

بررسی تولید رواناب و فرسایش بین شیاری تحت تأثیر باران و باد در شرایط آزمایشگاهی

مهین کله‌هوئی^۱، سید حمیدرضا صادقی^{۲*}، عبدالواحد خالدی درویشان^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۷/۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵

چکیده

پژوهش حاضر با هدف بررسی فرایندهای ترکیبی باران و باد بر فرسایش بین شیاری در شرایط آزمایشگاهی روی خاک تهیه شده از حوزه آبخیز کجور واقع در استان مازندران انجام شد. به همین منظور از سه کرت آزمایشگاهی با ابعاد ۶×۱×۰/۵ متر در شیب حدود ۳۰ درصد و شدت بارندگی تقریبی ۵۰ میلی‌متر بر ساعت با دوام ۳۰ دقیقه و دو سرعت باد مخالف شیب (پایین دست به بالادست کرت) حدود سه و شش متر بر ثانیه استفاده شد. نتایج مؤید آن بود که میانگین زمان شروع رواناب در شرایط هوای آرام چهار دقیقه و ۱۹ ثانیه و سرعت بادهای سه و شش متر بر ثانیه به ترتیب حدود هفت دقیقه و ۲۸ ثانیه و ۱۰ دقیقه و ۱۶ ثانیه بوده است. میانگین حجم و ضریب رواناب در شرایط هوای آرام به ترتیب برابر ۱۱۴/۹۵ لیتر و ۹۳/۳۹ درصد و در شرایط باد مخالف شیب با سرعت‌های سه و شش متر بر ثانیه به ترتیب برابر ۱۲۳/۸۹ و ۱۲۰/۵۹ لیتر و ۸۹/۲۲ و ۸۰/۶۳ درصد و اختلاف معنی‌دار ($p < 0.01$) بوده است. علاوه بر آن، با توجه به یافته مشخص شد که میانگین هدررفت خاک در شرایط بدون باد و باد با سرعت‌های سه و شش متر بر ثانیه به ترتیب برابر ۲۱۰۷/۲۵ و ۲۸۵۸/۵۸ گرم بر مترمربع و غلظت رسوب نیز برابر با ۱۴۲/۲۰، ۲۱۲/۶۹ و ۴۱۰/۱۳ گرم بر لیتر و اختلاف معنی‌دار ($p < 0.01$) بوده است. نتایج پژوهش حاضر می‌تواند تحلیل‌های مفیدی برای مدل‌سازی صحیح فرایند فرسایش آبی در مناطق متأثر از باد فراهم کند.

کلیدواژه‌ها: تخریب زمین، فرسایندهای باران، فرسایش آبی متأثر از باد، هدررفت خاک.

۱. دانش‌آموخته دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس

۲. استاد گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نویسنده مسئول، sadeghi@modares.ac.ir

۳. دانشیار، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس

• این مقاله برگرفته از رساله دکتری دانشگاه تربیت مدرس است.

مقدمه

خاک یک منبع زنده و پویاست که برای تولید پایدار مواد غذایی و عملکرد بوم‌سازگان ضروری است (صادقی، ۲۰۱۰؛ دیوو^۱ و همکاران، ۲۰۲۲). فرسایش خاک^۲ همواره یکی از دلایل اصلی تخریب خاک سطحی همراه با مواد آلی و سایر مواد مغذی موجود در آن است (بیدوکوک^۳ و همکاران، ۲۰۱۶) که خسارات بوم‌شناختی و اقتصادی جهانی برجای می‌گذارد (صادقی و همکاران، ۲۰۱۹). گستره سرزمینی این پدیده در نواحی خاص محدود نمی‌شود، اما مقدار و شدت آن در کشورهای در حال توسعه به‌طور چشمگیری نسبت به کشورهای پیشرفته بیشتر است (لال، ۱۹۹۸). میزان فرسایش در سطح قاره آسیا به وضعیت بحرانی رسیده است و با این حال اطلاعات دقیق و مشخصی درباره وضعیت فرسایش در کشور در دسترس نیست. در عین حال مطابق نقشه فرسایش تهیه شده توسط پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، میزان فرسایش خاک سالانه حدود ۹۷۶ میلیون تن تخمین زده می‌شود (عرب‌خداری و همکاران، ۲۰۱۸). فرسایش خاک نتیجه تعامل چندین عامل مؤثر از جمله اقلیم،^۵ فرسایش‌پذیری خاک،^۶ توپوگرافی،^۷ مدیریت خاک، روش‌های حفاظتی و پوشش گیاهی است (مونتنگرو^۸ و همکاران، ۲۰۱۳).

فرایندهای فرسایش خاک به‌طور چشمگیری تحت‌تأثیر انرژی ناشی از بارندگی قرار می‌گیرند که به‌طور مستقیم با شدت بارش و اندازه قطرات باران مرتبط است (سردا،^۹ ۱۹۹۷). در همین راستا، باد به‌عنوان یک عامل اقلیمی، تأثیر قابل توجهی بر فرسایش ناشی از باران دارد. قطرات باران در شرایطی که هوا آرام و بدون وزش باد است، معمولاً به‌صورت عمودی بر سطح خاک برخورد می‌کند (رضایی‌ارشد و محمودآبادی، ۲۰۱۸). با توجه به اینکه باد به‌عنوان عامل اصلی شکل‌گیری رگبارهای طبیعی شناخته می‌شود، می‌تواند بر ریزش قطرات باران و همچنین جریان‌های کم‌عمق تأثیر بگذارد.

ریزش قطرات باران متأثر از باد با توجه به سرعت و جهت وزش باد به‌صورت مایل بر سطح خاک اتفاق می‌افتد و از حالت ریزش عمودی فاصله می‌گیرد (اسمیت^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۷). وزش باد باعث افزایش سرعت قطرات باران می‌شود که با زاویه‌ای مایل به سطح زمین فرود می‌آیند. این امر منجر به افزایش انرژی جنبشی، تغییر زاویه ریزش، افزایش قطر و سرعت سقوط قطرات و همچنین افزایش فاصله برخورد که آن‌ها طی می‌کنند، می‌شود (کورنلیس^{۱۱} و همکاران، ۲۰۰۴؛ صادقی و همکاران، ۲۰۱۳؛ کله‌هوئی و همکاران، ۲۰۲۳). پژوهش‌های متعددی به منظور فهم فرایندهای جداگانه فرسایش آبی و بادی، تحت تأثیر عواملی نظیر ویژگی‌های بارندگی و رواناب، شیب، توپوگرافی، نوع کاربری اراضی، سرعت باد و تغییرات اقلیمی انجام شده است (صادقی و همکاران، ۲۰۱۱؛ کورگیالاس^{۱۲} و همکاران، ۲۰۱۶؛ خیرآبادی و همکاران، ۲۰۱۸). با وجود اینکه در مطالعات پیشین به ارتباط کلی بین باد و تأثیر فرسایش باران اشاره شده است، نقش کمی باد در تغییر میزان فرسایش کمتر مورد بررسی قرار گرفته است (نوهو باکو و همکاران، ۲۰۱۶؛ کله‌هوئی و همکاران، ۲۰۲۲). دلیل نادیده گرفتن باران متأثر از باد^{۱۳} (گبریلس^{۱۴} و همکاران، ۲۰۱۱) به محدودیت یا نبود تجهیزات آزمایشگاهی مناسب برای شبیه‌سازی تعاملات میان جریان باد و باران و تأثیر ترکیبی آن‌ها بر فرسایش خاک مربوط می‌شود (دینگ^{۱۵} و همکاران، ۲۰۲۰). با این حال، یوم‌بک و لمبکه^{۱۶} (۱۹۶۶)، دیس‌رود^{۱۷} و همکاران (۱۹۶۹) جزء نخستین پژوهشگرانی بودند که در پژوهش‌های آزمایشگاهی نشان دادند که بین فرایندهای فرسایش آبی و بادی تعامل وجود دارد.

مطالعاتی توسط برخی از پژوهشگران در زمینه بررسی نقش باران متأثر از باد بر فرایندهای فرسایشی با استفاده از تونل باد (ارپول^{۱۸} و همکاران، ۲۰۰۴؛ فیستر^{۱۹} و همکاران، ۲۰۱۱؛

10. Schmidt
11. Cornelis
12. Kourgialas
13. Wind-Driven-Rain
14. Gabriels
15. Ding
16. Umback & Lembke
17. Disrud
18. Erpul
19. Fister

1. Du
2. Soil Erosion
3. Biddoccu
4. Lal
5. Climate
6. Soil Erodibility
7. Topography
8. Montenegro
9. Cerda

جامع‌تری در مورد اثر ترکیبی باران و باد بر تولید رواناب و فرایندهای فرسایش خاک مورد نیاز است. علاوه‌بر این، مهار فرسایش آبی زمانی ممکن است که اطلاعات کافی درباره عوامل مؤثر بر آن در دسترس باشد. در این زمینه، تلاش شده است که این موضوع از منظر دیگری مورد بررسی قرار گیرد. به همین دلیل، پژوهش حاضر با هدف اصلی شناسایی ارتباط متقابل بین باد و باران در فرایند فرسایش بین‌شیباری، در شرایط آزمایشگاهی روی خاک مراتع بیلاقی واقع در دامنه شمالی البرز و در حوزه آبخیز کجور استان مازندران طراحی شده است. این فهم می‌تواند به عنوان یک گام اساسی در تحلیل و ارزیابی عوامل مؤثر و همچنین مدل سازی دقیق فرسایش آبی خاک به شمار آید.

مواد و روش‌ها

انتخاب ناحیه اصلی خاک مورد مطالعه

برای انجام این پژوهش خاک مراتع بیلاقی واقع در حوزه آبخیز کجور که در دامنه شمالی البرز و در جنوب شرقی شهر نوشهر قرار دارد، انتخاب شد. شیب کلی منطقه به سمت جنوب و به صورت یک‌جانبه است (همایون‌فر و خالدی‌درویشان، ۲۰۱۶). دو شیب تقریبی ۱۲ و ۳۰ درصد به عنوان نماینده شیب بیشینه برای اراضی کشاورزی و نیز شیب غالب منطقه برای مطالعه اثر شیب بر فرایندها و همچنین اهمیت نسبی بیشتر آن بر فرایندهای دانه‌بندی رسوبات طی فرسایش (کیانی‌هرچگانی و همکاران، ۲۰۱۹) مد نظر قرار گرفت. منطقه مورد مطالعه در ارتفاع ۱۶۶۵ متری از سطح دریا قرار دارد. میانگین بارش و دمای سالانه به ترتیب برابر ۳۳۷/۹ میلی‌متر و ۱۱/۹ درجه سانتی‌گراد است. متوسط شدت بارش برابر ۵۰ میلی‌متر بر ساعت در مدت زمان ۳۰ دقیقه است. مطابق نتایج خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک منطقه مورد مطالعه مشخص شد که بافت خاک، مواد آلی، اسیدیته و هدایت الکتریکی به ترتیب شنی-لومی، ۲/۶۱ درصد، ۷/۶۵ و ۰/۷۶ میکروزیمنس بر سانتی‌متر بود. این منطقه براساس طبقه‌بندی کوپن، دارای آب‌وهوای بری است که زمستان‌های سرد و خشک و تابستان‌های کوتاهی را تجربه می‌کند. این منطقه به‌عنوان بستری مناسب برای استقرار توده‌های جنگلی با تنوع و پراکنش گونه‌های درختی با ارزش نظیر نمدار (*Tilia begonifolia*),

ایسرلوه^۱ و همکاران، ۲۰۱۳، مارزین^۲ و همکاران، ۲۰۱۵؛ رضایی‌ارشد و محمودآبادی، ۲۰۱۹؛ رضایی‌ارشد و همکاران، ۲۰۱۹؛ پورمیرکمالی و محمودآبادی، ۲۰۲۱) انجام شده است. به هر تقدیر، اثر ترکیبی فرسایش آبی و باد و یا سایر عوامل اقلیمی به صورت پراکنده تحلیل شده است. در این خصوص، ژانگ^۳ و همکاران (۲۰۱۶)، تأثیر باران تحت تأثیر باد بر رواناب و رسوب‌دهی یک خاک لسی شنی در سه شدت بارندگی ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ میلی‌متر در ساعت و چهار سرعت مختلف صفر، یک، هشت و ۱۵ متر بر ثانیه را مورد بررسی قرار دادند. مطابق نتایج زمان شروع رواناب تحت تأثیر سرعت باد و شدت بارش قرار دارد، اما بارش تأثیر بیشتری روی رواناب داشته است. حجم رواناب و رسوب تولیدشده در سرعت ۱۵ متر بر ثانیه و شدت ۱۲۰ میلی‌متر بر ساعت به بیشینه مقدار خود رسیده است. اسمیت و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی تأثیر باد بر فرسایش آبی و تحلیل حساسیت با بهره‌گیری از شبیه‌سازی مدل سه بُعدی در مقیاس آبخیز و با استفاده از تونل باد در جهات مختلف پرداختند. براساس سناریوهای شبیه‌سازی‌شده، فرسایش ممکن است به دلیل کاهش تأثیر باد افزایش یابد. تانر^۴ و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی تأثیر ویژگی‌های خاک بر حساسیت به فرسایش ناشی از آب و باد در دو نوع خاک مدیترانه‌ای پرداختند. مقایسه میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش آبی و بادی نشان دهنده روندی متضاد در حساسیت خاک به این نیروهای فرسایشی است. در ایران، محمودآبادی و همکاران (۲۰۲۱) به تحلیل تأثیر هدررفت کربن آلی و غنی‌شدگی رسوب بر فرسایش بین‌شیباری ناشی از هم‌زمانی باد و باران با شدت و سرعت متفاوت پرداختند. براساس نتایج به‌دست آمده، میزان هدررفت کربن آلی در خاک‌های با بافت‌های مختلف، بین ۰/۰۴ تا ۴/۰۴ میلی‌گرم بر متر مربع در ثانیه تغییر کرد. نسبت غنی‌شدگی کربن آلی در رسوبات این خاک‌ها به ترتیب برابر ۰/۸، ۰/۱ و ۱/۲ بود.

با بررسی دقیق ادبیات موجود، مطالعات در مورد اثرات بارش هم‌زمان و شبیه‌سازی باد بر فرایندهای هیدرولوژیکی، به‌ویژه فرسایش آبی، اندک است؛ درحالی‌که تلاش‌های

1. Iserloh
2. Marzen
3. Zhang
4. Tanner

لیلکی (*Geleditsia lotus*)، توسکا (*Alnus sp.*)، انجیلی (*Parrotia persica*)، راش (*Fagus orientalis*) و پوشش مرتعی فراهم شده است (سعیدی و صادقی، ۲۰۱۲). شکل (۱)، چشم اندازی از موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان مازندران و کشور ایران را به نمایش گذاشته است.

نمونه برداری و جابه جایی خاک

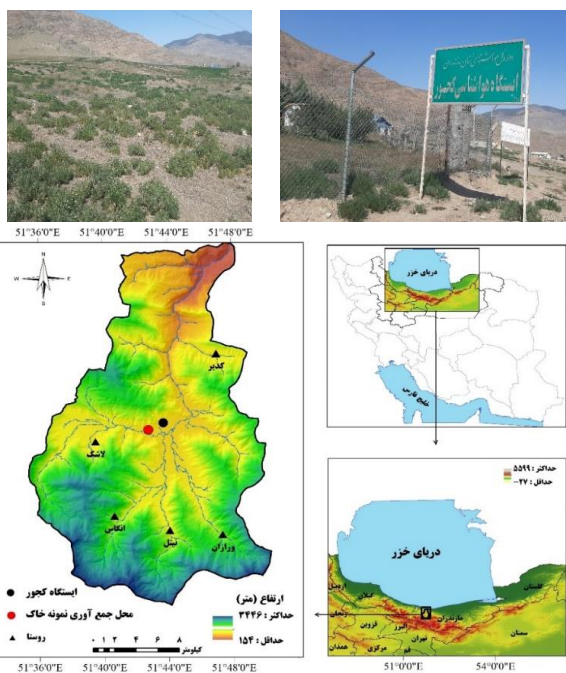
برای انجام آزمایش، نمونه های خاک سطحی تا عمق ۲۰ سانتی متری (کوکال و سرکار، ۲۰۱۰) از سطح مراتع بیلاقی منطقه برداشت شد. نمونه های جمع آوری شده به آزمایشگاه شبیه ساز باران و فرسایش خاک در دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس منتقل شدند. خاک قبل از آماده سازی و انتقال به داخل کرت ها، ابتدا در فضای باز و در مکان های سرپوشیده هواخشک شد تا امکان پر کردن کرت های آزمایشی و لایه بندی آن ها در شرایط رطوبت معمول فراهم شود (فوکس و برایان، ۲۰۰۰). سپس برای جداسازی سنگ ریزه ها و بقایای گیاهی از الک هشت میلی متری استفاده شد (خالدی درویشان و همکاران، ۲۰۱۴).

سامانه شبیه سازی و آماده سازی کرت های آزمایشگاهی

برای انجام این پژوهش، از سه کرت به مساحت شش متر مربع استفاده شد. عمق کرت ها نیم متر و شیب بیشینه ۳۰ درصد با ارتفاع بارندگی تقریبی چهار تا شش متر بوده است. کف کرت ها با پوکة معدنی به ارتفاع تقریبی ۳۰ سانتی متر پر شد و باقی مانده عمق کرت ها با خاک خشک پر شد (دفرشا^۲ و همکاران، ۲۰۱۱). سطح خاک هریک از کرت ها با غلتک دستی به جرم مخصوص ظاهری منطقه برابر با ۱/۴۶ گرم بر سانتی متر مکعب رسید (رومکنس^۳ و همکاران، ۲۰۰۱). بر اساس منحنی های شدت-مدت-فراوانی مربوط به ایستگاه سینوپتیک کجور، شدت باران ۵۰ میلی متر در ساعت و مدت زمان ۳۰ دقیقه برای دوره بازگشت ۳۰ سال تعیین شد. برای ارزیابی یکنواخت بودن بارش از ضریب یکنواختی Christensen براساس رابطه (۱) استفاده شد (کریستین سن^۴، ۱۹۴۲).

$$UC = \left\{ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - M|}{nM} \right\} \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه، X_i مقدار آب در هر ظرف اندازه گیری (میلی لیتر)، M مقدار میانگین آب در همه ظروف اندازه گیری (میلی لیتر) و n تعداد ظروف اندازه گیری است. شایان ذکر است که از ۳۵ ظرف پلاستیکی لبه تیز با قطر دهانه ۱۵ سانتی متر و به صورت تصادفی استفاده شد. با توجه به شرایط آزمایشگاهی و امکان ایجاد باد، سرعت های سه و شش متر بر ثانیه انتخاب شد. به منظور شبیه سازی باد از یک جفت دمندة باد به ابعاد ۱×۱ متر استفاده شد. سرعت باد تولیدی هرکدام از دمنده ها با استفاده از سرعت سنج باد کنترل شد. شایان ذکر است که جهت باد تولیدی مخالف شیب (از پایین دست به بالادست کرت) بود. در این پژوهش سه کرت شاهد (بدون تأثیر باران متأثر از باد در شیب و شدت بارندگی مشابه)، سه کرت با سرعت باد سه متر بر ثانیه و سه کرت



شکل (۱): چشم انداز و نمائی از موقعیت حوزه آبخیز کجور در استان

مازندران و ایران

Figure (1): A view of the location of Kojour watershed in Mazandaran Province and Iran

2. Defersha
3. Romkens
4. Christensen

1. Kukal & Sarkar

در شرایط آزمایشگاهی، برخلاف شرایط واقعی، وزش باد موجب جابه‌جایی بخشی از بارش به سمت بالادست و پایین دست کرت متناسب با جهت وزش باد و به دنبال آن تغییر ناحیه دریافتی کرت نسبت به شرایط بدون باد (هوای آرام) می‌شود. تغییر در سطح مؤثر کرت موجب می‌شود که قسمتی از بارش در تولید رواناب نقشی نداشته باشد و در نتیجه، ضریب رواناب تغییر کند. ضریب یکنواختی Christensen بالای ۸۰ درصد برای ارزیابی تأثیر باد بر تغییر سطح مؤثر باران در سرعت‌های سه و شش متر بر ثانیه انتخاب شد؛ به گونه‌ای که نواحی با بارش کم و ضریب یکنواختی کمتر از ۸۰ درصد از دامنه محاسباتی حذف شدند. در ادامه، حجم و ضریب رواناب واقعی با بهره‌گیری از رابطه‌های (۲) و (۳) محاسبه شد.

$$W_F = \frac{A_1}{A_2} \quad (2)$$

$$V_W = V \times W_F \quad (3)$$

که در آن W_F عامل اصلاحی رواناب تحت وزش باد، A_1 مساحت کل کرت (متر مربع)، A_2 مساحت دریافت کننده بارندگی (متر مربع)، V_W حجم رواناب اصلاح شده (لیتر) و V حجم رواناب (لیتر) جمع‌آوری شده در خروجی کرت است. به منظور ارزیابی اثر باد بر تغییر عامل فرسایش پذیری که در نهایت باید در برآورد مناسب فرسایش خاک گنجانده شود، تغییرات شدت باران برای شرایط مورد مطالعه محاسبه و ضریب فرسایش بارش متناظر با توجه به رابطه‌های (۴) و (۵) مورد استفاده برای مدل‌های خانواده USLE برآورد شد.

$$E_i = 0.29 [1 - 0.72 \exp(-0.05 I_i)] \quad (4)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n E_i I_{30}}{100} \quad (5)$$

در رابطه (۴)، E_i و I_i به ترتیب انرژی جنبشی بارندگی برحسب مگاژول بر هکتار در میلی‌متر از هر بخش از هیتوگراف و شدت بارندگی برحسب میلی‌متر بر ساعت برای هر مرحله زمانی است. همچنین در رابطه (۵) نیز R و I_{30} به ترتیب ضریب فرسایش بارندگی ویشمایر و اسمیت و شدت بارندگی در طول ۳۰ دقیقه رگبار منفرد برحسب میلی‌متر بر ساعت است (صادقی و همکاران، ۲۰۱۱). شایان ذکر است که در این پژوهش، به دلیل عدم تجهیز آزمایشگاه شبیه‌ساز باران به سامانه تولید برف و همچنین عدم امکان کنترل مؤلفه‌های بیشتر

برای سرعت شش متر بر ثانیه و در مجموع نه کرت تحت شبیه‌سازی قرار گرفت.

اندازه‌گیری مؤلفه‌های هیدرولوژیکی و فرسایش بین‌شیاری

رواناب حاصل از هریک از کرت‌های شاهد و تیمار شده به همراه رسوبات خروجی آن‌ها در فواصل زمانی دو (شش دقیقه اول)، سه (نه دقیقه دوم پس از شش دقیقه اول) و پنج (۱۵ دقیقه آخر) دقیقه جمع‌آوری شد و سپس با استفاده از استوانه مدرج اندازه‌گیری شد (وان^۱ و همکاران، ۲۰۱۲). علاوه بر این، مقدار ضریب رواناب نیز محاسبه شد (غلامی و همکاران، ۲۰۱۴). میزان هدررفت خاک با به‌کارگیری روش تخلیه و خشک کردن در کوره حرارتی به مدت ۲۴ ساعت و در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد برآورد شد. شکل (۲) نمایی از مراحل انجام آزمایش و اندازه‌گیری رواناب و رسوب را نشان می‌دهد.



شکل (۲): نمایی از مراحل اجرای آزمایش و اندازه‌گیری رواناب و رسوب
Figure (2): A view of the stages of running tests and measuring runoff and sediment

نتایج حاصل از اندازه‌گیری مؤلفه‌های رواناب

نتایج تغییرات زمانی حجم رواناب و ضریب رواناب در شکل (۴) و ویژگی‌های مقایسه‌ای مؤلفه‌های مطالعاتی در شرایط آزمایشگاهی مزبور و تحلیل‌های آماری مترتب بر آن‌ها در جدول‌های (۱) و (۲) ارائه شده است. مطابق جدول (۱)، میانگین حجم رواناب تولیدشده به ترتیب در شرایط هوای آرام ۱۱۴/۹۵ و سرعت‌های باد سه و شش متر بر ثانیه ۱۲۳/۸۹ و ۱۲۰/۵۹ لیتر بوده است. میانگین ضریب رواناب نیز در شرایط مورد نظر به ترتیب حدود ۹۳/۳۹، ۸۹/۲۲ و ۸۰/۶۳ درصد بوده است. نتایج تغییرات گام‌های زمانی حجم رواناب و ضریب رواناب که در شکل (۴) ارائه شده، نشان می‌دهد که زمان رسیدن به اوج (معادل ۲۲/۸ لیتر) و ضریب رواناب (معادل ۱۱/۶۷ درصد) در شرایط هوای آرام در زمان ۳۴ دقیقه و ۱۹ ثانیه و در شرایط باد با سرعت شش متر بر ثانیه در زمان ۴۰ دقیقه و ۱۶ ثانیه اتفاق افتاده است. در مقابل، زمان رسیدن به اوج (معادل ۲۶/۵۶ لیتر) و ضریب رواناب (معادل ۱۳/۸۳ درصد) در سرعت باد سه متر بر ثانیه، در زمان ۳۶ دقیقه و ۸۸ ثانیه به دست آمده است.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری مؤلفه‌های فرسایش بین‌شیاری

نتایج تغییرات زمانی هدررفت خاک و غلظت رسوب در شکل (۵) و ویژگی‌های مقایسه‌ای مؤلفه‌های مطالعاتی در شرایط آزمایشگاهی مزبور و تحلیل‌های آماری مترتب بر آن‌ها در جدول‌های (۱) و (۲) ارائه شده است. میانگین هدررفت خاک و غلظت رسوب در شرایط هوای آرام برابر ۱۹۳۳/۸۸ گرم بر مترمربع و ۱۴۲/۲۰ گرم بر لیتر بوده است. همچنین در سرعت‌های سه و شش متر بر ثانیه هدررفت خاک به ترتیب برابر ۲۱۰۷/۲۵ و ۲۸۵۸/۵۸ گرم بر مترمربع و غلظت رسوب نیز به ترتیب برابر ۲۱۲/۶۹ و ۴۱۰/۱۳ گرم بر لیتر اندازه‌گیری شده است. علاوه بر این، نتایج ارائه‌شده در شکل (۵) نشان می‌دهد که زمان دستیابی به اوج هدررفت خاک (معادل ۴/۳۹۲ گرم بر مترمربع) در شرایط هوای آرام در گام زمانی ۱۹ دقیقه و ۳۴ ثانیه و بیشینه غلظت رسوب (معادل ۲۰/۶۵ گرم بر مترمربع بر لیتر) نیز در شرایط بدون باد در زمان ۱۹ دقیقه و ۱۹ ثانیه رخ داده است. میانگین هدررفت خاک (معادل ۷۰۱/۹۷

در این زمینه، از بررسی نقش پوشش گیاهی و برف در تولید رواناب حوزه آبخیز کجور صرف‌نظر شده است. علاوه بر آن تغییرات مکانی بارندگی با استفاده از نرم‌افزار Surfer 12.0.626 در کل سطح کرت پهنه‌بندی شد.

تحلیل‌های آماری

با استفاده از آزمون Shapiro Wilk نرمال بودن داده‌ها در سطح ۵ درصد بررسی شد (شاپیرو و ولیک، ۱۹۶۵). سپس از آزمون تجزیه واریانس یک‌طرفه^۲ برای تعیین تعامل بین متغیرهای وابسته و مستقل استفاده شد. همه تحلیل‌های آماری در محیط نرم‌افزار SPSS 26 انجام شد.

نتایج

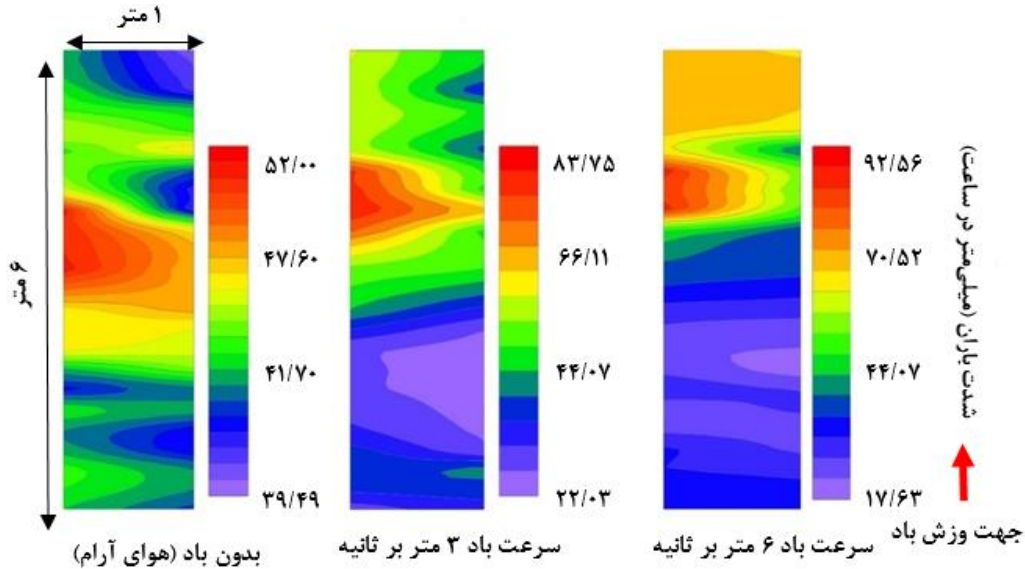
نتایج حاصل از ضرایب یکنواختی و انرژی باران

بر اساس نتایج ضریب یکنواختی Christensen مشخص شد که توزیع بارندگی در کرت‌های آزمایشگاهی تحت تأثیر وزش باد با سرعت‌های آرام (صفر)، سه و شش متر بر ثانیه در جهت مخالف شیب (از پایین دست به بالادست) به ترتیب ۸۷/۱۵، ۷۲/۲۱ و ۵۹/۹۴ درصد بوده است. علاوه بر این، بیشتر بارش‌ها به سمت بالادست کرت منتقل شده‌اند؛ همان‌طور که در شکل (۳) نمایش داده شده است. با توجه به معادله (۲) و با در نظر گرفتن ضریب یکنواختی Christensen که بیشتر از ۸۰ درصد است، مشخص شد که ۴/۲۵ و ۳ متر از بخش بالایی کرت در تولید رواناب مشارکت دارند و W_F به ترتیب برای سرعت‌های باد سه و شش متر بر ثانیه برابر با ۱/۴۱ و ۲ بوده است. در مجموع، نتایج نشان داد که مقادیر شدت بارندگی در شرایط بدون باد (هوای آرام) و باد با سرعت‌های سه و شش متر بر ثانیه به ترتیب برابر با ۵۲، ۸۳/۷۵ و ۹۲/۵۶ میلی‌متر در ساعت افزایشی یافته است. پس از جایگزینی هریک از شدت‌های مورد نظر در رابطه‌های (۴) و (۵)، نتایج نشان داد که ضریب فرسایش بارندگی با در نظر گرفتن مقدار ثابت ۰/۲۸۵ برای شدت‌های فراتر از ۷۶ میلی‌متر در ساعت به ترتیب برابر با ۳/۷۱، ۱۰/۰۰ و ۱۲/۲۵ مگاژول در میلی‌متر بر هکتار بر ساعت برای سرعت‌های آرام، باد سه و شش متر بر ثانیه بوده است.

1. Shapiro & Wilk
2. ANOVA

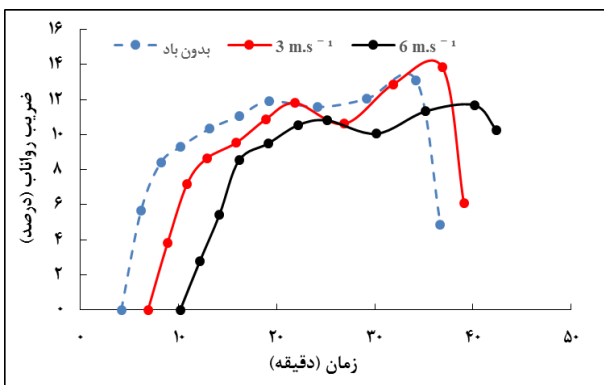
باد بر مؤلفه‌های رواناب و فرسایش خاک (جدول ۲) نیز نشان می‌دهد که سرعت باد تأثیر معنی‌داری در سطح ۵ درصد بر مؤلفه‌های رواناب و فرسایش بین شیباری داشته است.

گرم بر متر مربع) و غلظت رسوب (معادل ۵۹/۷۷ گرم بر متر مربع بر لیتر) در سرعت باد شش متر بر ثانیه در گام‌های زمانی ۴۰ دقیقه و ۱۶ ثانیه به بیشینه مقدار خود رسیده است. نتایج آزمون تجزیه واریانس یک طرفه برای ارزیابی آماری اثر سرعت

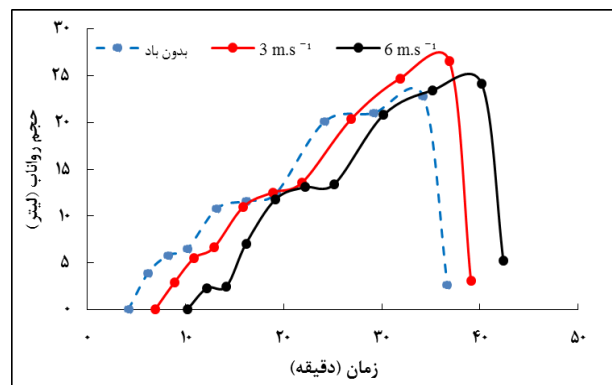


شکل (۳): تغییرات مکانی بارندگی در سطح کرت‌های آزمایشگاهی تحت تأثیر سرعت‌های مختلف باد

Figure (3): Spatial changes of rainfall on the surface of laboratory plots under the influence of different wind velocity



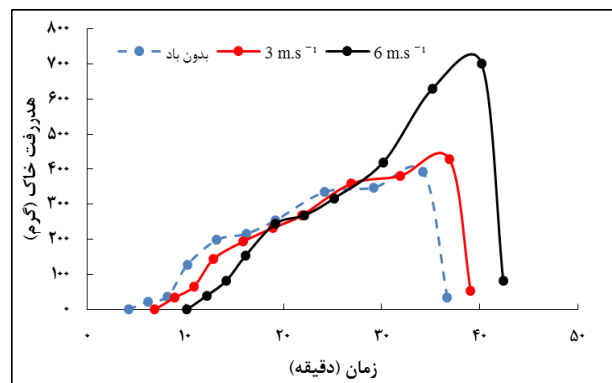
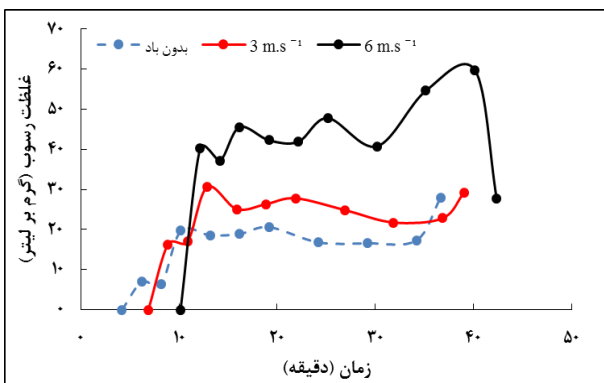
(ب)



(الف)

شکل (۴): تغییرات زمانی حجم رواناب (الف) ضریب رواناب (ب) در سرعت‌های مختلف باد

Figure (4): Temporal changes of runoff volume (a) and runoff coefficient (b) at different wind velocity



(الف) (ب)

شکل (۵): تغییرات زمانی هدررفت خاک: الف) غلظت رسوب؛ ب) در سرعت‌های مختلف باد

Figure (5): Temporal changes of soil loss (a) and sediment concentration (b) at different wind velocity

جدول (۱): تغییرات مؤلفه‌های هیدرولوژیکی و فرسایش بین‌شیاری در سرعت‌های مختلف باد

Table (1): Changes of hydrological and interrill erosion components at different wind velocity

سرعت باد (متر بر ثانیه)	شماره کرت	زمان شروع رواناب (دقیقه)	حجم رواناب (لیتر)	ضریب رواناب (درصد)	زمان خاتمه رواناب (دقیقه)	هدررفت خاک (گرم بر متر مربع)	غلظت رسوب (گرم بر لیتر)
۱	۱	۳:۴۰	۱۱۷/۹۹	۹۳/۹۸	۳۵:۱۰	۱۷۹۲/۲۶	۱۳۲/۳۶
۲	۲	۴:۰۲	۱۱۰/۴	۸۹/۹۹	۳۷:۴۲	۲۱۲۰/۱۹	۱۵۸/۲۳
۳	۳	۵:۱۵	۱۱۶/۴۶	۹۶/۱۶	۳۷:۴۵	۱۸۸۹/۲۱	۱۳۵/۹۹
میانگین		۴:۱۹	۱۱۴/۹۵	۹۳/۳۹	۳۷:۰۷	۱۹۳۳/۸۸	۱۴۲/۲۰
کمینه		۲:۰۰	۲/۰۰	۲/۸۷	۲۱/۳۲	۴/۴۴	۴/۴۴
بیشینه		۲۴/۸۰	۲۴/۸۰	۱۴/۲۵	۴۳۸/۷۲	۲۴/۸۴	۲۴/۸۴
انحراف معیار		۶/۶۱	۶/۶۱	۲/۱۶	۱۲۵/۳۹	۵/۰۱	۵/۰۱
۳	۱	۶:۳۰	۱۱۸/۱۵	۸۴/۴۶	۳۸:۰۰	۲۰۲۹/۹۸	۲۱۵/۶۸
۲	۲	۷:۰۰	۱۲۲/۸۴	۸۸/۰۵	۴۰:۱۰	۲۰۰۰/۹۰	۲۰۵/۴۴
۳	۳	۷:۳۵	۱۳۰/۶۹	۹۵/۱۵	۳۹:۱۱	۲۲۹۰/۸۸	۲۱۶/۹۶
میانگین		۷:۲۸	۱۲۳/۸۹	۸۹/۲۲	۳۹:۰۷	۲۱۰۷/۲۵	۲۱۲/۶۹
کمینه		۲/۴۷	۲/۴۷	۳/۲۲	۲۸/۴۲	۱۵/۲۰	۱۵/۲۰
بیشینه		۲۷/۴۳	۲۷/۴۳	۱۴/۲۹	۴۵۳/۰۰	۳۱/۸۰	۳۱/۸۰
انحراف معیار		۷/۹۷	۷/۹۷	۲/۸۹	۱۳۰/۹۶	۴/۴۶	۴/۴۶
۶	۱	۹:۳۶	۱۰۵/۰۵	۷۰/۹۹	۴۱:۴۸	۲۸۷۲/۶۹	۴۴۹/۷۹
۲	۲	۱۰:۰۲	۱۱۳/۵۸	۷۴/۵۱	۴۲:۳۲	۲۸۸۱/۷۴	۴۶۰/۳۳
۳	۳	۱۱:۱۰	۱۴۲/۷۰	۹۶/۳۹	۴۳:۳۵	۲۸۲۱/۳۲	۳۲۰/۲۶
میانگین		۱۰:۱۶	۱۲۰/۵۹	۸۰/۶۳	۴۲:۳۸	۲۸۵۸/۵۸	۴۱۰/۱۳
کمینه		۱/۴۶	۱/۴۶	۱/۷۶	۲۲/۳۶	۱۵/۴۲	۱۵/۴۲
بیشینه		۳۰/۴۰	۳۰/۴۰	۱۴/۶۸	۷۰۹/۱۳	۶۶/۶۳	۶۶/۶۳
انحراف معیار		۷/۵۸	۷/۵۸	۲/۸۱	۲۱۶/۶۱	۶/۹۵	۶/۹۵

جدول (۲): نتایج آزمون تجزیه واریانس یک‌طرفه برای ارزیابی آماری اثر سرعت باد بر مؤلفه‌های رواناب و فرسایش بین‌شیاری

Table (2): The results of the one-way variance analysis test for the statistical evaluation of the effect of wind velocity on runoff and interrill erosion components

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
درون‌گروهی	۱۳	۲	۵	۰/۰۰	۰/۰۰
بین‌گروهی	۴۶۲۹	۷۸	۵۹		
کل	۴۶۴۳	۸۰			
درون‌گروهی	۲۸	۲	۱۴	۰/۰۰	۰/۰۰
بین‌گروهی	۶۵۸	۷۸	۸		
کل	۶۸۶	۸۰			
درون‌گروهی	۱۶۱۰۶۸	۲	۸۰۵۳۴	۰/۰۰	۰/۰۰
بین‌گروهی	۲۱۹۳۷۴۰	۷۸	۲۸۱۲۴		
کل	۲۳۵۴۸۰۹	۸۰			
درون‌گروهی	۱۲۸۵۹	۲	۶۴۲۹	۰/۰۰	۰/۰۰
بین‌گروهی	۵۴۸۷	۷۸	۷۰		
کل	۱۸۳۴۶	۸۰			

بحث و نتیجه گیری

تغییر پذیری زمان شروع رواناب در شرایط باران متأثر از باد

در شرایطی که باد وجود ندارد (هوای آرام)، قسمتی از بارش در خاک نفوذ می‌کند و پس از تثبیت روند نفوذ، بخشی از بارش دریافتی در کرت به رواناب سطحی تبدیل می‌شود و پس از طی مسافتی به خروجی کرت می‌رسد؛ اما در شرایطی که باران تحت تأثیر باد قرار دارد، قطرات باران به وسیله میدان باد محلی منحرف می‌شوند و در شرایط مختلف وزش باد مخالف، به سمت بالای کرت هدایت می‌شوند. این امر باعث می‌شود که زمان شروع و خاتمه رواناب به دلایل مختلف متفاوت باشد. زمان شروع رواناب در شرایط هوای آرام چهار دقیقه و ۱۹ ثانیه و در سرعت‌های باد سه و شش متر بر ثانیه به ترتیب برابر با هفت دقیقه و ۲۸ ثانیه و ۱۰ دقیقه و ۱۶ ثانیه به ثبت رسیده است. مقادیر میانگین حجم رواناب در شرایط هم‌زمانی باران متأثر از باد در حالت‌های بدون باد (هوای آرام) برابر با ۱۱۴/۹۵ و باد سرعت‌های سه و شش متر بر ثانیه به ترتیب برابر ۱۲۳/۸۹ و ۱۲۰/۵۹ لیتر بوده است. مقادیر میانگین ضریب رواناب به ترتیب برابر ۹۳/۳۹، ۸۹/۲۲ و ۸۰/۶۳ درصد در شرایط بدون باد و باد با سرعت‌های سه و شش متر بر ثانیه بوده است. جریان باد موجب شد که قطرات باران از مسیر اصلی خود منحرف شده و به سمت‌های دیگر حرکت داشته باشد که این امر بر تغییرات رواناب تولیدشده تأثیر گذاشته است. میانگین حجم رواناب در سرعت سه متر بر ثانیه به هوای آرام افزایش یافته، اما در سرعت شش متر بر ثانیه، به دلیل انتقال بخشی از رواناب به سمت بالادست و خارج شدن از سطح کرت آزمایشگاهی، میانگین حجم رواناب نسبت به سرعت سه متر بر ثانیه به صورت کاهش و نسبت به شرایط بدون باد (هوای آرام) به صورت افزایش است. بیشترین و کمترین میانگین ضریب رواناب به ترتیب در شرایط باد با سرعت سه و شش متر بر ثانیه بوده است. براساس نتایج ارائه‌شده در شکل (۴)، تأخیر در زمان اوج برای تیمار با سرعت شش متر بر ثانیه در مقایسه با شرایط هوای آرام نشان می‌دهد که در این سرعت، رواناب بیشتر در سطح کرت جریان یافته و سپس به خروجی

کرت منتقل شده است. این تحلیل توسط کله‌هوئی و همکاران (۲۰۲۳) در شیب و شرایط متفاوت وزش باد نیز گزارش شده است. علاوه بر این، تحلیل مؤلفه‌های نیرو نشان داد که در غیاب باد، حرکت قطره باران تحت تأثیر نیروی وزن آن قرار داشته است؛ اما به دلیل تأثیرگذاری باد و دخالت نیروی اصطکاک تماسی، بخشی از نیروی باد برای غلبه بر حرکت قطره باران صرف می‌شود که این امر باعث می‌شود تا رواناب با تأخیر زمانی به خروجی کرت برسد. از طرف دیگر، تأثیر باد موجب می‌شود که قطرات کوچک‌تر به هم متصل شده و قطرات بزرگ‌تری تشکیل دهند که این امر به طور قابل توجهی بر افزایش حجم رواناب تأثیر می‌گذارد.

تغییرات فرسایش بین شیباری در شرایط باران متأثر از باد

زاویه برخورد قطرات باران به سطح خاک در شرایط بدون باد تا باد با سرعت شش متر بر ثانیه از ۸۹/۸۳ درجه به ۳۲/۰۴ درجه تغییر می‌یابد (کله‌هوئی و همکاران، ۲۰۲۳). تغییر زاویه برخورد قطرات باران باعث ایجاد تنش‌های برشی متفاوت در سطح خاک می‌شود و سعی دارد تعادل مقاومت برشی در برابر جدایی خاک را به هم بزند. در سرعت باد شش متر بر ثانیه انرژی جنبشی معادل ۱۳۸/۶۰ ژول به انرژی پتانسیل جریان تبدیل می‌شود. این تغییر انرژی باعث تسهیل در فرایند تخریب و جداسازی ذرات خاک می‌شود و در نهایت منجر به فرسایش خاک خواهد شد (کله‌هوئی و همکاران، ۲۰۲۳). خاک‌دانه‌های آسیب‌دیده به علت یک یا چند فرایند انتقال، مانند پاشمان یا لایه‌نازک‌جریانی که به واسطه ضربه قطرات باران یا رواناب سطحی ایجاد می‌شود، از مکان اصلی خود جابه‌جا می‌شوند (کیانی‌هرچگانی و همکاران، ۲۰۱۷). جدول (۱) نشان می‌دهد که مقادیر میانگین هدررفت خاک در شرایط بدون باد (هوای آرام) برابر ۱۹۳۳/۸۸ گرم بر متر مربع بوده و با اثر باران متأثر از باد این مقادیر در سرعت‌های سه و شش متر بر ثانیه به ترتیب به ۲۱۰۷/۲۵ و ۲۸۵۸/۵۸ گرم بر متر مربع رسیده است. علاوه بر این، غلظت رسوب در همین شرایط به ترتیب برابر ۱۴۲/۲۰، ۲۱۲/۶۹ و ۴۱۰/۱۳ گرم بر لیتر بوده است. نتایج در شکل (۵) نشان می‌دهد که وجود و دسترسی رسوب در کرت، منجر به

در مجموع تأثیر باران متأثر از باد بر حجم رواناب و ضریب رواناب نشان داد که با افزایش سرعت باد به دلیل جابه‌جایی بخشی از بارش شبیه‌سازی شده، شدت رواناب افزایش یافته است که با یافته‌های شای^۱ و همکاران (۲۰۲۲) و وانگ^۲ و همکاران (۲۰۲۳) هم‌خوانی دارد. میانگین هدررفت خاک و غلظت رسوب نشان‌دهنده این است که با افزایش سرعت باد، این مقادیر نیز افزایش یافته‌اند. براساس یافته‌ها موجود و در دسترس بودن رسوب تولیدی در کرت‌های آزمایشگاهی، سبب شده که هدررفت خاک و غلظت رسوب افزایش یابد. بیشترین میزان میانگین هدررفت خاک و غلظت رسوب در شرایطی که باد با سرعت شش متر بر ثانیه می‌وزد، مشاهده شده است. نتایج تحقیقات فانگ^۳ و همکاران (۲۰۲۲) و فیو^۴ و همکاران (۲۰۲۳) نشان می‌دهد که مؤلفه‌های هدررفت خاک به‌طور چشمگیری تحت تأثیر سرعت باد قرار دارند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که باد تأثیر قابل توجهی بر تغییرات مؤلفه‌های زمان شروع، حجم رواناب، ضریب رواناب، فرسایش خاک و غلظت رسوب داشته است. نتایج این پژوهش به کارشناسان، مدیران و مسئولان اجرایی این امکان را می‌دهد که عوامل مؤثر در مدل‌سازی جامع فرایندهای هدررفت خاک و همچنین حفاظت و مدیریت حوزه‌های آبخیز را شناسایی کنند.

افزایش هدررفت خاک و غلظت رسوب است؛ به‌طوری‌که کمترین و بیشترین میزان میانگین هدررفت خاک و غلظت رسوب در شرایط هوای آرام و سرعت شش متر بر ثانیه مشاهده شده و با تأثیر نیروی جاذبه، این مقادیر افزایش یافته است. براساس مشاهدات مستقیم، مشخص شد که در شرایط شبیه‌سازی با هوای آرام، قطرات باران به‌طور عمود بر سطح زمین فرود می‌آیند؛ اما در شرایطی که باد و باران به‌طور هم‌زمان با سرعت‌های مختلف، به‌ویژه با سرعت شش متر بر ثانیه شبیه‌سازی می‌شوند، زاویه برخورد قطرات باران از حالت عمود به حالت مایل تغییر می‌کند. این تغییر زاویه باعث می‌شود که قطرات باران مانند یک جسم برنده، خاک دانه‌های سطح زمین را متلاشی کرده و آن‌ها را برای انتقال توسط رواناب آماده سازند. با وجود اینکه میزان مشارکت کرت در تولید رسوب تحت شرایط مختلف شبیه‌سازی متفاوت بوده است، در شرایط هوای آرام، کل سطح کرت مسئول انتقال ذرات جداشده بوده، درحالی‌که در سرعت‌های باد سه و شش متر، این مسئولیت به بخش‌های خاصی از سطح کرت محدود شده است. در سرعت‌های باد سه و شش متر بر ثانیه، به ترتیب بخش‌های میانی و انتهایی کرت در فرایند مشارکت دارند، درحالی‌که سایر بخش‌ها در انتقال رواناب تولیدشده نقش ایفا می‌کنند. ذرات خاک جدا شده و رواناب تولیدی به سمت پایین دست کرت در حال حرکت بوده، اما پس از برخورد با باد، نیروی اصطکاک بین باد و رواناب همراه با رسوب تا حدی مانع از حرکت آن‌ها می‌شود. با این حال، به‌محض اینکه نیروی ثقل بر نیروی اصطکاک غلبه کند، رواناب و رسوب به سمت پایین دست حرکت می‌کنند. تعامل نیروهای موجود، به‌ویژه نیروی اصطکاک تماسی، موجب شد تا در سطح کرت، تجمع‌های رسوب به صورت پشته‌های کوچک شکل بگیرد. علاوه بر این، پس از خاتمه شبیه‌سازی باران، به دلیل کمبود رواناب کافی، حجم زیادی از رسوب حمل‌شده در خروجی کرت ترسیب شد و در چرخه اندازه‌گیری مؤلفه‌های فرسایش و رسوب قرار نگرفت.

1. Shi
2. Wang
3. Fang
4. Fu

منابع

- Arabkhedri, M., Shadfar, S., Jafari-Ardakani, A., Bayat, R., Khajavi, E., & Mahdian, M. H. (2018). Improving Water Erosion Estimates for Iran. *Watershed Management Research*, 31(3), 13-27. [In Persian]
- Biddoccu, M., Ferraris, S., Opsi, F., & Cavallo, E. (2016). Long-term monitoring of soil management effects on runoff and soil erosion in sloping vineyards in Alto Monferrato (North-West Italy). *Soil and Tillage Research*, 155, 176-189.
- Cerda, A. (1997). Rainfall drop size distribution in the Western Mediterranean basin, Val'encia. Spain. *Catena*, 30 (2-3), 169-182.
- Christiansen, J.E. (1942). Irrigation by sprinkling, The University of California agricultural experiment station. *Bulletin, Berkeley* (670), 124.
- Cornelis, W.M., Erpul, G., & Gabriels, D. (2004). The ICE wind tunnel for wind and water interaction research. *Wind and rain interaction in erosion*, (50): 197-224.
- Defersha, M.B., Quraishi, S., & Mellese, A.M. (2011). The effect of slope steepness and antecedent moisture content on interrill erosion, runoff and sediment size distribution in the highlands of Ethiopia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15: 2367-2375.
- Ding, Z., Zhang, Z., Li, Y., Zhang, L., & Zhang, K. (2020). Characteristics of magnetic susceptibility on cropland and pastureland slopes in an area influenced by both wind and water erosion and implications for soil redistribution patterns. *Soil and Tillage Research*, 199, 104568.
- Disrud, L.A., Lyles, L., & Skidmore, E.L. (1969). How wind affects the size and shape of raindrops. *Agricultural Engineering*, 50(10): 617-626.
- Du, X., Jian, J., Du, C., & Stewart, R. D. (2022). Conservation management decreases surface runoff and soil erosion. *International soil and water conservation research*, 10(2), 188-196.
- Erpul, G., Gabriels, D., & Norton, L.D. (2004). Wind effects on sediment transport by raindrop impacted shallow flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(8): 955-967.
- Fang, Q., Zhao, L., Hou, R., Fan, C., & Zhang, J. (2022). Rainwater transformation to runoff and soil loss at the surface and belowground on soil-mantled karst slopes under rainfall simulation experiments. *Catena*, 215, 106316.
- Fox, D. M., & Bryan, R. B. (2000). The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient. *Catena*, 38(3), 211-222.
- Fister, W., Iserloh, T., Ries, J.B., & 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.
- Fu, Y., Wang, D., Sun, W., & Guo, M. (2023). Impacts of grass planting density and components on overland flow hydraulics and soil loss. *Land Degradation & Development*, 34(1), 234-249.
- Gabriels D., Erpul G., & Vermang J. (2011). The "Erosion Component" of WEPP (Water Erosion Prediction Project) for wind driven rain. 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, 9-18 pp.
- Golami, L., Sadeghi, S.H.R., & Homaeae, M. (2014). Effect of rice straw mulch on runoff threshold and coefficient from rainfall. *Iranian Water Researches Journal*, 8(2), 33-40. [In Persian]
- Homayounfar, V., & Khaledi Darvishan, A. (2016). Affectability of splash from soil disturbance in laboratorial erosion studies. *Watershed Engineering and Management*, 8(4), 478-485. [In Persian]
- Iserloh, T., Fister, W., Marzen, M., Seeger, M., Kuhn, N. J., & 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.
- Kiani-Harchegani, M., & Sadeghi, S.H.R. (2017). Effects of consecutive storms on splash erosion components for two different rainfall intensities under laboratory conditions. *Iranian journal of Ecohydrology*, 4(3), 837-846. [In Persian]
- Kiani-Harchegani, M., Sadeghi, S.H.R., Singh, V. P., Asadi, H., Abedi, M. (2019). Effect of rainfall intensity and slope on sediment particle size distribution during erosion using partial eta squared. *Catena*, 176, 65-72.
- Kalehhouei, M., Sadeghi, S.H.R., & Khaledi Darvishan, A. (2022). Water Erosion Reactivity from Some Climatic Factors. *Extension and Development of Watershed Management*, 9(34), 20-27. [In Persian]
- Kalehhouei, M., Sadeghi, S.H.R., & Khaledi Darvishan, A. (2023). Changes in raindrop properties due to wind blowing using image processing. *Catena*, 221, 106789.
- Khaledi Darvishan, A., Sadeghi, S.H.R., Homaeae, M., & Arabkhedri, M. (2014). Measuring sheet erosion using synthetic color-contrast aggregates. *Hydrological Processes*, 28(15): 4463-4471.
- Kheirabadi, H., Mahmoodabadi, M., Jalali, V., & Naghavi, H. (2018). Sediment flux, wind erosion, and net erosion are influenced by soil bed length, wind velocity, and aggregate size distribution. *Geoderma*, 323, 22-30.
- Kourgialas, N.N., Koubouris, G.C., Karatzas, G.P., & Metzidakis, I. (2016). Assessing water erosion in Mediterranean tree crops using GIS techniques and field measurements: The effect of climate change. *Natural Hazards*, 83(1), 65-81.

26. Kukal, S.S., & Sarkar, M. (2010). Splash erosion and infiltration in relation to mulching and polyvinyl alcohol Application in semi-arid tropics. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 56(46): 697-705.
27. Lal, R. (1998). Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality: Criti Review, *Plant Science*, 17, 319-464.
28. Marzen, M., Iserloh, T., Casper, M. C., & Ries, J. B. (2015). Quantification of particle detachment by rain splash and wind-driven rain splash. *Catena*, 127, 135-141.
29. Mahmoodabadi, M., Zamani, S., & Yazdanpanah, N. (2021). Organic carbon loss and sediment enrichment during interrill erosion influenced by simultaneous wind and rain. *Watershed Engineering and Management*, 13(1), 13-28. [In Persian]
30. Montenegro, A. D. A., Abrantes, J. R. C. B., De Lima, J. L. M. P., Singh, V., & Santos, T. E. M. (2013). Impact of mulching on soil and water dynamics under intermittent simulated rainfall. *Catena*, 109, 139-149.
31. Nouhou Bako, A., Darboux, F., James, F., Josserand, C., & 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.
32. Poormirkamali, S., & Mahmoodabadi, M. (2021). Losses of soil, organic carbon, phosphorous and potassium due to interrill erosion influenced by different levels of wind velocity and plant residue coverage. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 10(4), 173-189. [In Persian]
33. Rezaei Arshad, R., & Mahmoodabadi, M. (2018). Simultaneous effects of wind and rain on hydraulic parameters of sheet flow and interrill erosion rate. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 8(2), 1-22. [In Persian]
34. Rezaei Arshad, R., Mahmoodabadi, M., Farpoor, M. H., & Fekri, M. (2019). Experimental investigation of rain-induced splash and wash processes under wind-driven rain. *Geoderma*, 337: 1164-1174.
35. Romkens, M.J.M., Helming, K., & Prasad, S.N. (2001). Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes. *Catena*, 46(2-3): 103-123.
36. Sadeghi S.H.R. (2010). Study and measurement of water erosion. Publications of Tarbiat Modares University. 200 p. [In Persian]
37. Sadeghi, S.H.R., Moatamednia, M., & Behzadfar, M. (2011). Spatial and temporal variations in the rainfall erosivity factor in Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 13: 451-464.
38. Sadeghi, S.H.R., Zarif Moazam, M., & Mirnia, K. (2011). Effect of Slope Steepness and Aspect on Surface Runoff and Sediment Yield from Experimental Small Plots in Kojour Watershed. *Water and Soil*, 25(3), 583-592. [In Persian]
39. Sadeghi, S.H.R., Abdollahi, Z. & Khaledi Darvishan. A.V. (2013). Experimental comparison of some techniques for estimating natural rain drop size distribution in south coast of the Caspian Sea, Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 58(6):1-9.
40. Sadeghi, S.H.R., Hazbavi, Z., & Gholamalifard, M. (2019). Interactive impacts of climatic, hydrologic and anthropogenic activities on watershed health. *Science of the Total Environment*, 648: 880-893.
41. Saeidi, P., & Sadeghi, S.H.R. (2012). Analysis of Observed Sedimentographs and Rating Loops on Storm Basis in Educational Watershed of Tarbiat Modares University, Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, 17(1), 97-112. [In Persian]
42. Schmidt, J., Werner, M. V., & Schindewolf, M. (2017). Wind effects on soil erosion by water—A sensitivity analysis using model simulations on catchment scale. *Catena*, 148: 168-175.
43. Shapiro, S. S., & Wilk M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3/4): 591-611.
44. Shi, P., Li, P., Li, Z., Sun, J., Wang, D., & Min, Z. (2022). Effects of grass vegetation coverage and position on runoff and sediment yields on the slope of Loess Plateau, China. *Agricultural Water Management*, 259, 107231.
45. Tanner, S., Ben-Hur, M., Argaman, E., & Katra, I. (2023). The effects of soil properties and aggregation on sensitivity to erosion by water and wind in two Mediterranean soils. *Catena*, 221, 106787.
46. Umback, C.R., & Lembke, W.D. (1966). Effect of wind on falling water drops. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 9(6): 805-808.
47. Wang, L., Li, Y., Wu, J., An, Z., Suo, L., Ding, J., Li, Sh., Wei, D., & Jin, L. (2023). Effects of the Rainfall Intensity and Slope Gradient on Soil Erosion and Nitrogen Loss on the Sloping Fields of Miyun Reservoir. *Plants*, 12(3), 423.
48. Won C. H., Choi Y. H., Shin M. H., Lim K. J., and Choi J. D. (2012). Effects of rice straw mats on runoff and sediment discharge in a laboratory rainfall simulation. *Geoderma*, 189: 164-169.
49. Zhang, Q., Fan, J., Zhang, X. (2016). Effects of simulated wind followed by rain on runoff and sediment yield from a sandy loessial soil with rills. *Journal of Soils and Sediments*, 16, 2306-2315.

Investigating the Influence of Rain and Wind on Runoff Production and Interrill Erosion under Laboratory Conditions

Mahin Kalehhouei¹, Seyed Hamidreza Sadeghi^{2*}, Abdulvahed Khaledi Darvishan³

Received: 29/09/2024

Accepted: 04/01/2025

Extended Abstract

Introduction: Characterized by 25% global biodiversity, the soil is known as the unique substrate sustaining Earth's inhabitants. On the other hand, soil erosion caused by water is a primary factor in land degradation. Approximately 75 billion tons of soil and living organisms are removed from soil ecosystems annually due to soil degradation and erosion. Moreover, soil erosion may endanger the quality and health of soil and water. The primary determinants of water erosion are static topographical features such as steepness and slope direction, and dynamic climatic factors, including precipitation and wind, which may cause changes in soil's hydrological processes, indirectly or indirectly affecting other environmental factors. The main point concerning the initiation of water erosion is the impact of raindrops on the soil surface. However, processes affected by the raindrops from the time of descent to the impact on the soil surface have been underresearched, neglecting the influential role of raindrops in creating and changing the behavior of water erosion. Therefore, this study was conducted on the soil collected from the Kojour Watershed in Mazandaran Province, Iran, mainly focusing on the interaction of rain and wind with interrill erosion under laboratory conditions.

Materials and methods: The soil samples, especially those collected from the summer rangelands of the Northern Alborz Range of Kojur Watershed, Mazandaran Province, Iran, were transported to the Rainfall and Erosion Simulation Laboratory of the Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University. For this o this end, three laboratory plots with dimensions of $0.5 \times 1 \times 6$ m were used at a slope of about 30%. Moreover, the intensity of rainfall was approximately 50 mm h^{-1} with a duration of 30 min under no-wind control conditions and two wind velocities of 3 and 6 m s^{-1} at a slope of 30%. The wind direction of the study area was also considered, opposite the slope (from bottom to top of the plot), as it mainly occurred during the storms in the study region. Furthermore, the wind velocity generated during the experiments was closely monitored using an anemometer to ensure accuracy and consistency throughout the study. Finally, the effectiveness of the interrill erosion process caused by wind-affected rain was demonstrated through statistical comparisons against the control plot.

Results: According to the results of the study, the mean runoff start time varied significantly based on wind velocity. In this regard, the runoff started after approximately 4:19 minutes under calm conditions. Moreover, when wind velocities increased to 3 m s^{-1} , the mean runoff start time was delayed to 7:28 minutes, and the delay extended further to 10:16 minutes at a wind velocity of 6 m s^{-1} . The aforementioned results indicated that the mean runoff volume was influenced by wind velocity. On the other hand, the mean runoff volume was found to be 114.95 l under wind-less conditions. Accordingly, as wind velocity increased to 3 m s^{-1} , the mean runoff volume rose slightly to 123.89 l. However, at a wind velocity of 6 m s^{-1} , the runoff volume slightly decreased to 120.59 l. The runoff coefficients were also found to be 108.33, 114.20 and, 111.27%, respectively.

1 . Former PhD Student, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

2 . Professor (Corresponding Author), Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares Resources University, Noor 46417-76489, Iran, Author correspond; sadeghi@modares.ac.ir

3 . Associate Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University

Furthermore, the study found that the mean soil loss increased under higher wind velocities. On the other hand, the mean soil loss was reported as 1933.88 g under calm conditions. In this regard, when the wind velocity increased to 3 m s^{-1} , the soil loss rose to 2107.25 g, and it further escalated to 2858.58 in cases where the velocity reached 6 m s^{-1} . The sediment concentrations were calculated as 142.20 g l^{-1} under calm conditions, reaching 212.69 g l^{-1} and 410.13 g l^{-1} at wind velocities of 3 m s^{-1} and 6 m s^{-1} , respectively. These results suggest a progressive increase in sediment concentration with rising wind velocities, underscoring the significant influence of wind-induced turbulence on sediment mobilization and transport in runoff. Moreover, the analysis of the results revealed that wind velocity exerted a statistically significant influence on runoff and interrill erosion components at the 5% significance level.

Conclusion: The results of this study confirm that wind-driven rain significantly influences the components of runoff and soil loss. These findings can be a game-changer, providing valuable insights for accurately modeling the water erosion process under natural circumstances. Furthermore, the findings can significantly help executive department managers estimate soil erosion caused by wind storms, thereby fostering sound management and prioritization of erosion-prone areas and soil and water conservation measures.

Keywords: Land Degradation, Rainfall Erosivity, Soil loss, Wind Driven Water Erosion.