

## The Effect of Raindrops Impact on Soil Loss from Cultivated Furrows in Different Soils

ALI REZA VAEZI<sup>1\*</sup>, RA'NA BIGDELI<sup>2</sup>

1. Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.  
(Received: June. 20, 2020- Revised: Aug. 13, 2020- Accepted: Sep. 8, 2020)

### ABSTRACT

Poor vegetation cover on the surface and lower content of soil organic matter are main factors influencing the sensitivity of soils to erosion from cultivation strips in semi-arid regions. The aim of this study was to investigate the effect of raindrops impact on runoff and soil loss from rills in different soil textures in the semi-arid region. Soil samples were taken from dominant soil textures in hillslopes affected by rill erosion in Zanjan province. For this purpose, three soils with different textures (clay loam, silty loam and sandy loam) were examined with three replications in a flume with 1 m in length and 0.6 m in width and 10% slope under simulated rainfall. Each soil sample was subjected under direct and non-direct raindrop impact with an intensity of 50 mm/h for 30 minutes. Runoff production and soil loss from the rills were measured at a time-scale of 5-min to reach a steady state runoff flow. The results showed that runoff production and soil loss were affected by raindrop impact ( $p < 0.01$ ). The highest and the lowest impact of raindrops on runoff production were found in clay loam (2.95 times) and sandy loam (2.02 times), respectively. In terms of soil loss, sandy loam was the most sensitive to raindrop impact (3.66 times), whereas clay loam was the most resistant soil (2.47 times) to raindrop impact. An increasing trend was observed in runoff production during rainfall time, while soil loss varied irregularly in the rills. This study revealed that runoff production is significantly affected by the distribution of particle size, while soil loss is remarkably dependent on the aggregate stability. Therefore, maintaining soil surface cover plays an effective role in preventing soil loss by raindrop impact in the rainfed furrows.

**Keywords:** Rill Detachment, Runoff, Rainfall Intensity, Soil Physical Properties, Soil Loss.

## تأثیر ضربه قطرات باران بر هدررفت خاک از نوارهای کشت در خاک‌های با بافت مختلف

علی‌رضا واعظی<sup>۱\*</sup>، رعنا بیگدلی<sup>۱</sup>

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

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۳/۳۱ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۵/۲۳ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۶/۱۸)

### چکیده

ضعف پوشش گیاهی روی سطح و محتوای اندک ماده آلی خاک از عواملی هستند که حساسیت خاک‌های مناطق نیمه-خشک به فرسایش خاک در نوارهای کشت را افزایش می‌دهند. این پژوهش با هدف بررسی اثر ضربه قطرات باران بر رواناب و هدررفت خاک از شیارها در خاک‌های با بافت مختلف در منطقه نیمه‌خشک اجرا شد. نمونه‌های خاک از بافت‌های غالب خاک در دامنه‌های تحت فرسایش شیاری در استان زنجان تهیه شدند. برای این منظور، سه خاک با بافت مختلف (لومرسی، لومسیلتی و لومشنی) در فلولمی به طول ۱ متر و عرض ۰/۶ متر با سه تکرار در شیب یکنواخت ۱۰ درصد تحت باران شبیه‌سازی شده بررسی شدند. هر یک از خاک‌ها در دو حالت بارندگی: زیر ضربه مستقیم قطرات و بدون ضربه قطرات باران تحت بارانی با شدت ۵۰ میلی‌متر در ساعت به مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفتند. تولید رواناب و هدررفت خاک از شیارها در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد تولید رواناب و هدررفت خاک تحت تأثیر ضربه قطرات باران قرار گرفت (  $p < 0/01$  ). بیش‌ترین و کم‌ترین تأثیر ضربه قطرات باران بر تولید رواناب به ترتیب در خاک لومرسی ( ۲/۹۵ برابر) و لومشنی ( ۲/۰۲ برابر) بود. از نظر هدررفت، خاک لومشنی حساس‌ترین خاک به اثر ضربه قطرات باران (۳/۶۶ برابر) و خاک لومرسی مقاوم‌ترین ( ۲/۴۷ برابر) بود. تولید رواناب طی زمان در شیارها تحت ضربه قطرات باران از روند افزایشی پیروی کرد در حالی که تغییرات زمانی هدررفت خاک الگوی نامنظمی داشت. این مطالعه نشان داد که تولید رواناب در شیارها تحت بارندگی به شدت تحت تأثیر توزیع اندازه ذرات خاک است در حالی که هدررفت خاک از شیارها به پایداری ساختمان خاک وابسته است. بنابراین نگهداری پوشش سطح خاک نقشی مؤثر در جلوگیری از هدررفت خاک از شیارها تحت بارندگی دارد.

**واژه‌های کلیدی:** جداسدن شیاری، رواناب، شدت باران، ویژگی‌های فیزیکی خاک، هدررفت خاک.

### مقدمه

کشتزارهای دیم شخم خورده در راستای شیب می‌باشد ( Vaezi and Heidari., 2018). فرسایش شیاری بیش از ۸۰ درصد کل فرسایش در اراضی شیب‌دار کشاورزی در بسیاری از مناطق جهان را به خود اختصاص می‌دهد (Qin et al., 2019) بر اساس آمار سازمان خوار بار کشاورزی ملل متحد در سال ۲۰۱۶، حدود ۲۰ میلیون هکتار از اراضی زراعی ایران دیم است. با توجه به باران بسیار متغیر، فصل خشک طولانی و خشک‌سالی‌های مکرر، آب محدودیت عمده در کشاورزی به شمار می‌آید و چالش اساسی در کشاورزی دیم در مناطق خشک و نیمه‌خشک است ( El Kateb et al., 2013). تولید جریان سطحی و انتقال مؤثر ذرات در شخم‌های مختلف وقتی به‌وجود می‌آید که عملیات شخم از بالا به پایین شیب انجام شود. فرسایش ناشی از شخم در اراضی شیب‌دار عامل اصلی توزیع دوباره ذرات خاک در کشاورزی است (Van Ooset et al., 2006).

نتایج پژوهش‌ها بر روی فرسایش شیاری نشان می‌دهد که

فرسایش شیاری یکی از فرآیندهای تخریب خاک توسط آب در مراتع و زمین‌های زراعی شیب‌دار در بسیاری از مناطق جهان است (Porto et al., 2014). این فرسایش در اثر تولید جریان متمرکز در دامنه‌ها آغاز می‌شود و پس از سال‌ها، آبراه‌های کم عمق در امتداد شیب به وجود می‌آید. در تعریفی دقیق‌تر، فرسایش شیاری عبارت از جدا شدن و انتقال رسوب به وسیله جریان متمرکز آب در آبراه‌های باریک و فرسایش‌پذیر است (Chen et al., 2017). این فرسایش به‌عنوان آغازین مرحله فرسایش آب‌بندی از اهمیت بسیاری برخوردار است. از یک سو شیارها نه تنها باعث از بین رفتن قابل توجه خاک و آب در مزارع شیب‌دار شده، بلکه باعث از بین رفتن عمده مواد مغذی خاک سطحی و در نتیجه باعث تخریب اراضی و آلودگی رودخانه‌های پایین‌دست می‌شوند (Lei et al., 2008; Wirtz et al., 2012). فرسایش شیاری یکی از مهم‌ترین علل هدررفت خاک در

برشی هیدرودینامیکی، قدرت جریان واحد و قدرت جریان بیش از دو برابر می‌شود. فرسایش خاک تحت اثر ضربه قطره باران ۷۲/۳ تا ۹۶/۲ درصد کل رسوب را به خود اختصاص می‌دهد. Sajjadi and Mahmoodabadi (2015) آزمایش‌های پاشمان خاک توسط قطرات باران را در دو شدت انجام داده و بیان داشتند که تحت شدت‌های بالای باران مقادیر پاشمان ذرات با قطر کوچکتر از ۰/۰۴۳ بیشتر از ذرات بزرگ بوده و همچنین با افزایش زمان بارندگی، میزان پاشمان کل در ابتدای بارندگی به اوج خود می‌رسد. Lu و همکاران (۲۰۱۶) تأثیر قطرات باران بر فرسایش خاک و خاکدانه را بررسی کرده و نشان دادند که اثر ضربه قطره باران نقش مهمی در فرسایش خاک دامنه بازی می‌کند. هدررفت خاک به وسیله قطرات باران بیشتر از هدررفت آن به وسیله رواناب بوده و از بین بردن تأثیر قطرات باران، اثر شدت باران بر هدررفت خاک را کاهش می‌دهد. Vaezi et al (2017) با بررسی اثر ضربه قطرات باران بر فرسایش شیار و هدررفت خاک با هفت شدت باران دریافتند که میزان رواناب و هدررفت خاک با افزایش شدت بارندگی افزایش یافت. همچنین سهم اثر قطرات باران در هدررفت خاک به طور پیوسته با افزایش شدت بارندگی کاهش یافت. and Foroumadi (Vaezi 2017) با بررسی نقش شدت و ضربه قطرات باران بر ویژگی‌های فیزیکی خاک و ظرفیت جدا شدن ذره از شیار نشان دادند توزیع اندازه ذرات، اندازه خاکدانه، تخلخل و تشکیل آندوده به شدت تحت تأثیر شدت باران قرار گرفتند. افزایش شدت باران، از یک سو افزایش ضربه قطرات و تخریب ساختمان خاک و از سوی دیگر تولید جریان متمرکز در شیارها را به دنبال داشت. فرسایش شیار یکی از عوامل اصلی تخریب خاک به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. این خاک‌ها اغلب محتوای ماده آلی کمتری دارند و همچنین به دلیل کمبود رطوبت، انرژی جنبشی قطرات باران به سهولت موجب تخریب ساختمان خاک و افزایش فرسایش شیار در این مناطق می‌شود. در پژوهش‌های پیشین اغلب به بررسی فرآیند کلی فرسایش شیار یا بررسی جداگانه مراحل فرسایش شیار پرداخته شده و تعداد اندکی از پژوهش‌ها به سهم فرآیندهای انفرادی مانند رواناب یا قطره باران اختصاص داشته است (Qin et al., 2019) با وجود آن که در پژوهش‌های پیشین عوامل مؤثر بر فرسایش شیار از جمله بارندگی (Li et al., 2003) مورد بررسی قرار گرفته است، در مورد اثرات ضربه قطرات باران بر هدررفت خاک از شیار، به ویژه در مناطق نیمه‌خشک مانند بسیاری از مناطق ایران، اطلاعات اندکی در دسترس است. اهمیت این موضوع در پیش‌بینی حساسیت خاک‌های مختلف به فرسایش شیار بسیار آشکار است. استان زنجان از جمله مناطق نیمه‌خشک در شمال غرب ایران است که

گسترش این فرسایش به شدت بارندگی، سرعت جریان آب، خصوصیات هیدرولیکی جریان، درجه، طول شیب (Li et al., 2005) و خصوصیات خاک (Romero et al., 2007) بستگی دارد. تأثیر خصوصیات خاک بر فرسایش شیار را می‌توان با مفهوم فرسایش‌پذیری شیار بیان کرد. این عامل تحت تأثیر خصوصیتی مانند توزیع اندازه ذرات، ساختمان (اندازه و پایداری خاکدانه)، نفوذپذیری، مقدار ماده آلی و درصد سدیم تبادلی (Romero et al., 2007) قرار دارد. هر چه مقاومت خاک در برابر جریان متمرکز بیشتر باشد فرسایش‌پذیری خاک کمتر شده و ذرات کمتری از خاک کنده می‌شود و در نتیجه از گسترش شیار جلوگیری می‌شود (Knapen et al., 2007). خصوصیات هیدرولیکی جریان نقش مهمی در شدت جدا شدن ذرات از شیارها به‌ویژه در خاک‌های آهکی دارد (Mirzaee and Ghorbani-Dashtaki, 2018). پاشمان به وسیله ضربه قطره باران که مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده میزان جدا شدن ذرات خاک است، نتیجه تعامل پیچیده بین فرسایش قطرات باران و حساسیت پاشمانی خاک است (Choo et al., 2018). هنگامی که قطرات باران بر سطح خاک اثر می‌گذارند، انرژی این قطرات برای غلبه بر پیوند بین ذرات مصرف می‌شود (Ma et al., 2014). خاکدانه‌ها از یک سو با جذب آب باران دچار وارفتگی شده و از سوی دیگر در اثر ضربه قطرات باران دچار پراکنش می‌شوند (Vaezi et al., 2017). با تخریب ساختمان خاک و خیس شدن ذرات پراکنش یافته، لایه نازکی در سطح خاک به نام آندوده تشکیل می‌شود. تشکیل آندوده در سطح خاک در اثر قطرات باران یک ویژگی مشترک از خاک‌های تخریب شده است. این عارضه فیزیکی با کاهش هدایت هیدرولیکی خاک سطحی، نفوذ آب به خاک را محدود و شرایط را برای تولید رواناب فراهم می‌کند (Kidron, 2007). تأثیر قطره باران مهم‌ترین عامل وقوع فرسایش خاک است که نه تنها مواد خاک را جدا کرده بلکه حمل و نقل ذرات را نیز افزایش می‌دهد (Zhang and Wang, 2017).

در پژوهش‌های مختلف نقش ضربه قطرات باران بر میزان رواناب و فرسایش خاک مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا Xu et al. (2010) تأثیر قطرات باران بر رواناب و رسوب در اراضی شیب‌دار را مورد بررسی قرار داده و دریافتند که اثر قطره باران سبب افزایش آشفستگی و عدم پایداری الگوی جریان به‌وسیله افزایش عدد رینولدز و عدد فرود می‌شود. (An et al., 2012) با بررسی نقش اثر ضربه قطرات باران بر ساز و کار هیدرودینامیکی فرسایش خاک تحت سه شدت باران شبیه‌سازی شده و دو حالت باران (تحت ضربه و بدون ضربه قطرات) باران نشان دادند که در حالت تحت ضربه نسبت به حالت بدون ضربه قطرات باران، تنش

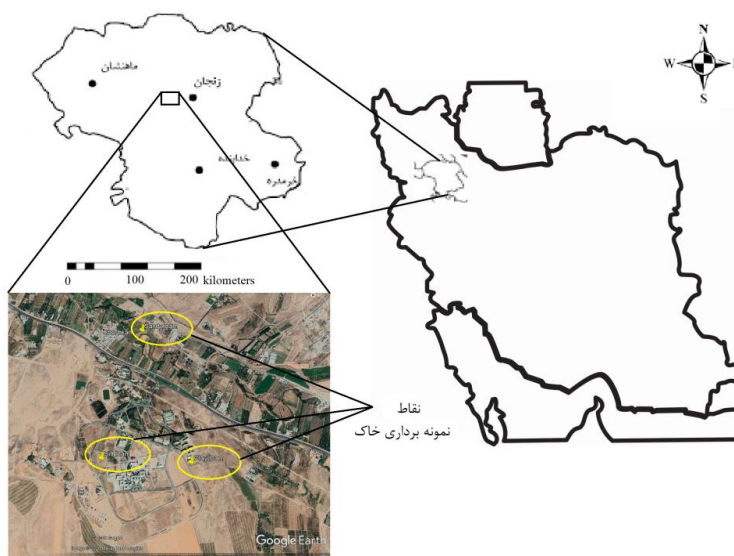
انجام گرفت. بر اساس داده‌های سازمان هواشناسی، میانگین بارندگی سالانه این منطقه ۳۱۱ میلی‌متر است و اقلیم منطقه به روش دمارتن نیمه‌خشک می‌باشد. در ابتدا دامنه‌های تحت فرسایش شیاری در منطقه شناسایی شد و در آن از خاک‌های منطقه نمونه‌های خاک برداشت شد. پس از نمونه‌برداری‌های متعدد از خاک‌های منطقه و بررسی‌های اولیه آزمایشگاهی، نهایتاً سه خاک با بافت مختلف که در دامنه‌های تحت فرسایش شیاری در منطقه غالب بودند (لومرسی، لوم‌شنی و لوم‌سیلتی) انتخاب شدند. این خاک‌ها به ترتیب از نقاط با طول و عرض جغرافیایی E " ۲۴' ۲۱" N و " ۴۱' ۰۳" N، E " ۲۴' ۱۱" و " ۴۸' ۵۴" N و " ۴۱' ۳۶" و E " ۲۳' ۴۲" و " ۴۸' ۰۹" N برداشت شدند (شکل ۱). حدود ۲۰۰ کیلوگرم از هر خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی متری جمع‌آوری و به آزمایشگاه فرسایش خاک منتقل و خاک‌ها برای انطباق خاک با شرایط خاک طبیعی و حفظ ساختمان خاک از الک ۸ میلی‌متری عبور داده شدند (Chen et al., 2016).

اشکال مختلف فرسایش به ویژه فرسایش شیاری در آن آشکارا دیده می‌شود. بسیاری از خاک‌ها در این منطقه آهکی هستند و از محتوای مواد آلی کمتری برخوردارند و به دلیل محدودیت توسعه ساختمانی به شدت حساس به تخریب ناشی از ضربه قطرات باران هستند. ضعف پوشش گیاهی عامل اساسی است که منجر به افزایش تأثیر ضربه قطرات باران بر تخریب ساختمان و ایجاد فرسایش خاک در دامنه‌ها می‌شود. بررسی نقش ضربه قطرات باران تحت باران‌های طبیعی دشوار است، چرا که از یک سو پیش‌بینی زمان وقوع باران‌ها دشوار است و از سوی دیگر ویژگی‌های باران‌ها یکسان نیست و اساساً باران‌ها تکرارناپذیرند. از این رو، این پژوهش در مقیاس آزمایشگاهی، با هدف تعیین سهم ضربه قطرات باران در هدررفت خاک از شیاری در برخی خاک‌های منطقه نیمه‌خشک انجام گرفت.

## مواد و روش‌ها

### انتخاب خاک‌های مورد بررسی

این پژوهش در برخی از خاک‌های استان زنجان طی سال ۱۳۹۸



شکل ۱- موقعیت نقاط نمونه‌برداری خاک در استان و کشور

هر مرحله از آزمایش، هر یک از نمونه‌های خاک به درون فلوم ریخته و شیاری با ارتفاع دیواره ۱۵ سانتی‌متر و عمق شیاری ۶ تا ۸ سانتی‌متر و طول ۱ متر ایجاد شد. آزمایش در شیب ۱۰ درصد (مطابق با شیب‌های غالب در دامنه‌های تحت فرسایش آبی) انجام گرفت. با آگاهی از چگالی ظاهری خاک‌ها در منطقه مطالعاتی سعی شد با مرطوب کردن خاک در چند مرحله، شرایط طبیعی خاک از نظر چگالی به دست آید. برای انطباق آزمایش با شرایط طبیعی و رسیدن به رطوبت ظرفیت مزرعه، خاک‌ها به آرامی و

### اندازه‌گیری هدررفت خاک از شیاریها

به منظور اندازه‌گیری هدررفت خاک از شیاریها در دو حالت تحت ضربه قطره باران و بدون ضربه، از فلومی به ابعاد ۱ متر و عرض ۶۰ سانتی‌متر استفاده شد. فلوم آزمایشی توسط دو ورق گالوانیزه به سه بخش به ابعاد ۱ متر و ۲۰ سانتی‌متر تقسیم گردید (شکل ۲). ابعاد فلوم متناسب با ابعاد صفحه بارش دستگاه شبیه‌ساز باران طراحی شد و به دلیل محدودیت طراحی دستگاه بزرگ شبیه‌ساز باران، امکان بررسی آزمایش در ابعاد بزرگ فلوم فراهم نبود. در

در ساعت تنظیم گردید. علت استفاده از چنین بارانی بر اساس بررسی های اولیه روی شدت های مختلف باران در آزمایشگاه بود که نتایج نشان داد باران های با شدت کمتر از توان فرسایش زایی در شیارها برخوردار نیستند. از سوی دیگر با وجود فراوانی اندک باران های با شدت ۵۰ میلی متر بر ساعت در منطقه، وقوع فرسایش آبی بیشتر نتیجه وقوع چنین باران های نادر در منطقه است. نمونه های خاک داخل فلوم پس از رسیدن به رطوبت ظرفیت مزرعه به مدت ۳۰ دقیقه تحت شدت مورد نظر باران قرار گرفتند. در فواصل زمانی ۵ دقیقه نمونه های رسوب و رواناب برای هر آزمایش جمع آوری شد. در طول آزمایش، زمان زهکشی آب و رواناب برای هر نمونه ثبت گردید. پس از پایان هر آزمایش جرم کل مخلوط رواناب و رسوب داخل سطل ها اندازه گیری شد. جرم رسوب هر سطل نیز پس از خشک کردن در آون (دمای ۱۰۵ درجه، ۲۴ ساعت) تعیین گردید.



(ب)



(الف)

شکل ۲- نمایی از شیارهای ایجاد شده با مقطع سهمی (الف) و لوله های انتقال رسوب در انتهای شیارها (ب)

بدون تخریب شیارها، اشباع شده و پس از گذشت ۲۴ تا ۴۸ ساعت از زمان اشباع که خروج آب ثقلی از زیر فلوم به پایان رسید، آزمایش آغاز گردید. در این شرایط رطوبتی، محتوای رطوبتی خاک به حداکثر ظرفیت نگهداری آب در شرایط طبیعی (FC) نزدیک تر بود. تحت چنین شرایط رطوبتی و به دلیل وجود شیب، فرصت ماندگاری و نفوذ آب به خاک محدود شده و احتمال وقوع جریان و هدررفت خاک از شیارها انتظار می رود. به منظور بررسی هدررفت خاک تحت دو شرایط تحت ضربه و حذف ضربه قطره باران، توری های فلزی به طول ۱ متر و عرض ۰/۲ متر که توسط قاب های چوبی ثابت شده و برای هر بخش از فلوم طراحی شده بودند، در آزمایش های مربوط به حذف قطره باران روی فلوم قرار گرفتند. برای انجام آزمایش یک دستگاه شبیه ساز باران قطره ساز به ارتفاع ۳ متر و ابعاد ۱ متر × ۱/۵ متر استفاده شد. دستگاه شبیه ساز باران به دلیل یکنواختی باران، روی شدت ۵۰ میلی متر

### تجزیه و تحلیل داده ها

داده های حاصل از آزمایش قبل از تحلیل، از نظر توزیع نرمال بودن مورد بررسی قرار گرفتند. برای بررسی تغییرات فرسایش شیار در سه بافت متفاوت خاک از آزمون چند دامنه ای دانکن استفاده شد. همچنین برای بررسی تأثیر ضربه قطرات باران بر فرسایش شیار در بافت های متفاوت از آزمون t-test استفاده شد. تجزیه واریانس داده ها با استفاده از نرم افزار SPSS انجام شد و برای رسم نمودار از نرم افزار Excel نسخه ۲۰۱۶ بهره گرفته شد.

### نتایج و بحث

#### ویژگی های خاک های مورد بررسی

برخی ویژگی های فیزیکی خاک ها در جدول (۱) ارائه شده است.

#### اندازه گیری ویژگی های خاک

برای تعیین ویژگی های فیزیکی خاک های مورد بررسی، نمونه ای از هر خاک به آزمایشگاه منتقل و مورد بررسی قرار گرفتند. برای تعیین توزیع اندازه ذرات اولیه خاک ذرات بخش شن (بسیار درشت، درشت، متوسط، ریز و بسیار ریز) با استفاده از الک های مربوطه جدا و وزن شدن و ذرات کوچک تر (سیلت و رس) به روش هیدرومتری (Bouyoucos., 1962)، چگالی ظاهری با استفاده از روش سیلندر فلزی (Blake and Hartge., 1986)، هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار ثابت (Mc Kenzie et al., 2002)، ماده آلی به روش والکی و بلک (Walkley and Black., 1934) و پایداری خاکدانه به روش الک تر (Yoder., 1936) اندازه گیری شد.

**تغییرات تولید رواناب و فرسایش بین خاک‌ها**

تجزیه واریانس تولید رواناب در بین خاک‌های مورد بررسی (جدول ۲) نشان داد که مقدار تولید رواناب تحت ضربه قطرات باران، تفاوت معنی‌دار بین خاک‌ها دارد. این موضوع نشان‌دهنده تأثیر ساختمان خاک بر تولید رواناب است به طوری که در شرایط وجود ضربه قطرات، خاک‌های با ساختمان نسبتاً پایدار از خاک‌های با ساختمان ضعیف رواناب کمتری تولید می‌کنند. در شرایط عدم وجود ضربه قطرات باران، نقش ساختمان خاک در شدت نفوذ آب و تولید رواناب نمایان نمی‌شود. اهمیت ساختمان خاک در پژوهش‌های پیشین در کاهش فرسایش آبی بیان شده است؛ (Hoyos (2005) در پژوهش خود نشان دادند که پایداری خاکدانه و نفوذپذیری از ویژگی‌های مهم مؤثر بر فرسایش‌پذیری خاک هستند. همچنین Rouhipour et al (2004) در پژوهش خود، چهار نمونه خاک را تحت چهار شدت بارندگی و پنج شیب متفاوت بررسی کرده و نشان دادند که با افزایش درصد خاکدانه‌های پایدار، تخریب خاک توسط ضربه قطرات باران کاهش یافته و مقاومت خاک به فرسایش افزایش می‌یابد. Sadeghian and Vaezi (2019) در پژوهش خود انتخاب‌پذیری رسوب در اثر فرسایش شیاری را در سه بافت خاک بررسی کرده و اعلام داشتند پایداری خاکدانه، نقش مهم در نفوذپذیری خاک و تولید جریان متمرکز ایفا می‌کند و در خاک‌های با ساختمان ناپایدار، شدت تولید جریان و بار رسوب بیشتر است. تجزیه واریانس هدررفت خاک‌های مورد بررسی نیز نشان داد تفاوت معنی‌داری در مقدار هدررفت این خاک‌ها در هر دو حالت بارندگی تحت ضربه قطرات و بدون ضربه آن وجود ندارد.

همان‌طور که شکل (۳) نشان می‌دهد، اگرچه تولید رواناب و هدررفت خاک میان سه خاک مورد بررسی تفاوت معنی‌دار نداشت (به جز در مورد تولید رواناب تحت ضربه قطرات باران)، تفاوت زیادی بین دو حالت باران (تحت ضربه و بدون ضربه قطرات) از نظر رواناب و هدررفت خاک وجود داشت. این موضوع اهمیت ضربه قطرات باران را در هدررفت آب و خاک نشان می‌دهد. نقش ضربه قطرات باران در هدررفت آب و خاک در خاک‌های با بافت مختلف متفاوت بود. این موضوع می‌تواند به ویژگی‌های ساختمان خاک از جمله پایداری خاکدانه مرتبط باشد.

خاک‌های مورد مطالعه از نظر ماده آلی فقیر هستند به طوری که محتوای ماده آلی از ۰/۴۴ درصد در خاک لوم رسی تا حداکثر ۰/۹۶ درصد در خاک لوم سیلتی تغییر می‌کند. خاک لوم رسی به دلیل داشتن حجم منافذ بیشتر، از چگالی ظاهری کمتری (۱/۱۷ گرم بر سانتی متر مکعب) برخوردار است در حالی که در خاک لوم شنی با وجود اندازه بزرگتر منافذ، چگالی ظاهری نیز بیشتر (۱/۴۰ گرم بر سانتی متر مکعب) است.

**جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مورد بررسی**

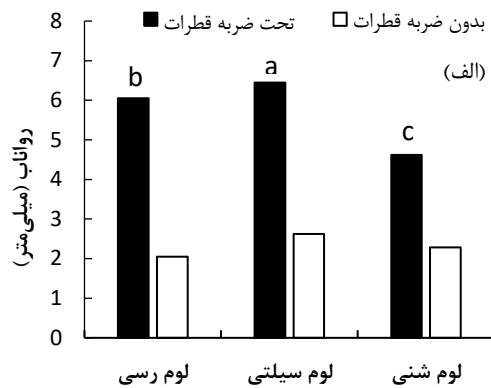
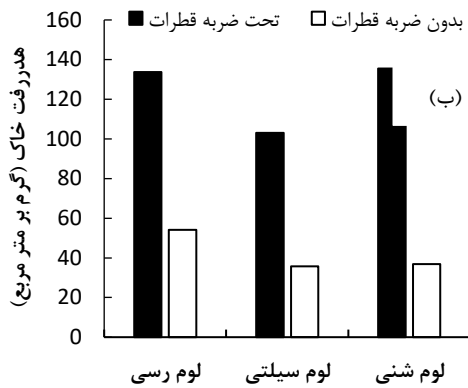
ویژگی‌های خاک	لوم رسی	لوم سیلتی	لوم شنی
شن (%)	۲۶/۸۸	۳۳/۹۰	۶۷/۱۷
شن خیلی درشت (%)	۱/۸۱	۳/۴۷	۰/۹۰
شن درشت (%)	۱/۳۷	۹/۱۲	۸/۵۸
شن متوسط (%)	۸/۲۸	۷/۰۲	۱۵/۲
شن ریز (%)	۵/۳۷	۵/۹۷	۲۰/۹۰
شن خیلی ریز (%)	۱۰/۰۴	۸/۳۰	۱۹/۶
سیلت (%)	۶۰/۳۵	۵۳/۶۰	۲۵/۳۲
رس (%)	۵/۳۷	۱۲/۵	۷/۵
ماده آلی (%)	۰/۴۴	۰/۹۶	۰/۸۱
هدایت هیدرولیکی اشباع (cm.h <sup>-1</sup> )	۵/۳۴	۷/۵۱	۱۳/۸۶
چگالی ظاهری (g.cm <sup>-3</sup> )	۱/۱۷	۱/۲۸	۱/۴۰
پایداری خاکدانه (mm)	۰/۵۲	۰/۹۸	۰/۹۲

از این رو نفوذپذیری خاک لوم شنی بیشترین مقدار (cm.h<sup>-1</sup>) است، در حالی که خاک لوم رسی از کمترین نفوذپذیری (۵/۳۴ cm.h<sup>-1</sup>) برخوردار می‌باشد. خاک‌ها از نظر پایداری ساختمانی در برابر آب ضعیف تر بوده و مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب از ۰/۵۲ میلیمتر در خاک لوم رسی تا ۰/۹۸ میلی متر در خاک لوم سیلتی تغییر می‌کند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که خاک‌هایی که دچار کمبود ذرات هم‌اور (رس و ماده آلی) هستند ساختمانی ناپایدار دارند. تحت این شرایط فرسایش‌پذیری شیاری خاک بیشتر است (Romero et al., 2007). محتوای اندک ذرات رس در خاک‌های لوم شنی و لوم سیلتی عامل مهمی در کاهش پایداری خاکدانه در آن‌ها است؛ در حالی که در خاک لوم رسی با وجود ذرات رس زیاد به دلیل فقر ماده آلی، پایداری ساختمان بسیار اندک است.

**جدول ۲- تجزیه واریانس رواناب و فرسایش در خاک‌های مورد بررسی در دو حالت بارندگی (تحت ضربه و بدون ضربه قطرات)**

متغیر	شرایط باران	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	معنی داری
رواناب	تحت ضربه قطرات	۲	**۰/۴۶۱	۵/۲۴۳	۰/۰۰۸
	بدون ضربه قطرات	۲	n.s. ۰/۰۴۱	۰/۴۱۵	۰/۶۶۳
هدررفت خاک	تحت ضربه قطرات	۲	n.s. ۱۶۶/۶۹۳	۰/۹۱۴	۰/۴۰۷
	بدون ضربه قطرات	۲	n.s. ۵۲/۸۱۹	۰/۸۴۴	۰/۴۳۶

n.s. و \*\* به ترتیب غیر معنی‌داری و معنی‌دار در سطح احتمال ۹۹/۹۹ درصد



شکل ۳- تفاوت مجموع تولید رواناب (الف) و هدررفت خاک بین خاک‌ها (ب) در دو حالت باران (تحت ضربه و بدون ضربه قطرات باران) حروف انگلیسی روی ستون‌ها نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۹۹ درصد هستند ( $p < 0.001$ ).

لوم رسی (۲/۴۷) بود. در خاک لوم شنی، هدایت هیدرولیکی خاک بیشتر از آنچه تحت تأثیر ساختمان باشد، متأثر از توزیع اندازه ذرات بود و از این رو به دلیل فراوانی زیاد ذرات درشت اولیه (۶۷/۲ درصد شن کل)، شدت نفوذ آب به خاک ذاتاً بیشتر بود به طوری که در شرایط ضربه قطرات باران نیز با وجود تخریب ساختمان، شدت نفوذ آب کمتر از سایر خاک‌ها تحت تأثیر قرار گرفت. با این وجود، شدت هدررفت خاک در آن به میزان زیادی متأثر از ضربه قطرات باران بود. وجود خاکدانه‌های نسبتاً پایدار از یک سو و فراوانی زیاد ذرات درشت و سنگین در آن (شن) موجب شد هدررفت خاک در شرایط فقدان ضربه قطرات به مراتب کمتر از شرایط وجود ضربه قطرات باران باشد.

#### تغییرات زمانی رواناب و هدررفت خاک تحت تأثیر ضربه قطرات باران

بررسی تغییرات مقدار رواناب طی زمان در خاک‌های مختلف نشان داد که مقدار آن تحت ضربه قطره باران نسبت به حالت بدون ضربه در هر سه خاک بیشتر است (شکل ۵). به‌طور کلی در آغاز بارندگی به دلیل پایین بودن رطوبت خاک، مقدار آب بیشتری به خاک نفوذ کرد و در نتیجه رواناب خروجی کم بود. پس از گذشت زمان و اشباع شدن خاک، میزان رواناب خروجی رو به افزایش گذاشت. بررسی روند تغییرات رواناب نشان داد که شیب منحنی رواناب در حالت بدون ضربه در خاک لوم رسی نسبت به خاک لوم شنی و به ویژه لوم سیلتی کمتر بود که نشان دهنده تغییرات تدریجی تولید رواناب در این خاک است. در خاک لوم رسی برخلاف تصور در زمان پایانی، تولید رواناب کاهش یافت. این موضوع می‌تواند به دلیل تغییر مورفولوژی (ریخت‌شناسی) شیار تحت تأثیر باران و جریان آب باشد. افزایش محیط خیس-شدگی شیار در اثر رسوب‌گذاری دوباره و فروریزش خاکدانه‌ها از

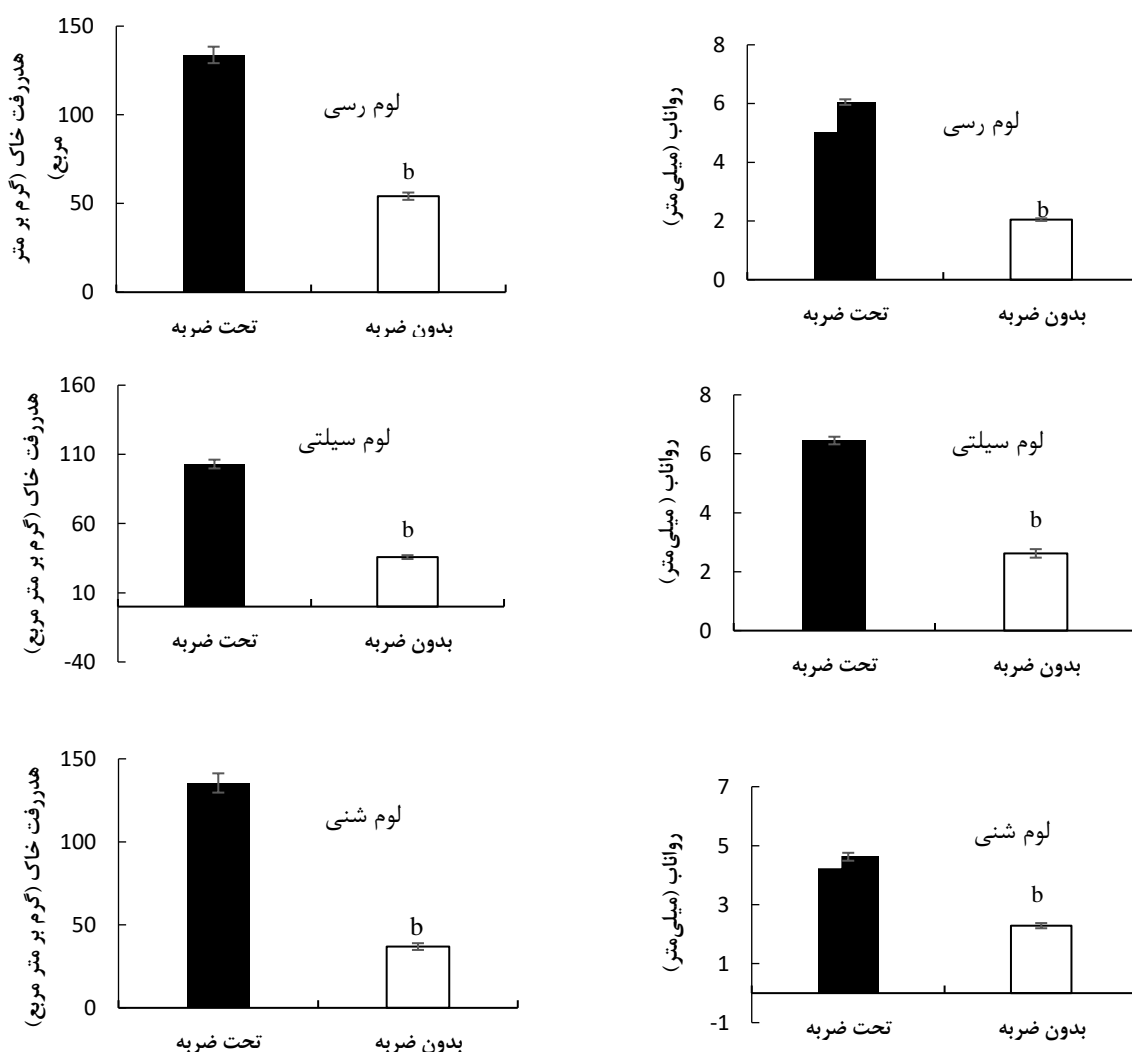
#### تأثیر ضربه قطرات باران بر رواناب و هدررفت خاک

بر اساس آزمون  $t$  جفتی، تفاوت معنی‌دار از نظر تولید رواناب میان دو حالت بارندگی در هر سه خاک بود ( $p < 0.001$ ). مقدار رواناب تولیدی در حالت تحت ضربه به ترتیب حدود ۴/۰۰۱، ۳/۸۲ و ۲/۳۳ میلی‌متر در خاک لوم رسی، لوم سیلتی و لوم شنی بیشتر از حالت بدون ضربه بود (شکل ۳). بر این اساس می‌توان بیان کرد ضربه مکانیکی قطرات باران با تخریب خاکدانه و ایجاد سله، موجب کاهش نفوذپذیری خاک شده (Valettea *et al.*, 2006) و مقدار رواناب را افزایش داد. میزان افزایش رواناب تحت ضربه قطرات باران در خاک لوم رسی بیش‌ترین (۲/۹۵ برابر) و در خاک لوم شنی کم‌ترین (۲/۰۲ برابر) بود. هدایت هیدرولیکی بالا و فراوانی ذرات درشت در خاک لوم شنی موجب شد که این خاک، کم‌ترین نسبت رواناب را داشته باشد. در همین راستا، Vaezi *et al.* (2016) با بررسی نقش ویژگی‌های خاک در فرسایش شیلی بیان داشتند که توزیع اندازه ذرات به مقدار قابل توجهی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ( $K_s$ ) که یکی از عامل‌های اساسی کاهش رواناب می‌باشد را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که در خاک‌های ریز بافت، به دلیل نفوذپذیری پایین خاک، تولید رواناب و در نتیجه هدررفت خاک در شیارها بیش‌تر می‌شود (Vatani and Vaezi., 2013).

نتایج آزمون  $t$  جفتی نشان داد که تفاوت معنی‌دار از نظر هدررفت خاک بین دو حالت بارندگی وجود دارد ( $p < 0.001$ ). (شکل ۴). در حالت تحت ضربه، مقدار هدررفت خاک مانند مقدار رواناب بیشتر از حال بدون ضربه بود. بررسی نسبت هدررفت خاک در حالت تحت ضربه قطرات و بدون ضربه قطرات باران نشان داد که برخلاف رواناب، بیش‌ترین نسبت هدررفت خاک از شیار در خاک لوم رسی (۳/۶۶) و کمترین میزان هدررفت خاک در خاک

و کاهش شدت نفوذ آب باران طی بارندگی است. An et al. (2012) و Lu et al. (2016) در پژوهش خود بیان داشتند که حذف ضربه قطرات باران، با کاهش انرژی جنبشی قطرات باران از رواناب سطحی خاک جلوگیری کرده، نفوذ را افزایش می‌دهد. در خاک لوم شنی با گذشت زمان از آغاز بارندگی، تفاوت تولید رواناب بین دو حالت بارندگی بیشتر بود که دلیل آن نفوذپذیری بیشتر این خاک از یک سو و پایداری ساختمانی نسبتاً زیاد آن بود. خاک‌های دارای درصد بیشتری از ذرات شن، اثر ضربه قطرات باران را بهتر کاهش داده و به دلیل داشتن سرعت نفوذ آب بیشتر، رواناب کمتری تولید می‌کنند. این همبستگی منفی ذرات شن با رواناب در پژوهش‌های (Vaezi and Vatani 2015) و Vahabi and Mahdian (2008) نیز مشاهده شده است.

پشته به درون شیار دلایلی برای تغییر ریخت‌شناسی شیار طی بارندگی هستند. اگرچه کل تولید رواناب در خاک لوم شنی کمتر از دو خاک دیگر بود (شکل ۳) اما شدت تولید رواناب در آن در زمان پایانی به شدت زیاد شد. به نظر می‌رسد ساختمان نسبتاً پایدار در این خاک موجب شد خاکدانه‌ها دیرتر دچار تخریب شوند و با تخریب آنها در زمان‌های انتهایی، منافذ خاک بیشتر مسدود شده و هدایت هیدرولیکی خاک افت بیشتری یافته است و در نتیجه شدت تولید رواناب زیاد بوده است. الگوی تغییرات تولید رواناب و هدررفت خاک در هر سه خاک میان دو حالت باران متفاوت بود. تفاوت بین منحنی‌های تولید رواناب در دو حالت بارندگی (تحت ضربه قطرات باران و بدون ضربه قطرات) نشان دهنده اهمیت ضربه قطرات باران در تخریب ساختمان خاک



شکل ۴- مقایسه بین دو حالت باران از نظر تولید رواناب (شکل‌های سمت راست) و هدررفت خاک (شکل‌های سمت چپ)

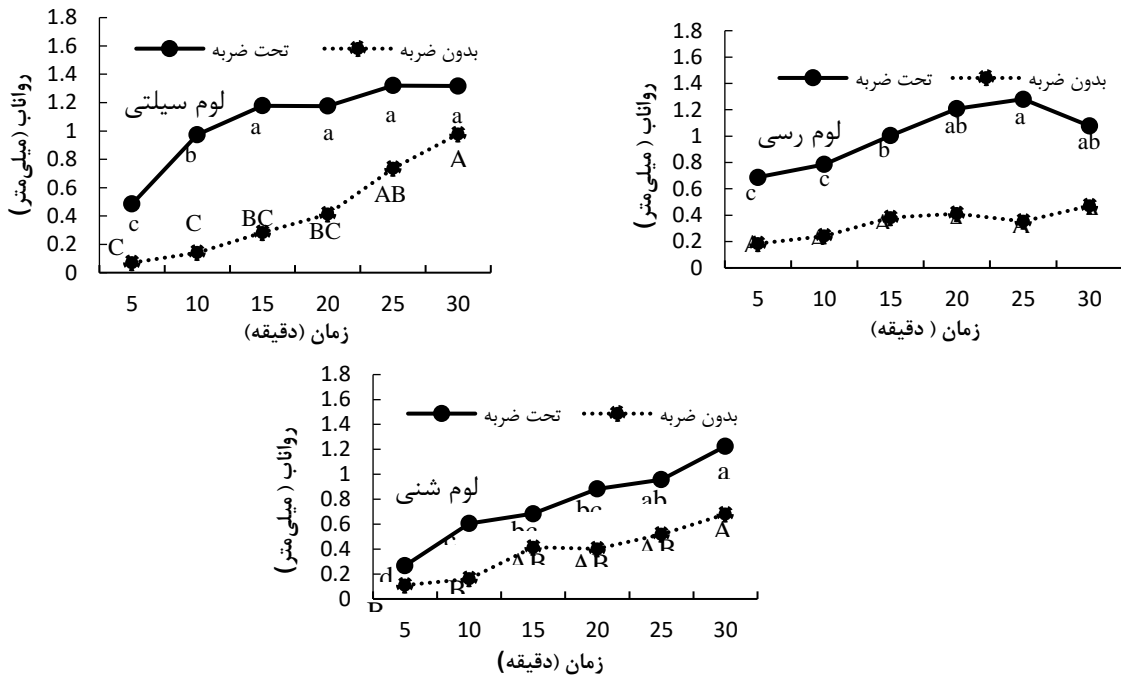
دلیل آن را می‌توان موجودیت ذرات فرسایش‌پذیر در هر زمان طی بارندگی بیان کرد. به عبارت دیگر، میزان هدررفت خاک طی زمان برخلاف تولید رواناب همواره روند صعودی ندارد بلکه گاهی ذرات فرسایش‌پذیر در زمانی از بارندگی، باعث هدررفت بیشتر خاک شده

هدررفت خاک از شیار در هر زمان در خاک‌های مورد بررسی در حالت تحت ضربه قطرات نسبت به حالت بدون ضربه بیشتر بود (شکل ۶). در خاک‌های مورد بررسی، تغییرات زمانی هدررفت خاک برخلاف تغییرات زمانی تولید رواناب از روند منظمی پیروی نکرد.

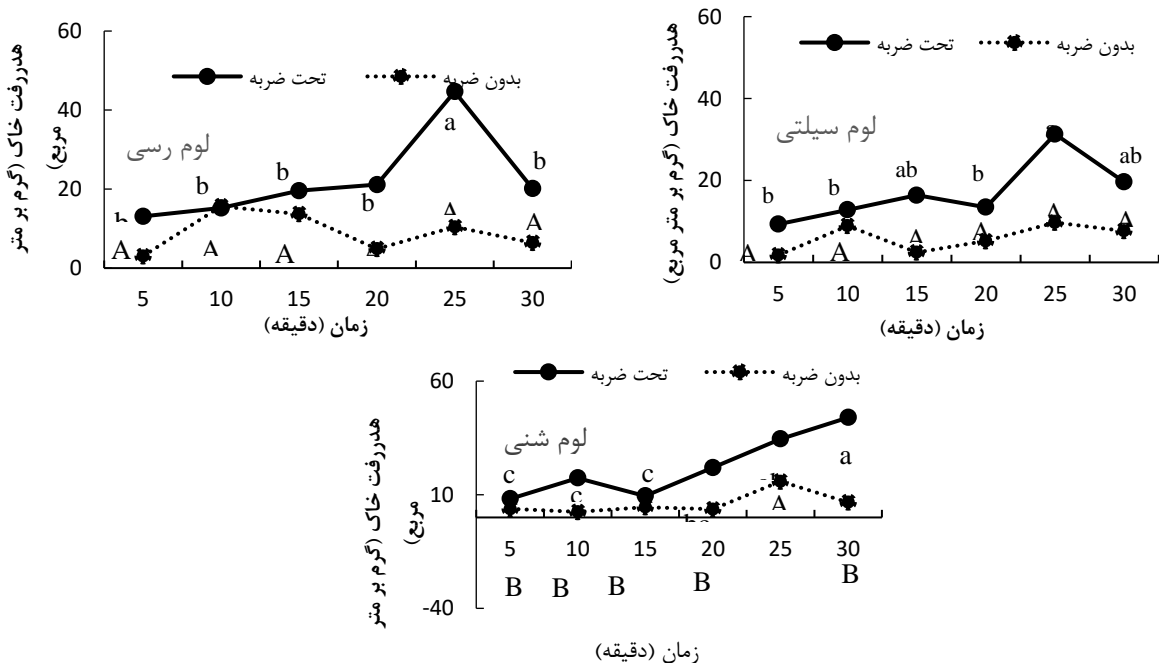


داده است، در حالی که تحت شرایط ضربه قطرات باران مقدار هدررفت روند نوسانی را نشان داد (An et al., 2012). هدررفت خاک در زمان های پایانی در حالت تحت ضربه قطره باران تنها در خاک لوم شنی روندی صعودی آشکاری داشت و در دو خاک دیگر دچار افت شدید شد. به نظر می رسد روند هدررفت خاک در خاک لوم شنی از روند زمانی تولید رواناب پیروی می کند در حالی که در دو خاک دیگر با وجود افزایش نسبی تولید رواناب در زمان های پایانی، به دلیل کاهش موجودیت ذرات فرسایش پذیر در شیارها، هدررفت خاک نیز کمتر بود (Vatani and Vaezi, 2013).

و گاهی به دلیل کاهش موجودیت ذرات فرسایش پذیر، هدررفت خاک کاهش می یابد. به عبارت دیگر با وجود آن که تولید رواناب طی زمان غالباً روند افزایشی دارد اما هدررفت خاک عمدتاً وابسته به فراوانی ذرات فرسایش پذیر در هر لحظه از بارندگی است. گاهی با وجود تولید رواناب بیشتر به دلیل عدم وجود ذرات ریز قابل انتقال، هدررفت خاک کمتر می شود و در زمان هایی با فروپاشی ساختمان خاک وضعیت عکس پدیدار می شود. همچنین پس از حذف اثر ضربه قطرات باران، مقدار هدررفت در طی زمان تقریباً حالت پایداری داشت که نشان می دهد حداکثر ظرفیت جدایش و انتقال ذرات رخ



شکل ۵- تفاوت تولید رواناب در خاک ها تحت تأثیر ضربه قطره باران



شکل ۶- تفاوت هدررفت در خاک ها تحت تأثیر ضربه قطره باران

## نتیجه‌گیری

ضربه بود. الگوی تغییرات زمانی تولید رواناب در دو حالت باران متفاوت از الگوی تغییرات زمانی هدررفت خاک بود. در خاک ریزبافت مانند خاک لومرسی بر خلاف خاک لومشنی الگوی افزایش تدریجی در تولید رواناب مشاهده شد و در شرایط وجود ضربه قطرات، تفاوت در تولید رواناب آشکارتر بود، در حالی که تغییرات زمانی هدررفت خاک از الگوی نامنظمی پیروی کرد و بیشتر از آنچه به تغییرات زمانی نفوذپذیری خاک و تولید رواناب وابسته باشد، به موجودیت ذرات قابل انتقال در شیار بستگی دارد. در شرایط وجود ضربه قطرات باران، الگوی مذکور از بی‌نظمی بیشتری برخوردار بود و نشان‌دهنده اهمیت ضربه قطرات باران بر موجودیت ذرات قابل انتقال در شیار و هدررفت خاک است. به طور کلی این پژوهش نشان داد که ضربه قطرات باران اهمیت زیادی به ویژه در تولید رواناب در خاک‌های با نفوذپذیری پایین و نیز اهمیت زیاد در هدررفت خاک به ویژه در خاک‌های با ساختمان نسبتاً پایدار دارد. وجود پوشش مناسب در سطح می‌تواند عامل بازدارنده مهم از نظر حفظ آب و خاک در چنین خاک‌هایی باشد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

این پژوهش نشان داد ضربه قطرات باران نقش مهمی در گسترش و هدررفت خاک از شیارها دارد. مقایسه تولید رواناب بین دو حالت باران (تحت ضربه قطرات و بدون ضربه قطرات) نشان داد که بیشتر تأثیر ضربه قطرات باران از نظر تولید رواناب در خاک لومرسی (۲/۹۵ برابر) و کمترین تأثیر در خاک لومشنی (۲/۰۲ برابر) بود. همچنین بیشترین تأثیر ضربه قطرات باران از نظر هدررفت در خاک لومشنی (۳/۶۶ برابر) و کمترین در خاک لومرسی (۲/۴۷ برابر) بود. این نتایج نشان می‌دهد تولید رواناب که به نفوذ آب در خاک بستگی دارد عمدتاً تحت تأثیر توزیع اندازه ذرات اولیه خاک است و در خاک لومشنی به دلیل نفوذپذیری ذاتی بالا، نقش ضربه قطرات باران بر تولید رواناب کمترین بود؛ در حالی که هدررفت خاک بیشتر از آنچه به توزیع اندازه ذرات اولیه بستگی داشته باشد، متأثر از پایداری ساختمان خاک است و در خاک لومشنی به دلیل وجود خاکدانه‌های نسبتاً پایدار، هدررفت خاک به شدت تحت تأثیر ضربه قطرات باران بود. تولید رواناب و هدررفت خاک تغییرات زمانی نشان داد در تمام اوقات، مقدار آن‌ها تحت ضربه قطرات باران بیشتر از حالت بدون

## REFERENCES

- An, J., Zheng, F., Lu, J., and Li, G. (2012). Investigating the role of raindrop impact on hydrodynamic mechanism of soil erosion under simulated rainfall conditions. *Soil Science*, 177(8), 517-526.
- Blake, G. R., and Hartge, K. H. (1986). Particle density. *Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical methods*, 5, 377-382.
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. *Agronomy Journal*, 54(5), 464-465.
- Chen, X. Y., Huang, Y. H., Zhao, Y., Mo, B., Mi, H. X., and Huang, C. H. (2017). Analytical method for determining rill detachment rate of purple soil as compared with that of loess soil. *Journal of Hydrology*, 549, 236-243.
- Chen, X. Y., Zhao, Y., Mi, H. X., and Mo, B. (2016). Estimating rill erosion process from eroded morphology in flume experiments by volume replacement method. *Catena*, 136, 135-140.
- Choo, H., Park, K. H., Won, J., and Burns, S. E. (2018). Resistance of Coarse-grained Particles against Raindrop Splash and Its Relation with Splash Erosion. *Soil and Tillage Research*, 184, 1-10.
- El Kateb, H., Zhang, H., Zhang, P., and Mosandl, R. (2013). Soil erosion and surface runoff on different vegetation covers and slope gradients: A field experiment in Southern Shaanxi Province, China. *Catena*, 105, 1-10.
- Foroumadi, M., and Vaezi, A. R. (2017). Physical Degradation and Particle Detachment Capacity of Rill in Relation to Rainfall Intensity and Raindrop Impact in a Marl Soil. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 21(2), 263-277. (In Persian)
- Hoyos, N. (2005). Spatial modeling of soil erosion potential in a tropical watershed of the Colombian Andes. *Catena*, 63(1), 85-108.
- Kidron, G. J. (2007). Millimeter-scale microrelief affecting runoff yield over microbiotic crust in the Negev Desert. *Catena*, 70(2), 266-273.
- Knapen, A., Poesen, J., Govers, G., Gyssels, G., and Nachtergaele, J. (2007). Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. *Earth-Science Reviews*, 80(1-2), 75-109.
- Lei, T. W., Zhang, Q. W., Yan, L. J., Zhao, J., and Pan, Y. H. (2008). A rational method for estimating erodibility and critical shear stress of an eroding rill. *Geoderma*, 144(3-4), 628-633.
- Li, J. C., Liu, Q. Q., and Zhou, J. F. (2003). Environmental mechanics research in China. *Advances in Applied Mechanics*, 39, 217-306.
- Li, P., Li, Z. B., Zheng, L. Y., and Lu, K. (2005). Comparisons of dynamic mechanics of soil erosion and sediment yield by runoff on Loess slope. *Journal of Soil Water Conservation*, 19, 66-69. (In Chinese)
- 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.
- Ma, R. M., Li, Z. X., Cai, C. F., and Wang, J. G. (2014). The dynamic response of splash erosion to aggregate mechanical breakdown through rainfall simulation events in Ultisols (subtropical China). *Catena*, 121, 279-287.
- Mc Kenzie, N., Coughlan, K., and Cresswell, H. (2002). *Soil physical measurement and interpretation for land evaluation (Vol. 5)*. Csiro Publishing.
- Mirzaee, S., & Ghorbani-Dashtaki, S. (2018). Deriving and evaluating hydraulics and detachment models of rill erosion for some calcareous soils. *Catena*, 164, 107-115.
- Porto, P., Walling, D. E., and Capra, A. (2014). Using <sup>137</sup>Cs and <sup>210</sup>Pbex measurements and conventional surveys to investigate the relative contributions of interrill/rill and gully erosion to soil loss from a small cultivated catchment in Sicily. *Soil and Tillage Research*, 135, 18-27.
- Qin, C., Zheng, F., Wilson, G. V., Zhang, X. J., and Xu, X. (2019). Apportioning contributions of individual rill erosion processes and their interactions on loessial hillslopes. *Catena*, 181, 104099.
- Romero, C. C., Stroosnijder, L., and Baigorria, G. A. (2007). Interrill and rill erodibility in the northern Andean Highlands. *Catena*, 70(2), 105-113.
- Rouhipour, H., Farzaneh, H., and Asadi, H. (2004). The effect of aggregate stability indices on soil erodibility factors using rainfall simulator. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 11 (3), 236-254. (In Persian)
- Sadeghian, N., and Vaezi, A. (2019). Selectivity of Particles through Rill Erosion in Different Soil Textures. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 23(2), 1-12. (In Persian)
- Sajjadi, S. A., and Mahmoodabadi, M. (2015). Aggregate breakdown and surface seal development influenced by rain intensity, slope gradient and soil particle size. *Solid Earth*, 6(1), 311-321.
- Vaezi, A. R., Ahmadi, M., and Cerdà, A. (2017). Contribution of raindrop impact to the change of soil physical properties and water erosion under semi-arid rainfalls. *Science of the Total Environment*, 583, 382-392.
- Vaezi, A. R., and Vatani, A. (2015). Determining Rill Erodibility in Some Soils in Zanjan Province Under Simulated Rainfall. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 19(71), 59-68. (In Persian)
- Vaezi, A. R., Gharehdaghi, H., and Marzvan, S. (2016). The role of slope steepness and soil properties in rill erosion in the hillslope ( A case study: Taham Cgai catchment, NW Zanjan). *Journal of Water and Soil Conservation*, 23 (4), 83-100. (In Persian)
- Vaezi, A., Heidari M. (2018). The Effect of wheat etraw on flow characteristics and rill erosion in wheat rainfed field. *Iran Soil and Water Research*. 50(1), 54-63. ( in Persian).
- Vahabi J and Mahdian MH. (2008). Rainfall simulation for the study of the effects of efficient factors on runoff rate. *Current Science* (95), 1439-1445
- Valettea, G., S. Prevosta and L. Lucasa. (2006). A simulation of soil surface degradation by rainfall. *Computer and Graphics*, 30, 494-506.
- Van Oost, K., Govers, G., De Alba, S., and Quine, T. A. (2006). Tillage erosion: a review of controlling factors and implications for soil quality. *Progress in Physical Geography*, 30(4), 443-466.
- Vatani, A., and Vaezi, A. R. (2013). Soil loss in rills and its temporal variation during rainfall in different soil textures. *Journal of Soil and Water*, 24(3), 84-92. (In Persian)
- Walkley, A., and Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38.
- Wirtz, S., Seeger, M., and Ries, J. B. (2012). Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes. *Catena*, 91, 21-34.
- Xu, Z., Gao, J. E., Zhao, C. H., and Han, H. (2010). Effects of raindrop impact on runoff and sediment transport of the slope. *Journal of Soil Water Conservation*, 24(6), 20Y23. (In Chinese)
- Yoder, R. E. (1936). A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses 1. *Agronomy Journal*, 28(5), 337-351.
- Zhang, X. J., and Wang, Z. L. (2017). Interrill soil erosion processes on steep slopes. *Journal of Hydrology*, 548, 652-664.