

تأثیر باران متأثر از باد بر فرسایش بین‌شیاری با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز همزمان باد، باران و رواناب

روح اله رضایی‌ارشد^۱، مجید محمودآبادی^{۲*}، محمدهادی فرپور^۳ و مجید فکری^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

۳- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

تاریخچه مقاله	چکیده
دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۱۶ پذیرش نهایی: ۱۳۹۷/۰۱/۲۸	رگبارهای شدید و فرساینده، به‌طور معمول با وزش بادهای تند همراه است. هرچند شناخت اثرات متقابل باران و باد اهمیت ویژه‌ای در پژوهش‌های فرسایش خاک دارد، ولی تاکنون مطالعه جامعی در این زمینه و در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی انجام نشده است. پژوهش حاضر با هدف بررسی فرسایش بین‌شیاری ناشی از باران در حضور سرعت‌های مختلف باد بر روی چند خاک زراعی با استفاده از شبیه‌ساز همزمان باد، باران و رواناب انجام شد. چهار سرعت باد شامل صفر، ۶، ۹ و ۱۲ متر در ثانیه در ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر و سه شدت باران ۳۰، ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر در ساعت بر روی سه خاک زراعی، با بزرگترین اندازه ذرات ۲، ۴/۷۵ و ۸ میلی‌متر ایجاد و شدت فرسایش بین‌شیاری اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که سرعت باد تأثیر معنی‌داری بر شدت فرسایش بین‌شیاری دارد. با افزایش سرعت باد از ۶ متر در ثانیه به ۹ و ۱۲ متر در ثانیه، شدت فرسایش بین‌شیاری به‌طور معنی‌داری افزایش یافت که این موضوع نشان از وجود یک آستانه برای سرعت باد در تشدید فرسایش بین‌شیاری دارد. میانگین شدت فرسایش در سرعت صفر، ۶، ۹ و ۱۲ متر در ثانیه باد به ترتیب $10^{-4} \times 0/43$ ، $10^{-4} \times 0/54$ ، $10^{-4} \times 0/97$ و $10^{-4} \times 1/67$ کیلوگرم بر متر مربع در ثانیه اندازه‌گیری گردید. هم‌چنین با افزایش شدت باران و کاهش اندازه خاکدانه‌ها، شدت فرسایش بین‌شیاری افزایش نشان داد. یافته‌های این پژوهش، اهمیت سرعت باد به ویژه سرعت‌های بیش‌تر از مقدار آستانه را در بررسی فرسایش بین‌شیاری نشان می‌دهد.
* عهده دار مکاتبات Email: mahmoodabadai@uk.ac.ir	

اقتصادی و رفع وابستگی و حفظ محیط زیست را در پی دارد، بلکه سبب استقلال فرهنگی، سیاسی و نظامی که از دیگر شاخص‌های توسعه پایدار محسوب می‌شوند، می‌گردد. در حقیقت خاک یک ماده حیاتی است که

مقدمه

خاک یکی از نعمت‌های با ارزش و حیاتی و از جمله منابع مؤثر و زیربنایی اقتصادی هر کشور محسوب می‌شود. بنابراین تلاش در حفظ این منبع نه تنها استقلال

موجود در سطح دارد که آن خود به پایداری خاکدانه و وضعیت ساختمان خاک وابسته است (۱۶، ۲۵، ۳۴ و ۴۷). از طرف دیگر، میزان خردشدن خاکدانه‌ها نیز به‌طور مستقیم بستگی به انرژی جنبشی باران و شدت و مدت آن دارد (۲). همزمان با بارش باران، اگر رواناب کم‌عمق در سطح ایجاد شود، بخشی از ذرات به صورت انتخابی منتقل می‌شوند که در این صورت فرسایش بین شیارهای اتفاق می‌افتد. در واقع، انتقال ذرات رسوب به‌وسیله جریان رواناب کم‌عمق به‌طور همزمان با فرآیند پاشمان توسط قطرات باران رخ می‌دهد که البته با افزایش عمق جریان در عمق‌های بیش‌تر از عمق بحرانی، شدت جداشدن و جداشدن مجدد به‌طور غیرخطی کاهش می‌یابد (۲ و ۲۷)؛ به‌عبارت دیگر، در فرسایش بین‌شیاری، انتقال ذرات رسوب به‌وسیله اثر متقابل بین باران و پارامترهای هیدرولیکی جریان ورقه‌ای تعیین می‌شود (۱۳).

در طبیعت، باران‌های شدید و فرساینده، معمولاً با وزش بادهای تند همراه است؛ بنابراین، تعیین اثر متقابل باد و باران و اثرات سرعت باد بر فرآیندهای جدا شدن و انتقال ذرات تأثیر زیادی در بهبود برآورد فرسایش خاک از طریق مدل‌های پیش‌بینی فرسایش خاک فراهم می‌سازد (۱۳). جدا شدن و انتقال ذرات در اثر باران متأثر از باد متفاوت از باران بدون باد است (۹). پژوهش‌های گذشته نشان داده است که باد بر زاویه سقوط قطرات باران (۸ و ۴۱)، سرعت سقوط قطرات (۱۴، ۱۵ و ۳۲)، اندازه قطرات (۷، ۱۴ و ۱۵) و انرژی جنبشی (۱۰ و ۱۷) و در نتیجه شدت فرسایش خاک تأثیر دارد. در واقع، باد به‌طور قابل توجهی اثر برخورد قطرات باران را که تابعی از اندازه قطره، انرژی برخورد و زاویه برخورد است، را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۳۹). هم‌چنین، وزش باد با تأثیر بر روی انرژی جنبشی و زاویه برخورد قطرات باران و در پی آن بر جداسازی ذرات خاک تأثیرگذار است (۳۷). با توجه به پژوهش‌های محدودی که در زمینه تأثیر باد بر فرسایش بین‌شیاری انجام شده است، یک شکاف

تمدن‌ها برای پیشرفت به آن نیاز دارند (۳۳). اما در چند دهه اخیر، این منبع طبیعی با ارزش، در اثر عوامل انسانی (جنگل‌زدایی، چرای بیش از حد، مدیریت ناصحیح اراضی و غیره) و عوامل طبیعی (فرسایش آبی و بادی) از بین رفته، در معرض تخریب و نابودی قرار گرفته است. هم‌چنین توزیع غیریکنواخت باران در سطح کشور باعث شده است که در اثر رگبارهای ناگهانی با جاری شدن سیل در مناطق مختلف، زمینه فرسایش خاک فراهم آید. فرسایش خاک عامل کلیدی تخریب اراضی کشاورزی و جنگل‌ها می‌باشد که هر ساله مقادیر زیادی از خاک سطحی و حاصل‌خیز خاک را از بین می‌برد (۲۴).

جدا شدن، انتقال و رسوبگذاری، سه فرآیند اصلی فرسایش خاک می‌باشند که به‌طور همزمان در طول یک رخداد فرسایشی اتفاق می‌افتند (۱۹، ۲۸ و ۲۹). فرسایش آبی تحت تأثیر بارندگی و رواناب رخ می‌دهد و بر این اساس در مطالعه این نوع فرسایش، فرآیندها به دو دسته فرآیندهای ناشی از باران و فرآیندهای ناشی از رواناب تقسیم شده‌اند (۲۹). در مدل‌های جدید فرآیندهای فرسایش خاک، فرسایش بین‌شیاری از فرسایش شیارهای تفکیک شده است (۲۶). این فرسایش یکی از انواع مهم و رایج فرسایش آبی در اراضی کشاورزی است (۱۹ و ۲۲).

فرسایش بین‌شیاری، در اثر جدا شدن و انتقال ذرات خاک به‌وسیله قطرات باران (۳۱) و یا انتقال حاصل از جریان ورقه‌ای (۵) رخ می‌دهد (۲۰، ۴۵، ۴۸ و ۵۰). فرسایش بین‌شیاری به ویژگی‌های قطرات باران، ویژگی خاک در معرض فرسایش، شیب، زبری سطح و رژیم جریان ورقه‌ای بستگی دارد (۱، ۲۶ و ۲۷). برخورد قطرات باران به سطح خاک، موجب خرد و شکسته شدن خاکدانه‌های موجود در سطح شده، در نتیجه، انسداد سطحی رخ می‌دهد (۲ و ۳). ذرات خاکدانه در اثر ضربه قطرات باران از محل اولیه خود جدا و به‌وسیله جریان رواناب کم‌عمق جابه‌جا می‌شوند (۶). تشکیل و توسعه سله سطحی بستگی به میزان خردشدن خاکدانه‌های

از باد در دستگاه شبیه‌ساز همزمان، باد، باران و رواناب، (۲) تأثیر شدت‌های مختلف باران بر شدت فرسایش بین‌شیاری در چند خاک با توزیع اندازه خاکدانه مختلف و (۳) تأثیر سرعت‌های مختلف باد بر فرسایش بین‌شیاری انجام شد.

مواد و روش‌ها

دستگاه شبیه‌ساز همزمان باد، باران و رواناب

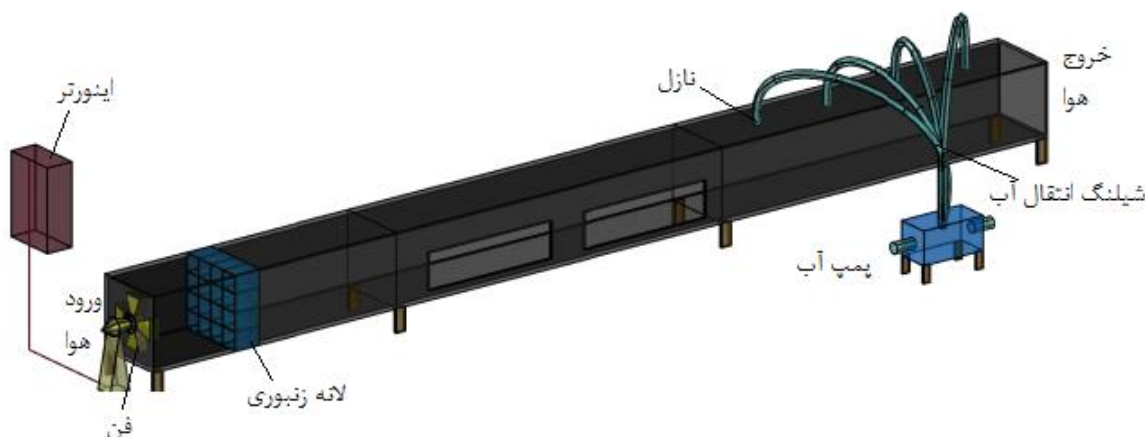
در این پژوهش، مطالعه فرسایش بین‌شیاری از طریق ایجاد باران متأثر از باد در شرایط آزمایشگاهی انجام شد. به این منظور، از دستگاه شبیه‌ساز همزمان باد، باران و رواناب موجود در آزمایشگاه فرسایش و حفاظت خاک دانشگاه شهید باهنر کرمان استفاده شد (شکل ۱). این دستگاه که برای اولین بار در کشور طراحی و ساخته شده، دارای طول ۱۲ متر و ارتفاع و عرض ۰/۸ متر می‌باشد (۱۸) و شامل سامانه‌های شبیه‌ساز باد، باران و رواناب است که این امکان را فراهم می‌سازد تا بتوان اثر جداگانه و یا توأم عوامل فرساینده را بر فرسایش آبی و بادی مطالعه نمود. این دستگاه قابلیت‌های منحصر به فردی دارد و 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) روی سطحی از خاک با طول نیم تا تا ۷ متر شبیه‌سازی نماید (شکل ۱).

سامانه شبیه‌ساز باران مورد استفاده شامل سیستم آبرسانی و صفحه بارش است که آب مورد نیاز باران 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 شده است. صفحه بارش از چهار عدد نازل از نوع تحت فشار تشکیل شده که در ارتفاع ۸۰ سانتی‌متری از کف تونل باد و در سقف تونل نصب شده است. با تغییر فشار، تعداد نازل‌های فعال و فواصل بین آن‌ها شدت و الگوی باران قابل تنظیم است.

اطلاعاتی قابل تأمل در ارتباط با فرسایش بین‌شیاری متأثر از باد وجود دارد (۳۶، ۳۸ و ۴۴). بنابراین، شبیه‌سازی دقیق شرایط طبیعی فرسایش خاک نیاز به درک بهتر اثر باد بر فرسایش دارد.

در باران‌های متأثر از باد، سرعت و جهت باد نه تنها انرژی قطرات در حال برخورد با سطح را بلکه هیدرولیک جریان‌های کم عمق را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ زیرا در اثر برخورد قطرات باران در پستی، و بلندی‌های ریز سطح خاک تغییر ایجاد می‌شود (۱۲). اپرل و همکاران^۱ (۱۱) بیان کردند که وزش باد بر روی سرعت برخورد، زاویه برخورد و فراوانی برخورد قطرات باران در واحد سطح تأثیر می‌گذارد و بسته به سرعت باد، ذرات پاشمان یافته را تا مسافت‌های مختلفی انتقال می‌دهد.

در بسیاری از مناطق خشک و نیمه خشک، نظیر ایران برخی بارندگی‌های شدید و رگباری همراه با وزش بادهای تند می‌باشد که این موضوع منجر به وقوع همزمان فرآیند فرسایش آبی و بادی و تأثیرپذیری این دو فرآیند از همدیگر می‌شود. جریان باد، علاوه بر تأثیری که خود بر جدا کردن ذرات خاک دارد، با انحراف قطرات باران در حال سقوط از حالت عمود منجر به جدا شدگی بیش‌تر ذرات خاک و انتقال ذرات جدا شده تا مسافت‌های طولانی‌تری می‌شود؛ در نتیجه، علاوه بر هدررفت ذرات حاصل‌خیز خاک سطحی، ممکن است مشکلات زیست محیطی نیز بروز کند. با وجود نقش مهمی که جریان باد بر قدرت فرسایش باران دارد ولی تاکنون پژوهش‌های جامعی در زمینه فرسایش ناشی از باران متأثر از باد در ایران گزارش نشده است. این در حالی است که حتی پژوهش‌های انجام شده در دنیا نیز در این زمینه اندک بوده و نیاز به انجام آزمایش‌های بیش‌تر برای شناخت فرآیندهای فرسایش ناشی از باران متأثر از باد وجود دارد. بنابراین این پژوهش با اهداف بررسی (۱) واسنجی شدت باران متأثر



شکل (۱) نمایی از دستگاه شبیه ساز همزمان باد، باران و رواناب مورد استفاده در این پژوهش

Figure(1) A schematic of the Simultaneous Wind-Rainfall-Runoff Simulator used in this study

صورت گرفت (۳۰). گام اول با استفاده از نتایج حاصل از مرحله قبل و ترکیب نمودن آن‌ها در محیط نرم افزار Excel انجام شد. به این منظور در هر فشار آب، توزیع شدت بر روی طول قاعده مخروط بارش مربوط به هر نازل، به صورت ستونی از داده‌ها با ستون مربوط به توزیع شدت سایر نازل‌ها در همان فشار، ترکیب و فاصله نازل‌ها طوری تنظیم شد که با تداخل قاعده‌های مخروط‌های بارش، بیش‌ترین یکنواختی نسبی حاصل گردد. از بین ترکیب‌های مختلف، سه شدت ۳۰، ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر در ساعت که دارای بیش‌ترین ضریب یکنواختی بودند، انتخاب شد.

برای ارزیابی یکنواختی شدت بارش، از ضریب یکنواختی کریستین سن^۱ (C.C) استفاده گردید. این ضریب با استفاده از شدت باران در هر ظرف (Xi)، شدت متوسط بارش (m) و تعداد ظروف (n) از رابطه زیر محاسبه شد (۳۰ و ۴۲):

$$C.C = [1 - (\sum |x_i - m|) / (m.n)] \times 100 \quad (1)$$

در گام بعد، با توجه به نتایج مرحله محاسبه‌ای، سه شدت منتخب باران به صورت مشاهده‌ای (واقعی) نیز ایجاد شد. به این منظور، مشابه مرحله اول، ظروف استوانه‌ای در زیر

تعیین شدت و یکنواختی باران

به منظور تعیین دامنه شدت‌هایی که به وسیله دستگاه قابل شبیه‌سازی است و هم‌چنین اندازه‌گیری شدت و یکنواختی باران آزمایش‌هایی در دو مرحله انجام شد (۳۰):

الف: تعیین شدت و یکنواختی بارش برای تک نازل‌ها

به منظور انجام این مرحله از آزمایش، یک چارچوب فلزی با ارتفاع برابر ارتفاع موثر تونل باد و طول و عرض دو متر ساخته شد و نازل‌ها با استفاده از یک صفحه فلزی متحرک بر روی این چارچوب نصب گردید. برای تعیین شدت و یکنواختی باران در قاعده مخروط بارش برای هر نازل منفرد، از ظروف استوانه‌ای با سطح مقطع ۸۰ سانتی‌متر مربع با فواصل ۱۵ سانتی‌متر بین مراکز آن‌ها استفاده شد. با اعمال باران در فشارهای مختلف و اندازه‌گیری آب جمع شده در ظروف در مدت ۱۰ دقیقه، توزیع شدت باران در راستای طول و عرض ۱/۵ متر تعیین گردید. این آزمایش‌ها در مورد هر چهار نازل به‌طور جداگانه انجام شد (۳۰).

ب: تعیین توزیع بارش برای ترکیب نازل‌ها

بررسی شدت و یکنواختی باران در سطح تشتک برای ترکیب نازل‌ها در دو گام محاسبه‌ای و مشاهده‌ای

1- Christiansen's coefficient of uniformity

و عمق آن ۷ سانتی متر بود. البته برای ایجاد شرایط نفوذ آب در خاک، یک لایه فلزی مشبک در کف آن نصب گردید.

آزمایش‌های شبیه‌سازی فرسایش

در هر آزمایش، خاک مورد نظر به تشک مخصوص منتقل و به طور کامل تسطیح شد؛ سپس اشباع تدریجی هر نمونه از زیر انجام و نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در شرایط اشباع نگهداری گردید (۲۷). در ادامه، زهکش تخلیه و تشک حاوی نمونه خاک در شیب ۰/۵ درصد و در معرض ترکیب‌های مختلف باران و باد بر روی آن قرار گرفت. مدت زمان هر آزمایش ۳۰ دقیقه در نظر گرفته شد که در هر آزمایش رواناب حاوی رسوب خروجی از سینی برای پنج دقیقه ابتدایی آزمایش هر یک دقیقه یکبار و در ادامه تا پایان آزمایش هر پنج دقیقه یکبار جمع‌آوری شد. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک و در نهایت شدت فرسایش بین‌شیاری برای شرایط پایدار محاسبه گردید. منظور از شرایط پایدار حالتی است که تغییرات دبی رسوب با گذشت زمان تقریباً ثابت باقی بماند (۲ و ۲۸).

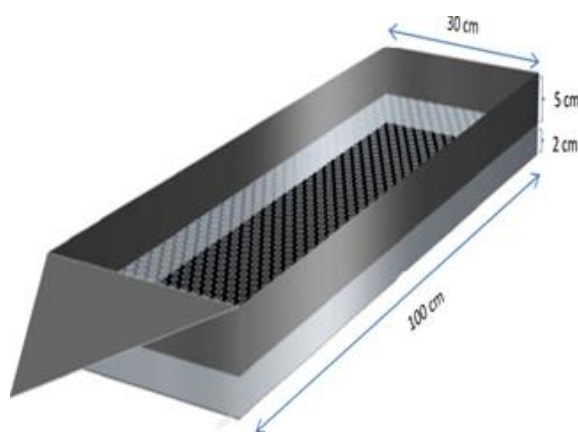
صفحه بارش چیده شد و ضریب یکنواختی و شدت باران برای سه شدت منتخب اندازه‌گیری گردید. بعد از تعیین دقیق فواصل بین نازل‌ها، نازل‌ها بر روی سقف تونل باد نصب گردید و سپس برای اطمینان از حصول نتایج مطابق مراحل قبل، شدت باران و ضریب یکنواختی برای هر سه شدت منتخب مجدداً اندازه‌گیری شد (۳۰).

تیمارهای مورد مطالعه

آزمایش‌ها به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار انجام گردید. سه فاکتور شامل شدت باران (۳۰، ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر بر ساعت)، سرعت باد (صفر یا بدون حضور باد به عنوان شاهد، ۶، ۹ و ۱۲ متر بر ثانیه) و خاک (با حداکثر اندازه خاکدانه ۲، ۴/۷۵ و ۸ میلی‌متر، به ترتیب با اسامی D_{2mm} ، $D_{4.75mm}$ و D_{8mm}) بود. تجزیه واریانس با استفاده از نرم‌افزار SPSS و مقایسه میانگین از طریق آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

تشک مخصوص اندازه‌گیری فرسایش بین‌شیاری

برای اندازه‌گیری فرسایش بین‌شیاری از یک تشک، مخصوص از جنس آهن گالوانیزه استفاده شد (شکل ۲). طول و عرض این تشک به ترتیب ۱ و ۰/۳ متر



شکل (۲) نمایی از تشک مخصوص برای اندازه‌گیری فرسایش بین‌شیاری

Figure(2) A Schematic of the especial tray used for the measurement of interrill erosion

نتایج و بحث

توزیع شدت بارش برای تک نازل‌ها

با ایجاد باران در سه فشار (۰/۸، ۱ و ۱/۲ اتمسفر) برای تک تک نازل‌ها، شدت باران در قاعده مخروط بارش تعیین و توزیع یکنواختی آن محاسبه گردید. شکل‌های ۳ و ۴ توزیع شدت باران را برای چهار نازل منتخب در سه فشار آزمایشی با فاصله از مرکز قاعده مخروط باران، به ترتیب در راستای طول و عرضی (در راستای طول و عرض تشتک مخصوص) نشان می‌دهد. از آن‌جا که طول و عرض در نظر گرفته تنها ۱/۵ متر بود، شدت باران در انتهای طول و عرض به صفر منتهی نمی‌شود. مشاهده می‌گردد که تغییرات شدت باران در فشارهای مختلف در راستای طولی و عرضی قاعده مخروط بارش، مشابه یکدیگر است. در اغلب موارد، شدت باران دارای دو اوج است که در طرفین مرکز قاعده بارش قرار دارد. این موضوع، به دلیل رفتار مخصوص به این نازل‌ها در ایجاد پاشش آب در شرایط تحت فشار است.

توزیع بارش برای ترکیب نازل‌ها

جدول ۱ ویژگی‌های باران را برای شدت‌های باران مورد مطالعه در حضور سرعت‌های مختلف باد نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که ترکیب دو نازل شماره ۲ و ۳ با فاصله ۱۳۰ سانتی‌متر از یکدیگر و فشار آب ۰/۸ اتمسفر، قادر به ایجاد شدت باران ۳۰ میلی‌متر در ساعت با ضریب یکنواختی بیش از ۸۶/۷۶ درصد می‌باشد. برای شدت‌های باران ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر در ساعت، همزمان از سه نازل فعال استفاده شد. فاصله بین نازل‌ها برای این دو شدت، به ترتیب ۵۵ تا ۷۵ و ۵۵ تا ۱۱۰ سانتی‌متر و فشار آب، به ترتیب ۱/۰ و ۱/۲ اتمسفر در نظر گرفته شد. هم‌چنین نتایج نشان داد که ضریب یکنواختی باران برای این دو شدت، به ترتیب بیش از ۸۹/۷۵ و ۸۷/۴۷ درصد بود که نشان دهنده توزیع مناسب شدت باران در تمام سطح تشتک مخصوص اندازه‌گیری فرسایش بین‌شیاری است.

ویژگی‌های خاک‌های مورد مطالعه

برخی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۲ نشان داده شده است. به‌طور کلی،

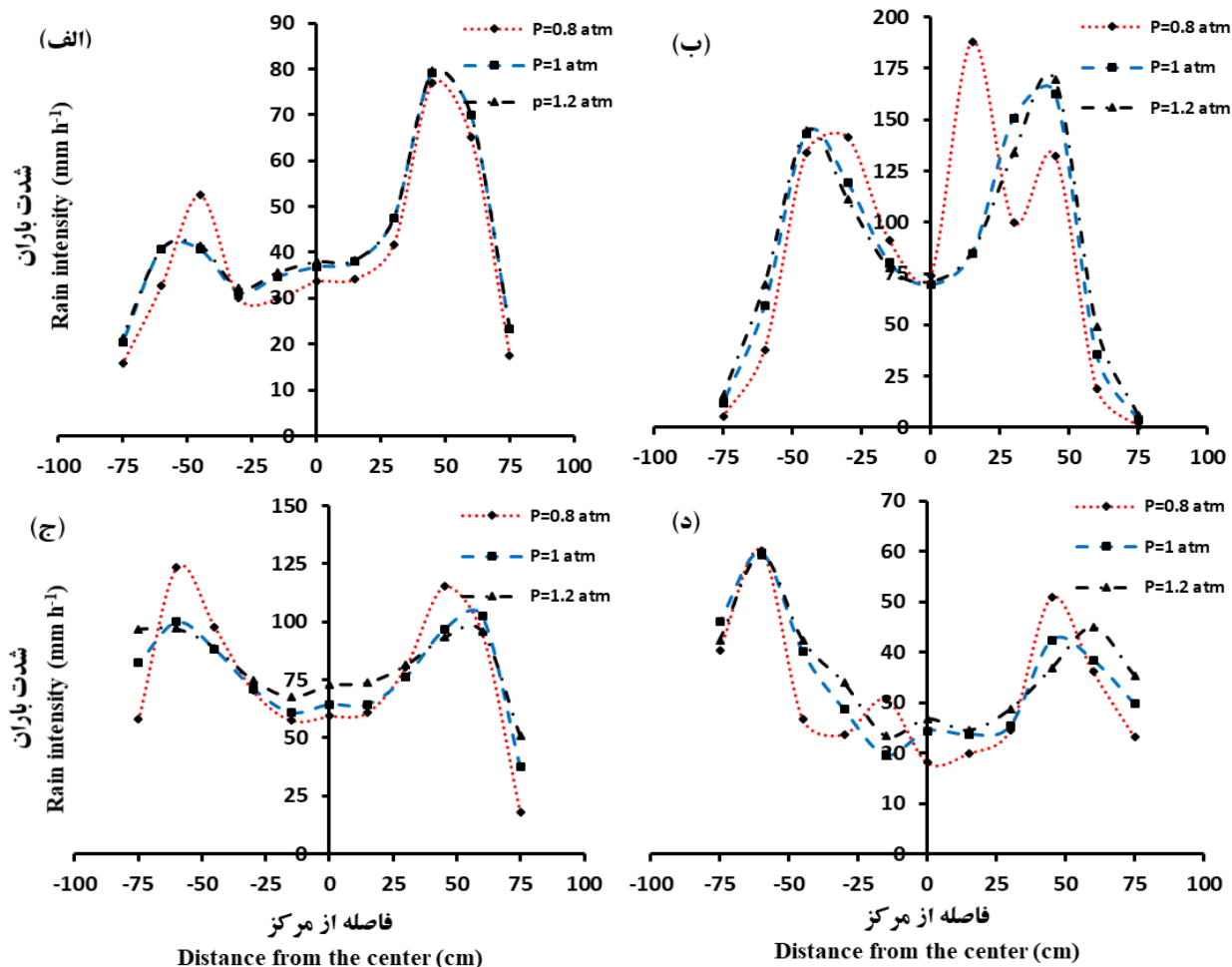
خاک‌های مورد مطالعه دارای بافت لوم شنی هستند. کربن آلی کم‌تر از ۰/۶ درصد و کربنات کلسیم معادل بیش از ۱۰ درصد است.

شدت فرسایش بین‌شیاری

نتایج تجزیه واریانس اثر، سه عامل شدت باران، خاک و سرعت باد بر شدت فرسایش بین‌شیاری در شرایط پایدار در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اثر سه عامل شدت باران، خاک و سرعت باد به صورت جداگانه و هم‌چنین اثر متقابل دو عامل فرساینده باد و باران در سطح احتمال یک درصد بر شدت فرسایش بین‌شیاری معنی‌دار شد. این موضوع اهمیت هر سه عامل مورد مطالعه را و نیز اثر متقابل باد و باران را بر کنترل شدت فرسایش تأیید می‌کند. در شکل ۵ تأثیر شدت‌های مختلف باران در تقابل با سرعت‌های مختلف باد بر متوسط شدت فرسایش بین‌شیاری نشان داده شده است. در هر سرعت از باد، بین شدت فرسایش بین‌شیاری در شدت‌های مختلف باران اختلاف معنی‌داری وجود دارد؛ به‌طوری‌که با افزایش شدت باران از ۳۰ به ۵۰ و نیز ۷۵ میلی‌متر در ساعت، شدت فرسایش به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد. به‌طور معمول، باران‌های با شدت بیش‌تر، انرژی جنبشی و فرساینندگی بیش‌تری دارند. نتایج بررسی اشمیت^۱ (۴۰) نشان داد که در شدت‌های بالاتر بارندگی، قطرات باران دارای انرژی جنبشی بیش‌تری بوده که از طریق خرد کردن بیش‌تر خاکدانه‌های موجود در سطح خاک، باعث توسعه سله سطحی، کاهش نفوذپذیری، افزایش تولید رواناب و در نتیجه، تشدید فرسایش خاک می‌شود. هم‌چنین، ون دایک و همکاران^۲ (۴۳) بیان داشتند که در شدت‌های بیش‌تر باران، حجم رواناب سطحی در واحد سطح خاک بیش‌تر شده که در اثر تقویت قدرت فرساینندگی جریان، ذرات بیش‌تری از سطح جدا شده است و بنابراین میزان انتقال و تولید رسوب افزایش می‌یابد.

1- Schmidt

2- Van Dijk *et al.*



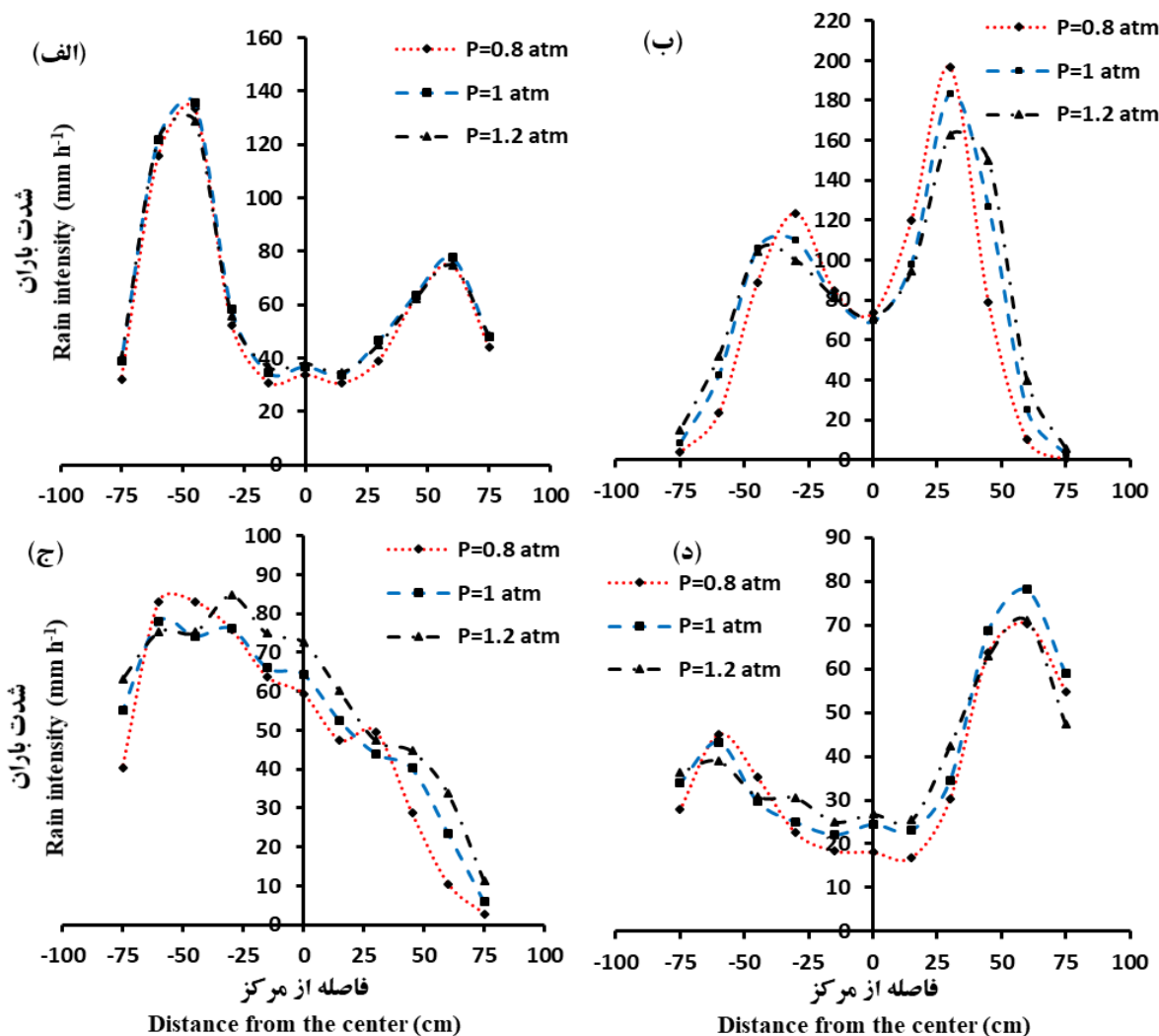
شکل (۳) تغییرات طولی شدت باران با فاصله از مرکز قاعده مخروط بارش برای نازل‌های (الف) شماره ۱، (ب) شماره ۲، (ج) شماره ۳ و (د) شماره ۴

Figure(3) Longitudinal variations of rain intensity from the center of cone base for nozzles (a) No. 1, (b) No. 2, (c) No. 3, (d) No. 4.

جدول (۱) برخی ویژگی‌های شدت‌های مختلف باران شبیه‌سازی شده

Table(1) Some properties of the simulated rain intensities

ضریب یکنواختی	شدت اندازه‌گیری شده	فاصله نازل‌ها	نازل‌های فعال	سرعت باد	شدت اسمی	فشار
Coefficient of uniformity (%)	Measured intensity (mm s ⁻¹)	Distance between nozzles (cm)	Active nozzles	Wind velocity (m s ⁻¹)	Nominal intensity (mm h ⁻¹)	Pressure (atm)
88.46	31.11	130	3,2	0	30	0.8
89.38	33.69	130	3,2	6		
90.07	35.45	130	3,2	9		
86.76	36.93	130	3,2	12		
92.17	51.26	55,75	2,4,3	0	50	1
90	56.23	55,75	2,4,3	6		
90.89	59.44	55,75	2,4,3	9		
89.75	58.04	55,75	2,4,3	12		
92.21	76.60	55,110	3,2,1	0	75	1.2
89	72.20	55,110	3,2,1	6		
87.47	74.82	55,110	3,2,1	9		
93.35	77.46	55,110	3,2,1	12		



شکل (۴) تغییرات عرضی شدت باران با فاصله از مرکز قاعده مخروط بارش برای نازل‌های (الف) شماره ۱، (ب) شماره ۲، (ج) شماره ۳ و (د) شماره ۴

Figure(4) Transverse variations of rain intensity from the center of cone base for nozzles (a) No. 1, (b) No. 2, (c) No. 3, (d) No. 4.

جدول (۲) برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

Table(2) Some physical and chemical properties of the soils used in the study

ویژگی‌های خاک (Soil properties)	واحد (Unit)	خاک با حداکثر اندازه ذرات ۲ میلی‌متر (D ₂ mm)	خاک با حداکثر اندازه ذرات ۴/۷۵ میلی‌متر (D _{4.75} mm)	خاک با حداکثر اندازه ذرات ۸ میلی‌متر (D ₈ mm)
pH	-	7.69	7.83	7.68
EC	dS m ⁻¹	3.35	3.7	3.75
کربنات کلسیم معادل (CaCO ₃)	%	14.0	13.5	13.5
جرم مخصوص ظاهری (Bulk density)	g cm ⁻³	1.47	1.47	1.47
کربن آلی (Organic carbon)	%	0.195	0.580	0.390
کلاس بافت (Texture class)	-	لوم شنی	لوم شنی	لوم شنی

در شدت‌های باران ۳۰، ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر در ساعت، برای خاک D_{2mm} به ترتیب $10^{-4} \times 1/07$ ، $10^{-4} \times 1/7$ و $10^{-4} \times 2/2$ کیلوگرم در متر مربع در ثانیه بود؛ اما در خاک $D_{4.75mm}$ بیشینه شدت فرسایش در شدت‌های بارندگی یادشده، به ترتیب $10^{-4} \times 0/99$ ، $10^{-4} \times 1/3$ و $10^{-4} \times 1/9$ اندازگی شد. هم‌چنین در خاک D_{8mm} شدت فرسایش بین‌شیاری در این شدت‌های باران، به ترتیب $10^{-4} \times 0/93$ ، $10^{-4} \times 1/2$ و $10^{-4} \times 1/7$ کیلوگرم در متر مربع در ثانیه تعیین شد. این نتایج، گویای این مطلب است که با درشت‌تر شدن خاکدانه‌های موجود در سطح، شدت فرسایش بین‌شیاری کاهش یافته است. یکی از دلایل این کاهش، وجود خاکدانه‌های درشت‌تر در سطح و ایجاد زبری تصادفی بیش‌تر، به‌ویژه در خاک D_{8mm} است (۴۹). به دلیل زبری بیش‌تر در سطح این خاک، سرعت رواناب کم‌تر و رواناب ایجاد شده فرصت بیش‌تری برای نفوذ در خاک دارد.

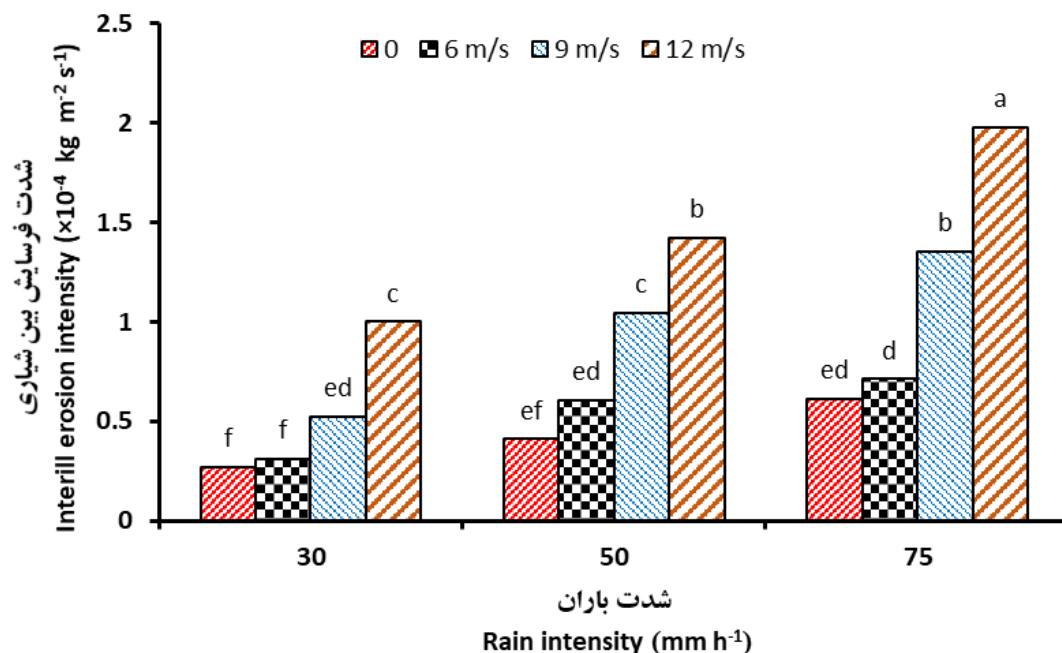
از طرفی، به‌علت وجود خاکدانه‌های درشت‌تر، منافذ بزرگتری در داخل خاک وجود دارد که آب را به‌راحتی عبور می‌دهد و در نهایت نفوذپذیری بیش‌تر خواهد بود. در نتیجه، رواناب کم‌تری در سطح خاک ایجاد می‌شود و تولید رسوب کاهش می‌یابد. هم‌چنین سرعت رواناب در این خاک‌ها نسبت به خاک با خاکدانه‌های ریزتر (D_{2mm}) کم‌تر است که این امر منجر به کاهش ظرفیت انتقال رسوب از طریق جریان کم عمق ورقه‌ای می‌شود. روند افزایش شدت فرسایش در سرعت‌های صفر و ۶ متر بر ثانیه متفاوت از سرعت‌های بیش‌تر باد است به‌نحوی که در سرعت‌های ۹ و ۱۲ متر بر ثانیه، با افزایش سرعت باد، شدت فرسایش بین‌شیاری با شیب تندتری افزایش یافته است (شکل ۶).

از سوی دیگر، مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت باد در هر شدت باران، شدت فرسایش بین‌شیاری به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد. به‌گونه‌ای که بیش‌ترین شدت فرسایش بین‌شیاری در سرعت ۱۲ متر بر ثانیه باد رخ می‌دهد. البته لازم به ذکر است که بین شدت فرسایش در دو سرعت صفر (شاهد) و ۶ متر بر ثانیه باد تفاوت معنی‌داری مشاهده نمی‌شود؛ حال آن‌که با افزایش سرعت باد از ۶ به ۹ متر بر ثانیه و هم‌چنین به ۱۲ متر بر ثانیه افزایش معنی‌دار شدت فرسایش قابل مشاهده است. در پژوهشی که توسط ارپل و همکاران (۱۲) انجام شد نیز به‌طور تقریباً مشابهی سرعت‌های بالاتر باد (۱۰ و ۱۲ متر بر ثانیه) تشدید فرسایش را در پی داشتند که به افزایش سرعت سقوط قطرات باران و انحراف زاویه برخورد قطرات مرتبط دانسته شد.

روند تغییرات شدت فرسایش بین‌شیاری به‌عنوان تابعی از سرعت باد و در شدت‌های مختلف ۳۰، ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر در ساعت باران برای خاک‌های مورد مطالعه در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش سرعت باد و شدت باران، باعث وقوع شدت‌های متفاوت فرسایش بین‌شیاری شده است. برای هر سه خاک مورد مطالعه در سرعت حداکثر باد و البته با افزایش شدت بارندگی، شدت فرسایش افزایش یافته است. برای نمونه، در سرعت باد حداکثر (۱۲ متر در ثانیه) میانگین شدت فرسایش برای شدت‌های ۳۰، ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر در ساعت به ترتیب $10^{-4} \times 1$ ، $10^{-4} \times 1/42$ و $10^{-4} \times 1/98$ کیلوگرم در متر مربع در ثانیه به‌دست آمد. هم‌چنین خاک دارای خاکدانه‌های ریزتر یعنی خاک با ذرات کوچکتر از ۲ میلی‌متر (D_{2mm}) بیش‌ترین و خاک با ذرات کوچکتر از ۸ میلی‌متر (D_{8mm}) کم‌ترین شدت فرسایش را نشان دادند. مقدار بیشینه فرسایش بین‌شیاری

جدول (۳) نتایج تجزیه واریانس اثر فاکتورهای مورد مطالعه بر شدت فرسایش بین‌شیاری در شرایط پایدار
 Table (3) Analysis of variance for the applied factors on interrill erosion rate under steady state conditions.

P value	میانگین مربعات Mean square	درجه آزادی D.F.	منابع تغییرات Source of variation
0.0001	3.67×10^{-8}	2	شدت باران (I)
0.0001	6.09×10^{-9}	2	خاک (S)
0.0001	6.01×10^{-8}	3	باد (W)
0.287	4.65×10^{-10}	4	I×S
0.0001	2.45×10^{-9}	6	I×W
0.77	1.96×10^{-10}	6	S×W
0.99	9.84×10^{-11}	12	I×S×W



شکل (۵) تأثیر شدت‌های مختلف باران در حضور سرعت‌های متفاوت باد بر میانگین فرسایش بین‌شیاری
 Figure(5) The effect of various rain intensities and wind speeds on the average values of interrill erosion.

انتقال ذرات رسوب ایفا می‌کند (۴، ۱۹، ۲۱ و ۳۵). در پژوهشی، وانگ و همکاران^۱ (۴۴) دریافتند که شدت فرسایش بین‌شیاری، رابطه مثبت و معنی‌داری با انرژی جنبشی باران دارد. نتایج پژوهش حاضر هم‌چنین نشان می‌دهد که در یک شدت مشخص باران، در هر سه خاک مورد مطالعه با افزایش سرعت باد، شدت فرسایش نیز روند افزایشی دارد که این روند در سرعت‌های صفر

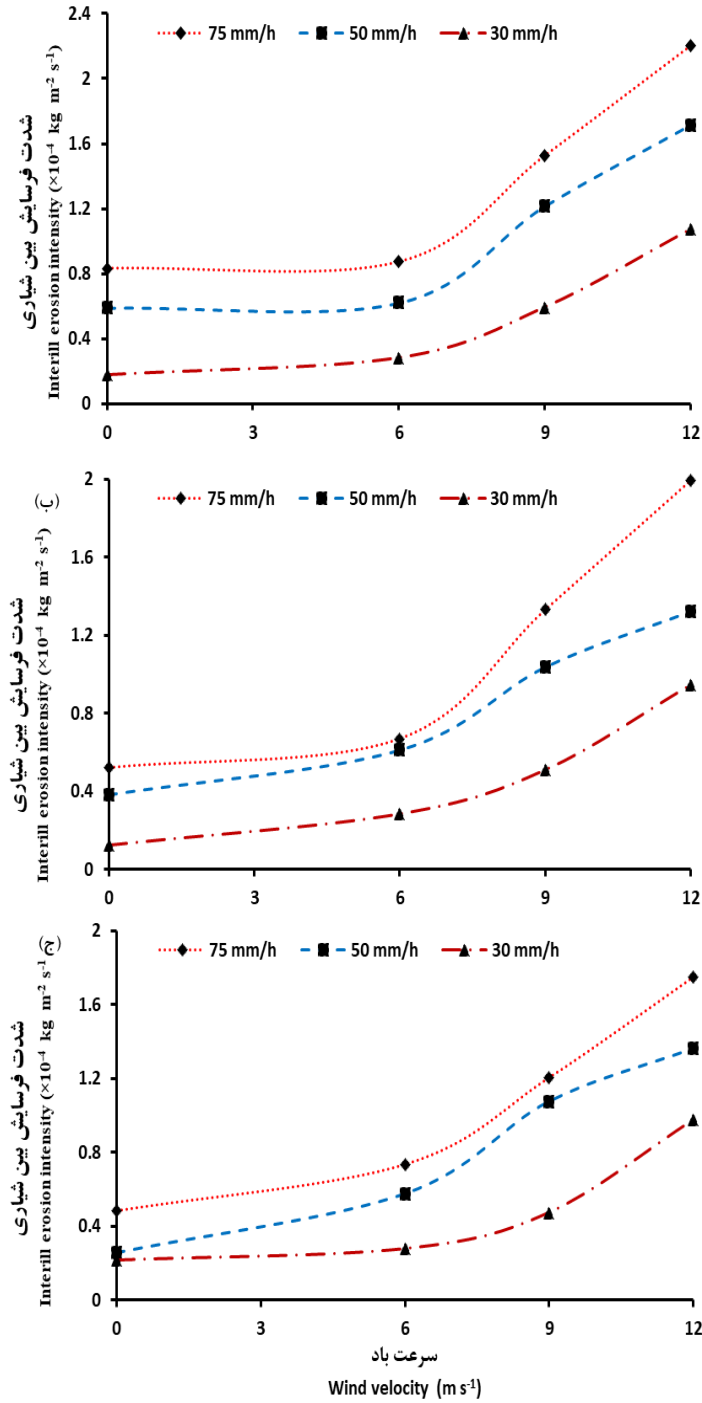
این که افزایش سرعت باد تشدید فرسایش را در پی دارد، در پژوهش‌های قبلی نیز مشاهده شده است (۱۲) و (۱۳)؛ برای نمونه، ارپل و همکاران (۱۳) دلیل افزایش شدت فرسایش ناشی از افزایش سرعت باد را به افزایش انحراف زاویه برخورد قطرات باران از حالت عمود که منجر به افزایش انرژی جنبشی قطرات باران می‌شود، مرتبط دانستند. انرژی جنبشی باران متأثر از باد، نقش بسیاری مهمی در کنترل شدت فرسایش بین‌شیاری و

1- Wang *et al.*

تغییرات متوسط شدت فرسایش بین شیاری در سه خاک D_{2mm} ، $D_{4.75mm}$ و D_{8mm} در نتیجه ایجاد شدت‌های مختلف باران در چهار سرعت باد در شکل ۷ نشان داده شده است. در شدت ۳۰ میلی‌متر در ساعت باران، بیشینه شدت فرسایش بین شیاری برای سرعت‌های باد صفر، ۶، ۹ و ۱۲ متر در ثانیه به ترتیب $۰/۲۱ \times ۱۰^{-۴}$ ، $۰/۲۸ \times ۱۰^{-۴}$ ، $۰/۵۹ \times ۱۰^{-۴}$ و $۱/۰۷ \times ۱۰^{-۴}$ کیلوگرم بر متر مربع در ثانیه به دست آمد؛ برای سرعت‌های یادشده، در شدت ۵۰ میلی‌متر در ساعت مقدار بیشینه شدت فرسایش به ترتیب برابر با $۰/۵۹ \times ۱۰^{-۴}$ ، $۰/۶۲ \times ۱۰^{-۴}$ ، $۱/۲۱ \times ۱۰^{-۴}$ و $۱/۷۱ \times ۱۰^{-۴}$ کیلوگرم بر متر مربع در ثانیه و در شدت ۷۵ میلی‌متر در ساعت، برابر با $۰/۸۳ \times ۱۰^{-۴}$ ، $۰/۸۷ \times ۱۰^{-۴}$ ، $۱/۵۳ \times ۱۰^{-۴}$ و $۲/۲ \times ۱۰^{-۴}$ کیلوگرم بر متر مربع در ثانیه بدست آمد. به عبارتی، شدت فرسایش بین شیاری در سرعت ۱۲ متر در ثانیه باد، در شدت‌های ۳۰، ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر در ساعت به ترتیب حدود ۵، ۳ و $۲/۶۲$ برابر بیش‌تر از شدت فرسایش در شرایط عدم وزش باد بود. هم‌چنین شکل ۷ نشان می‌دهد که در بیش‌تر موارد، بین شدت فرسایش بین شیاری و شدت باران رابطه غیرخطی (لگاریتمی) برقرار است. این موضوع دلیلی بر اثر متفاوت شدت‌های مختلف باران بر تشدید فرسایش بین شیاری است.

و ۶ متر در ثانیه باد کند بوده که این موضوع به مفهوم اختلاف ناچیز این دو سرعت باد از نظر تأثیر بر قدرت فرسایش باران است. در مقابل، در سرعت‌های بیش‌تر باد یعنی ۹ و ۱۲ متر بر ثانیه، شدت فرسایش بین شیاری با شیب بیش‌تری در حال افزایش است که نشان از تأثیر بسیار بیش‌تر سرعت‌های ۹ و ۱۲ متر در ثانیه باد در مقایسه با سرعت‌های کم‌تر از ۶ متر بر ثانیه باد بر شدت فرسایش بین شیاری دارد. این موضوع به دلیل قدرت فرسایشی بیش‌تر باران متأثر از باد در سرعت‌های بیش‌تر از این مقدار است؛ برای نمونه، در شدت ۳۰ میلی‌متر در ساعت باران در خاک D_{2mm} شدت فرسایش در حضور باد با سرعت ۱۲ متر در ثانیه، ۶ برابر بیش‌تر از شرایط عدم وزش باد است. میانگین شدت فرسایش در سرعت‌های صفر، ۶، ۹ و ۱۲ متر در ثانیه باد به ترتیب $۰/۴۳ \times ۱۰^{-۴}$ ، $۰/۵۴ \times ۱۰^{-۴}$ ، $۰/۹۷ \times ۱۰^{-۴}$ و $۱/۴۶ \times ۱۰^{-۴}$ کیلوگرم در متر در ثانیه بود؛ بنابراین سرعت مشخصی از باد را می‌توان به عنوان سرعت آستانه فرسایش بین شیاری در باران متأثر از باد در نظر گرفت. برخی پژوهشگران، نظیر ارپل و همکاران (۱۳) افزایش شدت فرسایش با افزایش سرعت باد را به تأثیر باد بر روی سرعت، فراوانی و زاویه برخورد قطرات باران ارتباط داده که در نهایت منجر به تأثیر معنی‌داری بر شدت جداسازی و انتقال ذرات می‌شود.

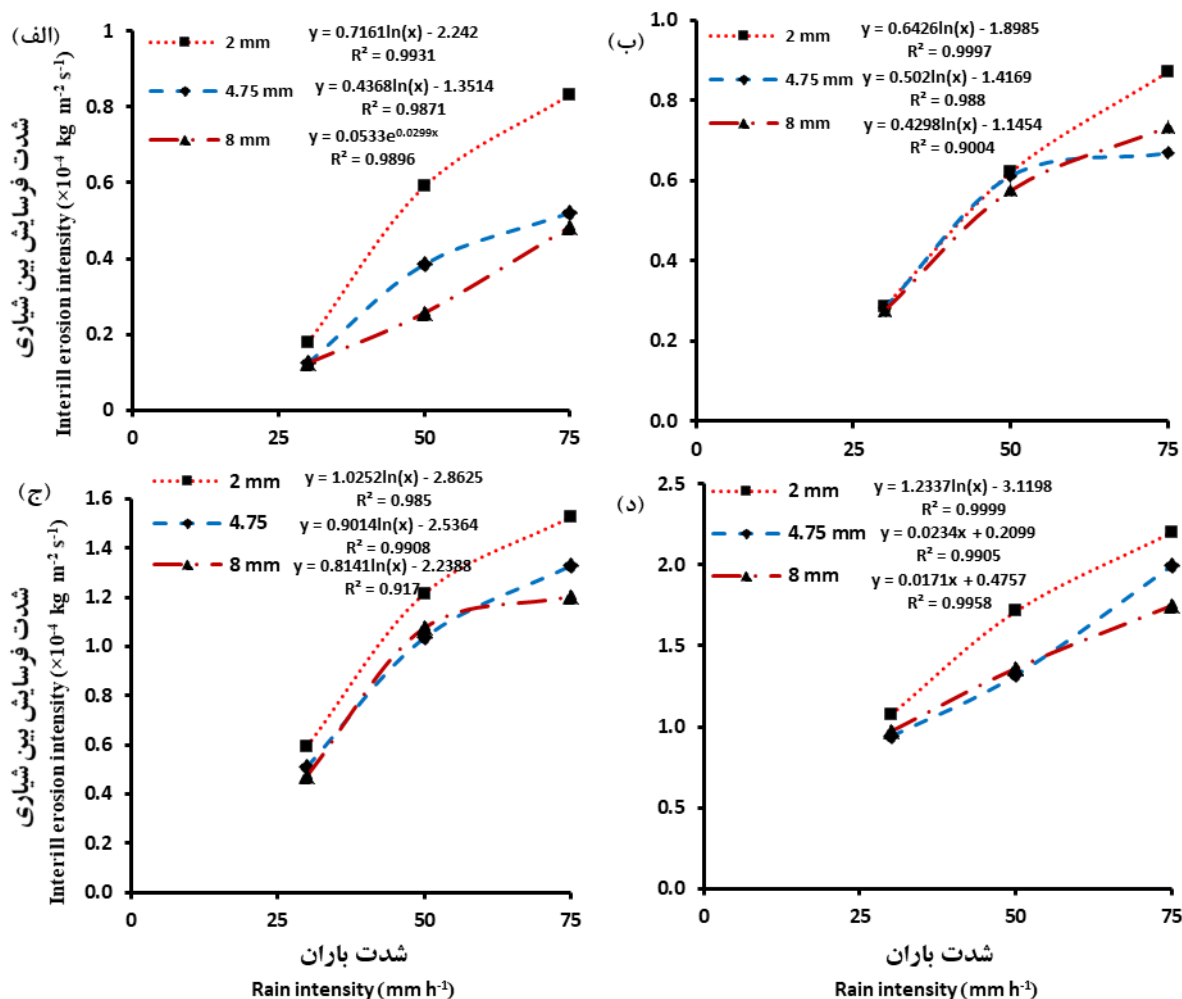
رضایی ارشد و همکاران: تأثیر باران متأثر از باد بر فرسایش...



شکل (۶) روند تغییرات شدت فرسایش بین‌شیاری در سرعت‌های مختلف باد و شدت‌های متفاوت باران

برای خاک‌های با ذرات کوچکتر از (الف) ۲ میلی‌متر، (ب) ۴/۷۵ میلی‌متر و (ج) ۸ میلی‌متر

Figure(6) Trend of changes for interrill erosion rate at different wind velocities and rainfall intensities for soils (a) D_{2mm}, (b) D_{4.75mm}, (c) D_{8mm}.



شکل (7) رابطه شدت فرسایش بین شیار و شدت باران در سه خاک مورد مطالعه برای سرعت‌های متفاوت باد شامل (الف) صفر، (ب) 6 متر بر ثانیه، (ج) 9 متر بر ثانیه، (د) 12 متر بر ثانیه

Figure (7) The relationship between interrill erosion rate and rain intensity in the studied soils for wind velocities of (a) 0, (b) 6 m s^{-1} , (c) 9 m s^{-1} , (d) 12 m s^{-1}

بارش باران در شرایط آرام (عدم وزش باد)، شدت فرسایش بیش‌تری در پی دارد. هم‌چنین مشخص شد که در شرایط وزش باد با سرعت‌های بیش‌تر از یک آستانه، شدت فرسایش بین‌شیاری به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این تشدید شدت فرسایش در شدت‌های بیش‌تر باران، بیش‌تر نیز می‌شود. از طرفی، خاکی که در معرض فرسایش قرار دارد، اگر خاکدانه‌های درشت‌تری داشته باشد، حساسیت کم‌تری در برابر فرسایش بین‌شیاری از خود نشان می‌دهد، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد در صورتی که بتوان در اراضی کشاورزی با ایجاد زبری در سطح، جلوی افزایش سرعت باد را گرفت، تا حد قابل توجهی می‌توان در راستای مهار فرسایش خاک گام

نتیجه‌گیری

در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشکی نظیر شرایطی که بر کشور ایران حاکم است، هر دو نوع فرسایش آبی و بادی به وقوع می‌پیوندد. از طرفی، معمولاً باران‌های رگباری با وزش باد همراه است که این موضوع موجب وقوع هم‌زمان عوامل فرساینده باد و باران و رواناب و البته اثرات متقابل آن‌ها بر شدت فرسایش می‌شود. یافته‌های این پژوهش که برای اولین بار در ایران به بررسی اثرات هم‌زمان باد و باران بر شدت فرسایش بین‌شیاری پرداخت، نشان از اهمیت هر دو عامل فرساینده باد و باران بر کنترل شدت فرسایش بین‌شیاری دارد. مشخص گردید که باران متأثر از باد، نسبت به

برداشت. علاوه بر این، در صورت اعمال مدیریت صحیح خاک برای ایجاد ساختمان مطلوب و فراهم نمودن شرایط تشکیل خاکدانه‌های درشت و پایدار در سطح خاک، تا حدی می‌توان شدت فرسایش بین‌شیاری را مهار کرد.

منابع

1. Angulo-Martinez, M., Begueria, S., Navas, A., and Machin, J. 2012. Splash erosion under natural rainfall on three soil types in NE Spain. *Geomorphology*, 175-176: 38-44.
2. Arjmand Sajjadi, S., and Mahmoodabadi, M. 2015. Aggregate breakdown and surface seal development influenced by rain intensity, slope gradient and soil particle size. *Solid Earth*, 6: 311-321.
3. Assouline, S. 2004. Rainfall-induced soil surface sealing: a critical review of observations, conceptual models, and solutions. *Vadose Zone Journal*, 3: 570-591.
4. Bako, A.N., Darboux, F., James, F., Jossierand, 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 Surface Processes and Landforms*, 41(9): 1199-1210.
5. Barthes B., and Roose, E. 2002. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion: Validation at several levels. *Catena*, 47: 133-149.
6. Bhattacharyya, R., Fullen, M.A., Davies, K., and Booth, C.A. 2010. Use of palm-mat geotextiles for rainsplash erosion control. *Geomorphology*, 19 (1-2): 52-61.
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 Science Society of America Journal*, 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 processes. *New Directions of Surface Water Modeling (Proceedings of the Baltimore Symposium, May 1989)*, 181: 73-82.
9. De Lima, J.L.M.P., Van Dijck, P.M., and Spaan, W.P. 1992. Splash-saltation transport under wind-driven rain. *Soil Technology*, 5: 151-166.
10. Erpul, G., Gabriels, D., and Norton, D.L. 2005. Sand detachment by wind-driven raindrops. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30: 241-250.
11. Erpul, G., Gabriels, D., and Norton, L.D. 2003b. The Combined Effect of Wind and Rain on Interrill Erosion Processes. Lecture given at the College on Soil Physics Trieste, 3-21 March 2003.
12. Erpul, G., Gabriels, D., Norton, L.D. 2004. Wind effects on sediment transport by raindrop-impacted shallow flow: a wind tunnel study. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29: 955-967.

13. Erpul, G., Norton, L.D., and Gabriels, D. 2003a. Sediment transport from interrill areas under wind-driven rain. *Journal of Hydrology*, 276: 184–197.
14. 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
15. 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.
16. Gelaw, A.M., Singh, B.R., and Lal, R. 2015. Organic carbon and nitrogen associated with soil aggregates and particle sizes under different land uses in Tigray, northern Ethiopia. *Land Degradation and Development*, 26(7): 690-700.
17. Helming, K. 2001. Wind speed effects on rain erosivity. 10th International Soil Conservation Organization Meeting held May 24-29. P: 771-776.
18. 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.
19. Kinnell, P.I.A. 2005. Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: A review. *Hydrological Processes*, 19: 2815–2844.
20. Kinnell, P.I.A. 2009. The impact of slope length on the discharge of sediment by rain impact induced saltation and suspension. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34: 1393–1407.
21. Kinnell, P.I.A. 2012. Raindrop-induced saltation and the enrichment of sediment discharged from sheet and interrill erosion areas. *Hydrological Processes*, 26(10): 1449-1456.
22. Liu, Q.Q., Xiang, H., and Singh, V.P. 2006. A simulation model for unified interrill erosion and rill erosion on hillslopes. *Hydrological processes*, 20: 469–486.
23. Lu, J.Y., Su, C.C., Lu, T.F., and Maa, M.M. 2008. Number and volume raindrop size distributions in Taiwan. *Hydrological Processes*, 22: 2178-2158.
24. Mahmoodabadi, M. 2011. Sediment yield estimation using a semi-quantitative model and GIS- remote sensing data. *International Agrophysics*, 25: 241–247.
25. Mahmoodabadi, M. and Ahmadbeygi, B. 2013. Dry and water-stable aggregates in different cultivation systems of arid region soils. *Arabian Journal of Geosciences*, 6: 2997-3002.
26. 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.

27. Mahmoodabadi, M., and Arjmand Sajjadi, S. 2016. Effects of rain intensity, slope gradient and particle size distribution on the relative contributions of splash and wash loads to rain-induced erosion. *Geomorphology*, 253: 159–167.
28. Mahmoodabadi, M., Ghadiri, H., Rose, C., Yu, B., Refahi, H., and Rouhipour, H. 2014a. Evaluation of GUEST and WEPP with a new approach for the determination of sediment transport capacity. *Journal of Hydrology*, 513: 413–421.
29. Mahmoodabadi, M., Ghadiri, H., Yu, B., and Rose, C. 2014b. Morpho-dynamic quantification of flow-driven rill erosion parameters based on physical principles. *Journal of hydrology*, 514: 328–336.
30. Mahmoodabadi, M., Rouhipour, H., Arabkhedri, H., and Refahi, H. 2007. Calibration, Spatial distribution and characteristics of simulated rainfall (Case study: Rain simulator of Soil Conservation and Watershed Research Center). *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 1(1): 39-50. (in Persian)
31. Meyer, L.D., and Harmon, W.C. 1984. Susceptibility of agricultural soils to interrill erosion. *Soil Science Society of America Journal*, 48: 1152-1157.
32. Pedersen, H.S., and Hasholt, B. 1995. Influence of wind speed on rainsplash erosion. *Catena*, 24: 39–54.
33. Presley, D., and Tatarko, J. 2009. *Principals of wind erosion and its control*. Kansas State University. Available at: [http:// www.weru.ksu.edu](http://www.weru.ksu.edu).
34. Pulido Moncada, M., Gabriels, D., Cornelis, W., and Lobo, D. 2013. Comparing aggregate stability tests for soil physical quality indicators. *Land Degradation and Development*, 26(8): 843-852.
35. Ran, Q., Su, D., Li, P., and He, Z. 2012. Experimental study of the impact of rainfall characteristics on runoff generation and soil erosion. *Journal of Hydrology*, 424-425: 99-111.
36. Ravi, S., Breshears, D.D., Huxman, T.E., and D'Odorico, P. 2010. Land degradation in drylands: interactions among hydrologic–aeolian erosion and vegetation dynamics. *Geomorphology*, 116: 236–245.
37. 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*, 12: EGU2010-2747.
38. Ries, J.B., Iserloh, T., Seeger, M., and Gabriels, D. 2013. Rainfall simulations—constraints, needs and challenges for a future use in soil erosion research. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues*, 57(1): 1–10.
39. Samray, H., Erpul, G., and Gabriels, D. 2011. Raindrop detachment and raindrop-induced flow transport (RD-RIFT) under different fall trajectories of wind-driven raindrops. In: Vermang, J., Gabriels, D., Cornelis, W.M., De Boever, M. (Eds.), *Land Degradation Processes and Assessment—Wind Erosion, Interrill Erosion,*

- Gully Erosion, Land Cover Features. UNESCO Chair of Eremology, Ghent, Belgium, pp. 19–24.
40. Schmidt, J. 2010. Effects of soil slaking and sealing on infiltration—experiments and model approach. In Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science: Soil solutions for a changing world, Brisbane, Australia. 1-6 August 2010. The physics of soil pore structure dynamics, pp. 29-32.
 41. Sharon, D., Morin, J., and Moshe, Y. 1988. Micro-topographical variations of rainfall incident on ridges of a cultivated field. Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural Engineers, 31(6): 1715-1722.
 42. Solomon, K. 1979. Variability of sprinkler coefficient of uniformity test results. Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural Engineers, 22 (5): 1078-1080.
 43. Van Dijk, A.I.J.M., Meesters, A.G.C.A., and Bruijnzeel, L.A. 2002. Exponential distribution theory and the interpretation of splash detachment and transport experiments. Soil Science Society of America Journal, 66(5): 1466-1474.
 44. Visser, S.M., Sterk, G., and Ribolzi, O. 2004. Techniques for simultaneous quantification of wind and water erosion in semi-arid regions. Journal of Arid Environments, 59(4): 699–717.
 45. Wakiyama, Y., Onda, Y., Nanko, K., Mizugaki, S., Kim, Y., Kitahara, H., and Ono, H. 2010. Estimation of temporal variation in splash detachment in two Japanese cypress plantations of contrasting age. Earth Surface Processes and Landforms, 35 (9): 993–1005.
 46. Wang, B., Steiner, J., Zheng, F., and Gowda, P. 2017. Impact of rainfall pattern on interrill erosion process: Rainfall pattern effect on interrill erosion. Earth Surface Processes and Landforms, 42(12): 1833-1846.
 47. Wick, A.F., Daniels, W.L. Nash, W.L., and Burger, J.A. 2014. Aggregate recovery in reclaimed coal mine soils of SW Virginia. Land Degradation and Development, 27(4): 965-972.
 48. Wuddivira, M.N., Stone, R.J., and Ekwue, E.I. 2009. Clay, organic matter and wetting effects on splash detachment and aggregate breakdown under intense rainfall. Soil Science Society of American Journal, 73(1): 226–232.
 49. Zamani, S. and Mahmoodabadi, M. 2013. Effect of particle-size distribution on wind erosion rate and soil erodibility. Archives of Agronomy and Soil Science. 59(12): 1743-1753.
 50. Zhang, G.S., Chan, K.Y., Oates, A., Heenan, D.P., and Huang, G.B. 2007. Relationship between soil structure and runoff/soil loss after 24 years of conservation tillage. Soil and Tillage Research, 92: 122–128.