اثرات شیب و شدت باران بر تولید رواناب و هدررفت خاک با استفاده از شبیه‌ساز باران

عارف جباری زهرا: *دانشجوی ارشد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی و محیط زیست، دانشگاه اراک، اراک*
مهدی محمدی قلعه‌نی*: *استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی و محیط زیست، دانشگاه اراک، اراک*
مه‌نوش مقدسی: *دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی و محیط زیست، دانشگاه اراک، اراک*
حسین دهبان: *مؤسسه تحقیقات آب، پژوهشکدهٔ مطالعات و تحقیقات منابع آب، وزارت نیرو، تهران*

نوع مقاله: پژوهشی
تاریخچهٔ مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۱)
20.1001.1.22517812.1401.12.1.8.3

چکیده

هدف از تحقیق حاضر، ارزیابی اثرات سطوح مختلف شیب و شدت باران بر مشخصات رواناب و رسوب با استفاده از شبیه‌ساز باران است که در قالب مطالعه‌ای آزمایشگاهی اجرا می‌شود. تحلیل تجزیه واریانس متغیرهای مورد اندازه‌گیری در آزمایش‌ها، با سه تکرار به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایهٔ کاملاً تصادفی با دو متغیر شدت باران در پنج سطح (۱۵، ۲۲/۵، ۳۰، ۳۷/۵ و ۴۵ میلی‌متر بر ساعت) و شیب در سه سطح ۱، ۳ و ۵ درصد با استفاده از نرم‌افزار SPSS 26 انجام شد. نتایج تحلیل واریانس، حاکی از اثرات معنی‌دار سطوح مختلف شیب و شدت باران بر مقادیر متغیرهای اندازه‌گیری‌شده شامل حجم رواناب، ضریب رواناب، غلظت رسوب و هدررفت خاک در سطح معنی‌داری یک درصد است. همچنین نتایج آزمون دانکن بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد برای تمامی متغیرهای اندازه‌گیری شده‌است؛ به طوری که بیشترین و کمترین افزایش مقادیر میانگین به ازای افزایش شیب از ۱ به ۵ درصد، مربوط به هدررفت خاک و ضریب رواناب و به ترتیب برابر با ۱۸۲ و ۵ درصد افزایش در مقادیر میانگین آنها است. بیشترین تغییر در بین پارامترهای اندازه‌گیری، به ازای تغییر یک سطح متغیر شیب از ۱ به ۳ درصد در مقدار میانگین هدررفت خاک دیده می‌شود که برابر با ۴۱/۷۵ گرم افزایش بوده است. با افزایش شدت باران از ۱۵ به ۴۵ میلی‌متر بر ساعت میانگین تمامی متغیرهای مورد اندازه‌گیری شامل حجم رواناب، ضریب رواناب، غلظت رسوب و هدررفت خاک به ترتیب برابر با ۳۴۱، ۲۰، ۶۳۵ و ۴۴۶ درصد افزوده می‌شود.

واژگان کلیدی: تحلیل تجزیه واریانس، شبیه‌ساز باران، ضریب رواناب، فرسایش خاک.

۱ـ مقدمه

مطالعهٔ باران و فرایندهای هیدرولوژیکی مرتبط با آن با توجه به جنبه‌های مختلف قابل مطالعه از جمله خصوصیات رواناب ایجاد شده، نفوذ و فرسایش خاک، همواره از سوی محققان قابل‌توجه بوده‌است. یکی از راه‌های ارزیابی اثرات

* نویسنده مسئول: m-mohammadighaleni@araku.ac.ir

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.8.3]

باران بر متغیرهایی مانند مشخصات رسوب و میزان هدررفت خاک، استفاده از شبیه‌ساز باران است که تـا کنـون از آن در تحقیقـات زیـادی اسـتفاده شـده‌اسـت (Askoy et al, 2012 & Mhaske et al, 2019 & Abudi et al, 2012).

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.8.3]

مهم‌ترین مزایای استفاده از شبیه‌سازی باران، سرعت در عمل، کارایی، قابلیت کنترل و انعطاف‌پذیری بیشتر آن نسبت به باران‌های طبیعی است (Meyer and Harmon, 1979). به طور کلی، شبیه‌سازهای باران شامل دو نوع قطره‌ساز و نازل تحت فشار است. در نوع اول، قطرات بدون سرعت اولیه و تنها در اثر نیروی ثقل سقوط می‌کنند؛ بنابراین، به ارتفاع زیادی نیاز دارند تا قطرات به سرعت حد برسند. به علاوه، این شبیه‌سازها نمی‌توانند توزیع مناسبی از دامنه اندازهٔ قطرات ارائه دهند. در شبیه‌سازهای زیر فشار، قطرات سرعت اولیه داشتند؛ بنابراین برای رسیدن به سرعت حد، در مقایسه با شبیه‌سازهای نوع اول به ارتفاع کمتری نیاز دارند. همچنین این شبیه‌سازها، قابلیت تغییر شدت بارندگی را در دامنهٔ نسبتاً بیشتری دارند. در شرایط صحرایی، شبیه‌سازی باران برای کمی‌سازی فرایندهای رواناب و فرسایش کاربرد دارد. برای تعیین عوامل منفرد مؤثر بر رواناب و فرسایش، شبیه‌سازی باران در شرایط آزمایشگاهی نیز مناسب است (Gómez and Nearing, 2005).

اکثر تحقیقات مرتبط با کاربرد شبیه‌ساز باران در ارزیابی مقدار رواناب و تولید رسوب، بر اساس متغیرهای شدت باران (Kiani Harchegani et al, 2018 & Kord et al, 2020 & Assouline and Ben-Hur, 2006 & Mhaske et al, 2019)، شیب سطح خاک (Zare et al, 2012 & Farzi et al, 2016 & Gómez and Nearing, 2005 & Cheng et al, 2008)، بافت خاک (Zarei et al, 2020 & Foroumadi and Vaezi, 2020) و پوشش سطح خاک (Azartaj et al, 2017 & Mohammadamini et al, 2020 & Hejabi and Bashiri, 2010) خلاصه می‌شود. نتایج این تحقیقات بیانگر افزایش معنی‌دار مقدار هدررفت خاک در اثر تغییر شیب در سطح یک درصد است (Zarei et al, 2020 & Zare et al, 2012). ضریب و حجم رواناب نیز در برخی از تحقیقات در سطح پنج درصد معنی‌دار (Farzi et al, 2016) و در برخی دیگر غیرمعنی‌دار (Zare et al, 2012) بوده‌است.

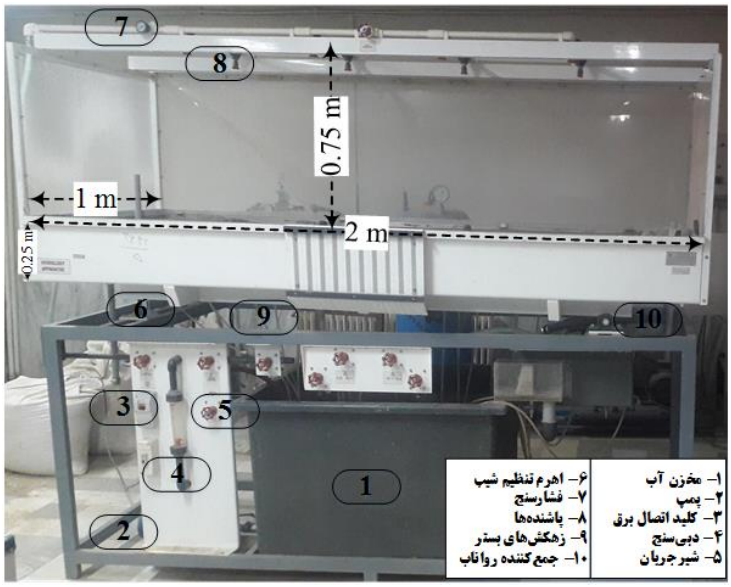
در سالیان اخیر با توجه به پیشرفت تجهیزات و امکانات بیشتر، تحقیقات آزمایشگاهی جدید بر فرسایش پاشمانی (Foroumadi and Vaezi, 2020 & Zambon et al, 2021)، کاربری اراضی و پوشش گیاهی (Mayerhofer et al, 2017 & Mendes et al, 2021 & Parvizi et al, 2020) و برآورد عدد منحنی (Kincl et al, 2021) متمرکز شده‌است. این تحقیقات از نقش بیشتر ذرات سیلت در فرسایش پاشمانی (Foroumadi and Vaezi, 2020 & Zambon et al, 2021) و اثر معنی‌دار پوشش گیاهی بر رواناب و هدررفت خاک (Parvizi et al, 2020 & Mendes et al, 2021) حکایت دارد. جمع‌بندی سابقهٔ تحقیق نشان می‌دهد که از شبیه‌ساز باران برای تحقیق در موضوعات مختلفی استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر با توجه به پیشرفت تجهیزات و امکانات آزمایشگاهی، کاربرد شبیه‌ساز باران جنبه‌های متنوع‌تر و تخصصی‌تری یافته‌است. با وجود تحقیقات زیادی که با استفاده از شبیه‌ساز باران انجام شده و با توجه به متفاوت بودن نتایج در مناطق مطالعاتی مختلف و لزوم توسعهٔ کاربرد این دستگاه‌ها، اجرای تحقیقات بیشتر در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد. هدف از مقالهٔ حاضر، بررسی تغییرات متغیرهای حجم رواناب، ضریب رواناب، غلظت رسوب و هدررفت خاک در اثر تغییر دو متغیر شیب در سه سطح ۱، ۳ و ۵ درصد و متغیر شدت باران در پنج سطح ۴۵، ۳۷/۵، ۳۰، ۲۲/۵ و ۱۵ میلی‌متر بر ساعت با استفاده از شبیه‌ساز باران است.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.8.3]

۲ـ مواد و روش‌ها

شبیه‌ساز باران مورد استفاده

شبیه‌ساز باران مورد استفاده در تحقیق حاضر، از تجهیزات موجود در آزمایشگاه هیدرولوژی دانشگاه اراک است. این دستگاه، ده قسمت اصلی دارد که در شکل ۱ نیز دیده می‌شود.



شکل ۱: تجهیزات دستگاه شبیه‌ساز باران مورد استفاده در تحقیق حاضر

مخزن آب شبیه‌ساز باران مورد استفاده، دارای ابعاد (۰/۶۰×۰/۷۵×۱ متر) با حجم برابر ۴۵۰ لیتر است. پمپ مورد استفاده، ساخت شرکت استریم ایتالیا مدل SQB70 با ۰/۷۵ اسب بخار توان با دبی و ارتفاع ماکزیمم به ترتیب برابر با ۴۵ لیتر بر دقیقه و ۶۷ متر است. بر اساس دبی‌سنج نصب شده در مسیر جریان آب و با استفاده از شیرهای تنظیم جریان، دبی سیستم از حدود پنج تا بیست لیتر بر دقیقه قابل تنظیم است. تنظیم شیب در شبیه‌ساز باران با استفاده از دو اهرم دستی و با قابلیت تغییر ارتفاع تا ۰/۱۰ متر صورت می‌گیرد. فشارسنج در ابتدای مسیر توزیع جریان در پاشنده‌ها از نوع روغنی ده بار نصب شده‌است. تعداد هشت عدد پاشندهٔ مدل QPHA3.5 پرومکس، با قطر روزنهٔ ۱/۶ میلی‌متر و با دبی حدود ۲/۶ لیتر بر دقیقه، در سه بار فشار برای شبیه‌سازی باران استفاده شده‌است. برای تخلیهٔ نفوذ عمقی آب، بیست عدد روزنه با قطر ده میلی‌متر در کف محدودهٔ باران تعبیه شد که توسط لوله‌هایی مطابق شکل ۱ (قسمت ۹)، این آب به مخزن هدایت می‌شود. رواناب سطحی حاصل از باران نیز توسط جمع‌کننده‌ای در انتهای محدودهٔ باران، جمع و توسط لوله‌ای به ظرف اندازه‌گیری رواناب هدایت می‌شود.

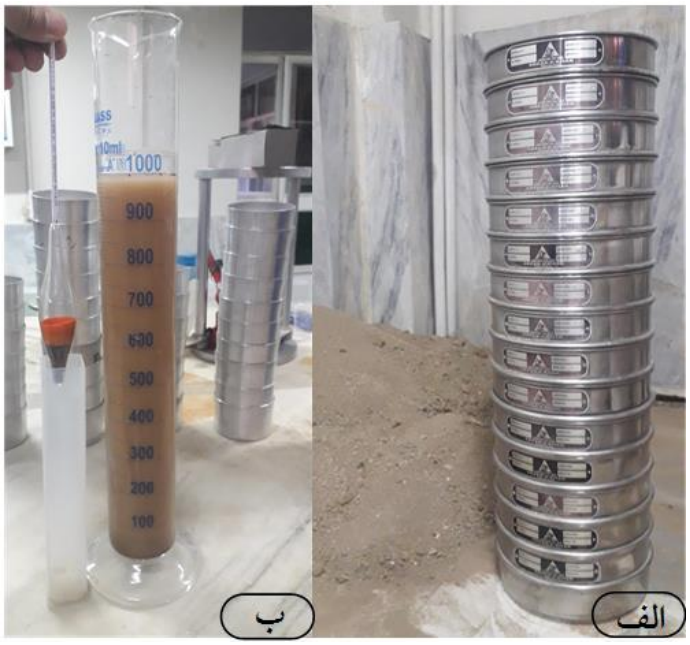
خاک مورد مطالعه

اجرای تحقیقات با استفاده از دستگاه‌های شبیه‌ساز باران با توجه به قابل حمل بودن یا نبودن دستگاه موردنظر، می‌تواند در محل اجرای آزمایش بر روی خاک دست نخورده یا با انتقال خاک به محل آزمایشگاه انجام شود. در تحقیق حاضر با توجه به قابل حمل نبودن دستگاه شبیه‌ساز باران، خاک مورد استفاده از مزرعهٔ تحقیقاتی دانشکدهٔ

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.8.3]

کشاورزی و محیط زیست دانشگاه اراک تهیه شد. علت انتخاب مکان نمونه‌برداری، ارزیابی توان فرسایش خاک برای مدیریت و حفاظت از منابع خاک در این مزرعه است. با توجه به نقش بیشتر لایهٔ سطحی خاک در فرایند تولید رواناب و رسوب، خاک مورد استفاده از عمق صفر تا ده سانتی‌متر برداشت شد (Behtari and Vaezi, 2018).

به منظور اجرای آماده‌سازی سطح باران، ابتدا خاک مورد استفاده با استفاده از سری الک‌ها دانه‌بندی شد. در ادامه با مخلوط کردن خاک با دانه‌بندی‌های مختلف، حجمی از خاک برابر با یک مترمکعب با نسبت‌های تقریباً مساوی از شن، سیلت و رس تهیه شد. برای تعیین دقیق بافت خاک نیز از روش هیدرومتری با استفاده از هیدرومتر مدل 152H استفاده شد. بافت خاک مورد استفاده در تحقیق حاضر، لوم رسی با نسبت‌های رس، سیلت و شن به ترتیب برابر ۳۱، ۳۶ و ۳۳ درصد مشخص شد. در شکل ۲، مراحل دانه‌بندی و تعیین بافت خاک نشان داده شده‌است.



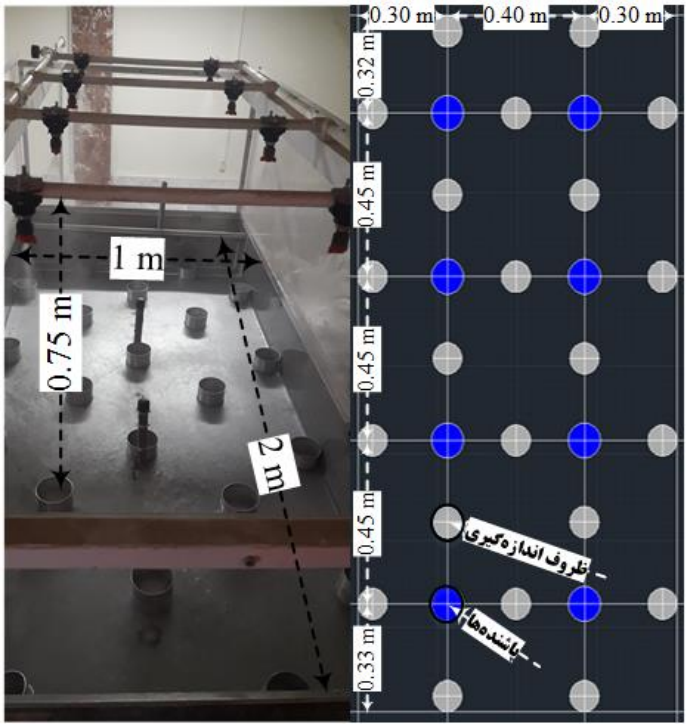
شکل ۲: دانه‌بندی خاک (الف) و تعیین بافت آن به روش هیدرومتری (ب)

خصوصیات خاک مورد استفاده شامل وزن مخصوص ظاهری، وزن مخصوص حقیقی و درصد کربن آلی به ترتیب با استفاده از روش‌های نسبت وزن نمونه‌های خشک و تر، پیکنومتر و روش والکی بلاک اندازه‌گیری شد (Azartaj et al, 2017). مشخصات خاک مورد استفاده شامل وزن مخصوص ظاهری، وزن مخصوص حقیقی و درصد کربن آلی به ترتیب برابر ۱/۳۵ و ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و ۰/۸۱ درصد بود.

اندازه‌گیری متغیرهای مورد بررسی

یکی از مهم‌ترین مشخصات باران طبیعی، یکنواختی پاشیدن آن است که در تحقیق حاضر، ضریب یکنواختی پاشش باران شبیه‌سازی شده در شدت‌های مختلف با استفاده از ضریب کریستانسین اندازه‌گیری شد و شکل ۳، نحوهٔ اندازه‌گیری این ضریب را نشان می‌دهد.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.8.3]



شکل ۳: اندازه‌گیری یکنواختی پاشش باران بر اساس ضریب کریستیانسن

مطابق شکل ۳ به منظور اندازه‌گیری ضریب یکنواختی کریستیانسن، از ۲۲ عدد ظرف دایره‌ای شکل به قطر ۸/۵ سانتی‌متر استفاده شد. پس از اندازه‌گیری مقدار آب جمع‌شده در این ظروف با استفاده از رابطهٔ ۱، مقادیر ضریب یکنواختی پاشش در پنج نوع باران با شدت‌های مختلف محاسبه شد.

$$CU = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} |R_i - M|}{nM}$$ رابطهٔ ۱

در رابطهٔ ۱، CU ضریب یکنواختی پخش کریستیانسن به درصد، R_i حجم آب جمع شده در ظرف iام به میلی‌لیتر، M میانگین حجم آب جمع شده در ۲۲ ظرف اندازه‌گیری به میلی‌لیتر و n تعداد کل ظرف‌های اندازه‌گیری است.

آزمایش‌های تحقیق حاضر، در قالب دو متغیر شدت باران در پنج سطح (۱۵، ۲۲/۵، ۳۰، ۳۷/۵ و ۴۵ میلی‌متر بر ساعت) و شیب سطح خاک در سه سطح با شیب‌های ۱، ۳ و ۵ درصد با سه مرتبه تکرار (۴۵ آزمایش) انجام شد. انتخاب سطوح مختلف شیب سطح و شدت باران، بر اساس مرور تحقیقات انجام شده و محدودیت‌های دستگاه شبیه‌ساز باران انجام شد. شدت باران‌های در نظر گرفته شده در مطالعات داخلی با توجه به شرایط مختلف هر تحقیق، دارای مقادیر متفاوتی از ۲۵ تا ۹۰ میلی‌متر بر ساعت (Zarei et & Farzi et al, 2016 & Foroumadi and Vaezi, 2020 & Parvizi et al, 2020 & Kiani Harchegani et al, 2018 & Mohammadamini et al, 2020 & al, 2020) متغیر است. بر این اساس، شدت‌های باران در تحقیق حاضر از ۱۵ تا ۴۵ میلی‌متر بر ساعت در نظر گرفته شد. همچنین با توجه به محدودیت دستگاه شبیه‌ساز باران استفاده شده برای متغیر شیب و حداکثر برابر با پنج درصد، سه سطح شیب ۱، ۳ و ۵ درصد برای آزمایش‌ها انتخاب شد.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.8.3]

در هر مرتبه از اجرای آزمایش متغیرهای حجم رواناب، وزن هدررفت خاک، غلظت رسوب و ضریب رواناب اندازه‌گیری شد. به منظور ایجاد جریان نفوذ عمقی نیز ابتدا یک لایهٔ پنج سانتی‌متری شن درشت در بستر صفحهٔ باران ریخته شد تا جریان نفوذ عمقی راحت‌تر انجام شود. پس از آن لایه‌ای بیست سانتی‌متری از خاک لوم رسی تهیه شد و روی لایهٔ زهکش قرار گرفت. به منظور یکسان بودن شرایط آزمایش‌ها پس از هر بار تکرار، لایه‌ای پنج سانتی‌متری از خاک روی سطح خاک آزمایش قبلی ریخته شد. سپس اشباع خاک صورت گرفت و اندازه‌گیری‌های تکرار بعدی شروع شد. اشباع خاک، با وارد کردن آب با استفاده از لوله‌های تعبیه شده در زیر صفحهٔ باران (لوله‌های زهکش و خروجی‌های ابتدا و انتهای صفحه باران) انجام و آزمایش‌ها پس از گذشت ۲۴ ساعت (به منظور خارج شدن آب اضافی از حجم خاک) از غرقاب شدن سطح خاک شروع شد. شکل ۴، لایه زهکش و بستر خاک آمادهٔ آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۴: لایه زهکش (الف) و سطح خاک آماده در هر تکرار آزمایش (ب)

در هر ۴۵ تکرار آزمایش، چهار پارامتر شامل حجم رواناب با استفاده از استوانه‌های مدرج با دقت میلی‌لیتر، وزن هدررفت خاک با استفاده از ترازو با دقت یک صدم گرم، غلظت رسوب بر حسب گرم در لیتر و ضریب رواناب بر حسب درصد اندازه‌گیری شد. همچنین در هر تکرار آزمایش، نمونه‌ای ۱/۵ لیتری به منظور تعیین وزن هدررفت خاک و غلظت رسوب تهیه شد. پس از گذراندن این حجم از کاغذ صافی واتمن ۴۲، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون در دمای ۱۰۵ درجهٔ سانتی‌گراد قرار گرفت و با توزین، وزن هدررفت خاک محاسبه شد (Zare et al, & Seeger, 2007 2012). از تقسیم وزن هدررفت خاک به حجم نمونه، غلظت رسوب در هر مرتبه از اجرای آزمایش محاسبه شد. به

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.8.3]

منظور محاسبهٔ ضریب رواناب، حجم رواناب خروجی بر حجم بارندگی تقسیم و به صورت درصد بیان شد. شکل ۵، تصاویری از روند اجرای آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۵: شبیه‌سازی باران (الف)، اندازه‌گیری رواناب و رسوب (ب)، برداشت حجم نمونه (پ)، جداسازی رسوب (ت)، خشک کردن و توزین رسوب (ث) و اجرای تحلیل‌های آماری (ج)

تجزیه و تحلیل آماری

پس از اجرای مطالعات آزمایشگاهی و اندازه‌گیری متغیرهای حجم رواناب، وزن هدررفت خاک، غلظت رسوب و ضریب رواناب در هر تکرار آزمایش، از نرم‌افزار SPSS 26 به منظور اجرای تحلیل‌های آماری استفاده شد. در مرحلهٔ نخست به منظور بررسی نرمال بودن داده‌ها، از آزمون کلموگروف اسمیرنوف در سطح پنج درصد استفاده شد (Geissen et al, 2009). تحلیل تجزیه واریانس برای متغیرهای شدت باران در پنج سطح و درصد شیب در سه سطح به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایهٔ کاملاً تصادفی انجام شد. برای بررسی معنی‌داری میانگین‌ها نیز از آزمون مقایسهٔ میانگین دانکن در سطح معنی‌داری یک درصد استفاده شد (Parvizi et al, 2020). درصد تغییرات میانگین متغیرها بر اساس رابطهٔ ۲ محاسبه می‌شود.

$$\%\Delta = \frac{A-B}{B} \times 100$$ رابطهٔ ۲

در رابطهٔ ۲، $\%\Delta$ درصد تغییرات، A مقدار متغیر در سطح جدید تیمار و B مقدار متغیر در سطح قبلی تیمار است.

۳ـ یافته‌ها (نتایج)

نتایج آزمون کلموگروف اسمیرنوف حاکی از نرمال بودن داده‌های حجم رواناب، ضریب رواناب، غلظت رسوب و هدررفت خاک برای دو تیمار شیب و شدت باران در سطح معنی‌داری پنج درصد است. نتایج تجزیه واریانس متغیرهای اندازه‌گیری‌شده در تحقیق حاضر، به صورت جدول ۱ است.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.8.3]

جدول ۱: تحلیل واریانس متغیرهای اندازه‌گیری شده در تحقیق حاضر

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		حجم رواناب (میلی‌لیتر)	ضریب رواناب (درصد)	غلظت رسوب (گرم در لیتر)	هدررفت خاک (گرم)
شیب (درصد)	۲	۵۴۹۳۴/۰۱**	۰/۷**	۴۴/۳۴**	۱۶۵۳۶/۱۴**
شدت باران (میلی‌متر در ساعت)	۴	۸۴۳۷۸۸۰/۰۳**	۲/۸**	۴۹/۲۲**	۱۲۴۰۰/۲۴**
شیب× شدت باران	۸	۱۱۳۱۵/۳۵**	۰/۱**	۳/۳۰**	۱۱۸۶/۴۶**
خطا	۳۰	۵۵۲/۸۱	۸/۶۷E-۳	۰/۰۳۸	۱۳/۷۳

**: معنی‌داری در سطح یک درصد را نشان می‌دهد.

جدول ۱، حاکی از معنی‌داری تمامی متغیرهای اندازه‌گیری‌شده به ازای تیمارهای شیب و شدت باران و اثرات متقابل آنها (شیب × شدت باران) در سطح معنی‌داری یک درصد است؛ به عبارتی، سطوح مختلف شیب (۱، ۳ و ۵ درصد) و همچنین شدت‌های مختلف باران (۴۵، ۳۷/۵، ۳۰، ۲۲/۵ و ۱۵ میلی‌متر بر ساعت) بر مقادیر متغیرهای اندازه‌گیری‌شده شامل حجم رواناب، ضریب رواناب، غلظت رسوب و هدررفت خاک اثرات معنی‌داری داشته‌است. همچنین بر اساس جدول ۱ اثرات متقابل شیب و شدت باران بر مقادیر متغیرهای اندازه‌گیری‌شده، اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد نشان می‌دهد. جدول ۲ نتایج آزمون دانکن برای مقایسهٔ میانگین متغیرهای حجم رواناب، ضریب رواناب، غلظت رسوب و هدررفت خاک را برای شیب‌های مختلف (۱، ۳ و ۵ درصد) در سطح معنی‌داری یک درصد نشان می‌دهد.

جدول ۲: مقایسهٔ میانگین متغیرهای مورد اندازه‌گیری در شیب‌های مختلف با استفاده از آزمون دانکن

شیب (درصد)	حجم رواناب (میلی‌لیتر)	ضریب رواناب (درصد)	غلظت رسوب (گرم در لیتر)	هدررفت خاک (گرم)
۱	۱۸۶۴±۸۵۰^{c}	۷۸±۴^{c}	۲/۰۸±۱/۴^{c}	۳۶/۱۴±۲۰^{c}
۳	۱۹۱۲±۸۸۶^{b}	۸۰±۵^{b}	۴/۳۴±۲/۴^{b}	۷۷/۸۹±۳۶^{b}
۵	۱۹۸۴±۹۵۵^{a}	۸۳±۶^{a}	۵/۴۵±۲/۹^{a}	۱۰۱/۷۳±۵۱^{a}

a، b و c: اعداد (میانگین±انحراف معیار) دارای حروف مختلف در یک ستون، در سطح یک درصد اختلاف معنی‌دار دارد.

بر اساس نتایج جدول ۲، میانگین‌های هر چهار متغیر حجم رواناب، ضریب رواناب، غلظت رسوب و هدررفت خاک در سطوح مختلف شیب (۱، ۳ و ۵ درصد)، اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد دارد. نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که افزایش شیب در سطوح مختلف از یک تا پنج درصد، به افزایش میانگین متغیرهای حجم رواناب، ضریب رواناب، غلظت رسوب و هدررفت خاک منجر شده‌است.

بیشترین و کمترین افزایش مقادیر میانگین به ازای افزایش شیب، از ۱ به ۵ درصد مربوط به هدررفت خاک و ضریب رواناب و به ترتیب، برابر با ۱۸۲ و ۵ درصد افزایش در مقادیر میانگین آنها است. همچنین بیشترین تغییر در بین پارامترهای اندازه‌گیری به ازای تغییر یک سطح متغیر شیب، از ۱ به ۳ درصد در مقدار میانگین هدررفت خاک و برابر با ۴۱/۷۵ گرم افزایش داشته‌است. جدول ۳، نتایج آزمون دانکن برای مقایسهٔ میانگین متغیرهای حجم رواناب،

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.8.3]

ضریب رواناب، غلظت رسوب و هدررفت خاک را برای سطوح مختلف شدت باران (۴۵، ۳۷/۵، ۳۰، ۲۲/۵ و ۱۵ میلی‌متر بر ساعت) در سطح معنی‌داری یک درصد نشان می‌دهد.

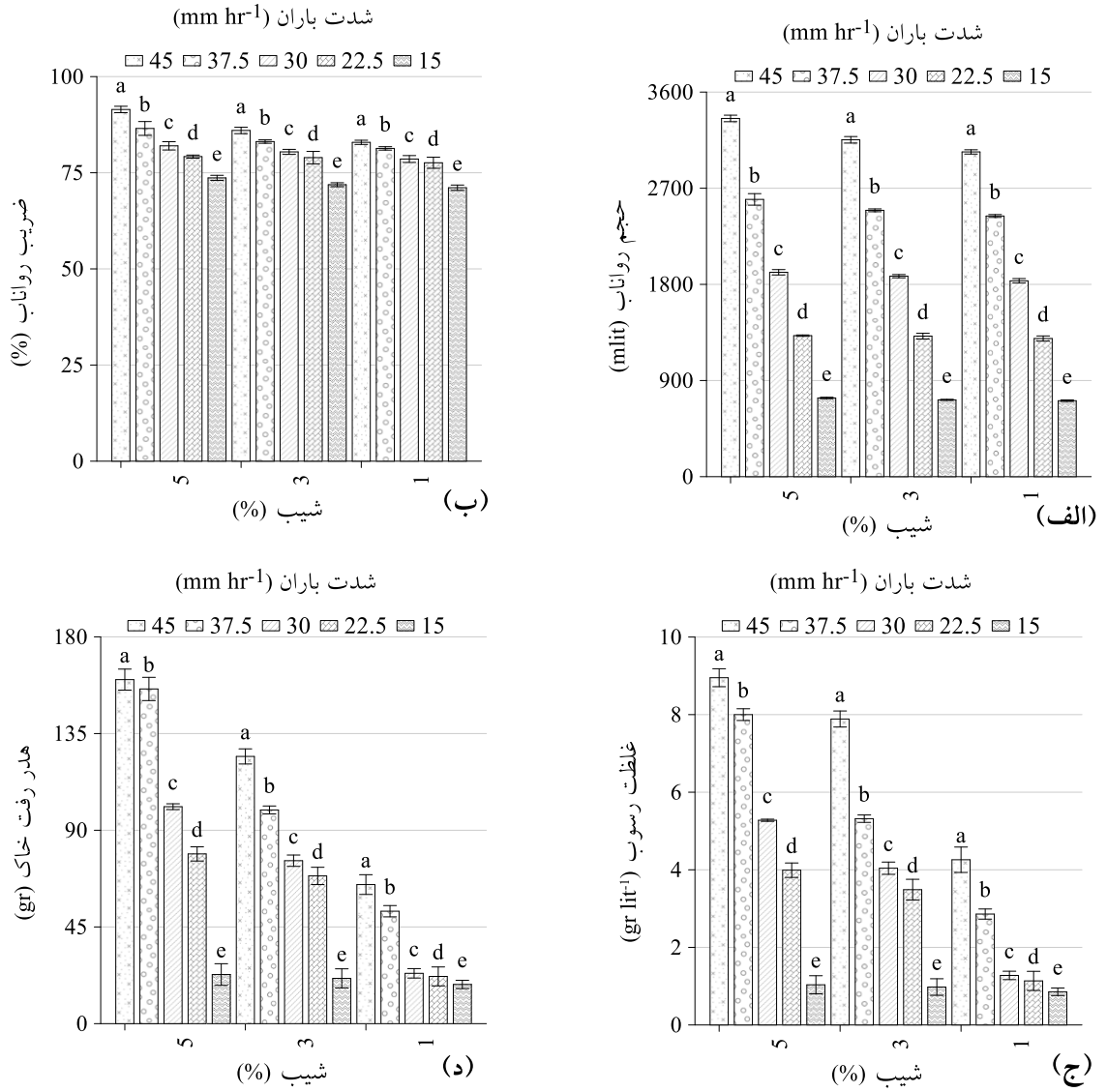
جدول ۳: مقایسهٔ میانگین متغیرهای مورد اندازه‌گیری در شدت‌های مختلف باران با استفاده از آزمون دانکن

شدت باران (میلی‌متر بر ساعت)	حجم رواناب (میلی‌لیتر)	ضریب رواناب (درصد)	غلظت رسوب (گرم در لیتر)	هدررفت خاک (گرم)
۱۵	۷۲۲±۱۳^{e}	۷۲±۱^{e}	۰/۹۶±۰/۲^{e}	۲۰/۷۲±۴^{e}
۲۲/۵	۱۳۱۰±۲۲^{d}	۷۹±۱^{d}	۲/۸۷±۱/۳^{d}	۵۶/۵۷±۲۷^{d}
۳۰	۱۸۷۴±۳۹^{c}	۸۰±۲^{c}	۳/۵۳±۱/۸^{c}	۶۶/۷۴±۳۴^{c}
۳۷/۵	۲۵۱۰±۷۴^{b}	۸۴±۲^{b}	۵/۳۹±۲/۲^{b}	۱۰۲/۵۱±۴۵^{b}
۴۵	۳۱۸۲±۱۳۹^{a}	۸۷±۴^{a}	۷/۰۳±۲/۱^{a}	۱۱۳/۰۶±۳۸^{a}

a، b، c، d و e: اعداد (میانگین±انحراف معیار) دارای حروف مختلف در یک ستون، در سطح یک درصد اختلاف معنی‌داری دارد.

جدول ۳، حاکی از اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد برای تمامی متغیرهای مورد اندازه‌گیری شامل حجم رواناب، ضریب رواناب، غلظت رسوب و هدررفت خاک به ازای سطوح مختلف شدت باران است. با افزایش شدت باران از ۱۵ به ۴۵ میلی‌متر بر ساعت میانگین تمامی متغیرهای مورد اندازه‌گیری شامل حجم رواناب، ضریب رواناب، غلظت رسوب و هدررفت خاک به ترتیب برابر با ۳۴۱، ۲۰، ۶۳۵ و ۴۴۶ درصد افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار اختلاف در بین متغیرهای مورد اندازه‌گیری در تغییر شدت باران، از ۱۵ به ۲۲/۵ میلی‌متر بر ساعت اتفاق افتاد؛ به طوری‌که حجم رواناب ۵۸۷ میلی‌لیتر، ضریب رواناب ۷ درصد، غلظت رسوب ۲ گرم بر لیتر و هدررفت خاک ۳۶ گرم به ازای تغییر شدت باران از ۱۵ به ۲۲/۵ میلی‌متر بر ساعت افزایش یافت. با توجه به معنی‌دار شدن اثر متقابل متغیرهای شیب و شدت باران، معنی‌داری اختلاف میانگین متغیرهای اندازه‌گیری‌شده به تفکیک سطوح مختلف هر دو متغیر شیب و شدت باران در شکل ۶ نشان داده شده‌است.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.8.3]



شکل ۶: مقایسهٔ میانگین‌های حجم رواناب (الف)، ضریب رواناب (ب)، غلظت رسوب (ج) و هدررفت خاک (د) در اثرات متقابل متغیرهای شیب و شدت باران

به طور کلی، شکل ۶ (الف ــ د) حاکی از وجود اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد بین میانگین متغیرهای حجم رواناب، ضریب رواناب، غلظت رسوب و فرسایش (هدررفت) خاک در تمامی اثرات متقابل سطوح مختلف متغیرهای شیب و شدت باران است. با توجه به شکل ۶ ــ الف، بیشترین و کمترین میانگین حجم رواناب اندازه‌گیری‌شده مربوط به شیب پنج درصد با شدت باران ۴۵ میلی‌متر بر ساعت و شیب یک درصد با شدت باران ۱۵ میلی‌متر بر ساعت و به ترتیب برابر ۳۳۵۳ و ۷۱۱ میلی‌لیتر است. بیشترین خطای استاندارد در اندازه‌گیری حجم رواناب مربوط به تکرارهای آزمایش شیب پنج درصد با شدت باران ۳۷/۵ میلی‌متر بر ساعت و برابر ۵۴ میلی‌لیتر است. همچنین بیشترین افزایش حجم رواناب در بین ۱۵ اثر متقابل دو متغیر، مربوط به افزایش شدت باران از ۳۷/۵ به ۴۵ میلی‌متر در ساعت در شیب پنج درصد و برابر ۷۵۸ میلی‌لیتر است.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.8.3]

بر اساس شکل ۶ ــ ب تغییرات میانگین ضریب رواناب از ۷۱ درصد در شیب یک درصد با شدت ۱۵ میلی‌متر در ساعت تا ۹۱ درصد در شیب پنج درصد با شدت باران ۴۵ میلی‌متر در ساعت متغیر است. بیشترین خطای استاندارد ضریب رواناب، مربوط به تکرارهای آزمایش شیب پنج درصد با شدت باران ۳۷/۵ میلی‌متر بر ساعت و برابر ۱/۸ درصد است. شکل ۶ ــ ج نشان می‌دهد که بیشترین افزایش غلظت رسوب در شیب پنج درصد به ازای افزایش شدت باران، از ۱۵ به ۲۲/۵ میلی‌متر بر ساعت و برابر سه گرم در لیتر اندازه‌گیری شده‌است. بیشترین و کمترین غلظت رسوب به ترتیب در شیب پنج درصد با شدت باران ۴۵ میلی‌متر در ساعت و شیب یک درصد با شدت ۱۵ میلی‌متر در ساعت و برابر ۸/۹۵ و ۰/۸۶ گرم در لیتر اندازه‌گیری است. بیشترین فرسایش یا هدررفت خاک در شیب پنج درصد با شدت باران ۴۵ میلی‌متر بر ساعت نیز برابر ۱۶۰/۱ گرم و کمترین آن در شیب یک درصد با شدت باران ۱۵ میلی‌متر بر ساعت و برابر ۱۸/۲ گرم اندازه‌گیری شده‌است (شکل ۶ ــ د). بیشترین افزایش هدررفت خاک در شیب پنج درصد به ازای افزایش شدت باران، از ۱۵ به ۲۲/۵ میلی‌متر بر ساعت و برابر ۵۶ گرم اندازه‌گیری شده‌است.

۴ـ بحث و نتیجه‌گیری

بررسی ارتباط بین میزان فرسایش خاک و متغیرهای اقلیمی و محیطی مانند مشخصات باران (شدت، مدت و فراوانی)، شیب اراضی، پوشش گیاهی و مشخصات خاک (بافت، ساختمان، درصد مواد آلی و ...) به منظور جلوگیری از هدررفت منابع خاک ضرورت دارد. یکی از راه‌های ارزیابی میزان فرسایش و هدررفت خاک، اجرای آزمایش‌ها با استفاده از شبیه‌ساز باران با لحاظ سطوح مختلف برای متغیرهای مؤثر بر میزان هدررفت خاک است. تحقیقات بسیاری با استفاده از دستگاه‌های شبیه‌ساز باران به منظور ارزیابی اثرات متغیرهایی مانند شدت باران، قطر قطره‌های باران، انرژی جنبشی قطره‌های باران، بافت خاک، درصد مواد آلی خاک، رطوبت خاک، شیب سطح خاک، پوشش گیاهی و ... روی مشخصات رواناب و رسوب انجام شده‌است.

تحقیق حاضر با هدف ارزیابی اثرات دو متغیر شیب در سه سطح ۱، ۳ و ۵ درصد و متغیر شدت باران در پنج سطح ۴۵، ۳۷/۵، ۳۰، ۲۲/۵ و ۱۵ میلی‌متر بر ساعت روی متغیرهای حجم رواناب، ضریب رواناب، غلظت رسوب و هدررفت خاک در مقیاس آزمایشگاهی با استفاده از شبیه‌ساز باران انجام شد. نتایج تحلیل واریانس فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی، حاکی از اثرات معنی‌دار تیمارهای شیب، شدت باران و اثرات متقابل آنها (شیب × شدت باران) بر تمامی متغیرهای اندازه‌گیری‌شده در سطح معنی‌داری یک درصد است. همچنین اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد بین میانگین متغیرهای حجم رواناب، ضریب رواناب، غلظت رسوب و هدررفت خاک در سطوح مختلف تیمارهای شیب و شدت باران با استفاده از آزمون دانکن مشخص شد. اختلاف معنی‌دار اثرات شیب و شدت باران در تحقیقات گذشته مانند Zare و همکاران (2012) و Salem and Meselhy (2021) روی متغیرهای ضریب رواناب و هدررفت خاک گزارش شده‌است. بیشترین هدررفت خاک در شیب پنج درصد با شدت باران ۴۵ میلی‌متر بر ساعت، برابر ۱۶۰/۱ گرم و کمترین آن در شیب یک درصد با شدت باران ۱۵ میلی‌متر بر ساعت و برابر ۱۸/۲ گرم اندازه‌گیری شده‌است. نتایج تحقیق Kord و همکاران (2020) پس از ارزیابی غلظت رسوب و هدررفت خاک‌های مختلف، حاکی از اثر بیشتر شیب سطح و شدت باران بر میزان هدررفت خاک است که با نتایج تحقیق حاضر مبنی بر افزایش حداکثری هدررفت خاک در شیب و شدت‌های باران زیاد، همخوانی دارد. Mhaske و همکاران (2019) در نتایج خود حداکثر

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.8.3]

هدررفت خاک را برابر با ۹۴۲ گرم برای باران با شدت ۱۴۸ میلی‌متر بر ساعت در مدت سی دقیقه عنوان کرد که با توجه به چند برابری شدت و مدت باران به نسبت تحقیق حاضر، مقدار هدررفت خاک منطقی است.

به طور کلی، نتایج تحقیق حاضر بیانگراثرات بیشتر متغیر شیب نسبت به متغیر شدت باران بر میزان هدررفت خاک است. این نکته بیانگر لزوم اجرای عملیات حفاظت از منابع خاک در سطوح شیب‌دار به منظور جلوگیری از فرسایش‌های شدید است. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده انواع بافت‌های مختلف خاک با پوشش‌های متفاوت به عنوان یکی از تیمارهای مورد بررسی در تغییرات متغیرهای رواناب و فرسایش بررسی شود. همچنین ارزیابی اثرات مشخصاتی از باران مانند قطر قطره‌ها و انرژی جنبشی قطره‌های باران، می‌تواند به عنوان ایده‌های جدید در تحقیقات آینده در نظر گرفته شود.

۵ ـ سپاس‌گزاری

تحقیق حاضر با استفاده از امکانات آزمایشگاه هیدرولوژی دانشگاه اراک در قالب طرح تحقیقاتی درون‌دانشگاهی به شمارهٔ ۹۸/۱۶۶۶ انجام شد که به این وسیله از دانشگاه اراک تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

1. Abudi, I.; Carmi, G.; & P. Berliner, 2012. Rainfall simulator for field runoff studies, *Journal of Hydrology*, 454, 76-81.
2. Aksoy, H.; Unal, N. E.; Cokgor, S.; Gedikli, A.; Yoon, J.; Koca, K.; ... & E. Eris, 2012. A rainfall simulator for laboratory-scale assessment of rainfall-runoff-sediment transport processes over a two-dimensional flume, *Catena*, 98, 63-72.
3. Assouline, S., & M. Ben-Hur., (2006). Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing. *Catena*. 66(3), 211-220.
4. Azartaj, E.; Rasoulzadeh, A.; Asghari, A.; & A. Esmali, 2017. Investigation of Gravel Fragment Effect on Runoff Yield and Soil Erosion Using Rainfall Simulation (Case study: Watershed of Almas Bridge, Ardabil), *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48(1), 105-111. (in Persian)
5. Behtari, M., & A. R. Vaezi., (2018). Effect of Initial Moisture on Runoff Generation and Soil Loss in Different Soil Textures under Simulated Rainfall Condition. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering.* 11(39), 11-21. (in Persian)
6. Cheng, Q.; Cai, Q.; & W. Ma, 2008. Comparative study on rain splash erosion of representative soils in China, *Chinese Geographical Science*, 18(2), 155-161.
7. Christiansen, J. E., 1942. Irrigation by sprinkling (Vol. 4). Berkeley: University of California.
8. Farzi, P.; Azarakhshi, M.; Rasoulzadeh, A.; & M. Bashiri, 2016. The Effects of Geological Units' Characteristics and Slope Gradient on Runoff and Sediment Yield Using Rainfall Simulator (Case study: Senobar Watershed, Torbat-e-Heydarieh), *Journal of Range and Watershed Managment*, 69(2), 437-447. (in Persian)
9. Foroumadi, M., & A. R. Vaezi., (2020). Effect of Surface Slope on the Selectivity of Particles in Splash Erosion in Different Soils. *Applied Soil Research*. 8(2), 99-111. (in Persian)
10. Geissen, V.; Sánchez-Hernández, R.; Kampichler, C.; Ramos-Reyes, R.; Sepulveda-Lozada, A.; Ochoa-Goana, S.; ... & S. Hernández-Daumas, 2009. Effects of land-use change on some properties of tropical soils—an example from Southeast Mexico, *Geoderma*, 151(3-4), 87-97.
11. Gómez, J. A., & M. A. Nearing., (2005). Runoff and sediment losses from rough and smooth soil surfaces in a laboratory experiment. *Catena*. 59(3), 253-266.
12. Hejabi-Jordovey, F., & M. Bashiri., (2021). The effect of surface rock fragments deployment pattern on soil erosion processes under simulated conditions. *Environmental Erosion Research Journal*. 11(1), 20-35. (in Persian)

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.8.3]

13. Kiani Harchegani, M.; Saeidi, P.; & S. H. Sadeghi, 2018. Analysis of rating loops of interrill erosion on consecutive storms under laboratory conditions, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(2), 293-302. (in Persian)
14. Kincl, D.; Kabelka, D.; Vopravil, J.; & D. Heřmanovská, 2021. Estimating the curve number for conventional and soil conservation technologies using a rainfall simulator, *Soil and Water Research*, 16(2), 95-102.
15. Kord, M.; Vaezi, A. R.; & M. H. Mahdian, 2020. Study of Changes in Sediment Concentration and Soil Loss and Its Temporal Variation in Different Conditions of Slope and Rainfall Intensity, *Water and Soil Science*, 30(2), 59-73. (in Persian)
16. Lasanta, T.; Garcıa-Ruiz, J. M.; Pérez-Rontomé, C.; & C. Sancho-Marcén, 2000. Runoff and sediment yield in a semi-arid environment: the effect of land management after farmland abandonment, *Catena*, 38(4), 265-278.
17. Le Bissonnais, Y.; Cerdan, O.; Lecomte, V.; Benkhadra, H.; Souchère, V.; & P. Martin, 2005. Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion, *Catena*, 62(2-3),111-124.
18. Loch, R. J., 2000. Effects of vegetation cover on runoff and erosion under simulated rain and overland flow on a rehabilitated site on the Meandu Mine, Tarong, Queensland, *Soil Research*, 38(2), 299-312.
19. Macedo, P. M. S.; Pinto, M. F.; Sobrinho, T. A.; Schultz, N.; Coutinho, T. A. R.; & D. F. de Carvalho, 2021. A modified portable rainfall simulator for soil erosion assessment under different rainfall patterns, *Journal of Hydrology*, 596, 126052.
20. Mayerhofer, C.; Meißl, G.; Klebinder, K.; Kohl, B.; & G. Markart, 2017. Comparison of the results of a small-plot and a large-plot rainfall simulator–Effects of land use and land cover on surface runoff in Alpine catchments, *Catena*, 156, 184-196.
21. Mendes, T. A.; Alves, R. D.; Gitirana, G. D. F. N.; Pereira, S. A. D. S.; Rebolledo, J. F. R.; & M. P. da Luz, 2021. Evaluation of Rainfall Interception by Vegetation Using a Rainfall Simulator, *Sustainability*, 13(9), 5082.
22. Meyer, L. D., & W. C. Harmon., (1979). Multiple-intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes. *Transactions of the ASAE*. 22(1), 100-0103.
23. Mhaske, S. N.; Pathak, K.; & A. Basak, 2019. A comprehensive design of rainfall simulator for the assessment of soil erosion in the laboratory, *Catena*, 172, 408-420.
24. Mohammadamini, H., & J. Alavi., (2020). Effects of Soil Surface Rock Fragments on Runoff Variables of Field Plots under Rainfall Simulation. *Journal of Watershed Management Research*. 11(22), 243-253. (in Persian)
25. Molina, A.; Govers, G.; Vanacker, V.; Poesen, J.; Zeelmaekers, E.; & F. Cisneros, 2007. Runoff generation in a degraded Andean ecosystem: Interaction of vegetation cover and land use, *Catena*, 71(2), 357-370.
26. Parvizi, Y.; Bayat, R.; Arabkhedri, M.; & S. Fatehi, 2020. Determination of Main Agents Affecting Soil Erosion in Rainfed Land of Kermanshah Province Using Rainfall Simulator, *Iranian Journal of Watershed Management Science & Engineering*, 14(49), 70- 83. (in Persian)
27. Salem, H. M., & A. A. Meselhy., (2021). A portable rainfall simulator to evaluate the factors affecting soil erosion in the northwestern coastal zone of Egypt. *Natural Hazards*. 105(3), 2937-2955.
28. Schiettecatte, W.; Ouessar, M.; Gabriels, D.; Tanghe, S.; Heirman, S.; & F. Abdelli, 2005. Impact of water harvesting techniques on soil and water conservation: a case study on a micro catchment in southeastern Tunisia, *Journal of Arid Environments*, 61(2), 297-313.
29. Seeger, M., 2007. Uncertainty of factors determining runoff and erosion processes as quantified by rainfall simulations, *Catena*, 71(1), 56-67.
30. Zambon, N.; Johannsen, L. L.; Strauss, P.; Dostal, T.; Zumr, D.; Cochrane, T. A.; & A. Klik, 2021. Splash erosion affected by initial soil moisture and surface conditions under simulated rainfall, *Catena*, 196, 104827.
31. Zare, K. M.; Najafinejad, A.; Noura, N.; & A. Kavian, 2012. Effects of slope and soil properties on runoff and soil loss using rainfall simulator, Chehel-chai watershed, Golestan province, *Journal of water and soil conservation*, 19(2), 165-178. (in Persian)
32. Zarei, B.; Gholami, L.; Kavian, A.; & K. Shahedi, 2020. Changes Study of Soil Loss using Poultry Manure in Various Time Periods, *Journal of Water and Soil Conservation*, 27(4), 1-21. (in Persian)

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.8.3]

The effect of slope and rainfall intensity on runoff and soil erosion using a rainfall simulator

Aref Jabbary Zahra: *M.Sc. Student in Water and Science Engineering, Water and Science Engineering Department, Faculty of Agriculture & Environment, Arak University, Arak*
Mehdi Mohammadi Ghaleni[1]: *Assistant professor, Water and Science Engineering Department, Faculty of Agriculture & Environment, Arak University, Arak*
Mahnoosh Moghaddasi: *Associate professor, Water and Science Engineering Department, Faculty of Agriculture & Environment, Arak University, Arak*
Hossein Dehban: *Ph.D., Water Research Institute, Research Institute of Water Resources Studies and Research, Ministry of Energy, Tehran*

Article History (Received: 2021/08/28 **Accepted:** 2021/12/2**)**

Extended abstract

1- Introduction

Soil erosion due to rainfall is influenced by various factors such as rainfall characteristics, slope, soil properties, land use, and other related factors. The aim of this study was to evaluate the effects of different levels of slope and rainfall intensity on runoff and sediment characteristics by using a rainfall simulator in the laboratory.

2- Methodology

In this study, changes in parameters of runoff volume, runoff coefficient, sediment concentration, and soil erosion due to changes in two slope factors at three levels of 1, 3, and 5% and rainfall intensity factor at five levels of 45, 37.5, 30, 22.5 and 15 mm hr^{-1} were measured using a rainfall simulator. Analysis of variance of the parameters measured in the experiments was performed with three replications in a factorial design in a completely randomized design using SPSS 23 software. Duncan's mean comparison test was also used to evaluate the significance of the difference between the means at the level of 5%.

3- Results

The results of the analysis of variance indicated the significant effects of different levels of slope and rainfall intensity on the values of the measured parameters including runoff volume, runoff coefficient, sediment concentration, and soil erosion at the level of one percent. The results of the Duncan test also showed a significant difference at the level of one percent for all measurement parameters, so that the highest and lowest increase in mean values for increasing the slope from 1 to 5 percent related to soil erosion and runoff coefficient which were equal to 182 and 5 percent, respectively. Also, the greatest change among the measurement parameters occurred in the average amount of soil erosion (116% increase) from a slope of 1 to 3% with a 41.75 gr increase in soil erosion. With increasing rainfall intensity from 15 to 45 mm hr^{-1}, the average of all measured parameters including runoff volume, runoff coefficient, sediment concentration, and soil erosion increased by 341, 20, 635, and 446%, respectively. The highest difference between the measured parameters occurred in changing the rainfall intensity from 15 to 22.5 mm hr^{-1} to the extent that runoff volume, runoff coefficient, sediment concentration, and soil erosion have increased 587 ml, 7%, 2 g lit^{-1}, and 36 g with change in rainfall intensity from 15 to 22.5 mm hr^{-1}.

4- Discussion & Conclusions

The results of the present study showed a significant difference between the mean parameters of runoff volume, runoff coefficient, sediment concentration, and soil erosion at different levels of slope and rainfall intensity treatments at the level of one percent. The highest and lowest increases in mean values for increasing slope from 1 to 5% were related to soil loss and runoff coefficient and were equal to 182 and 5% increase in

[1] **Corresponding Author: m-mohammadighaleni@araku.ac.ir**

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.8.3]

their mean values, respectively. With an increase in rainfall and its intensity from 15 to 45 mm hr^{-1}, the values of all studied variables, namely, runoff volume, runoff coefficient, sediment concentration, and soil erosion increased by 341, 20, 635, and 446%, respectively. The highest soil erosion was measured at a slope of 5% with a rainfall intensity of 45 mm hr^{-1}, equal to 160.1 gr, and the lowest at a slope of 1% with a rainfall intensity of 15 mm hr^{-1} and equal to 18.2 gr.

Key Words: Analysis of variance, Rainfall simulator, Runoff coefficient, Soil erosion.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.8.3]