

## مقاله پژوهشی

# تغییرات غلظت رسوب و هدررفت خاک‌های مختلف و تغییرات زمانی آن‌ها تحت شرایط متفاوت شیب سطح و شدت بارندگی

مجتبی کرد\*<sup>۱</sup>، علی‌رضا واعظی<sup>۲</sup> و محمدحسین مهدیان<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۹/۲۹

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۴/۳۱

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

۲- دانشیار، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

۳- استاد پژوهش سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج و کشاورزی، وزارت جهاد کشاورزی

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: kord2086@yahoo.com

## چکیده

بررسی عوامل مؤثر بر فرسایش خاک و تغییرات زمانی آن از پیش‌نیازهای مهم مدیریت منابع آب و خاک است. هدف از این پژوهش، تعیین حساسیت خاک‌ها به فرسایش آبی و تغییرات زمانی هدررفت خاک در خاک‌های با بافت لوم‌رسی، لوم و لوم‌شنی در شیب‌های مختلف (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۵ و ۳۰ درجه) تحت باران‌های شبیه‌سازی شده (۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلی‌متر در ساعت) بود. آزمایش در ابعاد فلوم (۶۵ سانتی‌متر × ۱۶۰ سانتی‌متر) در قالب طرح کامل تصادفی با دو تکرار انجام شد. هدررفت خاک در بازه‌های زمانی ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۳، ۴، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ دقیقه و ادامه تا دستیابی به جریان ماندگار رواناب سطحی اندازه‌گیری شد. تفاوت معنی‌داری بین خاک‌ها از نظر هدررفت خاک مشاهده شد ( $p < 0/01$ ). خاک لوم‌رسی، حساس‌ترین خاک به فرآیندهای فرسایشی بود. در این خاک، بخش عمده ذرات فرسایش‌پذیر در زمان‌های اولیه بارندگی فرسایش یافت و با تداوم بارندگی، هدررفت خاک کاهش یافت. هدررفت خاک در خاک‌ها به شدت تحت تأثیر شیب سطح و شدت باران قرار گرفت ( $p < 0/01$ ). با افزایش درجه شیب، به دلیل کاهش نگره‌داشتن آب باران، رواناب سریع‌تر به وقوع پیوست و هدررفت خاک بیشتر شد. شیب سطح و شدت باران نقشی بارزتر در افزایش هدررفت خاک در بافت لوم‌شنی نشان دادند. نتایج مؤید آن است که حساسیت به فرسایش آبی با تغییر شیب سطح و شدت باران، در خاک‌های فرسایش‌پذیر (ریزبافت) کمتر است و این دو عامل (شیب سطح و شدت باران) بیش‌ترین تأثیر را بر هدررفت خاک در خاک‌های مقاوم (درشت‌بافت) می‌گذارند.

واژه‌های کلیدی: رواناب سطحی، شبیه‌ساز باران، غلظت رسوب، هدررفت خاک

## Study of Changes in Sediment Concentration and Soil Loss and Its Temporal Variation in Different Conditions of Slope and Rainfall Intensity

M Kord<sup>1\*</sup>, AR Vaezi<sup>2</sup> and MH Mahdian<sup>3</sup>

Received: December 19, 2020 Accepted: July 21, 2019

<sup>1</sup>Ph.D. Student, Soil Sci. Depart, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Iran

<sup>2</sup>Assoc. Prof., Soil Sci. Depart, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Iran

<sup>3</sup>Full Prof., Agricultural Research, Education and Extension Organization, Ministry of Jihad - Agriculture, Iran

\*Corresponding Author, Email: kord2086@yahoo.com

### Abstract

Study of factors that affecting soil erosion and its temporal variation is prerequisite for the management of soil and water resources. The purpose of This study was to determine susceptibility of soils to erosion and its temporal variations in three soil textures (clay loam, loam and sandy loam) on different slopes (5, 10, 15, 25, and 30 degree) under simulated rainfalls (40, 60 and 80 mm h<sup>-1</sup>). The experiment done by flume (160 cm × 65 cm) and in a completely randomized design with two replications. Soil losses measured at various times (0/5, 1, 1/5, 2, 3, 4, 5 10, 15, 20, 30, 40, 50 and 60 minutes) to achieve steady-state flow of surface runoff. There was a Significant difference between the soils in terms of soil loss (p< 0.01). Clay loam was the most susceptible on to soil erosion. In this soil, Most of erodible soil particles eroded by surface runoff at the beginning of rainfall and soil loss decrease with continuing of rain. Soil loss in soils was strongly influenced by slope gradient and rainfall intensity (p< 0. 01). by increasing slope gradient, due to lower rain water retention on the surface, runoff was occurred quickly, and then soil loss increased. in soil loss of sandy loam, Slope steepness and rainfall intensity showed dominant roles in soil losses. The results revealed that in erodible soils, sensitivity to erosion by changing the slope and rain intensity is lower, and these two factors (slope steepness and rainfall intensity) has greatest impact on soil loss in highly resistant soils to erosion .

**Keywords:** Rainfall simulator, Sediment concentration, Soil loss, Surface runoff

رواناب و فرسایش خاک تحت تأثیر عوامل مختلف از جمله شدت باران، درصد پوشش گیاهی، ویژگی‌های خاک (بافت، ساختمان، نفوذپذیری، ماده آلی و رطوبت اولیه)، میزان تبخیر و تعرق و شرایط پستی و بلندی زمین قرار دارد (پرزلاتور و همکاران ۲۰۱۰). فرسایش آبی به طور گسترده به ویژه در زمین‌های شیب‌دار مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران مشاهده می‌شود. در مناطق نیمه‌خشک به دلیل کمبود بارندگی و ناپایداری ساختمان خاک، پوشش گیاهی مناسبی تشکیل نشده که این امر سبب تشدید

### مقدمه

یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی دنیا، فرسایش خاک<sup>۱</sup> و هدررفت منابع آب و خاک ناشی از آن است (جوادی و همکاران ۱۳۹۰). هدررفت خاک یک چالش جهانی بوده که به‌طور جدی منابع آب و خاک را تهدید می‌کند (کیونگ دنگ و همکاران ۲۰۰۸). کمی کردن میزان رواناب و فرسایش خاک یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های مطالعات منابع طبیعی است (بویان و همکاران ۲۰۰۲). برای این منظور، شناخت عوامل مؤثر بر فرسایش خاک ضروری است. میزان

<sup>1</sup>Soil Erosion

کم‌ترین ظرفیت تولید رسوب را دارند. در خاک‌هایی که بیش از ۲۰ درصد رس وجود دارد، رس به عنوان یک عامل سیمانی عمل کرده و پایداری خاکدانه‌ها را در برابر عوامل مخرب از جمله قطرات باران، افزایش داده و باعث کاهش سله سطحی می‌شود.

مقادیر مختلف شیب، از عوامل مهم در فرسایش خاک به وسیله آب هستند. از این بین، نقش درجه شیب در کاهش فرصت نفوذ آب و تشدید تولید رواناب و در نتیجه افزایش فرسایش خاک بسیار بارزتر است. پژوهش‌های متعددی که بر پایه داده‌های جمع‌آوری شده از درجات متفاوت شیب انجام شده، نشان داد که درجه شیب به عنوان یک عامل توپوگرافیک بر روی میزان عناصر غذایی خاک، آلودگی یا انتقال ذرات اثر می‌گذارد و خود یک عامل مؤثر بر میزان فرسایش خاک است (وانگ و همکاران ۲۰۱۴). یافته‌های محمودآبادی و ارجمند (۲۰۱۶) مؤید نقش مؤثر شیب و شدت باران در افزایش هدررفت خاک است. آسولین و بن هور (۲۰۰۶) با استفاده از شبیه‌ساز باران، اثر شدت بارندگی و درجه شیب را در یک خاک شنی بر روی رواناب و هدررفت خاک بررسی کردند و نشان دادند که رواناب کل به صورت نمایی در هر دو شدت باران مورد بررسی (۲۴ و ۶۰ میلی‌متر بر ساعت) با افزایش شیب افزایش یافت. برخلاف رواناب روند افزایش هدررفت خاک در شدت ۶۰ بیش‌تر از ۲۴ میلی‌متر بر ساعت بود.

بارندگی منبع اصلی تولید رواناب و در نتیجه فرسایش خاک در اراضی شیب‌دار است. شدت بارندگی<sup>۲</sup> مهم‌ترین ویژگی باران از دیدگاه فرسایش خاک است. به طوری که در مدل‌های مختلف فرسایش خاک از جمله معادله جهانی فرسایش خاک،<sup>۴</sup> USLE (ویشمایر و اسمیت ۱۹۷۸) و نسخه‌های اصلاح شده

فرسایش آبی در این مناطق می‌شود (قدیمی و همکاران، ۱۳۷۸). نتایج تحقیقات کیسترا و همکاران (۲۰۱۶) نشان داد پوشش گیاهی، رطوبت خاک و ماده آلی اثر معنی‌داری بر رواناب و هدررفت خاک دارد. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که ویژگی‌های خاک از جمله بافت و توزیع اندازه ذرات از عوامل مؤثر بر تشکیل رواناب و هدررفت خاک است (هوآنگ و همکاران ۲۰۱۳). شیب زمین و شدت باران از دیگر عوامل اثرگذار بر هدررفت خاک و رواناب بوده که به صورت مستقیم و یا با تأثیر بر روی سایر عوامل سبب افزایش رواناب و هدررفت خاک می‌شود (شن و همکاران ۲۰۱۶).

عوامل مختلفی برای تشریح رفتارهای هیدرولوژیکی و فرسایشی خاک مورد توجه قرار گرفته‌اند و یکی از متغیرهای مهم و قابل بررسی در وقوع رواناب و فرسایش خاک، ویژگی‌های خاک است (کاوایان و همکاران ۱۳۸۹). توزیع اندازه ذرات خاک مهم‌ترین ویژگی خاک از نظر فرسایش آبی است (ویشمایر و اسمیت ۱۹۷۸). رس عامل مهمی در پیوند خاکدانه‌ها بوده که مانند یک ماده سیمانی ذرات خاک را در کنار هم نگه می‌دارد. افزایش رس در خاک با افزایش پایداری خاکدانه‌ها ارتباط معنی‌داری دارد. این ارتباط در مقادیر مختلف به دلیل عامل پخشیدگی رس، به صورت معکوس یا مستقیم نمایان می‌شود (فنگ‌لینگ و همکاران ۲۰۱۰). واکینداکی و بن هور (۲۰۰۲) گزارش کردند که بافت خاک می‌تواند با تأثیر بر پایداری خاکدانه‌ها، بر میزان نفوذپذیری و از دست رفتن خاک تحت تأثیر بارندگی مؤثر باشد. آن‌ها با آزمایش بر روی خاک‌های مختلف به این نتیجه رسیدند که خاک‌های کائولینیتی<sup>۲</sup> بالاترین میزان پایداری خاکدانه‌ها، کم‌ترین میزان پراکنده شدن در اثر ضربات قطرات باران، کم‌ترین رواناب و در نتیجه

<sup>4</sup> Universal Soil Loss Equation

<sup>2</sup> Kaolinitic Soil

<sup>3</sup> Intensity

سطح را می‌توان تحت باران‌های طبیعی مورد اندازه‌گیری قرار داد، چنین اندازه‌گیری‌هایی اغلب زمان‌بر و پرهزینه بوده (شریدان و همکاران ۲۰۰۸) و قابل تکرار نیز نمی‌باشد. از این‌رو، شبیه‌سازهای باران به عنوان ابزاری در پژوهش‌های هدررفت خاک و فرآیندهای مربوط به آن به‌طور وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد. سرعت، کارایی، قابلیت تداوم باران و امکان تکرارپذیری از دیگر مزایای دستگاه‌های شبیه‌ساز باران است.

به‌طورکلی بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که اطلاعات اندکی در مورد حساسیت خاک‌های با بافت مختلف در منطقه نیمه‌خشک به فرسایش آبی با تغییر شیب سطح و شدت بارندگی وجود دارد. با توجه به گستردگی این خاک‌ها در سطح کشور، بررسی تأثیر این عوامل در آن‌ها حائز اهمیت است و شناخت این عوامل می‌تواند در ارائه راه‌کارهایی برای کاهش هدررفت خاک مفید باشد.

#### مواد و روش‌ها

##### طرح آزمایشی

برای بررسی تأثیر شدت باران و درجه شیب در خاک‌های مختلف بر غلظت رسوب و هدررفت خاک، بررسی آزمایشگاهی در سه خاک با بافت مختلف شامل لوم‌شنی، لوم‌رسی و لوم در پنج اندازه شیب (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ درجه) تحت سه شدت باران (۴۰، ۶۰ و ۸۰ میلی‌متر در ساعت) با دو تکرار در قالب طرح کاملاً تصادفی در ۹۰ واحد آزمایشی اجرا شد. واحدهای آزمایشی شامل فلوم‌هایی به طول ۱۶۰ سانتی‌متر، عرض ۶۵ سانتی‌متر و عمق ۳۰ سانتی‌متر بود (شکل ۱). این ابعاد بر مبنای برخی بررسی‌های پیشین بود که در آن‌ها عموماً فلوم‌های آزمایشگاهی دارای یک تا دو متر طول، نیم تا یک متر عرض و ۲۰ تا ۵۰ سانتی‌متر عمق در نظر گرفته شدند (کاتو و

آن، RUSLE<sup>5</sup> (رنارد، ۱۹۹۴) و نیز WEPP<sup>6</sup> به نقش شدت باران در فرسایش‌دهی باران تأکید شده است. نتایج پژوهش‌های واعظی و همکاران (۱۳۸۷) در بررسی تغییرات رواناب در بخشی از خاک‌های آهکی ناحیه نیمه‌خشک در شمال غربی ایران نشان داد که تولید رواناب رابطه معنی‌داری با شدت باران و بیش‌ترین شدت ۳۰ دقیقه‌ای باران دارد. بررسی‌های بونگا (۲۰۱۲) در خاک لوم‌رس‌شنی تحت تأثیر سه شدت باران شبیه‌سازی شده (۵۰، ۶۵ و ۸۰ میلی‌متر بر ساعت) نشان داد که میزان فرسایش با شدت بارندگی رابطه‌نمایی دارد. یافته‌های دفرشا و ملیس (۲۰۱۲) بر روی خاک‌های رگوسول، کامبی‌سول و ورتی‌سول به ترتیب با بافت‌های لوم، لوم‌رس‌شنی و لوم‌رسی نشان داد که حداکثر متوسط رسوب در بارندگی با شدت ۱۲۰ میلی‌متر بر ساعت و شیب ۴۵ درصد رخ داد. نتایج پژوهش‌های محمودآبادی و سجادی (۲۰۱۶) بر روی خاک لوم‌شنی نشان داد افزایش شدت باران از ۵۷ به ۸۰ میلی‌متر بر ساعت اثر معنی‌داری بر میزان فرسایش در همه شیب‌های مورد بررسی دارد. نتایج پژوهش‌های هایوز و همکاران (۲۰۱۶) بر روی خاک لوم‌رسی در بررسی اثر شدت باران و شیب زمین بر روی فرسایش شیاری نشان داد اگرچه با افزایش شدت باران میزان رواناب در همه شیب‌های مورد بررسی (۱۰، ۱۵ و ۲۰ درجه) اختلاف معنی‌داری نداشت، ولی غلظت رسوب و هدررفت خاک با افزایش شدت باران و شیب زمین اختلاف معنی‌داری را نشان داد. پژوهش‌های زیائویان چن و همکاران (۲۰۱۶) بر روی خاک لوم‌سیلتی نشان داد که هدررفت خاک با افزایش درجه و طول شیب افزایش یافت و همچنین غلظت رسوبات با افزایش طول شیب افزایش نشان داد. با وجود آن‌که چگونگی و میزان وقوع رواناب در یک

<sup>6</sup> Water Erosion Prediction Project

<sup>5</sup> Revised Universal Soil Loss Equation



شکل ۱. نمایی از فلوم‌های آزمایشی پس از اعمال باران و خروجی رواناب

#### اندازه‌گیری غلظت رسوب و هدررفت خاک

برای حذف اثر رطوبت اولیه بر رواناب، مقدار رطوبت خاک‌ها یکسان‌سازی شد (آسولین و بن هور، ۲۰۰۶). برای این کار خاک فلوم‌ها پنج روز پیش از اجرای آزمایش اشباع شد و طی این مدت برای جلوگیری از تبخیر، سطح آن‌ها با استفاده از پلاستیک پوشانده گردید (لئو و همکاران ۲۰۱۱). رطوبت خاک‌ها در زمان آزمایش بین ۹ تا ۱۱ درصد بود. برای اندازه‌گیری شاخص‌های غلظت رسوب و هدررفت خاک، ابتدا زمان آغاز رواناب در هر آزمایش شبیه‌سازی باران ثبت شد. سپس در بازه‌های زمانی ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۳، ۴، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ دقیقه و در ادامه تا زمان وقوع جریان ماندگار رواناب، نمونه‌های رواناب برداشت شد. در نمونه‌های برداشت‌شده رسوب به وسیله کاغذ صافی واتمن از رواناب جدا و رسوب باقی‌مانده بر روی کاغذ صافی در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد (وی و همکاران ۲۰۰۷) به مدت ۲۴ ساعت خشک گردید و بدین‌صورت جرم رسوب در نمونه‌های رواناب تعیین و با استفاده از جرم رسوب و حجم رواناب، غلظت رسوب محاسبه شد.

#### اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک‌ها

توزیع اندازه ذرات اولیه (شن، سیلت و رس) به روش هیدرومتر و جرم مخصوص ظاهری در محل

همکاران ۲۰۰۹، دانجو و همکاران ۲۰۰۴، آدکالو و همکاران ۲۰۰۷). برای ایجاد باران، یک دستگاه شبیه‌ساز باران به ابعاد ۱۴۰ سانتی‌متر در ۱۷۵ سانتی‌متر طراحی شد. دستگاه شبیه‌ساز باران از یک سطح بارش با حدود ۹۰۰ نازل تشکیل شده بود که در ارتفاع ۲۸۰ سانتی‌متری از سطح زمین قرار داشت. قطر قطرات باران در تمام نازل‌ها ۲/۶۵ میلی‌متر بود. به نظر می‌رسد وجود چنین قطراتی با قطری شبیه به قطر قطرات باران، رفتار باران از نظر تخریب ساختمان خاک سطحی و وقوع رواناب و فرسایش بهتر نمایان شود (گری‌ارسون و ادز ۱۹۷۷). دستگاه باران‌ساز به سیستمی مکانیکی برای تنظیم شیب فلوم‌ها مجهز شد.

#### نمونه‌برداری خاک

نمونه‌های خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر برداشته شد. خاک‌ها به فلوم‌های فلزی منتقل شد. برای یکسان‌سازی شرایط سطح خاک، اقدام به حذف سنگریزه از سطح خاک شد. اطراف فلوم‌ها با استفاده از ورق‌های گالوانیزه مسدود شد. در زمان ریختن خاک به داخل فلوم سعی شد تا جرم مخصوص ظاهری خاک داخل فلوم با ایجاد تراکم یکنواخت با جرم مخصوص ظاهری خاک دست‌نخورده مزرعه مشابه باشد (لیلی و همکاران ۲۰۱۶). برای تعیین جرم مخصوص ظاهری خاک، نمونه‌های دست‌نخورده از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر به وسیله استوانه فلزی به قطر ۴/۵ و طول ۴/۸۵ سانتی‌متر برداشت شد. در انتهای هر فلوم تجهیزات جمع‌آوری رواناب و رسوب شامل لوله انتقال و مخزن نصب شد.

میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در خاک‌ها بسیار پایین بود (میلی‌متر  $<1$  MWD) و بیش‌ترین مقدار آن در خاک لوم (۰/۷۴ میلی‌متر) مشاهده شد. وجود مقدار پایین ماده آلی و رس در خاک لوم‌شنی می‌تواند دلیل پایین بودن درجه خاکدانه‌سازی و تشکیل خاکدانه‌های پایدار باشد (شی و همکاران، ۲۰۱۰). خاک‌ها دارای مقادیری نسبتاً زیادی سدیم تبدالی (بین هشت تا ۱۰ درصد) است که با توجه به پایین بودن مقدار ماده آلی انتظار می‌رفت که حساسیت خاک‌ها به فرآیندهای فرسایش آبی بالا باشد (روث و همکاران ۲۰۱۶). هدایت هیدرولیکی اشباع، به‌عنوان مهم‌ترین مشخصات فیزیکی خاک از نظر هیدرولوژیکی (فونتز و همکاران ۲۰۰۴)، در خاک لوم‌رسی کم‌ترین (۱/۸۲ سانتی‌متر بر ساعت) و در خاک لوم شنی بیش‌ترین (۳/۷۳ سانتی‌متر بر ساعت) بود.

#### نرمال بودن داده‌ها

با توجه به اینکه چولگی و کشیدگی داده‌ها در بازه (۲، ۲-) قرارگرفت، می‌توان نتیجه گرفت داده‌ها از توزیع نرمال برخوردار می‌باشند (جدول ۲).

#### تغییرات شاخص‌های غلظت رسوب و هدررفت خاک در خاک‌های مختلف

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بین خاک‌های مورد بررسی تفاوتی معنی‌دار از نظر غلظت رسوب ( $p < 0.001$ ) و هدررفت خاک ( $p < 0.001$ ) وجود داشت (جدول ۳). بیش‌ترین مقدار غلظت رسوب (۱۱/۳۱ گرم در لیتر) و هدررفت خاک (۵۲۳/۶۷ گرم بر مترمربع) در خاک لوم‌رسی مشاهده شد و کم‌ترین مقدار آن (۹/۲۱ گرم در لیتر و ۳۳۰/۱۴ گرم بر مترمربع) در خاک لوم شنی اتفاق افتاد (شکل ۲).

نمونه‌برداری خاک به روش سیلندر تعیین شد. متوسط قطر خاکدانه‌ها بر اساس جداسازی خاکدانه‌های هر بخش از سری الک‌های مورد استفاده (بین الک‌های ۴-۲، ۶-۴ و ۸-۶ میلی‌متر) و تعیین میانگین وزنی قطر<sup>۷</sup> خاکدانه به دست آمد. پایداری خاکدانه در خاکدانه‌هایی با قطر بین شش تا هشت میلی‌متر بر اساس تعیین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار (MWD) به روش الک تر با استفاده از سری الک‌ها (۸، ۶، ۴، ۲، ۱، ۰/۶ و ۰/۲۵ میلی‌متر) به مدت یک دقیقه با توان ۲۰ دور در دقیقه تعیین شد. انتخاب این مدت به دلیل پایداری بسیار پایین خاکدانه‌های مورد بررسی در منطقه بود (واعظی و همکاران ۱۳۹۲). هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار ثابت اندازه‌گیری شد. درصد سدیم تبدالی<sup>۸</sup> (ESP) با استفاده از دستگاه فلیم‌فومتر، ماده آلی به روش والکی-بلاک، آهک بر مبنای کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک یک نرمال و گچ نیز به روش استون در خاک‌ها اندازه‌گیری شد.

#### نتایج و بحث

##### ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها

جدول (۱) ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. خاک‌ها از نظر ماده آلی فقیر (بین ۰/۷۴ تا ۱/۰۳ درصد) و با توجه به وجود مقدار کربنات کلسیم معادل (با حدود ۱۰ درصد کربنات کلسیم معادل)، دارای شرایط آهکی (نزیف و همکاران ۲۰۱۴) بودند. متوسط قطر خاکدانه در حالت خشک که معیاری از فرآیند خاکدانه‌سازی است (سیکس و همکاران، ۲۰۰۰) در خاک لوم‌شنی کم‌ترین (۰/۹۵ میلی‌متر) و در خاک لوم بیش‌ترین (۱/۹۳ میلی‌متر) است. پایداری خاکدانه‌ها بر مبنای

<sup>8</sup> Exchangeable Sodium Percentage

<sup>7</sup> Mean Weight Diameter

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد بررسی

ویژگی‌ها	بافت خاک		
	لوم رسی	لوم	لوم شنی
شن (%)	۴۱/۲۵	۳۶/۶۰	۷۱/۱۲
سیلت (%)	۲۱/۶۳	۴۳/۵۷	۱۶/۵۰
رس (%)	۳۷/۱۲	۱۹/۸۳	۱۲/۳۸
سنگریزه (%)	۱۲/۶۷	۱۴/۵۳	۱۸/۲۴
رطوبت اشباع (%)	۴۵/۱۲	۴۱/۲۹	۳۵/۸۳
جرم مخصوص ظاهری ( $\text{g cm}^{-3}$ )	۱/۳۱	۱/۳۷	۱/۴۴
متوسط قطر خاکدانه (mm)	۱/۶۵	۱/۹۳	۰/۹۵
میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب (mm)	۰/۵۷	۰/۷۴	۰/۲۶
هدایت هیدرولیکی اشباع ( $\text{cm h}^{-1}$ )	۱/۸۲	۲/۷۸	۳/۷۳
درصد سدیم تبدیلی	۹/۸۶	۷/۹۲	۸/۴۶
ماده آلی (%)	۰/۷۴	۱/۰۳	۰/۸۷
آهک (%)	۱۰/۴۷	۱۱/۲۳	۹/۷۸
گچ (%)	۹/۶۷	۸/۲۷	۷/۵۶

جدول ۲. نتایج آزمون نرمال بودن داده‌ها

متغیر	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	چولگی	کشیدگی
غلظت رسوب (گرم در لیتر)	۱/۹۲	۱۷/۴۴	۱۰/۰۵	۴/۰۰۹	-۰/۴۳۰	-۰/۶۳۸
هدررفت خاک (گرم)	۸/۲۹	۱۱۹۹/۹۷	۴۳۰/۸۸	۳۱۸/۲۸۷	۰/۷۵۰	-۰/۴۱۱

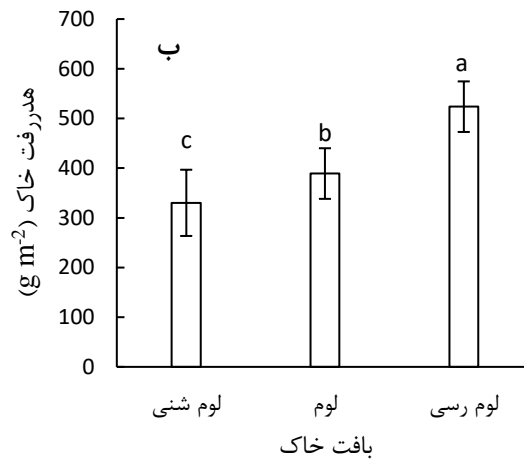
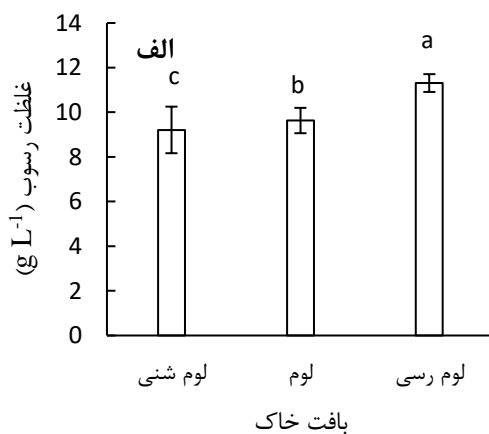
هدررفت خاک مشاهده شود. نتایج نشان می‌دهد رابطه بین بافت خاک با غلظت رسوب و هدررفت خاک در شیب‌های مختلف متفاوت است. همچنین نتایج نشان داد اگر چه رابطه بین بافت خاک با میزان هدررفت خاک در شدت‌های مختلف باران متفاوت است ولی برای غلظت رسوب این روند برقرار نمی‌باشد که این مسئله می‌تواند ناشی از زمان‌های متفاوت خاک‌های مختلف برای رسیدن به جریان ماندگار رواناب باشد.

این نتایج به‌طور کلی نشان می‌دهد که افزایش هدررفت خاک همگام با افزایش غلظت رسوب در رواناب است. اگرچه جزء رس خاک می‌تواند به خاکدانه‌سازی و افزایش پایداری ساختمان خاک و کاهش میزان هدررفت خاک کمک کند (کرکبای و همکاران ۲۰۱۰) به نظر می‌رسد مقدار رس به‌تنهایی در خاک‌های مورد مطالعه برای تثبیت خاکدانه‌ها در برابر تخریب ناشی از قطرات باران کافی نباشد (مامدو و همکاران ۲۰۰۱) و این موضوع سبب شد تا در خاک لوم‌رسی بیش‌ترین مقدار غلظت رسوب و

**جدول ۳: تجزیه واریانس تغییرات غلظت رسوب و هدررفت خاک بین شدت‌های باران و درجات شیب در خاک‌های مورد بررسی**

متغیر	بافت خاک		شدت باران		درجه شیب		بافت خاک × درجه شیب		شدت باران × درجه شیب		بافت خاک × شدت باران	
	درج	میانگین	درج	میانگین	درج	میانگین	درج	میانگین	درج	میانگین	درج	میانگین
غلظت رسوب (گرم در لیتر)	۲	۳۷/۰۷**	۲	۵۷	۴	۹/۵۳	۸	۲۹/۸**	۸	۹۱	۴	۳۱۱/۱۵*
هدررفت خاک (گرم در متر مربع)	۲	۳۱۹/۵۵	۲	۶۸	۴	۱/۱۲	۸	۲۱۳/۵۸	۸	۲۳	۴	۵۴۵/۷۹
		۲۹۱**		۲۶۶**		۶۴۲		۸۱**		۶۳		۳۰۱**
		۲۹۱**		۲۶۶**		۶۴۲		۸۱**		۶۳		۳۰۱**

\*: معنادار در سطح پنج درصد، \*\*: معنادار سطح یک درصد و <sup>ns</sup>: غیر معنادار.



**شکل ۲. مقایسه بین خاک‌های مورد بررسی از نظر غلظت رسوب (الف) و هدررفت خاک (ب)**

سطح خاک کاهش یافته و در نتیجه به دلیل کوتاه شدن فرصت نفوذ آب باران، رواناب زودتر و با سرعت بیشتر به وقوع می‌پیوندد و در نتیجه به دلیل افزایش قدرت حمل جریان، هدررفت خاک بیشتر می‌شود (هایوزشن و همکاران، ۲۰۱۶).

پژوهش‌ها در مورد اثر شیب زمین بر هدررفت خاک در چین نشان داد که با افزایش شیب از پنج درجه به ۲۵ درجه، تولید رواناب به دلیل کاهش میزان نفوذ و تشکیل سله تا حد ۶۰ درصد افزایش یافت (چنگ و همکاران ۲۰۰۸). افزایش تولید رواناب، عامل

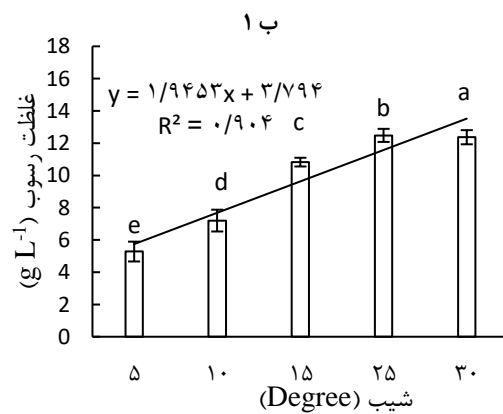
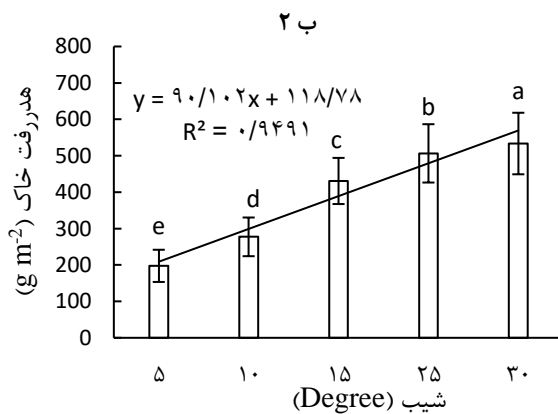
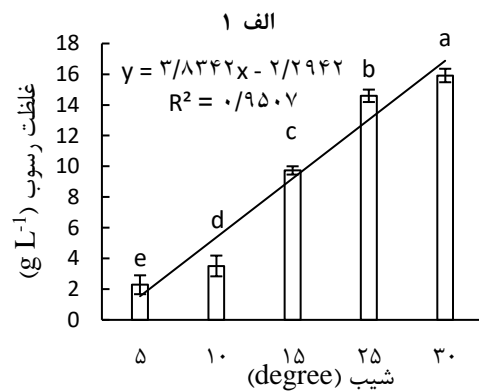
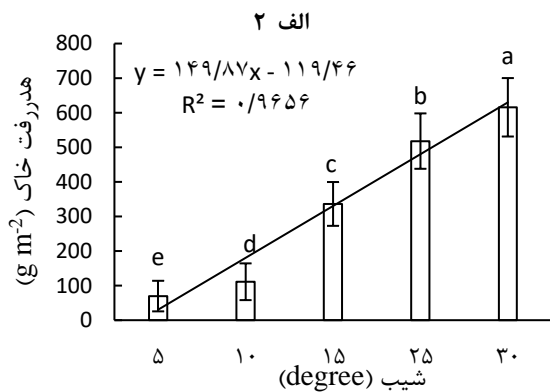
**تغییرات غلظت رسوب و هدررفت خاک در درجات مختلف شیب**

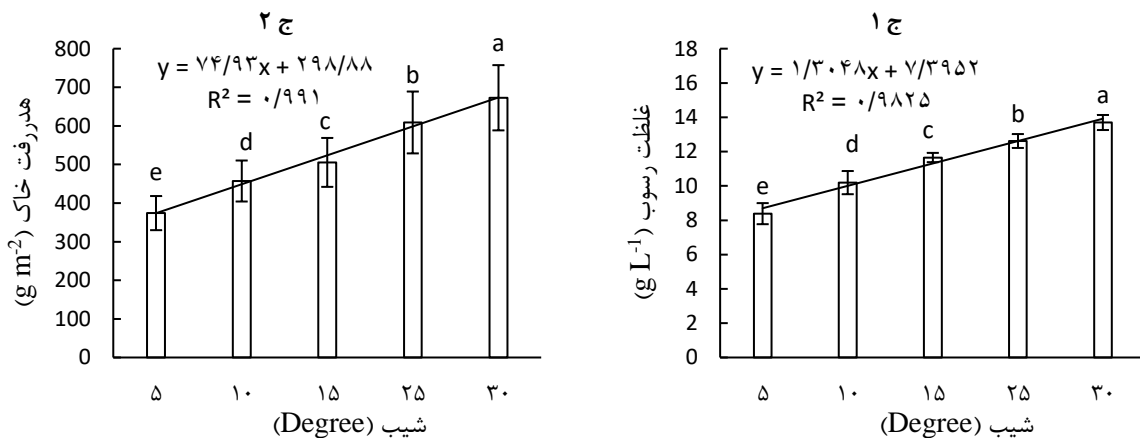
نتایج تجزیه واریانس نشان داد که شیب تأثیر معنی‌داری بر غلظت رسوب ( $p < 0.001$ ) و هدررفت خاک ( $p < 0.001$ ) دارد (جدول ۳). افزایش شیب سطح منجر به افزایش غلظت رسوب و هدررفت خاک در خاک‌های مورد بررسی شد (شکل ۳). نتایج به دست آمده نشان داد، هدررفت خاک رابطه‌ای خطی با شیب زمین دارد. با افزایش درجه شیب، به دلیل افزایش تأثیر نیروی گرانشی زمین، مدت ماندگاری آب روی



به اندازه هفت برابر غلظت رسوب در شیب پنج درجه بود و هدررفت خاک در شیب ۳۰ درجه (۶۱۵/۶۶ گرم در مترمربع) به اندازه ۸/۵ برابر هدررفت خاک در شیب پنج درجه بود. خاک لومرسی کمترین تغییرات را از نظر غلظت رسوب و هدررفت خاک با افزایش شیب سطح نشان داد. به عبارت دیگر، خاک‌های ریزبافت به دلیل آن‌که ذاتاً حساسیت بالایی به فرآیندهای فرسایشی دارند، نقش شیب در تسریع فرآیندهای فرسایشی در آن‌ها کمتر است، درحالی‌که در خاک‌های درشت‌بافت که فرسایش‌پذیری پایینی دارند، افزایش شیب به شدت بر تشدید فرآیندهای فرسایشی و افزایش هدررفت خاک کمک می‌کند.

مهم افزایش هدررفت خاک در شیب‌های بالا است. یکی دیگر از علل افزایش هدررفت خاک با افزایش شیب سطح می‌تواند به دلیل تغییر اصطکاک ذرات با سطح باشد. با افزایش شیب سطح، ضریب اصطکاک ذرات کاهش یافته و حساسیت آن‌ها به انتقال افزایش می‌یابد (سوهوا و همکاران ۲۰۱۱). بررسی چگونگی تأثیر شیب سطح بر غلظت رسوب و هدررفت خاک نشان داد که تفاوتی اساسی بین خاک‌ها از نظر تأثیر شیب بر این دو متغیر وجود دارد. خاک لوم‌شنی بیش‌ترین تغییرات غلظت رسوب و هدررفت خاک با افزایش شیب را بین خاک‌ها نشان داد، به طوری‌که غلظت رسوب در شیب ۳۰ درجه (۱۵/۹۲ گرم در لیتر)



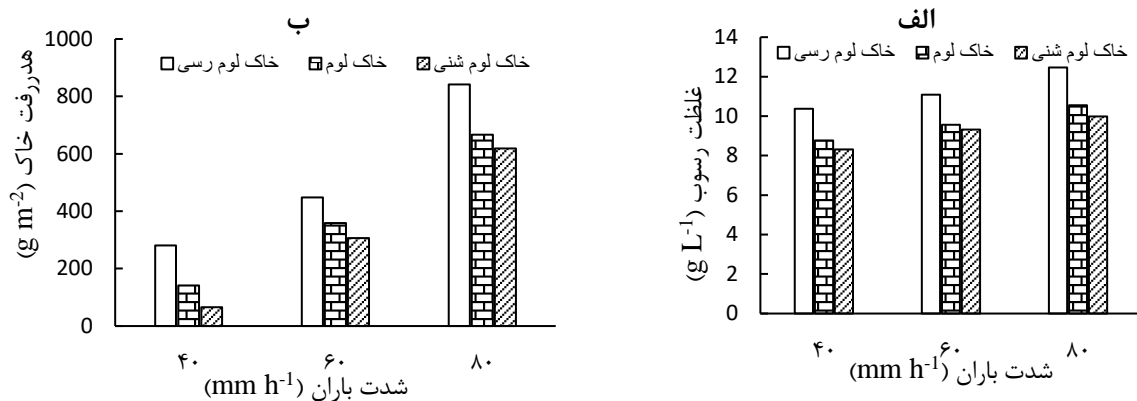


شکل ۳. مقایسه غلظت رسوب (الف) و میزان هدررفت خاک (ب) در خاک‌های لوم‌شنی (الف ۱ و الف ۲) لوم (ب ۱ و ب ۲) و لوم‌رسی (ج ۱ و ج ۲) در درجات مختلف شیب

نتایج نشان داد خاک لوم‌شنی حساسیت بیشتری به فرسایش با افزایش شدت باران دارد، به طوری که با افزایش شدت باران از ۴۰ به ۸۰ میلی‌متر بر ساعت، میزان هدررفت ۹/۵ برابر شد. نتایج پژوهش‌های آسولین و بن‌هور (۲۰۰۶) در خاک‌های شنی نشان می‌دهد، در شدت‌های پایین باران، اثر شیب بر هدررفت خاک به صورت نمایی است و با افزایش شدت باران این رابطه به حالت خطی تغییر می‌کند. این موضوع به دلیل افزایش قدرت حمل رواناب در شدت‌های بالای باران است. با افزایش شدت باران، تعداد قطرات برخورد یافته به سطح خاک و اندازه آن‌ها افزایش می‌یابد و افزایش نیروی برشی قطرات باران، سبب تضعیف ساختمان خاک و افزایش غلظت رسوب و هدررفت خاک می‌شود (زینینگ زائو و همکاران ۲۰۱۴). در پژوهش حاضر از آنجاکه قطر قطرات باران در شدت‌های مختلف بارندگی یکسان بود، افزایش تعداد قطرات برخورد یافته بر سطح خاک، عامل اصلی افزایش هدررفت خاک در باران‌های شدید بود.

#### تغییرات غلظت رسوب و هدررفت خاک در شدت‌های باران

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که شدت باران اثر معنی‌داری بر غلظت رسوب ( $p < 0.001$ ) و هدررفت خاک ( $p < 0.001$ ) دارد (جدول ۳). غلظت رسوب و هدررفت خاک با افزایش شدت باران، افزایش یافت. بیشترین غلظت و هدررفت خاک در شدت ۸۰ میلی‌متر بر ساعت (به ترتیب ۱۱ گرم بر لیتر و ۷۳۷/۲۸ گرم) و کمترین آن‌ها در شدت ۴۰ میلی‌متر بر ساعت (به ترتیب ۹/۱۵ گرم بر لیتر و ۱۶۹/۲۳ گرم) مشاهده شد (شکل ۴). تأثیر شدت باران بر هدررفت خاک بارزتر از تأثیر آن بر غلظت رسوب بود. دلیل آن است که هدررفت خاک طی بارندگی از یک سو به حجم رواناب تولیدی و از سوی دیگر به غلظت رسوب در آن وابسته است. در باران‌های شدید (۸۰ میلی‌متر بر ساعت) نسبت به باران‌های با شدت کمتر (۴۰ میلی‌متر بر ساعت) در کنار آن که غلظت رسوب به دلیل افزایش قدرت تخریبی باران افزایش می‌یابد، حجم رواناب نیز به مراتب بیشتر می‌شود. این دو عامل در کنار هم موجب می‌شود هدررفت خاک در باران‌های شدید بسیار بیشتر باشد.



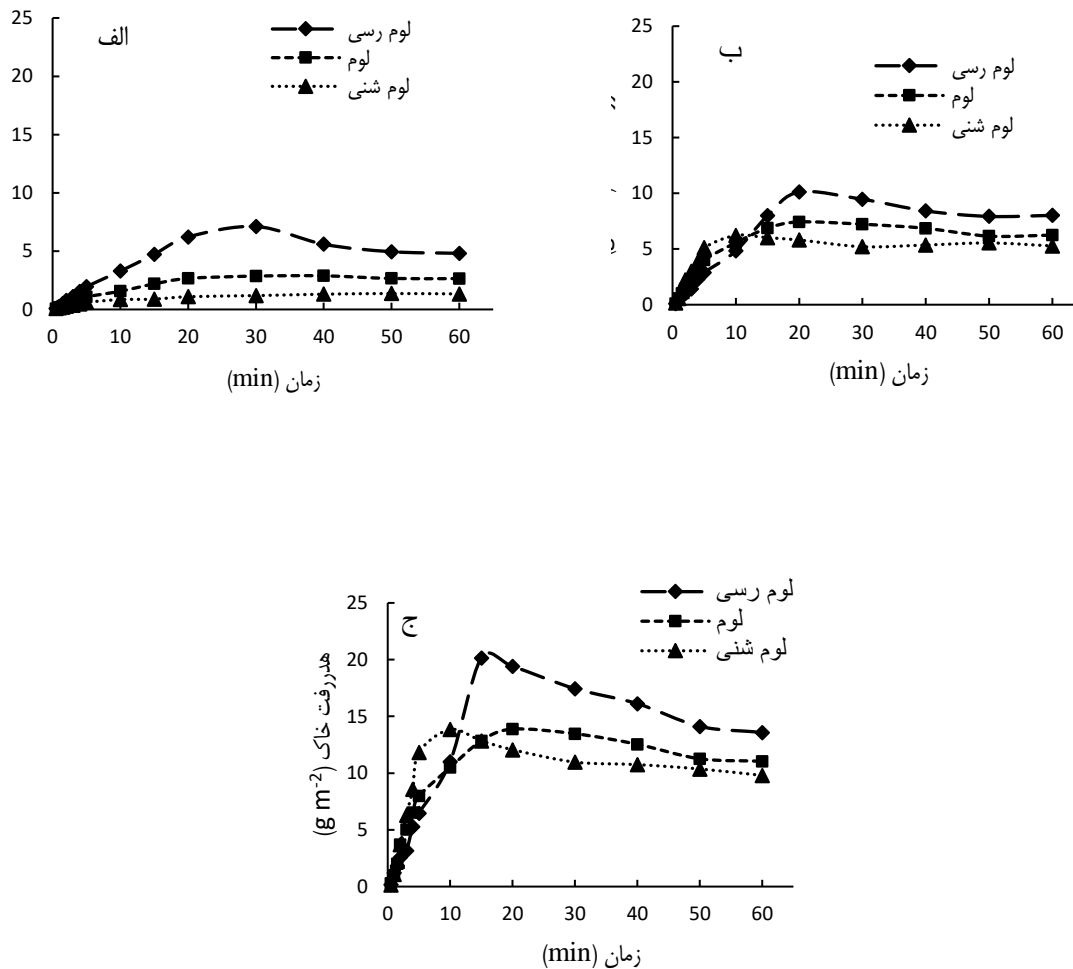
شکل ۴. مقایسه غلظت رسوب (الف) و میزان هدررفت خاک (ب) در شدت‌های باران مورد مطالعه

#### تغییرات زمانی هدررفت خاک طی بارندگی

تغییرات آشکاری از نظر هدررفت خاک طی زمان بارندگی مشاهده شد (شکل ۵). هدررفت خاک با گذشت زمان از آغاز رواناب افزایش یافت و این وضعیت در شدت‌های بالاتر باران تشدید شد. با گذشت زمان از آغاز بارندگی از یکسو محتوای رطوبتی خاک افزایش یافت و از سوی دیگر به دلیل تشکیل اندوده سطحی، به تدریج نفوذپذیری خاک کاهش یافت و این موضوع منجر به افزایش تولید رواناب و در نتیجه هدررفت بیشتر خاک شد. به نظر می‌رسد تخریب شدید ساختمان خاک در اثر ضربه قطرات باران، عامل اصلی تشدید تولید رواناب و هدررفت خاک در اوایل بارندگی باشد. در اواخر دوره بارندگی، به دلیل آن‌که شدت نفوذ آب به خاک به حد تقریباً ثابت رسید، تغییرات آشکاری در هدررفت خاک مشاهده نشد (گیرمای و همکاران ۲۰۰۹، واعظی و وطنی ۱۳۹۴).

نتایج نشان داد که الگوی هدررفت خاک طی بارندگی در خاک‌های مختلف متفاوت است و این تفاوت با افزایش شدت بارندگی آشکارتر می‌شود. در خاک لومرسی در شدت باران ۴۰ میلی‌متر در ساعت بلافاصله پس از آغاز رواناب، تا زمان ۲۰ دقیقه پس

از زمان آغاز رواناب، افزایش شدیدی در هدررفت خاک اتفاق افتاد. این افزایش با شدتی کمتر برای خاک‌های لوم و لوم‌شنی نیز مشاهده شد. تخریب سریع ساختمان خاک و در نتیجه افت شدید نفوذپذیری خاک و افزایش میزان رواناب از علل اصلی تشدید هدررفت خاک در خاک لومرسی بود. در هر یک از باران‌های مورد بررسی (۳۰، ۴۰ و ۸۰ میلی‌متر در ساعت) میزان هدررفت خاک در فاصله زمانی نسبتاً کوتاه (۲۰ تا ۳۰ دقیقه) پس از آغاز بارندگی به بیش‌ترین مقدار خود رسید و سپس با اندکی کاهش به حد تقریباً ثابتی رسید. خاک لوم‌شنی کم‌ترین میزان هدررفت خاک را در بین خاک‌ها در تمام شدت‌های باران نشان داد. شکل (۵) نشان می‌دهد که هدررفت خاک طی بارندگی در شدت‌های مختلف باران همواره در خاک لومرسی بیشتر از سایر خاک‌ها است. این موضوع نقش غالب بافت خاک را در فرسایش آبی نشان می‌دهد. در این خاک بخش عمده هدررفت خاک در زمان‌های اولیه بارندگی (۲۰ تا ۳۰ دقیقه) رخ می‌دهد و با تداوم بارندگی به دلیل انتقال بخش عمده ذرات حساس از سطح خاک و نیز تشکیل اندوده سطحی، میزان هدررفت خاک به تدریج کاهش می‌یابد.



شکل ۵- تغییرات زمانی هدررفت خاک تحت تأثیر بافت در شدت باران ۴۰ (الف)، ۶۰ (ب) و ۸۰ (ج) میلی‌متر بر ساعت

### نتیجه‌گیری

افزایش تأثیر نیروی گرانشی زمین، مدت ماندگاری آب روی سطح خاک کاهش یافته و به دلیل کوتاه شدن فرصت نفوذ، رواناب سریع‌تر به وقوع می‌پیوندد و در نتیجه به دلیل افزایش قدرت حمل جریان، هدررفت خاک بیشتر می‌شود. خاک‌های ریزبافت به دلیل آن‌که ذاتاً حساسیت بالایی به فرآیندهای فرسایشی دارند، نقش شیب در افزایش فرآیندهای فرسایشی در آن‌ها کمتر است، درحالی‌که در خاک‌های درشت‌بافت که فرسایش‌پذیری پایینی دارند، افزایش شیب به شدت منجر بر تشدید فرآیندهای فرسایشی و افزایش

نتایج نشان داد که بافت خاک، شیب سطح و شدت باران از عوامل مؤثر بر غلظت رسوب و هدررفت خاک هستند. خاک لوم‌رسی با وجود داشتن درجه خاکدانه‌سازی بیشتر و خاکدانه‌های پایدارتر نسبت به خاک لوم‌شنی، به دلیل هدایت هیدرولیکی کمتر و داشتن ذرات فرسایش‌پذیر بیشتر (سیلت و رس)، هدررفت خاک بیشتری را نشان داد. افزایش شیب در تمام خاک‌ها منجر به افزایش غلظت رسوب و هدررفت خاک شد. با افزایش درجه شیب، به دلیل

کاهش یافت. به‌طورکلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که خاک‌های ریزبافت حساسیت بالایی به فرسایش ناشی از جریان سطحی دارند و بخش عمده ذرات فرسایش‌پذیر آن‌ها در زمان‌های اولیه بارندگی دچار فرسایش می‌شود. اگرچه فرسایش آبی در این خاک‌ها با افزایش شدت بارندگی تشدید می‌شود، این خاک‌ها حساسیت کم‌تری به فرسایش خاک با افزایش شیب سطح نشان می‌دهند. با توجه به پیچیدگی رفتار آب و خاک پیشنهاد می‌شود این آزمایش با بافت‌های دیگر خاک انجام گیرد تا نقش بافت خاک در هدررفت خاک تحت شدت‌های مختلف باران روشن‌تر شود.

#### سپاسگزاری

از آقای دکتر یاسر صفری به دلیل همکاری در تهیه فلوم‌های آزمایشی و نمونه‌برداری سپاسگزاریم.

هدررفت خاک می‌شود و این یافته‌ها با نتایج پژوهش هایوزشن و همکاران (۲۰۱۶) همخوانی دارد. تأثیر شدت باران بر هدررفت خاک بارزتر از تأثیر آن بر غلظت رسوب است. این موضوع نشان‌دهنده افزایش حجم رواناب در کنار افزایش غلظت رسوب در باران‌های شدید است. هدررفت خاک دارای تغییرات زمانی طی بارندگی بوده و الگوی تغییرات زمانی آن در خاک‌های مختلف متفاوت است. هدررفت خاک طی بارندگی در شدت‌های مختلف باران در خاک لوم‌رسی بیشتر از سایر خاک‌ها بود. این موضوع نقش غالب بافت خاک را در فرسایش آبی نشان می‌دهد. در این خاک، بخش عمده هدررفت خاک در زمان‌های اولیه بارندگی رخ داد و با تداوم بارندگی به دلیل انتقال بخش عمده ذرات حساس از سطح خاک و نیز تشکیل اندوده سطحی، هدررفت خاک به‌تدریج

#### منابع مورد استفاده

- جوادی م، زهتابیان غم، احمدی ح، ایوبی ش ا و جعفری م، ۱۳۹۰. مقایسه و برآورد پتانسیل تولید رواناب و رسوب معلق در واحدهای کاری مختلف با استفاده از باران‌ساز (مطالعه موردی: حوزه آبخیز نومه‌رود). فصلنامه علوم و فنون منابع طبیعی، سال ششم، شماره ۲، صفحه‌های ۱ تا ۱۴.
- قدیمی عروس محله ف، پورمتین ا و قدوسی ج، ۱۳۷۸. بررسی رابطه بین اشکال فرسایش با خصوصیات فیزیکی - شیمیایی مارن‌ها. مجله پژوهش و سازندگی، شماره ۴۲، صفحه‌های ۹۵ تا ۹۹.
- کاویان ع، آزموده ع، سلیمانی ک و وهاب‌زاده ق، ۱۳۸۹. تأثیر ویژگی‌های خاک بر رواناب و فرسایش خاک در اراضی جنگلی. نشریه مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران جلد ۲۴، شماره ۳، صفحه‌های ۱ تا ۱۳.
- واعظی ع، بهرامی ح ع، صادقی س ح ر و مهدیان م ح، ۱۳۸۷. تغییرات مکانی رواناب در بخشی از خاک‌های آهکی ناحیه نیمه خشک در شمال غربی ایران. مجله کشاورزی و منابع طبیعی جلد ۱۵، شماره ۵، صفحه‌های ۲۱۳ تا ۲۲۵.
- واعظی ع، حسن زاده ح و محمدی م ح، ۱۳۹۲. تغییرات رواناب در ابعاد کرت در نمونه‌های خاک با بافت مختلف تحت رخدادهای یکسان باران شبیه‌سازی‌شده. مجله تحقیقات خاک و آب ایران. جلد ۴۴، شماره ۳، صفحه‌های ۲۴۳ تا ۲۵۳.
- واعظی ع، و وطنی ا، ۱۳۹۴. تعیین فرسایش‌پذیری شیاری در برخی خاک‌های استان زنجان تحت باران شبیه‌سازی شده. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم خاک و آب، جلد ۵۹، صفحه‌های ۶۷ تا ۷۱.
- Adekalu K O, Olorunfemi I A and Osunbitan J A, 2007. Grass mulching effect on infiltration, surface runoff and soil loss of three agricultural soils in Nigeria. *Bioresource Technology* 98: 912-917.
- Assouline S and Ben-Her M, 2006. Effect of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing. *Catena* 66: 211-220.
- Bhuyan S J, Prasanta K, Kaith K, Janssen A and Philip L B, 2002. Soil loss predictions with three erosion simulation models. *Environmental Modelling and Software* 17(2): 137-146.
- Bunga E, 2012. Stabilization effect of emulsified asphalt on erosion rate of sandy clay loam. *Civil & Environmental Engineering* 12(2): 1-10.

- Cheng Q, Ma W and Cai Q, 2008. The relative importance of soil crust and slope angle in runoff and soil loss: A case study in the hilly areas of the Loess Plateau, North China. *Geoderma* 71: 117-125.
- Defersha M B and Melesse A M, 2012. Effect of rainfall intensity, slope and antecedent moisture content on sediment concentration and sediment enrichment ratio. *Catena* 90: 47-52.
- Dunjo G, Pardini G and Gispert M, 2004. The role of land use-land cover on runoff generation and sediment yield at a micropilot scale, in a small Mediterranean catchment. *Arid Environment*, 57: 99–116.
- Feng-Ling Y, Zhi-Hua S H, Chong-Fa C and Zhao-Xia L, 2010. Wetting rate and clay content effects on interrill erosion in ultisols of southeastern China. *Pedosphere* 20(1): 129–136.
- Fuentes J P, Flury M and Bezdicke D F, 2004. Hydraulic properties in a silt loam soil under natural prairie, conventional tillage and no-till. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1679–1688.
- Girmay G and Singh B R, 2009. Runoff and sediment- associated nutrient losses under different Land uses in Tigray, Northern Ethiopia. *Hydrology* 362: 206-215.
- Grierson I T and Oades J M, 1977. A rainfall simulator for field studies of run-off and soil erosion. *Agricultural Engineering Research* 22(1): 37-44.
- Haiou S, Fenli Z, Leilei W, Yong H and Wei H, 2016. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope. *Soil and Tillage Research* 155: 429–436.
- Huang J, Wu P and Xining Z, 2013. Effects of rainfall intensity, underlying surface and slope gradient on soil infiltration under simulated rainfall experiments, *Catena* 104: 93-102.
- Kato H, Onda Y, Tanaka Y and Asano M, 2009. Field measurement of infiltration rate using an oscillating nozzle rainfall simulator in the cold, semiarid grassland of Mongolia. *Catena* 76: 173–181.
- Keesstra S, Pereira P, Novara A, Brevik E C, Azorin-Molina C, Parras-Alcántara L, Jordán A and Cerdà A, 2016. Effects of soil management techniques on soil water erosion in apricot orchards. *Science of the Total Environment* 551–552: 357–366.
- Kirkby M J and Morgan R P, 2010. *Soil erosion*. John Wiley and Sons. New York.
- Lili M, Yu Z L, Wei Ping H, Xu R M, Vincent F B, Hao R L, Rui G and Ting W L, 2016. An approximate point source method for soil infiltration process measurement. *Geoderma* 264: 10-16.
- Liu H, Lei T W, Zhao J, Yuan C P, Fan Y T and Qu L Q, 2011. Effects of rainfall intensity and antecedent soil water content on soil infiltrability under rainfall conditions using the runoff-on-out method. *Journal of Hydrology* 396: 24–32.
- Mahmoodabadi M and Arjmand Sajadi S, 2016. Effects of rain intensity, slope gradient and particle size distribution on the relative contributions of splash and wash loads to rain-induced erosion. *Geomorphology* 253: 59–167.
- Mamedov A I, Levy G J, Shainberg I and Letey J, 2001. Wetting rate and soil texture effect on infiltration rate and runoff. *Australian Journal of Soil Research* 36: 1293-1305.
- Nazif W, Marzouk E R, Perveen S, Crout N M J and Young S D, 2014. Zinc solubility and fractionation in cultivated calcareous soils irrigated with wastewater. *Science of The Total Environment* 201: 310-319.
- Perez-Latorre F J, Castro L D and Delgado A, 2010. A comparison of two variable intensity rainfall simulators for runoff studies. *Soil and Tillage Research* 107: 11-16.
- Renard K G and Freidmund J R, 1994. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the RUSLE. *Journal of Hydrology* 157: 287-306.
- Ruth H E, Horst H G and Detlef D, 2016. Soil organic matter composition along a slope in an erosion-affected arable landscape in North East Germany. *Soil and Tillage Research* 156:209-218.
- Seeger M, 2007. Uncertainty of factors determining runoff and erosion processes as quantified by rainfall simulations. *Catena* 71:56-67.
- Shen H, Zheng F, Wen L, Han Y and Hu W, 2016. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope. *Soil and Tillage Research* 155: 429–436.
- Sheridan G, Noske P, Lane P and Sherwin C, 2008. Using rainfall simulation and site measurements to predict annual inter rill erodibility and phosphorus generation rates from unsealed forest roads: Validation against in-situ erosion measurements. *Catena* 73: 49-62.

- Shi X, Xiao L and Rui L, 2010. Dynamics of soil organic carbon and nitrogen associated with physically separated fractions in a grassland cultivation sequence in the Qinghai-Tibetan plateau. *Biology and Fertility of Soils* 46:103–111.
- Six J, Elliott E T and Paustian K, 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 2013–2099.
- Suhua F, Baoyuan L, Heping L and Li X, 2011. The effect of slope on interrill erosion at short slopes. *Catena* 84: 29–34.
- Wakindiki I I C and Ben-hur M, 2002. Soil mineology and texture. effects an crust micromorohology. In filtration and erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 597-605.
- Wang L, Shi Z H, Wang L, Fang N F, Wu G L and Zhhang H Y, 2014. Rainfall kinetic energy controlling erosion processes and sediment sorting on steep hillslopes: A case study of clay loam soil from the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology* 512: 168-176.
- Wischmeier W. H and Smith D. D, 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. *Agriculture Handbook No. 537*. US Department of Agriculture, Washington DC.
- Xiao-yan C, Yu Z, Hong-xing M and Bin M, 2016. Estimating rill erosion process from eroded morphology in flume experiments by volume replacement method. *Catena* 136: 135-140.
- Wei L, Zhang B and Wang M, 2007. Effects of antecedent soil moisture on runoff and soil erosion in alley cropping systems. *Agriculture Water Management* 94: 54-62.
- Xining Z, Huang J, Gao X, Wu P and Wang J, 2014. Runoff features of pasture and crop slopes at different rainfall intensities, antecedent moisture contents and gradients on the Chinese Loess Plateau: A solution of rainfall simulation experiments. *Catena* 119: 90-96.
- Zhi-Qiang D, João L.M.P. de L and Hoon-Shin J, 2008. Sediment transport rate-based model for rainfall-induced soil erosion. *Catena* 76: 54–62.