

تأثیرپذیری هدررفت کربن آلی و غنی‌شدگی رسوب طی فرسایش بین‌شیاری ناشی از وقوع همزمان باد و باران

مجید محمودآبادی^{۱*}، سمیرا زمانی^۲ و نجمه یزدان‌پناه^۳

^۱ استاد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ^۲ دانش‌آموخته دکتری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان و ^۳ دانشیار، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۰۲

چکیده

فرسایش بین‌شیاری، یکی از انواع مهم فرسایش در اراضی کشاورزی است که باعث هدررفت کربن آلی از سطح خاک می‌شود. این در حالی است که کمبود کربن آلی خاک در بیشتر مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، یکی از چالش‌های پیش روی تولید محصولات کشاورزی است. در این مناطق، بارش باران ممکن است با وزش بادهای فرساینده همراه باشد که مقادیر زیادی از خاک و کربن آلی را از بین می‌برد. لذا، پژوهش حاضر با هدف بررسی نقش عوامل فرساینده باد و باران بر هدررفت خاک و کربن آلی و نیز غنی‌شدگی رسوب طی رخداد فرسایش بین‌شیاری برنامه‌ریزی شده است. بدین منظور، با استفاده از سامانه شبیه‌ساز همزمان باد و باران، ترکیبی از سه شدت باران (۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌متر بر ساعت) و چهار سرعت باد (صفر، شش، نه و ۱۲ متر بر ثانیه) روی سه خاک با بافت مختلف (شنی، لوم شنی و لوم)، هر یک در سه تکرار استفاده شده است. نتایج نشان داد که هدررفت کربن آلی بین خاک‌هایی با بافت مختلف از ۰/۴ و ۴/۰۴ میلی‌گرم بر متر در ثانیه متغیر بوده است. نتایج دلالت بر اثر متقابل هم‌افزای دو عامل فرساینده باد و باران بر هدررفت خاک و کربن آلی داشت. همچنین، برای سرعت باد، یک حد آستانه (نه متر بر ثانیه) مشاهده شد که در سرعت بیشتر از این حد، هدررفت خاک و کربن آلی با شیب تندتری افزایش پیدا کرد. از طرفی، با افزایش هدررفت خاک، میزان هدررفت کربن آلی از هر خاک نیز به صورت خطی افزایش پیدا کرد. سهم هدررفت کربن آلی از میزان کل هدررفت خاک برای خاک‌های شنی، لوم شنی و لوم به ترتیب ۰/۳۶، ۰/۱۷ و ۲/۱۹ درصد تعیین شد. همچنین، نسبت غنی‌شدگی کربن آلی در رسوب این خاک‌ها، به ترتیب ۸/۰، ۱/۰ و ۲/۱ بود. بر اساس یافته‌های این پژوهش، کاهش سرعت باد در اراضی کشاورزی به‌ویژه مناطق بادخیز، برای کنترل هدررفت کربن آلی در اثر فرسایش بین‌شیاری از خاک سطحی پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: دینامیک کربن آلی، سرعت باد، شدت باران، خردشدن خاکدانه، عمق جریان

مقدمه

کربن آلی خاک می‌شود (Yan و همکاران، ۲۰۰۵؛ Jakab و همکاران، ۲۰۱۶). در واقع، پدیده فرسایش با کاهش حاصل‌خیزی و کیفیت خاک، تولید محصولات کشاورزی را کاهش می‌دهد (Zhang و همکاران،

فرسایش خاک، یکی از مهمترین چالش‌های زیست‌محیطی جهان محسوب می‌شود (Field و همکاران، ۲۰۰۹) که باعث هدررفت عناصر غذایی و

ظاهری، رطوبت اولیه دارد (Defersha و Melesse، ۲۰۱۲؛ Xiao و همکاران، ۲۰۱۷؛ Li و همکاران، ۲۰۱۸). با افزایش شدت و انرژی جنبشی قطرات باران، فرسایش بین‌شیاری به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد (Mahmoodabadi و Arjmand Sajjadi، ۲۰۱۶). همچنین، پایداری، اندازه و چگالی خاکدانه‌های موجود در سطح، بر فرسایش‌پذیری و نیز فرسایش بین‌شیاری تأثیرگذار است (Rodrigo Comino و همکاران، ۲۰۱۶؛ Zhang و همکاران، ۲۰۱۸). از طرفی، هدررفت کربن آلی خاک با فرایند فرسایش بین‌شیاری و همچنین، انرژی جنبشی باران ارتباط نزدیکی دارد (Kuhn و همکاران، ۲۰۱۲). در این نوع فرسایش و در اثر پاشمان ذرات و جریان سطحی کم‌عمق، ذرات حاصل‌خیز و غنی از کربن آلی خاک سطحی به دلیل چگالی کمتر منتقل می‌شود (Parsons و Stone، ۲۰۰۶؛ Schiettecatte و همکاران، ۲۰۰۸؛ Jakab و همکاران، ۲۰۱۶). در این زمینه، Begueria و همکاران (۲۰۱۵) دریافتند که در اثر برخورد قطرات باران، غلظت کربن آلی در رسوب حاصل از فرسایش به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. به‌علاوه، Liu و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند که انتقال انتخابی خاکدانه‌های سبک در خاک‌های درشت بافت، می‌تواند منجر به تخلیه مقدار بیشتری از کربن آلی نسبت به خاک ریزبافت شود. غلظت کربن آلی در رسوب حاصل از فرسایش بین‌شیاری نیز افزایش پیدا می‌کند (Lal و Polyakov، ۲۰۰۴). در حقیقت، انتقال انتخابی ذرات ریز حاوی کربن آلی به‌وسیله جریان کم‌عمق باعث پدیده غنی‌شدگی در رسوب می‌شود (Koiter و همکاران، ۲۰۱۷؛ Martinez-Mena و همکاران، ۲۰۱۲). به‌علاوه، خروج ترجیحی ذرات ریز غنی از برخی عناصر می‌تواند باعث آلودگی‌های پایین‌دست شود (Schulin و Shi، ۲۰۱۸). نتایج پژوهش‌های متعدد نشان می‌دهد که بین هدررفت کربن آلی و هدررفت خاک همبستگی معنی‌داری وجود دارد (Nie و همکاران، ۲۰۱۵). هرچند، پدیده غنی‌شدگی کربن آلی در ذرات رسوب حاصل از فرسایش بین‌شیاری گزارش شده (Kuhn و همکاران، ۲۰۱۲)، ولی در این زمینه تناقض‌هایی نیز وجود دارد. برای نمونه، برخی پژوهشگران غنی‌شدگی

۲۰۱۴؛ Nie و همکاران، ۲۰۱۵؛ Wei و همکاران، ۲۰۱۷) و تهدید جدی در برابر امنیت غذایی بشر محسوب می‌شود (Mahmoodabadi، ۲۰۱۹). جابجایی عناصر غذایی و کربن آلی به همراه ذرات فرسایش‌یافته طی رخداد فرسایش، ممکن است موجب افزایش غلظت آن‌ها در منابع آب و خاک پایین‌دست شده که این خود می‌تواند پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از آلودگی را در برخی موارد به‌دنبال داشته باشد (Lal و Polyakov، ۲۰۰۴؛ Wang و همکاران، ۲۰۱۶).

از آن‌جا که بخش عمده‌ای از کربن آلی در لایه سطحی خاک ذخیره می‌شود (Lal، ۲۰۰۴)، وقوع فرسایش باعث هدررفت مقدار قابل توجهی از کربن آلی خاک سطحی می‌شود (Begueria و همکاران، ۲۰۱۵). این در حالی است که کربن آلی نقش اساسی در حفظ کیفیت و بهبود ویژگی‌های خاک نظیر خاکدانه‌سازی، نفوذپذیری خاک و افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک دارد. همچنین، حفظ و افزایش ذخیره کربن آلی خاک باعث افزایش پایداری خاکدانه و کاهش فرسایش‌پذیری خاک و در نتیجه مهار فرسایش آبی و بادی می‌شود (Wang و همکاران، ۲۰۱۴؛ Li و همکاران، ۲۰۱۸؛ Shahabinejad و همکاران، ۲۰۱۹). در این زمینه، Brazier و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که ۸۷ درصد تخریب ناشی از فرسایش آبی و بادی در مناطق خشک، به دلیل کمبود کربن آلی خاک است. علاوه بر این، انتقال کربن آلی در اثر فرایندهای فرسایش، سرنوشت آن را دست‌خوش تغییر کرده و لذا در چرخه جهانی کربن حائز اهمیت است (Lal، ۲۰۰۴؛ Yasar Korkanca و Dorum، ۲۰۱۹).

فرسایش بین‌شیاری، یکی از انواع مهم فرسایش در اراضی کشاورزی است که در اثر جدا شدن و انتقال ذرات خاک در اثر برخورد قطرات باران و انتقال آن‌ها به‌وسیله جریان کم‌عمق رخ می‌دهد (Kuhn و همکاران، ۲۰۱۲؛ Mahmoodabadi و Cerdà، ۲۰۱۳). این نوع فرسایش، ارتباط نزدیکی با ویژگی‌های باران و حساسیت خاک سطحی در معرض فرسایش نظیر شدت باران، سرعت وزاویه برخورد قطرات، انرژی جنبشی باران، بافت و ساختمان خاک، جرم مخصوص

در کشور انجام نشده است. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف مطالعه اثرات متقابل شدت‌های مختلف باران و سرعت‌های متفاوت باد بر هدررفت خاک و کربن آلی حاصل از فرسایش بین‌شیاری در چند خاک انجام شد. همچنین، نسبت غنی‌شدگی کربن آلی در رسوب حاصل از فرسایش بین‌شیاری و نیز ارتباط بین ویژگی‌های هیدرولیکی جریان متأثر از باد با هدررفت کربن آلی نیز مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

دستگاه شبیه‌ساز فرسایش: در این پژوهش، مطالعه فرایندهای فرسایش بین‌شیاری متأثر از وزش باد با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز همزمان باران و باد موجود در آزمایشگاه فرسایش و حفاظت خاک دانشگاه شهید باهنر کرمان انجام شد. با استفاده از این دستگاه که برای اولین بار در کشور طراحی و ساخته شده، امکان مطالعه جداگانه و یا همزمان عوامل فرساینده باد، باران و رواناب وجود دارد. دستگاه یادشده از دو قسمت اصلی شبیه‌ساز باد و شبیه‌ساز باران تشکیل شده است. قسمت آزمایش این سامانه دارای طول ۱۲ متر و همچنین، سطح مقطعی با عرض و ارتفاع برابر با ۸۰ سانتی‌متر است. با این دستگاه می‌توان سرعت‌های باد بین ۰/۵ تا ۳۰ متر بر ثانیه در ارتفاع ۴۰ سانتی‌متری و نیز شدت‌های مختلف باران بین ۲۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر در ساعت را به‌طور جداگانه و یا همزمان ایجاد کرد. واسنجی شدت بارش به روش کریستین‌سن و سرعت باد از طریق اندازه‌گیری سرعت باد در ارتفاع‌های مختلف انجام شد (Kheirabadi و همکاران، ۲۰۱۸؛ Rezaei Arshad و همکاران، ۲۰۱۹).

نمونه‌برداری خاک و تعیین ویژگی‌ها: برای انجام این پژوهش، سه نمونه خاک سطحی از عمق ۱۰ سانتی‌متر سطحی با بافت‌های مختلف شامل شنی، لوم شنی و لومی از اراضی اطراف شهر کرمان با کاربری کشاورزی تهیه شد. پس از هوا خشک کردن، نمونه‌ها از الک ۴/۷۵ میلی‌متر عبور داده شد. بخشی از نمونه‌ها برای تعیین میانگین قطر خاکدانه‌ها (MWD) با استفاده از دستگاه شیکر الک و به دو روش سری الک تر و خشک استفاده شد (Kemper و Rosenau، ۱۹۸۶). بخش دیگری از نمونه‌ها، از الک دو

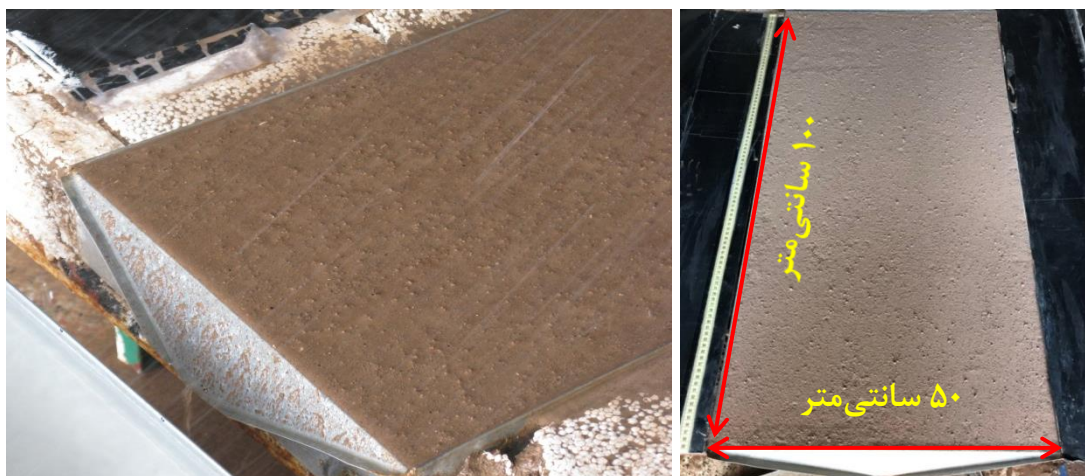
بیشتر کربن آلی در باران‌های با شدت کمتر (Jacinthe و همکاران، ۲۰۰۴) و برخی دیگر، غنی‌سازی بیش‌تر در باران‌های شدید (Ramos و Martinez-Casasnovas، ۲۰۰۶) را گزارش کرده‌اند. علاوه بر این، هنوز ارتباط ویژگی‌های هیدرولیکی جریان متأثر از باران با سازوکار هدررفت کربن آلی خاک در اثر حمل ذرات رسوب به‌طور کامل شناخته نشده است (Rezaei Arshad و همکاران، ۲۰۱۹). لذا، با وجود شناخت رابطه بین پارامترهای هیدرولیکی جریان و فرایند حمل ذرات رسوب (Martinez-Mena و همکاران، ۲۰۰۲؛ Guo و همکاران، ۲۰۱۳؛ Liu و همکاران، ۲۰۱۸)، همچنان برخی ناشناخته‌ها در زمینه فرایندهای مرتبط با هدررفت کربن آلی در جریان‌های متأثر از بارش باران و وزش باد وجود دارد (Xiao و همکاران، ۲۰۱۸؛ Liu و همکاران، ۲۰۱۹).

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، بسیاری از رگبارهای فرساینده با وزش باد همراه است (Whicker و همکاران، ۲۰۰۶؛ Mahmoodabadi، ۲۰۱۷). این در حالی است که پژوهش‌های اندکی در زمینه نقش باران‌های متأثر از باد بر هدررفت خاک و کربن آلی طی فرسایش بین‌شیاری انجام شده است. سرعت باد به‌عنوان مهمترین ویژگی باد، تأثیر زیادی بر ویژگی‌های قطرات باران نظیر سرعت سقوط، زاویه برخورد و انرژی جنبشی آن‌ها دارد (Erpul و همکاران، ۲۰۰۸؛ Ries و همکاران، ۲۰۱۰؛ Iserloh و همکاران، ۲۰۱۳). در شرایط وزش باد، فرایندهای جداسدن و انتقال ذرات خاک و نیز پارامترهای هیدرولیکی جریان سطحی تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Rezaei Arshad و همکاران، ۲۰۱۹). از این‌رو، بررسی اثر عوامل فرساینده باران و باد و جریان متأثر از آن‌ها در میزان هدررفت خاک و کربن آلی و نیز غنی‌شدگی رسوب حاصل حائز اهمیت است. از طرفی، در بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده، فرسایش آبی و بادی جدا از هم بررسی شده است (Kuhn و همکاران، ۲۰۱۲؛ Shi و Schulin، ۲۰۱۸)، در حالی‌که برای تشابه بیشتر شرایط آزمایش به شرایط طبیعی، در نظر گرفتن هر دو عامل باد و باران نتایج واقعی‌تری به‌دست می‌دهد (Visser و همکاران، ۲۰۰۴). تا کنون، مطالعه جامعی در زمینه هدررفت کربن آلی در شرایط وقوع همزمان باد و باران

Zamani و همکاران، ۲۰۲۰). برای اندازه‌گیری هدررفت ناشی از فرسایش بین‌شیاری، از یک سینی با کف مشبک به طول ۱۰۰ و عرض ۵۰ و ارتفاع پنج سانتی‌متر استفاده شد. در این سینی، اشباع نمونه‌های خاک از کف انجام و رواناب حاوی رسوب از قیف خروجی آن جمع‌آوری می‌شود. به‌منظور انجام آزمایش‌ها، نمونه‌های خاک به سینی موردنظر منتقل و پس از تسطیح، برای مدت ۲۴ ساعت در شرایط اشباع از کف قرار گرفت. برای جلوگیری از تشکیل شیار، شیب سینی در همه آزمایش‌ها برابر با یک درصد در نظر گرفته شد (شکل ۱). دلیل انتخاب این طول و شیب برای سینی، جلوگیری از ایجاد شیار در آزمایش‌های فرسایش بین‌شیاری بود (Mahmoodabadi و Cerdà، ۲۰۱۳). سپس، تیمارهای مختلف از ترکیب شدت‌های باران و سرعت‌های باد روی نمونه‌های خاک به مدت ۶۰ دقیقه اعمال شد. مدت آزمایش بر اساس زمان لازم برای رسیدن به شرایط پایدار انتخاب شد. منظور از شرایط پایدار، حالتی است که در آن تغییرات لحظه‌ای دبی رواناب و رسوب به حد کم و بیش ثابتی می‌رسد.

میلی‌متری عبور داده شد و سپس بافت خاک به روش هیدرومتری، کربن آلی به روش Walkley و Black (۱۹۳۴)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC) عصاره اشباع به‌وسیله هدایت‌سنج الکتریکی، واکنش خاک (pH) گل اشباع به کمک الکتروود شیشه‌ای دستگاه pH متر مدل JENWAY، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون (Pansu و Gautheyrou، ۲۰۰۶) و گچ به روش ترسیب با استون اندازه‌گیری شد.

انجام آزمایش‌ها: آزمایش‌ها به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی انجام شد. در پژوهش‌های متعددی از مقادیر ثابت شدت باران و سرعت باد برای اندازه‌گیری شدت فرسایش بین‌شیاری در شرایط آزمایشگاهی استفاده شده است (Kinnell، ۲۰۰۵؛ Erpul و همکاران، ۲۰۰۸؛ Iserloh و همکاران، ۲۰۱۳؛ Shi و Schulin، ۲۰۱۸). لذا، سه شدت بارندگی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌متر بر ساعت در ترکیب با سرعت‌های صفر، شش، نه و ۱۲ متر بر ثانیه باد بر روی سه نمونه خاک ایجاد شد. این مقادیر سرعت باد و شدت باران در آمار فرساینده‌گی باران و باد منطقه ثبت شده است



شکل ۱- نمایی از سطح تشتک حاوی نمونه خاک قبل از آزمایش (راست) و سطح در معرض برخورد قطرات باران (چپ) در آزمایش شبیه‌سازی فرسایش بین‌شیاری

رواناب و جرم ذرات رسوب حاصل با ترازوی دقیق اندازه‌گیری شد. شدت فرسایش بین‌شیاری از نسبت جرم رسوب در واحد سطح و مدت زمان آزمایش محاسبه شد. برای تعیین پارامترهای هیدرولیکی جریان، سرعت جریان به روش رنگ‌سنجی

اندازه‌گیری‌ها، محاسبه‌ها و تجزیه و تحلیل داده‌ها: نمونه‌های رواناب حاوی رسوب از طریق ظرف‌های مخصوص جمع‌آوری و سپس، در آون به مدت ۲۴ ساعت در درجه حرارت ۶۵ درجه سانتی‌گراد خشک شد (Shi و Schulin، ۲۰۱۸). در ادامه، حجم

شد. همچنین، رسم نمودارها در محیط Excel صورت پذیرفت.

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک‌های مورد مطالعه: خاک‌های مورد مطالعه در طبقات‌های بافت شنی، لوم شنی و لوم قرار گرفتند (جدول ۱). مقایسه شاخص‌های توزیع اندازه ذرات ثانویه در حالت خشک نشان داد که خاک لوم با MWD برابر با ۰/۹ میلی‌متر، بیشترین میانگین وزنی قطر خاکدانه را داشت ولی در حالت تر، این خاک کمترین و خاک شنی بیشترین مقدار MWD را به خود اختصاص داد. دلیل چنین روندی این است که با توجه به مقدار قابل توجه ماسه در خاک‌های مورد مطالعه که به ۹۰ درصد نیز می‌رسد (جدول ۱)، در تعیین توزیع اندازه ذرات در حالت تر، ذرات ماسه روی الک‌ها جدا نشد. از این رو در خاک شنی و بعد از آن در خاک لوم شنی، به دلیل درصد بیشتر ذرات اولیه و عدم خاکدانه‌سازی، خردشدن خاکدانه و در نتیجه اختلاف MWD در دو حالت خشک و تر، کمتر مشهود بود. در مقابل، خاک لوم با توجه به دارابودن بیشترین درصد رس و کربن آلی، هر چند خاکدانه‌های بیشتر و بزرگ‌تری نسبت به دو خاک دیگر دارد، ولی بر خلاف ذرات اولیه دو خاک دیگر، ذرات ثانویه آن در حالت تر قابل خردشدن و تبدیل به خاکدانه‌های ریزتر هستند و در نتیجه، مقدار MWD در حالت تر نسبت به حالت خشک کاهش بیشتری نشان داد. همچنین، همه خاک‌ها شور و مقدار کربنات کلسیم معادل در همه خاک‌ها قابل توجه و البته در خاک لوم شنی بیشتر از سایر خاک‌ها بود.

اثر باد و باران بر فرسایش بین‌شیاری در خاک‌های مختلف: اثر متقابل باد و باران بر مقادیر میانگین هدررفت خاک در اثر شدت فرسایش بین‌شیاری در خاک‌های مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که شدت فرسایش بین‌شیاری در خاک‌های مورد مطالعه بین ۲۳/۴ تا ۲۶۱/۶ میلی‌گرم بر مترمربع در ثانیه متغیر است. با افزایش شدت باران در همه خاک‌ها، هدررفت خاک ناشی از فرسایش بین‌شیاری به‌ویژه در سرعت‌های بیشتر باد به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. از طرفی، با

(Arjmand Sajjadi و Mahmoodabadi، ۲۰۱۶) و عمق جریان از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$D = \frac{q}{v} \quad (1)$$

که در آن، D عمق جریان (m)، q شدت جریان واحد (m^2s^{-1}) و v میانگین سرعت جریان (ms^{-1}) است. شاخص‌های فرساینده‌گی جریان شامل تنش برشی، قدرت جریان و قدرت جریان واحد نیز از روابط (۲) الی (۴) تعیین شد (Zhang و همکاران، ۲۰۰۲؛ Mahmoodabadi و همکاران، ۲۰۱۴a,b).

$$\tau = \rho g D S \quad (2)$$

$$\Omega = \tau v = \rho g q S \quad (3)$$

$$U = v S \quad (4)$$

که در آن‌ها، τ تنش برشی (Pa)، ρ چگالی آب (kgm^{-3})، g شتاب ثقل (ms^{-2})، شیب (mm^{-1})، Ω قدرت جریان (Wm^{-2}) و U قدرت جریان واحد (ms^{-1}) است. همچنین، غلظت کربن آلی در نمونه رسوب به روش Walkley و Black (۱۹۳۴) اندازه‌گیری شد. سپس، هدررفت کربن آلی در اثر فرسایش بین‌شیاری از رابطه (۵) بدست آمد.

$$SOC_L = q_s \cdot c_{sed} \quad (5)$$

که در آن، SOC_L هدررفت کربن آلی ($kgm^{-1}s^{-1}$)، q_s دبی رسوب ($kgm^{-1}s^{-1}$) و c_{sed} درصد کربن آلی در نمونه رسوب است. برای تعیین نسبت غنی‌شدگی کربن آلی در رسوب (ER_{oc}) از رابطه (۶) استفاده شد.

$$ER_{oc} = \frac{c_{sed}}{c_{soil}} \quad (6)$$

که در آن، c_{soil} درصد کربن آلی در نمونه خاک مورد مطالعه است.

تجزیه و تحلیل آماری با بررسی اثر سه عامل خاک، شدت باران و سرعت باد بر هدررفت خاک و کربن آلی در اثر فرسایش بین‌شیاری، با استفاده از نرم‌افزار SPSS.16 انجام شد. به این منظور، ابتدا تجزیه واریانس (ANOVA) انجام شد. با توجه به معنی‌داری اثر عوامل مورد مطالعه بر هدررفت خاک و کربن آلی و نیز نرمال بودن داده‌ها به روش کولموگوروف اسمیرنوف^۱ (Wah و Razali، ۲۰۱۱) مقایسه میانگین بین تیمارهای مورد مطالعه با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام

¹ Kolmogorov-Smirnov test

مقدار آستانه که نه متر بر ثانیه گزارش شد، شدت فرسایش بین‌شیاری با شیب تندتری افزایش می‌یابد. افزایش بیشتر هدررفت خاک در مقادیر بالاتر شدت باران و سرعت باد، دلالت بر اثر متقابل هم‌افزای این دو عامل فرساینده بر تشدید هدررفت خاک طی رخداد‌های فرسایش بین‌شیاری دارد.

افزایش سرعت باد، شدت فرسایش بین‌شیاری نیز به‌طور کلی افزایش معنی‌داری نشان داد. افزایش هدررفت خاک در سرعت‌های بیشتر از نه متر بر ثانیه، بیشتر از سایر سرعت‌های باد بود. این یافته با نتایج Rezaei Arshad و همکاران (۲۰۱۹) هم‌خوانی دارد که دریافتند با افزایش سرعت باد در بیشتر از یک

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

ویژگی	واحد	خاک شنی	خاک لوم شنی	خاک لوم
ماسه	درصد	۹۱/۳	۷۰/۷	۴۵/۶
سیلت	درصد	۵/۵	۱۶/۳	۳۷/۶
رس	درصد	۳/۲	۱۳/۰	۱۶/۸
MWD (خشک)	میلی‌متر	۰/۶۳	۰/۴۵	۰/۹۰
MWD (تر)	میلی‌متر	۰/۵۹	۰/۲۳	۰/۱۵
کربن آلی	درصد	۰/۰۵	۰/۲۰	۱/۰۴
کربنات کلسیم معادل	درصد	۱۹/۵	۲۸/۸	۱۸/۵
EC	دسی زیمنس بر متر	۵/۳	۳۸/۴	۲۲/۸
pH	-	۷/۸	۷/۶	۷/۶
گچ	درصد	۰/۲۱	۰/۶۳	۰/۴۸

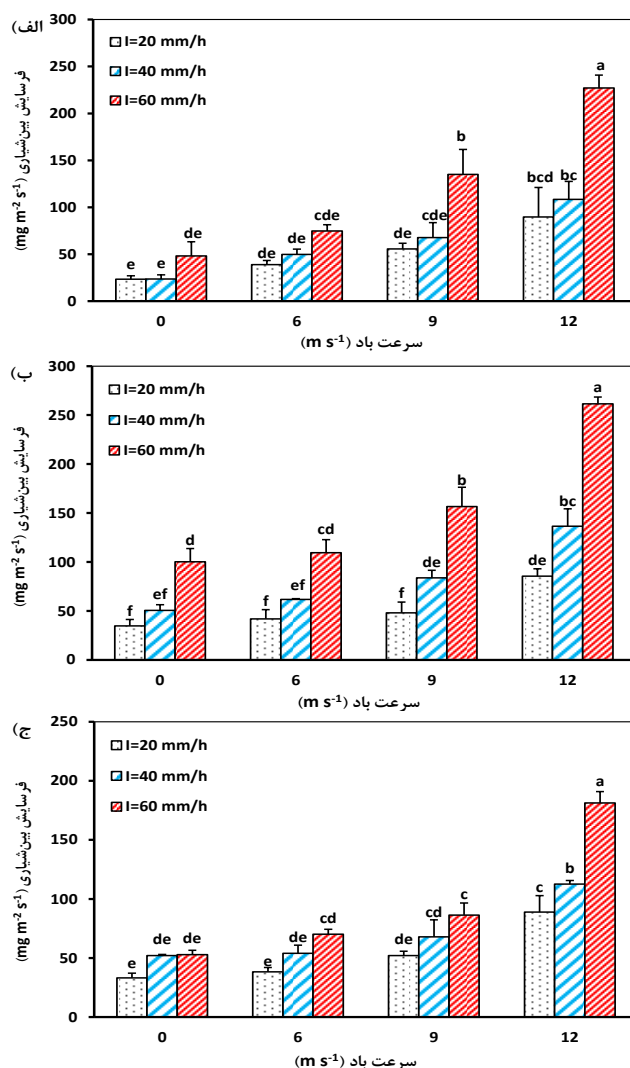
Arshad و همکاران، (۲۰۱۹). در واقع، به دلیل تقویت فرسایش‌دگی قطرات باران در شرایط وزش باد (Iserloh) و همکاران، (۲۰۱۳) Erpul و همکاران، (۲۰۱۳)؛ Marzen و همکاران، (۲۰۱۵)، ذرات بیشتری جدا و حمل می‌شود. از طرفی با افزایش شدت باران، مقادیر بیشتر هدررفت خاک مشاهده شد که به افزایش میزان جداسازی و انتقال ذرات خاک (Mahmoodabadi و Arjmand Sajjadi، ۲۰۱۶؛ Zhang و Wang، ۲۰۱۷) و نیز تشدید خردشدن خاکدانه‌ها (Defersha و Melesse، ۲۰۱۲؛ Li و همکاران، ۲۰۱۸؛ Rezaei Arshad و همکاران، ۲۰۱۹) در باران‌های شدیدتر مرتبط است.

همچنین، مقایسه هدررفت سه خاک مورد مطالعه نشان داد که با افزایش شدت باران، اختلاف خاک‌ها از نظر حساسیت در برابر فرسایش مشهودتر بود (شکل ۲). به‌طور متوسط، خاک لوم شنی و بعد از آن خاک شنی، هدررفت بیشتری نسبت به خاک لوم داشتند. از نتایج چنین بر می‌آید که این تفاوت بین خاک‌ها را صرفاً نمی‌توان بر اساس توزیع اندازه خاکدانه‌ها توجیه کرد و لازم است عوامل دیگری نظیر چسبندگی بین

نتایج همچنین، نشان داد که اعمال بیشترین سرعت باد (۱۲ متر بر ثانیه) در شدت‌های باران ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌متر در ساعت به‌ترتیب در خاک شنی ۳/۸، ۴/۶ و ۴/۷ برابر، در خاک لوم شنی ۲/۵، ۲/۷ و ۲/۶ برابر و در خاک لوم ۲/۷، ۲/۲ و ۳/۴ برابر هدررفت خاک را نسبت به شرایط بدون وزش باد افزایش داد. این یافته با پژوهش‌های قبلی مبنی بر افزایش چند برابری شدت فرسایش در باران‌های متأثر از باد نسبت به عدم حضور باد، هم‌خوانی دارد که برای نمونه می‌توان به افزایش ۱/۵ تا ۲۲۶ درصد (Ries و همکاران، ۲۰۱۰)، ۱۱۳ تا ۱۱۰۸ درصد (Iserloh و همکاران، ۲۰۱۳)، ۳۱/۵ درصد (Marzen و همکاران، ۲۰۱۷) و ۲۳۳ تا ۱۲۶۶ درصد (Rezaei Arshad و همکاران، ۲۰۱۹) هدررفت خاک در شرایط حضور نسبت به عدم حضور باد اشاره کرد. از دلایل افزایش فرسایش بین‌شیاری در باران‌های متأثر از باد، می‌توان به مایل‌شدن زاویه برخورد قطرات با سطح و افزایش انرژی جنبشی قطرات باران اشاره کرد (Erpul و همکاران، ۲۰۰۸؛ Ries و همکاران، ۲۰۱۰؛ Iserloh و همکاران، ۲۰۱۳؛ Marzen و همکاران، ۲۰۱۵؛ Rezaei

خاکدانه‌های قابل خردشدن در شدت‌های بالای باران بوده، از طرف دیگر، چسبندگی بین ذرات آن بیشتر از دو خاک دیگر است. بنابراین، با وجود کمتر بودن مقدار MWD در حالت تر در این خاک، به دلیل مقاومت ناشی از چسبندگی بین ذرات آن، شدت جداشدن محدود شده (Mahmoodabadi و Arjmand, Sajjadi, ۲۰۱۶) و در نتیجه، هدررفت کمتری را دارد. خاک شنی با بیش از ۹۰ درصد ماسه (جدول ۱) چسبندگی چندانی نداشته، در عوض به دلیل درصد بالای ذرات اولیه درشتی که دارد، در برابر انتقال از خود مقاومت نشان می‌دهد. خاک لوم شنی در حد وسط دو خاک دیگر از نظر چسبندگی و اندازه ذرات درشت اولیه (ماسه) قرار می‌گیرد و لذا، میزان متوسطی از هدررفت را نشان می‌دهد.

آن‌ها نیز مورد توجه قرار گیرد. در واقع، انتظار می‌رود که با افزایش اندازه خاکدانه‌ها، میزان هدررفت خاک کاهش یابد، که این موضوع در MWD در حالت خشک صدق می‌کند. پژوهش‌های گذشته نیز نشان داد که خاک‌های حاوی خاکدانه‌های کوچک‌تر نسبت به افزایش شدت باران و یا سرعت باد آسیب‌پذیرتر بودند (Iserloh و همکاران، ۲۰۱۳؛ Zamani و Mahmoodabadi، ۲۰۱۳؛ Rezaei Arshad و همکاران، ۲۰۱۹). ولی با توجه به مقدار بسیار زیاد ماسه در دو خاک شنی و لوم شنی، خرد شدن خاکدانه‌ها در حالت تر چندان قابل توجه نبوده، لذا، اختلاف مقادیر MWD در دو حالت خشک و تر در این دو خاک زیاد نیست. خاک لوم به دلیل مقدار به نسبت بیشتر رس و کربن آلی، از یک طرف دارای

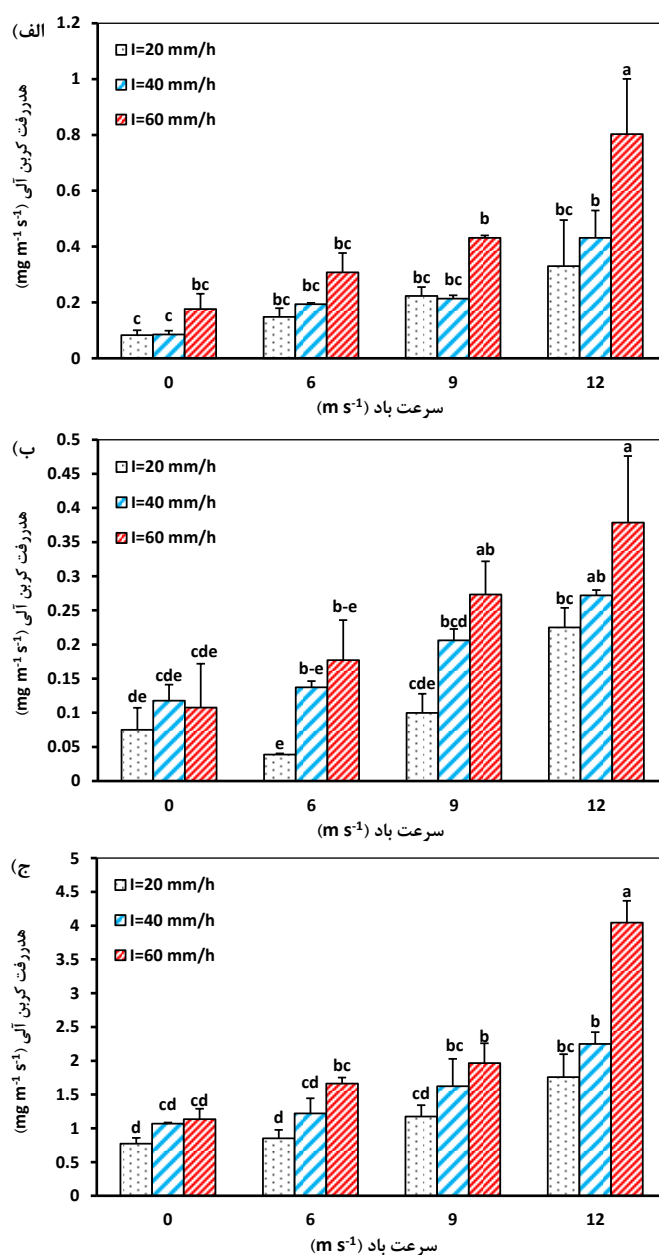


شکل ۲- مقایسه میانگین بین مقادیر شدت فرسایش بین‌شیاری در تقابل سرعت باد و شدت باران برای خاک (الف) شنی، (ب) لوم شنی و (ج) لوم. حروف مشابه در هر خاک بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد (آزمون دانکن) است.

اثر باد و باران بر هدررفت کربن آلی در خاک‌های

مختلف: نتایج مقایسه میانگین هدررفت کربن آلی ناشی از فرسایش بین‌شیاری در سطوح مختلف سرعت باد و شدت باران برای سه خاک مورد مطالعه در شکل ۳ ارائه شده است. هدررفت کربن آلی خاک‌ها بین ۰/۰۴ و ۴/۰۴ میلی‌گرم بر متر در ثانیه متغیر است که گویای دامنه وسیع تخلیه کربن آلی از سطح خاک‌ها بسته به شرایط حاکم بر سامانه فرسایشی است. نتایج نشان داد که سرعت باد و شدت باران تأثیر معنی‌داری بر هدررفت کربن آلی خاک‌ها داشته، به طوری که

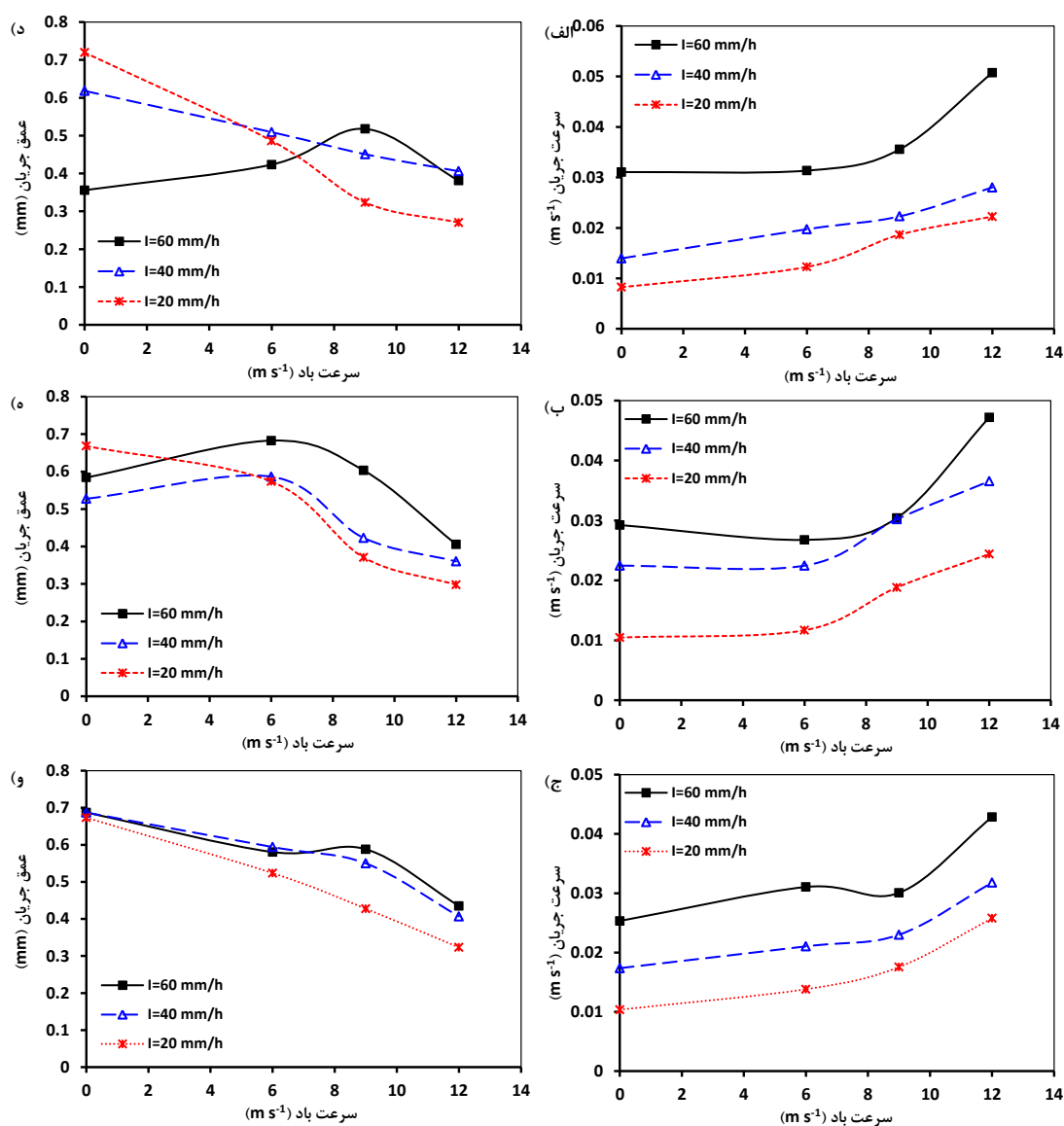
بیشترین هدررفت کربن آلی در سرعت باد ۱۲ متر بر ثانیه و شدت باران ۶۰ میلی‌متر در ساعت مشاهده شد (شکل ۳ ج). مقایسه بیشینه سرعت باد (۱۲ متر بر ثانیه) با شرایط بدون وزش باد نشان داد که هدررفت کربن آلی در شدت‌های باران ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌متر در ساعت به ترتیب ۴/۰، ۵/۱ و ۴/۶ برابر در خاک شنی، ۳/۰، ۲/۳ و ۳/۵ برابر در خاک لوم شنی و ۲/۱ و ۳/۶ برابر در خاک لوم، افزایش یافته است. این یافته دلیلی بر اهمیت سرعت باد به‌عنوان یک پارامتر کلیدی در تشدید هدررفت کربن آلی خاک‌ها است.



شکل ۳- مقایسه میانگین هدررفت کربن آلی در اثر فرسایش بین‌شیاری در تقابل سرعت باد و شدت باران برای خاک‌های الف) شنی، ب) لوم شنی و ج) لوم. حروف مشابه بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد (آزمون دانکن) است.

با افزایش سرعت باد در مقادیر بیشتر از حد آستانه، سرعت جریان به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش نشان داد که این خود دلیلی بر افزایش بیشتر فرسایش بین‌شیاری در سرعت‌های بیشتر از آستانه (شکل ۲) است. این حد سرعت آستانه برای سرعت باد، قبلاً با استفاده از همین دستگاه و به‌وسیله Rezaei Arshad و همکاران (۲۰۱۹) گزارش شده است. این پژوهشگران دریافتند با افزایش سرعت باد در مقادیر بیش‌تر از سرعت آستانه نه متر بر ثانیه، هر دو جزء بار شستشو و بار پاشمان طی رخداد‌های فرسایش ناشی از باران، افزایش قابل توجهی پیدا کرد.

اثر باد و باران بر عمق و سرعت جریان در خاک‌های مختلف: تأثیر سرعت باد و شدت باران برای خاک‌های مورد مطالعه بر روند تغییرات سرعت و عمق جریان به‌عنوان ویژگی‌های اصلی هیدرولیک جریان، در شکل ۴ ارائه شده است. به‌طورکلی، با افزایش سرعت باد به‌ویژه در سرعت‌های بیشتر از یک حد آستانه (حدود نه متر بر ثانیه)، سرعت جریان افزایش و عمق جریان کاهش یافت. همچنین، افزایش شدت باران، باعث افزایش سرعت جریان شد، اگرچه هیچ اثر واضحی بر عمق آب مشاهده نشد. در حقیقت، یک تعامل هم‌افزایی بین شدت باران و سرعت باد ایجاد شد که منجر به بیش‌تر شدن سرعت جریان شد.

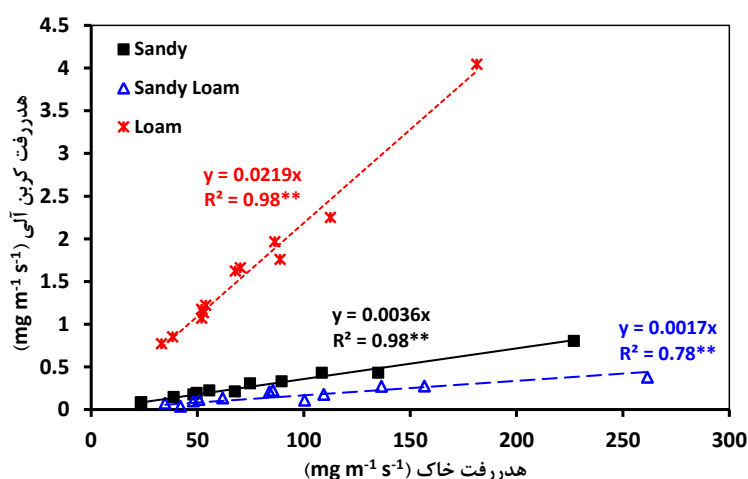


شکل ۴- ارتباط بین سرعت باد با سرعت جریان در خاک (الف) شنی، (ب) لوم شنی و (ج) لوم و همچنین ارتباط سرعت باد با عمق جریان در خاک (د) شنی، (ه) لوم شنی و (و) لوم برای سه شدت باران.

یافته نشان می‌دهد که در خاک لوم نسبت به دو خاک دیگر، مقادیر بیشتری از کربن آلی خاک در اثر فرسایش بین‌شیاری هدر رفته است. این در حالی بود که شدت فرسایش و هدررفت خاک لوم، کمتر از دو خاک دیگر بود. دلیل این موضوع را می‌توان در مقادیر غلظت کربن آلی در رسوب جستجو کرد. در جدول ۲، مقادیر هدررفت خاک و کربن آلی و نیز غلظت و نسبت غنی‌شدگی کربن آلی در رسوب حاصل از فرسایش بین‌شیاری در خاک‌های مورد مطالعه ارائه شده است. در پژوهش حاضر، هدررفت کربن آلی خاک با استفاده از دبی رسوب و غلظت کربن آلی در رسوب تعیین شد (رابطه ۵). در واقع، بالابودن غلظت کربن آلی در رسوب حاصل از فرسایش خاک لوم (جدول ۲)، دلیل اصلی افزایش هدررفت کربن آلی این خاک نسبت به دو خاک دیگر است. رابطه معکوس بین هدررفت خاک و میزان کربن آلی خاک در برخی پژوهش‌ها گزارش شده است (Shi و Schulin، ۲۰۱۸؛ Wang و همکاران، ۲۰۱۹). در این زمینه، Wang و همکاران (۲۰۱۹) دریافتند که با افزایش هدررفت خاک به دلیل کاهش سهم ذرات ریز حاوی کربن آلی در رسوب، غلظت و هدررفت کربن آلی کاهش یافت. در مقابل، Maiga-Yaleu و همکاران (۲۰۱۵) عنوان داشتند که هدررفت خاک و کربن آلی خاک از یک الگوی مشابه پیروی می‌کند.

سرعت باد از طریق افزایش انرژی جنبشی قطرات باران (Iserloh و همکاران، ۲۰۱۳) و تشدید خرد شدن خاکدانه‌ها و تشکیل و توسعه سله سطحی (Marzen و همکاران، ۲۰۱۷) می‌تواند باعث افزایش سرعت جریان متأثر از باد شود. افزایش سرعت جریان در سرعت‌های بالاتر باد، می‌تواند ظرفیت انتقال رسوب را افزایش داده (Mahmoodabadi و Sirjani، ۲۰۱۴) که منجر به هدررفت بیشتر خاک و کربن آلی شود (شکل‌های ۲ و ۳). از طرفی، کاهش عمق آب در سرعت‌های بالاتر باد می‌تواند باعث استهلاک کمتر انرژی جنبشی قطرات باران برای عبور از لایه آب شود (Zhang و همکاران، ۲۰۰۳؛ Kinnell، ۲۰۰۵؛ Rezaei Arshad و همکاران، ۲۰۱۹). لذا، شدت جداسازی و انتقال ذرات خاک در اثر برخورد قطرات باران در عمق‌های کمتر آب، افزایش می‌یابد (Kinnell، ۲۰۰۵؛ Erpul و همکاران، ۲۰۰۸).

سهم هدررفت کربن آلی از هدررفت خاک:
به‌منظور تعیین سهم هدررفت کربن آلی از میزان کل هدررفت خاک، ارتباط آن‌ها در قالب روابط خطی با عرض از مبدأ برابر با صفر ($y=ax$) برای هر خاک به‌طور جداگانه برقرار شد (شکل ۵). بر اساس شیب هر خط، سهم هدررفت کربن آلی برای خاک‌های شنی، لوم شنی و لوم به ترتیب ۰/۳۶ درصد، ۰/۱۷ درصد و ۲/۱۹ درصد از کل هدررفت خاک تعیین شد. این



شکل ۵- ارتباط خطی بین هدررفت خاک و هدررفت کربن آلی ناشی از فرسایش بین‌شیاری. به‌منظور تعیین سهم هدررفت کربن آلی نسبت به هدررفت خاک، مقدار عرض از مبدأ معادله مربوط به هر خاک، صفر در نظر گرفته شد.

خاک لوم می‌توان به مقدار بیشتر کربن آلی موجود در

از دلایل دیگر بالاتر بودن هدررفت کربن آلی در

آلی در ذرات در حال حمل به‌وسیله جریان (جدول ۲) مرتبط است. در این زمینه، Gao و همکاران (۲۰۱۸) دریافتند که در خاک‌های با مقدار کم کربن آلی، به‌دلیل بالا بودن فرسایش‌پذیری و هدررفت خاک، هدررفت کربن آلی زیاد است. فرسایش بیش‌تر آن، از خاکی با مقدار بیشتر کربن آلی کمتر بود. در واقع، هدررفت کربن آلی به دو عامل غلظت کربن آلی خاک و نیز دبی رسوب تولیدی بستگی دارد (Lal و Rimal, ۲۰۰۹).

این خاک اشاره کرد (جدول ۱). بیشتر بودن مقدار کربن آلی خاک لوم نسبت به دو خاک دیگر، از یک طرف به‌دلیل ایجاد چسبندگی بیشتر بین ذرات خاک در معرض فرسایش، باعث کاهش فرسایش بین‌شیاری و هدررفت این خاک شده است (شکل ۲). از طرف دیگر، به ازای هر واحد افزایش هدررفت خاک در خاک لوم، افزایش هدررفت کربن آلی آن بیشتر از دو خاک دیگر است (شکل ۵) که به غلظت بیشتر کربن آلی در این خاک (جدول ۱) و در نتیجه غلظت بیشتر کربن

جدول ۲- مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین هدررفت خاک و کربن آلی و همچنین غلظت و نسبت غنی‌شدگی کربن آلی در رسوب حاصل از فرسایش بین‌شیاری در خاک‌های مورد مطالعه

پارامتر	واحد	خاک شنی			خاک لوم شنی			خاک لوم میانگین	
		کمینه	بیشینه	میانگین	کمینه	بیشینه	میانگین	کمینه	بیشینه
هدررفت خاک	$\text{mgm}^{-1}\text{s}^{-1}$	۲۳/۴	۲۲۷/۰	۷۸/۵	۳۴/۸	۲۶۱/۶	۹۷/۶	۳۳/۲	۱۸۱/۴
هدررفت کربن آلی	$\text{mgm}^{-1}\text{s}^{-1}$	۰/۰۸	۰/۸۰	۰/۲۹	۰/۰۴	۰/۳۸	۰/۱۸	۰/۷۷	۴/۰۴
کربن آلی رسوب	%	۰/۳۳	۰/۴۰	۰/۳۷	۰/۱۰	۰/۲۷	۰/۲۰	۱/۹۶	۲/۳۷
غنی‌شدگی کربن آلی	-	۷/۱	۹/۴	۸/۰	۰/۵	۱/۴	۱/۰	۱/۹	۲/۳

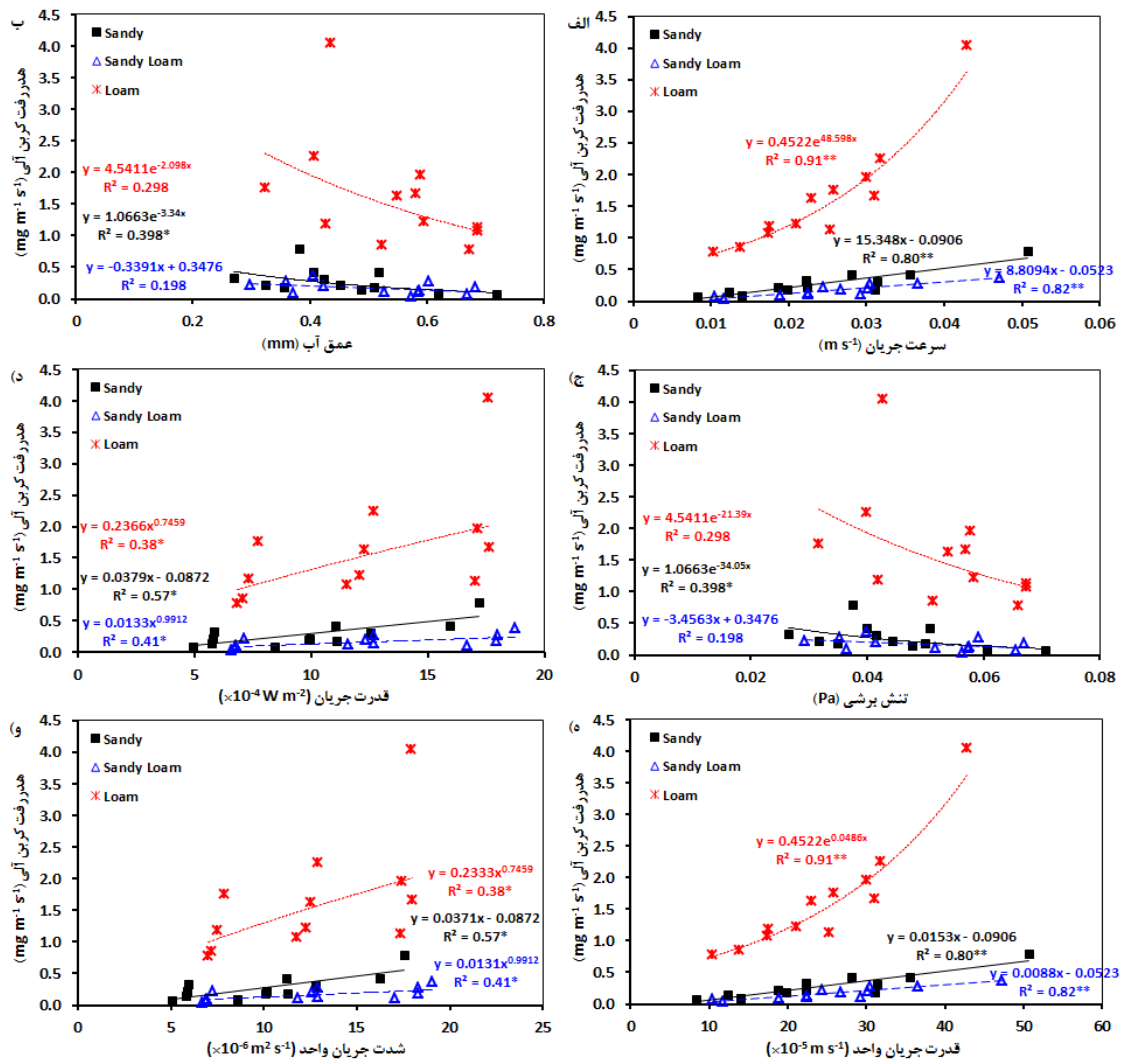
از طرف دیگر، با افزایش سرعت جریان، احتمال رسوب‌گذاری ذرات کاهش یافته و همچنین انتقال ذرات ریز غنی از کربن آلی که معمولاً سبک‌تر از ذرات درشتند، می‌تواند باعث تولید رسوب غنی از کربن آلی شود (Xiao و همکاران، ۲۰۱۸).

نسبت غنی‌شدگی کربن آلی: ارتباط بین نسبت غنی‌شدگی کربن آلی در رسوب و شدت فرسایش بین‌شیاری در خاک‌های مورد مطالعه در شکل ۷ نشان داده شده است. متوسط نسبت غنی‌شدگی کربن آلی برای خاک‌های شنی، لوم شنی و لوم به‌ترتیب ۸/۰، ۱/۰ و ۲/۱ تعیین شد (جدول ۲). مقدار بیشتر از یک این نسبت در بیشتر موارد، نشان می‌دهد که غلظت کربن آلی در رسوب تولیدی بیشتر از غلظت آن در خاک در معرض فرسایش بوده است. این یافته با مطالعات قبلی که غلظت‌های بیش‌تر کربن آلی در رسوب نسبت به خاک را گزارش کردند (Mchunu و همکاران، ۲۰۱۱؛ Li و همکاران، ۲۰۱۸؛ Shi و Schulin، ۲۰۱۸)، هم‌خوانی دارد. متوسط نسبت غنی‌شدگی در خاک لوم شنی تقریباً برابر با یک بود که البته در برخی پژوهش‌ها نظیر Liu و همکاران (۲۰۱۸) در خاک لوم سیلتی و Wang و همکاران

ارتباط جریان متأثر از باد و هدررفت کربن آلی: برای تفسیر بهتر نتایج، روابط بین پارامترهای هیدرولیکی جریان و هدررفت کربن آلی از سه خاک مورد مطالعه در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که به‌غیر از عمق آب و تنش برشی، بین سایر پارامترهای هیدرولیکی و هدررفت کربن آلی ارتباط مستقیم و در بیشتر موارد معنی‌داری برقرار بود. به‌عبارتی، سرعت باد از طریق تأثیر بر پارامترهای هیدرولیکی جریان، بر هدررفت کربن آلی اثر گذاشته است. همچنین، از بین پارامترهای هیدرولیکی مورد مطالعه، سرعت جریان و قدرت جریان واحد، با داشتن بالاترین ضرایب تعیین ($R^2 \geq 0/80$)، بهترین پارامترهای تخمین‌گر هدررفت کربن آلی خاک بودند. در پژوهش‌های گذشته، ارتباط نزدیکی بین پارامترهای هیدرولیکی جریان و شدت فرسایش و هدررفت خاک و کربن آلی گزارش شده است (Xiao و همکاران، ۲۰۱۸؛ Liu و همکاران، ۲۰۱۹). نتایج بررسی Liu و همکاران (۲۰۱۸)، نشان داد که سرعت جریان با هدررفت کربن آلی، رابطه مستقیم و معنی‌داری داشت. با افزایش سرعت جریان از یک طرف، هدررفت خاک و در نتیجه هدررفت کربن آلی افزایش می‌یابد.

همکاران (۲۰۱۹) دلیل این موضوع را به شستشوی ذرات درشت حاوی غلظت کم کربن آلی ارتباط دادند.

(۲۰۱۹) در دامنه‌های شیب‌دار، حتی نسبت غنی‌شدگی کمتر از یک گزارش شده است. Wang و



شکل ۶- ارتباط بین هدررفت کربن آلی با پارامترهای هیدرولیکی جریان شامل الف) سرعت جریان، ب) عمق آب، ج) تنش برشی، د) قدرت جریان، ه) قدرت جریان واحد، و) شدت جریان واحد، در خاک‌های مورد مطالعه

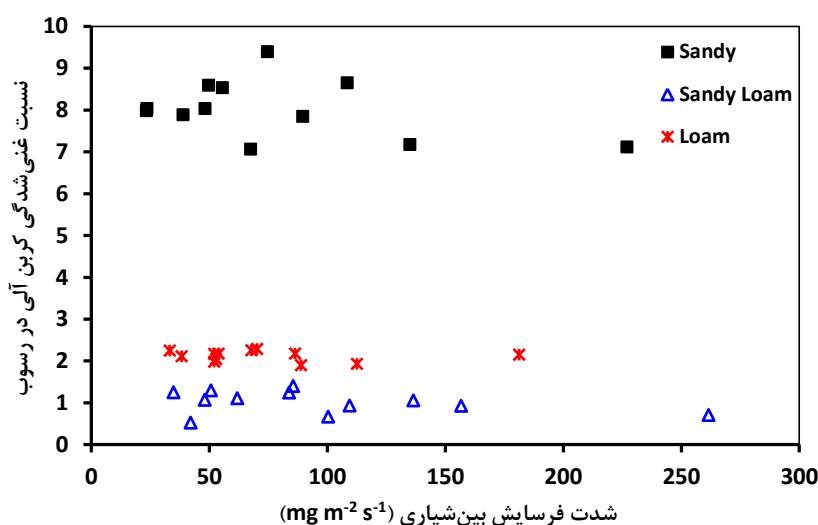
غنی‌شدگی کربن آلی در رسوب حاصل از فرسایش بین‌شیاری در خاکی شنی ۴/۵ بود که به غلظت کم کربن آلی خاک اولیه مرتبط دانسته شد. همچنین، به‌دلیل رسوبگذاری ذرات درشت و سنگین ماسه (Xiao و همکاران، ۲۰۱۸) در این خاک، احتمال انتقال ذرات ریزتر و غنی از کربن آلی به‌وسیله جریان افزایش می‌یابد (Koiter و همکاران، ۲۰۱۷).

غنی‌شدگی کربن آلی در رسوب حاصل از فرسایش خاک لوم، به غلظت زیاد کربن آلی این خاک و تشکیل ذرات ریز غنی از کربن آلی در اثر خرد و ساییده‌شدن

غنی‌شدگی کربن آلی در رسوب (مقدار بیشتر از یک)، به علت انتقال انتخابی ذرات ریز غنی از کربن آلی به‌وسیله جریان طی رخداد فرسایش بین‌شیاری رخ می‌دهد (Shi و Schulin، ۲۰۱۸؛ Xiao و همکاران، ۲۰۱۸). یکی از دلایل احتمالی غنی‌شدگی بیشتر کربن آلی در رسوب حاصل از فرسایش خاک شنی نسبت به سایر خاک‌ها، غلظت بسیار پایین کربن آلی این خاک (۰/۵ درصد، جدول ۱) و در نتیجه، مقدار بیشتر غنی‌شدگی طبق رابطه ۶ است. به‌طور مشابهی، Mchunu و همکاران (۲۰۱۱) دریافتند که نسبت

و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین ممکن است لایه‌های بیرونی خاکدانه‌ها، حاوی کربن آلی بیش‌تری نسبت به لایه‌های داخلی باشد (Liu و همکاران، ۲۰۱۹؛ Shi و Schulin، ۲۰۱۸؛ Kuhn و همکاران، ۲۰۰۹؛ Schiettecatte و همکاران، ۲۰۰۸) که در اثر سائیده شدن خاکدانه‌های پایدار، امکان تولید ذرات ریز غنی از کربن آلی را فراهم می‌سازد.

خاکدانه‌ها مرتبط است (Liu و همکاران، ۲۰۱۸). دلیل این موضوع این است که غلظت کربن آلی در طبقات مختلف ذرات ثانویه (خاکدانه‌ها)، معمولاً یکسان نیست (Wang و Mahmoodabadi، ۲۰۱۳؛ Ahmadbeigi و همکاران، ۲۰۱۹). علاوه بر این، ذرات ریز اولیه رس و سیلت معمولاً به دلیل داشتن سطح ویژه بیشتر، تمایل بیشتری برای جذب کربن آلی خاک نسبت به ذرات اولیه درشت دارند (Nadeu و همکاران، ۲۰۱۱؛ Wang



شکل ۷- ارتباط بین شدت فرسایش بین‌شیاری و نسبت غنی‌شدگی کربن آلی در رسوب تولیدی از سه خاک مورد مطالعه

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش، نشان از تأثیر معنی‌دار وزش باد در کنار بارش باران بر تشدید هدررفت خاک و کربن آلی داشت. در شرایطی که هر دو عامل فرساینده باد و باران به‌طور همزمان فعال باشند، به‌ویژه در سرعت‌های بیشتر از نه متر بر ثانیه باد، شدت فرسایش بین‌شیاری و هدررفت کربن آلی از خاک افزایش بیشتری خواهد داشت. مشخص شد که وزش باد با تأثیر بر فرساینده‌گی قطرات باران و نیز ویژگی‌های هیدرولیکی جریان، میزان هدررفت را متأثر می‌سازد، به‌نحوی که افزایش سرعت جریان و کاهش عمق لایه آب در پی افزایش سرعت باد باعث تشدید هدررفت خاک و کربن آلی شد. از بین پارامترهای هیدرولیکی، سرعت جریان بهترین تخمین‌گر هدررفت کربن آلی تعیین شد. همچنین، میزان هدررفت کربن آلی نسبت به کل تلفات خاک بسته به خاک در

همچنین، هیچ روند افزایشی یا کاهش‌ی در نسبت غنی‌شدگی کربن آلی با افزایش فرسایش بین‌شیاری مشاهده نشد (شکل ۷). در برخی از پژوهش‌ها، کاهش غنی‌شدگی کربن آلی با افزایش غلظت رسوب گزارش شده (Shi و Schulin، ۲۰۱۸) که به انتقال انتخابی ذرات ریز غنی از کربن آلی در قدرت جریان‌های کم، مرتبط دانسته شده است (Koiter و همکاران، ۲۰۱۷). عدم کاهش نسبت غنی‌شدگی با افزایش شدت فرسایش در مطالعه حاضر را می‌توان چنین توجیه کرد که در باران‌های با فرساینده‌گی کم (شدت کم فرسایش)، خاکدانه‌های سست منبع اصلی تأمین ذرات ریز غنی از کربن آلی هستند. این در حالی است که با افزایش فرساینده‌گی باران (افزایش شدت فرسایش)، خرد و سائیده شدن احتمالی خاکدانه‌های مقاوم‌تر نیز علاوه بر خاکدانه‌های حساس، در تولید ذرات ریز غنی از کربن مشارکت دارند.

ایجاد زبری در سطح از طریق مدیریت بقایای گیاهی، می‌توان از هدررفت کربن آلی جلوگیری کرد.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور برای حمایت مالی در انجام این پژوهش، در قالب طرح پژوهشی شماره ۹۷۰۲۵۶۷۱ سپاسگزاری می‌کنند.

معرض فرسایش بین ۰/۱۷ درصد تا ۲/۱۹ درصد متغیر بود. این یافته اهمیت هدررفت کربن آلی در نتیجه فرسایش در اراضی کشاورزی به‌ویژه مناطق بادخیز را بیش از پیش نشان می‌دهد، به‌طوری‌که توأم با هدررفت خاک، سالانه مقادیر قابل توجهی از کربن آلی خاک هدر می‌رود. بر اساس نتایج، پیشنهاد می‌شود که در صورت کاهش سرعت باد در این مناطق از طریق عملیات حفاظتی نظیر احداث بادشکن و یا

منابع مورد استفاده

- Begueria, S., M. Angulo-Martinez, L. Gaspar and A. Navas. 2015. Detachment of soil organic carbon by rainfall splash: experimental assessment on three agricultural soils of Spain. *Geoderma*, 245-246: 21-30.
- Brazier, R.E., L. Turnbull, J. Wainwright and R. Bol. 2014. Carbon loss by water erosion in drylands: implications from a study of vegetation change in the south-west USA. *Hydrol Process*, 28: 2212-2222.
- 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.
- Erpul, G., D. Gabriels, W. Cornelis, H. Samray and T. Guzelordu. 2008. Sand detachment under rains with varying angle of incidence. *Catena*, 72(3): 413-422.
- Erpul, G., D. Gabriels, L.D. Norton, D.C. Flanagan, C.H. Huang and S. Visser. 2013. Raindrop and flow interactions for interrill erosion with wind-driven rain. *Journal of Hydraulic Research*, 51(5): 548-557.
- Field, J.P., D.D. Breshears and J.J. Whichker. 2009. Toward a more holistic perspective of soil explicitly consider fluvial processes and interaction. *Aeolian Research*, 1(2): 9-17.
- Gao, X., Y. Hu, Q. Sun, L. Du, P. Duan, L. Yao and S. Guo. 2018. Erosion-induced carbon losses and CO₂ emissions from Loess and Black soil in China. *Catena*, 171: 533-540.
- Guo, T.L., Q.J. Wang, D.Q. Li, Z. Zhuang and L.S. Wu. 2013. Flow hydraulic characteristic effect on sediment and solute transport on slope erosion. *Catena*, 107: 145-153.
- Iserloh, T., W. Fister, M. Marzen, M. Seeger, N. Kuhn and J. Ries. 2013. The role of wind driven rain for soil erosion: an experimental approach. *Geomorphology*, 57(1): 193-201.
- Jacinthe, P.A., R. Lal, L. Owens and D. Hothem. 2004. Transport of labile carbon in runoff as affected by land use and rainfall characteristics. *Soil and Tillage Research*, 77: 111-123.
- Jakab, G., J. Szabo, Z. Szalai, E. Meszaros, B. Madarasz, C. Centeri, B. Szabo, T. Nemeth and P. Sipos. 2016. Changes in organic carbon concentration and organic matter compound of erosion-delivered soil aggregates. *Environmental Earth Sciences*, 75: 144-153.
- Kemper, W.D. and R.C. Rosenau. 1986. Aggregate stability and size distribution. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis*. Madison (WI): ASA and SSSA, 425-442.
- Kheirabadi, H., M. Mahmoodabadi, V.R. Jalali and H. Naghavi. 2018. Sediment flux, wind erosion and net erosion influenced by soil bed length, wind velocity and aggregate size distribution. *Geoderma*, 323: 22-30.
- Kinnell, P.I.A. 2005. Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: a review. *Hydrological Processes*, 19: 2815-2844.
- Koiter, A.J., P.N. Owens, E.I. Petticrew and D.A. Lobb. 2017. The role of soil surface properties on the particle size and carbon selectivity of interrill erosion in agricultural landscapes. *Catena*, 153: 194-206.
- Kuhn, N.J., T. Hoffmann, W. Schwanghart and M. Dotterweich. 2009. Agricultural soil erosion and global carbon cycle: controversy over? *Earth Surface Processes and Landforms*, 34: 1033-1038.
- 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.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123: 1-22.
- Li, G., Y. Fu, B. Li, T. Zheng, F. Wu, G. Peng and T. Xiao. 2018. Micro-characteristics of soil aggregate breakdown under raindrop action. *Catena*, 162: 354-359.
- Liu, L., Z.W. Li, X.F. Chang, X.D. Nie, C. Liua, H.B. Xiao and D.Y. Wang. 2018. Relationships of

- the hydraulic flow characteristics with the transport of soil organic carbon and sediment loss in the Loess Plateau. *Soil and Tillage Research*, 175: 291-301.
21. Liu, L., Z. Li, H. Xiao, B. Wang, X. Nie, C. Liu, L. Ni and D. Wang. 2019. The transport of aggregates associated with soil organic carbon under the rain-induced overland flow on the Chinese Loess Plateau. *Earth Surface Processes and Landforms*, 84(3): 760-774.
 22. Mahmoodabadi, M. 2017. The necessity of standardization and integration of methods for measuring water and wind erosion in Iran. 15th Iranian Soil Science Congress, 28-30 August, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran (in Persian).
 23. Mahmoodabadi, M. 2019. Environmental impacts of soil erosion. 16th Iranian Soil Science Congress, 27-29 August, University of Zanjan, Zanjan, Iran (in Persian).
 24. 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.
 25. Mahmoodabadi, M. and B. Ahmadbeigi. 2013. Dry and water-stable aggregates in different cultivation systems of arid region soils. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(8): 2997-3002.
 26. 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.
 27. 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.
 28. 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.
 29. Maïga-Yaleu, S.B., P. Chivenge, H. Yacouba, I. Guiguemde, H. Karambiri, O. Ribolzi, A. Bary and V. Chaplot. 2015. Impact of sheet erosion mechanisms on organic carbon losses from crusted soils in the Sahel. *Catena*, 126: 60-67.
 30. 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.
 31. Martinez-Mena, M., J. Lopez, M. Almagro, J. Albaladejo, V. Castillo, R. Ortiz and C. Boix-Fayos. 2012. Organic carbon enrichment in sediments: effects of rainfall characteristics under different land uses in a Mediterranean area. *Catena*, 94: 36-42.
 32. Marzen, M., T. Iserloh, M. Casper and J. Ries. 2015. Quantification of particle detachment by rain splash and wind-driven rain splash. *Catena*, 127: 135-141.
 33. Marzen, M., T. Iserloh, J.L.M. de Lima, W. Fister and J.B. Ries. 2017. Impact of severe rain storms on soil erosion: Experimental evaluation of wind-driven rain and its implications for natural hazard management. *Science of the Total Environment*, 590-591: 502-513
 34. Mchunu, C.N., S. Lorentz, G. Jewitt, A. Manson and V. Chaplot. 2011. No-till impact on soil and soil organic carbon erosion under crop residue scarcity in Africa. *Soil Science Society of America Journal*, 75: 1502-1511.
 35. Nadeu, E., J. De Vente, M. Martínez-Mena and C. Boix-Fayos. 2011. Exploring particle size distribution and organic carbon pools mobilized by different erosion processes at the catchment scale. *Journal of Soils and Sediments*, 11: 667-678.
 36. Nie, X., Z. Li, J. He, J. Huang, Y. Zhang, B. Huang, W. Ma, Y. Lu and G. Zeng. 2015. Enrichment of organic carbon in sediment under field simulated rainfall experiments. *Environmental Earth Sciences*, 74: 5417-5425.
 37. Pansu, M. and J. Gautheyrou. 2006. *Handbook of soil analysis: mineralogical, organic and inorganic methods*. Springer Science and Business Media, Germany, 26 pages.
 38. Parsons, A.J. and P.M. Stone. 2006. Effects of intra-storm variations in rainfall intensity on interrill runoff and erosion. *Catena*, 67: 68-78.
 39. Polyakov, V. and R. Lal. 2004. Soil erosion and carbon dynamics under simulated rainfall. *Soil Science*, 169(8): 590-599.
 40. Ramos, M. and J. Martinez-Casasnovas. 2006. Nutrient losses by runoff in vineyards of the Mediterranean Alt Penedes region (NE Spain). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 113: 356-363.
 41. Razali, N.M. and Y.B. Wah. 2011. Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, 2(1): 21-31.
 42. Rezaei Arshad, R., M. Mahmoodabadi, M.H. Farpoor and M. Fekri. 2019. Experimental investigation of rain-induced splash and wash processes under wind-driven rain. *Geoderma*, 337: 1164-1174.
 43. Ries, J.B., W. Fister, T. Iserloh and M. Marzen. 2010. Wind-driven rain as a new challenge for in situ rainfall simulation experiments. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2747 pages.

44. Rimal, B.K. and R. Lal. 2009. Soil and carbon losses from five different land management areas under simulated rainfall. *Soil and Tillage Research*, 106: 62-70.
45. Rodrigo Comino, J., T. Iserloh, T. Lassu, A. Cerdà, S.D. Keestra, M. Prodocimi, C. Brings, M. Marzen, M.C. Ramos, J.M. Senciales, J.D. Ruiz Sinoga, M. Seeger and J.B. Ries. 2016. Quantitative comparison of initial soil erosion processes and runoff generation in Spanish and German vineyards. *Science of the Total Environment*, 565: 1165-1174.
46. Schiettecatte, W., D. Gabriels, W.M. Cornelis and G. Hofman. 2008. Enrichment of organic carbon in sediment transport by interrill and rill erosion processes. *Soil Science Society of America Journal*, 72(1): 50-55.
47. Shahabinejad, N., M. Mahmoodabadi, A. Jalalian and E. Chavoshi. 2019. The fractionation of soil aggregates associated with primary particles influencing wind erosion rates in arid to semiarid environments. *Geoderma*, 356: 113-125.
48. Shi, P. and R. Schulin. 2018. Erosion-induced losses of carbon, nitrogen, phosphorus and heavy metals from agricultural soils of contrasting organic matter management. *Science of the Total Environment*, 618: 210-218.
49. Sirjani, E. and M. Mahmoodabadi. 2014. Effects of sheet flow rate and slope gradient on sediment load. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(1): 203-210.
50. Visser, S.M., G. Sterk and O. Ribolzi. 2004. Techniques for simultaneous quantification of wind and water erosion in semi-arid regions. *Journal of Arid Environments*, 59: 699-717.
51. 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 Society of America Journal*, 37: 29-38.
52. Wang, G., B. Wu, L. Zhang, H. Jiang and Z. Xu. 2014. Role of soil erodibility in affecting available nitrogen and phosphorus losses under simulated rainfall. *Journal of Hydrology*, 514: 180-191.
53. Wang, L., H. Huang, N.F. Fang, Y.H. Niu, T.W. Wang and Z.H. Shi. 2019. Selective transport of soil organic and inorganic carbon in eroded sediment in response to raindrop sizes and inflow rates in rainstorms. *Journal of Hydrology*, 575: 42-53.
54. Wang, W., S. Yin, Y. Xie, B. Liu and Y. Liu. 2016. Effects of four storm patterns on soil loss from five soils under natural rainfall. *Catena*, 141: 56-65.
55. Wei, S., X. Zhang, A. Neil, B. McLaughlin, X. Chen, S. Jia and A. Liang. 2017. Impact of soil water erosion processes on catchment export of soil aggregates and associated SOC. *Geoderma*, 294: 63-69.
56. Whicker, J.J., J.E. Pinder and D.D. Breshears. 2006. Increased wind erosion from forest wildfire: Implications for contaminant related risks. *Journal of Environmental Quality*, 35: 468-478.
57. Xiao, H., G. Liu, M.A.M. Abd-Elbasit, X.C. Zhang, P.L. Liu, F.L. Zheng, J.Q. Zhang and F.N. Hu. 2017. Effects of slaking and mechanical breakdown on disaggregation and splash erosion. *European Journal of Soil Science*, 68(6): 797-805.
58. Xiao, H., Z. Li, X. Chang, B. Huang, X. Nie, C. Liu, L. Liu, D. Wang and J. Jiang. 2018. The mineralization and sequestration of organic carbon in relation to agricultural soil erosion. *Geoderma*, 329: 73-81.
59. Yan, H., S. Wang, C. Wang, G. Zhang and N. Patel. 2005. Losses of soil organic carbon under wind erosion in China. *Global Change Biology*, 11: 828-840.
60. Yasar Korkanca, S.M. and G. Dorumb. 2019. The nutrient and carbon losses of soils from different land cover systems under simulated rainfall conditions. *Catena*, 172: 203-211.
61. Zamani, S. and M. Mahmoodabadi. 2013. Effect of particle-size distribution on wind erosion rate and soil erodibility. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 59(12): 1743-1753.
62. Zamani, S., M. Mahmoodabadi, N. Yazdanpanah and M.H. Farpoor. 2020. Meteorological application of wind speed and direction linked to remote sensing images for the modeling of sand drift potential and dune morphology. *Meteorological Applications*, 27: 18-31.
63. Zhang, G.H., B.Y. Liu, M.A. Nearing, C.H. Huang and K.L. Zhang. 2002. Soil detachment by shallow flow. *Trans ASAE*, 45: 351-357.
64. Zhang, G.H., B.Y. Liu, G.B. Liu, X.W. He and M.A. Nearing. 2003. Detachment of undisturbed soil by shallow flow. *Soil Science Society of America Journal*, 66: 1475-1483.
65. Zhang, S., X. Zhang, Z. Liu, Y. Sun, W. Liu, L. Dai and S. Fu. 2014. Spatial heterogeneity of soil organic matter and soil total nitrogen in a Mollisol watershed of Northeast China. *Environmental Earth Sciences*, 72(1): 275-288.
66. Zhang, X.C. and Z.L. Wang. 2017. Interrill soil erosion processes on steep. *Journal of Hydrology*, 548: 652-664.
67. Zhang, X.J., G. Liu and F. Zhang. 2018. Understanding erosion processes using rare earth element tracers in a preformed interrill-rill system. *Science of the Total Environment*, 625: 920-927.