

تأثیر پوشش سنگریزه سطحی و شیب بر شدت فرسایش پاشمانی و بین‌شیاری در دو خاک مختلف

اقدس ستوده‌نیا^۱، مجید محمودآبادی^{۲*} و مجید فکری^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ^۲ دانشیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان و
استاد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۳۰

چکیده

با توجه به ضعف پوشش گیاهی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، پوشش سنگریزه سطحی از اهمیت ویژه‌ای در مهار فرسایش خاک برخوردار است. پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر پوشش سنگریزه سطحی و شیب بر شدت فرسایش پاشمانی و بین‌شیاری در دو نمونه خاک مختلف انجام شد. به این منظور، بر روی دو خاک ماسه‌ای و زراعی با توزیع اندازه ذرات متفاوت، در چهار شیب ۰/۵، دو، پنج و ۱۰ درصد و پنج سطح سنگریزه سطحی شامل صفر، پنج، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ درصد، هر یک در سه تکرار آزمایش شبیه‌سازی باران انجام شد. با ایجاد باران با شدت ثابت ۳۵ میلی‌متر در ساعت و مدت ۳۵ دقیقه در یک سینی به ابعاد ۶۰ در ۶۰ سانتی‌متر، شدت فرسایش بین‌شیاری و نیز پاشمان ذرات به‌سمت پایین‌دست و بالادست و نیز متوسط پاشمان کل اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که با افزایش پوشش سنگریزه سطحی در هر دو خاک، شدت پاشمان پایین‌دست و بالادست و همچنین، متوسط پاشمان کل به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد، البته شدت پاشمان پایین‌دست بیشتر از پاشمان بالادست بود. با افزایش درصد پوشش سنگریزه از صفر (شاهد) به پنج، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ درصد، متوسط شدت پاشمان به‌سمت پایین‌دست در نمونه خاک ماسه‌ای به ترتیب ۱۲/۹، ۲۵/۳، ۳۵/۷ و ۴۷/۷ درصد و در نمونه خاک زراعی به ترتیب ۱۳/۹، ۲۵/۴، ۳۷/۰ و ۴۹/۴ درصد کاهش یافت. با افزایش درصد پوشش سنگریزه از صفر درصد (شاهد) به پنج، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ درصد، متوسط شدت فرسایش بین‌شیاری در نمونه خاک ماسه‌ای به ترتیب ۱۳/۵، ۲۶/۴، ۳۳/۳ و ۴۶/۴ درصد و در نمونه خاک زراعی به ترتیب ۱۲/۹، ۳۰/۷، ۳۷/۳ و ۴۵/۹ درصد کاهش یافت. همچنین، با افزایش شیب در هر دو خاک، شدت فرسایش پاشمانی و بین‌شیاری به‌طور غیر خطی افزایش پیدا کرد. شدت پاشمان و نیز فرسایش بین‌شیاری در خاک ماسه‌ای به دلیل چسبندگی کمتر و جدایش‌پذیری بیشتر ذرات آن، بیشتر از نمونه خاک زراعی بود. یافته‌های این پژوهش نشان داد که وجود پوشش سنگریزه در سطح خاک می‌تواند شدت فرسایش پاشمانی و بین‌شیاری را به‌طور معنی‌داری کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی: جریان ورقه‌ای، خاک ماسه‌ای و زراعی، شبیه‌سازی باران، فرسایش خاک، مناطق خشک و نیمه-خشک

* مسئول مکاتبات: mahmoodabadi@uk.ac.ir

مقدمه

انسان برای ادامه حیات خود به مواد غذایی نیاز دارد که به واسطه وجود آب و خاک به دست می‌آید. نابودی و تخریب خاک در اثر باران و رواناب فرساینده یکی از جدی‌ترین مشکلات زیست‌محیطی عصر حاضر است (Zhao همکاران، ۲۰۱۳). همچنین، فرسایش خاک معضل مهمی برای کشاورزی در نواحی خشک و نیمه‌خشک است که به علت اثرات دراز مدتی که دارد، حاصلخیزی خاک و کشاورزی پایدار را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Martinez-Mena و همکاران، ۲۰۰۲). این پدیده همچنین، با رسوب‌گذاری، آلودگی و تشدید سیلاب‌ها باعث وارد آمدن صدمات محیطی می‌شود (Deng و همکاران، ۲۰۰۸؛ Kuhn و همکاران، ۲۰۱۲). امروزه فرسایش خاک از چالش‌های اراضی کشاورزی و نیز آبخیزهای کشور به حساب می‌آید که می‌توان به‌عنوان یکی از موانع مهم دستیابی به توسعه پایدار کشاورزی و منابع طبیعی از آن نام برد. در مقیاس جهانی، فرسایش آبی به شکل‌های مختلف نظیر انواع فرسایش پاشمانی، ورقه‌ای، بین‌شیاری، شیاری، خندقی و کناره‌ای رخ می‌دهد (Lal و Blanco، ۲۰۰۸). یکی از انواع مهم فرسایش در اراضی کشاورزی، فرسایش بین‌شیاری است که شامل جدا شدن ذرات خاک به وسیله برخورد قطره‌های باران و انتقال این ذرات در اثر فرآیند پاشمان و جریان ورقه-ای کم‌عمق می‌باشد (Liu و همکاران، ۲۰۰۶؛ Mahmoodabadi و Cerdà، ۲۰۱۳).

فرسایش ناشی از باران به‌عنوان اولین مرحله در فرسایش آبی شناخته می‌شود و از این‌رو، نقش آن در فرسایش پاشمانی و بین‌شیاری حائز اهمیت است (Brodowski و همکاران، ۲۰۱۳؛ Mahmoodabadi و Arjmand Sajjadi، ۲۰۱۶). در نتیجه، این نوع فرسایش، تخریب خاک سطحی و پاشمان ذرات از سطح خاک به وسیله قطرات باران رخ می‌دهد (Kinnell، ۲۰۰۵). خاک‌های مختلف، حساسیت‌های متفاوتی در برابر پاشمان دارند به‌نحوی که با افزایش مقاومت خاک سطحی، شدت پاشمان کاهش می‌یابد (Van Dijk و همکاران، ۲۰۰۲). علاوه بر این، فرسایش بین‌شیاری یکی از انواع رایج فرسایش در اراضی زراعی و کشاورزی است (Liu و همکاران،

۲۰۰۶) که حاصل فرسایش پاشمانی و ورقه‌ای است. شدت بارندگی، شیب زمین، شدت و عمق جریان و البته نوع خاک به همراه اثرات متقابل بین آن‌ها، مهمترین عوامل موثر بر فرسایش بین‌شیاری هستند (Asadi و همکاران، ۲۰۰۷؛ Kuhn و همکاران، ۲۰۱۲).

شیب یکی از عوامل مهم و مؤثر بر شدت فرسایش خاک است (Defersha و Melesse، ۲۰۱۲؛ Fu و همکاران، ۲۰۱۱) که افزایش آن تشدید فرسایش را در پی دارد (Fattet و همکاران، ۲۰۱۱؛ Arjmand Sajjadi و Mahmoodabadi، ۲۰۱۵). در پژوهشی که توسط Defersha و Melesse (۲۰۱۲) انجام شد مشخص شد که از بین سه عامل شیب، شدت باران و رطوبت اولیه بر روی شدت تولید رواناب و رسوب، تأثیر شیب بیش از دو عامل دیگر است. همچنین، مقادیر غلظت رسوب، تا حد زیادی به شیب زمین وابسته است به‌نحوی که متوسط غلظت رسوب در شیب‌های تندتر، بیشتر است (Shi و همکاران، ۲۰۱۲). در مقابل، نتایج Janeau و همکاران (۲۰۰۳) در آزمایش‌های شبیه‌سازی باران در شرایط صحرائی نشان داد که با افزایش شیب، شدت جدا شدن ذرات و غلظت رسوب کاهش پیدا می‌کند که دلیل این موضوع به تشکیل و توسعه سله سطحی و عمق لایه آب موجود در سطح، مرتبط دانسته شد.

علاوه بر شیب، زبری ناشی از وجود سنگریزه در سطح زمین نیز یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر شدت فرسایش خاک به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه-خشک که پوشش گیاهی ضعیفی دارند، است. سنگریزه سطحی به‌عنوان عامل زبری سطح می‌تواند تولید رواناب و رسوب را تحت تأثیر قرار دهد. پوشش سنگریزه سطحی در کنترل فرسایش خاک، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که پوشش گیاهی فقیر است، اهمیت زیادی دارد (Mirzaee و همکاران، ۲۰۱۲). نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که افزایش درصد پوشش سنگریزه سطحی باعث کاهش حجم رواناب و تولید رسوب می‌شود (Grant و Struchtemeyer، ۱۹۹۵؛ Tailong و همکاران، ۲۰۱۰). سنگریزه سطحی از طریق کاهش انسداد سطحی (Martinez-Zavala و همکاران، ۲۰۱۰)،

Rouhipour, ۲۰۱۱). در این صورت، می‌توان اثر فرایندهای ناشی از جریان رواناب را در مقایسه با باران به حداقل رساند و در این شرایط، تمام یا عمده فرسایش در اثر باران رخ می‌دهد (Rouhipour و همکاران، ۲۰۰۴). در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل ضعف پوشش گیاهی، پوشش سنگریزه سطحی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Li, ۲۰۰۳). همچنین، پژوهش‌های اندکی در زمینه تأثیر سنگریزه سطحی بر شدت فرسایش بین‌شیاری و پاشمانی به‌طور توأم انجام شده است. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر درصدهای مختلف پوشش سنگریزه سطحی و همچنین، شیب بر شدت فرسایش پاشمانی و بین‌شیاری در دو نمونه خاک زراعی با ویژگی‌های متفاوت و با استفاده از شبیه‌سازی باران در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی انجام شد.

مواد و روش‌ها

شبیه‌ساز باران: در این پژوهش، از یک دستگاه شبیه‌ساز باران متعلق به آزمایشگاه فرسایش و حفاظت خاک دانشگاه شهید باهنر کرمان استفاده شد. این دستگاه، از نوع قطره‌ساز بوده که در آن از قطره‌چکان‌های قابل تنظیم مورد استفاده در آبیاری قطره‌ای به‌کار رفته است (Mahmoodabadi و Cerdà, ۲۰۱۳). در این سیستم، مخزن آب گنجایش ۱۰۰ لیتر دارد که به‌منظور حفظ فشار آب و شدت بارش، از طریق شناور سطح آب ثابت نگه داشته می‌شود. مخزن آب در ارتفاع یک متری بالای صفحه بارش قرار دارد. صفحه بارش به ابعاد یک متر در یک متر متشکل از شبکه‌ای از لوله‌های پی‌وی سی است که بر روی آن ۳۴۸ قطره‌چکان به فواصل چهار سانتی‌متر از یکدیگر نصب شده است. کل سیستم بارش در یک قالب فلزی و روی پایه‌هایی با ارتفاع قابل تنظیم در ارتفاع دو متری قرار دارد. پایه‌های دستگاه، کشویی ساخته شده تا در شیب‌های مختلف بتوان صفحه بارش را به‌طور افقی ثابت نگه داشت. به‌منظور اندازه‌گیری فرسایش بین‌شیاری، از تشتکی به ابعاد ۶۰ در ۶۰ و عمق ۱۰ سانتی‌متر استفاده شد. این تشتک قابلیت قرارگیری در شیب‌های مختلف را دارد و در انتهای آن یک قیف به‌منظور جمع‌آوری رواناب حاوی رسوب تعبیه شده

افزایش زبری سطح و در نتیجه کاهش سرعت رواناب (Mandal و همکاران، ۲۰۰۵؛ Tailong و همکاران، ۲۰۱۰) و تأخیر در شروع رواناب (Martinez-Zavala و همکاران، ۲۰۱۰) و ایجاد فرصت نفوذ نقش مهمی در کاهش تلفات خاک دارد. در پژوهشی که توسط Rieke-Zapp و همکاران (۲۰۰۷) بر روی تأثیر درصدهای مختلف پوشش سنگریزه بین صفر تا ۴۰ درصد بر مقدار تلفات خاک در خاک لوم سیلتی با استفاده از فلوم آزمایشگاهی انجام شد، مشخص شد که با افزایش پوشش سنگریزه به دلیل استهلاک در انرژی رواناب مقدار کل هدررفت خاک کاهش می‌یابد. همچنین، Tailong و همکاران (۲۰۱۰) در مطالعه خود در سطح مزرعه با استفاده از شبیه‌سازی رواناب در خاک لوم دریافتند که با افزایش پوشش سنگریزه سطحی از صفر به ۲۰/۸ درصد، میزان هدررفت خاک ۷۸ درصد کاهش یافت. Mirzaee و همکاران (۲۰۱۲) نیز با بررسی تأثیر پوشش سنگریزه سطحی بر فرسایش خاک با استفاده از شبیه‌سازی رواناب دریافتند که با افزایش سنگریزه از صفر به ۳۰ درصد به دلیل کاهش سرعت رواناب و جلوگیری از تمرکز جریان، میزان هدررفت خاک ۸۰/۱ درصد کاهش پیدا کرد.

شبیه‌سازی باران به‌عنوان ابزار مناسبی برای مطالعه اثرات عامل فرساینده، حساسیت سطح فرسایش‌پذیر و شرایط محیطی مختلف بر فرایندهای فرسایش خاک و انتقال رسوب در مقیاس‌های مختلف شناخته شده است (Jomaa و همکاران، ۲۰۱۰؛ Mahmoudabadi و Rouhipour, ۲۰۱۱). باران تولید شده به‌وسیله دستگاه شبیه‌ساز باران، از نظر مشخصات بارش نظیر شدت و مدت بارندگی قابل کنترل است. در این زمینه، شباهت توزیع اندازه قطرات، سرعت سقوط، شدت و انرژی جنبشی بارش به باران‌های طبیعی از عوامل کلیدی در طراحی شبیه‌سازهای باران است (Grismer, ۲۰۱۲؛ Mahmoudabadi و Cerdà, ۲۰۱۳). برای اندازه‌گیری فرسایش ناشی از باران و حذف فرایندهای ناشی از رواناب، از سینی پاشمان و یا تشتک با سطح کوچک استفاده می‌شود، زیرا در چنین شرایطی، جریان رواناب در جدا نمودن ذرات نقشی ندارد (Mahmoodabadi و

چهار طرف و مجاور تشتک بدون هیچ فاصله‌ای قرار داده می‌شد. شکل ۱ نمایی از دستگاه شبیه‌ساز باران، تشتک مورد استفاده برای اندازه‌گیری فرسایش بین-شیاری و همچنین، سینی‌های مجاور برای اندازه‌گیری شدت پاشمان در جهات مختلف را نشان می‌دهد.

است. در کف تشتک یک صفحه مشبک به‌منظور اشباع نمونه خاک و تخلیه زهکش نصب شد. همچنین، برای اندازه‌گیری شدت پاشمان ذرات در جهات مختلف طی هر رخداد باران، چهار سینی با ابعاد ۳۰ در ۶۰ سانتی‌متر و از جنس آهن گالوانیزه در



شکل ۱- نمایی از دستگاه شبیه‌ساز باران و تشتک مورد استفاده در آزمایش‌های شبیه‌سازی فرسایش پاشمانی و بین‌شیاری

سطح سنگریزه سطحی شامل صفر، پنج، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ درصد اعمال شد. با انتخاب این شیب‌ها، امکان اندازه‌گیری فرسایش بین‌شیاری بدون تشکیل شیاری فراهم می‌شود (Mahmoodabadi و Cerdà, ۲۰۱۳). در مجموع، تعداد ۱۲۰ آزمایش شبیه‌سازی باران انجام شد. بعد از تهیه نمونه‌های خاک و خشک شدن در هوا، از الک دو میلی‌متر عبور داده شد. سپس برخی ویژگی‌های فیزیکی شامل بافت به روش هیدرومتری، جرم مخصوص ظاهری به روش استوانه و توزیع اندازه ذرات ثانویه با استفاده از شیکر و سری الک با اندازه‌های یک، ۰/۵، ۰/۲۵، ۰/۱۲۵، ۰/۰۶۳ و ۰/۰۳۷ میلی‌متر در حالت تر و پس از تصحیح شن تعیین شد (Page و همکاران، ۱۹۹۲). همچنین، برخی ویژگی-

انجام آزمایش‌ها: آزمایش‌ها به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. عامل اول خاک، عامل دوم شیب و عامل سوم پوشش سنگریزه سطحی بود. در ابتدا دو نمونه خاک مختلف با اسامی خاک زراعی و خاک ماسه‌ای هر دو از کاربری زراعی انتخاب و از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری نمونه‌برداری شد. منطقه نمونه‌برداری دارای پوشش گیاهی ضعیف بوده و به‌دلیل کمبود ماده آلی، خاک‌های مورد مطالعه به نسبت در برابر فرسایش خاک حساس هستند. معیار انتخاب نمونه‌های خاک، تفاوت در توزیع اندازه ذرات بود که به‌عنوان یکی از مهمترین ویژگی‌های موثر بر شدت فرسایش خاک مطرح است. همچنین، چهار سطح شیب شامل ۰/۵، دو، پنج و ۱۰ درصد و پنج

سینی مستقر در مجاورت تشتک جمع‌آوری شد. جرم ذرات موجود در هر سینی پس از خشک نمودن در آون به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی-گراد اندازه‌گیری شد. بر این اساس، شدت پاشمان ذرات به سمت پایین‌دست و بالادست و نیز متوسط شدت پاشمان کل برای هر رخداد محاسبه شد (Mahmoodabadi و Arjmand Sajjadi, ۲۰۱۶).

به‌منظور انجام تجزیه واریانس، داده‌های حاصل با استفاده از نرم‌افزار SPSS مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. مقایسه میانگین از طریق آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد و رسم شکل‌ها با نرم‌افزار Excel انجام شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های نمونه‌های خاک: جدول ۱، برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک مورد مطالعه را نشان می‌دهد. با توجه به درصد ذرات اولیه و طبق مثلث بافت خاک، نمونه خاک زراعی در کلاس بافت لوم رسی و نمونه خاک ماسه‌ای در کلاس بافت لوم رسی شنی قرار می‌گیرد. در هر دو نمونه خاک، میزان pH در محدوده خنثی و هدایت الکتریکی (EC) بیشتر از چهار دسی‌زیمنس بر متر بوده و لذا هر دو نمونه خاک، شور محسوب می‌شود. میزان کربن آلی خاک زراعی تقریباً سه برابر خاک ماسه‌ای و در هر دو نمونه خاک کمتر از یک درصد و مقدار کربنات کلسیم معادل قابل توجه است.

های شیمیایی شامل قابلیت هدایت الکتریکی (EC) عصاره اشباع با استفاده از ECسنج، pH گل اشباع با دستگاه pHسنج، کربن آلی به روش Walkley و Black (۱۹۳۴) و کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون اندازه‌گیری شد (Pansu و Gautheyrou, ۲۰۰۶).

به‌منظور انجام آزمایش‌ها، نمونه خاک به تشتک منتقل شد و پس از تسطیح کامل، درصدهای مورد نظر پوشش سنگریزه، به‌طور تصادفی بر روی سطح خاک قرار داده شد. در این پژوهش از سنگریزه با قطر متوسط دو سانتی‌متر استفاده شد. در ادامه، نمونه‌ها از زیر به‌طور تدریجی اشباع و بعد از گذشت ۲۴ ساعت و نگهداری نمونه‌ها در شرایط اشباع، آب حاصل از زهکش از زیر تخلیه شد. پس از قطع زهکش، تشتک در شیب مورد نظر تنظیم و باران با شدت ثابت ۳۵ میلی‌متر در ساعت و مدت ۳۵ دقیقه ایجاد شد. طی هر رخداد و در زمان‌های یک، دو، سه، پنج، هفت، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ دقیقه نمونه رواناب حاوی رسوب از خروجی تشتک جمع‌آوری شد. جرم رسوب موجود در جریان، پس از خشک نمودن نمونه‌ها در آون به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی-گراد، اندازه‌گیری شد. بر اساس جرم رسوب و سطح در معرض فرسایش و بازه زمانی هر رخداد، شدت فرسایش بین‌شیاری در شرایط پایدار محاسبه شد. به‌منظور اندازه‌گیری شدت پاشمان، پس از پایان هر آزمایش، ذرات حاصل از پرتاب ذرات به داخل چهار

جدول ۱- مقادیر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک‌های مورد مطالعه

ویژگی	واحد	نمونه خاک ماسه‌ای	نمونه خاک زراعی
رس	%	۲۴/۰	۳۴/۴
سیلت	%	۴/۴	۳۲/۰
شن	%	۷۱/۶	۳۳/۶
جرم مخصوص ظاهری	g cm ⁻³	۱/۷۲	۱/۵۸
میانگین قطر خاکدانه‌ها (در حالت تر)	mm	۰/۰۸	۰/۱۶
EC	dS m ⁻¹	۴/۴۵	۴/۱۹
pH	-	۸/۳۴	۸/۴۵
کربن آلی	%	۰/۲۷	۰/۸۲
کربنات کلسیم معادل	%	۱۹	۲۱

اثر متقابل دوگانه خاک و پوشش سنگریزه سطحی بر شدت پاشمان به سمت پایین‌دست و بالادست ($p < 0/01$) و نیز بر متوسط شدت پاشمان کل ($p < 0/001$) معنی‌دار شد. اثر متقابل دوگانه شیب و پوشش سنگریزه سطحی ($p < 0/05$) و اثر متقابل سه-گانه عوامل ($p < 0/01$) بر متوسط شدت پاشمان کل معنی‌دار شد. در ادامه، نتایج مقایسه میانگین شدت پاشمان به سمت پایین‌دست، بالادست و متوسط شدت پاشمان کل با اولویت اثرات متقابل ارائه می‌شود.

فرسایش پاشمانی: نتایج تجزیه واریانس‌های مربوط به تاثیر سه عامل خاک، درصد شیب و درصد پوشش سنگریزه سطحی بر شدت پاشمان در سه حالت پاشمان به سمت پایین‌دست، پاشمان به سمت بالادست و متوسط شدت پاشمان کل در جدول ۲ ارائه شده است. هر سه عامل خاک، شیب و پوشش سنگریزه سطحی به صورت جداگانه دارای اثر معنی‌دار ($p < 0/001$) بر شدت پاشمان به سمت پایین‌دست و بالادست و متوسط شدت پاشمان کل بود. همچنین،

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس عوامل موثر بر شدت پاشمان به سمت پایین‌دست و بالادست و متوسط شدت پاشمان کل (مقادیر میانگین مربعات MS است)

منابع تغییرات	درجه آزادی	شدت پاشمان به سمت پایین‌دست	شدت پاشمان به سمت بالادست	متوسط شدت پاشمان کل
خاک (A)	۱	۰/۰۰۱***	۰/۰۰۱***	۰/۰۰۱***
شیب (B)	۳	۰/۰۰۲***	۰/۰۰۲***	۰/۰۰۱***
پوشش سنگریزه سطحی (C)	۴	۰/۰۰۲***	۰/۰۰۲***	۰/۰۰۲***
A×B	۳	۰/۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۰۱ ^{ns}
A×C	۴	۰/۰۰۰۱**	۰/۰۰۰۱**	۰/۰۰۰۱***
B×C	۱۲	۰/۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۰۱*
A×B×C	۱۲	۰/۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۰۱**
خطا	۸۰	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱
ضریب تغییرات (درصد)	-	۴/۳۶	۴/۹۷	۳/۳۵

*** معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۱ درصد، ** معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد، * معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد و ^{ns} عدم معنی‌داری

نمونه خاک ماسه‌ای و حساسیت بیشتر آن در برابر جدا شدن مربوط است. مقدار متوسط شدت پاشمان پایین‌دست در خاک ماسه‌ای ۰/۰۲۳ گرم بر مترمربع در ثانیه و در خاک زراعی ۰/۰۱۹ گرم بر مترمربع در ثانیه است (شکل ۴). با افزایش درصد پوشش سنگریزه سطحی در هر دو نمونه خاک مورد مطالعه، شدت پاشمان به سمت بالادست نیز به طور معنی‌دار و غیر خطی ($p < 0/05$) کاهش پیدا کرده است (شکل ۵). با افزایش درصد پوشش سنگریزه از صفر درصد (شاهد) به پنج، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ درصد، متوسط شدت پاشمان بالادست در خاک ماسه‌ای به ترتیب ۱۵/۳، ۲۷/۶، ۴۰/۰ و ۵۲/۶ درصد و در خاک زراعی به ترتیب ۲۲/۰، ۳۴/۲، ۴۷/۴ و ۵۵/۶ درصد کاهش نشان می‌دهد. روند تغییرات شدت پاشمان طوری است که میزان کاهش شدت پاشمان در درصدهای کمتر پوشش سنگریزه سطحی بیشتر از درصدهای بیشتر پوشش سنگریزه

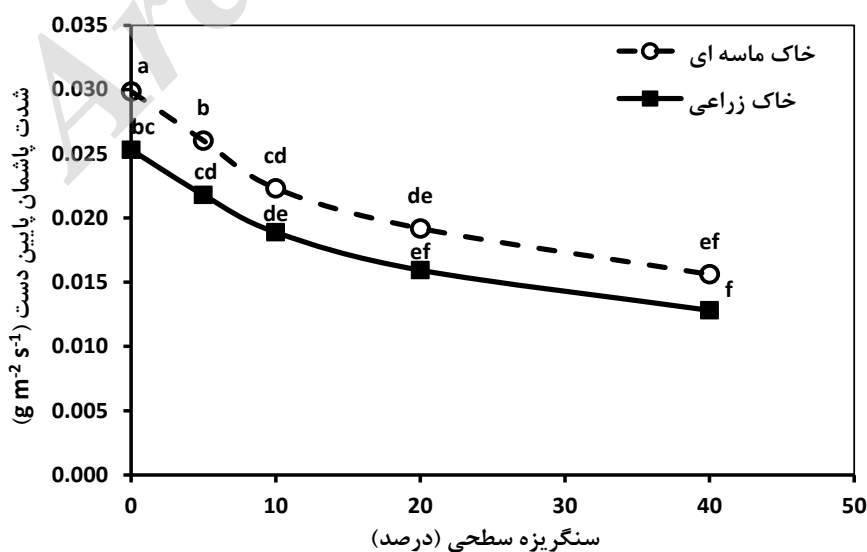
شکل‌های ۲ و ۳ اثر متقابل درصدهای مختلف پوشش سنگریزه سطحی در دو نمونه خاک مورد مطالعه را به ترتیب بر شدت پاشمان پایین‌دست و بالادست نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، با افزایش پوشش سنگریزه سطحی در هر دو نمونه خاک مورد مطالعه، شدت پاشمان به سمت پایین‌دست به طور معنی‌دار و البته غیر خطی ($p < 0/05$) کاهش پیدا می‌کند. با افزایش درصد پوشش سنگریزه از صفر درصد (به عنوان شاهد) به پنج، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ درصد، متوسط شدت پاشمان به سمت پایین‌دست در نمونه خاک ماسه‌ای به ترتیب ۱۲/۹، ۲۵/۳، ۳۵/۷ و ۴۷/۷ درصد و در خاک زراعی به ترتیب ۱۳/۹، ۲۵/۴، ۳۷/۰ و ۴۹/۴ درصد کاهش نشان می‌دهد. همچنین، شدت پاشمان پایین‌دست در نمونه خاک ماسه‌ای به طور معنی‌داری ($p < 0/05$) بیشتر از نمونه خاک زراعی است که به چسبندگی کمتر ذرات

تغییر می‌کند. این در حالی است که متوسط شدت پاشمان به سمت بالادست در نمونه خاک ماسه‌ای از ۰/۰۱۳ گرم بر مترمربع در ثانیه (۴۰ درصد سنگریزه) تا ۰/۰۲۷ گرم بر مترمربع در ثانیه (سطح بدون پوشش سنگریزه) و در نمونه خاک زراعی از ۰/۰۱۰ تا ۰/۰۲۳ گرم بر مترمربع در ثانیه (۴۰ درصد سنگریزه) نوسان دارد. به دلیل چسبندگی کمتر و جدایش پذیری بیشتر ذرات در نمونه خاک ماسه‌ای نسبت به خاک زراعی، شدت پاشمان ذرات در خاک ماسه‌ای بیشتر از خاک زراعی است.

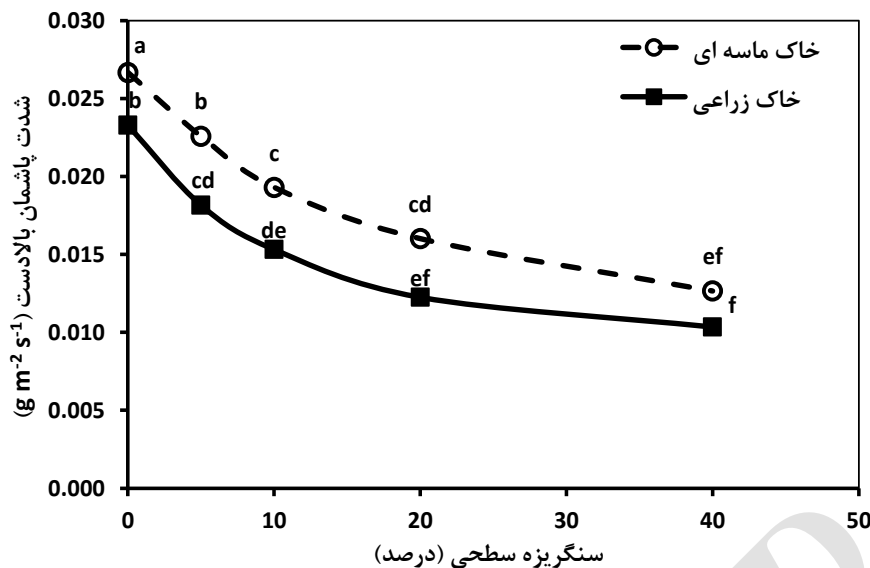
شکل ۴، تأثیر درصدهای مختلف شیب را بر متوسط شدت پاشمان به سمت پایین دست و بالادست نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، شدت پاشمان به سمت پایین دست به طور معنی داری بیشتر از پاشمان به سمت بالادست است. همچنین، با افزایش درصد شیب، شدت پاشمان به سمت پایین دست و بالادست افزایش معنی دار و غیر خطی ($p < 0.05$) می‌یابد. علاوه بر این، در شیب‌های کمتر از دو درصد در مقایسه با شیب‌های تندتر از آن، میزان افزایش شدت پاشمان بیشتر است. با افزایش شیب از ۰/۵ درصد به دو، پنج و ۱۰ درصد، متوسط شدت پاشمان به سمت پایین دست ۳۵/۴، ۵۲/۲ و ۷۰/۳ درصد و متوسط شدت پاشمان به سمت بالادست به ترتیب ۳۷/۳، ۵۹/۱ و ۸۱/۲ درصد افزایش نشان می‌دهد.

این موضوع اهمیت پوشش سنگریزه سطحی حتی در مقادیر کم را در مهار فرسایش پاشمانی نشان می‌دهد. همچنین، متوسط شدت پاشمان بالادست در خاک ماسه‌ای (۰/۰۱۹ گرم بر مترمربع در ثانیه) به طور معنی داری ($p < 0.05$) بیشتر از خاک زراعی (۰/۰۱۶ گرم بر مترمربع در ثانیه) بود (شکل ۵). وجود سنگریزه در سطح خاک، مانع از برخورد مستقیم قطرات باران به سطح شده و در نتیجه شدت پاشمان کاهش پیدا می‌کند. این موضوع در مناطق خشک و نیمه خشک که پوشش گیاهی ضعیفی دارند، اهمیت ویژه‌ای دارد (Li, ۲۰۰۳; Arjmand Sajjadi و Mahmoodabadi, ۲۰۱۵).

مقایسه شدت پاشمان به سمت پایین دست و بالادست (شکل‌های ۲ و ۳) نشان می‌دهد که شدت پاشمان به سمت پایین دست بیشتر از شدت پاشمان به سمت بالادست است. متوسط شدت پاشمان به سمت پایین دست ۰/۰۲۱ گرم بر مترمربع در ثانیه و متوسط شدت پاشمان به سمت بالادست ۰/۰۱۸ گرم بر مترمربع در ثانیه است. متوسط شدت پاشمان به سمت پایین دست در نمونه خاک ماسه‌ای در دامنه ۰/۰۱۶ گرم بر مترمربع در ثانیه (۴۰ درصد سنگریزه) تا ۰/۰۳۰ گرم بر مترمربع در ثانیه (سطح بدون پوشش سنگریزه) و در نمونه خاک زراعی بین ۰/۰۱۳ گرم بر مترمربع در ثانیه (۴۰ درصد سنگریزه) تا ۰/۰۲۵ گرم بر مترمربع در ثانیه (سطح بدون پوشش سنگریزه)



شکل ۲- تغییرات میانگین شدت پاشمان پایین دست در دو نمونه خاک زراعی و ماسه‌ای متأثر از درصدهای مختلف پوشش سنگریزه سطحی (حروف مشابه بیانگر عدم اختلاف معنی دار بین مقادیر میانگین پاشمان پایین دست در سطح احتمال پنج درصد طبق آزمون دانکن است)



شکل ۳- تغییرات میانگین شدت پاشمان بالادست در دو نمونه خاک زراعی و ماسه‌ای متأثر از درصدهای مختلف پوشش سنگریزه سطحی (حروف مشابه بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار بین مقادیر میانگین شدت پاشمان بالادست در سطح احتمال پنج درصد طبق آزمون دانکن است)

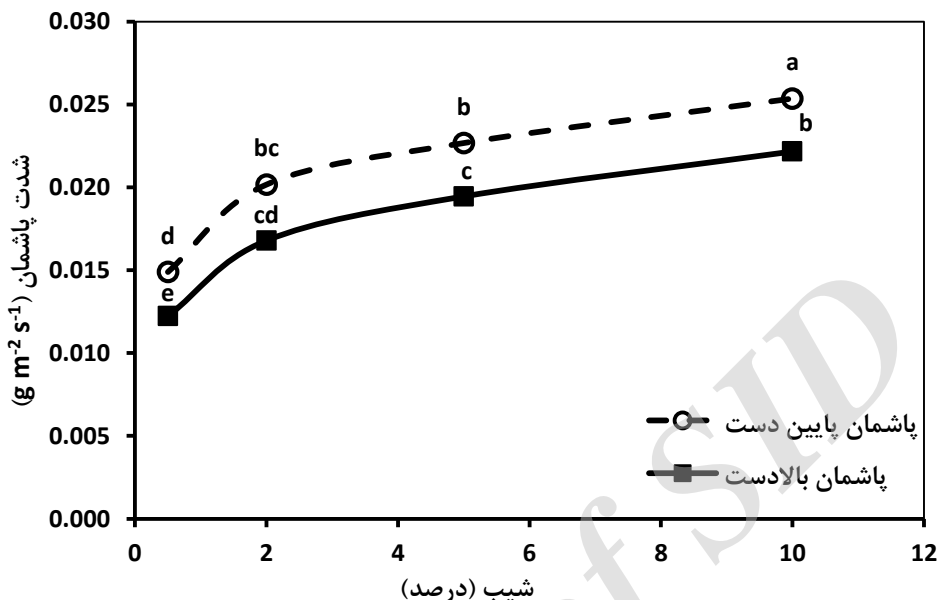
جداکننده ذرات خاک یعنی نیروی قطرات باران بر نیروی مقاومت خاک در برابر جدا شدن غلبه کرده و در نتیجه شدت جدا شدن و در نتیجه پاشمان به سمت پایین دست افزایش می‌یابد. همچنین، Mahmoodabadi و Arjmand Sajjadi (۲۰۱۶) دریافتند که با افزایش شیب، شدت پاشمان پایین دست افزایش پیدا می‌کند که به کاهش عمق لایه آب موجود در سطح خاک و کاهش نقش آن در استهلاک انرژی جنبشی قطرات باران مرتبط دانسته شد.

شکل ۵، تأثیر متقابل سه عامل خاک، شیب و پوشش سنگریزه سطحی را بر متوسط شدت پاشمان نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در هر دو نمونه خاک ماسه‌ای و زراعی با افزایش درصد پوشش سنگریزه سطحی، متوسط شدت پاشمان کاهش می‌یابد. همچنین، در هر دو نمونه خاک با افزایش درصد شیب، متوسط شدت پاشمان افزایش یافته است. کمترین مقدار متوسط شدت پاشمان در خاک زراعی، شیب ۰/۵ درصد و ۴۰ درصد پوشش سنگریزه سطحی به میزان ۰/۰۰۵ گرم بر مترمربع در ثانیه و بیشترین مقدار آن در خاک ماسه‌ای، شیب ۱۰ درصد و فاقد پوشش سنگریزه سطحی به میزان ۰/۰۳۱ گرم بر مترمربع در ثانیه مشاهده شد. نقش شیب در کنترل شدت پاشمان ذرات قبل از این مورد

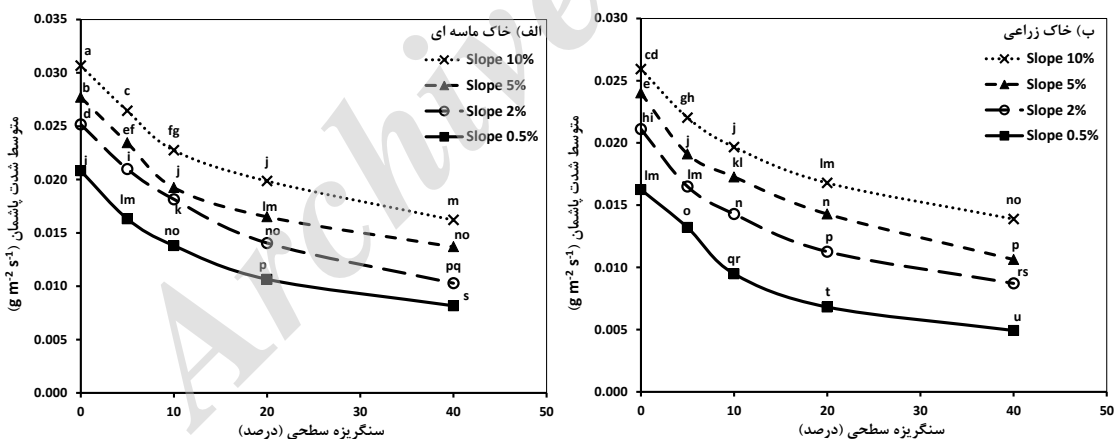
در پژوهش‌های قبلی، تأثیر افزایش شیب در افزایش شدت پاشمان به‌ویژه شدت پاشمان به سمت پایین دست گزارش شده است (Jomaa و همکاران، ۲۰۱۰؛ Brodowski و همکاران، ۲۰۱۳؛ Arjmand Sajjadi و Mahmoodabadi، ۲۰۱۶). در این زمینه، Poesen و Torri (۱۹۸۸) معتقدند که اثر مثبت شیب بر شدت پاشمان به اضافه شدن نیروی جاذبه زمین به نیروهای فرساینده قطرات باران و کاهش مقاومت خاک با افزایش درصد شیب مربوط است، به طوری که در شیب‌های تندتر به علت تأثیر جاذبه زمین، خاکدانه‌های بیشتری جدا و به اطراف پرتاب می‌شود. نتایج پژوهش Brodowski (۲۰۱۳) نشان داد که با افزایش درصد شیب، میزان پاشمان ذرات خاک افزایش معنی‌داری پیدا می‌کند. آن‌ها دریافتند که شدت پاشمان به سمت پایین دست بیشتر از شدت پاشمان به سمت بالادست است. این در حالی بود که Wan و همکاران (۱۹۹۶) و همچنین، Fu و همکاران (۲۰۱۱) مشاهده کردند که با افزایش درصد شیب، شدت پاشمان به سمت پایین دست افزایش ولی شدت پاشمان به سمت بالادست کاهش پیدا می‌کند. دلیل این موضوع توسط Wan و همکاران (۱۹۹۶) به تغییر جهت نیروهای برخورد قطرات باران با سطح شیب‌دار مرتبط دانسته شد در حالی که Fu و همکاران (۲۰۱۱) عنوان داشتند که با افزایش شیب، نیروی

شیب‌های کمتر به دلیل وجود لایه عمیق‌تر آب در سطح خاک است که به‌عنوان یک سپر در مقابل برخورد قطرات باران عمل می‌کند.

بررسی قرار گرفته که برای نمونه Wan و همکاران (۱۹۹۶) دریافتند شدت پاشمان با افزایش شیب رابطه مستقیم و خطی دارد. همچنین، Renard و همکاران (۱۹۹۷) بیان داشتند که مقدار کمتر شدت پاشمان در



شکل ۴- روند تغییرات میانگین شدت پاشمان پایین دست و بالادست در شیب‌های مختلف (حروف مشابه بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار بین مقادیر میانگین شدت پاشمان در سطح احتمال پنج درصد طبق آزمون دانکن است)



شکل ۵- اثرات متقابل شیب و پوشش سنگریزه سطحی در دو خاک ماسه‌ای و زراعی بر متوسط شدت پاشمان کل (حروف مشابه بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار بین مقادیر میانگین شدت پاشمان در سطح احتمال پنج درصد طبق آزمون دانکن است)

همچنین، اثر متقابل دوگانه خاک و شیب ($p < 0.01$) و اثر متقابل دوگانه خاک و پوشش سنگریزه سطحی ($p < 0.001$) بر فرسایش بین‌شیاری معنی‌دار است. شکل ۶، تأثیر درصدهای مختلف پوشش سنگریزه سطحی را بر متوسط شدت فرسایش بین‌شیاری در دو نمونه خاک مورد مطالعه نشان می‌دهد. همان‌گونه که

فرسایش بین‌شیاری: نتایج تجزیه واریانس مربوط به تأثیر سه عامل خاک، درصد شیب و درصد پوشش سنگریزه سطحی بر شدت فرسایش بین‌شیاری در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج گویای این مطلب است که هر سه عامل یادشده به‌صورت جداگانه تأثیر معنی‌داری ($p < 0.001$) بر شدت فرسایش بین‌شیاری دارند.

تا ۰/۷۷ گرم بر مترمربع در ثانیه (سطح بدون پوشش سنگریزه) متغیر است. با افزایش درصد پوشش سنگریزه از صفر درصد (شاهد) به پنج، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ درصد، متوسط شدت فرسایش بین‌شیاری در خاک ماسه‌ای به ترتیب ۱۳/۵، ۲۶/۴، ۳۳/۳ و ۴۶/۴ درصد و در خاک زراعی به ترتیب ۱۲/۹، ۳۰/۷، ۳۷/۳ و ۴۵/۹ درصد کاهش نشان می‌دهد.

مشاهده می‌شود، در هر دو نمونه خاک با افزایش درصد پوشش سنگریزه سطحی، شدت فرسایش بین‌شیاری کاهش معنی‌دار و غیر خطی ($p < 0.05$) یافته است. متوسط شدت فرسایش بین‌شیاری در خاک ماسه‌ای از ۰/۵۳ گرم بر مترمربع در ثانیه (۴۰ درصد سنگریزه) تا ۰/۹۸ گرم بر مترمربع در ثانیه (سطح بدون پوشش سنگریزه) و در خاک زراعی از ۰/۴۱ گرم بر مترمربع در ثانیه (۴۰ درصد سنگریزه)

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس عوامل مؤثر بر شدت فرسایش بین‌شیاری (مقادیر میانگین مربعات MS است)

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات
خاک (A)	۱	۰/۹۰۶***
شیب (B)	۳	۰/۶۹۱***
پوشش سنگریزه سطحی (C)	۴	۰/۶۰۶***
A×B	۳	۰/۰۰۴**
A×C	۴	۰/۰۰۹***
B×C	۱۲	۰/۰۰۱ ^{ns}
A×B×C	۱۲	۰/۰۰۱ ^{ns}
خطا	۸۰	۰/۰۰۱

*** معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۱ درصد، ** معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد، * معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد و ^{ns} عدم معنی‌داری

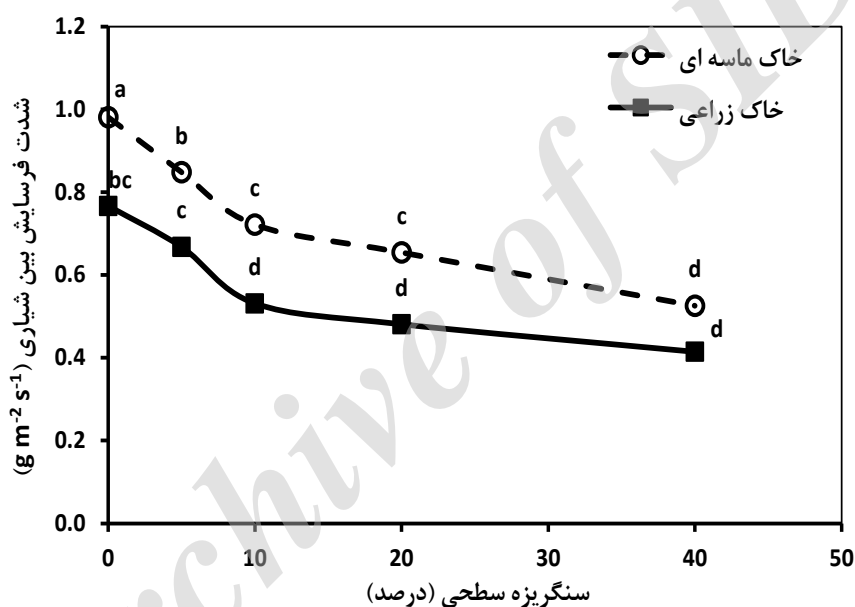
رواناب و در نتیجه کاهش هدررفت خاک می‌شود. Martinez-Zavala و همکاران (۲۰۱۰) نیز با استفاده از شبیه‌سازی باران در شرایط صحرائی مناطق مدیترانه‌ای عنوان داشتند که افزایش پوشش سنگریزه سطحی به بیش از ۶۰ درصد از طریق تأخیر در شروع رواناب سبب کاهش نمایی در میزان هدررفت خاک می‌شود. این در حالی است که Javadi و همکاران (۲۰۰۵) دریافتند با افزایش پوشش سنگی تا حدود ۱۵ درصد، شدت فرسایش بین‌شیاری افزایش و در پوشش‌های بیش از آن کاهش می‌یابد. این پژوهشگران دلیل افزایش هدررفت خاک در حضور پوشش سنگی تا میزان ۱۵ درصد را به تنش برشی رواناب در اثر برخورد با قطعات سنگی و در نتیجه افزایش تلاطم و تشدید جدا شدن ذرات خاک مرتبط دانستند.

نتایج همچنین، نشان می‌دهد که شدت فرسایش بین‌شیاری در نمونه خاک ماسه‌ای بیشتر از خاک زراعی است (شکل ۶). متوسط شدت فرسایش بین‌شیاری در دو خاک ماسه‌ای و زراعی به ترتیب

سنگریزه موجود در سطح خاک به‌عنوان عامل حفاظتی در برابر برخورد مستقیم قطرات باران بر سطح خاک عمل کرده و از این‌رو، سبب کاهش انسداد سطحی و همچنین، شدت فرسایش بین‌شیاری می‌شود (Martinez-Zavala و همکاران، ۲۰۰۵؛ Mandal و همکاران، ۲۰۱۰). از طرفی، در پژوهش‌های انجام شده در شرایط آزمایشگاهی (Poesen و همکاران، ۱۹۹۸) و صحرائی (Tailong و همکاران، ۲۰۱۰) مشخص شده که پوشش سنگریزه سطحی از طریق افزایش زبری سطح، مقاومت خاک را در برابر جریان رواناب افزایش داده که نتیجه آن افت سرعت جریان و کاهش قابلیت حمل ذرات جدا شده به‌وسیله باران است. یافته‌های پژوهش حاضر با نتایج پژوهش‌هایی که به بررسی اثر سنگریزه سطحی بر میزان هدررفت خاک پرداخته همخوانی دارد. در این زمینه، Mandal و همکاران (۲۰۰۵) در شرایط صحرائی و با استفاده از شبیه‌سازی باران بر روی سطوح با پوشش‌های متفاوت سنگریزه بین سه تا ۶۸ درصد دریافتند که وجود سنگریزه در سطح خاک، باعث کاهش سرعت جریان

است. پژوهش‌های قبلی نشان داده که شدت فرسایش در خاک‌های حاوی خاکدانه‌های ریزتر، بیشتر است (Mahmoodabadi و همکاران، ۲۰۱۴). علاوه بر این، مطابق شکل ۶ مشخص می‌شود که در پوشش سنگریزه کمتر از ۱۰ درصد در مقایسه با پوشش بیشتر از ۱۰ درصد، شدت فرسایش بین‌شیاری با افزایش درصد پوشش، بیشتر کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که در پژوهش حاضر درصد سنگریزه سطحی، تا ۴۰ درصد پوشش مورد بررسی قرار گرفت و ممکن است در درصدهای بیشتر پوشش، روند تغییرات شدت فرسایش متفاوت باشد.

۰/۷۵ و ۰/۵۷ گرم بر مترمربع در ثانیه است. با توجه به درصد بالای شن در خاک ماسه‌ای و البته خاکدانه‌های ریزتر در این خاک نسبت به خاک زراعی (جدول ۱)، می‌توان انتظار داشت که به دلیل چسبندگی کمتر و جدایش پذیری بیشتر، شدت فرسایش بین‌شیاری در خاک ماسه‌ای بیشتر از خاک زراعی باشد. همان‌طور که در بالا نیز گفته شد، شدت پاشمان در هر سه حالت پایین‌دست، بالادست و متوسط پاشمان کل در خاک ماسه‌ای بیشتر از خاک زراعی بود. به عبارتی در خاک ماسه‌ای، ذرات از قبل جدا شده بیشتری را در معرض جریان ورقه‌ای قرار گرفته و لذا، فرسایش بین‌شیاری نیز در این نمونه خاک بیشتر از خاک زراعی



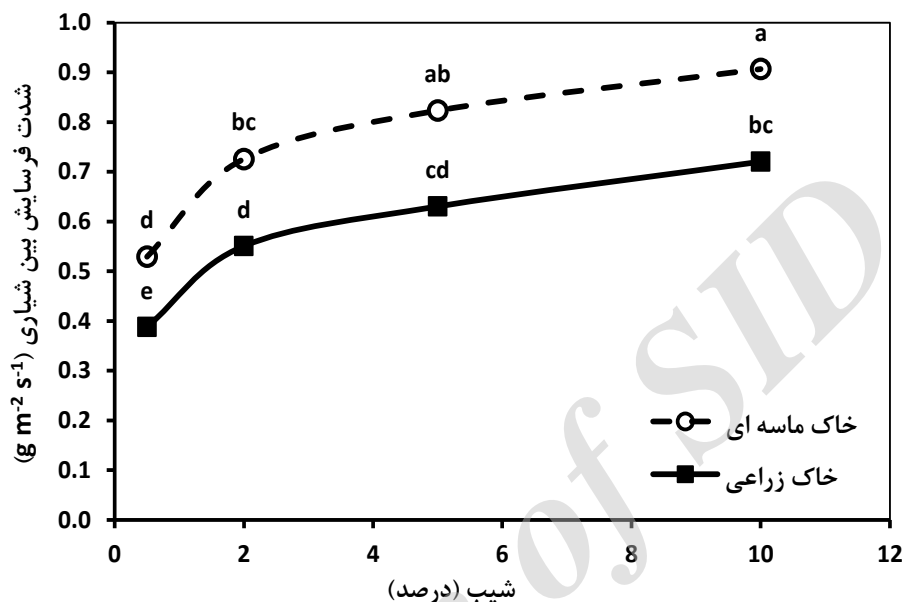
شکل ۶- مقایسه میانگین شدت فرسایش بین‌شیاری در دو نمونه خاک زراعی و ماسه‌ای متأثر از درصدهای مختلف پوشش سنگریزه سطحی (حروف مشابه بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار بین مقادیر میانگین شدت فرسایش بین‌شیاری در سطح احتمال پنج درصد طبق آزمون دانکن است)

بین‌شیاری در نمونه خاک ماسه‌ای به ترتیب ۳۷/۲، ۵۵/۵ و ۷۱/۳ درصد و در نمونه خاک زراعی به ترتیب ۴۱/۹، ۶۲/۵ و ۸۵/۷ درصد افزایش نشان می‌دهد. البته با افزایش شیب از دو به پنج درصد، تفاوت معنی‌داری در شدت فرسایش بین‌شیاری مشاهده نمی‌شود (شکل ۷). این موضوع در مورد شدت پاشمان نیز وجود دارد (شکل ۴). از دلایل احتمالی این موضوع می‌توان به تشکیل و توسعه سله سطحی و عمق لایه آب موجود در سطح اشاره کرد (Janeau و

شکل ۷، تأثیر شیب‌های مختلف در دو نمونه خاک مورد مطالعه را بر متوسط شدت فرسایش بین‌شیاری نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در هر دو نمونه خاک با افزایش درصد شیب، شدت فرسایش بین‌شیاری افزایش معنی‌دار و البته غیر خطی ($p < 0.05$) پیدا می‌کند. در شیب‌های کمتر از دو درصد، میزان افزایش شدت فرسایش بین‌شیاری بیشتر از شیب‌های تندتر است. با افزایش شیب از ۰/۵ درصد به دو، پنج و ۱۰ درصد، شدت فرسایش

طرف شدت پاشمان ذرات در اثر برخورد قطرات باران افزایش پیدا می‌کند (Mahmoodabadi و Arjmand Sajjadi, ۲۰۱۶) و از طرف دیگر با افزایش شیب به دلیل افزایش سرعت جریان ورقه‌ای، قابلیت حمل ذرات جدا شده افزایش می‌یابد (Sirjani و Mahmoodabadi, ۲۰۱۴).

همکاران، ۲۰۰۳). در پژوهش‌های متعددی اثر شیب در تشدید فرسایش بین‌شیاری گزارش شده است (Asadi و همکاران، ۲۰۰۷؛ Liu و همکاران، ۲۰۰۶؛ Fu و همکاران، ۲۰۱۱). در هیچ یک از آزمایش‌ها، شیاری در سطح خاک در معرض فرسایش مشاهده نشد. با افزایش شیب در فرسایش بین‌شیاری، از یک



شکل ۷- مقایسه میانگین شدت فرسایش بین‌شیاری در دو نمونه خاک زراعی و ماسه‌ای متأثر از شیب‌های مختلف (حروف مشابه بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار بین مقادیر میانگین شدت فرسایش بین‌شیاری در سطح احتمال پنج درصد طبق آزمون دانکن است)

سنگریزه سطحی در شیب ۱۰ درصد، متوسط شدت پاشمان کل کمتری نسبت به سطح فاقد پوشش این خاک در شیب ۰/۵ درصد دارد.

نتیجه‌گیری

نظر به ضعف پوشش گیاهی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، این پژوهش به بررسی اثر شیب و پوشش سنگریزه سطحی بر شدت فرسایش پاشمانی و بین‌شیاری در دو خاک مختلف پرداخت. یافته‌ها نشان از تأثیر معنی‌دار و غیر خطی پوشش سنگریزه سطحی در کاهش تلفات ناشی از پاشمان ذرات به سمت پایین‌دست و بالادست و همچنین، متوسط پاشمان کل داشت. البته شدت پاشمان ذرات به سمت پایین‌دست بیشتر از بالادست بود. همچنین، با افزایش درصد پوشش سنگریزه سطحی، شدت فرسایش بین‌شیاری نیز به‌طور معنی‌دار و غیر خطی کاهش یافت. با

در مجموع، یافته‌های پژوهش حاضر بیانگر نقش افزایش شیب و نقش کاهنده پوشش سنگریزه سطحی در کنترل شدت پاشمان ذرات و همچنین، شدت فرسایش بین‌شیاری است. از منظر کاربردی چنین می‌توان استنباط نمود که در اراضی شیب‌دار، هر چند شدت فرسایش بین‌شیاری و پاشمانی بیشتر از اراضی با شیب کمتر است ولی در صورت وجود و یا ایجاد پوشش سنگریزه سطحی، می‌توان شدت فرسایش را به‌طور معنی‌داری کاهش داد. همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در نمونه خاک ماسه‌ای با اعمال پوشش ۴۰ درصد و حتی ۲۰ درصد سنگریزه سطحی بر روی تندترین شیب یعنی شیب ۱۰ درصد می‌توان متوسط شدت پاشمان کل را به کمتر از متوسط شدت پاشمان کل بر روی شیب حداقل یعنی ۰/۵ درصد ولی فاقد پوشش سنگریزه سطحی کاهش داد. به همین ترتیب، در نمونه خاک زراعی وجود ۴۰ درصد پوشش

ذرات جدا شده افزایش پیدا می‌کند. مقایسه دو خاک با توزیع اندازه ذرات متفاوت دلالت بر این مطلب داشت که در خاک با چسبندگی کمتر و جدایش پذیری بیشتر به دلیل پاشمان بیشتر ذرات، ذرات از قبل جدا شده بیشتری در معرض جریان ورقه‌ای قرار گرفته و لذا شدت فرسایش بین‌شیاری در آن بیشتر از خاک دیگر است. در مجموع، نشان داده شد که حفظ پوشش سنگریزه سطحی در مناطق خشک و نیمه-خشک که پوشش گیاهی ضعیفی دارند، می‌تواند در راستای مهار و یا کاهش تلفات ناشی از فرسایش خاک راهگشا باشد. این موضوع تا جایی اهمیت دارد که اثر شیب در تشدید فرسایش، از طریق وجود و یا ایجاد پوشش سنگریزه سطحی کاهش می‌یابد.

افزایش درصد پوشش سنگریزه به میزان ۴۰ درصد در مقایسه با شاهد (سطح بدون پوشش)، هر دو نوع فرسایش پاشمانی و بین‌شیاری در دو خاک مورد مطالعه، حداقل ۴۵ درصد کاهش می‌یابد. همچنین، مشخص شد که در پوشش سنگریزه کمتر از ۱۰ درصد در مقایسه با پوشش بیشتر از ۱۰ درصد، شدت با افزایش درصد پوشش، فرسایش بین‌شیاری کاهش بیشتری تجربه می‌کند. با افزایش شیب در هر دو خاک مورد مطالعه، شدت پاشمان ذرات و نیز شدت فرسایش بین‌شیاری افزایش پیدا می‌کند. در واقع با افزایش شیب، از یک طرف شدت پاشمان ذرات در اثر برخورد قطرات باران افزایش پیدا کرده و از طرف دیگر به دلیل افزایش سرعت جریان ورقه‌ای، قابلیت حمل

منابع مورد استفاده

1. Arjmand Sajjadi, S. and M. Mahmoodabadi. 2015. Sediment concentration and hydraulic characteristics of rain-induced overland flows in arid land soils. *Journal of Soils and Sediments*, 15: 710-721.
2. Asadi, H., H. Ghadiri, H. Rouhipour and C.W. Rose. 2007. Interrill soil erosion processes and their interaction in low slopes. *Earth Surface Processes and Landform*, 32(5): 711-724.
3. Blanco, H. and R. Lal. 2008. *Principle of soil conservation and management*. Springer Netherlands, 617 pages.
4. Brodowski, R. 2013. Soil detachment caused by divided rain power from raindrop parts splashed downward on a sloping surface. *Catena*, 105: 52-61.
5. Defersha, M.B. and A.M. Melesse. 2012. Effect of rainfall intensity, slope and antecedent moisture content on sediment concentration and sediment enrichment ratio. *Catena*, 90: 47-52.
6. Deng, Z.Q., J.L.D. Lima and H.S. Jung. 2008. Sediment transport rate-based model for rainfall-induced soil erosion. *Catena*, 76: 54-62.
7. Fattet, M., Y. Fu, M. Ghestem, W. Ma, M. Foulonneau, J. Nespoulous, Y. Le Bissonnais and A. Stokes. 2011. Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength. *Catena*, 87: 60-69.
8. Fu, S., B. Liu, H. Liu and L. Xu. 2011. The effect of slope on interrill erosion at short slopes. *Catena*, 84(1-2): 29-34.
9. Grant, W.J. and R.A. Struchtemeyer. 1995. Influence of the coarse fraction in two Maine potato soils on infiltration, runoff and erosion. *Soil Science Society of America Journal*, 25: 391-394.
10. Grismer, M.E. 2012. Standards vary in studies using rainfall simulators to evaluate erosion. *California Agriculture*, 66(3): 102-107.
11. Janeau, J.L., J.P. Briquet, O. Planchon and C. Valentin. 2003. Soil crusting and infiltration on steep slopes in northern Thailand. *European Journal of Soil Science*, 54(3): 543-553.
12. Javadi, P., H. Rouhipour and A.A. Mahboubi. 2005. Effect of gravel cover on erosion and runoff rates using flume and rainfall simulation. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 20(3): 287-310 (in Persian).
13. Jomaa, S., D.A. Barry, A. Brovelli, G.C. Sander, J.Y. Parlange, B.C.P. Heng and H.J. Tromp-van Meerveld. 2010. Effect of raindrop splash and transversal width on soil erosion: Laboratory flume experiments and analysis with the Hairsine-Rose model. *Journal of Hydrology*, 395(1-2): 117-132.
14. Kinnell, P.I.A. 2005. Raindrop impact induced erosion processes and prediction: a review. *Hydrological Processes*, 19(14): 2815-2844.
15. Kuhn, N.J., E.K. Armstrong, A.C. Ling, K.L. Connolly and G. Heckrath. 2012. Interrill erosion of carbon and phosphorus from conventionally and organically farmed Devon silt soils. *Catena*, 91: 94-103.
16. Li, XY. 2003. Gravel-sand mulch for soil and water conservation in the semiarid loess region of northwest China. *Catena*, 52: 105-127.

17. Liu, Q.Q., H. Xiang and V.P. Singh. 2006. A simulation model for unified interrill erosion and rill erosion on hillslopes. *Hydrological Processes*, 20: 469-486.
18. Mahmoodabadi, M. and A. Cerdà. 2013. WEPP calibration for improved predictions of interrill erosion in semi-arid to arid environments. *Geoderma*, 204-205: 75-83.
19. Mahmoodabadi, M. and H. Rouhipour. 2011. Study on process changes in some indices of soil erodibility and depositability using rainfall simulator. *Journal of Water and Soil Conservation*, 18(4): 145-166 (in Persian).
20. Mahmoodabadi, M. and S. Arjmand Sajjadi. 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: 159-167.
21. Mahmoodabadi, M., H. Ghadiri, C. Rose, B. Yu, H. Rafahi and H. Rouhipour. 2014a. Evaluation of GUEST and WEPP with a new approach for the determination of sediment transport capacity. *Journal of Hydrology*, 513: 413-421.
22. Mahmoodabadi, M., H. Ghadiri, B. Yu and C. Rose. 2014b. Morpho-dynamic quantification of flow-driven rill erosion parameters based on physical principles. *Journal of Hydrology*, 514: 328-336.
23. Mandal, U.K., K.V. Rao, P.K. Mishra, K.P.R. Vittal, K.L. Sharma, B. Narsimlu and K. Venkanna. 2005. Soil infiltration, runoff and sediment yield from a shallow soil with varied stone cover and intensity of rain. *European Journal of Soil Science*, 56: 435-443.
24. Martinez-Mena, M., V. Castillo and J. Albaladejo. 2002. Relations between interrill erosion processes and sediment particle size distribution in a semiarid Mediterranean area of SE of Spain. *Geomorphology*, 45: 261-275.
25. Martinez-Zavala, L., A. Jordan, N. Bellinfante and J. Gil. 2010. Relationships between rock fragment cover and soil hydrological response in a Mediterranean environment. *Soil Science and Plant Nutrition*, 56: 95-104.
26. Mirzaee, S., M. Gorji and A. Jafari Ardakani. 2012. Effect of surface rock fragment cover on soil erosion and sediment using simulated runoff. *Soil Management and Sustainable Production*, 2(1): 141-154 (in Persian).
27. Page, A.L., R.H. Miller and D.R. Jeeney. 1992. *Methods of soil analysis, part 1. physical properties*. SSSA Publication, Madison, 1750 pages.
28. Pansu, M. and J. Gautheyrou. 2006. *Handbook of soil analysis, mineralogical, organic and inorganic methods*. Springer, 993 pages.
29. Poesen, J. and D. Torri. 1988. The effect of cup size on splash detachment and transport measurements; part 1: field measurement. *Catena*, 12: 113-126.
30. Poesen, J., F. Ingelmo-Sanchez and H. Mucher. 1990. The hydrological response of soil surfaces to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the top layer. *Earth Surface Processes and Landforms*, 15: 653-671.
31. Rieke-Zapp, D., J. Poesen and M.A. Nearing. 2007. Effects of rock fragments incorporated in the soil matrix on concentrated flow hydraulics and erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32: 1063-1076.
32. Shi, Z.H., N.F. Fang, F.Z. Wu, L. Wang, B.J. Yue and G.L. Wu. 2012. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes. *Journal of Hydrology*, 454-455: 123-130.
33. Sirjani, E. and M. Mahmoodabadi. 2014. Effects of sheet flow rate and slope gradient on sediment load. *Arabian Journal of Geosciences*, 7: 203-210.
34. Tailong, G., W.D. Qianjiu and J.Z. Li. 2010. Effect of surface stone cover on sediment and solute transport on the slope of fallow land in the semi-arid loess region of northwestern China. *Journal of Soils and Sediments*, 10: 1200-1208.
35. Van Dijk, A.I.J.M., A.G.C.A. Meesters and L.A. Bruijnzeel. 2002. Exponential distribution theory and the interpretation of splash detachment and transport experiments. *Soil Science Society of America Journal*, 66: 1466-1474.
36. Walkley, A. and I.A. Black. 1934. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37: 29-38.
37. Wan, Y., S.A. El-Swaify and A. Sutherland. 1996. Partitioning interrill splash and wash dynamics: a novel laboratory approach. *Soil Technology*, 9(1-2): 55-69.
38. Zhao, G., X. Mu, Z. Wen, F. Wang and P. Gao. 2013. Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the Loess Plateau of China. *Land Degradation and Development*, 24(5): 499-510.

The impact of surface gravel cover and slope gradient on splash and interrill erosion rates in two contrasting soils

Aghdas Sotoudehnia¹, Majid Mahmoodabadi*² and Majid Fekri³

¹ MSc Student, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, ² Associate Professor, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, and ³ Professor, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Received: 20 July 2016

Accepted: 02 May 2018

Abstract

Due to low plant cover in arid and semi-arid regions, surface gravel cover (SGC) plays an important role in soil erosion control. The aim of this study is to investigate the effect of SGC and slope gradient on splash as well as interrill erosion in two contrasting soils. For this purpose, a constant rain was simulated on two soils namely sandy and cropland with different aggregate size distributions at four slope gradients including 0.5, 2, 5 and 10 % and five levels of SGC including 0, 5, 10, 20 and 40 % each at three replicates. Through producing a rain intensity of 35 mm/h for 35 min duration on a 0.35 m by 0.35 m test area, both splash (downward, upward and the total splashed material) and interrill erosion rates were measured. Result showed that with increasing SGC in both soils, the downward, upward and the total average splash increased, significantly. However, the downward splash rate was higher than the upward splash rate. With increasing SGC from 0% (control) to 5, 10, 20 and 40 %, the downward splash rate decreased for the sandy soil by 12.9%, 25.3%, 35.7% and 47.7%, and for the cropland soil by 13.9%, 25.4%, 37.0% and 49.4%, respectively. Regarding the interrill erosion rate, the corresponding reduction percentages for the sandy soil were 13.5%, 26.4%, 33.3% and 46.4% and for the cropland soil were 12.9%, 30.7%, 37.3% and 45.9%, respectively. Moreover, nonlinear increases in the interrill and splash erosion rates were found at steeper slopes. Due to lower cohesion and greater detachability of sandy soil, it exhibited higher erosion rates than those for the cropland soil. The findings of this study revealed that in the presence of SGC, both splash and interrill erosion rates will reduce, significantly.

Key words: Interrill erosion, Rainfall simulation, Sheet flow, Splash, Surface gravel

* Corresponding author: mahmoodabadi@uk.ac.ir