

اثر رگبارهای شدت متغیر بر رواناب و فرسایش بین‌شیاری ناشی از بارندگی

مرتضی علوی‌نیا^۱، فرزین نصیری صالح^{۲*}، حسین اسدی^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران

nasiri_f@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۵/۰۳/۱۹]

تاریخ دریافت: [۹۴/۱۲/۲۶]

چکیده- انتقال رسوب ناشی از بارندگی یکی از اصلی‌ترین بخش‌های فرسایش بین‌شیاری خاک در طبیعت است. در طی رگبارهای طبیعی شدت بارندگی در نوسان است. در این پژوهش با شبیه‌سازی چهار رگبار با پروفیل‌های متفاوت و انرژی جنبشی یکسان بر دو نوع خاک متفاوت در سه تکرار، اثر پروفیل رگبار بر رواناب و رسوب ناشی از فرسایش بین‌شیاری بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد اگرچه در هر دو نوع خاک حجم رواناب ناشی از رگبارهایی با پروفیل‌های مختلف تفاوت معنی‌داری نداشتند اما اثرپذیری حداکثر میزان رواناب از پروفیل رگبار به نوع خاک بستگی داشت. نتایج مربوط به رسوب نیز بسته به نوع خاک، دلالت بر معنی‌دار بودن اثر پروفیل رگبار بر تولید رسوب داشت. علاوه بر این یافته‌های این پژوهش نشان داد در رگبارهای شدت متغیر استفاده از مدل‌هایی که فرسایش بین‌شیاری را با استفاده از شدت بارندگی برآورد می‌کنند کارایی ندارد. از این رو توسعه استفاده از شبیه‌سازی رگبارهای شدت متغیر در مطالعات فرسایش خاک و انتقال رسوب می‌تواند باعث شناخت دقیق فرآیندهای موثر حاکم بر تولید رواناب و رسوب در فرسایش بین‌شیاری شود.

واژگان کلیدی: شبیه‌سازی باران، تغییرات شدت بارندگی، رواناب، انتقال رسوب ناشی از بارندگی.

۱- مقدمه

تقسیم شده است [4]. به طور معمول فرآیند جدا شدن ذرات خاک به وسیله قطرات باران و انتقال آنها بر اثر پاشمان و یا جریان کم عمق سطحی به عنوان فرسایش بین‌شیاری در نظر گرفته می‌شود [5, 6, 7].

شبیه‌سازی باران در شرایط آزمایشگاهی یک ابزار اساسی برای درک بهتر فرآیندهای موثر در فرسایش ناشی از بارندگی محسوب می‌شود. در مقایسه با مطالعه فرسایش خاک در شرایط بارندگی طبیعی توانایی کنترل دقت آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌های دقیق فرآیندهای فرسایش در کنار صرفه‌جویی در هزینه و زمان از جمله مزیت‌های اصلی شبیه‌سازی باران در شرایط آزمایشگاهی محسوب می‌شوند [8]. از طرفی بررسی رگبارهای طبیعی نشان می‌دهد که

فرسایش خاک به عنوان یک پدیده پیچیده طبیعی یک چالش جهانی است که از مخاطرات اصلی منابع آب و خاک محسوب می‌شود [1]. لذا توسعه مدل‌های فیزیکی و استفاده از آنها برای پیش‌بینی میزان فرسایش خاک به تازگی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. از این رو شناخت دقیق فرآیندهای حاکم بر فرسایش خاک و انتقال رسوب و اندرکنش احتمالی آنها در توسعه مدل‌های فرسایش خاک اهمیت بالایی دارد [2, 3]. برای درک بهتر فرآیندهای موثر در جدا شدن و انتقال ذرات خاک در اثر بارندگی و یا رواناب، فرسایش خاک در مقیاس شیب دامنه به دو فرآیند فرسایش بین‌شیاری^۱ و فرسایش شیاری^۲

در هر دو آنها یکسان بود. نتایج به دست آمده در تحقیق ایشان نشان داد تغییرات شدت بارندگی در طی رگبار باعث افزایش بیشترین میزان رواناب می‌شود [20]. پارسونز و استون با استفاده از شبیه‌سازی پنج رگبار با انرژی جنبشی یکسان و پروفیل‌های متفاوت (یک رگبار شدت ثابت و پنج رگبار شدت متغیر) بر سه نوع خاک، به بررسی اثر پروفیل رگبار بر رواناب و رسوب بین‌شیاری پرداخت. نتایج این تحقیق نشان داد در هر سه نوع خاک اگر چه پروفیل رگبار بر حجم رواناب تولید شده اثر نداشت اما هدررفت خاک در رگبار با شدت ثابت حدود ۷۵٪ هدررفت خاک در رگبارهای با شدت متغیر بود [21]. احمد و همکاران با هدف مطالعه آزمایشگاهی اثر پروفیل رگبار بر فرسایش دو نوع خاک مختلف نشان دادند در رگبارهایی با شدت متوسط و مدت یکسان، میزان فرسایش خاک ناشی از رگبارهای با شدت متغیر بیشتر است [22]. دونکرلی در یک مطالعه صحرايي در استرالیا نشان داد در مقایسه با رگبارهای شدت ثابت، با حفظ مدت و متوسط شدت بارندگی، اعمال پروفیل‌های مختلف در رگبارهای شبیه‌سازی شده باعث افزایش حجم و حداکثر میزان رواناب تولید شده می‌شود [10]. پژوهش‌های انجام شده به وسیله آن و همکاران نیز نشان می‌دهد اگر چه پروفیل رگبار بر مشخصات رواناب تولید شده تاثیر ندارد اما هدررفت خاک ناشی از رگبارهای با شدت متغیر حدود ۱/۱۳ تا ۵/۱۷ برابر بیشتر از هدررفت خاک ناشی از رگبار با شدت ثابت است [23].

مرور مطالعات انجام شده نشان می‌دهد پروفیل رگبار بر فرآیندهای فرسایش خاک و در برخی شرایط بر فرآیندهای رواناب موثر است. با این حال درباره آثار پروفیل رگبار بر فرسایش ناشی از بارندگی و فرآیندهای موثر در آن، به ویژه در فرسایش بین‌شیاری، اطلاعات زیادی وجود ندارد. از این رو این پژوهش با دو هدف اصلی بررسی اثر پروفیل رگبار بر رواناب و رسوب ناشی از فرسایش ناشی از بارندگی و بررسی کارایی رابطه (۱) در رگبارهای شدت متغیر انجام شده است. از آنجا که در این پژوهش تنها بررسی آثار پروفیل رگبار بر فرآیندهای رواناب و رسوب مورد نظر است، این پژوهش در شرایط آزمایشگاهی و استفاده از شبیه‌سازی چهار رگبار با پروفیل متفاوت و انرژی

شدت بارندگی در طول یک رخداد متغیر است؛ به شکلی که ممکن است در طی رگبار بیشینه شدت بارندگی چند برابر متوسط شدت بارندگی آن رگبار باشد. تغییرات زمانی شدت بارندگی در طی رگبار را می‌توان پروفیل رگبار نامید [9، 10].

با این حال بیشتر پژوهشگران قبلی برای بررسی آثار بارندگی رواناب و فرسایش خاک از شبیه‌سازی رگبارهایی با شدت ثابت استفاده کرده‌اند [4، 7، 11، 12، 13، 14، 15]. بر این اساس فرم کلی و متداول روابطی که میزان هدررفت خاک در فرسایش ناشی از بارندگی را با استفاده از شدت بارندگی برآورد می‌کنند، به صورت زیر قابل بیان است:

$$D = k_i I^b \quad (1)$$

که در آن: D میزان هدررفت خاک ($\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$)، I شدت بارندگی (mms^{-1})، k_i ضریب فرسایش‌پذیری خاک ($\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$) و b یک پارامتر بدون بعد است [11، 12، 16].

مرور منابع نشان می‌دهد تاکنون پژوهش‌های زیادی بر آثار پروفیل رگبار بر فرسایش خاک انجام نشده است. ویلکینسون با بررسی رگبارهای حاکم در یک محدوده مطالعاتی در کشور نیجریه نشان داد زمان وقوع بیشینه شدت بارندگی در طی رگبار، بر فرسایش خاک موثر است [17]. فلاناگان و همکاران با شبیه‌سازی رگبارهایی با پروفیل‌های متفاوت بر یک نوع خاک سیلت لومی، ضمن تایید اثرپذیری رواناب و رسوب از پروفیل رگبار، نشان دادند، وقوع پیک شدت در انتهای رگبار منجر به افزایش رواناب سطحی و هدررفت خاک می‌شود [18]. ژانگ و همکاران با بررسی رواناب ناشی از رگبارهایی با عمق بارندگی و مدت بارندگی یکسان، نشان دادند وقوع پیک شدت بارندگی در ابتدای رگبار نسبت به وقوع آن در انتهای رگبار، غلظت مواد شیمیایی را به دو برابر افزایش می‌دهد. علاوه بر این نتایج پژوهش‌های ایشان نشان داد زمان وقوع پیک شدت در طی رگبار برحجم رواناب تولیدی رگبارهای مذکور، بی‌تاثیر است. [19]. فرائونفلد و ترومن با شبیه‌سازی یک رگبار شدت ثابت و یک رگبار شدت متغیر به بررسی نفوذ، رواناب و فرسایش خاک در شرایط آزمایشگاهی پرداختند. مدت بارندگی در هر دو رگبار ۷۰ دقیقه و عمق بارندگی

جدول (۱) مشخصات باران‌های استفاده شده در این پژوهش

Rainfall intensity (mm hr ⁻¹)		CU(%)		Kinetic energy (J m ⁻² s ⁻¹)
Mean	SD	Mean	SD	
46.5	1.56	90.05	2.17	0.088
55.9	2.64	91.30	0.98	0.117
65.6	1.12	91.30	1.28	0.159
76.0	2.37	93.48	1.37	0.177
88.1	2.07	91.37	1.32	0.182
112.2	2.12	91.02	2.77	0.189

SD: standard deviation; CU: coefficient of uniformity

Table 1. The characteristics of rainfall produced by the rainfall simulator used in this study

با توجه به اهداف این پژوهش از چهار رگبار مختلف استفاده شد. این رگبارها شامل رگبار با شدت صعودی (صعودی)، رگبار با شدت نزولی (نزولی)، رگبار با شدت صعودی-نزولی (صعودی-نزولی) و رگبار با شدت ثابت (ثابت) بودند که در شکل (۱) ارائه شده‌اند. اگرچه پروفیل تغییرات شدت بارندگی در این رگبارها متفاوت است اما به گونه‌ای طراحی شده‌اند که انرژی جنبشی یکسانی بر سطح خاک اعمال می‌کنند.

در این پژوهش از دو نوع خاک ماسه‌ای (خاک A) و لوم ماسه‌ای (خاک B) استفاده شد. خاک‌های استفاده شده پس از هوا خشک کردن و عبور از الک نمره ۴ (۴/۷۵ میلی‌متر) داخل یک سینی پاشمان نفوذپذیر به ابعاد ۳۰ در ۳۵ و عمق ۱۰ سانتی‌متر ریخته شد. با انجام کوبیدگی و غلتک زدن، وزن مخصوص نزدیک به حالت طبیعی در خاک ایجاد شد.

سینی پاشمان استفاده شده در این پژوهش از سه قسمت مجزا تشکیل شده است. اندازه‌گیری رواناب و رسوب از قسمت میانی سینی پاشمان (سطح ۱۵ در ۳۰ سانتی‌متر) انجام گرفت. قسمت‌های کناری به عنوان گارد (بافر پاشمان) عمل می‌کنند. به این معنی که ذرات خاک نه تنها از قسمت میانی به اطراف پرتاب می‌شوند بلکه از این دو قسمت نیز به درون قسمت میانی پرتاب می‌شوند. از این رو هدررفت خاک به صورت پاشمان هوایی از قسمت میانی که اندازه‌گیری

جنبشی یکسان بر دو نوع خاک متفاوت در یک سینی پاشمان انجام شده است.

۲- مواد و روش‌ها

این پژوهش با استفاده از شبیه‌ساز باران در دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است. سامانه تولید باران این شبیه‌ساز از نوع قطره چکانی است و در ارتفاع ۳ متری از سطح زمین قرار دارد که باعث می‌شود قطرها به حدود ۸۵٪ سرعت حد خود برسند [۲۴]. در این سامانه با کمک ۷۸۰ سوزن طپی (نمره ۲۳) که در یک شبکه مربعی منظم با فاصله ۳/۳۳ سانتی‌متر از یکدیگر نصب شده‌اند، قطره‌های باران تولید می‌شوند [۲۵]. سامانه تولید قطره‌های باران با کمک موتور نصب شده روی چهارچوب فلزی شبیه‌ساز با توجه به فاصله قطره چکان‌ها (سوزن‌ها) به شکلی حرکت دورانی دارد که از تداوم برخورد قطره‌های باران به یک نقطه ثابت از خاک و تمرکز نقطه‌ای فرسایش جلوگیری می‌کند. این شبیه‌ساز قادر است در سطح یک مترمربع، رگبارهای با شدت بین ۲۰ تا ۱۲۰ میلی‌متر بر ساعت تولید نماید. با استفاده از یک کنترلر قابل برنامه‌ریزی دور موتور پمپ و با تغییر دبی آب ورودی به سامانه تولید قطرات، تولید رگبار با شدت دلخواه امکان پذیر است. برای ایجاد طیف قطری باران شبیه‌سازی شده، به فاصله ۱۰ سانتی‌متری زیر سامانه تولید باران یک توری با قطر چشمه ۰/۲ سانتی‌متر نصب شد. به شکلی که قطرها پس از برخورد با این صفحه شکسته و در یک طیف قطری توزیع می‌شوند [۲۶]. اندازه‌گیری قطر قطره‌های باران در شدت‌های مختلف که با استفاده از تکنیک عکس برداری سریع و با استفاده از روش پیشنهادی صادقی و همکاران انجام گرفت [۲۷] نشان داد محدوده قطری قطره‌های باران شبیه‌سازی شده در شبیه‌ساز استفاده شده بین ۰/۱ تا ۳ میلی‌متر است. با اندازه‌گیری باران در نقاط مختلف سطح بارندگی مشخصات رگبارهای مورد نظر در شدت‌های مختلف محاسبه و در جدول (۱) ارائه شده است.

رواناب و رسوب در آن انجام می‌شود، کمترین میزان است [15].

برای حذف اثر رطوبت خاک بر نتایج، کلیه آزمایش‌ها روی نمونه‌های خاک اشباع شده انجام شد. اشباع کردن نمونه‌ها روز قبل از انجام هر آزمایش و با استفاده از سیستم زهکشی کف سینی پاشمان انجام شد. پس از اطمینان از اشباع شدن خاک، آب موجود در خاک با باز (۱) صعودی، (۲) نزولی، (۳) صعودی- نزولی و (۴) ثابت کردن شیر تخلیه زهکش‌های کف سینی پاشمان، تخلیه می‌شد. پس از ناچیز شدن آب خروجی از خاک از طریق زهکش‌ها، با تنظیم شیب سینی پاشمان شبیه سازی رگبار مورد نظر بر خاک انجام گرفت. در کلیه آزمایش‌ها شیب سینی پاشمان ۰/۵ درصد تنظیم شد. برای هر رگبار حداقل ۳ تکرار انجام گرفت.

در هر آزمایش پس از شروع رگبار، با شروع رواناب زمان شروع آن ثبت و نمونه برداری به طور پیوسته و در گام‌های زمانی مشخص انجام شد. برای اندازه‌گیری حجم رواناب پس از پایان آزمایش، نمونه‌ها بلافاصله توزین شدند. با فراهم آوردن شرایط ترسیب به مدت ۲۴ ساعت، جداسازی آب و رسوب انجام گرفت. وزن رسوب به دست آمده پس از قرار گرفتن در آون به مدت ۲۴ ساعت و تحمل دمای 105°C و توزین آن، ثبت شد. نسبت وزن رسوب خشک به حجم رواناب به عنوان غلظت رسوب در نظر گرفته شد [23]، [21]. برای بررسی تفاوت‌های معنی‌دار در مشخصات رواناب و رسوب ناشی از رگبارهای مختلف از روش کمترین تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح اطمینان ۹۵ درصد استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- رواناب

با توجه به وجود زهکش در سینی استفاده شده در این پژوهش، ایجاد رواناب مشابه شرایطی است که در طبیعت رخ می‌دهد. در شکل (۲) تغییرات شدت رواناب با زمان برای هر دو نوع خاک و در هر چهار رگبار ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تغییرات شدت رواناب به نوع خاک و پروفیل رگبار بستگی دارد.

شکل (۱) رگبارهای استفاده شده در این پژوهش:

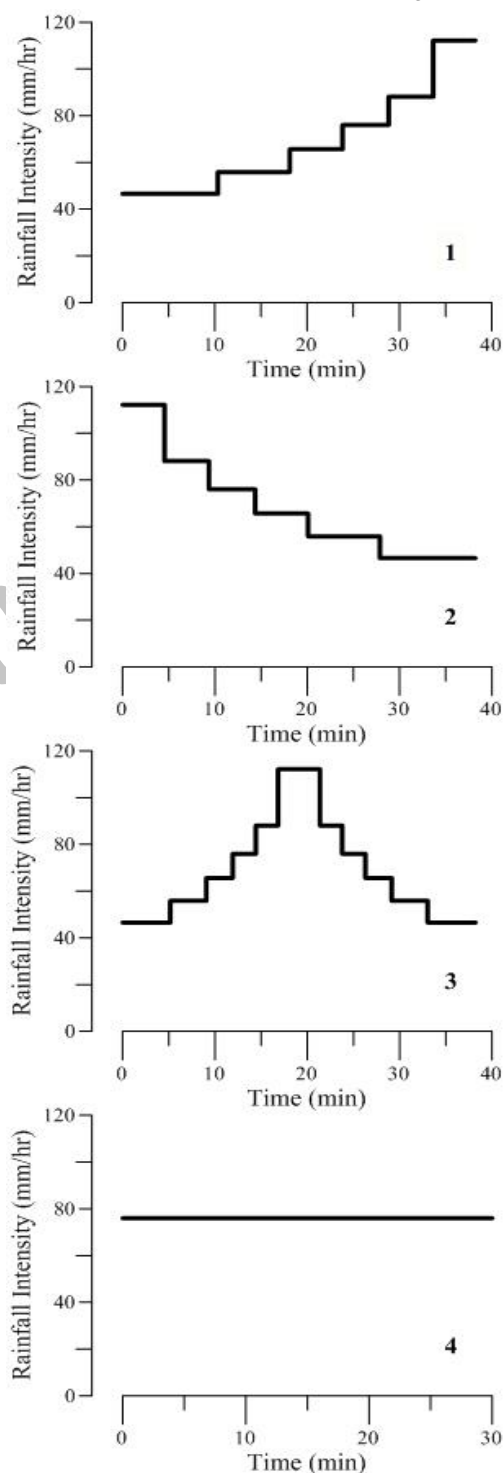


Fig.1. Intensity profiles for simulated rainfall events: (1) increasing, (2) decreasing, (3) increasing- decreasing and (4) constant.

شدت متغیر زمان وقوع بیشینه رواناب تابعی از زمان وقوع بیشترین شدت بارندگی است و تغییرات زمانی رواناب از شکل پروفیل رگبار حاکم تبعیت می‌کند. این در حالی است که میزان رواناب ناشی از رگبار با شدت ثابت پس از گذشت مدتی از شروع رواناب به حالت پایدار می‌رسد. این روند در مورد خاک ماسه‌ای (خاک A) مشهودتر است.

علاوه بر این، تحلیل نتایج به دست آمده در شکل (۲) ضمن تایید اثرپذیری مستقیم میزان رواناب از شدت بارندگی که با نتایج آسولین و بن‌هور و دفرشا و میلسی (۲۰۱۲) هماهنگی دارد، نشان می‌دهند در یک رگبار شدت متغیر، زمان وقوع بیشینه شدت و مدت تداوم آن بر بیشینه میزان رواناب تاثیر ندارد. با این حال فلاناگان و همکاران و دانکرلی بر این باورند که زمان وقوع بیشینه شدت در طی رگبار اثر قابل توجهی بر ویژگی‌های رواناب تولید شده دارد. به شکلی که فلاناگان و همکاران با بررسی زمان وقوع بیشینه شدت بارندگی در طی رگبار نشان دادند، در رگبارهای شدت متغیر اگر بیشینه شدت در انتهای رگبار رخ دهد، بیشینه میزان رواناب تولید شده حدود ۴ تا ۸ برابر افزایش می‌یابد. نتایج ارائه شده به وسیله دانکرلی نیز حاکی از افزایش ۶ برابری بیشینه میزان رواناب در رگبارهایی است که در آنها بیشینه شدت در انتهای رگبار رخ می‌دهد. با توجه به اثرپذیری رواناب از رطوبت خاک [4, 28] برخلاف شرایط اولیه خاک در این پژوهش (که کلیه آزمایش‌ها بر خاک اشباع انجام شده است)، در مطالعات فلاناگان و همکاران و دانکرلی (۲۰۱۱) در شروع رگبار خاک در حداقل شرایط رطوبتی خود قرار داشته است. از این رو ممکن است علت این تناقض تفاوت در رطوبت خاک در شروع رگبار باشد. علاوه بر این در مورد انرژی جنبشی رگبارهایی که در آزمایش‌های فلاناگان و همکاران و دانکرلی به کار رفته‌اند، اطلاعاتی وجود ندارد. در حالی که در این پژوهش از رگبارهایی با پروفیل‌های مختلف و انرژی جنبشی یکسان استفاده شده است. از این رو می‌توان ادعا کرد رطوبت پیشین خاک و انرژی جنبشی رگبار از عوامل موثر بر ویژگی‌های رواناب تولیدی ناشی از رگبارهای شدت متغیر هستند.

شکل (۲) تغییرات زمانی شدت رواناب در هر رگبار

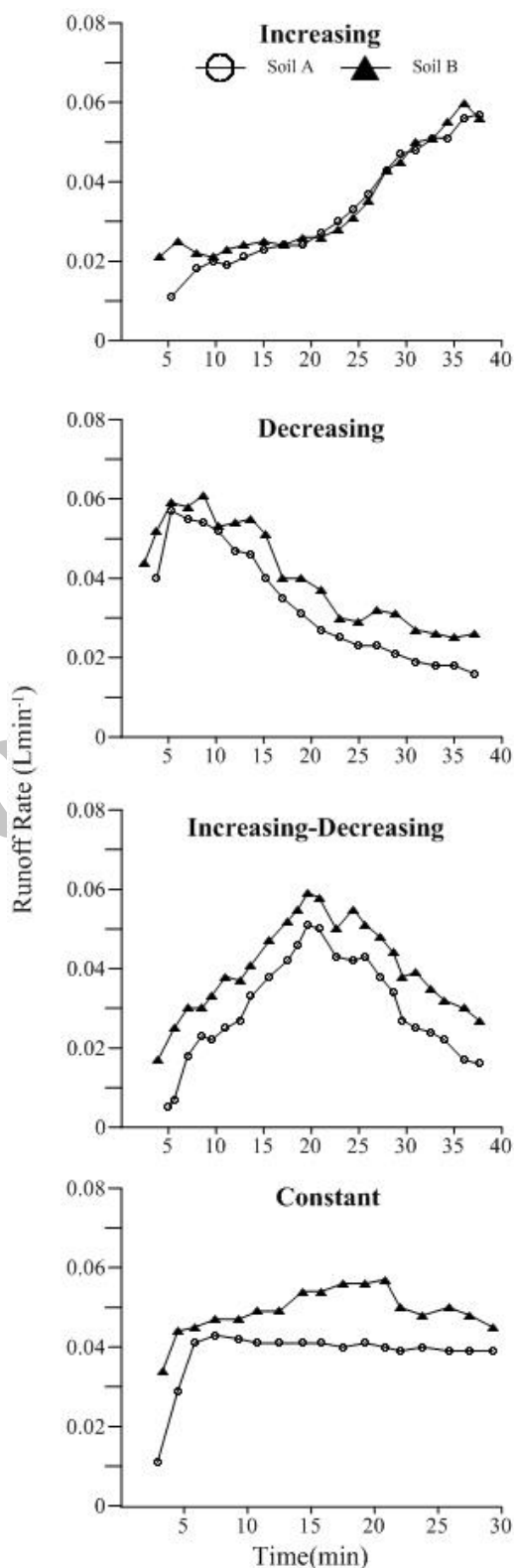


Fig. 2. The temporal variation of runoff rate during rainfall for event profiles.

نتایج به دست آمده در شکل (۲) نشان می‌دهد در رگبارهای

جدول (۲) مقادیر حجم کل رواناب، بیشینه میزان رواناب و هدررفت خاک در هریک از رگبارها

Soil types	Event profile	Total runoff volume (mL)	Peak runoff (mmmin ⁻¹)	Soil loss (gm ⁻²)
Sandy	Constant	1037.8a [†]	0.95b	77.6a
	Increasing	1072.4a	1.26a	79.0a
	Decreasing	1137.3a	1.26a	62.0b
	Increasing- Decreasing	1156.8a	1.23a	82.8a
Sandy loam	Constant	1341.7a	1.28a	118.0b
	Increasing	1240.3a	1.33a	90.1c
	Decreasing	1451.7a	1.34a	130.1a
	Increasing- Decreasing	1402.2a	1.34a	134.0a

[†]Mean values for a treatment followed by any identical letters are not significantly different at the 95% confidence level according to LSD test.

Table 2. Runoff, peak runoff rate and soil loss of each event profile on the two soil types

از شدت بارندگی مرتبط دانست به شکلی که در رگبارهای شدت متغیر وقوع شدت بارندگی بیشتر از شدت حاکم بر رگبار شدت ثابت، با ایجاد تراکم در سطح خاک و کاهش نفوذ پذیری سطحی خاک، باعث می‌شود تغییرات زمانی میزان رواناب بر تغییرات زمانی شدت بارندگی در طی رگبار هماهنگ باشد. این مطلب نشان می‌دهد کاربرد برخی مدل‌های شبیه‌سازی رواناب-فرسایش که برای لحاظ کردن ویژگی‌های بارندگی از پارامتر رواناب تجمعی ناشی از رگبار استفاده می‌کنند، در مورد رگبارهای با شدت متغیر باعث بروز خطا در نتایج می‌شود.

۲-۳- هدر رفت خاک و تولید رسوب

در طی یک رخداد بارندگی، مشخصات سطحی خاک و ذخیره رسوبات قابل حمل بطور دینامیکی در حال تغییر است به شکلی که حتی در یک رگبار با شدت ثابت هم ممکن است روند زمانی میزان هدررفت خاک نزولی باشد. از این رو ممکن است در رگبارهای با شدت متغیر، تغییرات زمانی در هدررفت خاک و رسوب خروجی از سینی پاشمان به دلیل اثرپذیری آن از اتلاف زمانی ذخیره رسوبات قابل حمل در سطح خاک باشد. برای اطمینان از این موضوع مقادیر رواناب و رسوب تجمعی در شش گام زمانی ۵ دقیقه‌ای برای رگبار با شدت ثابت محاسبه و در جدول (۳) نشان داده شده است.

نتایج مربوط به اندازه‌گیری رواناب در هر کدام از رگبارها در جدول (۲) ارائه شده است. بررسی این جدول نشان می‌دهد اگر چه حجم رواناب تجمعی ناشی از رگبارهای مختلف در خاک لوم ماسه‌ای بیشتر از خاک ماسه‌ای است، اما مقایسه اختلاف بین حجم رواناب کل ناشی از رگبارهای مختلف در هر کدام از خاک‌ها (آزمون LSD) نشان می‌دهد که چشم‌پوشی از نوع خاک، بین حجم تجمعی رواناب ناشی از رگبار ثابت و رگبارهای شدت متغیر تفاوت معنی‌داری وجود ندارد که با نتایج ارائه شده به وسیله‌ی پارسونز و استون، ترومن و همکاران و آن و همکاران هماهنگی دارد. بررسی مقادیر بیشینه میزان رواناب با استفاده از آزمون LSD نیز جدول (۲) نشان می‌دهد بیشینه میزان رواناب در رگبارهای با شدت متغیر بیشتر از رگبار با شدت ثابت است. مقایسه بیشینه میزان رواناب در رگبارهای شدت متغیر، نشان می‌دهد چشم‌پوشی از نوع خاک، تفاوت معنی‌داری در بیشینه میزان رواناب وجود ندارد که با نتایج آن و همکاران هماهنگی دارد. مقایسه بیشینه میزان رواناب در رگبارهای شدت متغیر و رگبار شدت ثابت نشان می‌دهد، اثرپذیری بیشینه میزان رواناب از پروفیل رگبار به نوع خاک بستگی دارد. به شکلی که در خاک ماسه‌ای (خاک A) بین بیشینه میزان رواناب تولیدی ناشی از رگبار با شدت ثابت و رگبارهای با شدت متغیر، تفاوت معنی‌داری وجود دارد. علت احتمالی را می‌توان به اثرپذیری شرایط سطحی این نوع خاک

خاک، رگبار افزایشی-کاهشی منجر به بیشینه هدررفت خاک می‌شود.

برای تحلیل بیشتر نتایج رابطه بین میزان هدررفت خاک و شدت بارندگی برای رگبارهای شدت متغیر بررسی شد. این بررسی نشان می‌دهد در همه رگبارها میزان هدررفت خاک با افزایش شدت بارندگی افزایش می‌یابد که در مقایسه با رابطه (۱) منطقی به نظر می‌رسد. در فرم کلی رابطه (۱) که برای رگبارهای شدت ثابت توسعه یافته است، b عددی ثابت است که عموماً مقدار ۲ برای آن توصیه می‌شود [11، 12، 16]. از این رو برای بررسی کارایی رابطه (۱) در برآورد فرسایش بین‌شیاری ناشی از رگبارهای شدت متغیر، با استفاده از نتایج اندازه‌گیری‌ها و با فرض $b = 2$ ، مقادیر متوسط ضریب فرسایش پذیری (پارامتر k_i) در هر نوع خاک و در هر یک از رگبارها محاسبه و در جدول (۴) ارائه شده‌اند.

جدول (۴) مقادیر متوسط ضریب فرسایش‌پذیری در هر رگبار

Event Profile	Soil A	Soil B
Constant	96.67	147.17
Increasing	87.74	102.58
Decreasing	80.64	149.64
Increasing- Decreasing	148.64	309.15

Table 4. Average values of the parameter k_i ($gs. mm^{-4} \times 10^{-4}$) for each event profile on the two soil types

مشاهده می‌شود با این فرض ضریب فرسایش‌پذیری در هر خاک ثابت نیست و به پروفیل رگبار بستگی دارد که با نتایج ارائه شده به وسیله‌ی آسولین و بن‌هور و نتایج پارسونز و استون هماهنگی دارد.

برای بررسی بیشتر اثر پروفیل رگبار بر هدررفت خاک در رگبارهای شدت متغیر، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی برای هر یک از خاک‌ها، رابطه بین شدت بارندگی-میزان فرسایش بین‌شیاری به فرم کلی رابطه (۱) استخراج و نتایج در جدول (۵) ارائه شده است.

در جدول (۵)، متوسط مقادیر پارامتر b برای خاک A و B به ترتیب $2/5$ و $1/8$ است. این نتیجه ضمن تایید اثرپذیری پارامتر b از نوع خاک، که با نتایج دفرشا و میلوسی هماهنگی دارد،

جدول (۳) میزان رواناب و غلظت رسوب در طی رگبار شدت ثابت

Time Step	Runoff (mL)		Soil Loss (gL^{-1})	
	Soil A	Soil B	Soil A	Soil B
1	31.4	88.50	7.61	7.01
2	207.3	230.5	3.61	4.27
3	206.3	250.7	3.2	4.35
4	200.7	276.9	2.93	3.76
5	198.4	257.7	3.34	3.36
6	193.7	237.3	3.05	2.99

Table 3. Runoff volumes and sediment concentrations for each time step for constant intensity experiments

بررسی جدول (۳) نشان می‌دهد در هر دو نوع خاک از گام زمانی دوم به بعد با ثابت شدن تقریبی حجم رواناب، در هر دو نوع خاک مقادیر رسوبات روند کاهشی چشمگیری ندارد. از این رو می‌توان ادعا کرد در آزمایش‌ها این پژوهش اثرپذیری هدررفت خاک از فرسودگی ذخیره رسوبات قابل چشم‌پوشی کردن است.

برای اطمینان از حاکم بودن فرآیندهای ناشی از بارندگی بر فرآیندهای انتقال رسوب در فرسایش بین‌شیاری از معیار قدرت جریان آستانه استفاده شده است. قدرت جریان آستانه کمینه قدرت جریانی است که در آن ذرات خاک (که معمولاً ریزترین ذرات خاک است) به وسیله‌ی جریان شروع به جدا شدن و انتقال می‌کنند [29]. مقدار این قدرت جریان آستانه بستگی به نوع خاک دارد. مقایسه مقادیر بیشینه قدرت جریان اندازه‌گیری شده در این پژوهش با مقادیر گزارش شده به وسیله‌ی پروفیت و همکاران [30] نشان می‌دهد وقوع فرآیند جداشدن ذرات خاک به وسیله‌ی رواناب در این شرایط فراهم نیست و فرآیندهای ناشی از بارندگی عامل جدا شدن ذرات هستند.

مقادیر هدررفت خاک در هر رگبار در جدول (۲) ارائه شده است. بررسی این جدول، نشان می‌دهد آثار رگبارهای شدت متغیر بر تولید رسوبات در هر یک از خاک‌ها متفاوت است که با نتایج پارسونز و استون (۲۰۰۶) و آن و همکاران (۲۰۱۴) هماهنگی دارد. علاوه بر این نتایج به دست آمده نشان می‌دهند معنی‌دار بودن اثر پروفیل رگبار بر تولید رسوبات به نوع خاک بستگی دارد اما با چشم‌پوشی از نوع

جدول (۵) مشخصات فرم توانی رابطه بین شدت بارندگی - میزان فرسایش بین‌شیاری در رگبارهای شدت متغیر

Event Profile	Soil A			Soil A		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²
Increasing	160.3	2.16	0.94	30.19	1.70	0.94
Decreasing	214.5	2.28	0.63	86.08	1.86	0.82
Increasing- Decreasing limb1	2461	2.93	0.89	48.79	1.71	0.83
Increasing- Decreasing limb2	730.6	2.60	0.76	118.2	1.94	0.94

(Limb 1= increasing limb in increasing-decreasing pattern, Limb 2= decreasing limb in increasing-decreasing pattern)

Table 5. The constant (*a*), exponent (*b*) and explained variance (*R*²) of the application of the power function $E = at^b$ to variable storm intensity data

و انرژی جنبشی یکسان بر دو نوع خاک متفاوت، تاثیر تغییرات شدت بارندگی در طی رگبار (پروفیل بارندگی) بر رواناب و رسوب ناشی از فرسایش بین‌شیاری بررسی شد. نتایج به دست آمده ضمن تایید اثرپذیری مستقیم میزان رواناب از شدت بارندگی، نشان داد تغییرات شدت بارندگی در طی یک رگبار، حجم رواناب تجمعی تولید شده به وسیله‌ی آن رگبار را تحت تاثیر قرار نمی‌دهد. علاوه بر این رطوبت پیه‌شین خاک و انرژی جنبشی رگبار از عوامل موثر بر ویژگی‌های رواناب تولیدی ناشی از رگبارهای شدت متغیر هستند. در مورد هدررفت خاک معنی‌دار بودن اثر پروفیل بارندگی بر تولید رسوب به نوع خاک بستگی دارد. علاوه بر این یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد در رگبارهای با شدت متغیر استفاده از مدل‌هایی مانند USLE و WEPP که فرسایش بین‌شیاری را با استفاده از شدت بارندگی (رابطه ۱) برآورد می‌کنند، می‌تواند باعث بروز خطای زیاد در برآورد فرسایش بین‌شیاری ناشی از بارندگی شود. بر این اساس و با توجه به تغییرات شدت بارندگی در طی رگبارهای طبیعی، ادامه استفاده از شبیه‌سازی باران‌های با شدت ثابت در مطالعات فرسایش خاک و استفاده از روابطی که بر این اساس توسعه یافته‌اند ممکن است باعث نادیده گرفتن فرآیندهای حاکم بر تولید رواناب و رسوب شود. با شناخت این فرآیندها و توسعه مدل‌های فرسایش خاک بر اساس آنها می‌توان دقت نتایج در شبیه‌سازی‌های بارندگی - رواناب - فرسایش را بهبود بخشید.

نشان می‌دهد در معادلات توانی حاکم بر شدت بارندگی - میزان فرسایش بین‌شیاری در رگبارهای شدت متغیر، استفاده از مقدار مرسوم ۲ برای پارامتر *b* صحیح نیست، که با نتایج پارسونز و استون هماهنگی دارد.

اگر چه متوسط مقادیر پارامتر *b* برای خاک A با نتایج نتایج پارسونز و استون هماهنگی دارد اما در مورد خاک B تناقض وجود دارد که ممکن است به دلیل تفاوت در ابعاد و شیب فلووم و به تبع آن تفاوت در فرآیندهای فعال در انتقال رسوب در فرسایش بین‌شیاری باشد. از این رو بر خلاف نتایج پارسونز و استون نمی‌توان برای پارامتر *b* در رگبارهای شدت متغیر مقدار مشخصی و ثابتی ارائه داد.

به طور کلی نتایج به دست آمده در این بخش ضمن تایید اثرپذیری پارامترهای *k_t* و *b* از نوع خاک و پروفیل رگبار در روابط توانی به فرم رابطه (۱) نشان می‌دهند برای برآورد فرسایش بین‌شیاری ناشی از رگبارهای شدت متغیر، ضریب فرسایش‌پذیری خاک تنها تابعی از نوع خاک که با واقعیت منطبق نیست [31]. به بیان دیگر برآورد فرسایش بین‌شیاری ناشی از رگبارهای شدت متغیر با استفاده از روابط توانی متکی بر شدت بارندگی امکان‌پذیر نیست. این موضوع ممکن است به دلیل تفاوت در عوامل موثر و فرآیندهای فعال در انتقال رسوب در رگبارهای شدت متغیر نسبت به رگبارهای شدت ثابت باشد.

۴- نتیجه‌گیری

با استفاده از شبیه‌سازی چهار رگبار با پروفیل متفاوت

-۵ مراجع

References

- [16] Watson, D.A., Laflen, J.M., "Soil strength, slope, and rainfall intensity effects on interrill erosion", *Trans. ASAE.*, 29, 1986, 98-102.
- [17] Wilkinson, G.E., "Rainfall characteristics and soil erosion in the rainforest area of western Nigeria", *Experimental Agriculture.*, 11, 1975, 247-255.
- [18] Flanagan, D.C., Foster, G.R., Moldenhauer, W.C., "Storm pattern effect on infiltration, runoff and erosion", *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers.*, 31(2), 1987, 414-420.
- [19] Zhang, X.C., Norton, L.D., Hickman, M., "Rain pattern and soil moisture content effects on Atrazine and Metolachlor losses in runoff", *Journal of Environmental Quality.*, 26, 1997, 1539-1547.
- [20] Frauenfeld, B., Truman, C., "Variable rainfall intensity effects on runoff and interrill erosion from two coastal plain ultisols in Georgia", *Soil Science.*, 169, 2004, 143-154.
- [21] Parsons, A.J., Stone, P.M., "Effects of intra-storm variations in rainfall intensity on interrill runoff and erosion", *Catena.*, 67, 2006, 68-78.
- [22] Ahmed, S.I., Rudra, R.P., Gharabaghi, B., Mackenzie, K., Dickinson, W.T., "Within-storm rainfall distribution effect on soil erosion rate", *International Scholarly Research Network Soil Science.*, 310927, 2012, doi:10.5402/2012/310927.
- [23] An, J., Zheng, F.L., Han, Y., "Effects of rainstorm patterns on runoff and sediment yield processes", *Soil Science.*, 179, 2014, 293-303.
- [24] Laws, J.O., "Measurements of the fall-velocity of water-drops and raindrops", *Transactions of the American Geophysical Union.*, 22, 1941, 709-721.
- [25] Battany, M.C., Grismer, M.E., "Development of a portable field rainfall simulator for use in hillside vineyard runoff and erosion studies", *Hydrological Processes.*, 12, 2000, 1119-1129.
- [26] Roth, C.H., Helming, K., "Dynamics of surface sealing runoff formation and interrill soil loss as related to rainfall intensity micro relief and slope.", *Z. Pflanzenernahr. Bodenk.*, 155, 1992, 209-216.
- [27] Sadeghi, S.H., Abdollahi, Z., Khaledi Darvishan, A., "Experimental comparison of some techniques for estimating natural raindrop size distribution on the south coast of the Caspian Sea, Iran", *Hydrological Sciences Journal.*, 58, 2013, 1-9.
- [28] Defersha, M.B., Mellese, A. M., "Effect of rainfall intensity, slope and antecedent moisture content on sediment concentration and sediment enrichment ratio", *Catena.*, 90, 2012, 47-52.
- [29] Hairsine, P.B., Rose, C.W., "Rainfall detachment and deposition: sediment transport in the absence of flow-driven processes", *Soil Science Society of America Journal.*, 55, 1991, 320-324.
- [30] Proffitt, A.P.B., Hairsine, P.B., Rose, C.W., "Modeling soil erosion by overland flow: Application over a range of hydraulic conditions", *Trans. ASAE.*, 36, 1993, 1743-1753.
- [31] Alberts, E.E., Nearing, M.A., Wertz, M.A., Risse, L.M., Pierson, F.B., Zhang, X.C., Laflen, J.M., Simanton, J.R. "Soil component. Chapter 7", Report No. 10 In: Flanagan, D.C., Nearing, M.A. (Eds.), *USDA-Water Erosion Prediction Project, Technical Documentation NSERL. National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana, 1995.*
- [1] Lal, R., "Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality", *Crit. Rev. PlantSci.*, 4, 1998, 319-464.
- [2] Pieri, L., Bittelli, M., Wu, J.Q., Dun, S., Flanagan, D.C., Pisa, P.R., Ventura, F., Salvatorelli, F., "Using the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model to simulate fieldobserved runoff and erosion in the Apennines mountain range, Italy", *Journal of Hydrology.*, 336, 2007, 84-97.
- [3] Mahmoodabadi, M., Cerdà, A., "WEPP calibration for improved predictions of interrill erosion in semi-arid to arid environments", *Geoderma.*, 204-205, 2013, 75-83.
- [4] Assouline, S., Ben-Hur, M., "Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing", *Catena.*, 66, 2006, 211-220.
- [5] Kinnell, P.I.A., "Raindrop impact induced erosion processes and prediction: a review", *Hydrological Processes.*, 19, 2005, 2815 - 2844.
- [6] Tromp-van Meerveld, H.J., Parlange, J.-Y., Barry, D.A., Tromp, M.F., Sander, G.C., Walter, M.T., Parlange, M.B., "Influence of sediment settling velocity on mechanistic soil erosion modeling", *Water Resources Research.*, 44, 2008, W06401. doi:10.1029/2007 WR006361.
- [7] Jomaa, S., Barry, D.A., Brovelli, A., Sander, G.C., Parlange, J.-Y., Heng, B.C.P., Tromp-van Meerveld, H.J., "Effect of raindrop splash and transversal width on soil erosion: Laboratory flume experiments and analysis with the Hairsine-Rose model", *Journal of Hydrology.*, 395, 2010, 117-132.
- [8] Parsons, A.J., Lascelles, B., "Rainfall Simulation in Geomorphology", *Earth Surface Processes and Landforms.*, 25(7), 2000, 679-689.
- [9] Dunkerley, D., "Rain event properties in nature and in rainfall simulation experiments: a comparative review with recommendations for increasingly systematic study and reporting", *Hydrological Processes.*, 22, 2008, 4415-4435.
- [10] Dunkerley, D., "Effects of rainfall intensity fluctuations on infiltration and runoff: rainfall simulation on dryland soils, Fowlers Gap, Australia", *Hydrological Processes.*, 26, 2012, 2211-2224.
- [11] Meyer, L.D., "How rain intensity affects interrill erosion", *Trans. ASAE.*, 24, 1981, 1472-1475.
- [12] Truman C.C., Bradford, J.M., "Relationships between rainfall intensity and the interrill soil loss-slope steepness ratio as affected by antecedent water content", *Soil Science.*, 156, 1993, 405-413.
- [13] Arnaez, J., Lasanta, T., Ruiz-Flaño, P., Ortigosa, L., "Factors affecting runoff and erosion under simulated rainfall in Mediterranean vineyards", *Soil and Tillage Research.*, 93, 2007, 324-334.
- [14] Asadi, H., Ghadiri, H., Rose, C.W., Rouhipour, H., "Interrill soil erosion processes and their interaction on low slopes", *Earth Surface Processes and Land Forms.*, 32, 2007, 711-724.
- [15] Asadi, H., Rouhipour, H., Rafahi, H.G., Ghadiri, H., "Testing a mechanistic soil erosion model for three selected soil types from Iran", *Journal of Agricultural Science and Technology.*, 10, 2008, 79-91.

Effects of Variant Rainfall Intensity Events on Runoff and Interrill Erosion

M. Alavinia¹, F. Nasiri Saleh^{2*}, H. Asadi³

1- Ph.D Candidate, Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modarres University

2- Assist. Prof., Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modarres University

3- Assoc. Prof., Faculty of agriculture, University of Tehran

*nasiri_f@modares.ac.ir

Abstract:

Soil erosion, as a complicated natural phenomenon, is a global challenge threatening soil and water resources. Therefore, accurate understanding of soil erosion, sediment transport processes and their interactions is necessary for prediction of soil erosion. To distinguish between the dominant processes involved in soil loss, soil erosion has been classified into rill and interrill erosion. Rainfall-induced detachment and transport of sediment have a fundamental contribution to interrill and sheet erosion. Instead of observation of natural rain showers, simulation of rainfall is widely used for better understanding of processes involved in soil erosion and their interactions. Rainfall intensity is variable during natural rain showers. Peak rainfall intensity in an event can exceed the mean event intensity by an order of magnitude. Variations of rainfall intensity during a rainfall event is called 'event profile'. However, the available information is inadequate to understand its effects on runoff and soil loss processes. Thus, this study is aimed to quantify the effect of event profile on runoff and soil loss in rainfall-induced erosion. The experiments are defined based on the use of simulated rainfall on disturbed soils in a small laboratory detachment tray. The study is conducted in the rainfall simulation laboratory, Department of Hydraulic, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Iran. Since kinetic energy controls runoff and soil loss processes, the effects on the soil surface of rainfall events with the same average intensity may be different. Hence to study only the effects of event profile, four events with different temporal profiles of rainfall intensity, each with the same kinetic energy, were chosen; (a) constant intensity, (b) increasing intensity, (c) decreasing intensity and (d) increasing - decreasing intensity. The soil samples used in the experiments are from sandy soil (soil A) and sandy loam soil (soil B). Disturbed soil samples are collected, air dried, crushed to pass a 4.75-mm sieve, and thoroughly mixed. For each experiment, soil is packed into a drainable detachment tray to a specific bulk density. The test area of this tray is 15-cm width by 30-cm length and 15-cm depth. Eliminating the effects of soil moisture on results, soil is saturated from the bottom using drainage outlet tube connected to a water reservoir 24-hr before each experiment. The tray is setup at a slope of 0.5% and exposed to simulated rainfall events. Each treatment is tested in three replicates. For each simulation, runoff and sediment are sampled at regular intervals. Results show that while the peak runoff is affected by event profile for the two soil types, there is no significant difference in total runoff among rainfall events examined for both soil types. However, the soil type significantly affects the soil loss. In addition, it seems that the models which estimate interrill soil erosion directly from the rainfall intensity are expected to perform poorly in predicting soil erosion from varying intensity rainfall events. It may imply that various and complicated mechanisms might be activated in runoff and erosion under natural rainfall conditions. The results may indicate that negligence of the event profile may lead to inaccurate understanding of mechanisms involved in runoff and soil erosion.

Keywords: Event Profile, Runoff, Sediment, Rainfall Simulation, Interrill Erosion.