

توزیع اندازه ذرات منتقله در اثر فرسایش سطحی در شدت‌های مختلف باران و درجات شیب

علی رضا واعظی^{۱*} - مهدی عبادی^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۱/۲۳

چکیده

رواناب سطحی یکی از عوامل مهم در انتقال ذرات خاک و در نتیجه فرسایش سطحی خاک است. شدت باران و شیب سطح دو عامل مهم و تأثیرگذار در فرسایش سطحی می‌باشند. در این پژوهش، انتقال‌پذیری ذرات اولیه خاک به وسیله رواناب سطحی بر روی یک خاک میان بافت (رس لومی) در نه شدت باران (از ۱۰ تا ۹۰ میلی‌متر بر ساعت) و پنج درجه شیب (از صفر تا ۴۰ درصد) به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام گرفت. فرسایش سطحی و توزیع اندازه ذرات فرسایش‌یافته با استفاده از فلوم‌هایی به ابعاد 50×32 cm تحت باران‌های شبیه‌سازی شده به مدت ۴۵ دقیقه اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج، شدت باران ۲۰ میلی‌متر بر ساعت به عنوان آستانه شدت باران و شیب ۱۰ درصد، به عنوان آستانه شیب برای وقوع فرسایش سطحی خاک بود. میزان فرسایش سطحی تحت تأثیر شدت باران ($P < 0.001$) و شیب سطح ($P < 0.001$) قرار گرفت به طوری که با افزایش شدت بارندگی و شیب سطح، میزان فرسایش سطحی به طور چشم‌گیری افزایش یافت. تفاوت اساسی بین ذرات اولیه خاک از نظر ویژگی انتقال‌پذیری وجود داشت. انتقال‌پذیری ذرات توسط جریان سطحی نیز به شدت تحت تأثیر شدت باران ($P < 0.001$) و شیب سطح ($P < 0.001$) قرار گرفت. با افزایش شدت باران انتقال‌پذیری ذرات سیلت افزایش و انتقال‌پذیری ذرات شن کاهش یافت. میزان انتقال ذرات رس تحت تأثیر شیب سطح قرار نگرفت. با وجود آن که میزان انتقال ذرات شن (به جز شن بسیار درشت) با افزایش شیب به شدت کاهش یافت، انتقال‌پذیری ذرات سیلت و رس تحت تأثیر شیب سطح قرار نگرفت. ذرات سیلت بیشترین سهم مواد فرسایش یافته را شامل شدند. حساسیت ذاتی بالای ذرات سیلت و حتی رس به فرسایش سطحی عواملی بودند که موجب شدند با افزایش درجه شیب، انتقال آن‌ها تحت تأثیر قرار نگیرد. با توجه به سهم بسیار بالای ذرات سیلت در هدررفت خاک، این ذره به عنوان حساس‌ترین ذره خاک در برابر فرآیندهای فرسایش آبی شناخته شد.

واژه‌های کلیدی: انتقال‌پذیری، باران شبیه‌سازی شده، رواناب، ذرات اولیه خاک

مقدمه

دارد (۱۶). اگرچه بیشترین عامل جدایی ذرات در شیب‌های کم، فرسایش پاشمانی می‌باشد ولی با افزایش تدریجی شیب، جریان سطحی از حدی افزون‌تر شده و نیروی گرانشی جریان آب افزایش یافته و منجر به جدایی ذرات و فرسایش خاک در اثر رواناب می‌شود (۴۸). اهمیت تولید رواناب در مناطق خشک و نیمه‌خشک دوچندان است (۴۲). در این مناطق، تولید رواناب در کنار ایجاد محدودیت‌های کم‌آبی برای گیاهان (۴۰)، نقشی مهم در تخریب خاک و فرسایش ایفاء می‌کند (۴۶). برآوردها نشان می‌دهد که حدود یک سوم از کل بارندگی سالانه در کشور (۱۳۰ میلیارد متر مکعب) به صورت رواناب سطحی از دسترس خارج می‌شود. اگر با کاهش فرسایش خاک، از هدررفت این مقدار آب جلوگیری گردد سالانه حدود ۱۰ میلیون هکتار زمین زراعی را می‌توان آبیاری کرد (۳۲).

در فرآیند تبدیل بارش به رواناب سطحی، دو دسته عوامل کلی شامل عوامل اقلیمی و عوامل فیزیوگرافی حوضه نقش اصلی دارند. مقدار تولید رواناب در یک دامنه تحت تأثیر عوامل گوناگون مانند

رواناب یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر انتقال ذرات خاک و فرسایش آبی بوده که بر فعالیت‌های کشاورزی اثر گذاشته و منجر به هدررفت عناصر غذایی از خاک می‌گردد (۳۰). به طور کلی بر اثر فرسایش، خاک حاصلخیز و عناصر غذایی مورد نیاز گیاه به تدریج از دسترس خارج می‌شود و شرایط فیزیکی خاک به ویژه از نظر نفوذپذیری نامناسب می‌گردد. به طور کلی رواناب هنگامی رخ می‌دهد که شدت بارندگی بیشتر از سرعت نفوذ آب به خاک باشد (۱۹). جریان یافتن آب بر روی سطح خاک عامل اصلی انتقال ذرات است و بیشترین نقش را در ایجاد شکل‌های مختلف فرسایش در هر عرصه

۱ و ۲ - دانشیار و دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان
* - نویسنده مسئول:

(Email: vaezi.alireza@znu.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.v31i1.52176

رواناب کم‌تری نسبت به خاک‌های ریزبافت تولید می‌کنند (۵۰، ۴۸، ۴۳). گزارش‌ها نشان می‌دهد، بین مقدار سیلت یک خاک و فرسایش‌پذیری آن ارتباط نزدیکی وجود دارد. هر چه مقدار سیلت خاک بیشتر باشد، فرسایش‌پذیری آن افزایش می‌یابد. به طور کلی ذرات سیلت و شن بسیار ریز (ذراتی بین ۲۰۰-۲ میکرون)، فرسایش‌پذیری بالایی دارند (۱۳، ۴۴ و ۴۷). عوامل فرساینده نیز به نوبه خود در تعیین نوع ماد منتقله مؤثر می‌باشد. شدت و انرژی جنبشی باران نیز از جمله عوامل اصلی هدررفت خاک می‌باشد. در پژوهش‌های پیشین به رابطه افزایش رواناب و تخریب خاک همگام با افزایش شدت باران (۱۸ و ۷) و انرژی جنبشی قطرات باران (۲۳) اشاره شده است. فرآیندهای فرسایش خاک عامل دیگر تعیین‌کننده دانه‌بندی مواد رسوب یافته هستند (۴۶).

در کنار آن که میزان انتقال خاک توسط جریان سطحی تحت تأثیر عواملی مانند شدت بارندگی و شیب سطح قرار دارد، قابلیت انتقال ذرات توسط جریان سطحی نیز به یک اندازه نیست. گزارش‌ها نشان می‌دهد که شرایط مختلفی مانند: ۱- مقدار در دسترس ذره در عرصه فرسایشی، ۲- امکان تولید ذره در طی پدیده فرسایش و ۳- انتخابی یا غیرانتخابی بودن فرآیندهای انتقال ذرات در نوع مواد منتقله اثر می‌گذارند (۱). انتقال ذرات خاک در اثر جریان سطحی به نوبه خود در کنار عامل شدت بارندگی و درجه شیب زمین به نوع و ماهیت ذره‌ی خاک وابسته است. سهم جریان سطحی در هدررفت خاک تحت شرایط مختلف شدت بارندگی و شیب سطح، متفاوت است. از سوی دیگر حساسیت ذرات اولیه (اجزای شن، سیلت و رس) به جابجایی در اثر جریان سطحی از یکدیگر متفاوت است و به این ترتیب میزان انتقال هر یک از ذرات اولیه خاک در شدت‌های مختلف بارندگی و درجات شیب یکسان نیست. آگاهی از توزیع اندازه ذرات رسوب انتقال یافته از سطح اراضی می‌تواند از جهات مختلفی دارای اهمیت باشد. نخست آن‌که، اثر فرسایش بر کیفیت و وضعیت حاصلخیزی اراضی (اثر درون عرصه‌ای فرسایش) به ریزی و درشتی ذرات هدررفته بستگی دارد و دوم آن‌که، توزیع اندازه ذرات رسوب وضعیت آلودگی منابع آب و عرصه‌ی ترسیب را مشخص می‌نماید (۳). مطالعات زیادی نشان داده است که در جریان ضعیف و فرسایش بین شیری اغلب ذرات در اندازه رس و سیلت از خاک اصلی منتقل می‌شوند (۲، ۵، ۲۲ و ۲۷). چاریر و همکاران (۱۰) با بررسی تولید رواناب و رسوب در باران شبیه‌سازی شده با شدت ۱۱۰ میلی‌متر بر ساعت و به مدت ۳۰ دقیقه نشان دادند که میزان هدررفت رس در مراتع دست نخورده به طور معنی‌داری بالاتر از مراتع تخریب یافته بود. نتایج مطالعات ژائو و همکاران (۵۱) نشان داد که ذرات سیلت متوسط (با اندازه ۶-۲۰ میکرومتر) و شن متوسط (با اندازه ۲۵۰-۵۰۰ میکرومتر) بیشترین مقدار را در رسوبات فرسایشی داشتند. اگر چه تحقیقات کلی در مورد نقش شدت باران یا درجه شیب

عوامل اقلیمی از جمله بارندگی (۲۹)، شیب (۱۱)، پوشش گیاهی (۲۵)، ویژگی‌های خاک (۲۰) و مدیریت خاک (۲۸) قرار می‌گیرد. در یک دامنه بدون پوشش گیاهی، مقدار تولید رواناب عمدتاً به ویژگی‌های خاک، خصوصیات باران و درجه شیب سطح وابسته است. مهم‌ترین خصوصیات باران که در تولید رواناب در هر رخداد بارندگی مؤثر می‌باشند، عبارتند از: شدت، مدت، مقدار بارندگی (۴۷). شدت باران مهم‌ترین خصوصیت باران از نظر تولید رواناب است. اگرچه باران‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک مشابه بسیاری از باران‌ها در چنین مناطقی از کشور، دارای شدتی بسیار کمتر از باران‌های نواحی نیمه‌مرطوب و مرطوب می‌باشند، اما تولید رواناب سطحی از مشکلات اساسی تخریب خاک و فرسایش آبی در این مناطق به شمار می‌رود. محدود بودن نفوذپذیری خاک از یکسو و ضعف پوشش گیاهی از سوی دیگر، از عوامل مهم افزایش ضریب رواناب در دامنه‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند. نفوذپذیری خاک در کنار توزیع اندازه ذرات خاک، تحت تأثیر ساختمان خاک (۳۹) و محتوای ماده آلی خاک قرار دارد (۳۵). در مناطق خشک و نیمه‌خشک، دامنه‌های دارای خاک با بافت ریز محدودیت زیادی از نظر نفوذ آب باران دارند. گزارش‌ها نشان می‌دهد که تشکیل ساختمان خاک و پایداری ساختمان در چنین مناطقی در کنار محتوای ماده آلی خاک (۱) به میزان آهک خاک (۴۳) نیز وابسته است. در خاک‌های واقع در این مناطق وجود شن درشت به علت افزایش نفوذپذیری خاک (۳۵) و ماده آلی و آهک به دلیل کمک در تشکیل پایداری خاکدانه‌ها تأثیر چشمگیری در کاهش رواناب دارد (۴۴). درجه شیب زمین مهم‌ترین ویژگی سطح زمین از نظر تولید رواناب سطحی است. وجود شیب زیاد باعث کاهش فرصت نفوذ آب، کوتاه شدن زمان آغاز جریان و تسریع تشکیل جریان سطحی می‌شود. از این رو هرچه بر مقدار درجه شیب افزوده شود، تولید رواناب و رسوب نیز افزایش می‌یابد (۳۳). بررسی‌های ژائو و همکاران (۵۱) در مورد شاخص‌های رواناب تحت باران شبیه‌سازی شده نشان داد که زمان آغاز رواناب با افزایش شیب به صورت خطی کاهش یافت. مقدار تولید رواناب تحت تأثیر شیب سطح افزایش یافت. این موضوع به دلیل افزایش تمایل آب برای جاری شدن و کم شدن ذخیره چالاب در اثر افزایش شیب گزارش گردید.

عوامل زیادی مقدار رسوب و نوع مواد منتقله را تحت تأثیر قرار می‌دهند. بافت خاک از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر فرسایش‌پذیری خاک و تولید رسوب می‌باشد. مطالعات نشان داده است که خاک‌های با بافت ریز دارای چسبندگی زیادی بوده و در نتیجه جدا شدن ذرات آنها مشکل است، با این وجود رسوبات حاصل از آن‌ها به راحتی منتقل می‌شوند و در مقابل خاک‌های درشت بافت، سریع‌تر و راحت‌تر جدا می‌شوند و در عین حال رسوبات تشکیل‌شده، به سختی منتقل و

(PSD) به روش هیدرومتری تعیین شد (۹). فراوانی ذرات بر اساس روش دانه‌بندی آمریکایی (۴۱) شامل: شن بسیار درشت (۲-۱ میلی‌متر)، شن درشت (۱-۰/۵ میلی‌متر)، شن متوسط (۵/۰-۰/۲۵ میلی‌متر)، شن ریز (۲۵/۰-۰/۱ میلی‌متر)، شن بسیار ریز (۱/۰-۰/۰۵ میلی‌متر)، سیلت (۰/۰۵-۰/۰۰۲ میلی‌متر) و رس (کوچک‌تر از ۰/۰۰۲ میلی‌متر) تعیین شد. جرم مخصوص ظاهری به روش سیلندر در سیلندر فلزی با قطر داخلی ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۴/۹ سانتی‌متر تعیین شد (۸). میانگین وزنی قطر خاکدانه (MWD) بر اساس مقاومت خاکدانه‌ها در آب به روش الک تر (۱۷) در خاکدانه‌هایی با قطر کوچکتر از ۲ میلی‌متر با استفاده از دستگاه مکانیکی با نوسان ۳۰ دور در دقیقه به مدت یک دقیقه (۲۰)، هدایت هیدرولیکی خاک از روش درجایی تک‌حلقه‌ی نفوذ (۳۴) درصد کربن آلی به روش والکلی-بلک (۴۵)، درصد کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک (۱۵)، pH خاک در گل اشباع با استفاده از pH متر (۳۸)، شوری خاک در عصاره اشباع با استفاده از EC متر (۱۲) و درصد سدیم تبادل‌ی خاک (ESP) نیز به روش استات آمونیوم تعیین شدند.

شبیه‌سازی باران

شبیه‌سازی باران ابزارهای مناسبی برای بررسی تغییرات خاک تحت فرآیند فرسایش و همچنین ارزیابی شرایط محیطی مانند شیب زمین، رطوبت اولیه خاک و شدت باران از نظر فرسایش خاک می‌باشند (۴). در این پژوهش از یک دستگاه شبیه‌ساز باران با چارچوب فلزی با صفحه بارشی به طول ۱۳۰ و به عرض ۹۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۸۷ سانتی‌متر استفاده شد (شکل ۱-الف). صفحه‌ی بارش باران‌ساز از ۵۴۰ قطعه نازل قطره‌ساز تشکیل شده بود. نازل‌ها به فواصل سه سانتی‌متری از هم برای ایجاد بارش یکنواخت باران قرار گرفتند. نازل‌ها توانایی تولید قطراتی با قطر دو میلی‌متر را داشتند. قطر قطره بر مبنای حجم قطره خارج شده از دهانه نازل قطره‌ساز تعیین گردید. شدت‌های مختلف باران (۱۰ تا ۱۲۰ میلی‌متر بر ساعت) با ایجاد توزیع یکنواخت در دستگاه باران‌ساز قابل شبیه‌سازی بود. مدت بارندگی در تمام شدت‌های باران مورد بررسی یکسان و برابر ۴۵ دقیقه بود. این مدت بر مبنای پیش‌آزمایش در نمونه‌های خاک برای وقوع فرآیند فرسایش سطحی انتخاب گردید.

اندازه‌گیری فرسایش سطحی

آزمایش در فلوم‌هایی از جنس گالوانیزه با ۵۰ سانتی‌متر طول، ۳۲ سانتی‌متر عرض و ۷ سانتی‌متر ارتفاع دیواره انجام گرفت. در کف فلوم‌ها سوراخ‌هایی برای خروج زه‌آب ایجاد شد. در کف فلوم از یک لایه فیلتر شنی به ضخامت ۲ سانتی‌متر استفاده شد. نمونه خاک به ضخامت ۴ سانتی‌متر بر روی لایه شنی به طور یکنواخت قرار داده

بر میزان کل جریان سطحی و هدررفت خاک انجام گرفته است لیکن تحقیقات دقیق در مورد سهم جریان سطحی در میزان فرسایش در شدت و شیب‌های مختلف به دقت مورد بررسی قرار نگرفته است. از سوی دیگر انتقال‌پذیری هر یک از ذرات اولیه یا حساسیت آن‌ها در مقابل انتقال به وسیله جریان سطحی موضوعی است که به دقت شناخته نشده است. از این رو در این پژوهش نقش شدت باران و شیب سطح بر میزان فرسایش سطحی و نیز انتقال‌پذیری ذرات اولیه تحت تأثیر این دو عامل در یک خاک منطقه نیمه‌خشک در شمال غرب کشور مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

طرح آزمایشی و تهیه نمونه خاک

آزمایش با ۴۵ تیمار و سه تکرار و در مجموع با ۱۳۵ واحد آزمایشی در یک خاک میان بافت (رسی لومی) با توزیع نسبتاً مساوی از ذرات اولیه (شن، سیلت و رس) انجام گرفت. آزمایش در نه سطح شدت باران شامل: ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت و در پنج سطح شیب شامل: صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در شرایط آزمایشگاهی به اجرا درآمد. اساس انتخاب شدت‌های باران مورد مطالعه، بر مبنای وقوع چنین باران‌هایی در استان زنجان به عنوان یکی از مناطق نیمه‌خشک در منطقه شمال غرب کشور بود. مبنای انتخاب شیب سطح نیز، مشاهده‌ی فرسایش سطحی در چنین شیب‌هایی در منطقه بود. برای پیدا کردن خاک میان بافت از چند منطقه در سطح استان زنجان نمونه اولیه‌ی خاک به روش لمسی جمع‌آوری شد و برای تعیین دقیق توزیع اندازه ذرات^۱ (PSD) به آزمایشگاه منتقل گردید. وجود نسبت‌های یکسان از ذرات اولیه خاک، برای مقایسه قابلیت انتقال‌پذیری آن‌ها در جریان سطحی ضروری بود. در این راستا ترکیبات همگن و با نسبت‌های مشخص از خاک‌ها تهیه شد و دوباره بافت آن‌ها اندازه‌گیری شد، این آزمایشات چندین بار انجام شد تا در نهایت با الک کردن و ترکیب دو نوع خاک (سیلتی کلی لوم و لوم)، خاک مورد نظر با توزیع اندازه ذرات تقریباً مشابه تهیه شد به طوری که نسبت ذرات مورد نظر برای هر یک از ذرات اولیه شن، سیلت و رس به ترتیب ۳۳/۱۵، ۳۳/۲۲ و ۳۳/۶۳ درصد بود. برای بررسی پاشمان در ۱۳۵ واحد آزمایشی حدود ۲ تن از خاک مورد نظر تهیه و به آزمایشگاه فرسایش خاک دانشگاه زنجان منتقل شد.

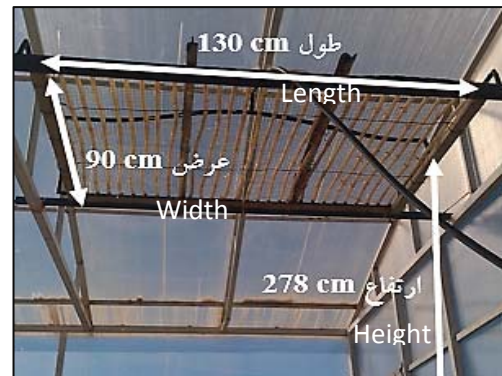
تعیین ویژگی‌های خاک

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل: توزیع اندازه ذرات

رواناب و رسوب موجود در ظرف‌ها به وسیله‌ی استوانه‌ی مدرج قرائت شد. پس از هواخشک شدن نمونه، رسوب به‌جا مانده در هر ظرف به آزمایشگاه منتقل و برای خشک شدن کامل در آون (۱۰۵°C) به مدت ۲۴ ساعت) قرار داده شد. به این ترتیب فرسایش سطحی بر مبنای جرم خاک هدررفته توسط جریان سطحی از هر فلوم تحت شیب و شدت باران معین، تعیین شد.



شد. از آنجا که نمونه خاک از الک ۲ میلی‌متر گذرانده شده بود، فراوانی خاکدانه‌های درشت در آن پایین بود و در نتیجه جابه‌جایی خاک تأثیری مهم بر شرایط آزمایش نمی‌گذاشت. در قسمت پایین هر فلوم، قیفی برای جمع‌آوری رواناب و رسوب تعبیه شده بود (شکل ۱-ب). برای جمع‌آوری رواناب از سطح خاک فلوم از ظرف‌هایی پلاستیکی با حجم ۲/۵ لیتر استفاده شد. پس از اتمام بارش حجم



شکل ۱- نمای از دستگاه شبیه‌ساز باران مورد استفاده در پژوهش (الف) و فلوم‌های آزمایشی و ظرف‌های جمع‌آوری رواناب و رسوب (ب)
Figure 1- Experimental flumes and containers for collecting runoff and soil loss

تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۲ و رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel نسخه ۲۰۱۳ استفاده شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک مورد بررسی

در جدول ۱ نتایج تجزیه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه خاک آمده است. خاک مورد بررسی دارای بافت لوم رسی با توزیع نسبتاً مساوی از ذرات شن (۳۳/۱۵ درصد)، سیلت (۳۳/۲۲ درصد) و رس (۳۳/۶۳ درصد) بود. واکنش خاک در محدوده خنثی و هدایت الکتریکی آن در محدوده غیر شور ($EC < 4 \text{ dS.m}^{-1}$) (۱۰) بود. خاک از نظر ماده آلی فقیر (کمتر از ۱ درصد) بود و به واسطه داشتن مقدار نسبتاً بالایی کربنات کلسیم معادل (بیش از ۱۰ درصد)، جزء خاک‌های آهکی (۳۷) بود. پایین بودن میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در روش الک تر (۰/۱۷ میلی‌متر) بیانگر ناپایداری ساختمان خاک بود و از این رو مقاومت کمتری در برابر عوامل فرساینده از جمله ضربه قطرات باران داشت (۲۴). با توجه به مقدار پایین سدیم تبادل خاک ($ESP=2/22$)، این ویژگی خاک به عنوان عامل اصلی ناپایداری خاکدانه‌ها و فروپاشی آن‌ها نبود. یکی از علل ناپایداری خاکدانه‌ها، خاکورزی‌های پیایی و محتوای پایین ماده آلی خاک کشتزار مورد نمونه برداری بود.

تعیین توزیع اندازه ذرات خاک فرسایش یافته

برای اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرات رسوب از روش هیدرومتری استفاده شد (۹). آزمایش در ۴۰ گرم از رسوب مربوط به هر فلوم، انجام گرفت. پس از عملیات جداسازی و پخشیده کردن ذرات، ذرات شن با استفاده از الک ۰/۰۵ میلی‌متری جدا شدند. اجزای شن (شن بسیار درشت، درصد شن درشت، شن متوسط، شن ریز، شن خیلی ریز) پس از خشک کردن در آون، از سری الک‌های ۰/۰۵، ۰/۰۷۵، ۰/۱۵، ۰/۲۵، ۰/۶ و ۱/۱۸ میلی‌متر عبور داده شد و تعیین گردید. درصد ذرات سیلت و رس نیز به وسیله هیدرومتر در نمونه رسوب تعیین گردید.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

تجزیه واریانس داده‌های مربوط به مقدار رسوب و نوع ذرات منتقله در سطوح مختلف شدت باران و در سطوح مختلف شیب با کمک آزمون LSD انجام گرفت. رابطه بین میزان انتقال ذرات و شدت باران و درجه شیب از طریق روابط مختلف ریاضی (خطی، لگاریتمی، توانی و یا ...) تعیین شد. داده‌ها قبل از انجام آنالیزهای مربوط به آزمایش، از نظر نرمال بودن با استفاده از تحلیل هیستوگرام و بررسی چولگی^۱ و کشیدگی^۲ مورد بررسی قرار گرفتند. برای انجام

1- Skewness
2- kurtosis

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک مورد مطالعه

ویژگی خاک Soil property	میانگین Mean
شن Sand (%)	33.15
سیلت Silt (%)	33.22
رس Clay (%)	33.63
جرم مخصوص ظاهری Bulk density (g cm ⁻³)	1.33
میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب Mean weight diameter of water stable-aggregates (mm)	0.17
هدایت هیدرولیکی اشباع Saturated hydraulic conductivity (mm h ⁻¹)	18.09
واکنش pH	7.28
هدایت الکتریکی Electrical conductivity (dS m ⁻¹)	3.32
ماده آلی Organic matter (%)	0.63
کربنات کلسیم معادل Calcium carbonate equivalent (%)	31.87
درصد سدیم تبادلی Exchangeable sodium percentage	2.22

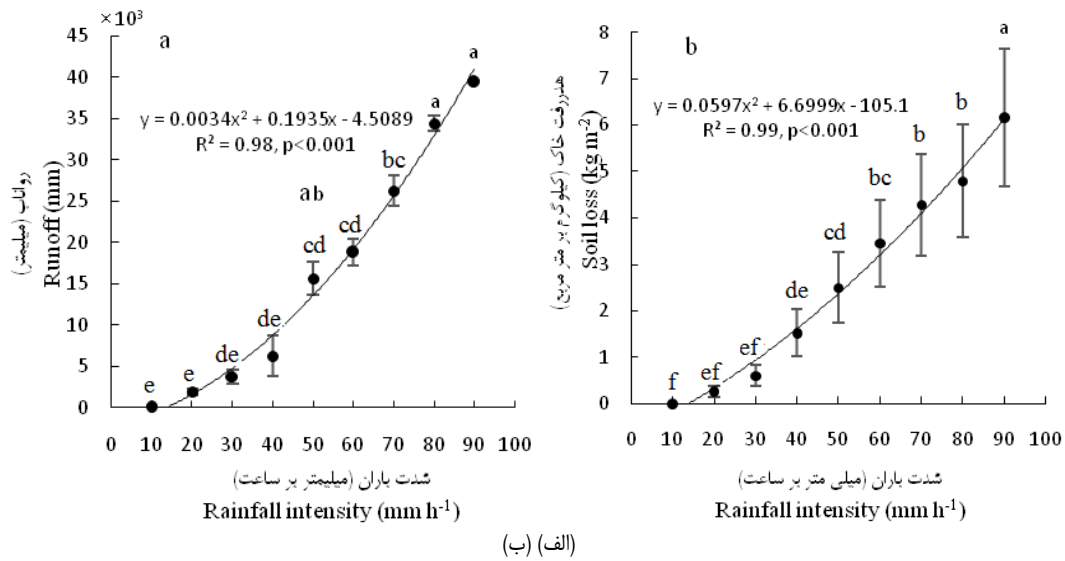
توجه به عدم وجود ساختمان مناسب در خاک مورد آزمایش و وجود ذرات انتقال‌پذیر، در شدت‌های بالای باران همچنان تولید رواناب سطحی و در نتیجه هدررفت خاک بالا بود.

تأثیر درجه شیب بر جریان سطحی و هدررفت خاک ناشی از آن

رابطه معنی‌دار بین شیب سطح و تولید جریان سطحی ($R^2=0/97$ و $P<0/001$) و هدررفت خاک ($R^2=0/99$ و $P<0/001$) به دست آمد (شکل ۳). با افزایش درصد شیب سطح، مقدار رواناب و هدررفت خاک به طور قابل توجهی افزایش پیدا کرد. در شیب‌های بالا، فرصت نفوذ آب به خاک کم شده، در نتیجه به دلیل افزایش سرعت و قدرت جریان سطحی، فرسایش خاک افزایش یافت. در شیب ۴۰ درصد، مقدار هدررفت آب و هدررفت خاک به ترتیب ۰/۰۱۷ میلی‌متر و ۳/۹۹ کیلوگرم بر متر مربع بود که به ترتیب به اندازه‌ی ۲/۳۰ برابر و ۱/۷۴ برابر مقدار آن در شیب ۱۰ درصد بود. افزایش درصد شیب تا حد ۲۰ درصد نقش اساسی در افزایش تولید رواناب و هدررفت خاک داشت و از آن پس تغییرات رواناب و هدررفت خاک با افزایش شیب ناچیز بود (شکل ۳ ب).

تأثیر شدت باران بر جریان سطحی و هدررفت خاک ناشی از آن

نتایج نشان داد که در پایین‌ترین شدت باران (۱۰ میلی‌متر بر ساعت) هیچ‌گونه رواناب و هدررفت خاکی رخ نداد. دلیل آن این بود که در شدت باران‌های پایین، سرعت نفوذ آب به خاک ($K_s=18/09^1$ mm.h⁻¹) بیشتر از شدت بارندگی بود و از این رو روانابی تشکیل نشد. شدت باران ۲۰ میلی‌متر بر ساعت، آستانه تولید رواناب و هدررفت خاک در فلوم‌ها بود. در شدت باران ۹۰ میلی‌متر بر ساعت، میزان کل هدررفت خاک (۶۱۶۳/۳۳ گرم بر متر مربع) به اندازه‌ی ۲۳/۴ برابر میزان هدررفت خاک در شدت باران ۲۰ میلی‌متر بر ساعت بود. رابطه‌ای افزایشی قوی بین شدت باران و رواناب ($P<0/001$) و هدررفت خاک ($R^2=0/98$ و $P<0/001$) مشاهده شد. در واقع، با افزایش شدت باران، رواناب بیش‌تری تولید شد و به دنبال آن هدررفت خاک به دلیل افزایش تخریب و انتقال خاک افزایش یافت. یافته‌های ژانگ و همکاران (۴۹) نشان داد که با افزایش شدت جریان، شدت جدا شدن ذرات به وسیله جریان سطحی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش شدت باران و انرژی جنبشی، تخریب خاکدانه‌ها افزایش می‌یابد بنابراین ذرات خاک حساس به حمل می‌شوند (۲۳). با



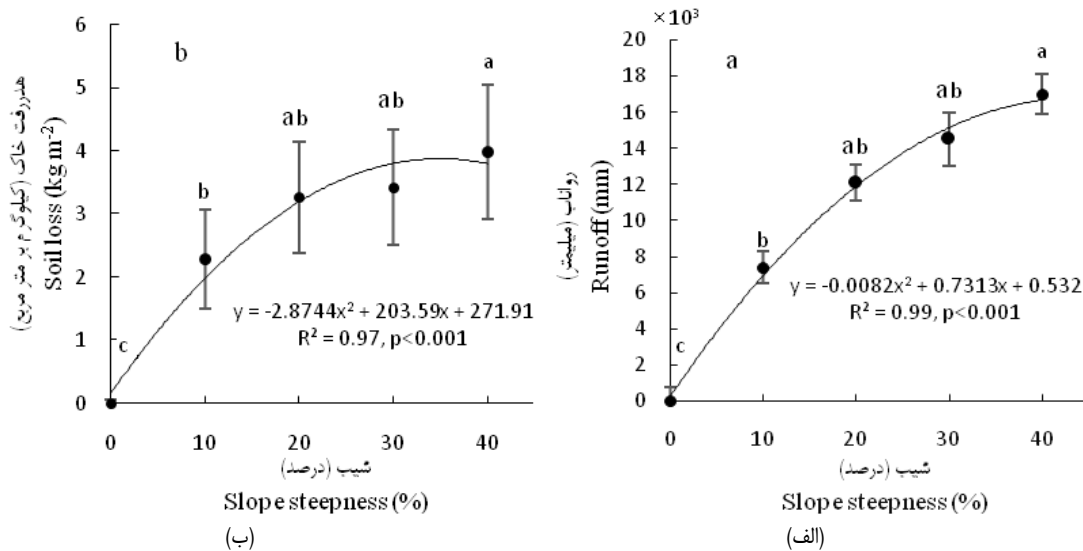
شکل ۲- رابطه بین شدت باران و تولید جریان سطحی (الف) و هدررفت خاک (ب)

(حروفات بیان‌گر وجود تفاوت معنی‌دار بین شدت‌های باران می‌باشد)

Figure 2- Relationship between rainfall intensity and surface runoff (a) and soil loss (b)
(The alphabets show significant differences among the rainfall intensities)

۲۰ درصد، به عنوان کمترین میزان شیب سطح، برای وقوع بیشترین میزان رواناب در اثر باران بود. بنابراین از آنجا که قدرت جریان سطحی در شیب‌های بالای ۲۰ درصد تغییرات چندانی پیدا نکرد، تفاوتی از نظر هدررفت خاک نیز مشاهده نگردید.

علت آن این است که تا شیب ۲۰ درصد، همگام با افزایش شیب سطح، فرصت نفوذ آب به خاک به شدت کاهش یافت و تولید جریان سطحی افزایش قابل توجهی پیدا کرد. در شیب‌های بالای ۲۰ درصد، تفاوتی چشمگیر در میزان نفوذ آب به خاک و در نتیجه تولید جریان سطحی نسبت به شیب ۲۰ درصد وجود نداشت. به عبارت دیگر شیب



شکل ۳- رابطه بین شیب سطح و تولید جریان سطحی (الف) و هدررفت خاک (ب)

(حروفات بیان‌گر وجود تفاوت معنی‌دار بین شدت‌های باران می‌باشد)

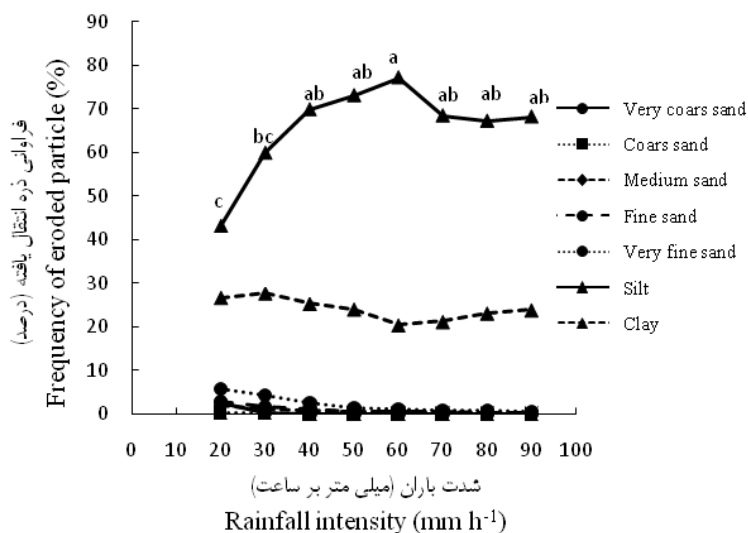
Figure 3- Relationship between slope steepness and surface runoff (a) and soil loss (b)
(The alphabets show significant differences among the rainfall intensities)

ذرات سیلت و رس به ترتیب حدود ۶۶ درصد و ۲۴ درصد از فرسایش خاک سطحی را شامل شدند. همانطور که شکل ۴ نشان می‌دهد با افزایش شدت باران (از شدت ۲۰ میلی‌متر بر ساعت تا شدت ۶۰ میلی‌متر بر ساعت) انتقال‌پذیری ذرات سیلت به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار گرفت و الگوی تقریباً افزایشی نشان داد. با توجه به نتایج می‌توان بیان کرد که ذرات سیلت حساسترین ذرات اولیه خاک به انتقال توسط جریان سطحی رواناب در شدت‌های مختلف باران بود. انتقال‌پذیری ذرات شن نیز تحت تأثیر شدت بارندگی کاهش یافت. تغییرات رس در شدت‌های مختلف باران از روند مشخصی پیروی نکرد. با افزایش شدت باران حجم رواناب افزایش یافت و جریان قوی‌تر، باعث جدا شدن راحت‌تر و انتقال ذرات خاک شد. هم‌چنین با افزایش شدت باران انرژی جنبشی قطرات باران افزوده شد و تخریب خاکدانه‌ها و جدا شدن ذرات افزایش یافت. به طور کلی انتقال ذرات سیلت بیشتر از دو ذره دیگر بود. علت این موضوع، انتقال انتخابی ذره سیلت به دلیل وزن کم و خاصیت چسبندگی پایین آن بود (۱۳). افزایش انتقال ذرات سیلت، عاملی مهم در کاهش سهم انتقال ذرات شن در هدررفت خاک بود. بررسی‌های اسدی و همکاران (۲) نشان داد که یک الگوی انتخابی در انتقال ذرات خاک به وسیله جریان سطحی وجود دارد.

تحقیقات هوانگ و همکاران (۲۱) نیز نشان داد که با افزایش شیب سطح، حجم رواناب افزایش معنی‌داری ($P < 0.001$) می‌یابد. باتانی و گریسمر (۶) بیان کردند که افزایش درصد شیب زمین در محدوده بین ۴ تا ۱۶ درصد، تأثیر مثبت و معنی‌دار بر میزان هدررفت خاک دارد. نتایج بررسی‌های کاینل (۲۶) نشان داد که با افزایش شیب به ویژه در مقادیر بیش از ۱۰ درصد، غلظت رسوب افزایش چشمگیری می‌یابد. مقایسه نتایج تأثیر شدت باران و شیب سطح بر تولید رواناب و هدررفت خاک (شکل ۲ و ۳) بیانگر آن است که شدت باران نقشی بارزتر نسبت به درجه شیب در میزان تولید رواناب و هدررفت خاک دارد. این نتیجه مؤید آن است که در خاک‌های منطقه نیمه‌خشک شدت باران مهمترین عامل تعیین کننده تولید رواناب در خاک‌ها باشد.

انتقال‌پذیری ذرات خاک به وسیله جریان سطحی تحت تأثیر شدت باران

شکل ۴ تغییرات درصد ذرات خاک را در شدت‌های مختلف باران نشان می‌دهد. ذرات اولیه خاک رفتار متفاوتی در برابر انتقال به وسیله جریان سطحی در شدت‌های مختلف باران نشان دادند. بیشترین جابه‌جایی ذرات اولیه متعلق به ذرات سیلت و رس بود به طوری که



شکل ۴- توزیع اندازه ذرات خاک فرسایش یافته در شدت‌های باران

(حروفات بیان‌گر وجود تفاوت معنی‌دار بین شدت‌های باران می‌باشد)

Figure 4- Particle size distribution of eroded soil in rainfall intensities (The alphabets show significant differences among the rainfall intensities)

مختلف انتقال برای ذرات با اندازه‌های مختلف اعلام کردند. بررسی‌های اسدی و همکاران (۴) در دو نوع خاک و در دامنه‌های

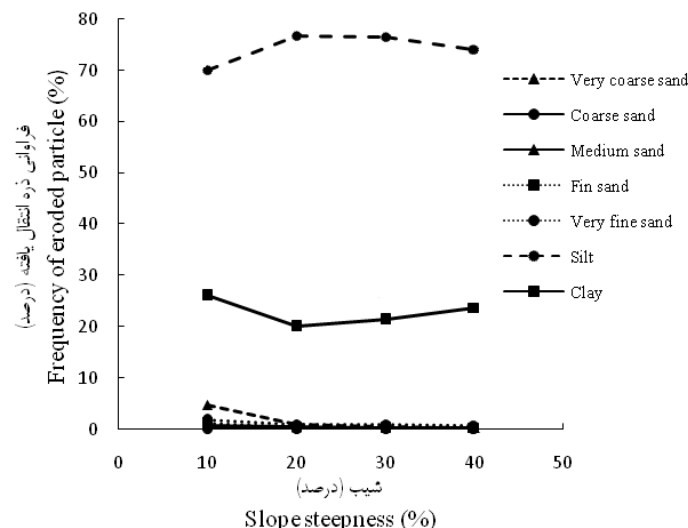
آن‌ها دلیل انتقال انتخابی ذرات با اندازه‌های مختلف را مقاومت متفاوت ذرات با اندازه‌های مختلف در مقابل انتقال یا وجود فرآیندهای

به تغییرات شیب وابسته نباشد. این نتیجه بیانگر آن است که انتقال‌پذیری ذرات سیلت در سطوح مختلف شیب عمدتاً تابعی از ماهیت ذاتی آن (جرم کم و چسبندگی ناچیز) است. امکان تشکیل واحدهای ساختمانی توسط ذرات رس، عاملی است که باعث شد انتقال‌پذیری ذرات رس به نوبه خود بسیار کمتر از ذرات سیلت باشد. چنین به نظر می‌رسد که انتقال‌پذیری ذرات رس نیز مانند ذرات سیلت، بیشتر وابسته به ماهیت این ذره بوده و تغییرات شیب تأثیری مهم بر سهم انتقال آن توسط جریان سطحی نمی‌گذارد. منحنی تغییرات انتقال ذرات رس تقریباً قرینه منحنی انتقال ذرات سیلت بود. میزان انتقال ذرات سیلت در شیب ۱۰ درصد کمترین مقدار بود و در شیب ۲۰ درصد به حداکثر مقدار خود رسید و در این شرایط شیب، انتقال ذرات رس نتایج عکس نشان داد. اگرچه میزان انتقال هر یک از ذرات سیلت و رس با افزایش درجه شیب ناچیز بود اما با افزایش شیب، به نظر می‌رسد که انتقال مجموع این دو ذره (سیلت + رس) باعث شد که سهم انتقال اجزای شن با افزایش شیب به طور قابل توجهی کاهش یابد. در این میان شدت کاهش انتقال ذرات بزرگ شن (شن بسیار درشت، شن درشت و شن متوسط) نسبت به سایر ذرات شن بیشتر بود. در پژوهشی رونگشنگ و ژابین (۳۳) بیان کردند که شن ریز قابلیت جداسازی بالاتری را نسبت به شن درشت دارد و ذرات رس به دلیل چسبندگی بالا، قابلیت جداسازی پایینی دارند.

محدود از قدرت جریان (۲-۵ mW) نشان داد حداقل دو فرآیند متفاوت جهش-تعلیق و چرخش در انتقال ذرات به وسیله‌ی جریان مؤثر است که اهمیت نسبی آن‌ها به خصوصیات جریان، به ویژه قدرت جریان و بافت خاک، وابسته است. شی و همکاران (۳۶) نشان دادند به طور کلی رابطه‌ی قوی بین ارتباط رسوب با چرخش و قدرت جریان وجود دارد و بافت خاک عامل اصلی توزیع اندازه ذرات رسوب است.

انتقال‌پذیری ذرات خاک تحت تأثیر شیب سطح

ذرات سیلت و رس به ترتیب حساسترین ذرات اولیه خاک به انتقال توسط جریان سطحی در درجات مختلف شیب بودند. در کل، بیش‌ترین میزان ذرات منتقله در سطوح مختلف شیب مربوط به ذرات سیلت (۷۷ درصد) و رس (۲۳ درصد) و کمترین آن مربوط به ذرات شن درشت (۰/۰۷ درصد) بود. بررسی تغییرات ذرات انتقال یافته در درصدهای مختلف شیب سطح (شکل ۵) نشان داد که با افزایش درصد شیب سطح، انتقال اجزای شن (شن بسیار درشت، شن درشت، شن متوسط، شن ریز و شن بسیار ریز) تحت تأثیر قرار گرفته و به شدت کاهش یافت ($P < 0/01$). ذرات سیلت و رس تغییرات چشمگیری را از نظر میزان انتقال با افزایش درجه شیب سطح نشان ندادند. حساسیت بالای ذرات سیلت به فرسایش باعث شد تا انتقال آن‌ها در تمام درجات شیب، نسبت به سایر ذرات اولیه بالاترین باشد. این قابلیت فرسایشی بالای ذرات سیلت عاملی بود تا مقدار انتقال آن



شکل ۵- توزیع اندازه ذرات خاک فرسایش یافته در درجات شیب سطح
Figure 5- Particle size distribution of eroded soil in slope gradients

باران و انتقال ذرات شن درشت ($t = -0/87$, $P < 0/01$)، شن متوسط ($t = -0/87$, $P < 0/01$)، شن ریز ($t = -0/84$, $P < 0/01$)، شن بسیار

وابستگی هدررفت خاک بر انتقال ذرات
همبستگی بالایی بین میزان هدررفت خاک تحت تأثیر شدت

برای ذرات رس در رسوب ۳/۶۱ گزارش دادند. در پژوهشی اکویو و هاریلال (۱۴) در هند نیز نشان دادند که خاک با حدود ۳۰ درصد رس، کمترین هدررفت را به واسطه ترکیب متعادل اجزاء شن، سیلت و رس دارا بود. در این خاک علاوه بر کاهش به دلیل چسبندگی مناسب ذرات به یکدیگر، فرسایش پاشمانی کاهش یافت و نفوذپذیری خاک نیز افزایش یافت. بررسی هدررفت خاک تحت تأثیر درجه شیب و انتقال پذیری ذرات خاک نیز نشان داد که همبستگی معنی دار بین هدررفت خاک و انتقال ذرات شن درشت ($r = -0.96$, $P < 0.05$)، شن متوسط ($r = -0.97$, $P < 0.01$)، شن ریز ($r = -0.97$, $P < 0.01$) و شن بسیار ریز ($r = -0.96$, $P < 0.05$) وجود داشت. با افزایش درجه شیب، انتقال پذیری این اجزاء شن به شدت کاهش یافت. میزان انتقال شن بسیار درشت، سیلت و رس تحت تأثیر شیب سطح قرار نگرفت. چنین به نظر می رسد که عدم وجود چسبندگی بین ذرات سیلت و قابلیت انتقال آسان آن‌ها باعث شد که این ذرات ماهیتاً بسیار حساس به انتقال باشند و تحت تأثیر عامل تشدید دهنده فرسایش (درصد شیب) قرار نگیرد. ذرات رس نیز تا اندازه‌ای رفتاری مشابه با ذرات سیلت نشان دادند و میزان انتقال آن‌ها متأثر از شیب سطح نبود بلکه ماهیت ذاتی این ذره عاملی بود که موجب شد قابلیت انتقال آن در تمام شیب‌های مورد بررسی نسبتاً بالا باشد. ذرات شن بسیار درشت برخلاف این دو ذره (سیلت و رس) به دلیل جرم بالا قابلیت انتقال بسیار محدودی داشتند و اگرچه افزایش درجه شیب، افزایش تولید رواناب را به همراه داشت اما عملاً رواناب تولید شده همچنان قادر به انتقال این ذرات درشت خاک نبود. از این رو در مورد این ذره نیز می توان تصور کرد که ماهیت ذاتی این ذرات، مهمترین عامل تعیین کننده میزان انتقال آن‌ها به وسیله جریان سطحی باشد.

ریز ($r = -0.88$, $P < 0.01$) و سیلت ($r = 0.85$, $P < 0.01$) وجود داشت (جدول ۲). با افزایش شدت بارندگی، انتقال اجزاء شن توصیف شده به شدت کاهش یافت. شن بسیار درشت و رس، ذراتی از خاک بودند که میزان انتقال آن‌ها تحت تأثیر شدت بارندگی قرار نگرفت. بیشترین میزان انتقال ذرات در شدت‌های مختلف باران مربوط به ذرات سیلت (۷۷/۱۴ درصد) و کمترین آن مربوط به ذرات شن بسیار درشت (۰/۰۴ درصد) بود. همانطور که پیشتر بیان شد شدت باران عاملی مهم در تولید رواناب و هدررفت خاک بود به طوری که با افزایش شدت باران، تولید رواناب به شدت افزایش یافت و این موضوع، هدررفت بیشتر ذرات خاک را به دنبال داشت (شکل ۲). از بین ذرات خاک، سیلت بیشترین سهم را در هدررفت خاک بر اثر شدت باران داشت. همگام با افزایش هدررفت ذرات سیلت با افزایش شدت باران، هدررفت ذرات شن کاهش یافت. با وجود آن که در جریان‌های شدید حاصل از باران‌های شدید، قابلیت انتقال ذرات توسط جریان بیش تر بود لیکن سهم انتقال ذرات درشت (شن) برخلاف ذرات ریز (سیلت) به دلیل جرم بالا بسیار کم بود. امکان چسبندگی بالای ذرات رس به یکدیگر و تشکیل ذرات ثانویه سنگین، مقاومت آن‌ها را به تخریب در اثر ضربه قطرات باران افزایش داد. بنابراین حتی در شدت‌های باران بالا، هدررفت ذرات رس افزایش قابل توجهی پیدا نکرد. این نتایج در بخشی موافق با یافته‌های ویشمیر و اسمیت (۴۸) است که نشان دادند که ذرات سیلت برخلاف ذرات شن درشت و رس، حساسیت بالایی به فرآیندهای فرسایش آبی دارند. بر خلاف نتایج این پژوهش، در سایر پژوهش‌ها گزارش شد که ذرات رس بیشترین سهم را در هدررفت خاک دارند. در این راستا کوینتون و همکاران (۳۱) در پژوهش‌های خود مشاهده کردند که ذرات رس در رسوب نسبت به خاک بیشتر است. همچنین ارسکین و همکاران (۱۵) این نسبت را

رس	سیلت	شن بسیار ریز	شن ریز	شن متوسط	شن درشت	شن بسیار درشت
Clay	Silt	Very fine sand	Fine sand	Medium sand	Coarse sand	Very coarse sand
0.69	0.85**	-0.88**	-0.87**	-0.84**	-0.87**	-0.56
Soil loss in rainfall intensities						
-0.54	0.66	-0.96*	-0.97**	-0.97**	-0.96*	-0.45
Soil loss in slope steepness						

*: معنی دار در سطح احتمال ۵٪ و **: معنی دار در سطح احتمال ۱٪

*: Difference is significant at $P < 0.05$; **: Difference is significant at $P < 0.01$

نتیجه گیری کلی

بیشتر ضربه قطرات باران بر تخریب خاک، به دلیل افزایش تولید رواناب سطحی بود به طوری که رابطه‌ای معنی دار بین شدت باران و تولید رواناب سطحی وجود داشت ($R^2 = 0.99$). با افزایش شدت باران و در نتیجه افزایش تولید رواناب، قدرت تخریب و انتقال ذرات خاک افزایش یافت. ذرات سیلت بیشترین سهم را در هدررفت خاک با

نتایج این پژوهش نشان داد که شدت باران و شیب سطح از عوامل مهم در تولید جریان سطحی و فرسایش سطحی خاک می باشند. در این میان، نقش شدت باران بر هدررفت خاک بسیار بارزتر از نقش شیب سطح بود. افزایش هدررفت خاک در کنار تأثیر

بود. انتقال ذرات شن بسیار درشت، سیلت و رس تحت تأثیر شیب سطح قرار نگرفت. ماهیت ذاتی ذرات سیلت (جرم نسبتاً پایین و فقدان چسبندگی) نقشی مهم در حساسیت بسیار بالای آن‌ها به انتقال به وسیله جریان سطحی بود. ذرات رس نیز به دلیل جرم پایین حساسیتی نسبتاً زیاد به انتقال نشان دادند و انتقال آن‌ها مانند ذرات سیلت، به دلیل ماهیت ذاتی ذرات بود و تابعی از میزان شیب سطح نبود. با افزایش نسبت هدررفت ذرات سیلت و رس در رسوب، نسبت هدررفت ذرات شن (به جز شن بسیار درشت) به شدت کاهش یافت.

افزایش شدت باران داشتند. با این‌وجود نسبت هدررفت ذرات شن به دلیل داشتن جرم بالا در شدت‌های بالای باران کاهش یافت. وجود خاصیت چسبندگی در ذرات رس نیز یکی از عوامل مهم پیوند این ذرات به هم بود به طوری که با افزایش شدت باران، نسبت هدررفت این ذرات افزایش قابل توجهی پیدا نکرد. اگرچه شیب سطح نیز عامل مهمی در میزان هدررفت خاک و انتقال ذرات بود، در شیب‌های بالای ۲۰ درصد، تفاوتی چشمگیر در میزان تولید جریان سطحی مشاهده نشد. این درصد شیب، به عنوان کمترین میزان شیب سطح برای وقوع بیشترین میزان رواناب و در نتیجه هدررفت خاک در اثر باران

منابع

1. Akbari S. and Vaezi A.R. 2015. Investigating aggregates stability against raindrops impact in some soils of a semi-arid region, north west of Zanjan. 2015. *Water and Soil Science*, 25(2): 65-77. (in Persian)
2. Asadi H., Ghadiri H., Rose C.W. and Rouhipour H. 2007a. Interrill soil erosion processes and their interaction on low slopes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(5): 711-724 .
3. Asadi H., Ghadiri H., Rose C. W., Yu, B. and Hussein J. 2007b. An investigation of flow-driven soil erosion processes at low streampowers. *Journal of Hydrology*, 342(1): 134-142 .
4. Asadi H., Moussavi A., Ghadiri H. and Rose C. W. 2011. Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of sediment. *Journal of Hydrology*, 406(1): 73-81.
5. Basic F., Kistic I., Nestroy O., Mesic M. and Butorac A. 2002. Particle size distribution (texture) of eroded soil material. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 188(5): 311-322 .
6. Battany M. and Grismer M. 2000. Rainfall runoff and erosion in Napa Valley vineyards: effects of slope, cover and surface roughness. *Hydrological Processes*, 14(7): 1289-1301.
7. Biddoccu M., Ferraris S., Cavallo E., Opsi F., Previati M. and Canone D. 2013. Hillslope Vineyard rainfall-runoff measurements in relation to soil infiltration and water content. *Procedia Environmental Sciences*, 19: 351-360 .
8. Blake G. and Hartge K. 1986. Bulk density, clod method. *Methods of soil analysis: Part, 1* .
9. Bouyoucos G. J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal*, 54(5):464-465.
10. Chartier M., Rostagno C. and Videla L. 2013. Selective erosion of clay, organic carbon and total nitrogen in grazed semiarid rangelands of northeastern Patagonia, Argentina. *Journal of Arid Environments*, 88: 43-49.
11. Chamizo S., Cantón Y., Rodríguez-Caballero E., Domingo, F. and Escudero, A. 2012. Runoff at contrasting scales in a semiarid ecosystem: A complex balance between biological soil crust features and rainfall characteristics. *Journal of Hydrology*, 452:130-138.
12. Dahnke W. and Whitney D. 1988. Measurement of soil salinity. Recommended chemical soil test procedures for the North Central Region. *North Dakota Agric. Exp. Stn. Bull.* 32-34.
13. Edwards W. M. and Larson W. 1969. Infiltration of water into soils as influenced by surface seal development. *Amer Soc Agr Eng Trans Asae* .
14. Ekwue E. and Harrilal A. 2010. Effect of soil type, peat, slope, compaction effort and their interactions on infiltration, runoff and raindrop erosion of some Trinidadian soils. *Biosystems Engineering*, 105(1): 112-118.
15. Erskine W.D., Mahmoudzadeh A. and Myers C. 2002. Land use effects on sediment yields and soil loss rates in small basins of Triassic sandstone near Sydney, NSW, Australia. *Catena*, 49(4): 271-287.
16. Foster G. 1982. Modeling the erosion process. *Hydrologic modeling of small watersheds*, 297-380 .
17. Goh T., Arnaud R.S. and Mermut A. 1993. Aggregate stability to water. *Soil Sampling and Methods of Analysis*, 177-180.
18. González-Pelayo O., Andreu V., Gimeno-García E., Campo J. and Rubio J.L. 2010. Rainfall influence on plot-scale runoff and soil loss from repeated burning in a Mediterranean-shrub ecosystem, Valencia ,Spain. *Geomorphology*,

118(3): 444-452.

19. Gupta O.P. 2002. Water in relation to soils and plants. Agrobios, India. Pp: 31-34.
20. Hasanzadeh H., Vaezi A.R. and Mohammadi M.H. 2013. Runoff variations of different soils in plot scale under the same simulated rainfalls. Iranian J. of Soil and Water Research, 44(3): 245-254. (in Persian)
21. Huang J., Wu P. and Zhao X. 2013. Effects of rainfall intensity, underlying surface and slope gradient on soil infiltration under simulated rainfall experiments. Catena, 104: 93-102.
22. Issa O.M., Bissonnais Y.L., Planchon O., Favis-Mortlock D., Silvera N. and Wainwright J. 2006. Soil detachment and transport on field-and laboratory-scale interrill areas: erosion processes and the size-selectivity of eroded sediment. Earth Surface Processes and Landforms, 31(8): 929-939.
23. Jin K., Cornelis W.M., Gabriels D., Schiettecatte W., De Neve S., Lu J. and Jin J. 2008. Soil management effects on runoff and soil loss from field rainfall simulation. Catena, 75(2): 191-199.
24. Kemper W. and Rosenau R. 1986. Aggregate stability and size distribution.
25. Kim J.K., Onda, Y., Kim M.S. and Yang D.Y. 2014. *Plot-scale study of surface runoff on well-covered forest floors under different canopy species*. Quaternary International, 344:75-85.
26. Kinnell P. 2000. The effect of slope length on sediment concentrations associated with side-slope erosion. Soil Science Society of America Journal, 64(3): 1004-1008.
27. Leguédou S. and Bissonnais Y. L. 2004. Size fractions resulting from an aggregate stability test, interrill detachment and transport. Earth Surface Processes and Landforms, 29: 1117-1129.
28. Merten G.H., Araújo A.G., Biscaia R.C.M., Barbosa G.M.C. and Conte O. 2015. No-till surface runoff and soil losses in southern Brazil. Soil and Tillage Research, 152: 85-93.
29. Peng T. and Wang S.J. 2012. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest China. Catena 90: 53-62.
30. Pérez-Latorre F. J., de Castro L. and Delgado A. 2010. A comparison of two variable intensity rainfall simulators for runoff studies. Soil and Tillage Research, 107(1): 11-16.
31. Quinton J.N., Catt J.A. and Hess T.M. 2001. The selective removal of phosphorus from soil. Journal of Environmental Quality, 30(2): 538-545.
32. **Rafahi** H.Gh. 2015. *Soil Erosion* by Water & Conservation. 7th edition. Tehran University Publication. 674 pp, (in Persian)
33. Rongsheng F. and Zhanbin L. 1993. Rainsplash and sediment transport model on the slope. Journal of Hydraulic Engineering, 6: 24-29.
34. Rubio J. L., Forteza J., Andreu V. and Cerni R. 1997. Soil profile characteristics influencing runoff and soil erosion after forest fire: a case study (Valencia, Spain). Soil Technology, 11(1): 67-78.
35. Santos F.L., Reis J.L., Martins O. C., Castanheira N.L. and Serralheiro R.P. 2003. Comparative assessment of infiltration, runoff and erosion of sprinkler irrigated soils. Biosystems Engineering, 86(3): 355-364.
36. Shi Z., Fang N., Wu F., Wang L., Yue B. and Wu G. 2012. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes. Journal of Hydrology, 454: 123-130.
37. Tan K. H. 2005. Soil sampling, preparation, and analysis: CRC press. 75-86.
38. Thomas G. 1996. Soil pH and soil acidity. Methods of soil analysis. Part, 3: 475-490.
39. Touma J., Raclot D., Al-Ali Y., Zante P., Hamrouni H. and Dridi B. 2011. In situ determination of the soil surface crust hydraulic resistance. Journal of Hydrology, 403(3): 253-260.
40. Tripathi R. P. and Ogbazghi W. 2016. Watershed management to enhance rainwater conservation and crop yields in semiarid environments-A case study at Hamelmalo Agricultural College, Anseba region of Eritera. Agricultural water Management 168: 1-10.
41. USDA S. 1972. Soil survey laboratory methods and procedures for collecting soil samples. Soil survey Investigations Rep (1).
42. Vaezi A.R. 2014. Modeling Runoff from Semi-Arid Agricultural Lands in Northwest Iran. Pedosphere, 24(5): 595-604.
43. Vaezi A.L., Bahrami H., Sadeghi H., and Mahdian M. 2008. Modeling the USLE K-factor for calcareous soils in northwestern Iran. Geomorphology 97 (3): 414-423.
44. Vaezi A.L., Hasanzadeh H. and Mohammadi M.H. 2013. Runoff variations in the soil textures samples in the plot

- scale under the same rainfall events. Iranian Journal of Soil and Water Research. 44(3): 243-253. (In Persian)
45. Walkly A. and Black I. 1982. An examination of digestion methods for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic and titration. Soil Science Society of America Journal, 37(2): 29-38.
46. Walling D. 1988. Erosion and sediment yield research some recent perspectives. Journal of Hydrology, 100(1): 113-141.
47. Williams J., Rose C., Thorne P., Coates L., West J., Harcastle P. and Wilson D. 1996. Observed suspended sediments in storm conditions. Coastal Engineering Proceedings, 1(25).
48. Wischmeier W. H., & Smith D. D. 1978. Predicting rainfall erosion losses-A guide to conservation planning. Predicting rainfall erosion losses-A guide to conservation planning.
49. Zhang G.-H., Guo-Bin L., Guo-Liang W. and Yu-Xia W. 2011. Effects of vegetation cover and rainfall intensity on sediment-bound nutrient loss, size composition and volume fractal dimension of sediment particles. Pedosphere, 21(5): 676-684.
50. Zhao L., Liang X. and Wu F. 2014. Soil surface roughness change and its effect on runoff and erosion on the Loess Plateau of China. Journal of Arid Land, 6(4): 400-409.
51. Zhao X., 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.

Particle Size Distribution of Surface-Eroded Soil in Different Rainfall Intensities and Slope Gradients

A.R. Vaezi^{1*} - M. Ebadi²

Received: 30-12-2015

Accepted: 11-04-2016

Introduction: Soil water erosion on the slope lands involves detachment, transport and deposition of soil materials due to erosive forces of raindrops and surface runoff. Surface runoff can produce relatively high soil loss and is often the dominant hillslope erosion process. The rate of surface runoff which controls surface erosion on the uniform areas in the hillslopes, is dependent on rainfall intensity and slope steepness. In various studies, the relationships between rainfall characteristics and surface runoff were well known. Many studies have been performed on the relationship between runoff and rainfall characteristics and soil loss. The effects of slope steepness on the surface runoff and soil loss were also investigated by many researchers. In a few studies, the transportation of soil particles has been studied. For examples, some studies showed that the soil particles have different susceptibility to transport by surface flow. However, limited information is available on the effects of rainfall intensity and slope steepness on the transportability of soil particles by surface runoff in the semi-arid areas. Therefore, the objective of this study was to investigate the effects of rainfall intensity and slope steepness on the transport rate of soil particles by surface runoff in a medium soil texture in semi-arid region.

Materials and Methods: A clay loam soil with similar particle size distribution (33.15% sand, 33.22% silt and 33.63% clay) was provided to study the detachability of soil particles by surface runoff. Soil loss and particle size distribution of eroded material were determined in the soil under zero, 10%, 20%, 30% and 40% slope steepness using simulated rainfall with 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 and 90 mm h⁻¹ in intensity. Soil samples were filled to 32 cm × 50 cm flumes with 7 cm depth and exposed to simulated rainfalls. Surface runoff, surface soil erosion and particle size distribution (PSD) of eroded material were determined in the slopes under simulated rainfalls. A total of 135 trials were carried out on 45 soil samples using the factorial completely randomized

design with three replications. Data of surface soil erosion and transportation of soil particles were compared using the Duncan's test among the rainfall intensities and slope steepness.

Results and Discussion: No surface runoff and surface soil erosion were observed in 10 mm h⁻¹ rainfall intensity. Rainfall intensity of 20 mm h⁻¹ appeared to be the threshold rainfall intensity to make surface runoff and surface soil erosion. Based on the results, surface runoff, surface erosion and kind of eroded soil particles were significantly affected by rainfall intensity ($P < 0.001$). Significant relationships were found between rainfall intensity and surface runoff ($R^2 = 0.98$) and surface erosion ($R^2 = 0.99$). Surface runoff increased strongly with increasing rainfall intensity. Increases in the rainfall intensity caused more runoff production as well as more detachment of soil surface particles. Surface runoff and surface erosion were affected strongly by the slope steepness. With an increase in the slope steepness, more surface runoff was produced and in consequence, surface soil erosion was considerably increased. Significant differences were found in the PSD of eroded material among the different rainfall intensities ($P < 0.001$) and the slope steepness ($P < 0.001$). Silt showed to be the sensitive soil particles to surface erosion in rainfall intensities and slope steepness. Silt included about 66% and 74% of eroded soil particles in the rainfall intensities and the slope steepness, respectively. Sand fractions (very coarse sand, coarse sand, medium sand, fine sand, very fine sand) were the resistant soil particles to surface erosion in the rainfall intensities and the surface slopes. In higher rainfall intensities and slope steepness, more surface soil erosion was produced which was associated with the more transport of silt.

Conclusion: Rainfall intensity was the more important factor than the slope steepness in the soil loss and transportation rate of soil particles by surface runoff. Silt was the most susceptible soil particle to erosion by surface runoff in the rainfall intensities and the slope steepness. The transportation of very coarse sand and clay didn't appear significant differences for both the rainfall intensities and the slope steepness. Protection of soil surface from raindrop impact is essential for prevention of runoff and soil loss in steep slopes especially for intensive rainfalls.

1 and 2- Associate Professor and Former M.Sc. students, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Zanjan (*-Corresponding Author Email: vaezi.alireza@znu.ac.ir)

Keywords: Simulated rainfall, Runoff, Soil primary particles, Transportability