

واژه‌های کلیدی: تکامل فرسایش، شبیه‌سازی باد و باران، فرآیندهای ترکیبی، فرسایش آبی متأثر از باد.

کنش‌پذیری فرسایش آبی از برخی مؤلفه‌های اقلیمی

مقدمه

فرسایش خاک^۱ یکی از مهم‌ترین مسائل محیط‌زیستی است که می‌تواند کیفیت کلیه اجزای منابع طبیعی را به مخاطره بیندازد [۳۵]. فرسایش خاک در حوزه‌های آبخیز یکی از موانع دست‌یابی به توسعه پایدار است که ابعاد سرزمینی این پدیده منحصر به محدوده خاصی نیست، ولی مقدار و شدت آن در کشورهای درحال توسعه به‌مراتب بیش‌تر از کشورهای پیشرفته است [۳۴]. به‌نحوی که طی دهه‌های اخیر، میزان فرسایش خاک در ایران افزایش چشم‌گیری داشته و بر اساس نقشه فرسایش تهیه شده در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، این مقدار ۹۷۶ میلیون تن در سال برآورد شده است [۱]. عوامل فراوانی از جمله اقلیم^۲، فرسایش‌پذیری خاک^۳، توپوگرافی^۴، مدیریت خاک، شیوه‌های حفاظتی و پوشش گیاهی بر شکل‌گیری و گسترش فرآیند فرسایش آبی تأثیرگذارند [۴۰ و ۵۰]. گستره و سهم مشارکت هرکدام از عوامل به بسیاری از متغیرها در مقیاس‌های مکانی-زمانی بستگی دارد [۳]. لذا برای مهار فرسایش آبی لازم است، شناخت کاملی از عوامل مؤثر صورت گیرد تا راه‌حلی مناسب برای آن اتخاذ شود. هم‌چنین باید در نظر داشت که اساساً نمی‌توان عامل مشخص و معینی را به‌عنوان عامل اصلی فرسایش آبی در یک منطقه معرفی نمود، بلکه شرایط فرسایش موجود در یک منطقه را باید معلول تأثیرات متقابل مجموعه عوامل مؤثر در ایجاد فرسایش دانست [۴۵]. در همین راستا باران و باد به‌عنوان مؤلفه‌های اقلیمی در بوم‌سازگان، نقش تأثیرگذاری بر فرسایش آبی در مناطق مرطوب و فرسایش بادی در مناطق خشک بر عهده دارند، درحالی‌که هدررفت خاک^۵ در مناطق خشک یا نیمه‌خشک به میزان قابل‌توجهی متأثر از فرآیند هم‌زمان هر دو فرسایش است [۱۳]. به‌همین تقدیر، ضرورت مطالعه حاضر باهدف تحلیل جامع از تأثیرپذیری فرآیند فرسایش آبی و مؤلفه‌های هیدرولوژیکی آن از جمله رواناب^۶، رسوب^۷،

مهین کله‌هوئی^۱، سیدحمیدرضا صادقی^{۲*} و عبدالواحد خالدی‌درویشان^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۲

DOR: 20.1001.1.26454777.1400.9.34.3.8

چکیده

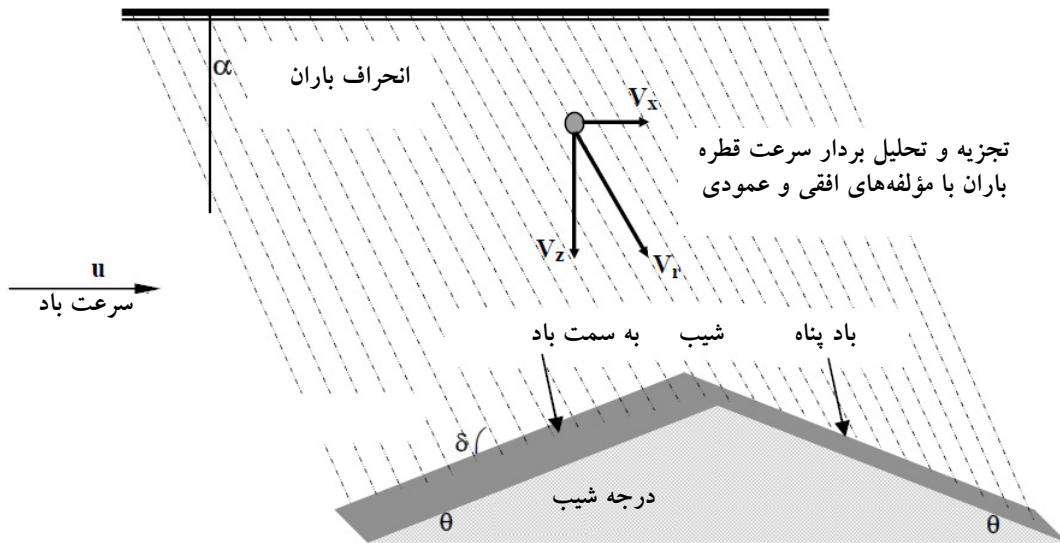
فرسایش آبی و بادی از مهم‌ترین علل هدررفت خاک است. درک این تعاملات برای برآورد کیفیت خاک و اثرات محیط‌زیستی در مناطق با زمینه رخداد هر دو نوع فرسایش خاک از اهمیت بالایی برخوردار است. عوامل متعددی بر وقوع و فرآیند فرسایش آبی تأثیر دارند. در همین راستا، عوامل اقلیمی از جمله بارندگی و باد به سبب پویایی بیش‌ترین نقش را دارند. بر همین اساس، مهار فرسایش آبی زمانی مؤثر خواهد بود که شناخت کافی در زمینه عوامل مؤثر بر آن در دسترس باشد. در همین راستا، در مقاله حاضر سعی شده است که از زاویه دید متفاوت به این مسئله پرداخته شود و به‌صورت مطالعه مروری اثرات مؤلفه‌های مختلف اقلیمی بر فرسایش آبی از طریق بررسی تحلیلی پیشینه‌های پژوهشی موجود را مورد بحث و بررسی قرار گیرد. نتایج حاصل از مرور منابع نشان داد که از بین عوامل اقلیمی مؤثر بر فرسایش آبی، بیش‌تر به نقش بارندگی بر تولید رواناب و هدررفت خاک پرداخته شده و به نقش سایر مؤلفه‌ها از جمله باد بر تغییرات رفتاری فرسایش آبی توجهی نشده است. در حالی‌که در شرایط حضور باد رفتار قطرات باران در حال ریزش تغییر کرده و بی‌شک بر فرآیند وقوع فرسایش آبی و نیز مؤلفه‌های هیدرولوژیکی تأثیرگذار است. تغییرات در قطر قطرات، سرعت، زاویه برخورد و انرژی جنبشی باران را می‌تواند در تغییر فرسایش آبی و به‌ویژه فرسایش پاشمانی نقش مهمی داشته باشد. با این حال شناسایی دقیق عوامل مؤثر و تأثیرگذار می‌تواند تحلیل‌های مفیدی برای مدل‌سازی و نهایتاً مدیریت صحیح فرآیند فرسایش آبی در اختیار متخصصین، مدیران و مسئولین اجرایی قرار دهد.

4. Soil Erosion
5. Climate
6. Soil erodibility
7. Topography
8. Soil loss
9. Runoff
10. Sediment

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

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

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



شکل ۱: نمای کلی WDR با زاویه عمودی و تصادفی روی سطح شیب‌دار [۱۷]

هنگامی که قطرات باران وارد میدان باد محلی می‌شوند، به وسیله بردارهای باد منحرف و در یک الگوی خاص توزیع می‌شوند [۴]، که در نهایت توزیع بارش منطقه را تغییر می‌دهند [۴۳]. علاوه بر آن باد با شکستن قطرات بزرگ به قطرات کوچک بر میزان بارش و اندازه قطرات تأثیر می‌گذارد [۳۶].

جریان باد باعث می‌شود که قطرات باران با سرعت و در مسیری مورب به زمین برخورد کنند که افزایش انرژی جنبشی، زاویه ریزش قطرات، قطر قطرات، سرعت سقوط قطرات، حرکت ذرات خاک و افزایش مسیر مسافت برخورد را به دنبال دارد [۷ و ۲۰]. هم‌چنین باد باعث تغییر شکل قطره باران به بیضی مسطح می‌شود [۱۲]. که تأثیر این مجموعه عوامل منجر به افزایش توان فرسایشی می‌شود [۳۸]. جریان باد باعث تأخیر در شروع جریان سطحی شده که از این طریق باعث جداسازی بیش‌تر ذرات توسط قطرات باران شده است [۱۵]. به طوری که Krauss و Disrud [۱۲]، گزارش کردند که جداسازی ذرات در WDR به مراتب بیش‌تر از باران بدون حضور باد بوده است.

اثر ترکیبی فرسایش آبی و بادی

رگبارهای باران‌های اغلب همراه با وزش باد است و بارش‌های بدون حضور باد در شرایط آب و هوایی بسیار نادر است. باران متأثر از باد، بارانی است که به طور مایل به یک مؤلفه سرعت افقی توسط باد داده می‌شود. هم‌چنین اثر WDR به توزیع مجدد بارش در توپوگرافی مقیاس کوچک ناشی از وجود الگوهای جریان باد آشفته محلی اشاره دارد [۴]. علاوه بر این تفاوت عمده‌ای بین فرسایشی WDR با شرایط باران بدون باد و هم‌چنین باد بدون باران وجود دارد [۳۳]. با این حال، میزان این اختلاف به ویژگی‌های باران و باد، هم‌چنین سایر عوامل هواشناسی مانند هوا، دما و رطوبت نسبی،

هدررفت خاک و غلظت رسوب^۱ از اثرات جداگانه و هم‌زمان بارش متأثر از باد انجام شده است.

تأثیرگذاری بارش بر فرسایش بادی

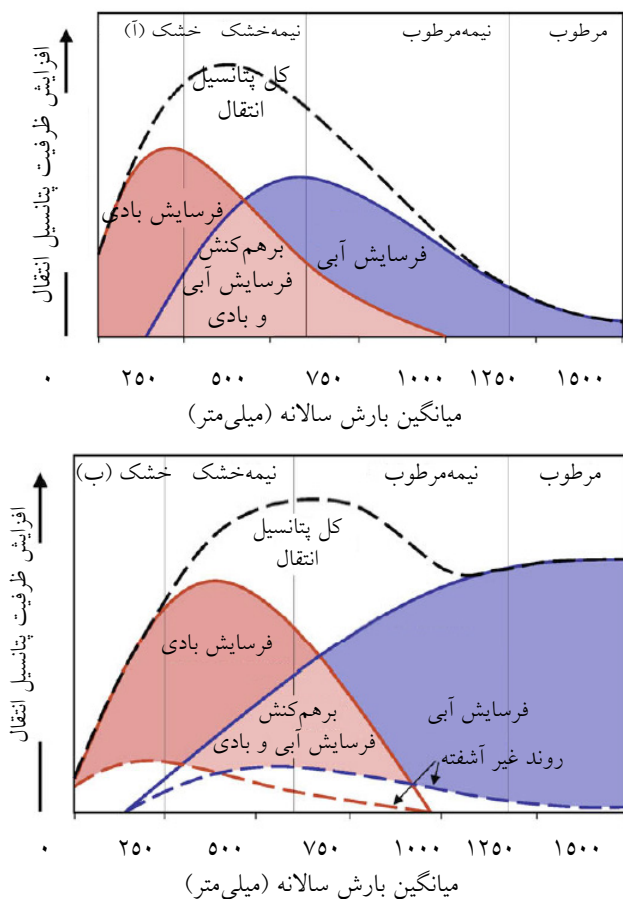
در یک پهنه، مشاهده تغییرات مکانی انتقال رسوب در فرسایش آبی در نتیجه تغییرات عواملی مختلفی از جمله رطوبت نسبی هوا [۳۲]، توپوگرافی [۵۶] بارش [۱۰] و رطوبت خاک است [۳۷]. به منظور درک و تفسیر هر شرایطی ضروری است که عوامل مؤثر شناخته شوند. نوسانات بارش، تراکم محدود پوشش گیاهی و غیره شرایط را برای وقوع فرسایش بادی مساعد می‌کند [۲]. کمبود بارندگی و افزایش درجه حرارت موجب حاکم شدن خشکی در منطقه و مهیا نمودن شرایط برای وقوع بادهای طوفان‌زا و حساس شدن آن‌ها برای انتقال رسوب می‌شود [۲۵]. در بسیاری از رویدادها، بارش باران همراه با باد است، اما تنها دانش محدودی در اثر باران در حال افزایش (یا کاهش) توانایی باد برای ایجاد حرکت و ساییدگی خاک وجود دارد [۸].

تأثیرگذاری باد بر فرسایش آبی

در شرایط آرام و بدون باد، قطرات باران معمولاً به صورت عمودی^۲ به سطح خاک برخورد می‌کنند [۴۶]، از آنجایی که باد بخش محرک رگبارهای باران طبیعی محسوب می‌شود می‌تواند بر ریزش قطرات باران و هم‌چنین جریان‌های کم‌عمق تأثیر بگذارد. بر همین اساس، ریزش قطرات باران متأثر از باد (WDR)^۳ با توجه به سرعت و جهت وزش باد به صورت مایل بر سطح خاک اتفاق می‌افتد^۴ و از حالت ریزش عمودی فاصله می‌گیرد [۲۷ و ۵۱] (شکل ۱).

1. Sediment concentration
2. Vertical Rain
3. Wind-driven rain (WDR)
4. Inclined Rain

۱۲). هم‌چنین پتانسیل انتقال رسوب کل در رژیم‌های بارشی در شرایط دست‌خورده و دست‌نخورده متفاوت است (شکل ۲ب).



شکل ۲: نمایش ترسیمی انتقال رسوب در مناطق مختلف در مکان‌های دست‌نخورده (آ) و دست‌خورده (ب) [۳۱]

جهت‌گیری و نقص مطالعات فرسایش WDR

پژوهش‌های متعددی در زمینه بررسی فرآیند فرسایش آبی [برای نمونه؛ ۲۹، ۴۹ و ۵۸] و بادی [برای نمونه؛ ۲۲، ۲۴، ۳۰ و ۲۶] انجام شده است. ولی تاکنون مطالعات جامع و کافی در زمینه بررسی نقش WDR صورت نگرفته است [۵۹، ۴۱ و ۱۸].

عدم شناخت این تعامل می‌تواند تهدیدی جدی برای اراضی کشاورزی و زراعی با پتانسیل بالا محسوب می‌شود [۳۸]. مدل‌های مفهومی و برآوردهای میدانی محدود نشان می‌دهند که میزان تعامل فرسایش آبی و بادی در بسیاری از محیط‌ها به دلیل مطالعات ارزیابی کم به‌صراحت نادیده یا کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است [۱۹ و ۲۳]. با این حال بیشتر مطالعات به نقش جداگانه نیروهای مخرب آب و باد پرداخته شده است [۳۹]. نقص موجود در چنین مطالعاتی می‌تواند ناشی از این واقعیت باشد که روش‌های برآورد فرسایش بادی [۲۴] و آبی [۴۸] انحصاری بوده است. آگاهی از تأثیر تغییرات اقلیمی یکی از دلایل اساسی برای غلبه بر این محدودیت و انحصار بوده است.

ویژگی‌های خاک و کاربری اراضی بستگی دارد [۸]. تأثیرگذاری باد بر باران و بالعکس ماهیتی پیچیده دارد و ترکیبی از تعامل بسیاری از متغیرها است، و شامل سه بخش جامد (ذرات خاک)، مایع (باران) و گاز (باد) و اعمال ترکیبی بخش مایع و گاز بر بخش جامد است [۶].

تغییرات رواناب در شرایط WDR

رواناب به‌عنوان مهم‌ترین مؤلفه‌های هیدرولوژیکی از اهمیت بالایی در مطالعات هیدرولوژیکی برخوردار است. بارش در مدل‌سازی هیدرولوژیکی برای شبیه‌سازی بارش-رواناب به‌کار برده می‌شود که در این خصوص WDR تأثیر قابل‌توجهی در جریان پایه آب‌نمود دارد [۶۰]. در واقع وقوع باران در حضور باد بر توزیع زمانی و مکانی بارندگی طبیعی تأثیر می‌گذارد، که می‌تواند ورودی فرآیند بارش - رواناب را تعدیل می‌کند. چنین تغییراتی در روند بارش - رواناب می‌تواند سامانه‌های واقعی را در دست‌یابی به شبیه‌سازی‌های بهتر کمک کند [۲۸]. بارش باران در شرایط بدون باد در نزدیکی سطح زمین به‌صورت سرعت عمودی بوده و اگر باد در نزدیکی سطح زمین وجود داشته باشد، باران سرعت افقی پیدا می‌کند و توسط باد در یک مسیر غیر عمودی هدایت می‌شود [۶۲]. به‌منظور اندازه‌گیری تأثیرپذیری روند بارش - رواناب و مؤلفه‌های هیدرولوژیکی از جمله رواناب، رسوب، هدررفت خاک و غلظت رسوب از شرایط WDR از شبیه‌سازی هم‌زمان باران و باد استفاده می‌شود [۹].

تغییرات غلظت و دانه‌بندی رسوب در شرایط WDR

انتقال رسوب ناشی از فرسایش بادی می‌تواند ظرفیت آبراهه‌ها و دریاچه‌ها را کاهش دهد و تأثیر بر مشخصه‌های فرسایش آبی بگذارد [۴۲]. برهم‌کنش بین فرسایش آبی و بادی می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر میزان انتقال رسوب داشته باشد، به‌طوری‌که یک از نیروهای فرسایشی ذرات خاک از بستر رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و دشت‌های سیلابی جدا می‌کند و با رابطه تعاملی مواد را برای واکنش نیروی فرسایش دیگر فراهم می‌کند [۵ و ۵۳]. توزیع اندازه رسوب ممکن است رفتار واقعی انتقال رسوب را کنترل کند [۵۷]. TUO و همکاران [۵۳]، گزارش کردند که فرسایش بادی سبب تشدید فرسایش آبی می‌شود، علاوه بر آن رسوب تولیدی را ۷/۲۵ تا ۳۸/۹۷ درصد افزایش می‌دهد. در میان عوامل مؤثر بارش نقش چندوجهی در انتقال ذرات خاک بر عهده دارد، به‌طوری‌که بر اساس شکل (۲)، میزان انتقال ذرات در فرسایش آبی و بادی به‌شدت با رژیم‌های بارشی در مناطق خشک، نیمه‌خشک/مرطوب و مرطوب متفاوت است.

هنگاهی که انتقال رسوب فرسایش بادی توأم با فرسایش آبی صورت بگیرد، اهمیت انتقال رسوب کل دو چندان خواهد شد، به‌طوری‌که انتقال رسوب در سیستم‌های نسبتاً دست‌نخورده در محیط‌های نیمه‌خشک بیش‌تر از مرطوب و یا خشک است (شکل

1. Rainfall-runoff

دلایل متعددی برای نادیده گرفتن تأثیر مؤلفه‌های باد بر فرسایش آبی از جمله رعایت نکردن مقیاس مناسب، شرایط آزمایشگاهی و فقدان اطلاعات وجود دارد [۲۳]. فرسایش خاک با ویژگی‌های تنوع مکانی - زمانی یک فرآیند چندوجهی پیچیده است، که نداشتن اطلاعات از مقیاس مکانی و زمانی باعث عدم شناسایی تعاملات می‌شود [۴۴ و ۵۲]. هم‌چنین محدود بودن یا فقدان تجهیزات آزمایشگاهی شبیه‌سازی تعاملات بین جریان باد و باران و هم‌چنین اثرات ترکیبی آن‌ها بر فرسایش خاک و عدم درک و توجه به اثر ترکیبی و احتمالاً هم‌افزای باران و باد دلیل دیگری بر عدم مطالعات جامع در این زمینه بوده است [۳۶، ۷، ۲۱، ۳۸، ۱۱]. علاوه بر این موارد، هنوز برخی شکاف‌های اطلاعاتی از نحوه سازوکار تعاملات پیچیده بین اثر ترکیبی فرسایش آبی و بادی از جمله انرژی جنبشی باد و فرسایش آبی وجود دارد که باعث نقص در انجام تحقیقات شده است [۵۲].

تاریخچه مطالعه فرسایش ناشی از WDR

Umbach و Disrud [۵۴]، جزء نخستین پژوهش‌گرانی بودند که در پژوهش‌های آزمایشگاهی نشان دادند که بین فرآیندهای فرسایش آبی و بادی تعامل وجود دارد. با توجه به اهمیت موضوع، مطالعات متعددی در مورد تعامل بین فرسایش آبی و بادی بر وقوع هم‌زمان باران و باد، یعنی قطرات باران ناشی از تأثیر باد، با استفاده از تونل بادی متمرکز شده است [۱۴، ۱۷، ۵۵، ۲۰، ۲۷ و ۴۷]. Erpul و همکاران [۱۶] به بررسی قطرات باران متأثر از باد بر جدایش ذرات با استفاده از تونل بادی در سرعت‌های شش، ۱۰ و ۱۴ متر بر ثانیه و شیب‌های مختلف هفت تا ۲۰ درصد در دانشگاه گنت، بلژیک پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که باد نه تنها سرعت تأثیر قطرات باران را افزایش می‌دهد بلکه زاویه برخورد قطرات باران را نیز تغییر می‌دهد. بر همین اساس، جدا شدن ذرات مختلف بسته به تغییر در مسیر بارش باران و افزایش سرعت و جهت باد رخ داده است. تفاوت معنی‌داری در جدایش ذرات در شیب‌های مختلف وجود دارد، به طوری که این جدایش در شیب‌های بالاتر، ۴۴ برابر بیش‌تر از شیب‌های پایین‌تر بوده است. Zhang و همکاران [۶۱] گزارش دادند که میزان فرسایش خاک متأثر از باران و باد در جنوب آریزونا آمریکا ۷/۶۰ تن بر هکتار در سال بوده است، که از این سهم تنها ۰/۰۸ تن بر هکتار در سال سهم فرسایش بادی بوده است. Iserloh و همکاران [۲۷] اثر نیروی محرک باد بر فرسایش خاک با استفاده از تونل بادی در مقیاس کرت در دو خاک خشک و مرطوب را در دانشگاه تریر آلمان مطالعه کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که میزان رسوب در حضور باد ۱۱۳ تا ۱۱۰۸ درصد در مقایسه با عدم حضور باد افزایش یافته است، حال آن‌که افزایش رواناب به‌طور قابل توجهی (۱۵ تا ۷۱ درصد) پایین‌تر بوده است، در حالی که غلظت رسوب تولیدی بین ۵۶ تا ۸۹۴ درصد افزایش داشته است. Marzen و همکاران [۳۸] به بررسی اثر باران متأثر از باد در پاشمان خاک با

استفاده از تونل باد پرداختند. شدت باران در حضور و عدم حضور جریان باد با سرعت ۵/۵ تا ۶ متر بر ثانیه در ۰/۳ متر ارتفاع به ترتیب ۱۳۰ و ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت بود. نتایج این پژوهش نشان داد که باران متأثر از باد تأثیر مستقیم و فزاینده‌ای بر میزان پاشمان خاک داشته است. به نحوی که میانگین پاشمان خاک در حضور و عدم حضور جریان باد به ترتیب ۱۰۴۹۰ و ۲۲۹/۹ میلی‌گرم بود. Schmidt و همکاران [۵۱] به مطالعه اثر باد بر فرسایش آبی و تجزیه و تحلیل حساسیت با استفاده از شبیه‌سازی مدل سه‌بعدی در مقیاس آبخیز ساکسونی آلمان شرقی با استفاده از تونل باد در جهت‌های مختلف (شمال، شرق، جنوب و غرب) پرداختند. نتایج نشان داد که با توجه به سناریوهای شبیه‌سازی شده، فرسایش نیز می‌تواند به دلیل کاهش اثر باد افزایش یابد. ایشان تأکید کردند که تأثیر باد بر فرسایش آبی قابل توجه بوده است و لذا نباید در مدل‌های فرسایش خاک ریاضی نادیده گرفته شود.

علی‌رغم اهمیت گزارش شده در رابطه با اثر باد در تغییر فرآیند فرسایش آبی، پژوهش‌های محدودی در رابطه با باران متأثر از باد روی فرآیندهای فرسایش در ایران گزارش شده است که در این میان می‌توان به مطالعه رضایی‌ارشد و محمودآبادی [۴۶]، اشاره نمود. ایشان به بررسی تأثیر هم‌زمان جریان باد و باران بر مشخصه‌های هیدرولیکی جریان سطحی و شدت فرسایش بین‌شیاری با استفاده از تونل بادی، در سرعت‌های باد (صفر، شش، نه و ۱۲ متر بر ثانیه) و شدت‌های باران (۳۰، ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر بر ساعت) مختلف پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که بسته به سرعت باد، شدت فرسایش بین‌شیاری بین ۰/۲۱ تا ۰/۲۲ گرم بر مترمربع بر ثانیه متغیر بوده است. با افزایش سرعت باد، عمق جریان و تنش برشی کاهش داشته و سبب افزایش سرعت و قدرت جریان شده است. بررسی‌ها نشان داده است که افزایش سرعت باد می‌تواند از طریق تأثیر بر مشخصه‌های هیدرولیکی جریان سطحی، شدت فرسایش بین‌شیاری را تحت تأثیر قرار دهد. به نحوی که افزایش سرعت و قدرت جریان واحد، شدت فرسایش بین‌شیاری را افزایش داد. هم‌چنین افزایش عمق لایه آب و نیز افزایش تنش برشی و قدرت جریان، به دلیل صرف بخشی از انرژی قطرات باران برای عبور از لایه آب، باعث کاهش شدت فرسایش پاشمانی شده است.

جمع‌بندی

بررسی و مرور مستندات نشان می‌دهد که تاکنون مطالعات بسیار محدودی و آن‌هم صرفاً طی سال‌های اخیر در رابطه با فرآیندهای ترکیبی هیدرولوژیکی صورت گرفته است و بررسی‌های جامعی در خصوص اثر هم‌زمان باران و باد بر فرآیندهای ترکیبی فرسایش گزارش نشده است. دسترسی محدود به آزمایشگاه‌های مجهز به شبیه‌سازی هم‌زمان باران و باد سبب شده است که کلیه آزمایش‌ها با استفاده از تونل باد و در سینی‌های کوچک فرسایشی با ایجاد فرسایش‌های مصنوعی صورت گیرد. از سوی دیگر پایش دقیق

the Earth, 28 (6-7): 277-282.

10. DE PLOEY, J. 1980: Some field measurements and experimental data on wind blown sands. In M. de Boodt & D. Gabriels (eds.), Assessment of erosion. Wiley, Chichester, 143-151.

11. 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.

12. Disrud, LA., Krauss, R.K. 1971: Examining the process of soil detachment from clods exposed to wind-driven simulated rainfall. Transaction of the ASAE 14, 90-92.

13. Du, H., Dou, S., Deng, X., Xue, X., Wang, T. 2016. Assessment of wind and water erosion risk in the watershed of the Ningxia-Inner Mongolia Reach of the Yellow River, China. Ecological Indicators, 67: 117-131.

14. Erpul, G., Gabriels, D., Janssens, D. 1998. Assessing the drop size distribution of simulated rainfall in a wind tunnel. Soil and Tillage research, 45(3-4): 455-463.

15. Erpul, G., Norton, L.D., Gabriels, D. 2003 (a). Sediment transport from interrill areas under wind-driven rain. Journal of Hydrology, 276: 184-197.

16. Erpul, G., Norton, L. D., Gabriels, D. 2003. (b) The effect of wind on raindrop impact and rainsplash detachment. Transactions of the ASAE, 46(1): 51-62.

17. 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.

18. Fenta, A. A., Tsunekawa, A., Haregeweyn, N., Poesen, J., Tsubo, M., Borrelli, P., Kawai, T. 2020. Land susceptibility to water and wind erosion risks in the East Africa region. Science of the Total Environment, 703: 135016.

19. Field, J. P., Breshears, D. D., Whicker, J. J. 2009. Toward a more holistic perspective of soil erosion: why aeolian research needs to explicitly consider fluvial processes and interactions. Aeolian

فرآیندهای فرسایشی حاصل از باران متأثر از باد نیازمند رعایت مقیاس مناسب و دخالت دادن برخی از مشخصه‌های مؤثر از جمله ترکیب عوامل سرعت باد، شیب و شدت بارندگی است. شناسایی دقیق عوامل مؤثر و تأثیرگذار می‌تواند اطلاعات جامعی در راستای مدل‌سازی جامع فرآیندهای فرسایش خاک و نیز حفاظت و مدیریت از حوزه‌های آبخیز در اختیار متخصصین، مدیران و مسئولین اجرایی قرار دهد.

منابع

1. Arabkhedri, M., Shadfar, S., Jafari-Ardakani, A., Bayat, R., Khajavi, E., Mahdian, M. H. 2018. Improving Water Erosion Estimates for Iran. Watershed Management Research, 120:14-27. (In Persian)
2. Babakhani, S., & Karimzadeh, H. R. (2013). Application of Steel Slag for Stabilizing Erodible Soils (Case study: Harand Area). Desert Management, 1(2), 1-12. (In Persian)
3. Baumgart, P., Eltner, A., Domula, A. R., Barkleit, A., Faust, D. 2017. Scale dependent soil erosion dynamics in a fragile loess landscape. Zeitschrift für Geomorphologie, 61(3): 191-206.
4. Blocken, B., Poesen, J., Carmeliet, J. 2006. Impact of wind on the spatial distribution of rain over micro-scale topography: numerical modelling and experimental verification. Hydrological Processes: An International Journal, 20(2): 345-368.
5. Bullard, J.E., Livingstone, I., 2002. Interactions between aeolian and fluvial systems in dryland environments. Area 34, 8-16.
6. Bullard, J E, McTainsh, G H. 2003. Aeolian-fluvial interactions in dryland environments: examples, concepts and Australia case study. Progress in Physical Geography, 27: 471-501.
7. 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.
8. De Lima, J. L. M. P., Van Dijk, P. M., Spaan, W. P. 1992. Splash-saltation transport under wind-driven rain. Soil Technology, 5(2): 151-166.
9. De Lima, J. L. M. P. Singh, V. P. 2003. Laboratory experiments on the influence of storm movement on overland flow. Physics and Chemistry of

Influence of storm movement on the rainfall-runoff process in impervious areas: laboratory experimentation with buildings of different heights. *Journal of Flood Risk Management*, 7(2): 176–181. DOI: 10.1111/jfr3.12030.

29. Kaiser, A., Neugirg, F., Schindewolf, M., Haas, F., Schmidt, J. 2015. Simulation of rainfall effects on sediment transport on steep slopes in an Alpine catchment, in: *Sediment Dynamics from the Summit to the Sea*. IAHS-AISH Publication. IAHS Press, New Orleans, 43–50.

30. Kheirabadi, H., Mahmoodabadi, M., Jalali, V., 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.

31. Kirkby, M.J., 1978. The Stream Head as a Significant Geomorphic Threshold. Department of Geography, University of Leeds Working Paper, 216p.

32. Knottnerus, D.J.C. 1980. Maatregelen aan bet stuifgevoelig grond-oppervlak ter bestrijding van erosie door wind. *Inst. Voor Bodemvruchtbaarheid*, Nota 92, 15 pp.

33. LAL, R. 1990. Soil erosion in the tropics: principles and management. McGraw-Hill, New York, 580 pp.

34. Lal, R. 1998. Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality: *Criti Review, Plant Science*, 17: 319-464.

35. Li, Y., Zhang, F., Yang, M., Zhang, J., Xie, Y. 2019. Impacts of biochar application rates and particle sizes on runoff and soil loss in small cultivated loess plots under simulated rainfall. *Science of the Total Environment*, 649: 1403-1413.

36. Lyles, L., Disrud, L. A., Woodruff, N.P. 1969. Effects of soil physical properties, rainfall characteristics, and wind velocity on clod disintegration by simulated rainfall. *Soil Science Society of America Journal* 33, 302–306.

37. Mahmoodabadi, M., Rajabpour, H. 2017. Study on the effect of initial soil moisture content on wind erosion rate using a laboratory wind tunnel. *J. of Water and Soil Conservation*, 24(2): 167-183. (In Persian)

Research, 1(1-2): 9-17.

20. Fišter, 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.

21. Fišter, W., Iserloh, T., Ries, J. B., Schmidt, R.G. 2012. A portable wind and rainfall simulator for in situ soil erosion measurements. *Catena*, 91: 72–84.

22. Funk, R., Reuter, H. I., Hoffmann, C., Engel, W., Öttl, D. 2008. Effect of moisture on fine dust emission from tillage operations on agricultural soils. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 33(12): 1851-1863.

23. 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.

24. Gao, Y., Dang, X., Yu, Y., Li, Y., Liu, Y., Wang, J. 2016. Effects of tillage methods on soil carbon and wind erosion. *Land Degradation & Development*, 27(3): 583-591.

25. Hanifehpur, M., Mashhadi, N., Khosravi, H. 2013. The Effect of intensity and duration of drought on wind conditions and wind erosion in agricultural areas (Case study: Damghan area). *Environmental Erosion Research Journal*, 3(2): 65-77. (In Persian)

26. Hong, C., Chenchen, L., Xueyong, Z., Huiru, L., Liqiang K., Bo L., Jifeng L. 2020. Wind erosion rate for vegetated soil cover: A prediction model based on surface shear strength. *Catena*, 187: 104398.

27. Iserloh T., Fišter 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.

28. Isidoro, J. M. G. P. De Lima, J. L. M. P. 2014.

- Iserloh, T., Senciales, J.M., Martínez Murillo, J.F., Ruiz Sinoga, J.D., Seeger, M., Ries, J.B. 2015. Rainfall and human activity impacts on soil losses and rill erosion in vineyards (Ruwer Valley, Germany). *Solid Earth*, 6(3): 823-837.
49. Rodrigo Comino, J., Iserloh, T., Lassu, T., Cerdà, A., Keestra, S.D., Prosdocim, M., Brings, C., Marzen, M., Ramos M.C., Senciales J.M., Ruiz Sinoga J.D., Seeger M., Ries, J.B. 2016. Quantitative comparison of initial soil erosion processes and runoff generation in Spanish and German vineyards. *Science of the Total Environment*. 565: 1165–1174.
50. Sadeghi, S. H. R. 2007. Analysis of the relationship between erosion and soil hydrophobicity. *Papers of 10th Soil Science Congress of Iran, University of Tehran, Karaj*, 10-32. (In Persian)
51. 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.
52. Song, Y., Yan, P., Liu, L. 2006. A review of the research on complex erosion by wind and water. *Journal of Geographical Sciences*, 16(2): 231-241.
53. Tuo, D., Xu, M., Zhao, Y., Gao, L. 2015. Interactions between wind and water erosion change sediment yield and particle distribution under simulated conditions. *Journal of Arid Land*, 7(5): 590-598.
54. 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.
55. Visser, S M, Sterk, G, Ribolzi, O. 2004a. Techniques for simultaneous quantification of wind and water erosion in semi-arid regions. *Journal of Arid Environments*, 59: 699–717.
56. Visser, S. M., Sterk, G., Snepvangers, J. J. 2004b. Spatial variation in wind-blown sediment transport in geomorphic units in northern Burkina Faso using geostatistical mapping. *Geoderma*, 120(1-2), 95-107.
57. Wang, L., Shi, Z. H., Wang, J., Fang, N. F., Wu, G. L., Zhang, H. Y. 2014. Rainfall kinetic energy controlling erosion processes and sediment sorting on
38. Marzen, M., Iserloh, T., De Lima J. L., Fišter W., Ries J. B. 2017. Impact of severe rain storms on soil erosion: Experimental evaluation of wind-driven rain and its implications for natural hazard management. *Science of the Total Environment*, 590: 502-513.
39. Marzen, M., Iserloh, T., Fišter, W., Seeger, M., Rodrigo-Comino, J., Ries, J. B. 2019. On-site water and wind erosion experiments reveal relative impact on total soil erosion. *Geosciences*, 9(11): 478.
40. Montenegro, A. D. A., Abrantes, J. R. C. B., De Lima J. L. M. P., Singh V. P., Santos, T. E. M. 2013. Impact of mulching on soil and water dynamics under intermittent simulated rainfall. *Catena*, 109: 139-149.
41. Nouwakpo, S. K., Williams, C. J., Al-Hamdan, O. Z., Wetz, M. A., Pierson, F., Nearing M. 2016. A review of concentrated flow erosion processes on rangelands: Fundamental understanding and knowledge gaps. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(2): 75-86.
42. Pieri, L., Bittelli, M., Hanuskova, M., Ventura, F., Vicari, A., Pisa, P. R. 2009. Characteristics of eroded sediments from soil under wheat and maize in the North Italian Apennines. *Geoderma*, 154: 20–29.
43. Poreh M., Mechrez E. 1984. The combined effect of wind and topography on rainfall distribution. *Journal of Hydrology*, 72(1-2): 1-23.
44. Qiu, Y., Fu, B J., Wang, Y., 2002. Spatio-temporal variation in soil erosion and its relation to environment factors. *Journal of Soil and Water Conservation*, 16(1): 108-111.
45. Rafahi, H. Gh. 2006. *Water Erosion and Conservation*. University of Tehran Press. 671pp. (In Persian)
46. 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)
47. Rezai 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.
48. Rodrigo Comino, J., Brings, C., Lassu, T.,

61. Zhang, Y. G., Nearing, M. A., Liu, B. Y., Van Pelt, R. S., Stone, J. J., Wei, H., & Scott, R. L. 2011. Comparative rates of wind versus water erosion from a small semiarid watershed in southern Arizona, USA. *Aeolian Research*, 3(2): 197-204.

62. 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(9), 2306-2315.

steep hillslopes: a case study of clay loam soil from the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 512: 168-176.

58. Wei, Y., Wu, X., Xia, J., Zeng, R., Cai, C., Wang, T. 2019. Dynamic study of infiltration rate for soils with varying degrees of degradation by water erosion. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(2): 167-175.

59. Wirtz, S., Iserloh, T., Rock, G., Hansen, R., Marzen M., Seeger, M., Ries, J. B. 2012. Soil erosion on abandoned land in Andalusia: a comparison of interrill-and rill erosion rates. *International Scholarly Research Network ISRN Soil Science*, 1-16.

60. Xu, G., Tang, S., Lu, K., Li, P., Li, Z., Gao, H., Zhao, B. 2015. Runoff and sediment yield under simulated rainfall on sand-covered slopes in a region subject to wind-water erosion. *Environmental Earth Sciences*, 74(3), 2523-2530.



Abstract

Water Erosion Reactivity from Some Climatic FactorsM. Kalehhouei¹, S. H.R Sadeghi*² and A. Khaledi Darvishan³

Received: 2021/06/23 Accepted: 2021/07/24

Water and wind erosion is one of the most important causes of soil loss. Understanding these interactions is essential for estimating soil quality and environmental impacts in areas with both types of soil erosion. Numerous factors affect the occurrence and process of water erosion. In this regard, dynamic climatic factors such as rainfall and wind have the most prominent role. Accordingly, water erosion control will be effective when sufficient knowledge is available about the effective factors. In this regard, the present manuscript has tried to address this issue from a different perspective and discuss the effects of different climatic factors on water erosion by analytically reviewing existing literature. The results of the review showed that among the climatic factors affecting water erosion, the role of rainfall on runoff production and soil loss had been paid more attention, and the role of other variables such as wind on behavioral changes in water erosion has not been considered. While in the presence of wind, the behavior of raindrops is changing and undoubtedly affects the process of water erosion and hydrological components. Changes in droplet diameter, velocity, angle of attack, and kinetic energy of rain can play an essential role in changing water erosion, especially splash erosion. However, accurate identification of effective and influential factors can provide beneficial analysis to experts, managers, and executives for modeling and ultimately proper management of the water erosion process.

Keywords: Evolution of erosion, Hybrid processes, Wind and rain simulation, Wind-Driven Water erosion

1. Ph.D. Student, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University.

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

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