

## تأثیر الگوی توزیع زمانی شدت بارندگی بر رواناب و هدررفت خاک در دامنه‌ای شیب‌دار در منطقه نیمه‌خشک

علیرضا واعظی\*، فرزاد بشارت و فرشته آذری‌فام<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۲/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۵/۲۷)

### چکیده

الگوی توزیع زمانی بارندگی می‌تواند در تولید رواناب و هدررفت خاک طی بارندگی نقش ایفا کند. در این پژوهش چهار الگوی بارندگی یکنواخت، پیش‌افتاده، بینابین و دیرکرده بررسی شدند. مقدار بارندگی در همه الگوهای بارندگی ۲۰ میلی‌متر بود. در الگوی بارندگی یکنواخت، شدت بارندگی (۲۰ میلی‌متر بر ساعت) ثابت بود و در الگوهای بارندگی غیریکنواخت، بیشترین شدت (۴۰ میلی‌متر بر ساعت) در دوره ۱۵ دقیقه اعمال شد. آزمایش‌ها در کرت‌هایی به ابعاد ۶۰ سانتی‌متر در ۸۰ سانتی‌متر در دامنه‌ای با شیب ۹ درصد در سه تکرار انجام گرفت. الگوهای بارندگی در پنج رخداد با فاصله یک هفته بر کرت‌ها اعمال شدند. نتایج نشان داد که تفاوتی معنی‌دار بین الگوهای بارندگی از نظر رواناب و هدررفت خاک وجود دارد ( $p < 0/01$ ). این تفاوت به دلیل تخریب ساختمان خاک سطحی و کاهش نفوذپذیری خاک به‌ویژه در زمان اوج شدت بارندگی (۴۰ میلی‌متر بر ساعت) بود. بیشترین مقدار رواناب در باران دیرکرده (۳/۴۳ میلی‌متر) و بیشترین مقدار هدررفت خاک (۶۱/۴۷ گرم بر مترمربع) در باران بینابین رخ داد که دلیل آن وقوع اوج شدت بارندگی در اواخر بارندگی و نقش مؤثر آن در تخریب بیشتر ساختمان خاک و کاهش شدت نفوذ بود. بررسی تغییرات رواناب و رسوب در رخدادهای بارندگی نشان داد که روند هدررفت خاک در الگوی بارندگی یکنواخت همسو با روند تولید رواناب است؛ درحالی‌که در سایر الگوها تغییرات هدررفت خاک از تغییرات رواناب پیروی نکرد. این نتایج نشان می‌دهد که در الگوهای بارندگی غیریکنواخت، در کنار مقدار تولید رواناب، در دسترس بودن ذرات فرسایش‌پذیر نیز عامل مؤثر در هدررفت خاک است. نتایج این پژوهش ضرورت آگاهی از الگوی توزیع بارندگی و تغییرات رخداد به رخداد آن را برای پیش‌بینی دقیق فرسایش خاک در منطقه نیمه‌خشک آشکار می‌کند.

واژه‌های کلیدی: الگوی بارندگی، باران شبیه‌سازی‌شده، رواناب، کرت فرسایشی، هدررفت خاک

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: vaezi.alireza@gmail.com

## مقدمه

خاک یک منبع طبیعی است که در مقیاس زمانی غیر قابل تجدید است. عاملی که وجود آب و خاک را به خطر می‌اندازد، فرسایش بوده که موجب تخریب این منابع مهم حیات می‌شود (۱۵). فرسایش خاک به‌عنوان عامل اصلی تخریب خاک روی سطح کره زمین شناخته می‌شود که به‌صورت یک فرایند خودبه‌خودی رخ داده و توسط فعالیت‌های انسان نیز تسریع می‌شود (۱۴). فرسایش آبی یکی از انواع فرسایش خاک است که شامل فرایندهای جداسازی، انتقال و رسوب ذرات خاک توسط بارندگی و رواناب است (۱۹). در دهه‌های اخیر فرسایش خاک توسط آب به‌واسطه تغییر اقلیم و کاهش شدید منابع طبیعی به یک مشکل جهانی تبدیل شده است. فعالیت‌های انسان در طبیعت مانند تغییر کاربری زمین، قطع درختان، چرای بی‌رویه، روش‌های نامناسب کشاورزی و فعالیت‌های عمرانی، فرسایش خاک را تشدید می‌کنند (۱۸).

از عوامل مهم مؤثر بر فرسایش خاک می‌توان به اقلیم، ویژگی‌های خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و نحوه مدیریت اراضی اشاره کرد (۱۷). در بررسی عامل اقلیمی، میانگین بارش، شدت بارندگی، نوع بارش و توزیع فصلی بارش‌ها نقش مهمی در فرسایش خاک دارند. مقدار بارندگی، شدت بارندگی، نوع بارش‌ها، مدت و سایر خصوصیات آن با فرسایش خاک همبستگی زیادی دارند (۳۰). بارندگی‌های با شدت زیاد و مدت طولانی معمولاً رواناب بیشتری ایجاد می‌کنند و فرسایش خاک تحت تأثیر تغییرات زمانی بارندگی و شرایط شیب است (۲۴).

یکی از ویژگی‌های مهم بارندگی که در مقدار و نوع فرسایش خاک مؤثر است، توزیع زمانی شدت بارندگی (Temporal distribution of rainfall intensity) است. توزیع زمانی بارندگی عبارت از تغییرات مقدار بارش در دوره‌های مختلف زمانی طی بارندگی است (۲۸). این موضوع نشان می‌دهد که حتی باران‌هایی که از نظر شاخص‌های فرسایندهایی یکسان هستند، ممکن است باعث فرسایش متفاوتی شوند. شدت بارندگی طی مدت بارندگی به‌دلیل تغییرات شرایط جوی تغییر

می‌کند. در برخی از بارندگی‌ها بیشینه شدت باران در اوایل بارندگی رخ می‌دهد (باران پیش‌افتاده)؛ درحالی‌که ممکن است برای برخی دیگر در اواسط مدت بارندگی (باران بینابینی) و یا مراحل پایانی آن (باران دیرکرده) حادث شود. به عقیده هارولد، باران‌های دیرکرده بیشترین رواناب و فرسایش خاک را به همراه دارند (۲۶). بر خلاف این موضوع، در برخی پژوهش‌ها بررسی اثر الگوی بارش بر تغییرات زمان شروع رواناب و مقدار آن نشان داد که باران‌های دیرکرده، دیرترین زمان وقوع رواناب و کمترین حجم رواناب را دارند؛ درحالی‌که باران‌های پیش‌افتاده، بیشترین حجم و ضریب رواناب را دارند (۶). همچنین بررسی اثر چهار الگوی بارندگی با شدت‌های مختلف در طول بارندگی (باران پیش‌افتاده، دیرکرده، بینابین و یکنواخت) بر رواناب و فرسایش ناشی از آن در خاکی با بافت شنی نشان داد که مقدار رواناب و خاک هدررفته در باران‌های بینابین بیشترین بوده است (۱). یافته‌ها در باران‌های منطقه نیمه‌خشک نشان داد که در شرایطی که دوره زمانی اوج بارندگی کوتاه (ده دقیقه) باشد، بیشترین رواناب و فرسایش خاک در رگبارهای بینابین رخ می‌دهد (۳).

فرسایش خاک از عوامل اصلی پسرفت خاک در مناطق نیمه‌خشک است. این مناطق که از بارندگی میان ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌متر در سال برخوردارند، حدود ۲۰ درصد از سطح کره زمین و حدود ۲۷ درصد از ایران را پوشش می‌دهند (۱۰). در این نواحی پراکنش بارندگی طی سال بیشتر غیریکنواخت است و فصل‌های تر و خشک طی سال نمایان می‌شود. از این رو پوشش گیاهی دائمی و پایدار به وجود نمی‌آید و بیشتر علف‌های یکساله و مراتع ضعیف در این مناطق وجود دارند. تغییر کاربری مراتع ضعیف به کشتزارهای دیم و از بین رفتن پوشش گیاهی طبیعی، خاک را در معرض فرایندهای فرسایشی قرار می‌دهد و شدت فرسایش آبی را زیاد می‌کند (۲). ویژگی‌های بارندگی در کنار سایر عوامل مؤثر بر فرسایش آبی، نقش اساسی در تغییرات رواناب و فرسایش خاک در کشتزارهای دیم ایفا می‌کند. در پژوهش‌های مختلف به نقش ویژگی‌های بارندگی در رواناب و هدررفت خاک در مناطق

توزیع اندازه ذرات به روش هیدرومتری اندازه‌گیری شد (۴). در نمونه خاک طبیعی، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در دو حالت خشک و تر توسط الک‌های ۲، ۴، ۶ و ۸ میلی‌متر تعیین شدند (۱۱). هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از روش بار ثابت اندازه‌گیری شد (۷). برای اندازه‌گیری درصد سنگ‌ریزه، الک‌های ۲ و ۸ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفتند. چگالی ظاهری خاک به روش سیلندر فلزی پیش از اعمال باران‌های شبیه‌سازی شده اندازه‌گیری شد (۷). برای اندازه‌گیری pH خاک ابتدا گل اشباع خاک تهیه شد و سپس به وسیله دستگاه pH سنج قرائت شد. ماده آلی با روش والکی و بلاک اندازه‌گیری شد (۲۰). همچنین برای اندازه‌گیری EC خاک، از عصاره گل اشباع استفاده شد و مقدار EC به وسیله دستگاه EC سنج قرائت شد (۲۳). برای اندازه‌گیری گچ از روش استون استفاده شد (۲۷). ظرفیت تبادل کاتیونی با استفاده از روش باور اندازه‌گیری شد (۲۱). درصد سدیم تبدلی به وسیله روابط تجربی بر اساس نسبت سدیم تبدلی (ESR) محاسبه شد.

### شبیه‌سازی الگوهای بارندگی

برای شبیه‌سازی دقیق باران، باران‌های منطقه مورد تحلیل قرار گرفتند. برای این منظور، گراف‌های باران‌نگار برای باران‌های رخ داده در طول ۱۰ سال آماری در ایستگاه قلتوق واقع در غرب استان بررسی شدند. طی این دوره، مدت باران‌ها از ۱۰ دقیقه تا سه ساعت متغیر بود. گروه‌بندی آماری باران‌های منطقه نشان داد که باران‌های با شدت بیشینه ۱۰ میلی‌متر بر ساعت از بیشترین فراوانی وقوع برخوردارند؛ درحالی‌که باران‌های با شدت بیشتر از ۴۰ میلی‌متر بر ساعت کمترین فراوانی وقوع را دارند. براین اساس چهار الگوی توزیع زمانی بارندگی شامل یکنواخت و غیریکنواخت (پیش‌افتاده، بینابین و دیرکرده) انتخاب شدند. در الگوی بارندگی یکنواخت، شدت بارندگی (۲۰ میلی‌متر بر ساعت) ثابت بود و در الگوهای بارندگی غیریکنواخت، بیشترین شدت بارندگی (۴۰ میلی‌متر بر ساعت) در دوره زمانی ۱۵ دقیقه طی مدت بارندگی اعمال شد. در همه

نیمه‌خشک پرداخته شده است (۸، ۹ و ۲۵). با این وجود اطلاعات در مورد تأثیر الگوی تغییرات زمانی بارندگی بر رواناب و هدررفت خاک بسیار محدود است. بررسی این موضوع برای تعیین دقیق فرسایندها باران و پیش‌بینی دقیق هدررفت خاک طی بارندگی سودمند است. از این رو این پژوهش با هدف بررسی اثر الگوهای مختلف توزیع زمانی شدت بارندگی بر تولید رواناب در منطقه نیمه‌خشک انجام گرفت.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در دامنه‌ای با شیب ۹ درصد و با خاک دست‌نخورده واقع در اراضی مرتعی در زنجان با مختصات جغرافیایی "۲۵' ۴۸' ۲۴" طول شرقی و "۵۶' ۳۶' ۴۰" عرض شمالی اجرا شد. آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی در چهار تیمار توزیع زمانی شدت بارندگی در سه تکرار با پنج رخداده بارندگی در مجموع با ۶۰ آزمایش شبیه‌سازی باران انجام شد. پیش از انجام پژوهش، زمین توسط دستگاه پنجه‌غازی به صورت سطحی در جهت عمود بر شیب شخم خورد و پوشش گیاهی پراکنده موجود در زمین حذف شد. به دلیل وجود ناهمواری‌ها روی زمین، زمین با استفاده از دستگاه تسطیح‌کن یکنواخت شد. سپس ۱۲ کرت به ابعاد ۶۰ سانتی‌متر در ۸۰ سانتی‌متر در امتداد شیب روی زمین ایجاد شدند. آزمایش‌های شبیه‌سازی باران روی کرت‌ها از اواخر فصل بهار تا اواخر تابستان که احتمال وقوع بارندگی بسیار اندک بود، انجام گرفت تا کمترین تأثیر باران‌های طبیعی روی نتایج اتفاق بیافتد.

#### اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک

برای آگاهی از ویژگی‌های خاک دامنه، حدود دو کیلوگرم خاک از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری در سه نقطه از زمین مورد آزمایش برداشته شد. نمونه‌ها پس از گذراندن از الک ۲ میلی‌متری برای انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه انتقال داده شدند. در نمونه‌های دست‌خورده خاک،

تجزیه و تحلیل داده‌ها شد. تفاوت در تولید رواناب و هدررفت خاک در کرت‌ها و همچنین تأثیر توزیع زمانی شدت بارندگی در تیمارها با استفاده از آزمون مقایسه میانگین توکی بررسی شد. تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۸ انجام شد.

## نتایج و بحث

### ویژگی‌های خاک دامنه

نتایج ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دامنه مورد بررسی در جدول ۲ ارائه شده‌است. باتوجه به درصد نسبی ذرات شن (۶۵/۵ درصد)، سیلت (۱۵/۱ درصد) و رس (۱۹/۴ درصد)، بافت خاک مورد بررسی لوم شنی بود. خاک دامنه از نظر هدایت الکتریکی به نسبت شور (۲/۸۴ دسی‌زیمنس بر متر) و از نظر واکنش، تقریباً خنثی (۷/۲۶) بود. همچنین باتوجه به درصد گچ (۱۲/۶۶ درصد) و آهک (۱۱/۴۶ درصد) می‌توان خاک را جزء خاک‌های گچی و آهکی طبقه‌بندی کرد. مقدار ماده آلی خاک به نسبت کم (۰/۹۳ درصد) و پایداری خاکدانه‌ها نیز به نسبت کم (۳/۱۱ میلی‌متر) بود. چگالی ظاهری تقریباً متوسط بود (۱/۴۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب). ظرفیت تبادل کاتیونی (۱۲/۸۶ سانتی‌مول بار بر کیلوگرم) و درصد سدیم تبدلی (۳/۰۶ درصد) تقریباً کم بود. این نتیجه نشان می‌دهد که سدیم تبدلی عامل محدود کننده پایداری خاکدانه‌ها نیست؛ بلکه کمبود ماده آلی خاک ضعف اساسی در تشکیل و پایداری خاکدانه‌ها در خاک‌های منطقه نیمه‌خشک است.

### تغییرات رواناب و هدررفت خاک در الگوهای بارندگی

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، زمان آغاز رواناب، مقدار رواناب و هدررفت خاک بین الگوهای توزیع زمانی بارندگی متفاوت بود. آغاز رواناب در رگبار پیش‌افتاده سریع‌تر (در ۱/۸ دقیقه) و در رگبار دیرکرده، دیرتر (۱۶/۳ دقیقه) اتفاق افتاد. تغییرات زمان آغاز رواناب در الگوهای مختلف بارندگی به دلیل چگونگی توزیع زمانی شدت بارندگی طی مدت بارندگی بود و این تفاوت

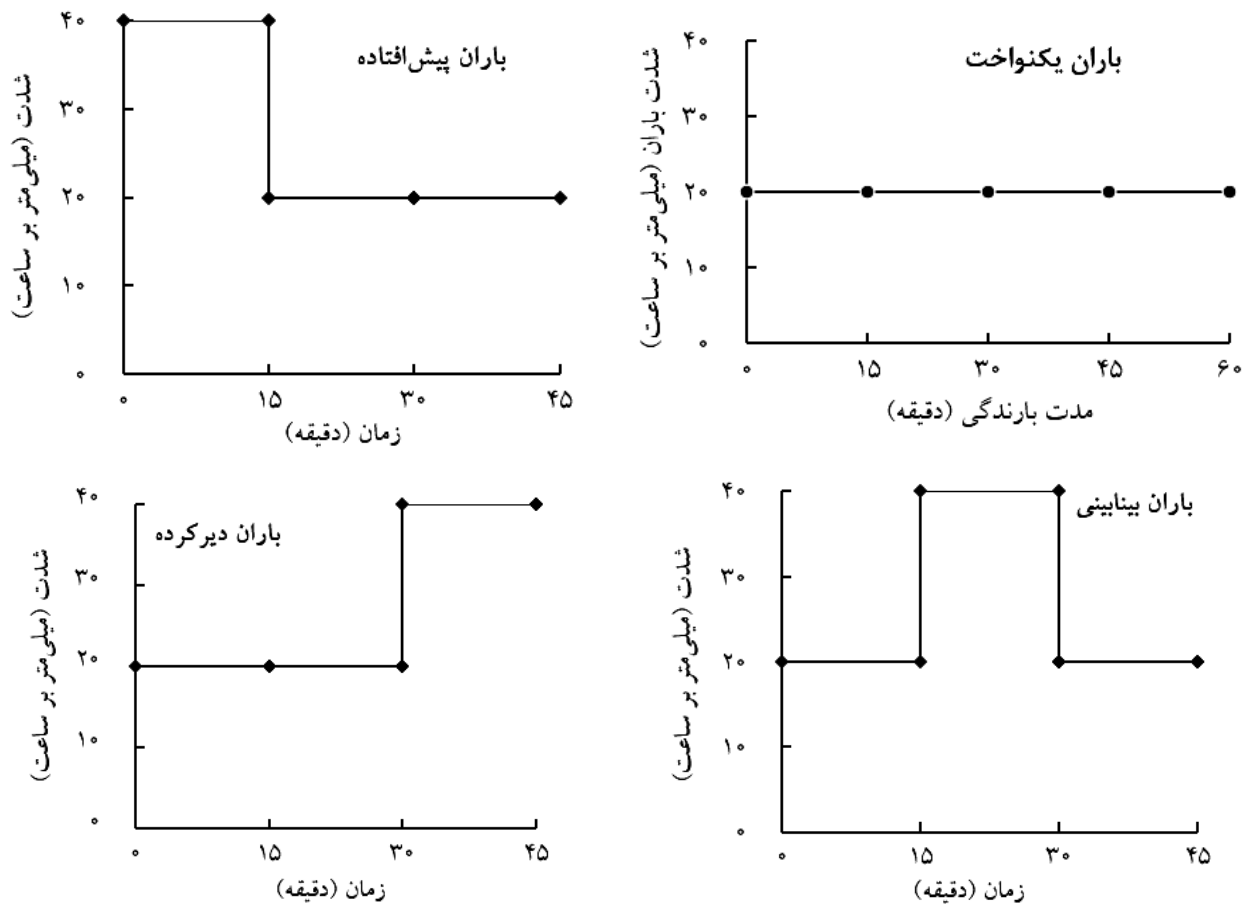
الگوهای بارندگی، مقدار بارندگی یکسان و برابر با ۲۰ میلی‌متر بود. براین اساس، تداوم بارندگی در الگوهای بارندگی غیریکنواخت، ۴۵ دقیقه و در الگوی بارندگی یکنواخت، ۶۰ دقیقه بود (شکل ۱). برای اعمال این باران‌ها یک دستگاه شبیه‌ساز باران متناسب با شدت‌های معمول باران استان زنجان طراحی و ساخته شد. باتوجه به وجود توزیع زمانی بارندگی در باران‌های با شدت غیریکنواخت (تغییر شدت بارندگی طی مدت بارندگی)، فرساینده‌های باران در آن‌ها متفاوت از الگوی بارندگی یکنواخت بود. در الگوهای بارندگی غیریکنواخت که تداوم یکسان شدت اوج را دارا بودند (۱۵ دقیقه)، بیشینه شدت باران ۳۰ دقیقه‌ای (۴۰ میلی‌متر بر ساعت) برابر بود؛ در نتیجه در این الگوها، فرساینده‌های باران (EI<sub>30</sub>) برابر بود (جدول ۱). باتوجه به دشواری‌های آزمایش‌های صحرائی از نظر پیاده‌سازی کرت‌های فرسایشی و حفظ آن‌ها در دوره مطالعاتی و نیز سختی‌های استقرار دستگاه شبیه‌ساز باران، رخدادهای بارندگی با فاصله هفت روز روی کرت‌ها طی فصل تابستان اعمال شدند.

### اندازه‌گیری رواناب و هدررفت خاک

برای اندازه‌گیری رواناب در هر رخداد باران شبیه‌سازی شده، از یک ظرف پلاستیکی مدرج ۱۰ لیتری استفاده شد (شکل ۲). همچنین به منظور حذف اثر تغییرات رطوبت اولیه خاک بر تولید رواناب و فرسایش خاک در کرت‌ها، ۴۸ ساعت پیش از اعمال باران شبیه‌سازی شده، خاک کرت‌ها با حدود ۱۵ لیتر آب به حالت اشباع درآمدند. زمان شروع رواناب توسط یک زمان‌سنج دستی با مشاهده رسیدن رواناب به نقطه خروجی کرت‌ها ثبت شد.

### تحلیل آماری داده‌ها

داده‌های آزمایش‌ها (رواناب و هدررفت خاک) پیش از تجزیه و تحلیل آماری به روش چولگی و کشیدگی از نظر توزیع نرمال بودن مورد بررسی قرار گرفتند و داده‌های غیرنرمال با تبدیل با توابع ریشه دوم و لگاریتم، نرمال شدند. سپس اقدام به



شکل ۱. توزیع زمانی شدت بارندگی در الگوهای باران مورد بررسی

جدول ۱. مقدار فرسایندهای باران در الگوهای باران مورد بررسی (یکنواخت و غیریکنواخت)

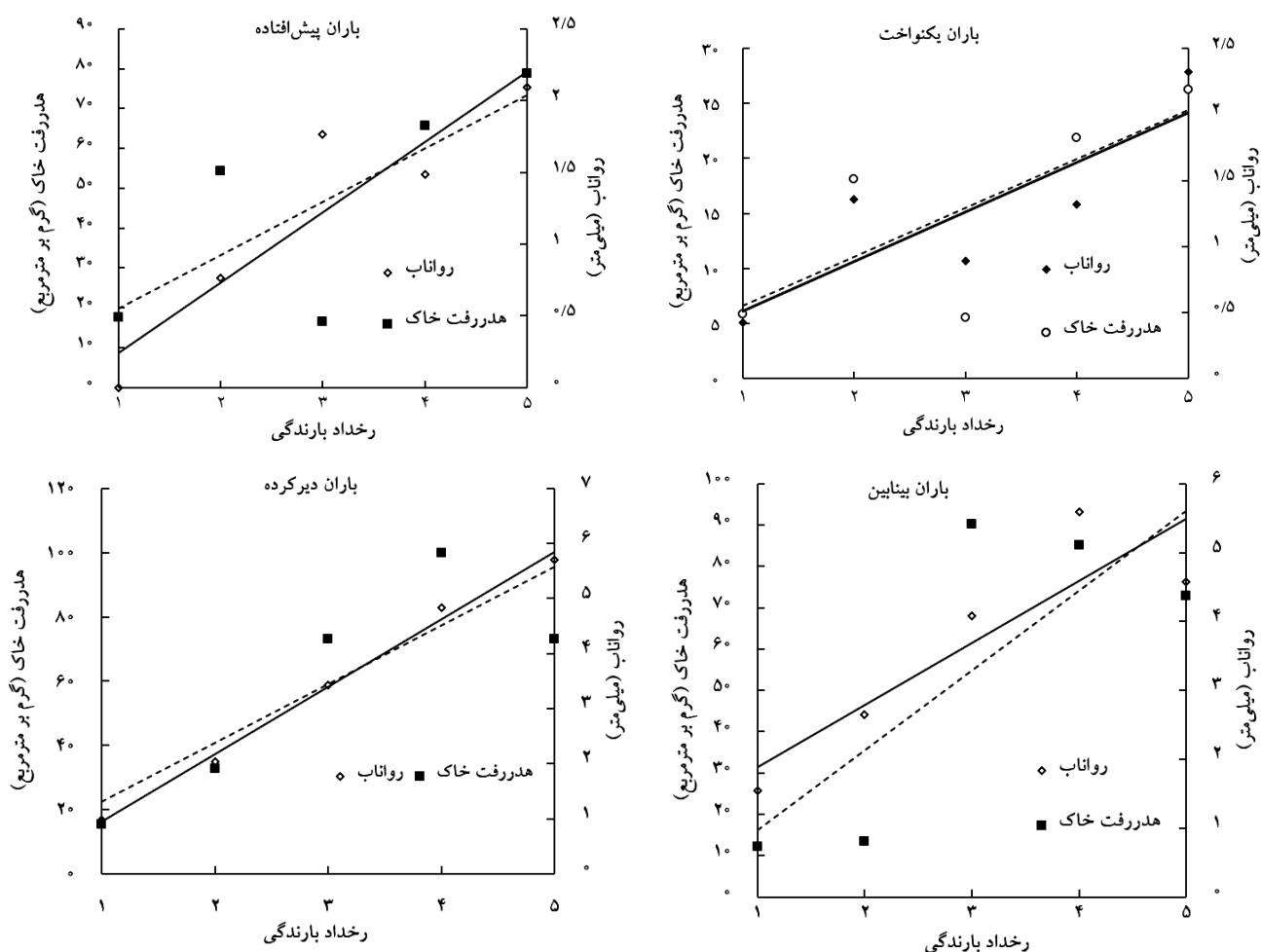
$EI_{30}$ (MJ.mm/ha.hr)	$I_{30}$ (mm/h)	E (J/m <sup>2</sup> )	نوع الگوی توزیع زمانی بارندگی
۳۱/۴۹	۲۰	۱۵۷/۴۷	الگوی یکنواخت
۵۳/۹۲	۳۰	۱۷۹/۷۱	الگوی با تداوم شدت اوج ۱۵ دقیقه



شکل ۲. نمایی از کرت‌های ایجاد شده روی دامنه با شیب ۹ درصد

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دامنه مورد بررسی

ویژگی خاک	مقدار
شن (%)	۶۵/۵
سیلت (%)	۱۵/۱
رس (%)	۱۹/۴
سنگ‌ریزه (%)	۱۰/۷
چگالی ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب)	۱/۴۷
هدایت هیدرولیکی (سانتی متر بر ساعت)	۳/۰۴
میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت تر (میلی متر)	۳/۱۱
واکنش	۷/۲۶
ماده آلی (%)	۰/۹۳
هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	۲/۸۴
درصد سدیم تبادلی	۳/۰۶
آهک (%)	۱۱/۴۶
گچ (%)	۱۲/۶۶

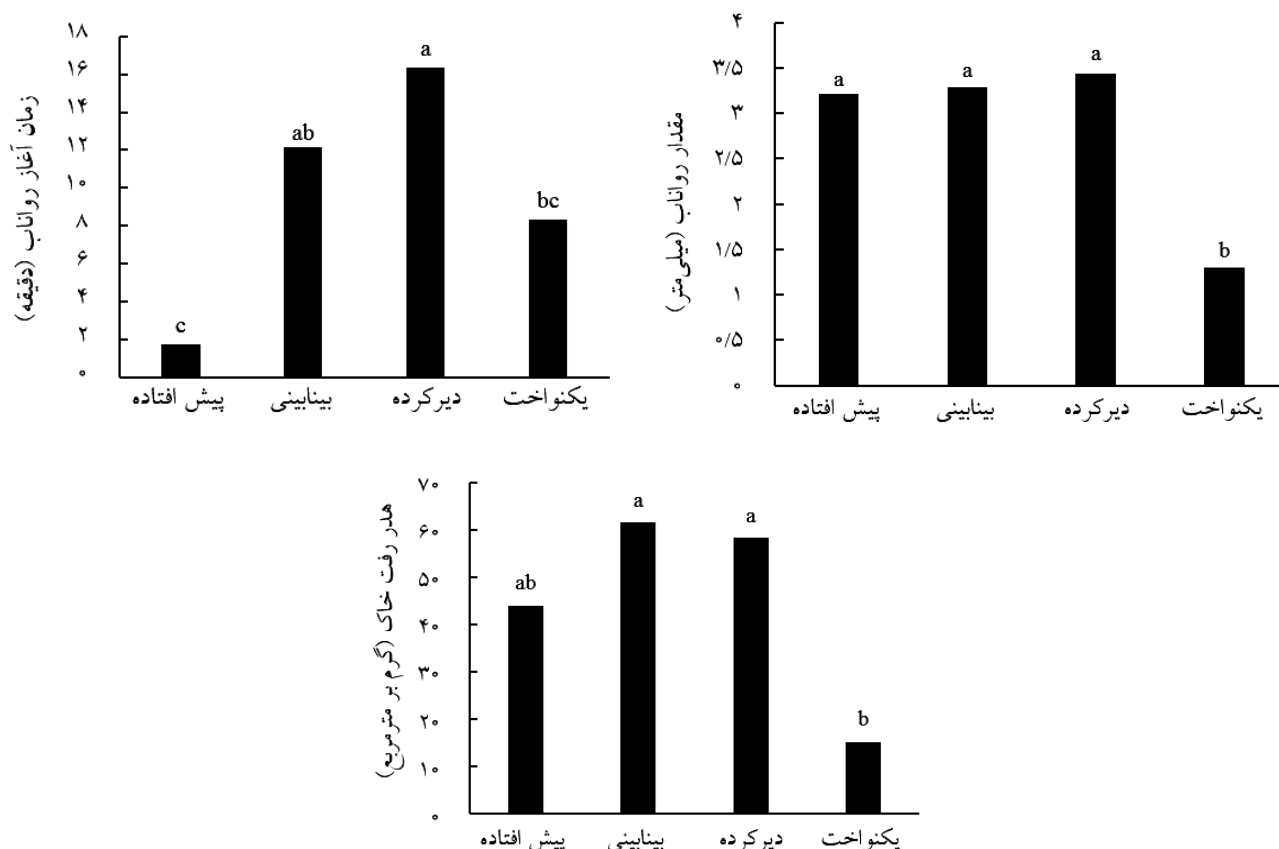


شکل ۳. تغییرات رواناب در الگوهای باران مورد بررسی طی پنج رخداد بارندگی (ادامه)

باران بینابین و دیرکرده، به دلیل شدت کم باران در آغازین زمان بارندگی، آب به سرعت در خاک خشک نفوذ می‌یابد. در این باران‌ها تخریب ساختمان خاک در اثر ضربه قطرات باران در اواسط و اواخر مدت بارندگی به بیشترین مقدار می‌رسد. در این زمان، نفوذپذیری خاک به علت افزایش محتوای رطوبتی خاک و در نتیجه کاهش شیب هیدرولیکی از یک سو و حرکت ذرات ریز خاک به داخل منافذ درشت و در نتیجه کاهش تخلخل درشت خاک از سوی دیگر کاهش می‌یابد (۱۲)؛ بنابراین در اثر کاهش نفوذ آب به خاک در زمان اوج شدت بارندگی (انتهای مدت بارندگی)، حجم رواناب روی سطح خاک افزایش یافت و به دنبال آن هدررفت خاک نیز بیشتر می‌شود (۱۶). افزایش جزئی هدررفت خاک در باران بینابین در مقایسه با باران دیرکرده به این دلیل بود که وقوع شدت اوج در اواسط مدت بارندگی، ساختمان خاک سطحی را به اندازه کافی تخریب کرد و ذرات حساس بیشتری را روی سطح خاک فراهم آورد و در ادامه بارندگی، مدت کافی برای انتقال این ذرات حساس وجود داشت. برخلاف نتایج این پژوهش، بشارت و واعظی با بررسی اثر الگوهای بارندگی رایج منطقه بر رواناب و هدررفت خاک نشان دادند که مقدار رواناب و هدررفت خاک در باران‌های پیش‌افتاده به مراتب بیشتر از باران دیرکرده بود (۳). به نظر می‌رسد مدت زمانی اوج شدت بارندگی دلیل اصلی تفاوت نتایج پژوهش یادشده با یافته‌های این پژوهش است. هم راستا با یافته‌های پژوهش حاضر، بررسی‌های Ran و همکاران نیز نشان داد که کمترین رواناب و رسوب در الگوی باران یکنواخت و بیشترین مقدار در الگوی بارندگی بینابینی صورت می‌گیرد (۲۲). علت این امر تأثیر شدیدتر ضربه قطرات باران طی مدت وقوع شدت اوج بارندگی بر سطح خاک بود که منجر به تخریب شدیدتر ساختمان خاک و افزایش رطوبت خاک و در نتیجه افزایش تولید رواناب و هدررفت خاک شد. Liu و همکاران هم با تحلیل ۵۴ رویداد بارندگی الگوهای آن طی سه سال در فلات لس‌چین نشان دادند

در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار بود. در الگوی باران پیش‌افتاده به علت شدت زیاد باران در ابتدای بارندگی (۴۰ میلی‌متر بر ساعت) و نبود فرصت کافی برای نفوذ آب به خاک، زمان آغاز رواناب کوتاه‌تر از سایر الگوهای باران بود. برخلاف باران پیش‌افتاده، در باران دیرکرده به دلیل شدت کم باران در ابتدای بارندگی، زمان کافی برای نفوذ آب در خاک وجود داشت. در پژوهشی ژائو و همکاران بیان کردند که زمان آغاز رواناب تحت تأثیر شدت بارندگی، رطوبت اولیه و مدت بارندگی است و با افزایش شدت بارندگی کاهش می‌یابد. آن‌ها همچنین بیان کردند که در شدت‌های کم بارندگی برای تخریب لایه سطحی و نفوذ آب به خاک، زمان بیشتری نیاز است که باعث تأخیر در تولید رواناب می‌شود (۳۱).

بررسی میانگین مقدار تولید رواناب در الگوهای بارندگی نشان داد که مقدار رواناب در باران یکنواخت بسیار کمتر از الگوهای بارندگی غیریکنواخت بود. تفاوت‌های تولید رواناب بین الگوهای بارندگی از نظر آماری معنی‌دار بود ( $p < 0/01$ ). مقدار رواناب از ۱/۲۹ میلی‌متر در الگوی باران یکنواخت تا ۳/۴۸ میلی‌متر در الگوی باران دیرکرده متغیر بود (شکل ۴). دلیل تفاوت از نظر رواناب در الگوهای مختلف بارندگی، چگونگی توزیع زمانی شدت اوج بارندگی طی مدت بارندگی بود. برخلاف رواناب، نوسانات زیادی از نظر هدررفت خاک بین الگوهای مختلف بارندگی دیده شد. تفاوت‌های هدررفت خاک میان الگوهای بارندگی از نظر آماری معنی‌دار بود ( $p < 0/01$ ). هدررفت خاک در الگوهای بارندگی از ۴۳/۹۸ گرم بر مترمربع در باران پیش‌افتاده تا ۶۱/۴۸ گرم بر مترمربع در باران بینابین تغییر یافت. اگرچه بیشترین مقدار رواناب در باران دیرکرده رخ داد، اما بیشترین مقدار هدررفت خاک در باران بینابین مشاهده شد که این نتایج با یافته‌های علوی‌نیا و همکاران در خاک‌های شنی همسو بود (۱). به هر حال تفاوت‌های معنی‌دار بین الگوهای مختلف بارندگی غیریکنواخت (پیش‌افتاده، بینابین و دیرکرده) از نظر هدررفت خاک وجود نداشت. در الگوهای



شکل ۴. مقایسه‌های میانگین بین الگوهای باران از نظر زمان آغاز رواناب، مقدار رواناب و هدررفت خاک

مسدود شدند و بدین صورت تخلخل درشت خاک کاهش یافت که باعث کاهش نفوذ آب به خاک و افزایش تولید رواناب در رخداد بعدی شد. بررسی هدررفت خاک از رخداد اول تا رخداد پنجم نیز نشان داد که به‌طور کلی روند افزایشی در هدررفت خاک از رخدادی به رخداد دیگر وجود دارد. در الگوی بارندگی یکنواخت، افزایش قابل توجهی در هدررفت خاک از رخدادی به رخداد دیگر وجود داشت؛ درحالی‌که در الگوهای بارندگی غیریکنواخت، نوساناتی در هدررفت خاک در رخداد سوم تا رخداد پنجم وجود داشت؛ به‌طوری‌که حتی در الگوهای بارندگی بینابینی و دیرکرده، هدررفت خاک در رخدادهای پایانی کاهش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که روند هدررفت خاک از رخدادی به رخداد دیگر به جز در الگوی بارندگی یکنواخت، در سایر الگوهای بارندگی همسو با تولید رواناب نیست. واعظی و همکاران با بررسی کارایی

که الگوی باران بینابین بیشترین درصد رسوب را به دنبال داشت (۱۳). فتاح و همکاران نیز با بررسی اثر الگوی رگبار بر تولید رسوب در حوزه آبخیز نشان دادند که بیشترین مقدر رسوب در الگوهای باران دیرکرده تولید می‌شود (۵).

#### تغییرات رواناب در رخدادهای بارندگی

تولید رواناب در پنج رخداد بارندگی مشابه که به فاصله هفت روز بر کرت‌ها اعمال شدند، بررسی شد (شکل ۳). نتایج نشان داد از رخدادی به رخداد دیگر بارندگی، مقدار رواناب تولیدشده در همه الگوها روند افزایشی داشت که این موضوع ناشی از افزایش محتوای رطوبتی خاک از یک سو و افزایش تولید ذرات فرسایش‌پذیر در هر رخداد به‌دلیل تخریب ساختمان خاک از سوی دیگر بود. همچنین در اثر تخریب خاکدانه‌ها و وقوع پاشمان ذرات خاک، منافذ درشت خاک



دیرکرده، رواناب دیرتر به وقوع پیوست. بیشترین مقدار رواناب و هدررفت خاک به ترتیب در باران‌های دیرکرده و بینابین اتفاق افتاد. در الگوی باران دیرکرده به دلیل افزایش شدت بارندگی در اواخر مدت بارندگی، ساختمان خاک سطحی بیشتر تخریب شد و در نتیجه شدت نفوذ آب باران به خاک نیز به دلیل افت شیب هیدرولیکی خاک طی بارندگی، کاهش یافت و تولید رواناب روی سطح خاک افزایش یافت. بیشترین مقدار هدررفت خاک در باران بینابین اتفاق افتاد. با این وجود تفاوتی بین آن و باران دیرکرده وجود نداشت. افزایش جزئی هدررفت خاک در باران بینابین نسبت به باران دیرکرده به این دلیل بود که با وقوع شدت اوج در دوره میانی مدت بارندگی، ساختمان خاک سطحی تخریب شد و ذرات حساس بیشتری روی سطح خاک تولید شد و در ادامه بارندگی، زمان کافی وجود داشت تا ذرات حساس توسط رواناب انتقال یابند. همچنین بررسی تغییرات رواناب و رسوب در پنج رخداد بارندگی نشان داد که روند هدررفت خاک از رخدادی به رخداد دیگر تنها در الگوی بارندگی یکنواخت، همسو با تولید رواناب بود. این نتیجه نشان می‌دهد که در باران یکنواخت، به دلیل افزایش تولید رواناب طی بارندگی، انتقال ذرات توسط جریان و در نتیجه هدررفت خاک افزایش می‌یابد. در الگوهای بارندگی غیریکنواخت، غیر از عامل رواناب، میزان در دسترس بودن ذرات انتقال‌پذیر نیز در مقدار هدررفت خاک مؤثر است. به طور کلی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که الگوی زمانی توزیع شدت بارندگی نقشی اساسی در تولید رواناب و هدررفت خاک طی بارندگی دارد. همچنین این عامل موجب می‌شود روند هدررفت خاک از رخدادی به رخداد دیگر باران با روند تولید رواناب همسو نباشد. از این رو توجه به تغییرات شدت بارندگی طی مدت بارندگی در بررسی فرسایش باران و پیش‌بینی هدررفت خاک در منطقه نیمه‌خشک دارای اهمیت است.

پلی وینیل استات در کاهش رواناب و رسوب در یک خاک ماری مشاهده کردند که در پنج رخداد بارندگی یکسان، مقدار رواناب و هدررفت خاک از رخداد اول تا چهارم افزایش یافتند. دلیل افزایش تولید رواناب و هدررفت خاک از رخداد اول تا چهارم، تخریب و تراکم خاک در رخداد‌های بارندگی و در نتیجه کاهش نفوذ و افزایش رواناب گزارش شد (۲۹). همچنین به دلیل انتقال ذرات ریز و سست تا رخداد چهارم و کاهش ذرات قابل انتقال، هدررفت خاک در رخداد پنجم کاهش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که همسو بودن هدررفت خاک با تولید رواناب در باران یکنواخت به دلیل اثرپذیری مستقیم هدررفت خاک از تولید رواناب است. در این نوع بارندگی به دلیل ضعف تولید رواناب و مقدار پایین تنش برشی جریان، اندک بود و در اواخر بارندگی به دنبال تولید رواناب زیاد، به بیشترین مقدار رسید. ناهمسو بودن هدررفت خاک با تولید رواناب در الگوهای دیگر بارندگی (غیریکنواخت) نشان می‌دهد که تنها عامل رواناب در هدررفت خاک در چنین باران‌هایی نقش ندارد؛ بلکه در دسترس بودن ذرات انتقال‌پذیر نیز در مقدار هدررفت خاک مؤثر است. در چنین الگوهای، به دلیل انتقال بیشتر ذرات فرسایش‌پذیر در رخداد‌های بارندگی اولیه (اول تا سوم)، در دسترس بودن ذرات فرسایش‌پذیر در رخداد چهارم و پنجم اندک بود و این موجب شد مقدار هدررفت خاک همسو با تولید رواناب در این رخداد‌های بارندگی نباشد.

### نتیجه‌گیری

این مطالعه نشان داد که زمان آغاز رواناب، مقدار رواناب و هدررفت خاک در منطقه نیمه‌خشک تحت تأثیر الگوی زمانی بارندگی (پیش‌افتاده، بینابین و دیرکرده) است. کوتاه‌ترین زمان آغاز رواناب در باران پیش‌افتاده بود؛ در حالی که در باران

## منابع مورد استفاده

- Alavinia, M., F. N. Saleh and H. Asadi. 2019. Effects of rainfall patterns on runoff and rainfall-induced erosion. *International Journal of Sediment Research* 34(3), 270-278.
- Azartaj, E., A. Rasoulzadeh and A. Asgari. 2018. Investigation of land use change effect on runoff and soil erosion using rainfall simulation in Heiran area, Ardabil. *Watershed Engineering and Management* 10(1): 1-13 (in Farsi).
- Besharat, F. and A.R Vaezi. 2015. Rainfall during Events on Runoff and Soil Loss under Simulated Rainfalls. *Journal of Iran-Watershed Management Science and Engineering* 9 (29) :9-18 (in Farsi).
- Bouyoucos, G. J. 1962. Hydromrter method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal* 54(5): 464- 466.
- Fattah, P., K. hoseini and S.A.A. Hashemi. 2023. Investigation of the effects of storm pattern and area characteristics on sediment yield of the watershed. *Watershed Engineering and Management* 15(2): 264-280 (in Farsi).
- Gholami, L., A. Kavian, A. Khaledi Darvishan, A. Alipour and Z. Besarand. 2018. The effect of rainfall pattern on changes of time to runoff and runoff coefficient at plot scale. *Watershed Engineering and Management* 10(4): 516-528 (in Farsi).
- Hazelton, P. and B. Murphy. 2007. Interpreting soil test results. CSIRO publishing, Australia.
- Hu, C., G. Ran, G. Li, Y. Yu, Q. Wu, D. Yan. and S. Jian. 2021. The effects of rainfall characteristics and land use and cover change on runoff in the Yellow River basin, China. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 69(1): 29-40.
- Jabbary Z.A., M. Mohammadi Ghaleni, M. Moghaddasi and H. Dehban. 2022. The effect of slope and rainfall intensity on runoff and soil erosion using a rainfall simulator. *Journal of Environmental Erosion Research Hormozgan University* 12 (1) :113-128 (in Farsi).
- Kalankesh, L.R., S. Rodriguez-Couto, A. Alami, S. Khosravan, M. Meshki, E. Ahmadov, A. Mohammadpour and N. Bahri. 2022. Socio-Environmental Determinants and Human Health Exposures in Arid and Semi-Arid Zones of Iran—Narrative Review. *Environmental Health Insights* 16: 11786302221089738.
- Kemper, W.D. and R.C. Rosenau. 1986. Aggregate stability and size distribution models. PP. 363-371. In: A. Klute (Ed), *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy, Madison.
- Liu, H., T. W. Lei, J. Zhao, C. P. Yuan, Y. T. Fan and L. Qu. 2011. Effects of rainfall intensity and antecedent soil water content on soil infiltrability under rainfall condition using the run off-on-out method. *Journal of Hydrology* 396(1-2): 24-32.
- Liu, Y., M. Yang, F. Zhang and J. Zhang. 2022. The effect of rainfall pattern on sediment source in a small catchment on the Chinese Loess Plateau. In: EGU General Assembly Conference Abstracts, Vienna, Austria.
- Majoro, F., U. G Wali, O.Munyanza, F. X.Naramabuye, and C.Mukamwambali. 2020. On-site and off-site effects of soil erosion: causal analysis and remedial measures in agricultural land-a review. *Rwanda Journal of Engineering, Science, Technology and Environment* 3(2): 2321-2617.
- Marko, O., J.Gjipalaj, , D. Profka, and N. Shkodrani., 2023. Soil erosion estimation using Erosion Potential Method in the Vjosa River Basin, Albania. *AIMS Environmental Science* 10(1): 191-205.
- Mohamadi, M.A. and A. Kavian. 2015. Effects of rainfall patterns on runoff and soil erosion in field plots. *International Soil and Water Conservation Research* 3(4): 273–281.
- Mondal, A., D. Khare, S. Kundu, P.K. Meena, P.K. Mishra and R. Shukla. 2015. Impact of climate change on future soil erosion in different slope, land use, and soil-type conditions in a part of the Narmada River Basin, India. *Journal of Hydrologic Engineering* 20(6): C5014003.
- Nayakekorale, H.B., 2020. Soil degradation. PP. 103-118. In: R.B. Mapa (Ed). *The Soils of Sri Lanka*. Springer Cham, New York.
- Nearing, M. A., Y. Xie, B. Liu and Y. Ye. 2017. Natural and anthropogenic rates of soil erosion. *International Soil and Water Conservation Research* 5(2): 77–84.
- Nelson, D.W. and E.J. Kladvko. 1979. Changes in soil properties from application of anaerobic sludge. *Water Pollution Control* 51(2): 325-332.
- Page, M. C., D. L. Sparks, M. R. Noll and G. J Hendricks. 1987. Kinetics and mechanisms of potassium release from sandy middle Atlantic Coastal plain soils. *Soil Science Society American Journal* 51(6): 1460-1465.
- Ran, Q., Wang, F. and Gao, J., 2019. Modelling effects of rainfall patterns on runoff generation and soil erosion processes on slopes. *Water* 11(11):2221.
- Rhoades, J.D. and J.D. Oster. 1986. Solute content. PP. 985-1006. In: A. Klute (Ed), *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy, Madison.
- Rodrigo-Comino, J., A. García-Díaz, E.C. BrevikS, D. Keestra, P. Pereira, A. Novara, A. Jordán, and A Cerdà. 2017. Role of rock fragment cover on runoff generation and sediment yield in tilled vineyards. *European Journal of Soil Science* 68(6): 864-872.

25. Sadeghian, N., A. R. Vaezi, A. Majnoonigeris. 2020. Effect of Raindrop Impact on Homogeneity of Sediments in Rill Erosion of Soils with Different Textures. *Iranian Journal of Soil Research* 34(1):127-141.
26. Schwab, G.O., R.K. Fervert, T.W. Edminster and K.K. Barnes. 1986. Soil and Water Conservation Engineering. John Wiley and Sons, Inc. New York.
27. Skarie, R. L., J. L. Arndt and J. L. Richardson. 1987. Sulfate and gypsum determination in saline soils. *Soil Science Society American Journal* 51(4): 901-905.
28. Vaezi, A. R. 2020. Water erosion (Processes and Models). University of Zanjan, Zanjan (in Farsi).
29. Vaezi, A., S. Hamidi Nahrani, M.H. Mohammadi and J. Saba. 2012. Effectiveness of polyvinyl acetate to decrease runoff and sediment in a marl soil under the same rainfall events. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 43(2): 179-184 (in Farsi).
30. Wang, Z.Y., G.Q. Wang, C.Z. Li and F.X. Wang. 2003. Research and application of the vegetation-erosion dynamics. *Sci. Chin (Ser. D)* 33:1013-1023.
31. Zhao, X., P. Wu, X. Chen, M.J. Helmers, and X. Zhou. 2013. Runoff and sediment yield under simulated rainfall on hill slopes in the Loess Plateau of China. *Soil Research* 51(1): 50-58.

## The Effect of Temporal Distribution Pattern of Rainfall Intensity on Runoff and Soil Loss in a Hillslope in a Semi-Arid Region

A. R. Vaezi\*, F. Besharat and F. Azarifam<sup>1</sup>

(Received: May 7-2024 ; Accepted: August 17-2024)

### Abstract

The temporal distribution pattern of rainfall can play a role in the production of runoff and soil loss during rainfall. This study investigated four rainfall patterns: uniform, advanced, intermediate, and delayed rainfall under field conditions. The rainfall height in all rainfall patterns was 20 mm. In the uniform rainfall pattern, a constant rainfall intensity (40 mm h<sup>-1</sup>) was used and in the non-uniform rainfall patterns, a maximum rainfall intensity of 40 mm h<sup>-1</sup> was applied for a 15-minute duration. The experiments were carried out in 60 cm × 80 cm plots on a hillslope with a slope gradient of 9% at three replications. Rainfall patterns were set up on the plots in five events with an interval of one week. The results showed a significant difference between rainfall patterns in runoff and soil loss ( $p < 0.01$ ). This difference was due to the destruction of surface soil structure and the reduction of water infiltration rate, especially during peak time of rainfall intensity (40 mm h<sup>-1</sup>). The highest runoff occurred in the delayed rainfall (3.43 mm) while, the highest soil loss (61.47 g m<sup>-2</sup>) was observed in the intermediate rainfall, which was associated with the peak intensity of rainfall at the end of the rainfall and its role in the destruction of the soil structure on the one hand, and the loss of infiltration rate on the other hand. Variation of runoff and soil loss from one event to another indicated that soil loss is in line with runoff production in uniform rainfall, while soil loss did not follow runoff in other rainfalls. Soil loss in these rainfalls was affected by both runoff production and availability of erodible soil particles. These results revealed the necessity of studying the rainfall intensity distribution pattern for accurate prediction of soil erosion and determining soil loss variation event by event in the semi-arid region.

**Keywords:** Rainfall pattern, Simulated rainfall, Runoff, Erosion plot, Soil loss

---

1. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

\*: Corresponding author, Email: vaezi.alireza@gmail.com