

تأثیر همزمان وزش باد و بارش باران بر پارامترهای هیدرولیکی جریان ورقه‌ای و شدت فرسایش بین‌شیاری

روح‌اله رضایی‌ارشد^۱ و *مجید محمودآبادی^۲

^۱ دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشجویار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه شهید باهنر کرمان
تاریخ دریافت: ۹۶۷/۸/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۲/۱۷

چکیده

سابقه و هدف: بسیاری از رگبارهای طبیعی با وزش باد همراه است. این در حالی است که تاکنون پژوهش جامعی در زمینه نقش باد در فرسایش ناشی از باران در شرایط آزمایشگاهی در ایران گزارش نشده است. پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر سرعت‌های مختلف باد در تقابل با شدت‌های مختلف باران بر پارامترهای هیدرولیکی جریان ورقه‌ای و همچنین شدت فرسایش بین‌شیاری در چند خاک زراعی انجام شد. به این منظور، از یک دستگاه شبیه‌ساز هم‌زمان باد، باران و رواناب که برای اولین بار در کشور طراحی و ساخته شده است، استفاده گردید.

مواد و روش‌ها: ترکیب‌های مختلف از چهار سرعت باد شامل صفر، ۶، ۹ و ۱۲ متر در ثانیه و سه شدت باران شامل ۳۰، ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر در ساعت بر روی سه خاک زراعی با بزرگ‌ترین اندازه ذرات ۲، ۴/۷۵ و ۸ میلی‌متر، هر یک در سه تکرار ایجاد شد. پارامترهای هیدرولیکی جریان شامل سرعت جریان، عمق لایه آب، تنش برشی، قدرت جریان و قدرت جریان واحد و همچنین شدت فرسایش بین‌شیاری اندازه‌گیری شد. در ادامه، تأثیر سرعت باد بر پارامترهای هیدرولیکی جریان ورقه‌ای و همچنین اثر این پارامترها بر شدت فرسایش بین‌شیاری مورد ارزیابی قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج این پژوهش نشان داد که بسته به سرعت باد، شدت فرسایش بین‌شیاری بین ۰/۰۲۱ تا ۰/۲۲ گرم بر مترمربع در ثانیه متغیر است. در این پژوهش، سرعت ۶ تا ۹ متر بر ثانیه باد به‌عنوان حد آستانه تعیین شد. با افزایش سرعت باد به‌ویژه در سرعت‌های بیش از این آستانه، سرعت و قدرت جریان واحد افزایش و در مقابل، عمق جریان و تنش برشی کاهش یافتند. همچنین با افزایش سرعت باد تا مقدار آستانه، قدرت جریان ابتدا افزایش و در ادامه کاهش پیدا کرد. نتایج همچنین گویای این مطلب بود که افزایش سرعت باد از طریق تأثیر بر پارامترهای هیدرولیکی جریان ورقه‌ای، شدت فرسایش بین‌شیاری را کنترل می‌کند. با افزایش سرعت و قدرت جریان واحد، شدت فرسایش بین‌شیاری افزایش یافت در حالی که، افزایش عمق لایه آب و همچنین افزایش تنش برشی و قدرت جریان، به‌دلیل صرف بخشی از انرژی قطرات باران برای عبور از لایه آب، باعث کاهش شدت فرسایش بین‌شیاری شد. در واقع، رابطه عکس سرعت-عمق جریان، سایر پارامترهای هیدرولیکی را نیز تحت تأثیر قرار داد. از طرفی، با افزایش اندازه خاکدانه‌های در معرض فرسایش، عمق لایه آب افزایش و در مقابل، سرعت و قدرت جریان واحد کاهش و در نتیجه شدت فرسایش بین‌شیاری کاهش یافت.

* مسئول مکاتبه: mahmoodabadi@uk.ac.ir

نتیجه‌گیری: یافته‌های این پژوهش نشان داد که در رگبارهای متأثر از وزش بادهای به‌ویژه در سرعت‌های بیش‌تر از سرعت آستانه باد، به‌دلیل افزایش فرساینده‌ی باران، افزایش سرعت جریان رواناب و همچنین کاهش عمق لایه آب، شدت فرسایش بین‌شیاری تشدید می‌شود. همچنین مشخص گردید که با اعمال مدیریت صحیح خاک در اراضی کشاورزی در راستای افزایش اندازه و پایداری خاکدانه‌های موجود در سطح و در نتیجه افزایش ضریب زبری، می‌توان سرعت جریان رواناب و همچنین شدت فرسایش را کاهش داد. از منظر دیگر، وجود خاکدانه‌های درشت و پایدار در سطح، با افزایش عمق لایه آب موجود در سطح از برخورد مستقیم قطرات باران و تشدید فرسایش بین‌شیاری جلوگیری می‌کند. یافته‌های این پژوهش اهمیت و لزوم انجام آزمایش‌های بیش‌تر در زمینه فرآیندها و مکانیسم‌های فرسایش ناشی اثر هم‌زمان وزش باد و بارش باران را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: باران متأثر از باد، سرعت جریان، عمق آب، سرعت باد، شدت باران

مقدمه

فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین جنبه‌های تخریب اراضی و به‌عنوان پدیده‌ای تهدیدآمیز محسوب می‌شود که قدرت باروری خاک و کیفیت آب را کاهش داده و به‌طور مستقیم بر تولید محصول و به‌طور غیرمستقیم بر افزایش خطر سیل، رسوبگذاری در پشت مخازن سدها، زمین لغزش و نیز تغییرات اقلیمی اثر می‌گذارد (۴۳، ۵۴ و ۶۴). با توجه به وضعیت حاد و بحرانی فرسایش خاک در ایران، انجام فعالیت‌های گسترده پژوهشی ضروری به‌نظر می‌رسد. از منظر فرآیندی، فرسایش خاک دارای سه مرحله شامل جداشدن، انتقال و رسوبگذاری ذرات خاک به‌وسیله عوامل فرساینده باد، باران و یا رواناب است (۱۰، ۳۹ و ۵۲). فرسایش بین‌شیاری یکی از انواع رایج فرسایش ناشی از باران در اراضی کشاورزی است (۳۱) که تأثیر معنی‌داری بر هدررفت خاک به‌ویژه ذرات ریز و حاصلخیز دارد و می‌تواند باعث آلودگی آب‌های سطحی از طریق مواد شیمیایی منتقل شده از اراضی کشاورزی گردد (۵). در این نوع فرسایش، جداشدن ذرات خاک در اثر برخورد قطرات باران و انتقال این ذرات از طریق پاشمان و جریان ورقه‌ای کم‌عمق اتفاق می‌افتد (۴ و ۳۵). اخیراً در

پژوهش‌های فرسایش خاک، به‌منظور بررسی دقیق‌تر فرآیندهای جداشدن و انتقال ذرات خاک در اثر بارندگی و یا رواناب، فرسایش بین‌شیاری از فرسایش شیاری تفکیک شده است (۳۶، ۵۵ و ۶۳). از این‌رو، لازم است طراحی و انجام آزمایش‌های مربوط به فرسایش بین‌شیاری به‌نحوی صورت پذیرد که فرآیند جداشدن صرفاً در اثر برخورد قطرات باران و انتقال آن‌ها به‌وسیله پاشمان و یا جریان رواناب کم‌عمق انجام شود و جریان ورقه‌ای رواناب در جداکردن ذرات نقشی نداشته باشد (۳ و ۳۰).

به‌طورکلی فرسایش بین‌شیاری تحت تأثیر عوامل متعددی مانند ویژگی‌های باران (قطر قطرات، انرژی جنبشی، مقدار و شدت باران)، ویژگی‌های هیدرولیک جریان سطحی (سرعت و عمق جریان)، ویژگی‌های خاک (بافت، توزیع اندازه خاکدانه، مقاومت برشی خاک، رطوبت اولیه) و شرایط سطحی زمین (شیب، پوشش گیاهی، پستی و زبری سطح) قرار می‌گیرد (۲۸ و ۳۵). ویژگی‌های باران تعیین‌کننده قدرت فرساینده‌ی باران و جریان سطحی ناشی از آن می‌باشد، در حالی‌که ویژگی‌های خاک و شرایط سطحی آن، جدایش‌پذیری و انتقال‌پذیری ذرات را

تحت تأثیر قرار می‌دهد (۱۱). در فرسایش بین‌شیاری قطرات باران و جریان ورقه‌ای حاصل از باران دو عامل مهم در جداسازی و انتقال ذرات از سطح خاک می‌باشند (۵۰). در فرسایش بین‌شیاری، جریان ورقه‌ای نقش انتقال ذرات جدا شده در اثر برخورد قطرات باران را ایفا می‌کند (۳۵). عمق جریان، سرعت جریان و پارامترهای هیدرولیکی جریان (سرعت و عمق جریان، تنش برشی، قدرت جریان و قدرت جریان واحد) برای تعیین قدرت فرساینده‌گی جریان کم‌عمق سطحی (ورقه‌ای) به‌کار می‌رود (۵۰). در سطوح بین‌شیاری به‌علت کم بودن درجه و طول شیب و تنش برشی کم جریان، جداسازی ذرات توسط جریان ورقه‌ای ناچیز است (۳۵).

سرعت جریان یکی از مهم‌ترین پارامترهای هیدرولیکی مؤثر بر شدت فرسایش است که همبستگی بالای با فرسایش و تلفات خاک دارد (۲۱ و ۳۶). در واقع سرعت جریان هم تحت تأثیر عوامل هیدرولیکی (دبی جریان، عمق جریان و شیب) و هم شرایط سطح خاک (پوشش گیاهی و زبری) قرار می‌گیرد (۶۰ و ۶۲). نتایج برخی پژوهش‌ها نشان داده که با افزایش سرعت جریان، شدت جدا شدن ذرات به‌طور غیرخطی افزایش می‌یابد (۵۸ و ۵۹). به‌طور کلی در جریان ورقه‌ای، پارامترهای شیب، سرعت و عمق جریان به‌عنوان پارامترهای هیدرولیکی اصلی کنترل‌کننده جداسازی ذرات خاک در نظر گرفته می‌شود (۵۲). با ترکیب این پارامترها، دیگر شاخص‌های فرساینده جریان مانند تنش برشی (نیروی کششی اعمال شده توسط جریان بر روی بستر)، قدرت جریان (انرژی جریان پراکنده شده در بستر توسط جریان) و قدرت جریان واحد (میزان انرژی پراکنده شده در واحد زمان و واحد جرم جریان) را می‌توان به‌دست آورد (۶۰).

علاوه بر موارد بالا، اثر متقابل اندازه قطرات و عمق لایه آب بر جداسازی و انتقال ذرات خاک جدا شده توسط قطرات باران توسط پژوهشگران زیادی مورد بررسی قرار گرفته است (۳۲، ۳۳ و ۵۳). در عمق‌های بیش‌تر از عمق بحرانی با افزایش عمق آب، شدت پاشمان ذرات خاک به‌صورت نمایی کاهش می‌یابد (۳ و ۵۳). نتایج پراسر و راستومجی (۲۰۰۰) نیز نشان داد که وقتی عمق جریان به بیش از سه برابر قطر قطرات باران برسد، تأثیر قطره باران در جداسازی ذرات خاک ناچیز می‌شود (۴۴). همچنین شدت انتقال رسوب نیز متأثر از عمق آب است به‌طوری‌که، اگر عمق لایه آب به اندازه قطر یک قطره (حدود دو میلی‌متر) باشد انتقال رسوب به حداکثر می‌رسد و با افزایش عمق آب تا به اندازه قطر سه قطره، انتقال ذرات به‌صورت خطی شروع به کاهش می‌کند (۳۲).

در شرایط عدم حضور باد، قطرات باران معمولاً به‌صورت عمودی با سطح خاک برخورد می‌کنند. این در حالی است که در شرایط طبیعی بیش‌تر بارندگی‌ها به‌صورت رگباری و همراه با وزش بادهای تند رخ می‌دهد. قطرات در بارش باران متأثر از باد با توجه به سرعت و جهت وزش باد نه به‌صورت عمودی بلکه مایل بر سطح برخورد می‌کند (۴۹). به‌عبارتی در شرایط وزش باد، هم سرعت سقوط قطرات و هم زاویه برخورد آن‌ها با سطح تحت تأثیر قرار گرفته و از این منظر، هیدرولیک جریان سطحی و شدت فرسایش خاک متفاوت از شرایط بدون وزش باد است. از همین‌رو، در بین پژوهشگران تأثیر باد بر قطرات باران و جدا شدن ذرات توسط این قطرات مورد توجه قرار گرفته است (۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۲۷ و ۳۸). یافته‌های پژوهشگران نشان می‌دهد که سرعت و جهت باد از طریق تأثیر بر زاویه سقوط (۸)، سرعت

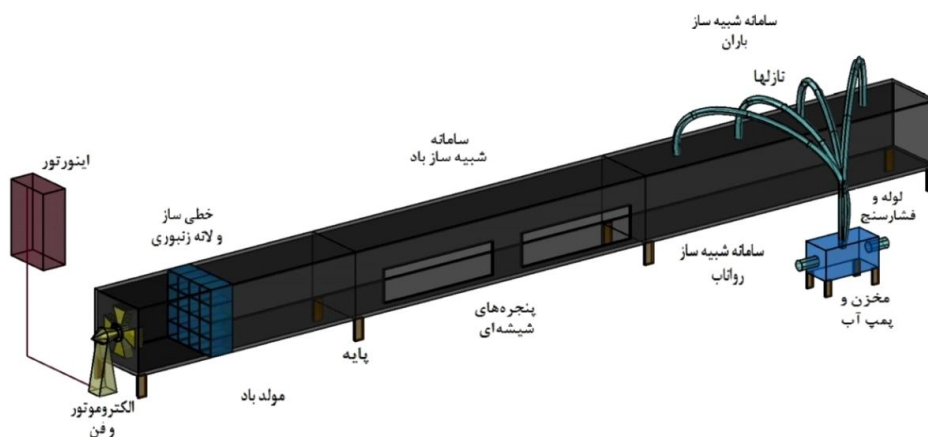
فرآیندهای فرسایش ناشی از باران در شرایط وزش باد، نیاز به انجام آزمایش‌های بیش‌تر بدیهی است. بنابراین، این پژوهش با هدف بررسی تأثیر سرعت‌های مختلف باد در تقابل با شدت‌های مختلف باران بر پارامترهای هیدرولیکی جریان از یک طرف و تأثیر این پارامترها بر شدت فرسایش بین‌شیاری از طرف دیگر انجام شد. در این راستا، رفتار سه خاک با توزیع اندازه ذرات مختلف و با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز هم‌زمان باد، باران و رواناب در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

معرفی شبیه‌ساز هم‌زمان باد، باران و رواناب: در این پژوهش برای بررسی تأثیر هم‌زمان وزش باد و بارش باران بر فرسایش بین‌شیاری و پارامترهای هیدرولیکی جریان ورقه‌ای، از دستگاه شبیه‌ساز هم‌زمان باد، باران و رواناب (شکل ۱) موجود در آزمایشگاه فرسایش و حفاظت خاک دانشگاه شهید باهنر کرمان استفاده شد. این دستگاه که برای اولین بار در کشور طراحی و ساخته شده، شامل سامانه‌های شبیه‌ساز باد، باران و رواناب است که این امکان را فراهم می‌سازد تا بتوان به‌طور هم‌زمان اثر همه عوامل فرساینده را بر فرسایش آبی و بادی مطالعه نمود. دستگاه یادشده قابلیت‌های منحصربه‌فردی دارد به‌طوری‌که قادر است شدت‌های مختلف باران بین ۲۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر در ساعت را در حضور بادهایی با سرعت بین ۰/۵ تا ۳۰ متر در ثانیه (معادل ۱۷۵ کیلومتر در ساعت در ارتفاع ۱۰ متر) بر روی سطحی از خاک تا طول ۷ متر را شبیه‌سازی نماید (۲۹).

سقوط (۱۹ و ۲۰)، قطر قطره (۷، ۱۹ و ۲۰) و در نتیجه، انرژی جنبشی قطرات باران (۱۳) بر فرسایش خاک تأثیر می‌گذارد. در پژوهشی که ارپل و همکاران (۲۰۰۳b) بر روی انتقال ذرات جداسده به‌وسیله باران انجام دادند، دریافتند که در شرایط عدم حضور باد، ذرات رسوب حداکثر تا مسافت ۰/۴ متر منتقل شد، در حالی‌که در حضور سرعت‌های ۶ و ۱۰ متر بر ثانیه باد، مسافت انتقال ذرات به‌ترتیب بین سه تا پنج متر افزایش یافت (۱۶). همچنین این پژوهشگران گزارش کردند که جریان باد باعث تأخیر در شروع جریان سطحی می‌شود که از این طریق باعث جداسازی بیش‌تر ذرات توسط قطرات باران می‌شود (۱۵). جریان باد با تغییر زاویه برخورد قطرات به سطح خاک و لایه آب جاری بر سطح، قدرت فرسایندهی قطرات باران را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (۹، ۱۲، ۱۵، ۱۶، ۴۵). ارپل و همکاران (۲۰۰۴) دریافتند که سرعت و جهت باد نه تنها بر انرژی قطرات در حال سقوط، بلکه بر هیدرولیک جریان‌های کم‌عمق سطحی از طریق تغییر در زبری سطح، اثر دارد (۱۴).

کشور ایران همواره در معرض وزش بادهای شدید بوده که این بادهای رگبارهای منجر به وقوع فرسایش را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. در واقع، سرعت‌های مختلف باد بر قدرت فرسایندهی قطرات باران و پارامترهای هیدرولیکی جریان سطحی و همچنین شدت فرسایش بین‌شیاری تأثیرگذار است. این در حالی است که تاکنون پژوهش‌های جامعی در زمینه فرسایش بین‌شیاری در اثر باران متأثر از باد در ایران انجام نشده و این در حالی است که پژوهش‌های انجام شده در دنیا نیز در این زمینه اندک بوده و برای شناخت بیش‌تر و بهتر



شکل ۱- نمایی از دستگاه شبیه‌ساز هم‌زمان باد، باران و رواناب مورد استفاده در این پژوهش.

Figure 1. A schematic of the simultaneous wind, rain and runoff simulator used in this study.

به‌طور معمول بیش‌تر از رخدادهای بدون وزش باد است. به‌طور هم‌زمان، با استفاده از سیستم دمنده، سرعت‌های مختلف باد ایجاد می‌شود. همچنین در کف این تونل قابلیت نصب سینی و یا تشتک به‌منظور قرار دادن نمونه خاک و ایجاد جریان رواناب وجود دارد.

آماده‌سازی نمونه‌های خاک و انجام آزمایش: برای انجام آزمایش‌ها، نمونه‌برداری از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری از سطح یک خاک کشاورزی انجام شد. معیار تهیه خاک، تفاوت در توزیع اندازه خاکدانه بود (۳۴ و ۵۲) که به این منظور، بعد از هوا خشک کردن خاک، سپس به‌منظور تهیه خاک‌هایی با توزیع اندازه ذرات متفاوت از الک‌های ۲، ۴/۷۵ و ۸ میلی‌متر استفاده شد. به این ترتیب، سه نمونه با حداکثر اندازه ذرات یادشده تهیه شد (۳۴). ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه شامل بافت به روش هیدرومتری، جرم مخصوص ظاهری به روش کلوخه، قابلیت هدایت الکتریکی (EC) به‌وسیله هدایت‌سنج الکتریکی، pH به کمک دستگاه pH متر، میزان کربن آلی با استفاده از روش اکسایش تر و کربنات کلسیم معادل از روش تیتراسیون به‌دست آمد.

این دستگاه دارای طول کل ۱۲ متر و سطح مقطع مربعی‌شکل با عرض و ارتفاع یکسان و برابر با ۸۰ سانتی‌متر است. در این شبیه‌ساز، آب مورد نیاز بارش با استفاده از پمپ و از طریق سیستم آبرسانی از مخزن تا نازل‌ها انتقال داده می‌شود. برای تنظیم فشار و دبی آب خروجی نازل‌ها از یک فشارسنج استفاده می‌شود. صفحه بارش از تعدادی نازل تشکیل شده که در فواصل مشخصی در ارتفاع ۸۰ سانتی‌متری از کف و در سقف تونل نصب شده است. با تغییر فشار آب ورودی به نازل‌ها، تعداد نازل‌های فعال و فواصل بین آن‌ها، شدت بارش قابل تنظیم می‌باشد. برای سه شدت ۳۰، ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر در ساعت باران و بسته به سرعت باد، حداقل ضریب یکنواختی باران (بر اساس ضریب کریستین‌سن)، به‌ترتیب ۸۶/۷۶، ۸۹/۷۵ و ۸۷/۴۷ درصد تعیین شد (۳) که بیانگر توزیع مناسب باران در تمام سطح تشتک مخصوص اندازه‌گیری فرسایش بین‌شیاری خاک می‌باشد. علت انتخاب این شدت‌های باران این بود که در شرایط طبیعی نیز، شدت باران برای هر منطقه یکسان نبوده و به همین دلیل سطوح مختلف شدت اعمال گردید. از طرفی، در رگبارهای هم‌زمان با وزش باد، شدت باران

استفاده از شدت جریان واحد و سرعت جریان، عمق جریان طبق رابطه زیر محاسبه گردید (۵۲):

$$D = q/V \quad (۱)$$

که در آن، D عمق جریان (متر)، q شدت جریان واحد (مترمربع در ثانیه) و V سرعت جریان (متر بر ثانیه) است. سایر پارامترهای هیدرولیکی یعنی تنش برشی، قدرت جریان و قدرت جریان واحد به ترتیب از طریق رابطه‌های ۲ تا ۴ محاسبه شد.

$$\tau = \rho g D S \quad (۲)$$

که در آن، τ تنش برشی (پاسکال)، ρ چگالی مخصوص آب، g شتاب گرانش (متر بر مجذور ثانیه)، S شیب بر حسب متر بر متر است (۴۲ و ۵۲).

$$\Omega = \rho g D S V \quad (۳)$$

که در آن، Ω قدرت جریان (وات بر مترمربع) است (۵۹). همچنین، قدرت جریان واحد (متر بر ثانیه) نیز از رابطه زیر تعیین شد (۵۲ و ۵۶):

$$U = V S \quad (۴)$$

نمونه‌های رواناب حاوی رسوب، جمع‌آوری و پس از خشک نمودن در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد، غلظت رسوب در زمان‌های مختلف رخداد تعیین شد و در پایان شدت فرسایش بین‌شیاری برای شرایط پایدار محاسبه گردید. شرایط پایدار مربوط به وضعیتی است که تغییرات دبی رسوب با زمان تقریباً ثابت باقی می‌ماند (۳ و ۲۵).

تجزیه و تحلیل داده‌ها: در پایان، اثر سه عامل خاک، شدت باران و سرعت باد بر پارامترهای هیدرولیکی جریان و نیز شدت فرسایش بین‌شیاری مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. به این منظور، تجزیه

تیمارهای مورد مطالعه: آزمایش‌ها به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار انجام شد. فاکتورهای مورد مطالعه شامل سرعت‌های مختلف باد، شدت‌های متفاوت باران و خاک‌های با توزیع اندازه ذرات متفاوت است که هر یک در سه تکرار اعمال شد. بنابراین، تیمارهای مورد مطالعه شامل ترکیبی از چهار سرعت باد (صفر یا بدون حضور باد به عنوان شاهد، ۶، ۹ و ۱۲ متر بر ثانیه، به ترتیب معادل صفر، ۳۵، ۵۲ و ۷۰ کیلومتر بر ساعت در ارتفاع ۱۰ متری)، سه شدت باران (۳۰، ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر در ساعت) و سه خاک با توزیع اندازه ذرات ثانویه متفاوت (با حداکثر اندازه ذرات ۲، ۴/۷۵ و ۸ میلی‌متر) می‌باشد.

نحوه انجام آزمایش‌ها: برای اندازه‌گیری فرسایش بین‌شیاری، از یک تشتک مخصوص و از جنس آهن گالوانیزه استفاده شد. این تشتک دارای طول یک متر و عرض ۰/۳۵ متر بوده و عمق کل آن ۷ سانتی‌متر می‌باشد که به منظور زهکشی نمونه خاک ۲ سانتی‌متر کف این تشتک توسط یک ورقه مشبک جدا شده و ۵ سانتی‌متر بالایی آن به منظور قرار گرفتن نمونه خاک در نظر گرفته شد. برای انجام هر آزمایش، خاک مورد نظر به تشتک مخصوص منتقل و به طور کامل تسطیح شد، سپس اشباع تدریجی هر نمونه از زیر انجام شده و نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در حالت اشباع نگهداری می‌شد (۳۷ و ۵۲). پس از تخلیه زهکش، تشتک به داخل سامانه شبیه‌ساز هم‌زمان باد، باران و رواناب منتقل شده و در شیب ۰/۵ درصد تنظیم و در ادامه، تیمارهای مورد مطالعه روی آن اعمال گردید. با توجه به زمان رسیدن به شرایط پایدار، مدت زمان برای انجام هر آزمایش ۳۰ دقیقه در نظر گرفته شد. در هر آزمایش، رواناب حاوی رسوب خروجی از تشتک مخصوص برای پنج دقیقه ابتدایی آزمایش هر یک دقیقه یک‌بار و در ادامه تا پایان آزمایش هر پنج دقیقه یک‌بار جمع‌آوری شد (۳). سرعت جریان به روش رنگ‌سنجی در چندین تکرار تعیین شد (۳۶ و ۵۲). با

واریانس با استفاده از نرم افزار SPSS و مقایسه میانگین از طریق آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. به علاوه، برای هر خاک به طور جداگانه اثر سرعت باد در شدت های مختلف باران بر روند تغییرات پارامترهای هیدرولیکی جریان نمایش داده شد. از طرفی، تأثیر هر یک از پارامترهای هیدرولیکی بر شدت فرسایش بین شیار به صورت ابر نقاط ترسیم و بهترین معادله به همراه ضریب تعیین (R^2) ارائه گردید.

نتایج و بحث

ویژگی های خاک های مورد مطالعه: جدول ۱ برخی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک های مورد مطالعه را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، در خاک های مورد مطالعه، درصد شن بیش تر از رس و سیلت بوده و بافت خاک در کلاس لوم شنی قرار می گیرد. مقدار pH در هر سه خاک در محدوده خشتی

قرار دارد. خاک ها دارای مقدار قابل توجهی کربنات کلسیم معادل بوده (بالای ۱۰ درصد) و هدایت الکتریکی کم تر از چهار دسی زیمنس بر متر است، بنابراین خاک های مورد مطالعه، در محدوده خاک های کم شور هستند. میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت خشک، در سه خاک D_{2mm} ، $D_{4.75mm}$ و D_{8mm} به ترتیب برابر با ۰/۲۰۶، ۰/۴۵۵ و ۱/۰۸۲ میلی متر به دست آمد. لازم به ذکر است که اختلاف بین توزیع اندازه ذرات سه نمونه خاک مورد مطالعه، از نظر آماری در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار بود. این در حالی بود که به جز کربن آلی، در سایر ویژگی های فیزیکی و شیمیایی بین سه خاک یاد شده، تفاوت معنی داری مشاهده نشد. کربن آلی اثر خود را از طریق تأثیر بر اندازه و پایداری خاکدانه بروز می دهد (۵۲، ۳۴ و ۵۵) و از این رو، توزیع اندازه ذرات مهم ترین ویژگی خاک بود که به عنوان عامل خاک، بر نتایج تأثیر داشت.

جدول ۱- برخی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک های مورد مطالعه.

Table 1. Some physical and chemical properties of the soils.

ویژگی خاک Soil property	خاک با حداکثر اندازه ذرات ۲ میلی متر (D_{2mm})	خاک با حداکثر اندازه ذرات ۴/۷۵ میلی متر ($D_{4.75mm}$)	خاک با حداکثر اندازه ذرات ۸ میلی متر (D_{8mm})
pH	7.69	7.83	7.68
EC ($dS m^{-1}$)	3.35	3.7	3.75
کربنات کلسیم معادل Calcium carbonate eq. (%)	14	13.5	13.5
جرم مخصوص ظاهری Bulk density ($g cm^{-3}$)	1.47	1.47	1.47
کربن آلی OC (%)	0.195	0.58	0.39
شن Sand (%)	55.3	69.4	73.4
سیلت Silt (%)	30.9	20.0	16.6
رس Clay (%)	13.8	10.6	10.0
میانگین وزنی قطر خاکدانه MWD (mm)	0.206	0.455	1.082

برشی به ترتیب ۰/۰۲۶، ۰/۰۳۶ و ۰/۰۳۸ پاسکال و مقدار قدرت جریان به ترتیب $۷/۹ \times 10^{-۴}$ ، $۸/۱ \times 10^{-۴}$ و $۸/۲ \times 10^{-۴}$ وات بر مترمربع تعیین شد. با توجه به رابطه ۲، تنش برشی تنها متأثر از عمق جریان هستند و بنابراین، دلیل اختلاف تنش برشی وارد بر سه خاک را می‌توان به عمق جریان نسبت داد. لازم به ذکر است که با توجه به حداکثر مقدار تنش برشی و قدرت جریان به دست آمده در این پژوهش، جریان از نوع ورقه‌ای است و جریان قابلیت جداسازی ذرات خاک را ندارد (۳). از طرفی، با ریزتر شدن ذرات ثانویه خاک سطحی، قدرت جریان واحد بر خلاف دو پارامتر قبلی (تنش برشی و قدرت جریان)، افزایش نشان می‌دهد. مقدار متوسط قدرت جریان واحد برای سه خاک یادشده به ترتیب $۲/۰ \times 10^{-۴}$ ، $۱/۷ \times 10^{-۴}$ و $۱/۵ \times 10^{-۴}$ متر بر ثانیه است. طبق رابطه ۴ قدرت جریان واحد متأثر از شیب و سرعت جریان است که با توجه به ثابت بودن مقدار شیب در تمام آزمایش‌ها (۰/۵ درصد)، بنابراین تنها تابع سرعت جریان است.

پارامترهای هیدرولیکی جریان: در جدول ۲ دامنه تغییرات پارامترهای هیدرولیکی برای سه خاک با توزیع اندازه ذرات ۲، ۴/۷۵ و ۸ میلی‌متر نشان داده شده است. میانگین سرعت جریان در سه خاک D_{8mm} ، $D_{4.75mm}$ و D_{2mm} به ترتیب ۰/۰۴۰، ۰/۰۳۴ و ۰/۰۳۰ متر بر ثانیه است در حالی که مقدار متوسط عمق لایه آب در این سه خاک به ترتیب برابر با ۰/۵۳، ۰/۷۴ و ۰/۷۷ میلی‌متر تعیین شد. به عبارتی، سرعت جریان در خاک D_{2mm} بیش‌ترین ولی عمق جریان در خاک D_{8mm} بیش‌ترین مقدار را نشان داد. یکی از دلایل این موضوع را می‌توان به ریزتر بودن خاکدانه‌ها و کم‌تر بودن زبری سطحی در خاک D_{2mm} نسبت به دو خاک دیگر نسبت داد (۳ و ۵۷). از طرفی، هر چه جریان سرعت بیشتری پیدا کرده، عمق لایه آب موجود در سطح کاهش یافته است. همچنین مقادیر دو پارامتر هیدرولیکی تنش برشی و قدرت جریان در خاک D_{8mm} بیش‌تر از خاک‌های دیگر بود. در سه خاک D_{8mm} ، $D_{4.75mm}$ و D_{2mm} متوسط تنش

جدول ۲- محدوده تغییرات پارامترهای هیدرولیکی جریان در سه خاک مورد آزمایش.

Table 2. The range of flow hydraulic parameters obtained for the three soil samples.

D_{8mm}		$D_{4.75mm}$		D_{2mm}		پارامترهای هیدرولیکی Hydraulic parameters			
میانگین Mean	حداکثر Max.	حداقل Min.	میانگین Mean	حداکثر Max.	حداقل Min.	میانگین Mean	حداکثر Max.	حداقل Min.	
0.030	0.064	0.0082	0.034	0.073	0.012	0.040	0.085	0.018	سرعت Velocity ($m s^{-1}$)
0.77	1.59	0.24	0.74	1.38	0.16	0.53	0.98	0.18	عمق Depth (mm)
0.038	0.078	0.012	0.036	0.068	0.008	0.026	0.048	0.009	تنش برشی Shear stress (Pa)
8.2	10.7	5.2	8.1	10.7	5.1	7.9	10.3	5.2	قدرت جریان Stream power ($\times 10^{-4} W m^2$)
1.5	3.2	0.41	1.7	3.6	0.62	2.0	4.3	0.88	قدرت جریان واحد Unit stream power ($\times 10^{-4} m s^{-1}$)

هیدرولیکی متأثر از تأثیر هر یک از عوامل خاک، شدت باران و سرعت باد در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به این که تنها اثرات مستقل عوامل مورد مطالعه بر همه پارامترهای هیدرولیکی معنی دار شده بود، بنابراین مقایسه میانگین بین سطوح مختلف هر عامل، به طور جداگانه انجام شد. مطابق جدول ۴ مشاهده می شود که اعمال هر چهار سرعت مختلف باد، اختلاف معنی دار مقادیر همه پارامترهای هیدرولیکی را در پی داشته است. این موضوع نشان از اهمیت سرعت باد بر تغییر رفتار هیدرولیکی جریان ورقه ای طی رخداد فرسایش بین شیار دارد.

تأثیر سرعت باد، شدت باران و خاک بر پارامترهای هیدرولیکی جریان: نتایج تجزیه واریانس مربوط به تأثیر سه عامل خاک، شدت باران و سرعت باد بر پارامترهای هیدرولیکی جریان در جدول ۳ ارائه شده است. همان گونه که می شود، اثر مستقل سه عامل یاد شده بر همه پارامترهای هیدرولیکی جریان، در سطح احتمال یک درصد معنی دار است. این در حالی است که اثر دوگانه خاک در شدت باران بر هیچ یک از پارامترهای هیدرولیکی معنی دار نشد و سایر اثرات دوگانه و نیز اثر سه گانه خاک، شدت باران و سرعت باد در بیش تر موارد معنی دار شد. در ادامه، نتایج مقایسه میانگین بین مقادیر مربوط به پارامترهای

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس پارامترهای هیدرولیکی و شدت فرسایش تحت تأثیر سه عامل خاک، شدت باران و سرعت باد (اعداد جدول نشان دهنده میانگین مربعات (MS) می باشد).

Table 3. Analysis of variance for hydraulic parameters affected by three factors of soil, rain intensity and wind speed (values in the Table represent the mean square (MS)).

فرسایش Interrill erosion	قدرت جریان واحد Unit stream power	قدرت جریان Stream power	تنش برشی Shear stress	عمق لایه آب Water flow depth	سرعت جریان Flow velocity	درجه آزادی d.f.	منبع تغییر Source of variance
$7.1 \times 10^{-9**}$	$2.5 \times 10^{-8**}$	$1.2 \times 10^{-8*}$	$0.001**$	$0.62**$	$0.001**$	2	خاک Soil (A)
$3.6 \times 10^{-8**}$	$1.5 \times 10^{-8**}$	$6.3 \times 10^{-7**}$	0.001^*	0.126^*	$0.001**$	2	شدت باران Rain intensity (B)
$6.2 \times 10^{-8**}$	$2.6 \times 10^{-7**}$	$4.5 \times 10^{-7**}$	$0.011**$	$4.63**$	$0.011**$	3	سرعت باد Wind speed (C)
6.5×10^{-10ns}	5.8×10^{-10ns}	2.7×10^{-9ns}	1.3×10^{-5ns}	0.005^{ns}	2.4×10^{-5ns}	4	A×B
0.001^{ns}	$4.1 \times 10^{-9**}$	3.6×10^{-9ns}	$0.001**$	$0.158**$	$0.001**$	6	A×C
$2.5 \times 10^{-9**}$	$6.1 \times 10^{-9**}$	$1.4 \times 10^{-8**}$	9.9×10^{-5ns}	0.041^{ns}	$0.001**$	6	B×C
0.001^{ns}	$2.5 \times 10^{-9*}$	1.9×10^{-9ns}	$0.001**$	$0.077**$	0.001^*	12	A×B×C
3.1×10^{-10}	1.3×10^{-9}	4.2×10^{-9}	7.2×10^{-5}	0.03	5.4×10^{-5}	72	خطا Error

* و ** به ترتیب بیانگر اثر معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد. ^{ns} بیانگر عدم معنی داری.

* and ** indicate significant at 5% and 1% levels. ^{ns} means non-significant.

جدول ۴- مقایسه میانگین بین مقادیر پارامترهای هیدرولیکی مورد مطالعه در سطوح مختلف خاک، شدت باران و سرعت باد.

Table 4. Mean comparison among the values of hydraulic parameters at different levels of soil, rain intensity and wind speed.

عامل	سطوح عامل	سرعت جریان	عمق لایه آب	تنش برشی	قدرت جریان	قدرت جریان واحد	فرسایش بین شیبی
Factor	Factor levels	Flow velocity	Water flow depth	Shear stress	Stream power	Unit stream power	Interrill erosion
خاک Soil	D _{2mm}	0.040a	0.53b	0.026b	0.00079b	0.000201a	0.000101a
	D _{4.75mm}	0.034b	0.74a	0.036a	0.00081ab	0.000170b	0.000083b
	D _{8mm}	0.030c	0.77a	0.038a	0.00082a	0.000149c	0.000073c
شدت باران Rain intensity	30	0.032b	0.62b	0.030b	0.00066c	0.000160b	0.000053c
	50	0.033b	0.74a	0.036a	0.00085b	0.000164b	0.000087b
	75	0.039a	0.68ab	0.034ab	0.00091a	0.000197a	0.000116a
سرعت باد Wind speed	0	0.015d	1.15a	0.056a	0.00082a	0.000078d	0.000043d
	6	0.024c	0.89b	0.043b	0.00094a	0.000121c	0.000053c
	9	0.038b	0.47c	0.023c	0.00083b	0.000190b	0.000099b
	12	0.061a	0.22d	0.011d	0.00063c	0.000304a	0.000147a

حروف مشابه برای سطوح مختلف هر یک از عوامل خاک، شدت باران و سرعت باد، بیانگر عدم اختلاف معنی دار در سطح احتمال پنج درصد با استفاده از آزمون دانکن است.

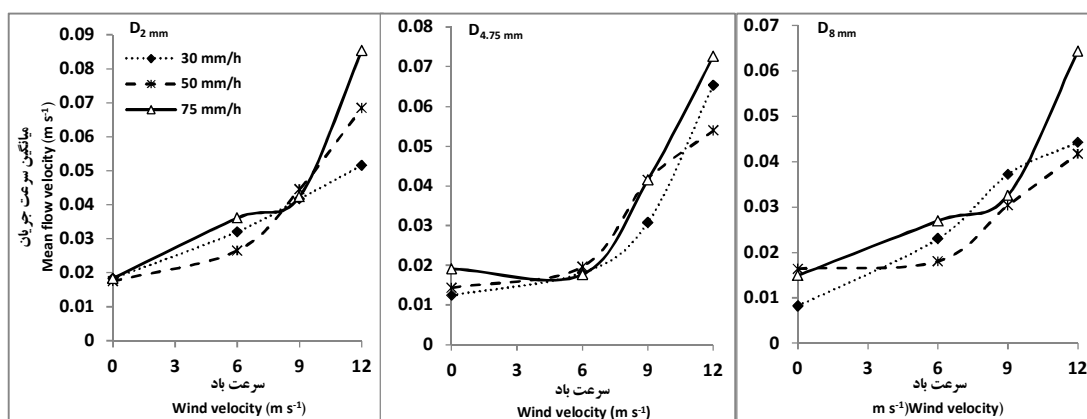
Similar letters for different levels of each factor (i.e. soil, rain intensity and wind speed) indicates non-significant differences at 5% level of probability using the Duncan' test.

باد در تقویت سرعت جریان رواناب است به طوری که مقدار این آستانه سرعت باد، حدود ۶ (در برخی موارد ۹) متر بر ثانیه است. یکی از دلایل افزایش سرعت جریان این است که افزایش سرعت باد از یک طرف موجب افزایش سرعت سقوط و نیز تقویت انرژی جنبشی قطرات باران و از طرف دیگر باعث مایل شدن زاویه برخورد آن‌ها به سمت پایین دست جریان شده و در نتیجه افزایش سرعت جریان ورقه‌ای مشاهده می‌شود (۱۸). در سرعت‌های بیش‌تر از ۶ (در برخی موارد ۹) متر بر ثانیه باد، این اثرات به‌طور قابل توجهی تشدید می‌شود. نکته قابل توجه دیگر این است که طبق شکل ۲ برای هر نمونه خاک به‌طور جداگانه، تفاوت چندانی بین تأثیر سه شدت باران بر تقویت سرعت جریان مشاهده نمی‌شود حال آن‌که افزایش سرعت باد، تأثیر بیش‌تری از خود نشان

تأثیر سرعت‌های مختلف باد و شدت‌های متفاوت باران در خاک‌های مورد مطالعه، بر پارامترهای هیدرولیکی جریان در شکل‌های ۲ تا ۷ نشان داده شده است. در تمام نمونه‌های خاک و شدت‌های باران، سرعت باد ارتباط مستقیمی بر سرعت جریان ورقه‌ای دارد به نحوی که با افزایش سرعت باد، سرعت جریان به‌صورت غیرخطی افزایش می‌یابد (شکل ۲). در کل، با افزایش سرعت باد به ۱۲ متر بر ثانیه نسبت به شرایط بدون وزش باد (شاهد)، سرعت جریان ورقه‌ای به‌طور متوسط بین ۲/۸ تا ۵/۴ برابر افزایش نشان می‌دهد. شکل ۲ همچنین گویای این مطلب است که در بیش‌تر موارد، با افزایش سرعت باد به مقادیر بیش‌تر از ۶ متر بر ثانیه (در مواردی ۹ متر بر ثانیه)، سرعت جریان با شیب بیش‌تری افزایش یافته است. این موضوع دلالت بر وجود یک آستانه سرعت

باران و جریان رواناب حاصل را بیش از پیش نشان می‌دهد.

می‌دهد. به عبارتی، افزایش سرعت باد نسبت به افزایش شدت باران، تأثیر بیشتری بر تقویت سرعت جریان دارد. این یافته اهمیت وزش باد بر فرساینده‌گی

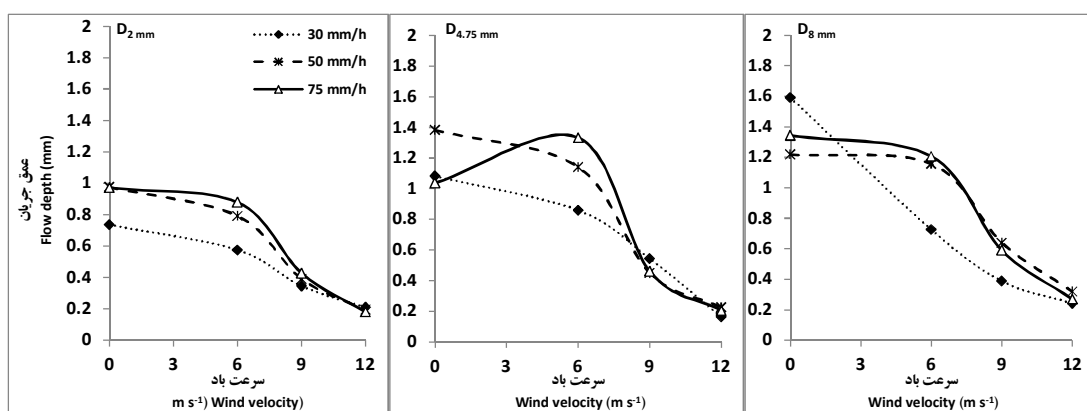


شکل ۲- رابطه بین سرعت باد و میانگین سرعت جریان در خاک‌های با توزیع اندازه ذرات مختلف و در شدت‌های متفاوت باران.

Figure 2. The relationship between wind velocity and mean flow velocity in soils with different particle size distribution and various rainfall intensities.

وزش باد) تا ۶ متر بر ثانیه، عمق لایه آب موجود در سطح کاهش یافته که البته این کاهش به نسبت زیاد نبوده ولی در سرعت‌های بیش‌تر از این مقدار آستانه، عمق لایه آب با شیب بیشتری کاهش یافته است. دلیل روند کلی کاهش عمق لایه آب با افزایش سرعت باد به ارتباط سرعت جریان- عمق جریان مربوط است (۱۵).

بررسی ارتباط سرعت باد با پارامتر هیدرولیکی عمق جریان نشان می‌دهد که در حالت کلی با افزایش سرعت باد، مقدار این پارامتر کاهش یافته، البته مقدار آستانه سرعت باد برابر با ۶ متر بر ثانیه نیز قابل مشاهده است (شکل ۳). به غیر از یک مورد (شدت ۷۵ میلی‌متر بر ساعت باران در خاک $D_{4.75mm}$) در سایر موارد، با افزایش سرعت باد از صفر (بدون



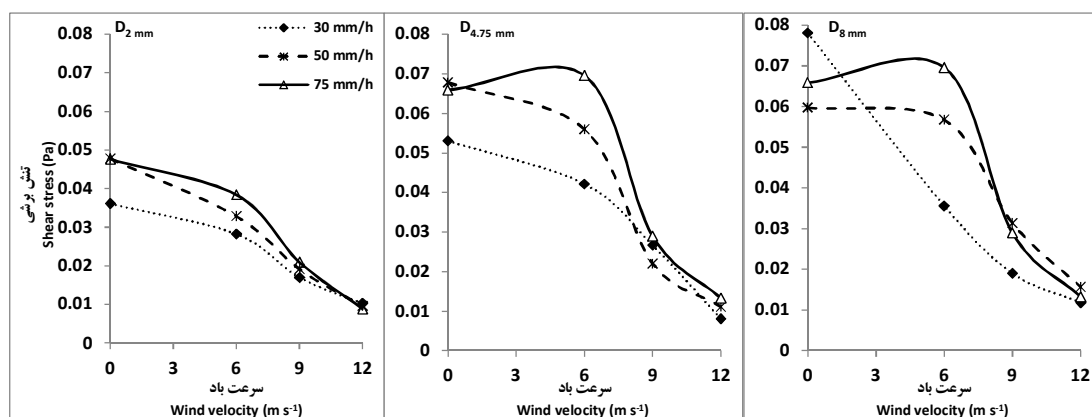
شکل ۳- رابطه بین سرعت باد و عمق جریان در خاک‌های با توزیع اندازه ذرات مختلف و در شدت‌های متفاوت باران.

Figure 3. The relationship between wind velocity and flow depth in soils with different particle size distribution and various rainfall intensities.

مفهوم است که ارتباط نزدیکی بین عمق جریان و تنش برشی برقرار است. با توجه به ثابت بودن شیب سطح خاک در تمام آزمایش‌ها، طبق رابطه ۲، تنش برشی تنها تابع تغییرات عمق جریان است به نحوی که با افزایش سرعت باد و در نتیجه کاهش عمق جریان، تنش برشی نیز کاهش یافته است. این در حالی است که با افزایش سرعت باد تا مقدار آستانه ۶ متر بر ثانیه، قدرت جریان افزایش و در مقادیر بیش‌تر سرعت باد، کاهش یافته است (شکل ۵). قدرت جریان در واقع علاوه بر عمق، تابع سرعت جریان نیز است (رابطه ۴). نتیجه آن‌که با افزایش سرعت باد، سرعت جریان افزایش و به‌طور هم‌زمان عمق جریان کاهش می‌یابد. میزان افزایش سرعت جریان از یک طرف و کاهش عمق جریان از طرف دیگر بر تغییرات قدرت جریان اثر می‌گذارد. نتایج نشان می‌دهد که در سرعت‌های باد کم‌تر از آستانه، به‌دلیل مقدار کم سرعت جریان (شکل ۲) و در سرعت‌های بیش‌تر باد، به‌علت مقدار کم عمق جریان (شکل ۳)، قدرت جریان کاهش داشته ولی در سرعت ۶ متر بر ثانیه سرعت باد، ترکیب سرعت و عمق جریان در بیش‌ترین مقدار قرار می‌گیرد.

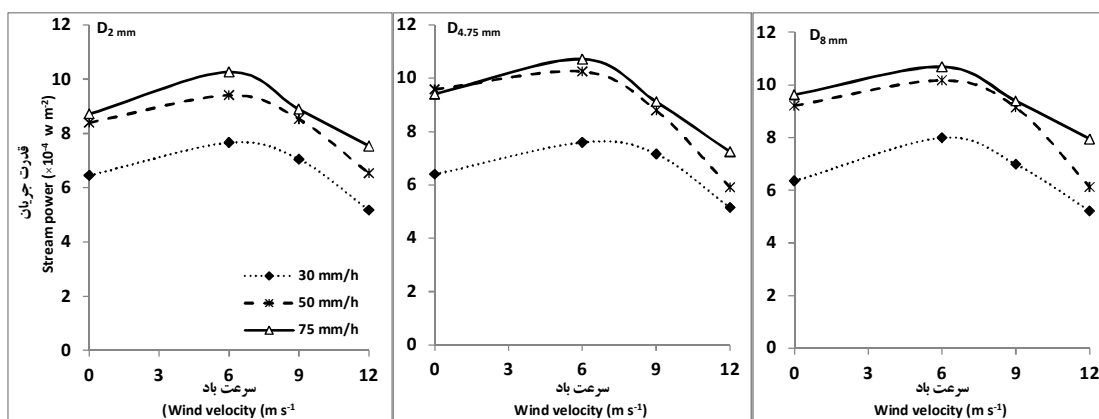
همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، افزایش سرعت باد باعث افزایش سرعت جریان گردید که این افزایش سرعت جریان در شرایط یکسان (شیب، دبی جریان و شدت باران)، کاهش عمق جریان را در پی دارد (۵۲). از طرفی، با افزایش سرعت باد به مقادیر بیش‌تر از آستانه، به‌دلیل افزایش بیش‌تر سرعت جریان، کاهش بیشتر عمق لایه آب قابل استدلالت است. در بیش‌تر پژوهش‌های قبلی، افزایش شدت فرسایش ناشی از باران و نیز انتقال ذرات رسوب با افزایش سرعت باد گزارش شده که این موضوع به افزایش انرژی جنبشی و یا افزایش قطر قطرات باران در سرعت‌های بیش‌تر باد مرتبط دانسته شده (۱۲ و ۱۷)، ولی در هیچ‌یک به مقدار آستانه‌ای برای سرعت باد اشاره نشده است.

مطابق شکل ۳ مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت باد تا مقدار آستانه ۶ متر بر ثانیه، مقدار تنش برشی به غیر از دو مورد (شدت ۷۵ میلی‌متر بر ساعت باران در خاک‌های $D_{4.75mm}$ و D_{8mm} ، با شیب کم‌تر و در سرعت‌های بیش‌تر باد با شیب بیش‌تری کاهش یافته است. روند تغییرات تنش برشی تا حد زیادی مشابه تغییرات عمق جریان (شکل ۲) است. این به آن



شکل ۴- رابطه بین سرعت باد و تنش برشی در خاک‌های با توزیع اندازه ذرات مختلف و در شدت‌های متفاوت باران.

Figure 4. The relationship between wind velocity and shear stress in soils with different particle size distribution and various rainfall intensities.

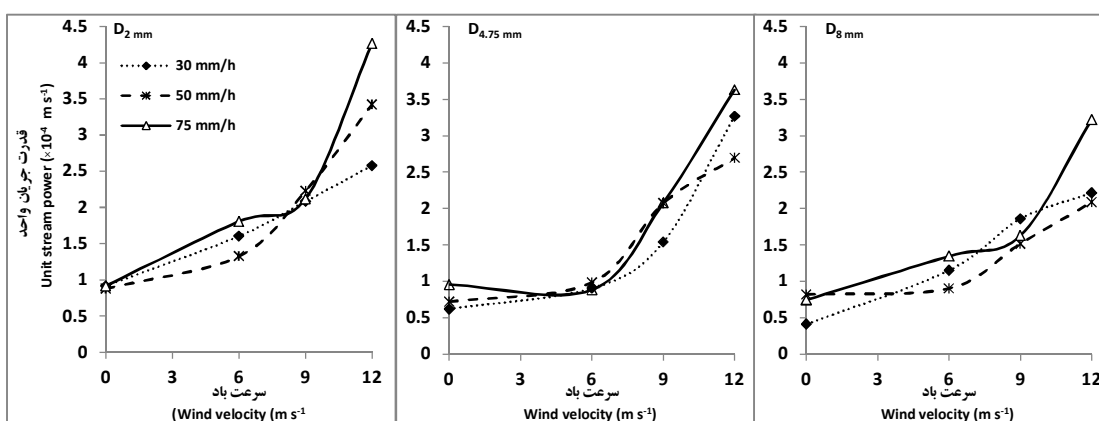


شکل ۵- رابطه بین سرعت باد و قدرت جریان در خاک‌های با توزیع اندازه ذرات مختلف و در شدت‌های متفاوت باران.

Figure 5. The relationship between wind velocity and stream power in soils with different particle size distribution and various rainfall intensities.

سرعت‌های بیشتر باد، میزان افزایش تشدید می‌شود. طبق رابطه ۴، پارامتر هیدرولیکی قدرت جریان واحد از ضرب سرعت جریان در شیب به دست می‌آید. با توجه به ثابت بودن بودن شیب در تمام آزمایش‌ها، بنابراین مقدار آن تنها تابع سرعت جریان است. در نتیجه، با توجه به رابطه مستقیم سرعت جریان و سرعت باد، با افزایش سرعت باد قدرت جریان واحد نیز افزایش یافته است.

شکل ۶ رابطه بین پارامتر هیدرولیکی قدرت جریان واحد و سرعت باد را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت باد، قدرت جریان واحد به‌طور کلی افزایش یافته است. از طرفی، روند تغییرات قدرت جریان واحد با افزایش سرعت باد، مشابه روند تغییرات سرعت جریان (شکل ۲) است. با افزایش سرعت باد تا حدود ۶ (در برخی موارد ۹) متر بر ثانیه، میزان افزایش قدرت جریان واحد کم و در



شکل ۶- رابطه بین سرعت باد و قدرت جریان واحد در خاک‌های با توزیع اندازه ذرات مختلف و در شدت‌های متفاوت باران.

Figure 6. The relationship between wind velocity and unit stream power in soils with different particle size distribution and various rainfall intensities.

جریان رواناب اشاره کرد (۲۴، ۳۶ و ۶۰). طبق جدول ۲، با درشت‌تر شدن اندازه خاکدانه‌ها، از یک طرف سرعت جریان ورقه‌ای کاهش می‌یابد که در پی آن، میزان انتقال ذرات (از قبل جدا شده به وسیله باران) نیز افت می‌کند (۵۲). از طرف دیگر، به دلیل افزایش توام عمق جریان، انتظار می‌رود که بخشی از انرژی جنبشی قطرات صرف عبور از لایه آب شده و در نتیجه، شدت جدا شدن و جدا شدن مجدد نیز کاهش پیدا کند (۳). نیرینگ و همکاران (۱۹۸۹) بیان کردند که افزایش زبری سطح، منجر به کاهش سرعت و انتقال ذرات رسوب به وسیله جریان می‌شود (۴۱). علاوه بر این، گای و همکاران (۱۹۹۰) و همچنین زانگ و همکاران (۲۰۰۹) بیان کردند که با کاهش سرعت جریان، ظرفیت انتقال ذرات توسط جریان نیز کاهش می‌یابد (۲۴ و ۶۰).

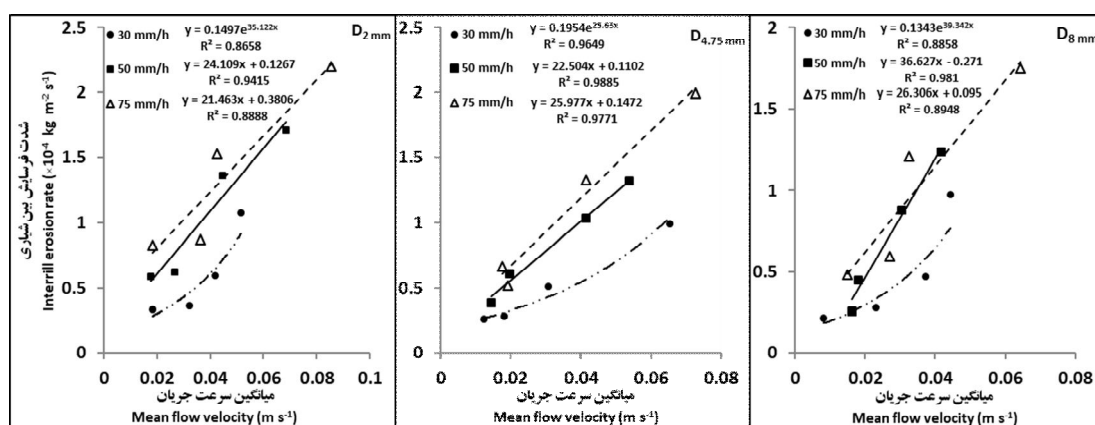
شکل ۷ تأثیر سرعت‌های مختلف جریان تحت باران متأثر از باد را بر شدت فرسایش بین‌شیاری در خاک‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت جریان، شدت فرسایش بین‌شیاری افزایش یافته است. در خاک‌ها و شدت‌های مورد مطالعه باران، ضریب تعیین (R^2) بین ۰/۸۷ تا ۰/۹۹ متغیر بود که نشان از اثر معنی‌دار سرعت جریان ورقه‌ای بر فرسایش بین‌شیاری دارد. سرعت جریان از مهم‌ترین پارامترهای هیدرولیکی است که شدت جدا شدن و انتقال ذرات را کنترل می‌کند (۲۳ و ۳۷). سرعت جریان متأثر از عوامل هیدرولیکی مانند عمق جریان و نیز شرایط سطحی خاک مانند زبری است (۳۶ و ۶۰). از آن‌جا که افزایش سرعت باد باعث افزایش سرعت برخورد و انرژی جنبشی قطرات باران می‌شود (۱۴)، بنابراین ظرفیت جدا شدن در اثر برخورد قطرات نیز تشدید می‌شود. علاوه بر این، به دلیل افزایش سرعت جریان ورقه‌ای، میزان انتقال ذرات از قبل جدا شده، به وسیله

ارتباط پارامترهای هیدرولیکی جریان و فرسایش بین‌شیاری: جدول ۳ تأثیر سه عامل خاک، شدت باران و سرعت باد را بر شدت فرسایش بین‌شیاری نشان می‌دهد. همه اثرات جداگانه عوامل مورد مطالعه بر شدت فرسایش بین‌شیاری در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. همچنین از بین اثرات دوگانه و سه‌گانه، اثر متقابل شدت باران و باد نیز به‌طور معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد بر شدت فرسایش بین‌شیاری معنی‌دار بود. این موضوع دلالت بر اهمیت تقابل وزش باد و بارش باران در کنترل فرسایش بین‌شیاری دارد. نتایج مقایسه میانگین (جدول ۴) نیز بیانگر اختلاف معنی‌دار بین سطوح مختلف خاک، شدت باران و سرعت باد است به نحوی که با کاهش اندازه خاکدانه‌های موجود در سطح، افزایش شدت باران و افزایش سرعت باد، شدت فرسایش بین‌شیاری به‌طور معنی‌دار افزایش یافته است.

نتایج نشان داد که شدت فرسایش در سه خاک مورد مطالعه بین 0.21×10^{-4} تا 2.7×10^{-4} کیلوگرم بر مترمربع در ثانیه متغیر است. این دامنه تغییرات شدت فرسایش در سه خاک مورد مطالعه، نشان از اهمیت اندازه ذرات خاکدانه سطحی بر شدت فرسایش بین‌شیاری دارد (۳). مقایسه مقادیر شدت فرسایش بین‌شیاری سه خاک مورد مطالعه نشان داد که با ریزتر شدن اندازه خاکدانه‌ها، شدت فرسایش بین‌شیاری افزایش می‌یابد (۳۵). شدت فرسایش در خاک D_{2mm} ، ۱/۲ برابر بیشتر از خاک $D_{4.75mm}$ و ۱/۳۶ برابر خاک D_{8mm} است. در پژوهش‌های قبلی نیز اهمیت اندازه ذرات بر کنترل فرسایش بین‌شیاری گزارش شده است (۳۶، ۴۱ و ۵۲). از دلایل کاهش شدت فرسایش با افزایش اندازه ذرات خاکدانه می‌توان به افزایش زبری سطح، افزایش لایه آب، افزایش مقاومت ذرات در برابر انتقال و کاهش سرعت

جداشدن و انتقال ذرات به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد (۵۸ و ۵۹). از منظر دیگر، در اثر افزایش سرعت باد و افزایش سرعت سقوط و انرژی جنبشی قطرات در حال برخورد به جریان سطحی، تلاطم جریان نیز تشدید شده که این خود باعث افزایش قدرت فرسایشی جریان می‌شود (۲۶).

جریان سطحی نیز تشدید می‌شود (۳). باکو و همکاران (۲۰۱۶) بیان داشتند که انرژی جنبشی باران، از طریق افزایش قابلیت حمل رسوب جریان متأثر از قطرات باران، نقش مهمی در تشدید فرسایش بین‌شیاری ایفا می‌کند (۶). زانگ (۲۰۰۲ و ۲۰۰۳) نشان دادند که با افزایش سرعت جریان، شدت



شکل ۷- رابطه بین شدت فرسایش بین‌شیاری و میانگین سرعت جریان در خاک‌های مختلف تحت باران‌های متأثر از باد.

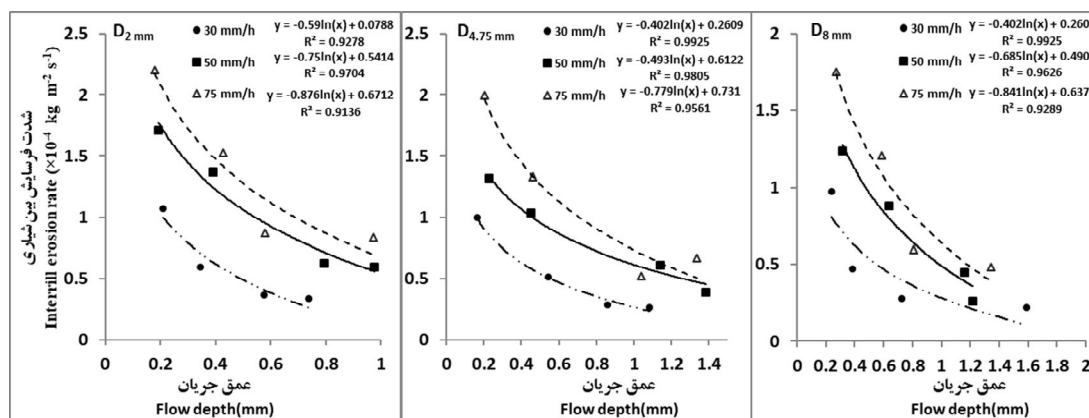
Figure 7. The relationship between interrill erosion and flow velocity in different soils affected by wind-driven rains.

جداشدن ذرات در اثر برخورد قطرات باران، طی رخداد فرسایش بین‌شیاری اهمیت ویژه‌ای دارد (۴۷). زمانی که عمق لایه آب موجود در سطح در حدود قطر دو قطره باران باشد، از برخورد مستقیم قطرات باران به سطح خاک جلوگیری می‌کند (۵۱). در پژوهشی، زانگ و وانگ (۲۰۱۷) دریافتند که حداکثر فرسایش بین‌شیاری در عمق جریان کم‌تر از ۰/۱ میلی‌متر رخ می‌دهد (۶۲). در این ارتباط، کینل (۱۹۹۱) و همچنین پراسر و راستومجی (۲۰۰۰) بیان کردند زمانی که عمق جریان به بیش‌تر از سه برابر قطر قطرات برسد، تأثیر باران بر فرسایش ناچیز است (۳۲ و ۴۴). مطابق شکل ۳ با افزایش سرعت باد، عمق جریان کاهش یافته که این موضوع باعث افزایش احتمال برخورد مستقیم قطرات باران به سطح خاک می‌شود (۱۵). به‌علت تشدید برخورد قطرات به سطح

شکل ۸ تأثیر عمق جریان ورقه‌ای بر شدت فرسایش بین‌شیاری را نشان می‌دهد. با افزایش عمق جریان ورقه‌ای، شدت فرسایش بین‌شیاری به‌طور غیرخطی (طبق تابع لگاریتمی) کاهش یافته است. مقادیر بالای ضریب تعیین (R^2 بیش‌تر از ۰/۹۲) بیانگر ارتباط معنی‌دار و قوی بین عمق جریان و شدت فرسایش بین‌شیاری است. به‌طور مشابهی، نیزینگ و همکاران (۱۹۹۱) نیز رابطه لگاریتمی بین عمق جریان و شدت جداشدن ذرات را گزارش کردند (۴۰). همچنین گیلی و همکاران (۱۹۸۵) و زانگ و وانگ (۲۰۱۷) بیان کردند که با افزایش عمق لایه آب، به‌دلیل اتلاف انرژی برخورد قطرات باران، شدت جداسازی ذرات خاک به‌وسیله قطرات باران به‌صورت نمایی کاهش می‌یابد (۲۲ و ۶۲). عمق جریان پارامتری هیدرولیکی است که در شدت

نیز افزایش یافته است. تشدید شدت فرسایش بین‌شیاری در پی افزایش شدت باران در پژوهش‌های زیادی گزارش شده است (۳، ۳۰ و ۵۵).

خاک و البته پاشمان ذرات، تلاطم جریان نیز بیشتر شده و در نتیجه، شدت فرسایش افزایش می‌یابد (۲۷). نتایج همچنین نشان داد که در یک عمق مشخص آب، با افزایش شدت باران، شدت فرسایش

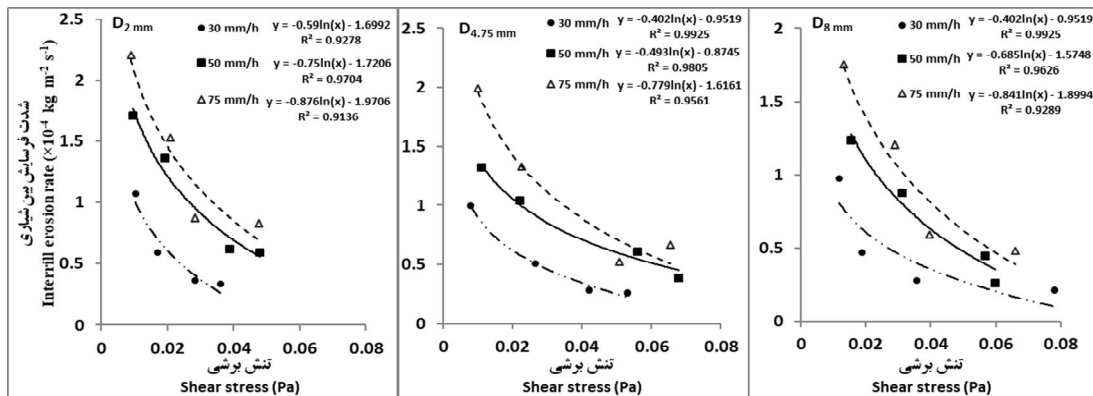


شکل ۸- رابطه بین شدت فرسایش بین‌شیاری و عمق جریان در خاک‌های مختلف تحت باران‌های متأثر از باد.

Figure 8. The relationship between interrill erosion and flow depth in different soils affected by wind-driven rains.

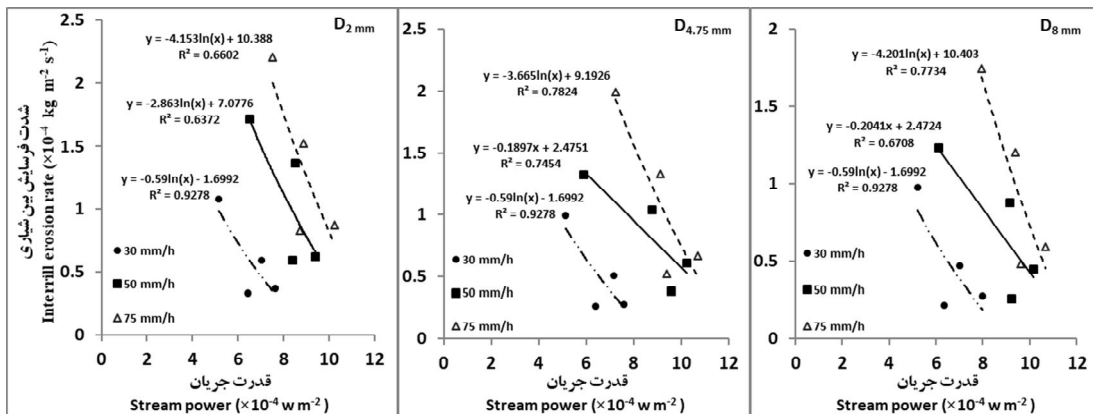
فرسایش بین‌شیاری شد (شکل ۱۰). این پارامتر از ضرب تنش برشی در سرعت جریان تعیین می‌شود و بنابراین علاوه بر عمق جریان (تنش برشی)، سرعت جریان نیز در کنترل آن نقش دارد (۵۲). مقادیر ضرایب تعیین مربوط به تأثیر قدرت جریان (مقدار R² بین ۰/۶۴ تا ۰/۹۳) کم‌تر از مقادیر مربوط به اثرگذاری تنش برشی و عمق جریان بر شدت فرسایش بین‌شیاری است. به عبارتی، از یک طرف به دلیل نقش افزایش سرعت جریان و از طرف دیگر نقش کاهش عمق جریان در شدت فرسایش و وابستگی قدرت جریان به هر دوی این پارامترها، قدرت جریان ارتباط ضعیف‌تری (ضرایب تعیین کوچک‌تری) نشان می‌دهد. در ضمن، عمق جریان نقش بیش‌تری نسبت به سرعت جریان در کنترل قدرت جریان رواناب تحت باران متأثر از باد دارد به‌نحوی که، کاهش شدت فرسایش در اثر افزایش قدرت جریان مشابه تنش برشی و عمق جریان و عکس اثر افزایش سرعت جریان بود.

مشابه با نحوه تأثیرگذاری عمق جریان بر شدت فرسایش بین‌شیاری، تنش برشی نیز ارتباط عکس و غیرخطی (لگاریتمی) با شدت فرسایش نشان داد (شکل ۹). همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، با توجه به ثابت و یکسان بودن شیب در تمام آزمایش‌ها، مقدار تنش برشی تنها متأثر از عمق جریان بوده و بنابراین رفتاری مشابه آن دارد. از طرفی، وجود مقادیر بالای ضریب تعیین (R² بیش‌تر از ۰/۹۱) در توابع برازش‌شده در شکل ۹، گویای نقش معنی‌دار تنش برشی بر کنترل شدت فرسایش بین‌شیاری است. در منابع متعدد، تنش برشی به‌عنوان یکی از شاخص‌های مهم فرساینده‌گی جریان شناخته می‌شود که در بسیاری از مدل‌های فرآیندی برآورد فرسایش نیز وارد شده است (۲۳). در واقع، افزایش تنش برشی از طریق افزایش عمق جریان موجب کاهش شدت فرسایش بین‌شیاری شد که دلایل اثرگذاری عمق جریان در بالا تبیین شد. علاوه بر تنش برشی، قدرت جریان پارامتر هیدرولیکی نیز به‌طور مشابهی باعث کاهش شدت



شکل ۹- رابطه بین شدت فرسایش بین شیارهای مختلف تحت بارانهای متأثر از باد.

Figure 9. The relationship between interrill erosion and shear stress in different soils affected by wind-driven rains.

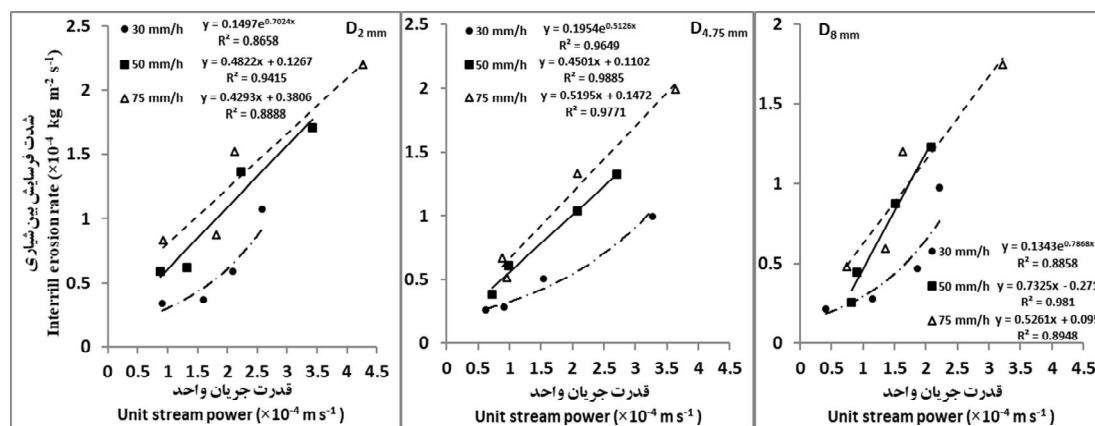


شکل ۱۰- تأثیر قدرت جریان بر شدت فرسایش بین شیارهای مختلف تحت بارانهای متأثر از باد.

Figure 10. The effect of stream power on interrill erosion of different soils affected by wind-driven rains.

گزارش کردند (۲). نتایج بررسی‌های هوی‌مینگ و یانگ (۲۰۰۹) و همچنین علی و همکاران (۲۰۱۲) نیز نشان داد که قدرت جریان واحد، بهترین پارامتر هیدرولیکی برای پیش‌بینی ظرفیت انتقال ذرات در اثر جریان‌های کم‌عمق است (۱ و ۲۶). همچنین، تأثیر قدرت جریان واحد بر شدت فرسایش بین‌شیاری به‌دلیل وابستگی به سرعت جریان (رابطه ۳)، مشابه یکدیگر بود.

نتایج نشان داد که افزایش قدرت جریان واحد، افزایش شدت فرسایش بین‌شیاری را در پی دارد (شکل ۱۱). در حالت‌های مختلف، ارتباط بین قدرت جریان واحد و شدت فرسایش بین‌شیاری، ضریب تعیین بین ۰/۸۷ تا ۰/۹۹ را به‌دست داد که نشان از ارتباط معنی‌دار بین دو دارد. به‌طور مشابهی، آن و همکاران (۲۰۱۲) نیز رابطه خطی بین جداشدن ذرات در اثر برخورد قطرات باران و قدرت جریان واحد را



شکل ۱۱- تأثیر قدرت جریان واحد بر شدت فرسایش بین‌شیاری در خاک‌های مختلف تحت باران‌های متأثر از باد.

Figure 11. The effect of unit stream power on interrill erosion of different soils affected by wind-driven rains.

و عمق جریان مرتبط دانسته شد که سایر پارامترهای هیدرولیکی را نیز متأثر می‌سازد. مشخص گردید که با افزایش سرعت باد علاوه بر افزایش فرسایش قطرات باران، از یک طرف سرعت جریان افزایش یافته و در نتیجه، توان حمل ذرات رسوب به وسیله جریان تقویت و فرسایش بین‌شیاری تشدید می‌شود. از طرف دیگر با افزایش سرعت باد، عمق جریان کاهش یافته و در نتیجه، احتمال برخورد قطرات باران به ذرات سطح خاک و به دنبال آن شدت جدا شدن و جدا شدن مجدد و در نهایت، شدت فرسایش افزایش پیدا می‌کند. علاوه بر این، با افزایش شدت باران و همچنین ریزتر شدن اندازه ذرات خاکدانه در معرض فرسایش، شدت فرسایش بین‌شیاری افزایش یافت. با توجه به این‌که این پژوهش در شرایط آزمایشگاهی انجام شده و در سایر شرایط مانند حوزه‌های آبخیز، تقابل سرعت باد و شدت باران بر روی سطوح شیبدار ممکن است نتایج متفاوتی به دست دهد. بنابراین لازم است آزمایش‌های بیشتری در زمینه فرآیندها و مکانیسم‌های مرتبط با فرسایش متأثر از وزش باد و بارش باران در سایر شرایط انجام شود.

نتیجه‌گیری

بسیاری از رگبارهای فرساینده در مناطق خشک و نیمه‌خشک با وزش باد هم‌زمان رخ می‌دهد. یافته‌های این پژوهش دلالت بر اهمیت سرعت باد بر پارامترهای هیدرولیکی جریان ورقه‌ای داشت. رفتار پارامترهای هیدرولیکی جریان ورقه‌ای در باران‌های متأثر از باد، از وجود سرعت آستانه در دامنه‌ای بین ۶ تا ۹ متر بر ثانیه باد حکایت داشت. با افزایش سرعت باد به‌ویژه در سرعت‌های بیش از آستانه، سرعت و قدرت جریان واحد افزایش و در مقابل، عمق جریان و تنش برشی کاهش یافتند. همچنین با افزایش سرعت باد تا این مقدار آستانه، قدرت جریان ابتدا افزایش و در ادامه کاهش پیدا کرد. علاوه بر این، بررسی فرسایش بین‌شیاری در پی باران‌های متأثر از باد نشان داد که افزایش سرعت باد از طریق تأثیر بر پارامترهای هیدرولیکی جریان ورقه‌ای، شدت فرسایش بین‌شیاری را کنترل می‌کند. به بیان دیگر، با افزایش سرعت و قدرت جریان واحد، شدت فرسایش بین‌شیاری افزایش پیدا کرد و در مقابل با افزایش عمق جریان، تنش برشی و قدرت جریان، شدت فرسایش کاهش یافت. دلیل این موضوع به رابطه عکس سرعت

منابع

1. Ali, M., Sterk, G., Seeger, K.M., Boersema, M.P., and Peters, P.D. 2012. Effect of hydraulic parameters on sediment transport capacity in overland flow over erodible beds. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16: 2. 591-601.
2. An, J., Zheng, F., Lu, J., and Li, G. 2012. Investigating the role of raindrop impact on hydrodynamic mechanism of soil erosion under simulated rainfall conditions. *Soil Sci.* 177: 8. 517-526.
3. Arjmand Sajjadi, S., and Mahmoodabadi, M. 2015. Sediment concentration and hydraulic characteristics of rain-induced overland flows in arid land soils. *J. Soil Sed.* 15: 710-721.
4. Asadi, H., and Rouhipour, H. 2007. The dynamic of sheet erosion. In *Proceedings of the 10th Iranian Soil Science Congress*. Pp: 1256-1257. (In Persian)
5. Bajracharya, R.M., Lal, R., and Elliot, W.J. 1992. Interrill erodibility of some Ohio soils based on field rainfall simulation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1. 267-272.
6. Bako, A.N., Darboux, F., James, F., Josserand, C., and Lucas, C. 2016. Pressure and shear stress caused by raindrop impact at the soil surface: scaling laws depending on the water depth. *Earth Surf. Process. Land.* 41: 9. 1199-1210.
7. Cornelis, W.M., Oltenfreiter, G., Gabriels, D., and Hartmann, R. 2004. Splash-saltation of sand due to wind-driven rain: horizontal flux and sediment transport rate. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1. 41-46.
8. De Lima, J.L.M.P. 1989. The influence of the angle of incidence of the rainfall on the overland flow process. In: *Proceedings of the Baltimore Symposium, New directions for surface water modeling*. Baltimore, US. Pp: 73-82.
9. De Lima, J.L.M.P., Van Dijk, P.M., and Spaan, W.P. 1992. Splash-saltation transport under wind-driven rain. *Soil Tech.* 5: 151-166.
10. Defersha, M.B., Quraishi, S., and Melesse, A. 2011. The effect of slope steepness and antecedent moisture content on interrill erosion, runoff and sediment size distribution in the highlands of Ethiopia. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15: 2367-2375.
11. Dimoyiannis, D., Valmis, S., and Danalatos, N.G. 2006. Interrill erosion on cultivated Greek soils: modelling sediment delivery. *Earth Surf. Process. Land.* 31: 8. 940-949.
12. Erpul, G., Gabriels, D., and Jannsens, D. 1998. Assessing the drop size distribution of simulated rainfall in a wind tunnel. *Soil Tillage Res.* 45: 3-4. 455-463.
13. Erpul, G., Gabriels, D., and Norton, D.L. 2005. Sand detachment by wind-driven raindrops. *Earth Surf. Process. Land.* 30: 241-250.
14. Erpul, G., Gabriels, D., and Norton, L.D. 2004. Wind effects on sediment transport by raindrop-impacted shallow flow: a wind tunnel study. *Earth Surf. Process. Land.* 29: 955-967.
15. Erpul, G., Norton, L.D., and Gabriels, D. 2003a. Sediment transport from interrill areas under wind-driven rain. *J. Hydrol.* 276: 184-197.
16. Erpul, G., Norton, L.D., and Gabriels, D. 2003b. The effect of wind on raindrop impact and rainsplash detachment. *Trans. ASAE.* 46: 1. 51-62.
17. Erpul, G., Norton, L.D., and Gabriels, D. 2002. Raindrop-induced and wind-driven soil particle transport. *Catena.* 47: 3. 227-243.
18. Fister, W., and Schmidt, R.G. 2008. Concept of a single device for simultaneous simulation of wind and water erosion in the field. In: *Proceedings of the Conference on Desertification, Combating desertification: assessment, adaptation and mitigation strategies.* 23: 106-113.
19. Fister, W., Iserloh, T., Ries, J.B., and Schmidt, R.G. 2011. Comparison of rainfall characteristics of a small portable rainfall simulator and a combined portable wind and rainfall simulator. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues.* 55: 3. 109-126.
20. Fister, W., Iserloh, T., Ries, J.B., and Schmidt, R.G. 2012. A portable wind and rainfall simulator for in situ soil erosion measurements. *Catena.* 91: 72-84.
21. Fox, D.M., and Bryan, R.B. 1999. The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient. *Catena.* 38: 211-222.

22. Gilley, J.E., Woolhiser, D.A., and McWhorter, D.B., 1985. Interrill soil erosion- Part I: development of model equations. *Trans. ASAE*. 28: 147-153.
23. Giménez, R., and Govers, G. 2002. Flow detachment by concentrated flow on smooth and irregular beds. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 5. 1475-1483.
24. Guy, B.T., Dickinson, W.T., Rudra, R.P., and Wall, G.J. 1990. Hydraulics of sediment-laden sheet flow and the influence of simulated rainfall. *Earth Surf. Process. Land.* 15: 101-118.
25. Huang, C.H., Norton, L.D., and Zheng, F.L. 2000. Vertical hydraulic gradient and run-on water and sediment effects on erosion processes and sediment regimes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 955-956.
26. Hui-Ming, S.H.I.H., and Yang, C.T. 2009. Estimating overland flow erosion capacity using unit stream power. *Int. J. Sed. Res.* 24: 1. 46-62.
27. Iserloh, T., Fister, W., Marzen, M., Seeger, M., Kuhn, N.J., and Ries, J.B. 2013. The role of wind-driven rain for soil erosion—an experimental approach. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues.* 57: 1. 193-201.
28. 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 Surf. Process. Land.* 31: 8. 929-939.
29. Kheirabadi, H., Mahmoodabadi, M., Jalali, V.R., and Naghavi, H. 2018. Sediment flux, wind erosion and net erosion influenced by soil bed length, wind velocity and aggregate size distribution. *Geoderma.* 323: 22-30.
30. Kinnell, P.I.A. 1993. Interrill erodibilities based on the rainfall intensity flow discharge erosivity factor. *Soil Res.* 31: 3. 319-332.
31. Kinnell, P.I.A. 2005. Raindrop impact induced erosion processes and prediction: a review. *Hydrol. Process.* 19: 14. 2815-2844.
32. Kinnell, P.I.A. 1991. The effect of flow depth on sediment transport induced by raindrops impacting shallow flows. *Trans. ASAE.* 34: 161-168.
33. Kinnell, P.I.A., and Wood, J.T. 1992. Isolating erosivity and erodibility components in erosion by rain-impacted flow. *Trans. ASAE.* 35: 201-205.
34. Mahmoodabadi, M., and Ahmadbeygi, B. 2013. Dry and water-stable aggregates in different cultivation systems of arid region soils. *Arab. J. Geosci.* 6: 2997-3002.
35. Mahmoodabadi, M., and Cerdà, A. 2013. WEPP calibration for improved predictions of interrill erosion in semi-arid to arid environments. *Geoderma.* 204-205: 75-83.
36. Mahmoodabadi, M., Ghadiri, H., Rose, C., Yu, B., Rafahi, H., and Rouhipour, H. 2014a. Evaluation of GUEST and WEPP with a new approach for the determination of sediment transport capacity. *J. Hydrol.* 513: 413-421.
37. Mahmoodabadi, M., Ghadiri, H., Yu, B., and Rose, C. 2014 b. Morpho-dynamic quantification of flow-driven rill erosion parameters based on physical principles. *J. Hydrol.* 514: 328-336.
38. Marzen, M., Iserloh, T., Casper, M.C., and Ries, J.B. 2015. Quantification of particle detachment by rain splash and wind-driven rain splash. *Catena.* 127: 135-141.
39. Morgan, R.P.C. 2005. *Soil Erosion and Conservation*. Third edition. Blackwell publishing. 314p.
40. Nearing, M.A., Bradford, J.M., and Parker, S.C. 1991. Soil detachment by shallow flow at low slopes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 339-344.
41. Nearing, M.A., Foster, G.R., Lane, L.J., and Finkner, S.C. 1989. A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology. *Trans. ASAE.* 32: 5. 1587-1593.
42. Nearing, M.A., Norton, L.D., Bulgakov, D.A., and Larionov, G.A. 1997. Hydraulics and erosion in eroding rills. *Water Reso. Res.* 33: 865-876.
43. Pla, S.I. 2003. Erosion research in Latin America. In: Gabriel, D. and Cornelies, W., (Ed.), *Proceeding of International Symposium, 25 year of assessment of erosion*. Ghent, Belgium.

44. Prosser, I.P., and Rustomji, P. 2000. Sediment transport capacity relations for overland flow. *Prog. Phys. Geogr.* 24: 2. 179-193.
45. Ries, J.B., Fister, W., Iserloh, T., and Marzen, M. 2010. Wind driven rain as a new challenge for in situ rainfall simulation experiments. EGU General Assembly Conference Abstracts.
46. Rouhipour, H., Ghadiri, H., and Rose, C.W. 2006. Investigation of the interaction between flow-driven and rainfall-driven erosion processes. *Soil Res.* 44: 5. 503-514.
47. Schack-Kirchner, H., Schmid, T., and Hildebrand, E. 2005. High-resolution monitoring of surface-flow depth with frequency-domain probes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 2. 343-346.
48. Schmidt, J., 1991. A mathematical model to simulate rainfall erosion. *Catena Supplement.* 19: 101-109.
49. Schmidt, J., Werner, M.V., and Schindewolf, M. 2017. Wind effects on soil erosion by water-A sensitivity analysis using model simulations on catchment scale. *Catena.* 148: 168-175.
50. Shih, H.M., and Yang, C.T. 2009. Estimating overland flow erosion capacity using unit stream power. *Int. J. Sed. Res.* 24: 46-62.
51. Singer, M.J., Walker, P.H., Hutka, J., and Green, P. 1981. Soil erosion under simulated rainfall and runoff at varying cover levels. Division of Soils Report No. 55, CSIRO, Australia.
52. Sirjani, E., and Mahmoodabadi, M. 2014. Effects of sheet flow rate and slope gradient on sediment load. *Arab. J. Geosci.* 7: 203-210.
53. Torri, D., Sfalanga, M., and Del Sette, M. 1987. Splash detachment: runoff depth and soil cohesion. *Catena.* 14: 149-155.
54. Toy, T.G., Foster, G.R., and Renard, K.G. 2002. *Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement and Control.* John Wiley and Sons, Inc., New York. USA. 338p.
55. Valmis, S., Dimoyiannis, D., and Danalatos, N.G. 2005. Assessing interrill erosion rate from soil aggregate instability index, rainfall intensity and slope angle on cultivated soils in central Greece. *Soil Tillage. Res.* 80: 1. 139-147.
56. Yang, C.T. 1972. Unit stream power and sediment transport. *J. Hydraul. Division, ASCE.* 98: 1805-1826.
57. Zamani, S., and Mahmoodabadi, M. 2013. Effect of particle-size distribution on wind erosion rate and soil erodibility. *Arch. Agron. Soil Sci.* 59: 12. 1743-1753.
58. Zhang, G.H., Liu, B.Y., Liu, G.B., He, X.W., and Nearing, M.A. 2003. Detachment of undisturbed soil by shallow flow. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 713-719.
59. Zhang, G.H., Liu, B.Y., Nearing, M.A., Huang, C.H., and Zhang, K.L. 2002. Soil detachment by shallow flow. *Trans. ASAE.* 45: 351-357.
60. Zhang, G.H., Liu, Y.M., Han, Y.F., and Zhang, X.C. 2009. Sediment transport and soil detachment on steep slopes: I. Transport capacity estimation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 1291-1297.
61. Zhang, G.H., Wang, L.L., Tang, K.M., Luo, R.T., and Zhang, X.C. 2011. Effects of sediment size on transport capacity of overland flow on steep slopes. *Hydrol. Sci. J.* 56: 7. 1289-1299.
62. Zhang, X.J., and Wang, Z.L. 2017. Interrill soil erosion processes on steep slopes. *J. Hydrol.* 548: 652-664.
63. Zhang, X.C., Nearing, M.A., Norton, L.D., Miller, W.P., and West, L.T. 1998. Modeling interrill sediment delivery. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 2. 438-444.
64. Zheng, F.L. 2005. Effect of accelerated soil erosion on soil nutrient loss after deforestation on the Loess Plateau. *Pedosphere.* 15: 6. 707-715.



Simultaneous effects of wind and rain on hydraulic parameters of sheet flow and interrill erosion rate

R. Rezaei Arshad¹ and *M. Mahmoodabadi²

¹Ph.D. Student, Dept. of Soil Science and Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman,

²Associate Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman

Received: 11.08.2017; Accepted: 05.07.2018

Abstract

Background and Objectives: Many natural rainstorms in arid and semiarid regions accompany by wind blowing. However, so far no comprehensive research has been done on the influence of wind on rain-induced erosion under laboratory conditions in Iran. The present study was conducted to investigate the interactive effects of different wind velocities and rain intensities on flow hydraulic parameters and on the interrill erosion rate of several agricultural soils. For this purpose, a simultaneous wind, rain and runoff simulator was used, which has been designed and constructed for the first time in the country.

Materials and Methods: Various combinations of four wind speeds including 0, 6, 9 and 12 m s⁻¹, three rain intensities of 30, 50 and 75 mm h⁻¹ were introduced on three cropland soils with different aggregate size distributions with the largest particle sizes of 2, 4.75 and 8 mm, each at three replications. Different flow hydraulic parameters including mean flow velocity, flow depth, shear stress, stream power and unit stream power in addition to the rate of interrill erosion were measured. Afterwards, the effects of wind velocity on the flow hydraulic parameters and also the influence of the measured parameters on interrill erosion rate were assessed.

Results: The results showed that depending on wind velocity, the rate of interrill erosion varied from 0.021 and 0.22 g m⁻² s⁻¹. In this research, the wind velocity of 6 to 9 m s⁻¹ was introduced as a threshold value. With increasing wind speed particularly those speeds higher than the threshold, the flow parameters of velocity and unit stream power increased, whereas, flow depth and shear stress decreased. In addition, stream power increased as wind velocity increased up to the threshold wind velocity and at the higher wind speeds, the reverse trend was observed. The result indicated that wind velocity can control interrill erosion rate through affecting on flow hydraulic parameters. Interrill erosion increased with increasing the velocity and unit stream power of flow, while it was reduced when flow depth, shear stress and stream power increased. This was attributed to the expenditure of raindrops energy for passing through water depth. In fact, the opposite relationship between flow velocity and water depth affects the other hydraulic parameters. Moreover, the presence of coarser aggregates at the soil surface increased water depth and decreased the flow velocity and unit stream power of flow, resulting in interrill erosion reduction.

Conclusion: The findings of this study showed that in wind-driven rains particularly at those wind velocities higher than a threshold value, interrill erosion rate increased sharply due to increasing in rain erosivity and flow velocity and decreasing in flow depth. It was found that with appropriate soil management in agricultural soils for increasing the size and strength of surface aggregates, flow velocity and consequently soil erosion can be reduced. From another point of view, the presence of stable and coarser aggregates at soil surface decreases interrill erosion. Overall, the findings of this study revealed the importance and necessity of more studies on soil erosion processes due to wind-driven rain.

Keywords: Wind-driven rain, Flow velocity, Water depth, Wind speed, Rain intensity

* Corresponding Author; Email: mahmoodabadi@uk.ac.ir