
20. Qinjuan, C., Qiangguo, C.A.I., and Wenjun, M.A. 2008. Comparative study on rain splash erosion of representative soils in china. *China Geography Science*. 18: 2. 155-161.
21. Quansah, C. 1981. The effect of soil type, slope, rain intensity and their interactions on splash detachment and transport. *J. Soil Sci.* 32: 2. 215-224.
22. Rafahi, H.GH. 2013. Water erosion and conservation. Tehran University Press, 674p. (In Persian)
23. Rousseau, P., Jolivet, V., and Ghazanfarpour, D. 2006. Realistic real-time rain rendering. *Computers and Graphics*. 30: 507-518.
24. Salles, C., Poesen, J., and Sempere-Torres, D. 2002. Kinetic energy of rain and its functional relationship with intensity. *J. Hydrol.* 257: 256-270.
25. SAS Institute. 2014. SAS, version 9.4 ed. SAS Institute, Cary, NC.
26. Sempere Torres, D., Porrà, J.M., and Creutin, J.D. 1994. A general formulation for raindrop Size distribution. *J. Appl. Meteorol.* 33: 1494-1502.
27. Shirazi, M.A., and Boersma, L. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 48: 1. 142-147.
28. Soil Survey Staff. 2014. Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 51, Version 2.0. R. Burt and Soil Survey Staff (Ed.). U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
29. Systat Software. 2012. SigmaPlot 12.0 user's manual. Systat Software, Point Richmond, CA.
30. Truman, C.C., and Bradford, J.M. 1990. Effect of antecedent soil moisture on splash detachment under simulated rainfall. *Soil Science*. 150: 5. 787-798.
31. Vaezi, A., Akbari, S., and Mohamadi, M. 2015. Study of rainfall processes in calcareous soils aggregates under laboratory conditions in NW Zanjan, Iran. *Iran. J. Soil Water Res.* 45: 1. 87-94. (In Persian)
32. Van Dijk, A.I.J.M., Bruijnzeel, L.A., and Wiegman, S.E. 2003. Measurements of rain splash on bench terraces in a humid tropical steepland environment. *Hydrological Processes*. 17: 513-535.
33. Wakiyama, Y., Onda, Y., Nanko, K., Mizugaki, S., Kim, Y., Kitahara, H., and Ono, H. 2010. Estimation of temporal variation in splash detachment in two Japanese cypress plantations of contrasting age. *Earth Surf. Process. Landforms*. 35: 9. 993-1005.

34. Walkly, A., and Black, I.A. 1934. An examination of digestion methods for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic and titration. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 37: 38-29.
35. Watung, R.L., Sutherland, R.A., and Swaify, S.A. 1996. Influence of rainfall energy flux density and antecedent soil moisture content on splash transport and aggregate enrichment ratios for a Hawaiian Oxisol. *Soil Technology*. 9: 251-272.
36. Wei, H., Nearing, M.A., Stone, J.J., Guertin, D.P., Spaeth, K.E., Pierson, F.B., Nichols, M.H., and Moffett, C.A. 2008. A new splash and sheet erosion equation for rangelands. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 73: 1386-1392.
37. Wuddivira, M.N., Stone, R.J., and Ekwue, E.I. 2009. Clay, organic matter and wetting effects on splash detachment and aggregate breakdown under intense rainfall. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 73: 1. 226-232.
38. Yusefi, A., Farrokhian Firouzi, A., and Khalili Moghaddm, B. 2015. Experimental investigation of the aggregate breakdown and splash erosion in different conditions duration and rainfall intensity in selected soil of Dashtegol watershed of Masjed Soleyman. *J. Water Soil Cons.* 22: 2. 175-188. (In Persian)



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 24(2), 2017
<http://jwsc.gau.ac.ir>

The susceptibility of different texture soils to splash erosion under different rainfall intensity and antecedent water content

***A. Baliani¹ and A.R. Vaezi²**

¹Ph.D. Student, Dept. of Soil Science, University of Zanjan,

²Associate Prof., Dept. of Soil Science, University of Zanjan

Received: 03/17/2016; Accepted: 07/18/2017

Abstract

Background and Objectives: Splash erosion is recognized as the first stage in a soil erosion process and results from the soil surface bombing by rain drops. Splash erosion is a complex process including the detachment of soil particles by raindrops followed by splash transport of a part of the detached particles. Quantification of splash erosion in the soils with different textures for various combinations of rainfall intensities and antecedent moisture content (AMC) is essential to understand splash erosion processes. The investigation on the splash erosion in the field is often expensive and time-consuming. Rainfall simulation has been used extensively as a cost effective method for soil erosion prediction across a lot of related factors. This study was conducted to investigate splash erosion in relation to rainfall intensity and AMC in different soil textures using the simulated rainfalls.

Materials and Methods: Splash erosion was measured in three soil textural classes (sand, silt and clay) and four AMC (from air-dried to saturation conditions) using the four simulated rainfalls (10, 20, 30 and 40 mm h⁻¹ in intensity). Forty-eight experimental units were designed at three replicates and analyzed using the factorial experiment in the completely randomized design. The experimental units were splash boxes with 25 cm × 35 cm dimensions and 5-cm depth. Splash erosion was determined using the accumulation of splashed particles during each rainfall and accordingly drying in 105 °C for 24-h. The physicochemical soil properties were determined using the conventional methods in the laboratory. Splash erosion data were analyzed using the Duncan parametric test for comparison of the effects of soil texture, rainfall intensity and, AMC on the splash erosion. Data were analyzed using the SAS 9.4 software and the diagrams were delineated using the SigmaPlot software.

Results: Significant differences were found in the splash erosion among the soil textures (P<0.001), AMC (P<0.001) and rainfall intensity (P<0.001). Silt showed the highest splash erosion (average value 257.2 g/m²) which was related to easy detachment of silt particles and readily transport by returned raindrops. Sand was the most resistant soil texture to splash erosion. Splash erosion in sand soil varied from 35.43 to 152.70 g per m². There were significant differences interactions between soil texture and rainfall intensity (P<0.001), soil texture and AMC (P<0.001), rainfall intensity and AMC (P<0.001). Splash erosion was positively affected by the rainfall intensity. Silt showed the highest susceptibility the splash erosion with increasing rainfall intensity. Different results were observed for AMC among the soil textures in the splash erosion. With an increase in AMC, splash erosion in the silt significantly increased, while clay showed a negative trend with increasing AMC. Sand didn't show an obvious difference in the splash erosion with increasing AMC. Splash erosion was significantly affected by the interactions of three variables (soil texture, rainfall intensity and AMC). The highest splash (441.20 g per m²) erosion was observed in Silt for AMC with 50% saturated point under the rainfall intensity of 40 mm h⁻¹. Sand showed the lowest splash (35.43 g per m²) erosion for AMC with 5% saturated point under 10 mm h⁻¹ rainfall intensity.

Conclusion: Results of this study indicated that Silt is the most susceptible soil texture to splash erosion. Also, variations of splash erosion in silt texture were larger than other textures. Splash erosion of each soil could be reliably predicted based on the rainfall intensity and antecedent water content.

Keywords: Soil splash, Soil particles distribution, Soil surface properties, Geometric particle-size diameter

* Corresponding Author; Email: alibaliani63@gmail.com

