

بررسی ارتباط فرآیندهای فرسایش بارانی با درصد شیب و محتوای رطوبتی پیشین در خاک‌های منطقه نیمه خشک

علی بلیانی^{*۱} - علیرضا واعظی^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۱۱

چکیده

فرسایش بارانی نقشی مهم در تخریب خاک سطحی به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک ایفاء می کند. فرسایش ناشی از قطرات باران عامل عمده تخریب خاک مانند تراکم و مقاومت خاک و هدررفت خاک سطحی است. این پژوهش به منظور ارزیابی اثرات فرسایش بارانی بر هدررفت پاشمانی خاک، تراکم خاک و مقاومت سطح خاک تحت تأثیر درجه شیب و محتوای رطوبت پیشین در خاک‌های مختلف انجام شد. در این راستا شش نوع بافت خاک (رس، سیلت، لوم رسی، لوم سیلتی، لوم سنی و شن) در معرض بارانی با شدت ۴۰ میلی متر بر ساعت به مدت ۱۵ دقیقه در چهار درجه شیب (صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) و چهار سطح محتوای رطوبت پیشین (هواخشک، یک چهارم اشباع، نیمه اشباع و اشباع) قرار گرفت. مجموعاً تعداد ۲۸۸ جعبه خاک به ابعاد ۳۵ سانتی متر × ۲۵ سانتی متر با آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تفاوت معنی داری ($p < 0.01$) بین خاک‌ها از نظر مقدار فرسایش پاشمان، تراکم خاک و مقاومت سطح وجود داشت. در میان شش بافت خاک مورد پژوهش، خاک با بافت سیلت بالاترین میانگین فرسایش پاشمان (۱۵۷۴/۹۳ گرم بر متر مربع بر ساعت)، تراکم خاک (۱۷/۴۳ درصد) و نسبت مقاومت خاک (۱۰/۵۳ بدون بعد) را داشت و خاک با بافت شن کمترین میانگین فرسایش پاشمان (۴۳۷/۳۷ گرم بر متر مربع بر ساعت)، تراکم خاک (۰/۲۵ درصد) و نسبت مقاومت خاک (۲/۶۶ بدون بعد) را نشان داد. همچنین همبستگی معنی داری بین فرسایش پاشمان، تراکم خاک و نسبت مقاومت خاک با برخی ویژگی‌های خاک شامل درصد شن، درصد سیلت، میانگین هندسی قطر ذرات، چگالی ظاهری، هدایت هیدرولیکی اشباع و کربنات کلسیم معادل مشاهده شد. نتایج این پژوهش می تواند در مدیریت منابع آب و خاک به ویژه در اراضی شیب دار با خاک‌های حساس به فرسایش ناشی از قطرات باران استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: تراکم خاک، درجه شیب، رطوبت خاک، فرسایش پاشمان، نسبت مقاومت سطح خاک

مقدمه

تراکم خاک به کار برده شده است. مقاومت سطح خاک با استفاده از فروسنج^۴ (وسیله‌ای جهت تعیین مقاومت خاک در برابر نفوذ بر حسب مگاپاسکال یا کیلوپاسکال) قابل تعیین است. این ویژگی خاک دارای تغییرات مکانی است و با تغییر مقدار رطوبت خاک تغییر می کند (۲). هدررفت خاک در اثر فرسایش بارانی، تراکم خاک^۵ و مقاومت خاک‌ها از طریق هدررفت عناصر غذایی و مقاومت سطح خاک در برابر ریشه دوانی گیاهان موجب افت کمی و کیفی حاصلخیزی و باروری خاک‌ها می شوند و در نتیجه امنیت غذایی^۶ جهان را به شدت به خطر می اندازند (۱۶). شدت و ضعف وقوع این عوامل تحت تأثیر برخورد قطرات باران به شیب اراضی، محتوای رطوبت پیشین خاک‌ها و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ذاتی خاک‌ها مرتبط می باشند و در

فرسایش بارانی یا فرسایش ناشی از قطرات باران^۳ شامل برخورد قطرات باران، پاشمان ذرات خاک و تشکیل چاله‌هایی در سطح خاک می باشد (۸). فرسایش بارانی شامل فرآیندهای مختلفی مانند تخریب خاک دانه‌ها، تراکم خاک و پاشمان ذرات است (۳۴) که به نوبه خود به ویژگی‌های خاک از جمله پایداری خاک دانه‌ها وابسته است (۳۵). تراکم خاک بیانگر تفاوت بین چگالی ظاهری اولیه و چگالی ظاهری ثانویه خاک در اثر تراکم است (۲۷). مقاومت سطح خاک در برابر فروسنج در بسیاری از پژوهش‌ها به عنوان ابزاری جهت توصیف

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

(* - نویسنده مسئول)

(Email: alibaliani63@gmail.com)

DOI: 10.22067/jsw.v32i5.70295

3- Raindrop-impact-induced erosion

4- Penetrometer

5- Soil compaction

6- Food security

دادند که مقدار فرسایش بارانی با افزایش درصد شیب افزایش یافت و با افزایش ماده آلی نفوذپذیری افزایش و مقدار رواناب و هدررفت خاک در تمام انواع خاک‌ها و شیب‌های مختلف کاهش یافت.

در خصوص تأثیر درصد شیب و محتوای رطوبت پیشین بر مقاومت سطح خاک و تراکم خاک ناشی از فرسایش بارانی پژوهش‌های اندکی گزارش شده است و گزارش‌های موجود نیز به طور عمده در خصوص تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها بر مقاومت سطح خاک و تراکم خاک می‌باشد (۵ و ۲۹). در این راستا آسولاین و همکاران (۱) تراکم‌پذیری دو خاک اکسی‌سول را بررسی کردند و بیان داشتند که بافت خاک، اسیدیته، ظرفیت تبادل کاتیونی و ماده آلی خاک باعث تفاوت در تراکم‌پذیری خاک می‌شود. یوتست و همکاران (۳۲) مقاومت خاک فرسوسول را قبل و ۲۴ ساعت بعد از آبیاری بررسی کردند و بیان داشتند مقاومت به فروروی ارتباط قوی با مقدار آب خاک دارد. به علاوه بیان داشتند مقاومت سطح خاک با چگالی ظاهری همبستگی معنی‌داری نداشت. اسمیت و همکاران (۲۶) اثر تراکم و ویژگی‌های فیزیکی خاک را بر روی مقاومت خاک به نفوذپذیری ۲۹ خاک جنگلی آفریقای جنوبی محدوده بافتی ۸ تا ۶۶ درصد رس و ۰/۲۶ تا ۵/۷۷ درصد مقدار کربن آلی خاک را بررسی کردند و بیان داشتند مقدار کربن آلی و رس بر روابط مقدار آب-تراکم-مقاومت به فروروی اثرگذار بود و اثر کربن آلی روی روابط مقدار آب-تراکم-مقاومت به فروروی در خاک‌های ریز بافت (< ۳۰ درصد رس + سیلت) ناچیز بود. دیاز-زوریت و گروسو (۶) اثر بافت خاک، کربن آلی و مقدار رطوبت را بر روی تراکم‌پذیری خاک‌های با بافت شن لومی، لوم و لوم سیلتی با متراکم نمودن نمونه‌ها توسط ضربات چکش بررسی کردند و بیان داشتند خاک‌های با مقدار رطوبت و ماده آلی بالاتر تراکم‌پذیری کم‌تری داشتند.

خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک اغلب با پوشش گیاهی ضعیف و یا بدون پوشش سطحی هستند و به سبب کمبود ماده آلی خاک، کربنات کلسیم معادل بالا و ناپایداری ساختمان خاک، مقاومت اندکی در برابر ضربه قطرات باران دارند. از این رو میزان فرسایش بارانی، مقاومت سطح خاک و درصد تراکم در خاک‌های این مناطق بیش‌تر است (۳۱). به طور کلی در پژوهش‌های پیشین، تغییرات فرسایش ناشی از قطرات باران، تراکم خاک و مقاومت سطح به طور همزمان در خاک‌های با بافت مختلف مورد بررسی قرار نگرفته است همچنین اطلاعات اندکی در مورد ارتباط این فرآیندها با درجه شیب و محتوای رطوبتی در خاک‌های منطقه نیمه‌خشک وجود دارد. با توجه به نقش تخریبی باران در خاک‌های مناطق نیمه‌خشک، این پژوهش با هدف بررسی تأثیر شیب سطح و رطوبت خاک بر مقدار فرسایش پاشمانی، درصد تراکم و مقاومت سطح خاک در برخی خاک‌های منطقه نیمه‌خشک انجام گرفت. همچنین ارتباط بین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک با مقدار فرسایش پاشمانی، درصد تراکم و

خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک که سطح خاک‌ها به طور عمده بدون پوشش گیاهی هستند با شدت بالاتری رخ می‌دهند (۱۱، ۱۲ و ۱۸).

پژوهش‌های بسیاری بر روی اثرات شیب سطح و رطوبت پیشین خاک بر فرسایش ناشی از قطرات باران انجام گرفته است. در این زمینه ویو و همکاران (۳۹) اثرات شدت فرسایش (بدون فرسایش، فرسایش متوسط، فرسایش شدید و فرسایش خیلی شدید) و شدت باران را بر فرآیندهای فرسایش خاک شامل تولید رسوب و رواناب بررسی کردند و گزارش کردند مقدار رسوب تولید شده همبستگی مثبت معنی‌دار با مقدار سیلت و رس دارند و همچنین چگالی ظاهری همبستگی منفی معنی‌دار با مقدار رسوب و رواناب تولیدی دارند. ودیویرا و همکاران (۴۰) اثرات رس، ماده آلی و شدت خیس شدن و رطوبت پیشین خاک را بر روی جداسازی پاشمانی و تخریب خاک‌دانه بررسی کردند و بیان داشتند شکستن خاک‌دانه و جداسازی ذرات خاک به صورت پاشمان با ماده آلی و رس رابطه منفی دارد. رضایی‌پاشا و همکاران (۲۲) فرسایش پاشمانی را با استفاده از شبیه‌ساز باران و کاسه پاشمان و ارتباط آن با ویژگی‌های خاک در سه کاربری جنگل، کشاورزی و مرتع بررسی کردند و بیان داشتند که درصد سیلت در کاربری کشاورزی دارای همبستگی مثبت معنی‌دار و ماده آلی در کاربری مرتع دارای همبستگی منفی معنی‌دار با نرخ پاشمان بود. ویو و همکاران (۳۸) فرسایش پاشمان مخلوط شن و رس را بررسی کردند و نشان دادند فرسایش پاشمان به طور معنی‌داری تحت تأثیر توزیع اندازه ذرات بود به علاوه بیان داشتند فرسایش پاشمان در حالت خشک بیش از حالت مرطوب بود و با چسبندگی خاک ارتباط منفی داشت. درویشان و همکاران (۳) تأثیرپذیری ضریب رواناب از شدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک را در خاک با بافت شن لومی در شدت‌های باران ۳۰ تا ۶۰ میلی‌متر بر ساعت به مدت ۱۰ تا ۱۵ دقیقه بررسی کردند و بیان داشتند ضریب رواناب با شدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک رابطه معنی‌دار دارد. واتانگ و همکاران (۳۷) تأثیر شش شدت باران مختلف و مقدار رطوبت پیشین را بر پاشمان خاک در خاک اکسی‌سول در منطقه هاوایی با استفاده از معادله عمومی پاشمان بررسی و نشان دادند که رطوبت پیشین تأثیری بر مقدار پاشمان خاک در دو حالت مرطوب و خشک نداشت. سعیدی و همکاران (۲۴) اثرات مستقیم و غیرمستقیم ویژگی‌های خاک بر میزان فرسایش پاشمان در خاک‌های آهکی زاگرس مرکزی در ایران در دو سطح شیب ۵ و ۱۵ درصد و شدت ۵۰ و ۸۰ میلی‌متر بر ساعت را بررسی و بیان داشتند که افزایش درصد شیب و شدت بارش باعث تشدید فرسایش پاشمانی گردید. اکیو و هرلیل (۷) تأثیر سه نوع خاک لوم‌شنی، لوم‌رسی و رسی را با سه سطح ماده آلی و در چهار سطح شیب ۹ تا ۳۰ درصد بر روی رواناب و فرسایش بارانی در ترینیداد و توباگو مورد بررسی قرار داده و نشان

مقاومت سطح خاک مورد مطالعه قرار گرفت.

نمونه برداری خاک

در این پژوهش نمونه‌های خاک از اراضی غیرکشاورزی استان‌های زنجان و فارس برداشت شد. از بین شش گروه بافت خاک، پنج بافت خاک (رس، لومرسی، لومسیلتی، لوم‌شنی و شن) از مناطق مختلف استان زنجان و خاک با بافت سیلت از حوزه آبخیز پرسپولیس واقع در ۴۰ کیلومتری غرب شهرستان مرودشت استان فارس شناسایی شد. به طور متوسط مقدار ۲۰۰ تا ۳۰۰ کیلوگرم از هر خاک از عمق صفر تا ۲۵ سانتی‌متر برداشت شد. پس از انتقال خاک‌ها به آزمایشگاه، برای حذف تأثیر اجزای درشت سنگی (۲۷) بر فرآیندهای فرسایش بارانی، نمونه‌های خاک از الک ۱۰ میلی‌متر عبور داده شد (جدول ۱).

مواد و روش‌ها

طرح آزمایشی

این پژوهش در شش کلاس بافت خاک (رس، سیلت، لومرسی، لومسیلتی، لوم‌شنی و شن)، در چهار سطح شیب (از حالت بدون شیب، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد که شیب غالب مناطق نمونه‌برداری بود)، چهار سطح محتوای رطوبت پیشین (رطوبت هوا خشک، ۲۵ درصد اشباع، ۵۰ درصد اشباع و ۱۰۰ درصد اشباع)، تحت بارانی با شدت ثابت ۴۰ میلی‌متر بر ساعت و در سه تکرار در مجموع با ۲۸۸ واحد آزمایشی به صورت فاکتوریل با طرح کاملاً تصادفی انجام شد.

جدول ۱- موقعیت جغرافیایی و نوع سازند خاک‌های مورد بررسی

Table 1- Geographic coordination and geologic formation of study soils

نوع سازند Geology type	موقعیت جغرافیایی Geographic coordination		رده خاک Soil order	بافت خاک Soil texture
	طول Longitude	عرض Latitude		
	شیل‌های آهکی میکادار Calcareous shale	4094477		
گل‌سنگ-ژئیس Gypsum-Lichen	4093351	242688	اینسپتی‌سول Inceptisol	لوم رسی Clay loam
ذخایر تراسی-مخروط افکنه‌های کوهپایه‌ای قدیمی Terrace reservoirs-Alluvial fan of ancient hills	4063707	268212	اینسپتی‌سول Inceptisol	لوم سیلتی Silt loam
سازند گچساران Gachsaran formation	4072213	268706	انتی‌سول Inceptisol	لوم‌شنی Sandy loam
گل‌سنگ-ژئیس و ماسه سنگ Gypsum-Lichen and sandstone	4093535	242719	انتی‌سول Inceptisol	شن Sand
سنگ آهک-شیل و مارن Limestone-shale and marl	3332263	650149	اینسپتی‌سول Inceptisol	سیلت Silt

۱). بعد از هر مرتبه اشباع از زیر و خشک نمودن، چگالی ظاهری تا نزدیک شدن به چگالی ظاهری خاک طبیعی مجدداً اندازه‌گیری شد.

تعیین ویژگی‌های خاک‌ها

در نمونه‌های خاک، درصد شن، سیلت و رس به روش هیدرومتری اندازه‌گیری شد (۲۷) و میانگین هندسی قطر ذرات (Dg) بر اساس روش شیرازی و بورسما (۱۹۸۴) تعیین شد (۲۵). میانگین وزنی قطر^۱ (MWD_{wet}) خاک‌دانه‌های پایدار در آب (خاک‌دانه‌های

واحدهای آزمایشی

در این پژوهش از جعبه‌های خاک به ابعاد ۳۵ × ۲۵ سانتی‌متر با عمق پنج سانتی‌متر استفاده شد. جعبه‌های دارای قابلیت نفوذ بوده و در کف آن‌ها از یک لایه فیلتر شنی جدا از ذرات خاک اصلی به ضخامت ۱ سانتی‌متر استفاده شد (۳۴). چگالی ظاهری خاک در نقاط تحت نمونه‌برداری به وسیله سیلندر فلزی به قطر ۲۰ و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر تعیین شد (۲۸). برای نزدیک شدن چگالی ظاهری خاک داخل جعبه‌های پاشمان به شرایط طبیعی، نمونه‌های خاک در چند مرحله از زیر جعبه اشباع و در شرایط هوای آزاد خشک شدند (شکل

1- Mean weight diameter

درشت بافت) و بار افتان (در خاک‌های ریز بافت) تعیین شد (۲۱).

شبیه‌سازی باران

به منظور شبیه‌سازی باران، از شدت بارش ۴۰ میلی‌متر بر ساعت با مدت بارش ۱۵ دقیقه (بر اساس تحلیل داده‌های شدت-مدت باران‌های منطقه در یک دوره زمانی ۱۰ ساله از سال ۱۳۷۶ تا ۱۳۸۶) استفاده شد. برای تولید باران از یک دستگاه باران‌ساز با ابعاد ۱ در ۲ متر و ارتفاع ۳ متر استفاده شد. صفحه بارش دستگاه از ۵۰۰ قطعه نازل تشکیل شده بود. یکنواختی ریزش باران با قرار دادن ظروف در جهت طولی و عرضی و جمع‌آوری حجم باران در مدت معین (۱۵ دقیقه) با استفاده از ضریب یکنواختی به روش کریستیانسن معادله (۲) ۸۰ درصد بود (شکل ۱).

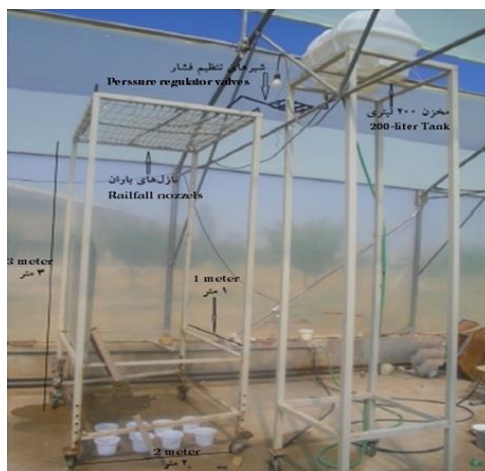
$$CUC(\%) = \left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - \bar{x}|}{n \bar{x}} \right) \times 100 \quad (2)$$

که در آن: CUC ضریب یکنواختی کریستیانسن بر حسب درصد، x_i عمق آب در هر یک از ظروف جمع‌آوری آب، \bar{x} میانگین عمق آب درون ظروف و n تعداد کل ظروف است (۱۹).

عبوری از الک شماره ۳/۸ اینچ با قطر ۹/۵ میلی‌متر و باقیمانده بر روی الک شماره ۱۰ با قطر ۲ میلی‌متر) که به طور عمده قطر کم‌تر از ۵ میلی‌متر داشتند را به مدت یک دقیقه با سرعت ۲۰ نوسان در دقیقه (۳۴) با استفاده از چهار الک غوطه‌ور در آب (۰/۵، ۰/۲۵، ۰/۱ و ۰/۰۵ میلی‌متر) با استفاده از معادله (۱) به دست آمد (۲۰ و ۴۱).

$$MWD_{wet} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{W_{i(a+s)} - W_{i(s)}}{\sum_{i=1}^n W_{i(a+s)} - \sum_{i=1}^n W_{i(s)}} \right) \bar{X}_i \quad (1)$$

که در آن‌ها: \bar{X}_i میانگین قطر ذره (بر حسب میلی‌متر) و W_i نسبت جرمی خاک‌دانه‌های پایدار در آب به جرم کل خاک‌دانه‌ها است و n تعداد الک‌ها می‌باشد. به منظور حذف خطای اندازه‌گیری جرم شن به جای جرم خاک‌دانه، خاک‌دانه‌های باقیمانده روی الک‌ها ابتدا در آب پراکنده و دوباره روی الک مانند خود ریخته شدند و سپس جرم ذرات باقیمانده شن (W_s) روی هر الک پس از خشک شدن تعیین شد و از جرم اولیه خاک‌دانه‌های روی هر الک (W_{a+s}) کم شدند (۳۴). مقدار ماده آلی خاک به روش والکلی و بلاک (۲۱) و درصد کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی با استفاده از اسید کلریدریک ۱ نرمال (۲۱) تعیین شد. درصد سدیم تبادلی (ESP) بر اساس نسبت سدیم تبادلی و ظرفیت تبادلی کاتیونی تعیین شد (۲۸). هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار ثابت (در خاک‌های



شکل ۱- نمایی از دستگاه باران‌ساز آزمایشگاه فرسایش خاک دانشگاه زنجان
Figure 1- Rainfall simulator from Soil Erosion Laboratory of the University of Zanjan

رسیدن به رطوبت‌های پایین‌تر قرار داده شدند (شکل ۲ الف و ب).

تعیین سطوح شیب

چهار سطح شیب شامل صفر (بدون شیب)، شیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد بر روی جعبه‌های خاک اعمال شد. این شیب‌ها بر مبنای شیب غالب خاک‌های موجود در مناطق مورد بررسی بود. نمونه‌های خاک تحت شیب‌های مذکور در زیر دستگاه باران‌ساز قرار گرفتند (شکل ۲).

اعمال سطوح رطوبتی به خاک‌ها

در این پژوهش چهار سطح رطوبتی شامل هواخشک (به طور 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 به روش موئنیگی حاصل شد (۲۸)، سپس برای حصول سایر سطوح رطوبتی، نمونه‌های اشباع در شرایط سایه تا



(ب)



(الف)

شکل ۲- تعدادی از جعبه‌های خاک در حوضچه آب جهت اشباع‌سازی نمونه‌ها به روش موئینگی (الف)، و محفظه پاشمان دربرگیرنده جعبه خاک (ب)

Figure 2- Some soil samples placed in water box for capillary wetting (a) and splash box containing soil plot (b)

اندازه‌گیری فرسایش پاشمانی

برای اندازه‌گیری فرسایش پاشمانی، جعبه‌های محتوی خاک درون محفظه‌های گالوانیزه به ابعاد ۳۰ × ۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر به منظور به دام انداختن ذرات خاک پاشمان یافته قرار گرفتند (۳۴). جعبه‌ها زیر دستگاه شبیه‌ساز باران در شیب معین قرار گرفتند. ذرات خاک خارج شده در اثر پاشمان جمع‌آوری و پس از گذاشتن در آون (دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت)، جرم آن‌ها بر حسب گرم بر متر مربع بر ساعت تعیین شد (شکل ۲).

اندازه‌گیری نسبت مقاومت خاک

مقاومت سطح نمونه‌های خاک به وسیله دستگاه فروسنج^۱ مدل Koehler بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع پیش (مقاومت ثانویه) و پس (مقاومت اولیه) از اعمال باران تعیین و با حذف واحدهای یکسان صورت و مخرج به صورت نسبت مقاومت سطح خاک (بدون بعد) تعیین شد. در حالت هواخشک اندازه‌گیری شد (معادله ۳). برای حذف تأثیر رطوبت خاک بر مقاومت سطح، اندازه‌گیری مقاومت خاک پس از اعمال باران مانند پیش از باران، در حالت هواخشک انجام شد.

$$\text{نسبت مقاومت سطح خاک} = \frac{\text{مقاومت سطح خاک اولیه} - \text{مقاومت سطح خاک ثانویه}}{\text{مقاومت سطح خاک اولیه}} \quad (۳)$$

اندازه‌گیری تراکم خاک

تراکم خاک بر اساس چگالی ظاهری آن قابل بیان است. در خاک طبیعی که در معرض عامل تخریب کننده یا متراکم کننده قرار ندارند، درصد تراکم خاک با کمک معادله (۴) صفر است. بارندگی یکی از عوامل تخریب ساختمان خاک سطحی است که منجر به افزایش چگالی ظاهری خاک می‌شود و در نتیجه تراکم خاک سطحی را به دنبال دارد. جهت تعیین درصد تراکم خاک‌ها چگالی ظاهری خاک‌ها پس از باران (چگالی ثانویه خاک) نسبت به پیش از باران (چگالی اولیه خاک) با استفاده از معادله (۴) تعیین شد:

$$\text{درصد تراکم خاک} = \frac{\text{چگالی ظاهری اولیه} - \text{چگالی ظاهری ثانویه}}{\text{چگالی ظاهری اولیه}} \times 100 \quad (۴)$$

تجزیه و تحلیل داده‌ها

پیش از تحلیل داده‌ها، ابتدا نرمال بودن توزیع آماری داده‌ها با آزمون شاپیرو-ویلک بررسی شدند (جدول ۳). تجزیه واریانس داده‌ها و مقایسه میانگین‌ها تفاوت آماری بین تیمارها با استفاده از آزمون دانکن در محیط SAS 9.4 انجام گرفت. نمودارهای فرسایش بارانی با نرم‌افزار SigmaPlot 12.0 رسم شد. ماتریس همبستگی ویژگی‌های خاک با فرآیندهای فرسایش بارانی بر اساس بالاترین

1- Penetrometer

ضریب همبستگی پیرسون (r) با استفاده از نرم افزار SAS 9.4 تعیین شدند.

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک‌ها

در جدول ۲ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی شش کلاس بافت خاک نشان داده شده است. پایداری خاک‌دانه‌ها در آب برای هر شش بافت خاک کم‌تر از ۰/۴ میلی‌متر بود که نشان از ناپایداری شدید خاک‌دانه‌ها در برابر عوامل فرساینده مانند باران می‌باشد. خاک با بافت شن و لوم شنی فاقد هر گونه خاک‌دانه‌ای بودند و از این رو پایداری خاک‌دانه در آن‌ها صفر بود. خاک‌دانه‌های خاک‌های میان

بافت (لوم سیلتی و لوم رسی) و ریز بافت (رس و سیلت) نیز کم‌تر از پنج درصد. پ‌هاش (pH) خاک‌ها کم‌تر از ۸/۵ داشته و درصد سدیم تبدلی آن‌ها کم‌تر از ۱۵ بود و خاک‌ها غیرسدیمی بودند (۲۷). درصد ماده آلی خاک‌ها بین ۰/۴۷ درصد (بافت شن) تا ۱/۵۵ درصد (بافت لوم رسی) متغیر بود و نشان دهنده کمبود ماده آلی خاک‌ها بود (۲۷). چگالی ظاهری خاک‌ها از ۱/۰۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای خاک رس تا ۱/۶۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای بافت شن متغیر بود (جدول ۲). کربنات کلسیم معادل در تمام خاک‌ها به جز بافت شن بیش‌تر از ۱۰ درصد بود و این خاک‌ها در گروه خاک‌های آهکی قرار داشتند.

جدول ۲- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد پژوهش

Table 2- Some of physical and chemical properties of the soils

بافت خاک Soil texture	شن (درصد) Sand (%)	سیلت (درصد) Silt (%)	رس (درصد) Clay (%)	چگالی ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب) Bulk density (g cm ⁻³)	میانگین هندسی قطر ذرات (میلی‌متر) Geometric mean diameter (mm)	پایداری خاک‌دانه (میلی‌متر) Aggregate stability (mm)	هدایت هیدرولیکی (سانتی‌متر بر روز) Saturate hydraulic conductivity (cm day ⁻¹)	درصد سدیم قابل تبادل (درصد) Exchangeable sodium percentage (%)	ماده آلی (درصد) Organic matter (%)	کربنات کلسیم معادل (درصد) Calcium Carbonate Equivalent (%)
رس Clay	12.35	24.35	63.3	1.07	0.01	0.38	41.54	9.12	1.01	25.0
سیلت Silt	4	84	12	1.25	0.02	0.10	44.09	3.34	0.61	48.7
لوم رسی Clay loam	35	27	38	1.21	0.03	0.08	31.3	6.4	1.55	22.98
لوم سیلتی Silt loam	27	53	20	1.30	0.04	0	24.32	7.07	0.24	34.0
لوم شنی Sandy loam	75	21	4	1.50	0.34	0	89.66	5.9	0.69	12.0
شن Sand	95	3	2	1.68	0.8	0	518.15	2.3	0.47	2.50

پیامدهای فرسایش بارانی

تحلیل استنباطی داده‌های فرآیندهای فرسایش بارانی با آزمون شاپیرو-ویلک در سطح ۰/۰۵ درصد معنی‌دار نبود و فرض صفر مبنی بر نرمال بودن داده‌ها اثبات شد (جدول ۳). بنابراین از روش‌های پارامتریک جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده شد. در میان شش بافت خاک مورد پژوهش، خاک با بافت سیلت با میانگین ۱۱۱۳/۰۱ گرم بر مترمربع بر ساعت بیش‌ترین و خاک با بافت شن با میانگین

۳۶۴/۸۴ گرم بر متر مربع بر ساعت کم‌ترین تغییرات را به اعمال تیمارهای درصد شیب و رطوبت خاک از نظر مقدار فرسایش پاشمانی نشان دادند (جدول ۳). همچنین در خصوص نسبت مقاومت سطح در میان شش بافت مورد پژوهش خاک با بافت سیلت با میانگین ۱۰/۳۱ بیش‌ترین و خاک با بافت شن با میانگین ۲/۴۸ کم‌ترین تغییرات را به اعمال تیمارهای درصد شیب و رطوبت خاک نشان دادند. به علاوه تغییرات تراکم خاک در میان شش بافت خاک نشان داد که بافت

دارای بیشترین و کمترین حساسیت به اثر تخریبی قطرات باران بودند. دلیل این نتایج ممکن است به اندازه و ماهیت ذرات تشکیل دهنده بافت‌های خاک مرتبط باشد (جدول‌های ۱ و ۳).

سیلت با میانگین ۱۵/۰۱ درصد بیش‌ترین و بافت شن با میانگین ۰/۲۳ درصد کم‌ترین تغییرات را به اعمال درصد شیب و رطوبت خاک نشان دادند (جدول ۳). به طور کلی بافت سیلت و بافت شن به ترتیب

جدول ۳- آماره‌های توصیفی و استنباطی داده‌های فرآیندهای فرسایش بارانی

Table 3- Descriptive statistics of rainfall erosion processes

بافت خاک Soil texture	فرسایش پاشمان (گرم بر متر مربع بر ساعت) Splash erosion (g m ⁻² h ⁻¹)				تراکم خاک (درصد) Soil compaction (%)				نسبت مقاومت خاک Soil resistance ratio			
	کم‌ترین Min	بیش‌ترین Max	میانگین Mean	*آزمون شاپیرو ویلک Shapiro-Wilk test	کم‌ترین Min	بیش‌ترین Max	میانگین Mean	*آزمون شاپیرو ویلک Shapiro-Wilk test	کم‌ترین Min	بیش‌ترین Max	میانگین Mean	*آزمون شاپیرو ویلک Shapiro-Wilk test
رس Clay	603.86	1601.95	633.12	0.92	13.41	15.90	14.10	0.96	4.43	12.46	8.73	0.95
سیلت Silt	728.32	2456.54	1113.01	0.94	13.00	22.38	15.01	0.91	7.84	13.40	10.31	0.90
رسی Clay loam	574.85	885.34	602.61	0.91	12.82	15.32	13.51	0.93	2.80	5.64	3.31	0.92
سیلتی Silt loam	856.59	2296.21	775.48	0.90	14.30	20.47	13.54	0.92	6.63	11.86	8.97	0.94
لوم شنی Sandy loam	410.11	1137.60	406.84	0.91	4.77	5.64	4.76	0.95	3.10	4.66	3.23	0.93
شن Sand	177.88	691.80	364.84	0.97	0.16	0.34	0.23	0.93	1.91	3.23	2.48	0.98

*: Significant at the 5% level

*معنی‌دار در سطح ۵ درصد

حد میانه و در خاک با بافت شن با ۴۳۷/۳۷ گرم بر متر مربع بر ساعت کم‌ترین مقدار را نشان داد. دلیل این حالت ممکن است به اندازه و چسبندگی ذرات خاک بستگی داشته باشد و هر چه اندازه ذرات کوچک‌تر و خاصیت چسبندگی ضعیف‌تر باشد مقدار فرسایش بالاتر خواهد بود (۱۰). بافت لوم‌رس با وجود توزیع اندازه ذرات کوچک‌تر از بافت سیلت به دلیل درصد رس و خاصیت چسبندگی بالاتر فرسایش کمتری از بافت سیلت را نشان داد. مقایسه میانگین اثر بافت خاک بر درصد تراکم به ترتیب به صورت سیلت < لوم سیلتی < رس < لوم رسی < لوم شنی < شن بود. همچنین مقاومت سطح خاک به فروروی به ترتیب به صورت سیلت < لوم سیلت < رس < لوم رسی < لوم شنی < شن بود به عبارتی در خاک با بافت سیلت بالاترین (مقاومت ثانویه ۱۰/۵۳ برابر بزرگ‌تر از مقاومت اولیه بود) و در بافت شن کم‌ترین مقدار (مقاومت ثانویه ۲/۶۶ برابر

همچنین اثرات مستقیم و متقابل بافت خاک، درصد شیب و محتوای رطوبت پیشین و اثرات متقابل این عوامل بر میانگین داده‌های فرآیندهای فرسایش بارانی در سطح یک درصد معنی‌دار بود. به عبارتی با احتمال ۹۹ درصد اثر معنی‌دار تیمارها بر میانگین داده‌های فرآیندهای فرسایش بارانی ناشی از تصادف نبوده است.

تأثیر بافت خاک بر فرآیندهای فرسایش بارانی

جدول ۴ مقایسه میانگین اثرات بافت خاک، درصد شیب و محتوای رطوبت پیشین بر فرآیندهای فرسایش بارانی را نشان می‌دهد. تفاوت معنی‌داری (P<0.01) بین میانگین داده‌های فرآیندهای فرسایش بارانی در بافت‌های خاک مشاهده شد، فرسایش پاشمان در خاک با بافت سیلت با ۱۵۷۴/۹۳ گرم بر مترمربع بر ساعت بیش‌ترین، خاک با بافت رس با ۱۰۷۹/۳۲ گرم بر مترمربع بر ساعت

شیب مقدار فرسایش، مقاومت سطح به فروروی و درصد تراکم بافت-های خاک افزایش نشان دادند، به عبارتی با افزایش درصد شیب سطح، خاک‌ها حساسیت بالاتری را به اثرات تخریبی ضربه قطرات باران نشان دادند.

بزرگ‌تر از مقاومت اولیه بود) مشاهده شد. این نتایج با یافته‌های تو و کی (۲۹) و دکستر و چزی (۵) که بیان داشتند افزایش درصد رس به علاوه کاهش درصد شن خاک‌ها و بالعکس (کاهش درصد رس و افزایش درصد شن) موجب افزایش مقاومت خاک به فروروی می‌شود مطابقت داشت.

تأثیر محتوای رطوبتی خاک بر فرآیندهای فرسایش بارانی

جدول ۴ فرآیندهای فرسایش بارانی تحت تأثیر محتوای رطوبتی پیشین خاک را نشان می‌دهد.

تأثیر شیب سطح بر فرآیندهای فرسایش بارانی

همچنین جدول ۴ تغییرات فرآیندهای فرسایش بارانی تحت تأثیر شیب سطح را نشان می‌دهد ($P < 0.01$)، به طور کلی با افزایش درصد

جدول ۴- مقایسه میانگین اثرات بافت خاک، شیب سطح و محتوای رطوبت پیشین بر فرسایش پاشمانی، تراکم خاک و نسبت مقاومت خاک
Table 4- Mean comparison for the effects of soil texture, slope, and antecedent moisture content on the splash erosion, soil compaction, and soil resistance ratio

تیمارها Treatments		فرآیندهای فرسایش بارانی Rainfall erosion processes		
تیمار Treatment	سطح Level	فرسایش پاشمان (گرم بر مترمربع بر ساعت) Splash erosion ($g\ m^{-2}\ h^{-1}$)	نسبت مقاومت خاک (بدون بعد) Soil resistance ratio (no dimension)	تراکم خاک (درصد) Soil compaction (percent)
بافت خاک Soil texture	سیلت Silt	1574.93 ^a	10.53 ^a	17.43 ^a
	لوم سیلتی Silt loam	1335.14 ^b	9.17 ^b	16.76 ^b
	رس Clay	1079.32 ^c	9.28 ^b	14.53 ^c
	لوم رسی Clay loam	748.61 ^d	3.84 ^c	13.95 ^d
	لوم شنی Sandy loam	652.05 ^e	3.79 ^c	5.05 ^e
	شن Sand	437.37 ^f	2.66 ^d	0.25 ^f
شیب سطح (درصد) Slope (percent)	0	869.29 ^c	5.94 ^d	11.09 ^b
	10	863.89 ^c	6.45 ^c	10.85 ^c
	20	934.26 ^b	6.58 ^b	11.12 ^b
	30	1217.51 ^a	7.20 ^a	12.26 ^a
محتوای رطوبت پیشین (درصد) Antecedent moisture content (percent)	5	881.14 ^c	5.64 ^d	10.72 ^c
	25	879.35 ^c	6.22 ^c	11.38 ^b
	50	1134.06 ^a	7.29 ^a	11.80 ^a
	100	990.40 ^b	7.02 ^b	11.43 ^b

Values with the same English letter didn't have significant difference

مقادیر با حروف یکسان از لحاظ آماری اختلافی معنی دار را نشان ندادند

مشاهده شد، اثر محتوای رطوبت پیشین بر مقاومت خاک به فروروی نیز در حالت نیمه‌اشباع بالاترین مقدار (مقاومت ثانویه ۷/۲۹ برابر بزرگ‌تر از مقاومت اولیه بود) و سپس حالت اشباع، یک چهارم اشباع و هواخشک قرار داشت. همچنین تأثیر رطوبت پیشین بر میانگین

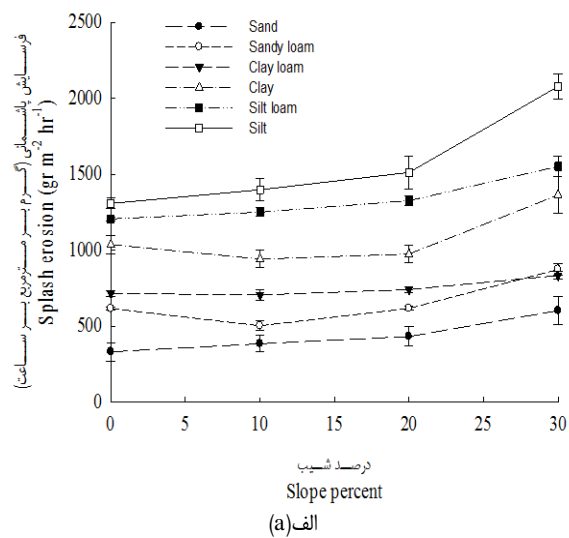
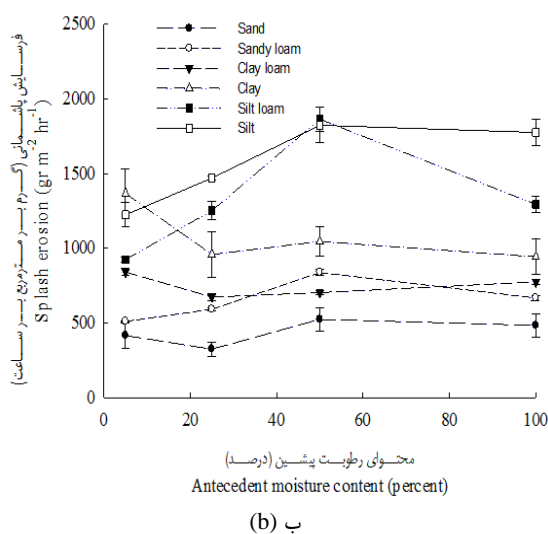
اثر محتوای رطوبتی پیشین بر فرسایش پاشمانی با ۱۱۳۴/۰۶ گرم بر مترمربع بر ساعت در رطوبت نیمه‌اشباع بالاترین مقدار بود و رطوبت اشباع در مرتبه دوم قرار داشت و بین حالت هوا خشک و یک‌چهارم اشباع تفاوت معنی‌داری بر هدررفت خاک در اثر پاشمان

الف) که این نتایج با یافته‌های سایر پژوهش‌گران در خصوص افزایش مقدار فرسایش پاشمان در اثر افزایش شیب مطابقت داشت (۱۸، ۲۲ و ۲۴). همچنین مقدار فرسایش خاک همواره در بافت‌های مانند سیلت و رس بیش از بافت شن بود که این نتایج با بخشی از یافته‌های واعظی و عبادی (۳۳) که بیان داشتند انتقال پذیری ذرات خاک (شن، سیلت و رس) در اثر فرسایش سطحی در شدت‌های مختلف باران و درجات شیب بیشتر به ماهیت ذرات بستگی دارد تا تغییرات درجه شیب، مطابقت داشت. دلیل این روند افزایشی ممکن است به کاهش زاویه سکون ذرات خاک بر سطح با افزایش درصد شیب مرتبط باشد و در نتیجه انتقال ذرات خاک در جهت شیب را آسان‌تر کند (۱۷).

تراکم خاک در حالت نیمه اشباع بالاترین بود (۱۱/۸۰ درصد) و بین حالت اشباع و یک‌چهارم تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد و در حالت هواخشک کم‌ترین میانگین تراکم خاک (۱۰/۷۲ درصد) را نشان داد (جدول ۴). به طور کلی رطوبت خاک در حالت نیمه‌اشباع بیش‌ترین اثر تخریبی را بر مقدار میانگین فرآیندهای فرسایش بارانی نشان داد.

تغییرات فرسایش پاشمان تحت تأثیر محتوای رطوبتی و درصد شیب

در شکل ۳ الف) تأثیر درصد شیب بر فرسایش پاشمان در بیش‌تر بافت‌های خاک یک حالت افزایشی غیرخطی را نشان دادند (شکل ۳



شکل ۳- اثرات شیب (الف) و محتوای رطوبت پیشین (ب) بر فرسایش پاشمانی

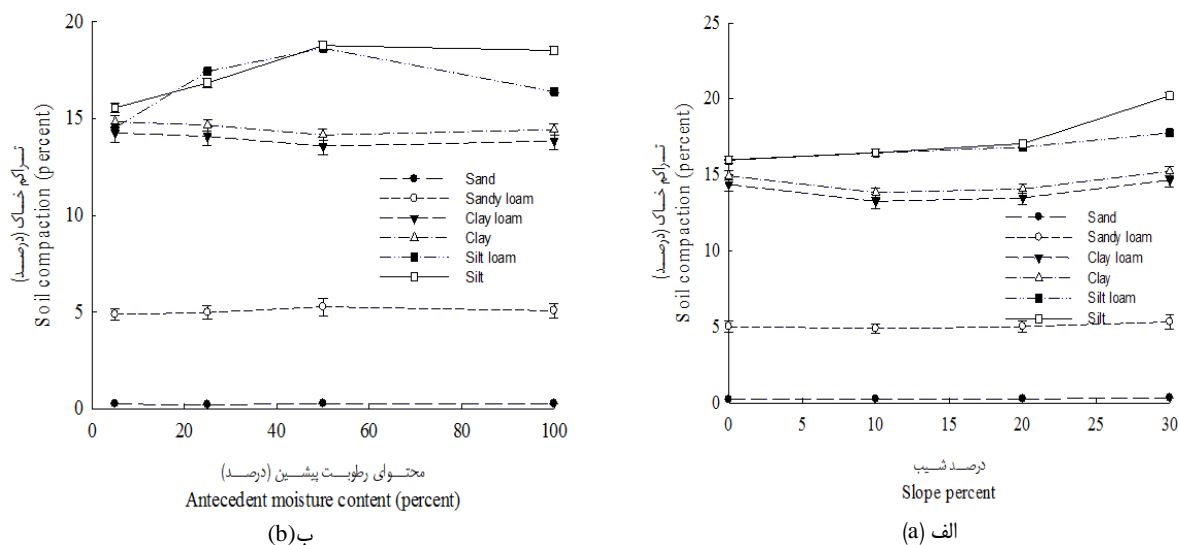
Figure 3- Effects of slope (a) and antecedent moisture content (b) on the splash erosion

نظر تأثیر رطوبت خاک بر فرسایش گزارش شده است. واتانگ و همکاران (۳۷) و ویدیویرا و کمپس-روچ (۴۰) نشان دادند که مقدار رطوبت بر مقدار خاک فرسایش یافته تأثیر ندارد (خاک با بافت شن شکل ۳ ب).

تغییرات درصد تراکم خاک تحت تأثیر محتوای رطوبتی و درصد شیب

شکل ۴ الف) نشان داد اثر درجه شیب بر روند درصد تراکم تقریباً مشابه با تأثیر این تیمار بر فرسایش پاشمان و تا حدودی مقاومت سطح به فروری بود، به علاوه اثر رطوبت بر تغییرات درصد تراکم در شکل ۴ ب) روندی متفاوت از اثر این تیمار بر فرسایش پاشمان و مقاومت سطح به فروری داشت.

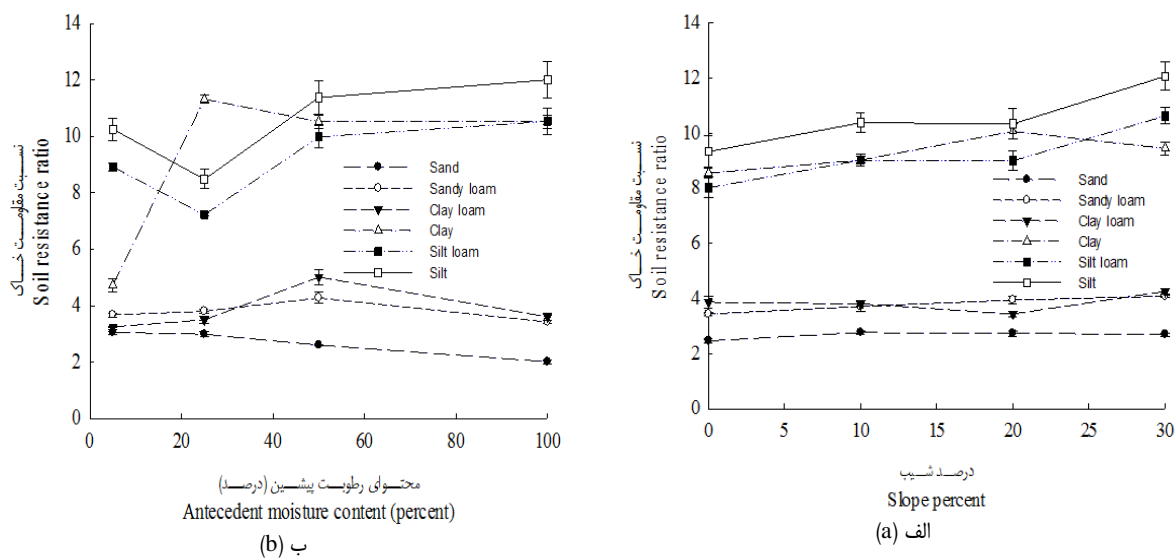
همچنین در شکل ۳ ب) افزایش محتوای رطوبت پیشین روند متفاوتی در بافت‌های خاک نشان داد. بافت سیلت همواره روند افزایش فرسایش پاشمانی را با افزایش رطوبت نشان داد. همچنین بافت لوم رسی و رسی در ابتدا کاهش فرسایش پاشمانی (رطوبت یک چهارم اشباع) و سپس افزایش اندکی را نشان داد. این روند متفاوت تأثیر رطوبت در خاک‌ها ممکن است به ماهیت متفاوت ذرات و اجزاء تشکیل دهنده خاک‌ها مرتبط باشد به گونه‌ای که افزایش رطوبت تا حدود نیمه‌اشباع در بافت‌های ریز (لوم رسی و رسی) موجب افزایش چسبندگی ذرات خاک شده است و در خاک‌های درشت بافت افزایش رطوبت تا حالت نیمه‌اشباع نه تنها چسبندگی را افزایش ندهد بلکه با کاهش زاویه اصطکاک بین ذرات، جداسازی و انتقال پذیری این ذرات را آسان‌تر شده است این نتایج با بخشی از یافته‌های ویی و همکاران (۳۸) که بیان داشتند افزایش رطوبت موجب افزایش مقدار فرسایش می‌شود مطابقت داشت. در برخی دیگر از پژوهش‌ها نتایج متفاوتی از



شکل ۴- اثرات شیب (الف) و محتوای رطوبت پیشین (ب) بر تراکم خاک
 Figure 4- Effects of slope (a) and antecedent moisture content (b) on the soil compaction

درصد تراکم و با افزایش بیشتر رطوبت افزایش درصد تراکم را نشان داد، روند تغییرات درصد تراکم با درصد رطوبت با روند تغییرات ذرات فرسایش یافته با رطوبت مشابه بود و به نظر می‌رسد اثر عاملی مانند ماهیت ذرات هر خاک بر تغییرات مقدار فرسایش و تراکم مشابه باشند.

به غیر از خاک‌های با بافت سیلت و لوم سیلت تغییر درصد رطوبت تأثیر کمی بر تغییرات درصد تراکم بافت‌های خاک نشان دادند. به طور کلی در همه بافت‌ها افزایش شیب افزایش تراکم را نشان داد با این وجود افزایش محتوای رطوبت پیشین در بافت شنی تفاوت چندانی نشان نداد و در خاک‌های ریز بافت مانند لوم رسی و رس ابتدا کاهش



شکل ۵- اثرات شیب (الف) و محتوای رطوبت پیشین (ب) بر نسبت مقاومت خاک
 Figure 5- Effects of slope (a) and antecedent moisture (b) content on the soil resistance ratio

تغییرات نسبت مقاومت سطح تحت تأثیر محتوای رطوبتی و درصد شیب

در اغلب بافت‌های خاک افزایش درصد شیب افزایش نسبت مقاومت خاک را نشان داد (شکل ۵ الف). دلیل آن ممکن است به کاهش فضای خالی بین ذرات خاک در نتیجه بازآرایی این ذرات در اثر فرسایش مرتبط باشد که این بازآرایی و کاهش فضای بین ذرات خاک منجر به افزایش مقاومت خاک در برابر فروسنج شده است. همچنین برخورد قطرات باران در خاک‌های با بافت لوم‌سیلتی و سیلتی در حالت هواخشک تخریب کم‌تری را نشان داد (شکل ۵ ب). افزایش محتوای رطوبتی چنین خاک‌های ممکن است به دلیل هم‌آرایی مجدد ذرات خاک با کاهش تخلخل توده خاک و در نتیجه تشکیل لایه‌های با قابلیت نفوذ کم‌تر را تشدید کند، بنابراین مقاومت سطح خاک در برابر فروسنج با افزایش محتوای رطوبتی افزایش یافته است. محتوای رطوبتی تأثیر کمی بر فروروی در بافت‌های شن و لوم‌شنی را نشان دادند. این حالت ممکن است به فقدان ساختمان در بافت‌های شن و لوم‌شنی مرتبط باشد (۱۴). همچنین افزایش محتوای رطوبتی در خاک با بافت رس در ابتدا افزایش مقاومت سطح خاک به فروسنج و با افزایش مجدد رطوبت کاهش این نسبت مقاومت خاک را نشان داد. این تغییرات ممکن است ناشی از به هم‌ریختگی ابتدایی اولیه ذرات در واحدهای ساختمانی خاک با بافت رس مرتبط باشد (۱۰) و آسیب‌پذیری بافت رس را به ضربه قطرات باران بالا برده باشد. با افزایش مجدد مقدار رطوبت و به احتمال حضور لایه نازکی از آب بر سطح خاک (به دلیل هدایت هیدرولیکی کم‌تر بافت رس نسبت به سایر بافت‌های خاک) این لایه به عنوان یک سپر حفاظتی در برابر برخورد قطرات باران (۱۶) عمل کرده است. بنابراین خاک با بافت رس در وضعیت با رطوبت پیشین بالا تخریب کم‌تری از حالت با رطوبت پیشین کم در اثر برخورد قطرات باران داشته است و در نتیجه مقاومت کم‌تر سطح خاک به فروسنج (پس از رسیدن به حالت هواخشک) را نشان داده است (شکل ۵ ب). این نتایج با بخشی از یافته‌های ترومن و همکاران (۳۱) که بر روی پنج خاک با بافت‌های لوم‌شن تا رس انجام گرفت و بیان داشتند افزایش میزان رطوبت اولیه مقاومت ذرات خاک به جدا شدن در برابر ضربات قطرات باران را افزایش می‌دهد مطابقت داشت.

همبستگی ویژگی‌های خاک با فرآیندهای فرسایش بارانی

برای بررسی نقش ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد پژوهش در تغییرات فرآیندهای فرسایش بارانی، همبستگی بین فرسایش پاشمانی، تراکم خاک و مقاومت خاک ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها به صورت ماتریس همبستگی تعیین شد (جدول ۵). همبستگی معنی‌دار بین فرسایش پاشمانی و درصد شن ($r=-$

0.85 $p<0.001$)، درصد سیلت ($r=0.96$ $p<0.001$)، چگالی ظاهری ($r = -0.57$ $p<0.05$)، میانگین هندسی قطر ($r = -0.68$ $p<0.01$)، هدایت هیدرولیکی اشباع ($r = -0.58$ $p<0.05$) و کرنات کلسیم معادل خاک ($r=0.97$ $p<0.001$) وجود داشت (جدول ۶). همچنین همبستگی معنی‌دار بین نسبت مقاومت خاک و درصد شن ($r=-0.86$ $p<0.01$)، درصد سیلت ($r=0.81$ $p<0.01$) چگالی ظاهری ($r=-0.65$ $p<0.01$)، میانگین هندسی قطر ($r=-0.68$ $p<0.01$)، هدایت هیدرولیکی اشباع ($r=-0.56$ $p<0.05$) و درصد کرنات کلسیم معادل ($r=0.88$ $p<0.01$) مشاهده شد. از میان ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی دو ویژگی درصد سیلت و کرنات کلسیم معادل همبستگی معنی‌دار مثبت با فرسایش پاشمانی، درصد تراکم و مقاومت خاک داشتند. این نتایج با نتایج یوتست و همکاران (۳۲) که بیان داشتند مقاومت خاک با چگالی ظاهری رابطه معنی‌دار ندارد متفاوت بود به دلیل آن که افزایش تراکم خاک و در نتیجه کاهش تخلخل خاک موجب افزایش مقاومت سطح خاک به فروروی می‌شود. همچنین نتایج جدول (۵) نشان داد درصد تراکم خاک دارای همبستگی معنی‌دار با درصد شن ($r=-0.97$ $p<0.001$)، درصد سیلت ($r = 0.71$ $p<0.01$)، درصد رس ($r = 0.63$ $p<0.01$)، چگالی ظاهری ($r=-0.93$ $p<0.001$)، میانگین هندسی قطر ($r=-0.97$ $p<0.001$)، پایداری خاک‌دانه ($r=0.50$ $p<0.05$)، هدایت هیدرولیکی اشباع ($r=-0.86$ $p<0.01$) و کرنات کلسیم معادل خاک ($r=0.86$ $p<0.01$) بود. این نتایج با بخشی از یافته‌های اسمیت و همکاران (۲۶) که بیان داشتند درصد رس و درصد کربن آلی بر روابط تراکم-مقاومت به فروروی اثر می‌گذارند، مطابقت نداشت. نتایج جدول (۵) نشان داد ماده آلی با پاشمانی، درصد تراکم و مقاومت خاک همبستگی معنی‌دار ندارد ممکن است دلیل آن به درصد ناچیز این ویژگی در خاک‌ها مورد پژوهش باشد. با این وجود درصد رس با درصد تراکم خاک دارای همبستگی معنی‌دار مثبت بود که این بخش از نتایج با بخشی از یافته‌های اسمیت و همکاران (۲۶) مطابقت داشت. دلیل این تفاوت‌ها ممکن است به تفاوت‌های درصد کربن آلی (۲ تا ۵ درصد) در پژوهش اسمیت و همکاران (۲۶) و پژوهش حاضر (معادل ۰/۱۴ تا ۰/۹۱ درصد کربن آلی) مرتبط باشد. نتایج ماتریس همبستگی (جدول ۵) بیان‌کننده تأثیر بالاتر ویژگی‌های فیزیکی خاک نسبت به ویژگی‌های شیمیایی آن‌ها بر فرآیندهای فرسایش بارانی بود. از میان ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مورد پژوهش، درصد شن چگالی ظاهری و میانگین هندسی قطر با فرسایش پاشمانی، تراکم خاک و مقاومت خاک همبستگی منفی معنی‌دار در سطح یک درصد و درصد سیلت و درصد کرنات کلسیم با فرسایش پاشمانی، تراکم خاک و مقاومت خاک دارای همبستگی مثبت معنی‌دار در سطح یک درصد بودند.

جدول ۵- ماتریس همبستگی بین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و داده‌های فرآیندهای فرسایش بارانی (تعداد داده‌ها: ۶)

Table 5- Correlation matrix between soil physical and chemical properties and rainfall erosion processes (number of data: 6)

	Sand	Silt	Clay	BD	D _s	MWD _{wet}	K _s	ESP	OM	CCE	SC	SR	Sp
Sand	1												
Silt	-0.76**	1											
Clay	-0.61**	-0.06	1										
BD	0.92**	-0.45	-0.85**	1									
Dg	0.92**	-0.65**	-0.62**	0.93**	1								
AS	-0.58*	0.01	0.88**	-0.74**	-0.46	1							
Ks	0.78**	-0.58*	-0.49*	0.82**	0.95**	-0.33	1						
ESP	-0.47	-0.07	0.81**	-0.72**	-0.65**	0.61**	-0.68**	1					
OM	-0.21	-0.23	0.60**	-0.48*	-0.35	0.42	-0.32	0.35	1				
CCE	-0.91**	0.96**	0.21	-0.67**	-0.80**	0.22	-0.70**	0.14	-0.06	1			
SC	-0.97**	0.71**	0.63**	-0.93**	-0.97**	0.50*	-0.85**	0.48	0.31	0.86**	1		
SR	-0.86**	0.81**	0.34	-0.65**	-0.68**	0.45	-0.56*	0.29	-0.29	0.88**	0.76**	1	
Sp	-0.85**	0.96**	0.12	-0.57*	-0.68**	0.18	-0.55*	-0.03	-0.12	0.97**	0.78**	0.85**	1

*: همبستگی در سطح ۰/۰۱ معنی دار است. **: همبستگی در سطح ۰/۰۵ معنی دار است. ***: همبستگی در سطح ۰/۰۰۱ معنی دار است.

ماده آلی : OM : درصد سدیم تبادل (درصد) : ESP : توزیع اندازه ذرات (میلی‌متر). AS : پایداری خاکدانه (میلی‌متر). K_s : هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی متر در روز). Dg : توزیع اندازه ذرات (میلی‌متر). Dg : توزیع اندازه ذرات (میلی‌متر). BD : چگالی ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب). CCE : کربنات کلسیم معادل (درصد). SC : تراکم خاک (درصد). SR : مقاومت خاک (بدون بعد) و Sp : فرسایش پاشمان (گرم بر سانتی متر مربع بر ساعت) است.

*: Correlation is significant at the 0.05 level **: Correlation is significant at the 0.01 level ***: Correlation is significant at the 0.001 level
 In table: BD: bulk density (g cm⁻³), Dg: particle-size distribution (mm), AS: aggregate stability (mm), K_s: saturated hydraulic conductivity (cm day⁻¹), ESP: exchangeable sodium percent (percent), OM: organic matter (percent), CCE: calcium carbonate equivalent (percent), SC: soil compaction (percent), SR: soil resistance (no dimension), Sp: splash erosion (g m⁻² hr⁻¹)

تراکم و مقاومت سطح خاک همبستگی مثبت و معنی‌داری داشت و ویژگی‌های شیمیایی مانند درصد ماده آلی و درصد سدیم قابل تبادل همبستگی معنی‌داری نشان ندادند. به عبارتی ماهیت فیزیکی ذرات تشکیل دهنده خاک مانند اندازه ذرات (درصد شن، درصد رس و درصد سیلت) نسبت به برخی از ویژگی‌های شیمیایی ذرات خاک مانند ماده آلی تأثیر بیش‌تری بر تغییرات مقدار فرسایش خاک، درصد تراکم و نسبت مقاومت فروروی خاک به فروسنج داشتند. به طور کلی، افزایش درصد سیلت و آهک در خاک بر خلاف درصد شن، منجر به افزایش حساسیت خاک به فرآیند فرسایش پاشمانی می‌شود. افزایش فرسایش پاشمانی منجر به تراکم خاک و افزایش مقاومت سطح می‌شود. در خاک‌های حاوی سیلت و آهک زیاد، با تغییر شیب سطح و محتوای رطوبتی، فرآیندهای فرسایش پاشمانی، تراکم و نسبت مقاومت خاک به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرند. با افزایش شیب و محتوای رطوبتی، شدت وقوع این فرآیندها در چنین خاک‌هایی افزایش پیدا می‌کند. این نتایج نشان می‌دهد که خاک‌های حاوی سیلت و آهک زیاد که در شیب‌های تند قرار دارند به ویژه زمانی که رطوبت خاک زیاد است به شدت تحت فرسایش بارانی قرار گرفته و دچار تخریب فیزیکی می‌شوند. حفظ پوشش گیاهی در چنین خاک‌هایی برای کاهش اثرات منفی باران بر تخریب خاک حائز اهمیت است.

دلیل این همبستگی منفی و مثبت ممکن است به اندازه ذرات وابسته باشد و هر چه درصد ذرات درشت‌تر، انتقال ذرات از توده اصلی خاک در اثر ضربه قطرات باران کاهش یافته و فرآیندهای تخریبی با شدت کم‌تر رخ می‌دهد. به علاوه هر چه درصد سیلت و درصد کربنات کلسیم معادل (ممکن است درصد ذرات کربنات کلسیم به صورت ذراتی در اندازه ذرات سیلت در توده خاک موجود بوده باشد) بیش‌تر فرآیندهای تخریبی با شدت بیش‌تری رخ می‌دهد. این نتایج با بخشی از یافته‌های واعظی و عبادی (۳۳) که بیان داشتند انتقال‌پذیری ذرات خاک (شن، سیلت و رس) در اثر فرسایش سطحی به ماهیت ذرات بستگی دارد مطابقت داشت.

نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد درصد شیب و محتوای رطوبت پیشین اثری معنی‌داری بر فرسایش پاشمانی، درصد تراکم خاک و مقاومت سطح دارند. افزایش درصد شیب اثر افزایشی بر فرسایش پاشمانی، تراکم و مقاومت سطح خاک داشت. با این وجود محتوای رطوبت پیشین در بافت‌های متفاوت خاک اثر متفاوتی بر مقدار پیامدهای فرسایشی بارانی داشتند و ماهیت ذرات و ویژگی‌های بافت‌های خاک موجب اثر متفاوت رطوبت خاک بر این پیامدها شد. فرسایش پاشمانی همچنین تحت تأثیر درصد شن خاک قرار گرفت. از میان ویژگی‌های شیمیایی تنها درصد کربنات کلسیم معادل با فرسایش پاشمانی، درصد

منابع

- 1- Assouline S., Tessier D., and Tavares-Filho J. 1997. Effect of compaction on soil physical and hydraulic properties: experimental results and modeling. *Soil Science Society of America Journal*, 61(2): 390-398.
- 2- Becher H.H. 1998. Resistances to penetration of aggregates from loess-derived topsoils at different soil water tensions, *Soil and Tillage Research*, 47: 73-81.
- 3- Darvishan A.V., Dadeghi S., Homae 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 Research Journal*, 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: 47-52.
- 5- Dexter A.R., Czyz E.A., and Gate O.P. 2007. A method for prediction of soil penetration resistance. *Soil and Tillage Research*, 93(2): 412-419.
- 6- Diaz-Zorita M., and Grosso G.A. 2000. Effect of soil texture, organic carbon and water retention on the compactability of soils from the Argentinean pampas. *Soil and Tillage Research*, 54(1): 121-126.
- 7- Ekwue E.I., and Harrilal A. 2010. Effect of soil type, peat, slope, compaction effort and their interactions on infiltration, runoff and raindrop erosion of some Trinidadian soils. *Biosystem Engineering*, 105: 112-118.
- 8- Ghadiri H. 2004. Crater formation in soils by raindrop impact. *Earth Surf Processes Landforms*, 29: 77-89
- 9- Humberto B., and Lal R. 2008. *Principles of Soil Conservation and Management*, Springer.
- 10- Kemper W. D., and Rosenau R. C. 1984. Soil cohesion as affected by time and water content. *Soil Science Society of America Journal*, 48(5): 1001-1006.

- 11- 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*, 241-242: 210-220
- 12- Kianiharchegani 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 Soil and Water Research Journal*, 46(4): 631-640. (In Persian)
- 13- Kinnell P.I. A., and Risse L. M. 1998. USLE-M: empirical modeling rainfall erosion through runoff and sediment concentration. *Soil Science Society of America Journal*, 62(6): 1667-1672.
- 14- Kinnell P.I.A. 2005. Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: a Review. *Hydrological Processes*, 19: 2815-2844.
- 15- Kinnell P.I.A. 2009. The influence of raindrop induced saltation on particle size distributions in sediment discharged by rain-impacted flow on planar surfaces. *Catena*, 78: 2-11.
- 16- Lal R. 2010. Beyond Copenhagen: mitigating climate change and achieving food security through soil carbon sequestration. *Food Security*, 2(2): 169-177.
- 17- Lanza N. 2011. Studying signatures of water on Mars at the macro and micro scales: Orbital analyses of hillslope geomorphology and ChemCam calibration for surficial rock chemistry, PhD dissertation, The University of New Mexico.
- 18- Lu J., Zheng F., Li G., Bian F., and An J. 2016. The effects of raindrop impact and runoff detachment on hillslope soil erosion and soil aggregate loss in the Mollisol region of Northeast China. *Soil and Tillage Research*, 161: 79-85.
- 19- Maroufpoor E., Faryabi A., Ghamarnia H., and Moshrefi Gh. 2010. Evaluation of uniformity coefficients for sprinkler Irrigation systems under different field conditions in Kurdistan Province. *Soil and Water Resources*, 5(4): 139-145.
- 20- Nord G., and Esteves M. 2005. PSEM_2D: A physically based model of erosion processes at the plot scale. *Water Resources Research*, 41(8):1-14
- 21- Page A.L., Miller R.H., and Jeeney D.R. 1992. Methods of soil analysis, part 2. Chemical and Mineralogical Properties, Soil Science Society American Publication. Madison (1159 pp.).
- 22- Rezaie Pasha M., Kaviani A., and Vahabzade GH. 2012. Experimental study of splash erosion and its relation with some soil properties in three adjacent land uses (a case study: Kasilian Watershed). *Journal of Water and Soil Science*, 15(58): 257-269. (In Persian)
- 23- Rowell D. I. 1994. *Soil Science: Methods and Application*. Longman Group. Harlow, PP: 345.
- 24- Saedi T., Shorafa M., Gorji M., and Moghadam B.K. 2016. Indirect and direct effects of soil properties on soil splash erosion rate in calcareous soils of the central Zagross, Iran: A laboratory study. *Geoderma*, 271: 1-9.
- 25- Shirazi M.A., and Boersma L. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Science Society of America Journal*, 48 (1): 142-147.
- 26- Smith C.W., Johnston M.A., and Lorentz S. 1997. The effect of soil compaction and soil physical properties on the mechanical resistance of South African forestry soils. *Geoderma*, 78(1): 93-111.
- 27- Soane B. D., and van Ouwerkerk C. (Eds.). 2013. *Soil compaction in crop production*, (Vol. 11). Elsevier.
- 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- To J., and Kay B.D. 2005. Variation in penetrometer resistance with soil properties: the contribution of effective stress and implications for pedotransfer functions. *Geoderma*, 126(3): 261-276.
- 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- Truman C.C., Bradford J.M., and Ferris J.E. 1990. Antecedent water content and rainfall energy influence on soil aggregate breakdown. *Soil Science Society of America Journal*, 154 (5): 1385-1392.
- 32- Utset A., and Cid G. 2001. Soil penetrometer resistance spatial variability in a Ferralsol at several soil moisture conditions. *Soil and Tillage Research*, 61(3): 193-202.
- 33- Vaezi A.R., and Ebadi M. 2017. Particle size distribution of surface-eroded soil in different rainfall intensities and slope gradients. *Journal of Water and Soil*, 31: 216-229. (In Persian)
- 34- Vaezi A., Akbari S., and Mohamadi M. 2015. Study of rainfall processes in calcareous soils aggregates under laboratory conditions in NW Zanjan, Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 45(1): 87-94. (In Persian)
- 35- Vaezi A., Rostami S., and Mohamadi M. 2012. Temporal variations of aggregates breakdown and splash particles processes in a marl soil under simulated rainfall. *Iranian Journal of Soil Research*, 25(4): 362-371.
- 36- Van Dijk A.I.J.M., Bruijnzeel M., and Eisma E.H. 2003. A methodology to study rain splash and wash processes under natural rainfall. *Hydrology Process*, 17: 153-167.

- 37- 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.
- 38- Wei Y., Xinliang W., and Chongfa C. 2015. Splash erosion of clay–sand mixtures and its relationship with soil physical properties: The effects of particle size distribution on soil structure. *Catena*, 135: 254–262.
- 39- Wu X., Wei Y., Wang J., Xia J., Cai C., Wu L., Fu Z., and Wei Z. 2017. Effects of erosion degree and rainfall intensity on erosion processes for Ultisols derived from quaternary red clay, *Agriculture. Ecosystems and Environment*, 249: 226-236.
- 40- Wuddivira M.N., and Camps-Roach G. 2007. Effects of organic matter and calcium on soil structural stability. *European Journal of Soil Science*, 58: 722–727.
- 41- Yoder R.E. 1936. A direct method of aggregate analysis and a study of a physical nature of erosion losses. *Journal of American Agronomy*, 28: 337-351.

Investigation of the Relationships between Rainfall Erosion Processes, Slope and Antecedent Water Content in Semi-Arid Soils

A. Baliani^{1*}- A.R. Vaezi²

Received: 31-01-2018

Accepted: 02-09-2018

Introduction: Rainfall erosion results from the expenditure of the energy of falling raindrops and flowing water when these two agents act either singly or together. Soil erosion by rainfall is a serious ongoing worldwide environmental issue that contributes to soil and water quality degradation. Understanding raindrop-impact-induced erosion processes are key to design and apply soil management techniques that minimize and control soil erosion risk. Water erosion and especially raindrop-impact-induced erosion is the primary agents that cause soil erosion-induced degradation and has been identified as one of the major processes contributing to the soil and water quality degradation. Soil degradation caused by rainfall raindrops impacts the soil surface disperses and splashes the soil, and displaces particles from their original position. Raindrops striking the soil surface develop a raindrop-soil particle momentum before releasing their energy in the form of the splash. Other causes of soil degradation are including compaction and penetration resistance.

Materials and Methods: This study was conducted to investigate the raindrop-impact-induced erosion in relation to slope gradient (0, 10, 20, and 30%) and antecedent moisture content or AMC (air dried, quarter saturation, semi saturation, and saturation). Toward this, six soil texture classes were exposed to simulated rainfalls with 40 mm h⁻¹ in intensity for 15-min in four slope gradients and four antecedent moisture contents. Rainfall was simulated using rainfall simulator from soil erosion laboratory of the University of Zanjan with 3-meter height and surface of 2 m². A total of 288 experimental soil boxes with 25 cm × 35 cm dimensions and 5-cm depth were investigated using the completely randomized block design with three replications. Data of soil erosion processes include splash erosion particles amount caused raindrop impact, soil resistance ratio after rainfall using penetrometer, and compaction percent using bulk density after and before rainfall was measured and then compared using Duncan's test among the slope steepness and antecedent moisture content

Results and Discussion: Significant relationships were found between the splash erosion rate, soil resistance ratio and soil compaction means ($P < 0.01$). The results showed that silt soil carried the highest mean value in splash erosion rate with 1574.93 gm⁻² h⁻¹, soil resistance ratio with 10.53 and soil compaction with 17.43 percent, while sand soil carried the lowest mean value in splash rate with 437.37 gm⁻² h⁻¹, soil resistance ratio with 2.66 and soil compaction with 0.25 percent. Soil erosion processes were significantly affected by slope gradient and AMC. Soil erosion processes showed a decreasing rate in 0 slope degree and increasing rate in 30 slope degree and also decreasing rate in air dried and increasing rate in semi saturation AMC. Significant correlations ($P < 0.01$ and 00.05) were found between soil erosion processes and sand, silt, geometric mean particle diameter, bulk density, saturated hydraulic conductivity, and calcium bicarbonate equivalent. among the physical properties of the studied soils, the sand percentage, bulk density, and Geometric mean diameter showed a negative significant correlation with splash erosion, soil compaction, and soil resistance, and the percentage of silt and calcium carbonate content with splash erosion, soil compaction, and soil resistance were positive significant correlated. The cause of this negative and positive correlation might be dependent on particles size and more percent of coarse particles, the transfer of particles from the soil mass is reduced due to raindrops and degradation processes occur with less intensity. In addition, destruction processes with more intensity occurred with increasing silt and lime percent.

Conclusion: Increasing the slope gradient has an incremental effect on the amount of rainfall erosion processes i.e. sediment load, penetration ratio, and soil compaction value. However, antecedent moisture content in various soil textures has the different effect on the amount of rainfall erosion processes. Among the soil chemical properties, only calcium carbonate equivalent with splash erosion, density, and soil surface resistance was positively correlated and chemical properties such as a percentage of organic matter and exchangeable

1 and 2- Ph.D. Student and Associate Professor, Department of Soil Science, University of Zanjan, Zanjan
(*- Corresponding Author Email: alibaliani63@gmail.com)

sodium percent no significant correlated with soil erosion processes. In other words, the physical nature of soil-forming particles such as particle size, as well as some of the chemical properties of soil particles such as organic matter, have a more effect on soil degradation, density, and soil resistance ratio. also the role of soil physical properties such as sand percent and calcium carbonate equivalent on the rainfall processes were more than soil chemical properties. In general, increasing the percent of silt and lime in the soil, unlike sand, was increased the sensitivity of the soil to the rainfall erosion and as a result increasing the splash erosion leads to increased soil compaction and soil resistance ratio.

Keywords: Rainfall simulation, Soil Compaction, Soil properties, Soil resistance, Splash erosion

