

## اثر ضربه قطرات باران بر ویژگی‌های هیدرولیکی جریان شیاری تحت تأثیر درجه شیب

نسرین صادقیان<sup>۱</sup> و علیرضا واعظی<sup>۱\*</sup> و ابوالفضل مجنوننی هریس<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۲/۲۹)

### چکیده

اطلاعات اندکی در مورد نقش ضربه قطرات باران بر ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در شیارها وجود دارد. در این آزمایش برای بررسی نقش ضربه قطرات باران بر دبی رواناب، غلظت رسوب و ویژگی‌های هیدرولیکی جریان، خاکی با بافت رسی در چهار شیب (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد) در فلومی به ابعاد  $4 \times 0.3 \times 0.4$  متر با بارانی به شدت ۹۰ میلی‌متر در ساعت تا رسیدن به حالت ماندگار، در دو حالت با وجود ضربه قطرات باران و بدون وجود ضربه قطرات باران با باران شبیه‌سازی شده، بررسی شد. نتایج نشان داد که با حذف ضربه قطرات باران بر سطح خاک، دبی رواناب، غلظت رسوب، عمق جریان، تنش برشی، قدرت جریان، عدد رینولدز و سرعت جریان به ترتیب به اندازه ۰/۶۲ تا ۳/۵۴، ۰/۰۸ تا ۱۱/۸۳، ۰/۹۱ تا ۰/۹۶، ۰/۲۶ تا ۰/۲۵، ۳/۲۵ تا ۰/۵۲، ۴/۴۵ تا ۰/۳۶ و ۳/۲۷ تا ۰/۲۳ و ۰/۷۹ تا ۰/۷۹ برابر کاهش یافت ( $P < 0.05$ )؛ درحالی که ضرایب دارسی و سیباخ، شزی و مانینگ در حالت بدون ضربه بیشتر از حالت با وجود ضربه قطرات باران بودند ( $P < 0.01$ ) که با توجه به نتایج عمق رواناب و سرعت در دو حالت سطح خاک بدیهی به نظر می‌رسد. نتایج نشان داد که سرعت جریان مهم‌ترین ویژگی هیدرولیکی جریان است که تحت تأثیر ضربه قطره باران و شیب سطح قرار داشت. به‌طور کلی این پژوهش نشان داد که ضربه قطره باران عاملی مهم در تغییر ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در شیارها بود. با افزایش شیب نیز نقش ضربه قطرات باران در ویژگی‌های هیدرولیکی جریان افزایش یافت. این نتایج نقش کلیدی ضربه قطرات باران را در خصوصیات هیدرولیکی رواناب و نیز شدت برداشت ذرات در شیارها نشان داد. آگاهی از این موضوع گامی اساسی در مدل‌سازی فرسایش شیاری است. مهار ضربه قطرات باران به‌ویژه در دامنه‌های با شیب تند از طریق حفظ پوشش گیاهی نقشی مهم در کاهش فرسایش جریان و هدررفت خاک از شیارها خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: تنش برشی، دبی رواناب، سطح خاک، غلظت رواناب و قدرت جریان

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان

۲- گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

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

## مقدمه

فرسایش خاک در طول بارندگی شامل فرایند پیچیده برداشت ذرات خاک توسط ضربه قطرات باران و رواناب سطحی و انتقال آنها به وسیله پاشمان و جریان سطحی است (۶ و ۷). فرسایش شیاری مشکل اساسی در شیب‌های تحت کشت در سراسر دنیا است، که در آنها شیاریها از نظر فرسایش فعال هستند. فرایندهای فرسایش شیاری شامل برداشت ذرات، انتقال، و جاگذاری آنها است که وابسته به ویژگی‌های هیدرولیکی جریان رواناب است (۱۸). ویژگی‌های هیدرولیکی رواناب در شیاریها مانند سرعت، عمق و دبی جریان و غلظت رسوب و نیز زبری سطح خاک به عنوان عامل‌های فیزیکی مهم در توصیف فرایندهای فرسایش سطحی خاک به شمار می‌آیند. این ویژگی‌ها به روش‌های مختلفی با هم ترکیب شده و برای پیش‌بینی فرسایش خاک در مدل‌های پیش‌بینی فرسایش بر پایه فیزیکی مانند پروژه پیش‌بینی فرسایش آبی (WEPP) به کار می‌روند (۳۱). میزان تخریب خاک در فرسایش شیاری طی بارندگی علاوه بر برداشت و انتقال ذرات خاک توسط رواناب تحت تأثیر ضربه قطرات باران نیز است. قطرات باران نیروی اولیه برای برداشت ذرات خاک و نیز ظرفیت نفوذ جریان سطحی (رواناب) به لایه زیر سطح خاک برای برداشت ذرات خاک را فراهم می‌کند (۱۰). اگرچه شدت انتقال ذرات خاک توسط ضربه قطرات باران نادیده گرفته می‌شود (۱۹): ولی ضربه قطرات باران قدرت تخریب رواناب و در نتیجه هدررفت خاک را افزایش می‌دهد (۵).

مطالعات هیدرولیکی جریان‌های سطحی در کانال‌های عمیق نشان می‌دهد که انرژی قطرات باران تأثیری ناچیز بر عمق جریان آب دارد ولی به شدت ویژگی‌های هیدرولیکی جریان‌های کم عمق را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۸ و ۲۷). شرایط هیدرولیکی به طور معنی‌داری در فواصل مکانی کوتاه با تغییر در عمق جریان یا تغییر سطح بستر در طول جریان یا در زمین بین جریان‌های رواناب تغییر می‌کنند (۴). عمق جریان در شیاریها معمولاً کمتر است. شیاریها معمولاً به طور فعال در حال فرسایش

هستند و شکل ظاهری آنها در مقیاس زمانی کوتاه تغییر می‌کند. شکل ظاهری شیاری در یک زمان مشخص وابسته به زبری، عرض و عمق شیاری هستند که اینها نیز تابع مواد فرساینده، شدت رواناب و ساختمان پیشین شیاری هستند (۱۴ و ۲۱). برای بررسی تأثیر شدت بارندگی بر گسترش شبکه شیاری و برای نشان دادن شاخص‌هایی برای توصیف کمی مورفولوژی شیاریها، آزمایش‌هایی توسط هیو و همکاران (۱۳) انجام شد. نتایج نشان داد که تشکیل شبکه شیاری تحت باران با شدت ۵۰ میلی‌متر بر ساعت پیچیده‌تر از بارش ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت است. چرا که باران شدیدتر منجر به افت سریع‌تر نفوذپذیری خاک و ظهور سریع‌تر رواناب شد. میانگین زاویه انحراف شیاری، تراکم شیاری، درجه گسستگی شیاری و کجی و موجی شیاری با افزایش شدت باران‌ها بیشتر شد. زارتج و همکاران (۳۰) اثرات شدت بارندگی، تندی شیب و شرایط هیدرولیکی سطح خاک بر برداشت و انتقال خاک را بررسی کردند. نتایج نشان داد که در همه تیمارهای خاک‌ها، شدت بارندگی مهم‌ترین عامل مؤثر بر تحویل رسوب از سطوح بین شیاری است. علاوه بر عامل شدت بارندگی، در اکثر خاک‌ها فرسایش بین شیاری به وسیله شیب و در برخی خاک‌ها با شرایط هیدرولیکی سطح خاک متأثر شد. در آزمایش آنها، شرایط هیدرولیکی سطح خاک عامل غالبی بود که اثر آنها به وسیله شیب و شدت بارندگی تقویت شد. در شرایطی که زهکشی حاکم بود، هدررفت از سطوح بین شیاری کمتر از داخل شیاری بود. ایکسیو و همکاران (۲۹) اثرات ضربه قطرات باران بر شدت تولید رواناب و انتقال رسوب در اراضی شیب‌دار را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که ضربات قطرات باران تلاطم و ناپایداری جریان رواناب و نیز عدد رینولدز و عدد فرود را افزایش می‌دهد. وو و زو (۲۸) در آزمایش خود به این نتیجه رسیدند که ضربه قطرات باران به طور معنی‌داری ضریب اصطکاک جریان ورقه‌ای را به میزان ۶۶/۱۴ درصد کاهش می‌دهد. بررسی‌های لیو و همکاران (۲۱) نشان داد که ضربه قطرات باران نقش کلیدی در فرسایش و هدررفت خاک در اراضی شیب‌دار دارد؛ به طوری که هدررفت خاک در

خاک به شرایط طبیعی شبیه‌تر باشد (۳۱ و ۳۲). ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در آزمایشگاه اندازه‌گیری شدند. در این راستا توزیع اندازه ذرات خاک به روش هیدرومتری (۱۷)، سنگریزه ذرات بزرگ‌تر از دو میلی‌متر به روش وزنی (۱۷)، جرم مخصوص ظاهری با استفاده از سیلندر فلزی (۱۷) و پایداری خاکدانه بر اساس شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در روش الک تر (۱۶) به مدت یک دقیقه در خاکدانه‌های با قطر بین ۵/۶ و ۸ میلی‌متر (۲۶) با حذف بخش شن و سنگریزه اندازه‌گیری شد.

### شبیه‌سازی بارش، تعیین ویژگی‌های هیدرولیکی جریان و غلظت رسوب

آزمایش با استفاده از فلومی به ابعاد  $4 \times 0/4 \times 0/3$  متر با شیب‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد و با دستگاه شبیه‌ساز باران (شکل ۱)، در دو حالت با و بدون وجود ضربه قطرات باران انجام گرفت. مقدار خاک لازم برای فلوم بر مبنای چگالی ظاهری نمونه طبیعی خاک ( $1/1 \text{ g cm}^{-3}$ ) و حجم فلوم محاسبه شد. شیاری دست‌ساز با ایجاد جوی و پشته متوالی با عرض حدود ۰/۱ و عمق ۰/۰۵ متر مطابق با تحقیقات پیشین (۱۲، ۱۳، ۲۳ و ۲۴) به تعداد چهار قطعه به طول چهار متر ایجاد شد. از باران شبیه‌سازی شده با شدت ۹۰ میلی‌متر بر ساعت استفاده شد که در آن از نازل‌های اسپری جت تحت فشار که به فاصله ۲۰ سانتی‌متر از هم قرار داشتند، استفاده شد ارتفاع نازل‌ها از سطح خاک برابر با دو متر بود. چنین بارانی جزء رگبارهای شدید در منطقه است که فراوانی وقوع اندکی (۳ درصد) دارد. این باران‌ها نقشی اساسی در هدررفت زیاد آب و خاک طی سال در دامنه‌های تحت فرسایش شیاری دارند (۲۶). برای حذف ضربه قطرات باران از توری پلاستیکی استفاده شد که تقریباً  $68/30$  درصد را تحت پوشش قرار داد (۱). فاصله توری از سطح خاک حدود سه سانتی‌متر بود به طوری که از یک‌سو ضربه قطرات باران را به طور کامل مهار کند و از سوی دیگر مانعی در حرکت جریان سطحی روی خاک ایجاد نکند. در هر رخداد باران شبیه‌سازی شده، مقدار رواناب و رسوب خارج شده از

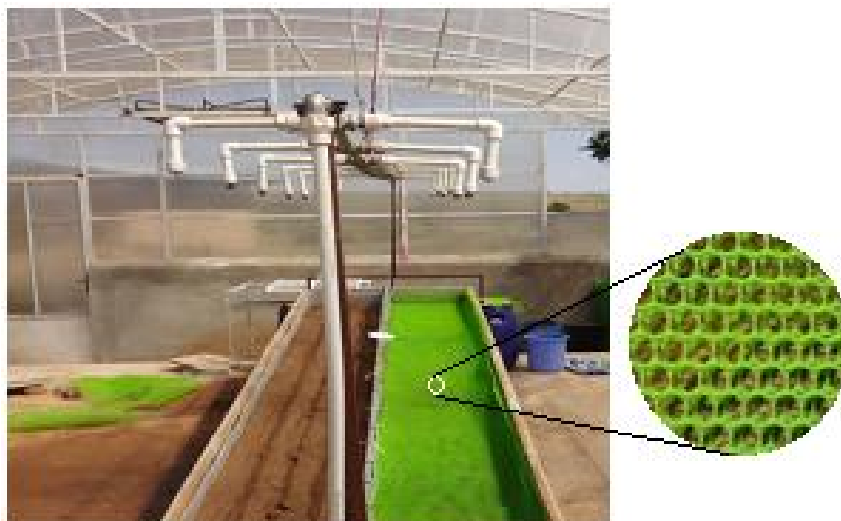
شرایط وجود ضربه قطرات باران  $19/8-3/6$  برابر بیشتر از شرایط بدون ضربه قطرات باران بود. حذف ضربه قطرات باران، اثر شدت بارندگی بر هدررفت خاک را کاهش و اثر شیب را افزایش می‌دهد.

تولید رواناب و رسوب توسط ویژگی‌های هیدرولیکی جریان کنترل می‌شود. فرسایش خاک، ویژگی‌های هیدرولیکی جریان را با تغییر رژیم جریان و زبری سطح خاک تغییر می‌دهد؛ بدین ترتیب که ضربات قطرات باران، غلظت و تحویل رسوب را افزایش می‌دهد و در نتیجه باعث تغییر ویژگی‌های هیدرولیکی جریان می‌شود. از این رو بررسی اثر ضربه قطرات باران بر ویژگی‌های هیدرولیکی جریان برای فهم بهتر فرایند فرسایش ضروری است. به طور کلی، بررسی منابع نشان می‌دهد که تحقیقات انجام شده در مورد ویژگی‌های هیدرولیکی در شرایط مزرعه‌ای تحت تأثیر جریان‌های با دبی ورودی متفاوت، درون شیاری دست‌ساز بوده است. در مطالعات اندکی که در مورد فرسایش خاک ناشی از جریان متمرکز در شرایط آزمایشگاهی در ابعاد فلوم انجام شده، اغلب به نقش شدت باران و شیب سطح پرداخته شده است؛ در حالی که وقوع فرسایش شیاری در شیاری در شرایط طبیعی علاوه بر شدت بارندگی و شیب، تحت تأثیر میزان تخریب خاک ناشی از ضربه قطرات باران است. این آزمایش به نقش ضربه قطرات باران در فرسایش خاک از داخل شیاریها، میزان تولید جریان، تنش برشی و در نتیجه دبی رواناب و میزان رسوب در چهار شیب در شرایط آزمایشگاهی پرداخته است.

### مواد و روش‌ها

#### نمونه‌برداری و اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک

برای انجام این آزمایش نمونه خاک رسی (Clay) از منطقه نیمه خشک از استان زنجان با مختصات عرض شمالی  $39^{\circ} 35' 39/02''$  و طول شرقی  $70^{\circ} 28' 37/00''$  تهیه شد. نمونه خاک از مراتع تغییر کاربری یافته از عمق ۲۰ سانتی‌متری جمع‌آوری شده و از الک ۱۰ میلی‌متری عبور داده شدند تا



شکل ۱. نمایی از فلوم و شبیه‌ساز باران مورد استفاده در آزمایش در دو حالت با و بدون وجود ضربه قطرات باران

که در آن  $g$  برابر شتاب ثقلی ( $m s^{-2}$ )،  $S$  برابر با متوسط شیب ( $m m^{-1}$ ) و  $v$  برابر با سرعت جریان ( $m s^{-1}$ ) و  $R$  شعاع هیدرولیکی ( $m$ ) جریان است. با توجه به عمق اندک جریان در شیارها، مقدار  $R$  برابر با عمق جریان در نظر گرفته شد (۲۰ و ۳۱).

ضریب زبری مانینگ به صورت زیر محاسبه شد (۱۱):

$$n = \frac{R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}}{V^2} \quad (2)$$

ضریب زبری شزی نیز از رابطه زیر محاسبه شد (۱۱):

$$C = \frac{V}{R S^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

همچنین عدد رینولدز یک پارامتر بدون بعد است که برای توصیف ویژگی‌های هیدرولیکی جریان به کار می‌رود و از رابطه زیر به دست آمد (۳۲):

$$R_n = \frac{VR}{u} \quad (4)$$

که در آن:  $u$  ویسکوزیته دینامیکی ( $m^2 s^{-1}$ ) است که از درجه حرارت آب محاسبه می‌شود.

از آنجا که اندازه‌گیری عمق جریان‌های کم عمق تحت شرایط آزمایش دشوار است، عمق جریان آب به طور غیرمستقیم با استفاده از معادله زیر تعیین شد (۳۲):

فلوم به طور پیوسته در فواصل زمانی مختلف (از بازه زمانی ۰/۵ تا ۲ دقیقه) تا دستیابی به جریان ماندگار اندازه‌گیری شد (۲۳ و ۲۴). مدت آزمایش از شروع بارندگی تا وقوع جریان ماندگار، حدود ۳۹ دقیقه بود. رسوب موجود در نمونه‌های رواناب جمع‌آوری و پس از ته‌نشینی کامل، رسوب در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شد و در نهایت هدررفت خاک برای زمان‌های مختلف محاسبه شد. با استفاده از حجم رواناب در هر بازه زمانی، دبی رواناب تعیین شد. سرعت جریان نیز با استفاده از پرمنگنات پتاسیم با غلظت ۰/۵ گرم در لیتر در فواصل یک متری در طول فلوم مجموعاً در چهار نقطه اندازه‌گیری شد (۱).

### تعیین ویژگی‌های هیدرولیکی جریان

معادلات داریسی ویسباخ، مانینگ و شزی به طور وسیعی برای توصیف ویژگی‌های جریان به کار می‌روند. هر کدام از این معادلات دارای ضرایب زبری تحت شرایط یکنواخت جریان هستند. در معادله داریسی ویسباخ ضریب  $f$  به صورت زیر محاسبه شد (۳):

$$f = \frac{gRS}{V^2} \quad (1)$$

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

مقدار	ویژگی
۱۷/۵	شن (%)
۳۰	سیلت (%)
۵۲/۵	رس (%)
۴/۷۴	سنگریزه (%)
۱/۰۱	میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار (mm)
۱/۱	جرم مخصوص ظاهری (g cm <sup>-3</sup> )
۰/۷۳	مواد آلی (%)
۲۷/۵۰	کربنات کلسیم معادل (%)

قطر خاکدانه‌های پایدار در آب برای مدت یک دقیقه، ۱/۰۱ میلی‌متر بود که نشان از ضعف مقاومت خاکدانه‌ها در برابر آب است.

### نقش ضربه قطرات باران بر تغییرات دبی رواناب و غلظت رسوب

رواناب ایجاد شده توسط ضربه قطرات باران در هر چهار شیب بیشتر از حالت بدون وجود ضربه قطرات باران بود در واقع حذف ضربه قطرات باران باعث کاهش معنی‌داری در دبی رواناب شد ( $P < 0/01$ ) (شکل ۲). با افزایش شیب در دو حالت شرایط سطح خاک (با وجود ضربه و بدون وجود ضربه قطرات باران) دبی رواناب افزایش یافت ولی میزان افزایش دبی رواناب در حالت با وجود ضربه قطرات باران بیشتر از بدون وجود ضربه قطرات باران بود. میزان کاهش دبی رواناب در شیب‌های بالا در حالت بدون وجود ضربه بیشتر بود که این امر ممکن است به دلیل کاهش عمق جریان آب و تلاطم رواناب و در نتیجه کاهش قدرت برشی جریان باشد. همچنان که در شکل ۲ مشاهده می‌شود غلظت رسوب در تیمار بدون وجود ضربه قطرات باران به‌طور معنی‌داری کمتر از حالت با وجود ضربه

$$h = \frac{Q}{BV} \quad (5)$$

که در آن:  $Q$  دبی جریان درون شیار ( $m^3 s^{-1}$ )،  $B$  عرض شیار ( $m$ ) و  $V$  سرعت متوسط جریان ( $m s^{-1}$ ) است. مقدار عمق جریان برای چهار شیار درون فلوم جداگانه تعیین و میانگین آن برای کل فلوم محاسبه شد.

برای محاسبه تنش برشی از رابطه زیر استفاده شد (۲۲):

$$\tau = \rho_f g R S \quad (6)$$

که در آن:  $\tau$  تنش برشی جریان رواناب (Pa) و  $\rho_f$  چگالی سیال ( $kg m^{-3}$ ) است.

قدرت جریان نیز با استفاده از رابطه زیر به دست آمد

$$\omega = \tau V \quad (7)$$

که در آن:  $\omega$  قدرت جریان با واحد  $kg m^{-3}$  است.

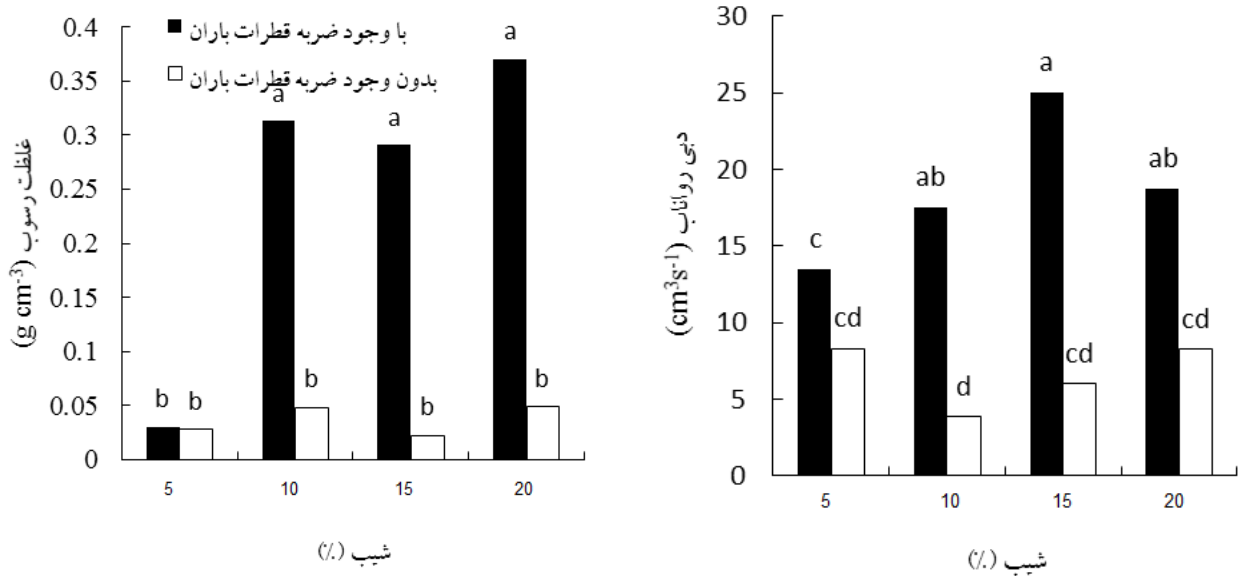
### تجزیه و تحلیل داده‌ها

تحلیل آماری مربوط به تفاوت بین شیب‌ها از نظر ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در دو حالت با وجود ضربه قطرات باران و بدون وجود ضربه قطرات باران به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در چهار تکرار انجام گرفت. برای بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون شاپیرو ویلک (۲۵) و برای انجام مقایسه میانگین عامل‌های آزمایش از آزمون دانکن استفاده شد. برای انجام تحلیل‌های آماری از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۱ و برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

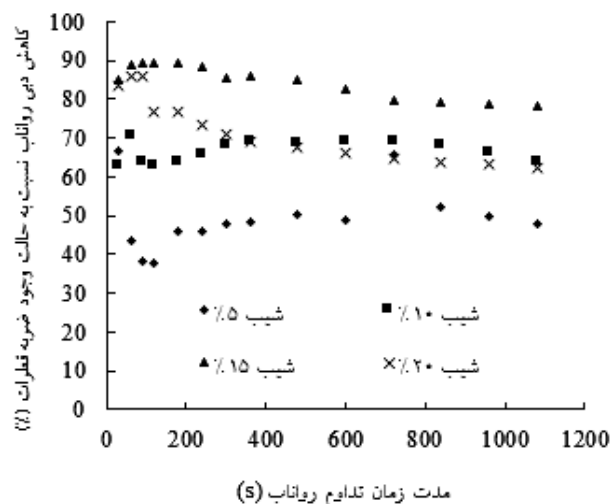
### نتایج و بحث

#### ویژگی‌های خاک مورد بررسی

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد بررسی در جدول ۱ آورده شده است. خاک مورد بررسی دارای بافت رسی (Clay) و مقدار اندک ماده آلی (۰/۷۳ درصد) است. با توجه به محتوای بالای کربنات کلسیم در خاک (بیش از ۲۰ درصد)، خاک‌ها در گروه خاک‌های آهکی قرار می‌گیرند. میانگین وزنی



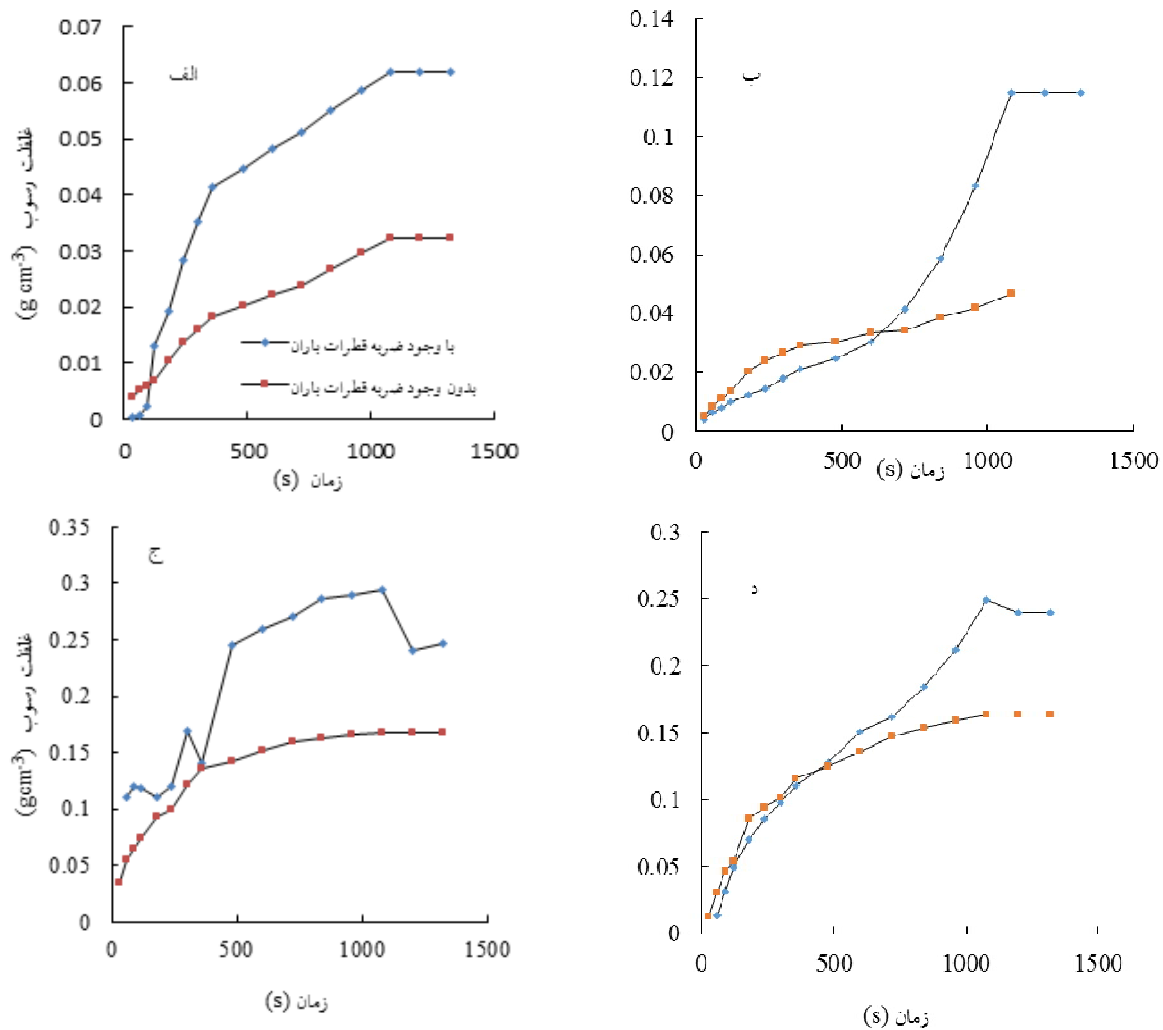
شکل ۲. مقایسه دبی رواناب و غلظت رسوب در دو حالت با وجود ضربه قطرات باران و بدون وجود ضربه قطرات باران در شیب‌های مورد مطالعه (حروف مشابه دارای اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد نیستند).



شکل ۳. درصد کاهش دبی رواناب در شرایط حذف ضربه قطرات باران نسبت به حالت تأثیر مستقیم ضربه قطرات طی زمان رواناب در شیب‌های مورد بررسی

گوی و همکاران (۱۲) است که نشان داد ۸۵ درصد از کل رسوب مربوط به سهم ضربه قطرات باران بود. حذف ضربه قطرات باران در طول بارندگی، دبی رواناب را به میزان  $1/42 \pm$  (۰/۶۲ تا ۳/۵۴) برابر کاهش داد (شکل ۳). حداکثر کاهش دبی رواناب در مراحل اولیه شروع رواناب یعنی تا حدود ۶ یا ۷ دقیقه بعد از شروع رواناب رخ داد. این امر ممکن است به دلیل حذف ضربه قطرات باران باشد که

بود. برداشت ذرات خاک و انتقال آنها، فرایند مصرف انرژی است. هنگامی که قطرات باران به سطح خاک برخورد می‌کنند، انرژی جنبشی قطرات باران به انرژی پتانسیل جریان تبدیل می‌شود که نیروی فرساینده را تقویت می‌کند. در حالت بدون وجود ضربه قطرات باران انرژی جنبشی قطرات باران که به سطح خاک می‌رسند به مقدار زیادی تقلیل می‌یابد (۲)، این اختلاف در غلظت رسوب در دو حالت هم‌راستا با یافته‌های

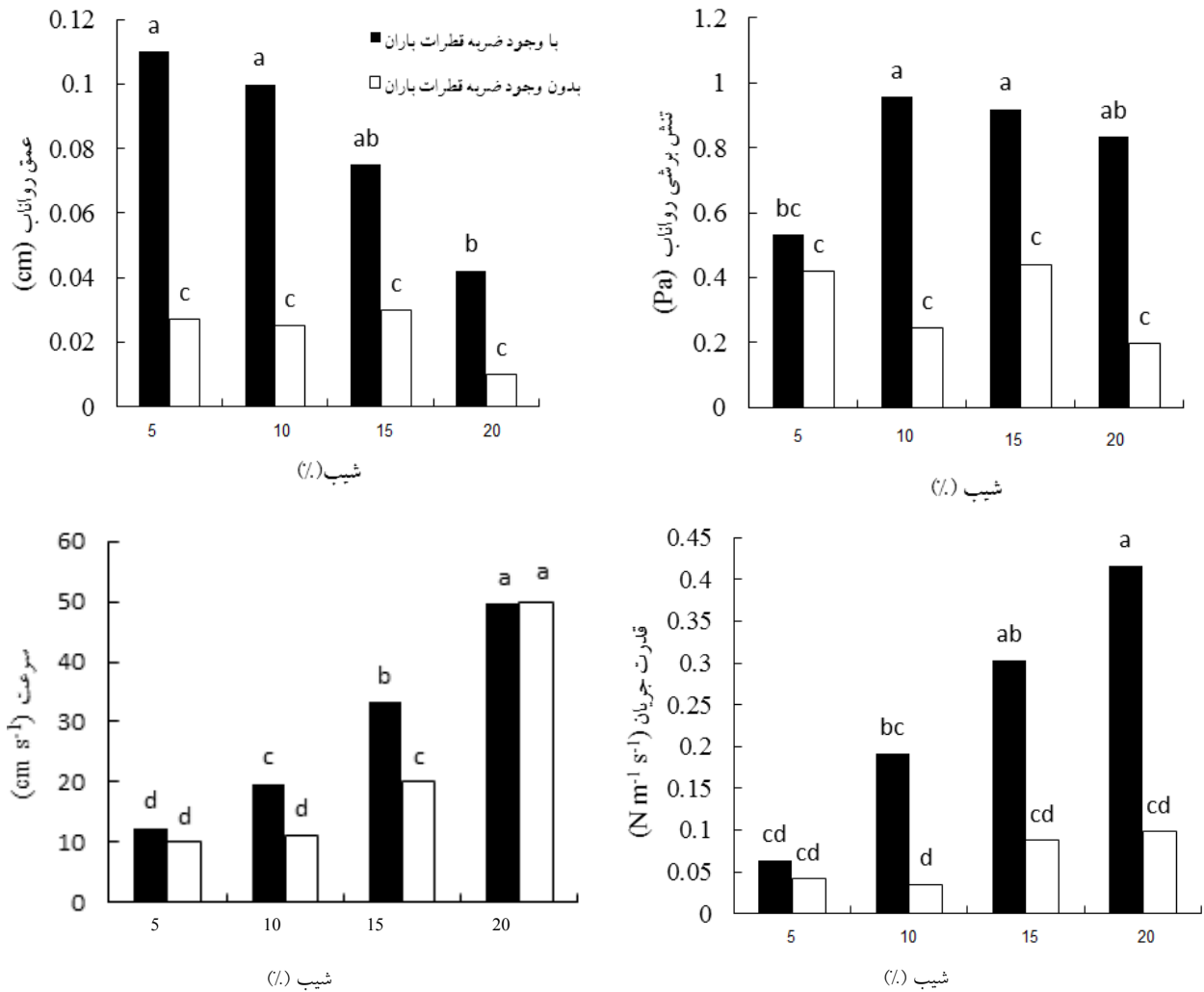


شکل ۴. غلظت رسوب در دو حالت با وجود ضربه و بدون وجود ضربه در چهار شیب: الف) ۵، ب) ۱۰، ج) ۱۵ و د) ۲۰ درصد (رنگی در نسخه الکترونیکی)

از نظر تولید رواناب است.

غلظت رسوب با حذف ضربه قطرات باران طی مدت باندرگی به مقدار زیادی  $4/82 \pm$  (۰/۸ تا ۱۱/۸۳ برابر) کاهش می‌یابد (شکل ۴). مقایسه نوسانات زمانی غلظت رسوب بین تیمار با وجود ضربه و بدون وجود ضربه قطرات باران نشان می‌دهد که برداشت ذرات خاک توسط برخورد قطرات باران مواد بیشتری برای انتقال توسط رواناب فراهم می‌کند، در واقع ضربه قطرات باران ذرات خاک را در شروع بارندگی از بستر خاک جدا می‌کند. شیب منحنی غلظت رسوب در حالت بدون وجود ضربه کمتر از حالت با وجود ضربه بود (شکل ۴).

انرژی جنبشی قطرات باران را کاهش می‌دهد و مانع از تشکیل سله سطحی خاک و افزایش مدت زمان نفوذ می‌شود. این نتایج مشابه با نتایج به دست آمده توسط لیو و همکاران (۲۱) است. تغییرات زمانی درصد کاهش دبی رواناب بیانگر این نکته است که فرایند رواناب که توسط ضربه قطرات باران ایجاد می‌شود نقش کلیدی بر میزان فرسایش خاک در مراحل شروع بارندگی دارد. مقایسه تأثیر ضربه قطره باران بر افزایش تولید رواناب بین شیب‌های مورد بررسی نشان می‌دهد که الگوی مشخصی در این ارتباط وجود ندارد و این نشانگر وجود برهم‌کنش بین دو عامل ضربه قطره باران و شیب سطح



شکل ۵. مقایسه عمق رواناب، قدرت جریان و تنش برشی به ترتیب در دو حالت با وجود ضربه و بدون وجود ضربه قطرات باران در چهار شیب ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد (حروف مشابه دارای اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد نیستند).

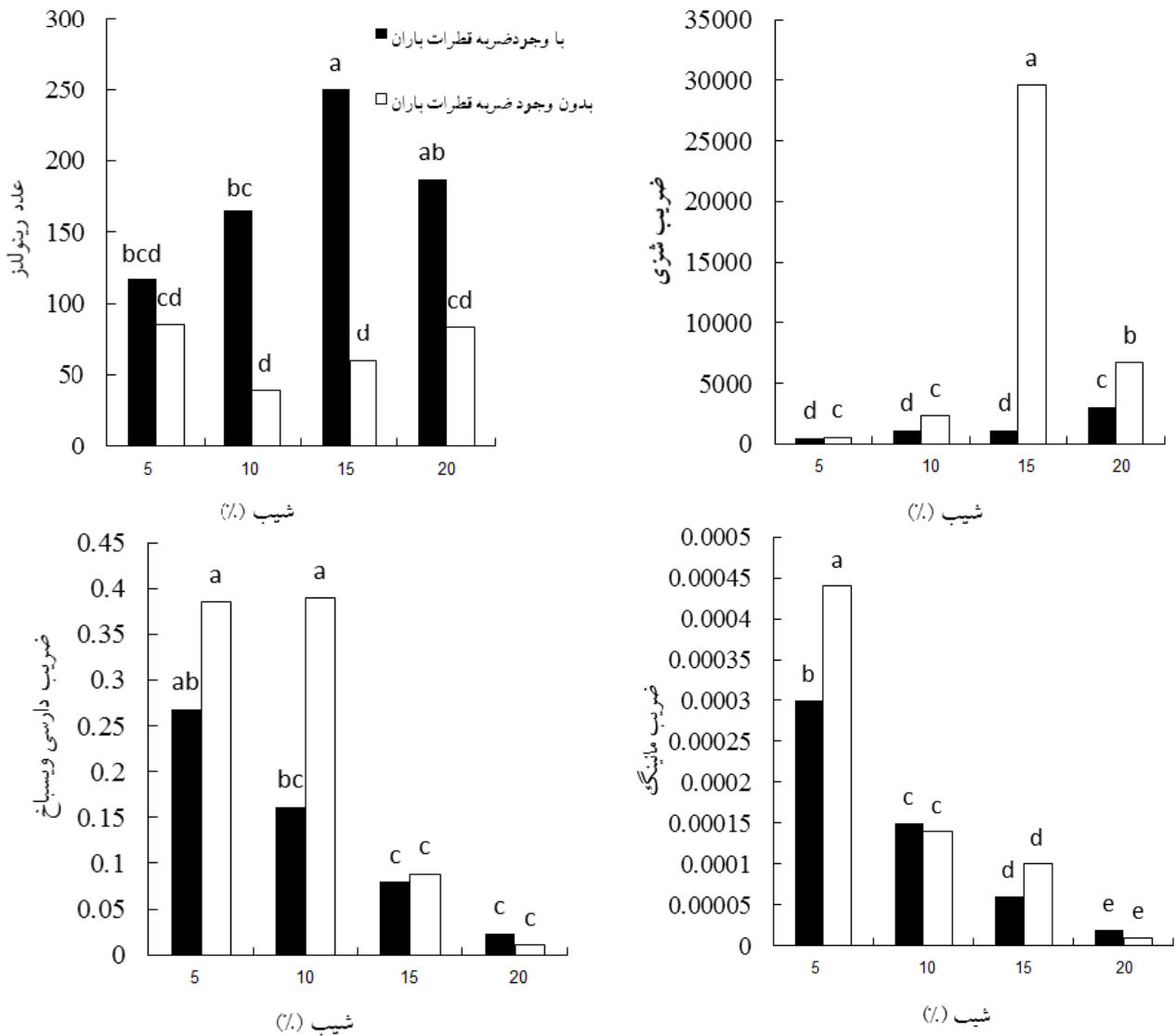
سرعت جریان، عدد رینولدز، ضریب دارسی ویسباخ، ضریب مانینگ و ضریب شزی تحت دو حالت با وجود ضربه و بدون وجود ضربه قطرات باران به طور واضحی تغییر کردند (شکل های ۵ و ۶). این نتایج ممکن است دلیل سهم بزرگ ضربه قطرات باران در فرسایش خاک باشد. هنگامی که ضربه قطرات باران با استفاده از توری حذف شد عمق جریان  $0.24 \pm 0.91$  تا  $0.96$ ، سرعت جریان  $0.37 \pm 0.23$  تا  $0.79$  و تنش برشی  $1.43 \pm 0.26$  تا  $3.35$  و قدرت جریان  $1.65 \pm 0.52$  تا  $4.45$  برابر به طور معنی داری کاهش یافت که این نتایج مشابه نتایج گزارش شده توسط بیوسلینک و همکاران (۲) است.

بنابراین، استفاده از عملیات حفاظتی مؤثر برای جلوگیری از هدررفت خاک به عنوان مثال استفاده از کاه و کلش (۱۵ و ۳۲) یا چمن (۹) برای حذف ضربه قطرات باران و جلوگیری از شکسته شدن خاکدانه های خاک لازم است.

#### نقش ضربه قطرات باران بر ویژگی های هیدرولیکی جریان تحت تأثیر شیب سطح

ضربه قطرات باران رواناب و غلظت رسوب را تحت تأثیر قرار داد که آنها هم ویژگی های هیدرولیکی را تغییر دادند. ویژگی های هیدرولیکی مانند عمق جریان، تنش برشی، قدرت جریان،





شکل ۶. مقایسه عدد رینولدز، ضریب شزی، ضریب دارسی ویسباخ و ضریب ماینینگ در دو حالت با وجود ضربه و بدون وجود ضربه قطرات باران در چهار شیب ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد (حروف مشابه دارای اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد نیستند).

بنابراین افزایش در عمق جریان و سرعت جریان و تلاطم جریان با ضربه قطرات باران باعث افزایش فرسایش خاک ناشی از ضربه قطرات باران شد. اگرچه ضریب دارسی ویسباخ در حالت بدون وجود ضربه بیشتر از حالت با وجود ضربه قطرات باران بود و این اختلاف از نظر آماری در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد ( $P < 0.01$ ). درحقیقت در وجود ضربه قطرات باران، ذرات تخریب شده توسط قطرات باران سطح خاک صاف‌تری ایجاد کرد که منجر به کاهش تأخیر جریان شد (۲). ضریب دارسی با افزایش شیب نیز در دو حالت با وجود

شکل ۶ نشان می‌دهد که عدد رینولدز در شرایط با وجود ضربه و بدون وجود ضربه قطرات باران و در چهار شیب مورد مطالعه مقادیر کمتر از ۶۰۰ دارد که بیانگر آرام بودن جریان رواناب بود (۲۷). اگرچه ضربه قطرات باران رژیم جریان را تغییر نمی‌دهد ولی با حذف ضربه قطرات باران عدد رینولدز در شیب‌های مورد مطالعه تقریباً  $1/43 \pm (0/36 \text{ تا } 3/27)$  برابر کاهش یافت، که بیانگر این حقیقت است که ضربه قطرات باران تلاطم جریان رواناب را افزایش داد. اثر حذف ضربه قطرات باران بر مقدار عدد رینولدز با افزایش شیب افزایش یافت.

ضربه و بدون وجود ضربه قطرات باران کاهش یافت.

جدول تجزیه واریانس نشان داد که شیب و ضربه قطرات باران بر میزان ضریب مانینگ نیز اثر معنی داری در سطح احتمال یک درصد داشت. ضریب مانینگ در حالت بدون وجود ضربه قطرات باران بیشتر از وجود ضربه قطرات باران بود و با افزایش شیب مقدار آن در هر دو حالت سطح خاک کاهش پیدا کرد، که دلیل آن بیشتر بودن سرعت جریان در حالت با وجود ضربه و نیز در شیب‌های بالا است که منجر به کاهش ضریب مانینگ در حالت با وجود ضربه در مقایسه با حالت بدون وجود ضربه و در شیب‌های بالا می‌شود. ضریب شزی نیز در حالت بدون وجود ضربه قطرات باران بیشتر از حالت وجود ضربه قطرات باران در هر چهار شیب مورد مطالعه بود. این نتایج بیانگر این حقیقت است که سرعت جریان پارامتر هیدرولیکی کلیدی متأثر کننده فرسایش خاک توسط ضربه قطرات باران است.

### نتیجه‌گیری

اثر ضربه قطرات باران تقریباً ۸۵ درصد هدررفت خاک را شامل می‌شود. در این آزمایش، مقایسه دبی رواناب حاصل از بارندگی در چهار شیب ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد نشان داد که در حالت حذف ضربه قطرات باران نسبت به حالت با وجود ضربه قطرات باران ۵۳ تا ۷۶ درصد کاهش یافت ( $P < 0/01$ ). ضربه قطرات باران نقش کلیدی در هدررفت خاک دارد. با افزایش شیب، برداشت خاک توسط رواناب و ضربه قطرات باران

### منابع مورد استفاده

افزایش می‌یابد. میزان کاهش دبی رواناب با حذف ضربه قطرات باران با افزایش شیب در طول مدت بارندگی در زمان‌های اولیه شروع رواناب بیشتر بود (۲۶/۵ تا ۸۵ درصد). همچنین غلظت رسوب در حالت بدون ضربه قطرات باران به طور معنی داری کمتر از وجود ضربه قطرات باران بود (۳۸ تا ۵۸ درصد) ( $P < 0/01$ ). ویژگی‌های هیدرولیکی همانند عمق رواناب، سرعت جریان، تنش برشی و قدرت جریان به‌طور معنی داری در حالت بدون وجود ضربه قطرات باران کمتر از حالت با وجود ضربه قطرات باران بود ( $P < 0/05$ ). عدد رینولدز در حالت با وجود ضربه در تمام شیب‌ها بیشتر از حالت بدون وجود ضربه بود ( $P < 0/01$ ). که با توجه به نتایج عمق رواناب و سرعت جریان در دو حالت پوشش سطح خاک قابل انتظار بود. ضریب مانینگ و شزی و داریسی و یسباخ در حالت بدون وجود ضربه در سطح احتمال یک درصد بیشتر از وجود ضربه قطرات باران بود، که این نتایج با ویژگی‌های هیدرولیکی مرتبط همانند عمق و سرعت رواناب همسویی دارد. نتایج نشان داد که سهم ضربه قطرات باران در میزان هدررفت خاک در شیارها از طریق تاثیر قابل توجهی که بر ویژگی‌های هیدرولیکی می‌گذارد، قابل چشم‌پوشی نیست و لذا استفاده از عملیات حفاظتی مؤثر برای جلوگیری از هدررفت خاک همانند استفاده از گیاهان پوششی در اراضی شیب‌دار تحت کشت برای حذف ضربه قطرات باران و جلوگیری از شکسته شدن خاکدانه‌های خاک لازم است.

1. An, J., F. L. Zheng, J. Lu and G. F. Li. 2012. Investigating the role of raindrop impact on hydrodynamic mechanism of soil erosion under simulated rainfall conditions. *Journal of Soil Science* 177: 517-526.
2. Beuselinck, L., G. Govers, P. B. Hairsine, G. C. Sander and M. Breynaert. 2002. The influence of rainfall on sediment transport by overland flow over areas of net deposition. *Journal of Hydrology* 257: 145-163.
3. Bryan, R. B. 1990. Knickpoint evolution in rill wash. *Catena* 17: 111-132.
4. Bryan, R. B. 2001. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology* 32: 385-415.
5. Dunne, T and W. Zhang. 1991. Effects of rainfall, vegetation and microtopography on infiltration and runoff. *Water Resources Research* 27(9): 2271-2285.
6. Ellison, W. D. 1944. Studies of raindrop erosion. *Transactions of the ASAE, an International Journal Published by the American Society of Agricultural Engineers* 25: 181-182.
7. Ellison, W. D. 1945. Some effects of raindrops and surface flow on soil erosion and infiltration. *Transactions of the American Geophysical Union* 26: 415-429.

8. Emmett, W. W. 1970. The hydraulics of overland flow on hillslopes. *Geological Survey Professional* 662-664.
9. Fullen, M. A. 1998. Effects of grass ley set-aside on runoff, erosion and organic matter levels in sandy soils in East Shropshire, UK. *Soil Tillage Research* 46: 41-49.
10. Gao, B., M. T. Walter, T. S. Steenhuis, J. Y. Parlange, B. K. Richards, W. L. Hogarth, C. W. Rose and G. Sander. 2005. Investigating raindrop effects on the transport of sediment and non-sorbed chemicals from soil to surface runoff. *Journal of Hydrology* 308: 313-320.
11. Gilley, J. E., W. J. Elliot, J. M. Laflen and J. R. Simanton. 1993. Critical shear stress and critical flow rates for initiation of rilling. *Journal of Hydrology* 142: 251-271.
12. Guy, B. T., R. P. Rudra, W. T. Dickenson and T. M. Sohrabi. 2009. Empirical model for calculating sediment-transport capacity in shallow overland flows: model development. *Biosystems Engineering* 103: 105-115
13. Haiou, S., Z. Fenli, W. Leilei, L. Jia and Y. Jiang. 2015. An experimental study of rill erosion and morphology. *Geomorphology* 231: 193-201.
14. Hung, Y., X. Chen, B. Luo, L. Ding and C. Gong. 2015. An experimental study of rill sediment delivery in purple soil, using the volume-replacement method. *Peer Journal* 1220.
15. Jin, K., W. M. Cornelis, D. Gabriels, M. Baert, H. J. Wu, W. Schiettecatte, D. X. Cai, S. De Neve, J. Y. Jin and D. Hofman. 2009. Residue cover and rainfall intensity effects on runoff soil organic carbon losses. *Catena* 78: 81-86.
16. Kemper, W. D and R. C. Rosenau. 1986. Aggregate stability and size distribution. In: *Methods of Soil Analysis, Part I. Physical and Mineralogical Methods* (2nd Edition) Agronomy Monography, No. 9. PP. 425-442.
17. Klute, A. 1996. *Methods of Soil Analysis, Part I: Physical and Mineralogical Methods*. SSSA Book Series No.5. Madison.
18. Lei, T. W., M. A. Nearing, K. Haghghi and V. F. Bralts. 2001. Rill erosion and morphological evolution: A simulation model. *Water Resources Research* 34(11): 3157-3168.
19. Li, G. L., F. Q. Wu, X. M. Pang and X. F. Zhao. 2008. Relationship between sediment transport with surface rainfall and runoff energies on sloping. *Advances in Water Resources* 19(6): 868-874. (In Chinese).
20. Li, Z. W., G. H. Zhang, R. Geng and H. Wang. 2015. Rill erodibility as influenced by soil and land use in a small watershed of the Loess Plateau, China. *Biosystems Engineering* 129(1): 248-257.
21. Lu, J., F. Zheng, G. Li, F. Bian and J. An. 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 & Tillage Research* 161: 79-85.
22. Nearing, M. A., L. D. Norton, D. A. Bulgakov, L. T. Larionov and K. M. Dontsova. 1997. Hydraulics and erosion in eroding rills. *Water Resources Research* 33: 865-876.
23. Reichert, J. M. and L. D. Norton. 2013. Rill and interrill erodibility and sediment characteristics of clayey Australian Vertosols and a Ferrosol. *Soil Research* 51: 1-9.
24. Romero, C. C., L. Stroosnijder and G. A. Baigorria. 2007. Interrill and rill erodibility in the northern Andean Highlands. *Catena* 70: 105-113.
25. Shapiro, S. S. and M. B. Wilk. 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 52(3-4): 591-611.
26. Vaezi, A. R. and F. Besharat. 2015. Rainfall during Events on Runoff and Soil Loss under Simulated Rainfalls. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering* 9(29): 9-18
27. Wenying, P., Z. Zhuodong and K. Zhang. 2015. Hydrodynamic characteristics of rill flow on steep slopes. *Hydrological Process Journal* 29: 3677-3686.
28. Wu, P. T. and P. H. Zhou. 1994. The effects of raindrop splash on the sheet flow hydraulic friction factor. *Journal of Soil Erosion and Soil Water Conservation* 8(2): 39-42. (In Chinese).
29. Xu, Z., J. E. Gao, C. H. Zhao and H. Han. 2010. Effects of raindrop impact on runoff and sediment transport of the slope. *Journal of Soil and Water Conservation* 24(6): 20-33.
30. Zartj, A. S., A. Klik and C. Huang. 2001. Soil detachment and transport processes from interrill and rill areas. *Chemical and Earth Science* 26: 25-36.
31. Zhang, G. H., R. I. Shen, L. O. Chang, T. G. Rong, Y. G. Cao and X. C. Zhang. 2010. Effects of sediment load on hydraulics of overland flow on steep slopes. *Earth Surface Processes and Landforms* 35: 1811-1819.
32. Zhang, G. H., R. T. Luo, Y. Cao, R. C. Shen and X. C. Zhang. 2010. Correction factor to dyemeasured flow velocity under varying water and sediment discharges. *Journal of Hydrology* 389: 205-213.

## Effect of Raindrops Impact on Hydraulic Properties of the Rill Flow under Slope Gradients

N. Sadeghian<sup>1</sup>, A. Vaezi<sup>1\*</sup> and A. Majnooni Heris<sup>2</sup>

(Received: January 3-2018; Accepted: May 19-2018)

### Abstract

Few studies have been done regarding the role of the raindrop in the hydrodynamic mechanism of soil erosion. In this study, rainfall simulation experiments were conducted to evaluate the role of raindrop in runoff discharge, sediment concentration and hydraulic properties of flow under four slope gradients (5, 10, 15 and 20%) in a clay soil using a 90 mm.h<sup>-1</sup> rainfall intensity to reach the steady state flow. Soil sample was packed into the erosion flume with 0.3m × 0.4m × 4 m in dimensions and tested under two soil surface conditions: one with raindrop impact and one without raindrop impact. The results showed that runoff discharge, sediment concentration, flow depth, shear stress, stream power, Reynolds number and runoff velocity under without raindrop impact condition were significantly lower than those in the condition with the raindrop impact with a factor of 0.62 to 3.54, 0.08 to 11.83, 0.91 to 0.96, 0.26 to 3.25, 0.52 to 4.45, and 0.36 to 3.27, 0.23 to 0.79 times, respectively; on the other hand, the Darcy Wysbach, Chezy and Manning coefficients were increased significantly under without raindrop impact (P<0.01). Flow velocity was the key hydraulic parameter strongly affecting the hydraulic properties. These findings indicated the importance of raindrop impact in the detachment rate of soil particles through the change of the hydraulic characteristics. This study also revealed the key role of raindrop impact on the runoff hydraulic characteristics, as well as particle detachments rate in rills. Information about the role of raindrop impact is a substantial step in modeling the rill erosion. Therefore, elimination of raindrops impact, especially in the steep slopes, with the conservation of natural vegetation cover can sufficiently prevent runoff production as well as the particle detachment rate.

**Keywords:** Runoff discharge, Sediment concentration, Shear stress, Soil surface, Stream power.

---

1- Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

2- Department of Water Science Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

\*: Corresponding author, Email: vaezi.alireza@gmail.com