

بررسی هدررفت خاک در کرت‌های کوچک حاوی خاک‌های با بافت مختلف در رخدادهای پیاپی باران شبیه‌سازی شده

علی‌رضا واعظی* و حیدر حسن‌زاده^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۵/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۱۵)

چکیده

آگاهی از تغییرات خصوصیات خاک از رخدادی به رخداد دیگر، برای تعیین دوره‌های بحرانی حساسیت خاک به فرآیندهای فرسایش حائز اهمیت است. این پژوهش به منظور بررسی هدررفت خاک در رخدادهای پیاپی باران در استان زنجان انجام گرفت. پس از شناسایی ۱۰ کلاس بافتی، نمونه‌های خاک‌ها در سه تکرار به کرت‌هایی کوچک (۶۰ سانتی‌متر × ۸۰ سانتی‌متر) به عمق ۲۰ سانتی‌متر در زمینی با شیب ۸ درصد منتقل شدند. کرت‌ها در معرض ۱۰ رخداد باران شبیه‌سازی شده با شدت ۵۵ میلی‌متر بر ساعت و مدت ۳۰ دقیقه با فاصله پنج روز قرار گرفتند. در مجموع ۳۰۰ رخداد باران بر کرت‌ها اعمال شد. نتایج نشان داد که رطوبت نگهداشته شده، تولید روان‌آب و هدررفت خاک تحت تأثیر معنی‌دار رخداد باران قرار گرفتند ($P < 0/001$). افزایش رطوبت خاک و در نتیجه کاهش ظرفیت نفوذ، عامل اصلی افزایش تولید روان‌آب و هدررفت خاک در رخدادهای پیاپی باران بود به طوری که حدود ۸۴ درصد از تغییرات هدررفت خاک طی رخدادهای باران براساس رطوبت پیشین خاک قابل بیان بود. پس از رخداد پنجم به دلیل رسیدن رطوبت خاک به حد ظرفیت نگهداری آب، تغییرات چشمگیری در نفوذپذیری و تولید روان‌آب مشاهده نگردید. با این حال، هدر رفت خاک پس از رخداد پنجم به دلیل وجود ذرات فرسایش پذیر بیشتر در سطح خاک و در نتیجه افزایش غلظت جریان‌های سطحی، همچنان الگویی افزایشی نشان داد.

واژه‌های کلیدی: باران شبیه‌سازی شده، رطوبت پیشین خاک، روان‌آب، نفوذپذیری خاک، فرآیندهای فرسایش خاک

۱. گروه خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: vaezi.alireza@gmail.com

مقدمه

فرسایش آبی یک فرآیند سه مرحله‌ای شامل جداسازی ذرات خاک در اثر ضربه قطرات باران و انتقال آنها توسط عوامل فرساینده مانند جریان آب و باد و در نهایت رسوب‌گذاری است. رسوب‌گذاری هنگامی رخ می‌دهد که انرژی کافی برای انتقال ذرات موجود نباشد (۲۴). هدررفت خاک یا تولید رسوب در یک زمین در اثر فرسایش آبی به عوامل زیادی بستگی دارد که از این میان می‌توان به بافت، ساختمان، سرعت نفوذ آب به خاک و ویژگی‌های باران اشاره کرد (۷). توانایی خاک در تولید روان‌آب و فرسایش خاک در طول زمان یکسان نیست بلکه با تغییر شرایط آب و هوایی، ویژگی‌های خاک و پوشش گیاهی در طول زمان تغییر می‌کند (۱۴). در اغلب مطالعات انجام شده در زمینه فرسایش، میزان هدررفت خاک و تولید رسوب در رخدادهای مشابه باران، ثابت در نظر گرفته می‌شود (۲۵). به‌رحال با تغییر شرایط خاک طی رخدادهای، قابلیت خاک در تولید رواناب و فرسایش‌پذیری خاک دستخوش تغییر می‌گردد. در مناطق خشک و نیمه‌خشک در کنار تغییرپذیری زمانی و مکانی بارش، تغییرات شرایط سطحی از جمله خصوصیات خاک و پوشش گیاهی از مهم‌ترین عوامل اثرگذار در تغییرات روان‌آب و رسوب در رخدادهای باران می‌باشند (۱۵). آگاهی از تغییرات زمانی خصوصیات خاک و تعیین دوره بحرانی که طی آن خاک حساس به فرآیندهای فرسایش می‌گردد، بسیار حائز اهمیت است (۶).

در اغلب پژوهش‌ها، تغییرات فرسایش خاک و تولید رسوب اغلب در مقیاس ماهانه یا فصلی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این راستا باجراچریا و همکاران (۶) با مطالعه تغییرات فصلی فرسایش در ایالت اوهایو نشان دادند که میزان هدررفت خاک و فرسایش‌پذیری آن در فصول مختلف متفاوت می‌باشد به طوری که فرسایش‌پذیری خاک طی زمستان و بهار به دلیل افزایش رطوبت خاک و پایین بودن مقاومت خاک بیشترین مقدار را داشت. طی تابستان با وجود فرسایندهایی بالای باران مقدار هدررفت خاک کم‌تر بود. مطالعات بی و همکاران

(۸) بر روی تغییرات فصلی خاک‌ها در دو فصل زمستان و تابستان در شمال چین نشان داد که میزان تولید رسوب در فصل زمستان ۳ تا ۱۰ برابر فصل تابستان است. آنها بیان کردند که افزایش رطوبت خاک و وجود سرما در فصل زمستان، عامل اصلی افزایش رسوب در خاک‌ها بود. در پژوهشی گائو و جوزفسون (۱۶) با مطالعه داده‌های جمع‌آوری شده رسوب حاصل از ۲۳ رخداد باران بین سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۰ در حوزه آبخیز نیویورک مرکزی در آمریکا به این نتیجه رسیدند که تغییرات فرآیند تولید رسوب نه تنها طی یک رخداد، بلکه از فصلی به فصل دیگر به دلیل تغییر شرایط آب و هوایی و شرایط سطح زمین متفاوت بود. آنها نشان دادند که بیشترین رسوب تولید شده مربوط به اواخر پاییز تا اوایل بهار بود. مطالعات خزایی و همکاران (۳) بر روی خاک‌های دو منطقه جنگلی تخریب شده و بکر در یکی از حوزه‌های آبخیز البرز مرکزی در استان مازندران نشان داد که میزان رسوب تولید شده تحت رخدادهای طبیعی باران با گذشت زمان از اوایل پاییز به سمت اواخر آن افزایش یافت. پژوهش‌های محمدی و کاویان (۴) بر روی تغییرات زمانی روان‌آب و رسوب در حوزه آبخیز معرف خامسان در استان کردستان تحت باران طبیعی نیز نشان داد که بیشترین مقدار رسوب در اوایل بهار و اواخر پاییز بود که دلیل آن را به ترتیب بارش‌های شدید همراه با ذوب برف در اوایل بهار و فرسایش‌پذیری بیشتر خاک در اواخر پاییز بیان کردند.

علاوه بر تغییرات فصلی یا ماهانه هدررفت خاک و تولید رسوب، عملکرد رسوب در حوزه‌های آبخیز از رخدادی به رخداد دیگر نیز تغییر می‌کند. تغییر ویژگی‌های خاک سطحی مانند تخلخل، میزان رطوبت خاک و نفوذپذیری عواملی مهم در تغییرات رسوب تحت رخدادهای باران می‌باشند (۲۱). یافته‌های ژو و وو (۳۵) نیز در حوزه‌های آبخیز شمال چین نشان داد که با افزایش رخدادهای بارندگی، غلظت رسوب افزایش یافت و میزان ذرات منتقله نیز بیشتر شد. آنها رطوبت اولیه خاک را عاملی مهم در این موضوع دانستند. نتایج بررسی‌های بایوا و همکاران (۵) نشان داد که رخدادهای



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی خاک‌های نمونه برداری شده

مواد و روش‌ها

شناسایی و نمونه برداری بافت‌های مختلف خاک و طرح آزمایش

این پژوهش در بخشی از خاک‌های استان زنجان تحت باران شبیه‌سازی شده در سال ۱۳۹۰ انجام گرفت. در این آزمایش مبنای تفرق خاک‌ها، تفاوت در بافت آنها بود. به هر حال تفرق بافت خاک ممکن است منجر به تفاوت خاک‌ها از نظر سایر ویژگی‌های فیزیکی (ساختمان، نفوذپذیری و ...) و شیمیایی (ماده آلی، سدیم تبادلی و ...) گردد. اگرچه سایر ویژگی‌های خاک غیر از توزیع اندازه ذرات (بافت)، به نوبه خود در رفتار خاک در برابر فرآیندهای فرسایشی نقش دارند، لیکن اهمیت بافت خاک و اثرپذیری سایر ویژگی‌های خاک از آن از دیدگاه فرسایش خاک بسیار نمایان است (۳۴). از اینرو برای اجرای آزمایش، پس از آزمایش‌های لمسی و تجزیه‌های آزمایشگاهی بافت در نمونه‌های مختلف، نهایتاً تعداد ۱۰ بافت مختلف خاک شامل رسی، لوم-رسی، رس-سیلتی، لومی، لوم رسی سیلتی، لوم رسی شنی، لوم-سیلتی، لوم شنی، شن لومی و شنی در محدوده استان شناسایی شد. با توجه به ابعاد شبیه‌ساز باران، کرت‌های فرسایشی به ابعاد ۶۰ سانتی‌متر × ۸۰ سانتی‌متر و عمق ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شدند و با استفاده از از ورق گالوانیزه مسدود شدند. براین اساس از هر خاک حدود ۵۰۰ کیلوگرم خاک برداشت و به ایستگاه آزمایشی انتقال داده شد. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی خاک‌های نمونه برداری شده را

بارندگی عاملی مهم در تولید روان‌آب و رسوب بوده و با افزایش روان‌آب طی پنج رخداد بارندگی، رسوب نیز افزایش پیدا کرد.

هر چند در مورد تغییرات زمانی فرسایش خاک تحت شرایط باران طبیعی و شبیه‌سازی شده مطالعاتی انجام گرفته است، لیکن اغلب این پژوهش‌ها با هدف بررسی تغییرات فصلی یا سالانه فرسایش خاک و تولید رسوب در حوزه‌های آبخیز انجام گرفته است. در حالی که پاسخ یک خاک به فرآیندهای فرسایشی بسیار پیچیده بوده و از رخدادی به رخداد دیگر می‌تواند تغییر کند. بررسی این موضوع در خاک‌های مختلف در یک منطقه و تحت باران طبیعی بسیار دشوار است چرا که از یک سو دستیابی به تنوع خاک در منطقه‌ای با بارندگی یکنواخت، دشوار بوده و از سوی دیگر وقوع باران‌های طبیعی یکسان طی دوره زمانی آزمایش غیرمحمول می‌باشد. بنابراین استفاده از کرت‌های کوچک محتوی نمونه‌های خاک‌ها و بهره‌مندی از باران‌های شبیه‌سازی شده، امکان مقایسه رفتار هر خاک از نظر هدررفت خاک از رخدادی به رخداد دیگر را بهتر نمایان می‌سازد. از اینرو پژوهش حاضر به منظور بررسی تغییرات هدررفت خاک در بافت‌های مختلف خاک در رخدادهای باران شبیه‌سازی شده انجام گرفت.



شکل ۲. الف) نمایی از کرت‌های فرسایشی محتوی خاک‌های مختلف و ب) باران‌ساز مورد استفاده در آزمایش

نشان می‌دهد.

ایستگاه آزمایشی، عبارت از زمینی بکر با مساحت ۳۰۰ مترمربع و شیب کلی ۸ درصد شمالی به‌عنوان شیب رایج کشتزارهای دیم منطقه، واقع در مختصات جغرافیایی $48^{\circ} 25' 44''$ تا $48^{\circ} 25' 44''$ طول شرقی و $36^{\circ} 01' 52''$ تا $36^{\circ} 01' 53''$ عرض شمالی در محدوده دانشگاه زنجان بود. زمین مذکور دارای شیب لازم برای وقوع فرآیندهای فرسایشی بود (۳۴). پیش از شروع آزمایش اقدامات لازم از قبیل تسطیح زمین و حذف پوشش گیاهی از سطح آن انجام گرفت. سپس تعداد ۳۰ قطعه چارچوب کرت (۶۰ سانتی‌متر \times ۸۰ سانتی‌متر در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی برای انتقال ۱۰ بافت خاک در سه تکرار بر روی زمین جاگذاری شدند. در انتهای هر کرت، سوراخی برای خروج روان‌آب و رسوب و در قسمت بیرونی آن مخزنی برای جمع‌آوری روان‌آب و رسوب (با حجم ۱۰ لیتر) قرار داده شد. پس از استقرار چارچوب کرت‌ها، خاک‌ها تا ارتفاع ۱۳ سانتی‌متری در سه تکرار (در جهت شیب) به داخل آنها ریخته شدند (شکل ۲-الف). خاک‌ها در چند مرحله تحت آبیاری قرار گرفتند تا تراکم طبیعی آنها حفظ گردد.

اندازه‌گیری هدررفت خاک تحت رخدادهای باران

برای بررسی هدررفت خاک در رخدادهای یکسان باران، یک دستگاه شبیه‌ساز باران قابل حمل طراحی شد (شکل ۲-ب).

دستگاه مذکور دارای ۴۷۰ نازل قطره‌ساز بود که توانایی تولید بارانی با شدت بین ۵۵ و ۱۲۰ میلی‌متر بر ساعت را داشت. قطرات باران که براساس تعداد قطره خروجی از سر نازل برای حجم معینی آب به‌دست آمد، برابر با $3/27$ میلی‌متر بود. سطح بارش دستگاه متناسب برابر با 72×92 سانتی‌متر و ارتفاع آن از سطح کرت بیش از ۲۰۰ سانتی‌متر بود. برای بررسی تغییرات هدررفت خاک در رخدادهای باران، تعداد ۱۰ رخداد باران از اواسط تابستان تا اوایل پاییز ۱۳۹۰ به فاصله پنج روز از همدیگر روی ۳۰ کرت فرسایشی، در مجموع به تعداد ۳۰۰ رخداد بارندگی اعمال شد. شدت و مدت بارندگی در تمام رخدادهای ثابت و به‌ترتیب برابر با ۵۵ میلی‌متر بر ساعت و ۳۰ دقیقه بود. انتخاب چنین رگباری بر مبنای تجزیه و تحلیل شدت‌های بارندگی در نزدیکترین ایستگاه باران‌نگاری منطقه (ایستگاه قلتوق) در دوره آماری ۱۰ ساله (سال ۱۳۸۰-۱۳۹۰) بود. براین اساس شدت باران‌ها در منطقه از ۵ تا ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت با تداوم ۳ تا ۶۰ دقیقه متغیر بوده و باران‌های دارای شدت ۵۵ میلی‌متر بر ساعت جزء باران‌های رایج در منطقه به ویژه در اوایل سال می‌باشند. انتخاب شدت‌های کمتر از ۵۵ میلی‌متر بر ساعت موجب بروز غیریکنواختی توزیع باران در سطح صفحه بارش دستگاه باران‌ساز می‌شد. اعمال اولین رخداد باران بر سطح کرت‌ها در شرایط کاملاً هوا خشک خاک‌ها آغاز شد.

صحرا (۱۳) و هدایت هیدرولیکی اشباع به‌روش بار ثابت (۲۳) اندازه‌گیری شدند.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

پس از جمع‌آوری و ثبت داده‌ها در محیط نرم‌افزاری Excel، برای تجزیه و تحلیل آماری از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۶ استفاده شد. در ابتدا آزمون نرمال بودن توزیع آماری داده‌ها به‌روش هیستوگرام و با تحلیل چولگی و کشیدگی داده‌ها انجام گرفت. تفاوت رخدادهای باران از نظر تولید روان‌آب و هدررفت خاک و رطوبت اولیه خاک‌ها به‌روش مقایسه میانگین با استفاده از آزمون دانکن بررسی شد. تغییرات رخداد به رخداد رطوبت نگهداشته شده، روان‌آب، غلظت رسوب و هدررفت خاک به‌طور هم‌زمان رسم و مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برای تعیین رابطه بین هدررفت خاک طی رخدادهای و عوامل مؤثر بر آن از توابع مختلف (خطی، نمایی و ...) بهره گرفته شد.

نتایج و بحث

جدول ۱ نتایج برخی شاخص‌های آماری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های منطقه مورد مطالعه در استان زنجان را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود خاک منطقه دارای مواد آلی پایین (بین ۰/۲ تا ۱ درصد) و با توجه به وجود مقدار کربنات کلسیم معادل (به‌طور میانگین ۱۷/۴ درصد) خاک‌های مورد بررسی در گروه خاک‌های آهکی (با بیش از ۱۰ درصد کربنات کلسیم معادل) قرار داشتند. درصد سدیم تبادلی خاک‌ها بالا (به‌طور میانگین ۹/۹۱) بود و به‌عنوان یکی از عوامل افزایش حساسیت خاک‌ها به فرآیندهای فرسایش آبی بود.

بر اساس نتایج از مجموع ۳۰۰ رخداد بارندگی (۱۰ رخداد بارندگی در ۳۰ کرت)، تنها ۲۳۴ رخداد منجر به روان‌آب و هدررفت خاک شدند. نتایج تجزیه واریانس اثر ۱۰ رخداد بارندگی بر رطوبت اولیه خاک، تولید روان‌آب، غلظت رسوب و هدررفت خاک (جدول ۲) نشان داد که هر یک از متغیرهای مذکور، تحت تأثیر معنی‌دار رخدادهای بارندگی قرار گرفتند

برای اندازه‌گیری هدررفت خاک در هر رخداد، ابتدا حجم مخلوط روان‌آب و رسوب داخل ظرف پایین‌دست هر کرت در کرت‌ها آزمایشی اندازه‌گیری شد. سپس ظرف محتوی مخلوط به‌طور دستی کاملاً هم‌زده شد و نمونه‌ای همگن از آن با حجم حدود نیم لیتر به آزمایشگاه منتقل و وزن و حجم آن تعیین شد (۱۸). در آزمایشگاه رسوب نمونه از روان‌آب جدا شد و پس از خشک شدن در آون (۱۰۵ درجه سلسیوس به‌مدت ۲۴ ساعت) وزن گردید. از تقسیم مقدار رسوب بر حجم مخلوط، غلظت رسوب بر حسب گرم در لیتر به‌دست آمد. مقدار روان‌آب و هدررفت خاک براساس غلظت رسوب و حجم کل مخلوط به‌دست آمد (۳۱). به‌این ترتیب مقدار روان‌آب (میلی‌متر) و هدررفت خاک (گرم در مترمربع) برای هر کرت به‌طور جداگانه در ۱۰ رخداد تعیین شد. از آن‌جا که مقدار رطوبت اولیه خاک تأثیر بسزایی بر تغییرات تولید روان‌آب و هدررفت خاک در رخدادهای باران دارد (۱۰)، مقدار رطوبت نگهداشته شده در خاک‌ها پیش از اعمال هر رخداد باران شبیه‌سازی شده به‌روش وزنی (۱۳) در خاک‌ها اندازه‌گیری شد.

تعیین ویژگی‌های خاک‌ها

مقداری از هر خاک پس از خشک شدن در برابر هوا و گذراندن از الک ۲ میلی‌متر برای تعیین ویژگی‌های خاک به آزمایشگاه منتقل شد. توزیع نسبی اندازه ذرات به‌روش هیدرومتری (۱۷)، درصد سنگریزه (قطر ۲ تا ۸ میلی‌متر) به‌روش وزنی، جرم مخصوص حقیقی به‌روش پیکنومتر (۱۹)، رطوبت اشباع به‌روش وزنی (۱۳)، ماده آلی به‌روش والکی و بلاک (۳۰)، کربنات کلسیم خاک به‌روش خنثی‌سازی توسط اسیدکلریدریک نرمال (۱۹)، مقدار گچ (CaSO_4 و $2\text{H}_2\text{O}$) به‌روش استون (۱۱)، درصد سدیم تبادلی (ESP) به‌روش استات آمونیوم (۲۱)، واکنش خاک (pH) در گل اشباع به‌وسیله pH متر، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع به‌وسیله EC متر و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به‌روش باور (۲۶) اندازه‌گیری شدند. جرم مخصوص ظاهری نیز با روش سیلندر فلزی در

جدول ۱. برخی مشخصات آماری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

ویژگی	کمترین	بیشترین	میانگین	انحراف معیار
شن (درصد)	۸/۳۴	۸۷/۵۱	۴۰/۶۷	۲/۷۹
سیلت (درصد)	۳/۵۸	۶۲/۹۷	۲۹/۲۱	۱۸/۱۷
رس (درصد)	۸/۶۱	۶۸/۹۳	۳۰/۱۰	۱۶/۱۴
جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب)	۱/۰۳	۱/۶۵	۱/۳۲	۰/۱۷
رطوبت اشباع (درصد)	۲۶/۹۲	۷۲/۱۳	۴۹/۲۸	۱۶/۲۹
هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی متر بر ساعت)	۱/۱۹	۹/۵۶	۳/۷۱	۲/۶۴
واکنش خاک	۷/۱۵	۷/۷۱	۷/۳۸	۰/۲۰
قابلیت هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	۰/۵۴	۲/۵۳	۱/۵۵	۰/۴۹
درصد سدیم تبادلی	۴/۳۳	۱۶/۴۵	۹/۹۱	۴/۰۷
ماده آلی (درصد)	۰/۱۶	۱/۱۱	۰/۶۱	۰/۵۶
کربنات کلسیم معادل (درصد)	۱۲/۸۷	۲۵/۸۷	۱۷/۳۶	۴/۱۷

جدول ۲. تجزیه واریانس اثر رخدادهای باران بر رطوبت نگهداشته شده، تولید روان‌آب، غلظت رسوب و هدررفت خاک

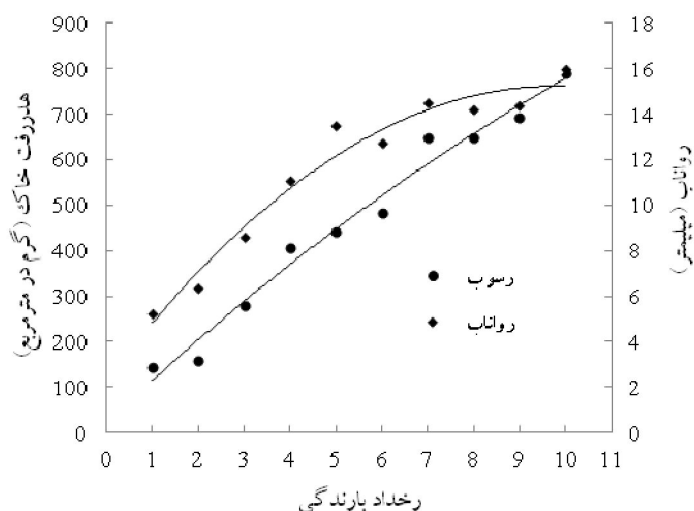
منبع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	سطح معنی داری
رطوبت اولیه خاک	۹	۱۷/۵۲	۵۷/۳۳	۰/۰۰۰
تولید روان‌آب	۹	۴۳/۵۵	۵۰/۷۵	۰/۰۰۰
غلظت رسوب	۹	۱۴۱/۰۶	۱۷/۰۲	۰/۰۰۰
هدررفت خاک	۹	۱۵۳۴۷۴/۸۱	۱۹/۵۸	۰/۰۰۰

افزایش رطوبت نگهداشته شده در خاک در طی این رخدادها کمتر از رخدادهای پیشین بود. در واقع رطوبت نگهداری شده در خاک‌ها از رخدادی به رخداد دیگر افزایش یافت و در نهایت در رخدادهای پایانی مقدار رطوبت نگهداری شده در خاک به حد ظرفیت نگهداری آب نزدیک شد و از آن پس افزایش قابل توجهی پیدا نکرد. در این نقطه رطوبتی به دلیل آنکه کاهش هدایت هیدرولیکی خاک ناچیز بود، افزایش تولید روان‌آب نیز روندی تدریجی نشان داد.

هدررفت خاک از رخداد اول تا رخداد دهم همگام با رواناب افزایش پیدا کرد (شکل ۳). با این وجود روند افزایش هدررفت خاک از رخدادی به رخداد دیگر از الگویی تقریباً خطی پیروی کرد. از آنجا که روان‌آب سطحی عامل اصلی انتقال ذرات جدا شده بود، افزایش هدررفت خاک از رخداد

($P < 0/001$). بررسی هم‌زمان روان‌آب و هدررفت خاک تحت ۱۰ رخداد باران برای کل خاک‌ها (شکل ۲) نشان داد که به‌طور کلی مقدار روان‌آب و هدررفت خاک از رخدادی به رخداد دیگر افزایش پیدا کرد به‌طوری‌که بیشترین مقدار روان‌آب (۱۵/۹ میلی‌متر) و بالاترین مقدار هدررفت خاک (۷۸۸/۹ گرم در مترمربع) در رخداد دهم بارندگی در کل خاک‌ها مشاهده شد.

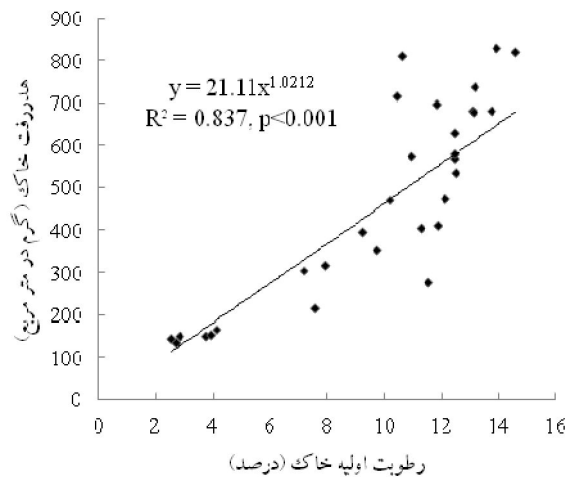
تولید روان‌آب از رخداد اول تا رخداد هفتم ابتدا با روندی فزاینده و سپس با روندی تدریجی افزایش پیدا کرد. تخریب خاکدانه‌ها و کاهش تخلخل درشت خاک از یک سو و افزایش رطوبت نگهداشته شده در خاک از سوی دیگر علل افزایش تولید روان‌آب از رخدادی به رخداد دیگر بودند. علت روند تدریجی افزایش روان‌آب در رخدادهای پایانی این بود که



شکل ۳. تغییرات هدررفت خاک و تولید روان‌آب در خاک‌ها تحت رخدادهای یکسان باران

نیز بیان کردند که فراوانی رخدادهای باران می‌تواند نقش مهمی را در تخریب و هدررفت خاک ایفا کند. هر چند در پژوهش حاضر افزایش روان‌آب در رخدادهای پایانی زیاد نبود، به‌نظر می‌رسد ظرفیت جداسازی و انتقال ذرات توسط جریان در این رخدادهای به‌طور نسبی افزایش یافت و به‌نوبه خود موجب شد نسبت خاک هدررفته در واحد حجم جریان (غلظت رسوب) نسبت به رخدادهای پیشین بیشتر باشد. بررسی‌های فیلو و همکاران (۱۵) در خاک‌های چینی طی رخدادهای باران شبیه‌سازی شده نیز نشان داد که مقادیر غلظت رسوب روان‌آب در شروع رخداد باران پایین هستند و تغییرات رسوب و غلظت آن در هر زمان مشابه با تغییرات روان‌آب در آن بود. نتایج پژوهش حاضر متفاوت از یافته‌هایی بود که در مورد افزایش روان‌آب و غلظت رسوب طی یک رخداد باران به‌دست آمده بودند. به‌عنوان مثال، ون‌تای و همکاران (۳۲) با بررسی خاک‌های جنگلی در چین نشان دادند که با گذشت زمان از شروع یک رخداد بارندگی، مقدار روان‌آب و غلظت رسوب هر دو افزایش یافته و پس از گذشت مدتی به یک حالت پایدار رسیدند. شی و همکاران (۲۸) نشان دادند که با گذشت زمان از شروع رخداد بارندگی، میزان فرسایش و غلظت رسوب ابتدا افزایش سریعی نشان داده و سپس با روندی تدریجی افزایش

اول تا رخداد هفتم به‌دلیل افزایش تولید روان‌آب طی این رخدادهای اول و دوم به‌دلیل رطوبت بسیار پایین خاک و مقاومت بالای خاکدانه‌ها، میزان هدررفت خاک بسیار پایین بود (حدود ۱۳۰ گرم در مترمربع). در رخداد سوم به‌دلیل افزایش نسبی محتوای رطوبتی خاک و در معرض قرار گرفتن ذرات فرسایش‌پذیر در سطح، هدررفت خاک افزایشی چشمگیر پیدا کرد (۲۸۰ گرم در مترمربع). از این رخداد به‌بعد همچنان افزایش محتوای رطوبتی خاک از یک سو و ایجاد ذرات فرسایش‌پذیر بیشتر از سوی دیگر، انتقال بیشتر ذرات از سطح را فراهم آورد. در رخدادهای پایانی (هفتم به بعد) گرچه افزایش تولید روان‌آب ناچیز بود لیکن به‌دلیل وجود ذرات فرسایش‌پذیر در سطح، همچنان شدت هدررفت خاک بالا بود. ترومن و همکاران (۲۹) نیز بیان کردند که افزایش رطوبت اولیه خاک ناشی از بارش‌های قبلی باعث کاهش پایداری خاکدانه‌ها و نفوذپذیری خاک می‌شود که نتیجه آن تسهیل برداشت خاکدانه‌ها توسط قطره باران و در نهایت انتقال آنها به‌وسیله جریان‌های سطحی است. یافته‌های حمیدی نهرانی و همکاران (۲) در یک خاک مازنی نیز نشان داد که با افزایش روان‌آب در رخدادهای متناوب بارندگی، رسوب هم به‌صورت معنی‌داری ($P < 0.001$ و $R^2 = 0.91$) افزایش یافت. مارکز و همکاران (۲۲)

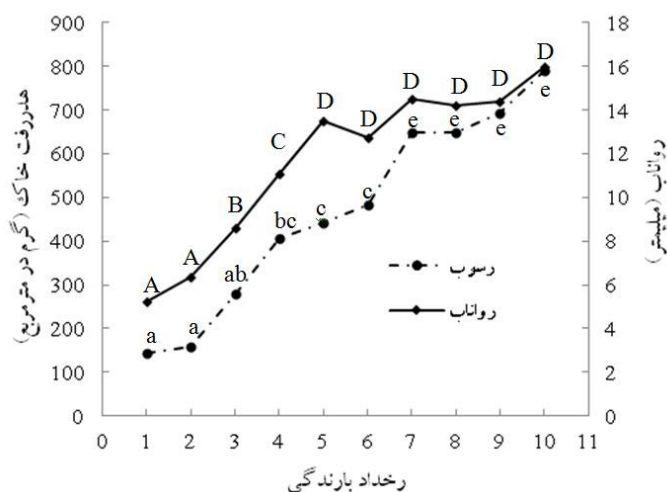


شکل ۴. رابطه بین هدررفت خاک و رطوبت اولیه در خاک‌ها تحت رخدادهای بارندگی

اصلی تشدید هدررفت خاک از رخدادی به رخداد دیگر دانست. روز- سینوگا و رومرو- دیاز (۲۷) با بررسی میزان تخریب خاک تحت باران شبیه‌سازی شده نشان دادند که قطرات باران با افزایش مقدار رطوبت خاک، تخریب‌پذیری آن را افزایش می‌دهند. همچنین یافته‌های کانتون و همکاران (۱۲) نشان داد که با افزایش روان‌آب در سه رخداد بارندگی، رسوب نیز به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت. در پژوهشی ترومن و همکاران (۲۹) با بررسی رفتار دو نوع خاک از نظر رطوبت اولیه و فرآیندهای فرسایش و روان‌آب تحت باران شبیه‌سازی شده در گرجستان نشان دادند که افزایش رطوبت اولیه خاک (تا حد ۴۰ درصد) نفوذپذیری خاک را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داده و باعث افزایش روان‌آب و تحویل رسوب می‌گردد. آنها رطوبت اولیه خاک را یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در فرآیند فرسایش خاک بیان کردند. ارشم و همکاران (۱) با بررسی میزان تولید رسوب در سه نوع خاک با بافت سبک، متوسط و سنگین تحت باران شبیه‌سازی شده در استان خوزستان نیز به این نتیجه رسیدند که با بالا رفتن رطوبت خاک از حالت هواخشک تا نزدیک به اشباع و طولانی‌تر شدن زمان بارش، تولید رسوب نیز افزایش یافت. وی و همکاران (۳۱) نیز با بررسی اثر رطوبت اولیه خاک بر تولید روان‌آب و فرسایش خاک در پنج نوع خاک با کاربری مختلف در چین نشان دادند که

پیدا کرد. دلیل این پدیده وابستگی فرآیند فرسایش به محدودیت در سیستم انتقال رسوب و جداسازی ذرات به‌وسیله قطرات باران بود. ژین و همکاران (۲۰) نیز با بررسی تغییرات زمانی روان‌آب و غلظت رسوب تحت شرایط مختلف رطوبت اولیه و مدیریت خاک نشان دادند که در حالت شخم مرسوم با گذشت زمان از شروع رخداد، مقدار روان‌آب و غلظت رسوب افزایش یافت.

نتایج نشان داد که هدررفت خاک رابطه‌ای معنی‌دار با رطوبت اولیه خاک دارد ($R^2 = 0.84$, $P < 0.001$) (شکل ۴). حدود ۸۴ درصد تغییرات هدررفت خاک طی رخدادهای باران در خاک‌ها براساس رطوبت پیشین خاک قابل بیان بود. خاک‌های مورد بررسی پیش از به‌کارگیری باران شبیه‌سازی شده به‌حالت هوا خشک بودند. با اعمال باران‌ها، مقدار رطوبت نگهداشته‌شده در خاک‌ها افزایش یافت. افزایش رطوبت خاک پیش از اعمال هر باران موجب شد که مکش خاک به سرعت کاهش یابد و در نتیجه سرعت نفوذ آب به خاک به‌طور عمده تحت تأثیر نیروی گرانش زمین قرار گیرد. به‌این دلیل سرعت و مقدار نفوذ آب به خاک با افزایش رطوبت پیشین کاهش یافت و در نتیجه تولید روان‌آب و به‌دنبال آن هدررفت خاک بیشتر شد. به‌طورکلی افزایش محتوای رطوبتی خاک و در نتیجه افزایش تولید روان‌آب را می‌توان عامل



شکل ۵. مقایسه آماری میزان تأثیر رخدادهای باران بر رطوبت نگهداشته شده و هدررفت خاک در خاک‌ها (حروف انگلیسی کوچک و بزرگ، نشان‌دهنده گروه‌های آماری رخدادهای باران به ترتیب از نظر هدررفت خاک و رواناب می‌باشند).

می‌رود نسبت تخریب خاکدانه‌ها در رخدادهای آغازین بیشتر از رخدادهای پسین باشد. تورم‌پذیری سریع ذرات خشک در اثر جذب آب نیز این فرایند را تشدید می‌کند. بلانکو و لال (۹) نیز بیان کردند که خاکدانه‌های خشک نسبت به خاکدانه‌های مرطوب، آب باران را سریع‌تر جذب کرده و در نتیجه با انبساط خود، زمینه فروپاشی توسط قطرات باران را در ادامه بارندگی فراهم می‌کنند. بررسی‌های وایلی (۳۳) نشان داد که با افزایش تعداد و تداوم رخدادهای باران، ساختمان خاک بیشتر تخریب شده و در اثر افزایش رطوبت اولیه خاک طی رخدادهای باران، نفوذپذیری خاک کاهش و تولید رواناب و رسوب به‌طور معنی‌دار ($P < 0/001$) افزایش یافت. هر چند تغییرات رطوبت اولیه خاک از رخداد پنجم تا رخداد دهم در خاک‌ها قابل توجه نبود لیکن تغییرات خصوصیات خاک سطحی در فاصله بین رخدادهای ششم و هفتم به‌ویژه از نظر بروز ریزپستی و بلندهای سطحی (Microtopography) ناشی از تأثیر باران نیز به‌نوبه خود موجب گردید تولید رسوب و در نتیجه هدررفت خاک طی این رخدادهای افزایشی معنی‌دار در خاک‌ها داشته باشد. از رخداد هفتم تا رخداد دهم تخریب نسبی ساختمان خاک به‌طور نسبی به پایان رسید و اگرچه تولید رواناب تقریباً مشابه بود، ظرفیت جداسازی و انتقال ذرات توسط جریان تا

در رخدادهای مشابه مقادیر روان‌آب و رسوب متفاوت است. این تغییرات به دلیل تفاوت معنی‌دار ($P < 0/05$) در رطوبت اولیه خاک بین رخدادهای باران بود.

مقایسه آماری رطوبت اولیه خاک و هدررفت خاک در رخدادهای بارندگی (شکل ۵) نیز نشان داد که مقدار رطوبت اولیه خاک در رخدادهای اول و دوم کمترین بود و از اینرو هدررفت خاک نیز در آنها به دلیل بالا بودن ظرفیت نفوذ آب خاک، کمتر از رخدادهای پسین بود. در واقع بخش عمده بارندگی طی این رخدادهای خاک‌ها جذب شد و به دلیل پایین بودن تولید روان‌آب، انتقال ذرات خاک نیز کاهش یافت. افزایش هدررفت خاک در رخدادهای سوم، چهارم و پنجم نسبت به همدیگر تا اندازه‌ای قابل توجه بود. هر چند تغییرات زمانی خصوصیات خاک سطحی از جمله ساختمان خاک، میزان فرسایش خاک را طی این رخدادهای تحت تأثیر قرار داد (۱۰)، اما افزایش چشمگیر مقدار رطوبت اولیه خاک و کاهش نفوذپذیری خاک از رخداد سوم تا رخداد پنجم عامل اصلی افزایش هدررفت خاک طی این رخدادهای بود. از آنجا که خاکدانه‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل پایین بودن عوامل پیوند دهنده ذرات (ماده آلی و غیره) پایداری اندکی در برابر نیروهای خارجی از جمله ضربه قطرات باران دارند، تصور

اندازه‌ای بالا بود. با این وجود تفاوت قابل ملاحظه‌ای در هدررفت خاک در این رخدادهای مشاهده نگردید.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که مقدار آب نگهداشته شده در خاک‌ها، تولید روان آب و هدررفت خاک تحت تأثیر معنی‌دار رخدادهای پیاپی باران شبیه‌سازی شده قرار گرفتند. در رخدادهای آغازین (اول و دوم)، نسبت تخریب خاکدانه‌ها به دلیل خیس شدن سریع ذرات بالا بود. با این حال به دلیل پایین بودن رطوبت خاک، تولید روان آب و در نتیجه هدررفت خاک بسیار پایین بود. از رخدادهای سوم تا رخدادهای پنجم همگام با افزایش رطوبت پیشین خاک، تولید روان آب و در نتیجه هدررفت خاک به شدت افزایش یافت. در رخدادهای بعدی رطوبت نگهداشته شده در خاک به حد تقریباً ثابتی رسید و موجب شد ظرفیت نفوذ آب به خاک کاهش چشمگیری پیدا نکند. از اینرو افزایش قابل ملاحظه‌ای در تولید روان آب در این رخدادهای مشاهده نگردید. در این رخدادهای تخریب ساختمان خاک همچنان به‌طور نسبی ادامه داشت و منجر به ایجاد ذرات فرسایش‌پذیر بیشتر در سطح

خاک شد. در رخدادهای پایانی (هفتم به بعد) ظرفیت جداسازی ذرات توسط جریان به‌طور نسبی افزایش یافت و به‌نوبه خود موجب شد نسبت خاک هدررفته در واحد حجم جریان (غلظت رسوب) نسبت به رخدادهای پیشین بیشتر باشد. با این وجود این افزایش به دلیل عدم تغییرات قابل توجه در تولید روان آب، چشمگیر نبود. به‌طور کلی روند هدررفت خاک در رخدادهای اولیه مشابه با روند تولید روان آب بود. رطوبت خاک عامل اصلی تعیین‌کننده تولید روان آب و هدررفت خاک در رخدادهای پیاپی باران بود به‌طوری‌که حدود ۸۴ درصد از تغییرات هدررفت خاک طی رخدادهای باران در خاک‌ها براساس رطوبت پیشین خاک قابل بیان بود. این نتایج نشان می‌دهد که در خاک‌های با ساختمان ناپایدار مانند بسیاری از خاک‌ها در نواحی نیمه‌خشک، رطوبت خاک پیش از بارندگی به‌عنوان عاملی مهم در تعیین میزان هدررفت آب و خاک از کشتزارهای بدون پوشش می‌باشد. از اینرو آگاهی از تغییرات رطوبت خاک در یک منطقه می‌تواند در پیش‌بینی تولید روان آب در رخدادهای مختلف باران طی سال مؤثر واقع گردد.

منابع مورد استفاده

۱. ارشم، ع.، م. آخوندعلی و ع. بهنیا. ۱۳۸۸. بررسی اثر رطوبت‌های قبلی خاک بر مقادیر روان آب و رسوب با استفاده از باران شبیه‌سازی شده. فصلنامه علمی- پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان ایران ۱۶(۴): ۴۴۵-۴۵۵.
۲. حمیدی نهرانی، س.، ع. ر. واعظی، م. ح. محمدی و ج. صبا. ۱۳۹۰. تغییرات زمانی تولید روان آب و هدررفت خاک تحت باران شبیه‌سازی شده. دوازدهمین کنگره علوم خاک ایران. دانشگاه تبریز. ۱۲ تا ۱۴ شهریور ۱۳۹۰.
۳. خزایی، م.، س. ح. ر. صادقی و س. خ. میرنیا. ۱۳۸۹. مقایسه میزان تولید روان آب و فرسایش خاک در تیمارهای جنگلی بکر و تخریب‌شده. ششمین همایش ملی علوم و مهندسی و چهارمین همایش ملی فرسایش و رسوب. دانشگاه تربیت مدرس. ۸ تا ۹ شهریور ۱۳۸۹.
۴. محمدی، م. ا. و ع. کاویان. ۱۳۸۹. بررسی تغییرات زمانی روان آب و رسوب‌دهی در مقیاس کرت. دوازدهمین کنگره علوم خاک ایران، تبریز، ۱۲ تا ۱۴ شهریور ۱۳۹۰.
5. Baihua, F., T. H. Lachlan, C. E. Newham and S. Ramos. 2010. A review of surface erosion and sediment delivery models for unsealed roads. Environ. Model. Softw. 25: 1-14.
6. Bajracharya, R. M., R. Lal and G. F. Hall. 1998. Temporal variation in properties of an uncropped, ploughed Miamian soil in relation to seasonal erodibility. J. Hydrolo. Process. 12: 1021-1030.
7. Bhattacharyya, R., M. A. Fullen, K. Davies and C. A. Booth. 2010. Use of palm-mat geotextiles for rain splash

- erosion control. *Geomorphology*. 119: 52-61.
8. Bi, N., Z. Yang, H. Wang, D. Fan, X. Sun and K. Lei. 2011. Seasonal variation of suspended-sediment transport through the southern Bohai Strait. *Estuarine, Coastal Shelf Sci.* 93(3): 239-247.
 9. Blanco, H. and R. Lal. 2008. *Principles of Soil Conservation and Management*. Springer Science, pp: 42-43.
 10. Bryan, R. B. 2000. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology*. 32: 385-415.
 11. Burt, R. 2009. *Soil survey field and laboratory methods manual*. Soil Survey Investigations Report No. 51. Lincoln, Nebraska.
 12. Canton, Y., A. Sole-Benet, C. Asensio, S. Chamizo and J. Puigdefabregas. 2009. Aggregate stability in range sandy loam soils relationship with runoff and erosion. *Catena*. 77: 192-199.
 13. Carter, M. R. and E. G. Gregorich. 2008. *Soil sampling and methods of analysis*, second edition. Canadian Society of Soil Science Publisher. ISBN10: 0-8493-3586-8.
 14. Chang, H. and I. L. Won Jung. 2010. Spatial and temporal changes in runoff caused by climate change in a complex large river basin in Oregon. *J. Hydrol.* 388: 186-207.
 15. Fu, B., Y. Wang, P. Xu and D. Wang. 2009. Changes in overland flow and sediment during simulated rainfall events on cropland in hilly areas of the Sichuan Basin, China. *Progress Natural Sci.* 19: 1613-1618.
 16. Gao, P. and M. Josefson. 2012. Event-based suspended sediment dynamics in a central New York watershed. *Geomorphology* 139-140: 425-437.
 17. Gee, G. W. and J. W. Bauder. 1986. Particle size analysis. PP. 383-411. *In: Klute, A. (Ed.), Methods of soil analysis, Part 1, 2nd ed.* Agronomy Monograph, Vol. 9. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.
 18. Girmay, G., B. R. Sing, J. Nyssen, and T. Borrosen. 2009. Runoff and sediment associated nutrient losses under different land uses in Tigray, Northern Ethiopia. *J. Hydrol.* 376: 70-80.
 19. Hazelton, P. and B. Murphy. 2007. *Interpreting soil test results*. CSIRO publishing, Melbourne, p. 169.
 20. Jin, K., W. M. Cornelis, D. Gabriels, W. Schiettecatte, S. De Neve, J. Lu, T. Buysse, H. Wu, D. Cai, C. Dianxiong, J. Jin and R. Harmann. 2008. Soil management effects on runoff and soil loss from field rainfall simulation. *Catena*. 75: 191-199.
 21. Lujan, L. d. 2003. Soil physical properties affecting soil erosion in Tropical soils. Facultad de Agronomia, Instituto de Edafologia, Universidad Central de Venezuela, Maracay, Venezuela 232-243.
 22. Marques, M. J., R. Bienes, L. Jimenez and R. Perez-Rodriguez. 2007. Effect of vegetal cover on runoff and soil erosion under light intensity events. Rainfall simulation over USLE plots. *Science Total Environ.* 378: 161-165.
 23. McKenzie, N. J., T. W. Green and D. W. Jacquier. 2002. Laboratory measurement of hydraulic conductivity. PP: 150-162. *In: McKenzie, N. J., K. L. Coughlan, H. P. Cresswell. (Eds.), Capter 10. Soil Physical Measurement and Interpretation for Land Evaluation.* CSIRO Publishing, Melbourne.
 24. Morgan, R. P. C. 2005. Soil erosion and conservation. PP: 13-60. 3rd ed. Blackwell Publishing, Malden.
 25. Rejman, J., R. Brodowski and I. Iglík. 2008. Annual variations of soil Erodibility of silt loam developed from loess based on 10-years runoff plot studies. *J. Annals Warsaw University of Life Sci. SGGW Land Reclam.* 39: 77-83.
 26. Rhoades, J. D. 1982. Cation exchange capacity, *Methods of soil analysis*, Agronomy, Nounber. 9, Chemical and mineralogical properties, Society. Agronomy, Madison, WI, USA, pp:149-157.
 27. Ruiz-Sinoga, J. D. and A. Romero-Diaz. 2010. Soil degradation factors along a Mediterranean pluviometric gradient in southern Spain. *Geomorphology* 118(3-4): 359-368.
 28. Shi, Z. H., N. F. Fang, F. Z. Wu, L. Wang, B. J. Yue and G. L. Wu. 2012. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes. *J. Hydroly.* 454-455: 123-130.
 29. Truman, C. C., T. L. Potter, R. C. Nuti, D. H. Franklin and D. D. Bosch. 2011. Antecedent water content effects on runoff and sediment yields from two coastal plain ultisols. *Agri. Water Manage.* 98: 1189-1196
 30. Walkly, A. and I. A. Black. 1934. An examination of digestion methods for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic and titration. *Soil Sci. Soc. . Am. J.* 37: 29-38.
 31. Wei, L., B. Zhang and M. Wang. 2007. Effects of antecedent soil moisture on runoff and soil erosion in alley cropping systems. *Agri. Water Manage* 94: 54-62.
 32. Wen-Tai, Zh., Y. Dong-Sheng, S. Xue-Zheng, T. Man-Zhi and L. Liu-Song. 2010. Variation of sediment concentration and its drivers under different soil management systems. *Pedospher.* 20(5): 578-585.
 33. Willy, K. N. 2011. The role of the aggregate size in soil resistance and decrease erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 10(15): 111-120.
 34. Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. PP. 1-62. U.S. Dep. Agr., Sci. Edu. Admin., Agr. Handbook 537. Washington, D.C.
 35. Zhou, W. and B. Wu. 2008. Assessment of soil erosion and sediment delivery ratio using remote sensing and GIS: a case study of upstream Chaobaihe River catchment, north China. *Inter. J. Sediment Res.* 23(2): 167-173.

Investigation of Soil loss from Small Plots with Different Soil Textures in Sequential Simulated Rainfall Events

A. R. Vaezi* and H. Hasanzadeh¹

(Received: Aug. 5-2012 ; Accepted : Jan. 5-2016)

Abstract

Knowledge of variation in soil properties from each event to another is very important for the determination of critical periods during which soil is susceptible to erosion processes. This study was carried out to investigate soil loss in sequential rainfall events in Zanjan Province. Toward this, ten soil textures samples were taken and were transported to small plots (60 cm×80cm) with 20-cm depth) on a 8% slope land at three replications. The plots were exposed to ten simulated rainfalls with an intensity of 55 mm h⁻¹ for 30-min and 5-day intervals. A total of 300 simulated rainfall trials were carried out at the plots. Results indicated that soil moisture, runoff production and soil loss were significantly affected by rainfall events ($P < 0.001$). Increasing soil moisture and consequently decreasing soil infiltration capacity were the most crucial element in increasing runoff production and soil loss in the sequential rainfall events, in a way that about 84% of soil loss variation in the rainfall events could be explained based on antecedent soil moisture. After the fifth rainfall event, no significant differences was found in soil infiltration capacity as well as runoff production because of soil moisture reaching to the water-holding capacity. Nevertheless, an increasing trend was observed in soil loss after fifth event which could associate with presence of more erodible soil particles on the surface and consequently increasing the concentration of surface flows.

Keywords: Simulated rainfall, Antecedent soil moisture, Runoff, Soil infiltration rate, Soil erosion processes.

1. Dept. of Soil Sci., Agric. Faculty, Univ. of Zanjan, Zanjan, Iran.

*: Corresponding Author, Email: vaezi.alireza@gmail.com, vaezi.alireza@znu.ac.ir