



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources



Soil Science Society of Iran

Rill Erosion Morphometry in the Experimental Plots

Seyed Hamidreza Sadeghi^{*1}, Atefeh Jafarpoor², Mehdi Homaei³

1. Corresponding Author, Professor, Dept. of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran and Agrohydrology Research Group, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: sadeghi@modares.ac.ir
2. Former Ph.D. Student, Dept. of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran, At Present: Assistant Professor, Dept. of Natural Resources and Environment, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. E-mail: atefeh.jafarpoor@modares.ac.ir
3. Professor, Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran and Agrohydrology Research Group, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: mhomaei@modares.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Full Length Research Paper	Background and Objectives: Rill erosion is one of the most significant water erosion processes, driven by flow concentration. It is a major contributor to runoff and sediment yield on slopes, ultimately reducing soil fertility and posing a threat to food security. Understanding the process of rill development is crucial for effective soil and water resource management. However, its process and morphometry have yet to be sufficiently considered. Therefore, this study was designed to investigate the morphometry of rills in experimental plots under controlled laboratory conditions. The research was conducted at the Rainfall Simulation and Soil Erosion Laboratory, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran.
Article history: Received: 10.08.2022 Revised: 05.24.2024 Accepted: 05.28.2024	Materials and Methods: A simulated rainfall of 50 mm h ⁻¹ with a duration of 30 minutes and an additional runoff of 2 L min ⁻¹ was applied to erosion-prone soil from the Marzanabad Region, West Mazandaran, Iran, across three experimental plots. Runoff generation and soil loss were measured. Following the simulation experiments, the rill morphometric parameters-including rill formation time, length, width, depth, and density-were assessed. An ordinary measuring tape and a ruler were used to determine these parameters in the study plots.
Keywords: Concentrated Flow, Linear Erosion, Rill Erosion Processes, Soil Conservation	Results: The results indicated that runoff generation rates in the three studied plots were 21.59, 18.63, and 14.33 L m ⁻² , while soil loss was recorded as 9622, 2665, and 3117 g m ⁻² , respectively. The high runoff production in the study plots confirmed the presence of concentrated flow, which facilitated the formation of rills on the surface of the experimental plots, leading to significant soil loss. The number of rills formed in the study plots was 4, 3, and 4, with a total rill length of 7.41, 7.04, and 11.8 m and rill density values of 1.24, 1.17, and 1.35 m m ⁻² , respectively. The mean width of the rills in the study plots was 6.8 ± 3.5 cm, 3.5 ± 2.0 cm, and 7.2 ± 2.7 cm, while the mean depth was 6.7 ± 1.0 cm, 3.0 ± 1.0 cm, and 3.9 ± 2.0 cm, respectively.
	Conclusion: The findings of this study highlight the importance of investigating different rill erosion processes. The results showed that sediment transport energy in the experimental plots increased following the

initiation of concentrated flow, leading to initial, active, and sedimentation phases. The study confirmed that rills play a dual role as both a source of soil loss and a site of sediment deposition. These findings underscore the necessity of implementing preventive measures and controlling rill erosion in erosion-prone areas at early stages.

Cite this article: Sadeghi, Seyed Hamidreza, Jafarpour, Atefeh, Homaei, Mehdi. 2025. Rill Erosion Morphometry in the Experimental Plots. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 14 (4), 131-144.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/EJSMS.2025.20654.2076

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



ریخت‌سنجی فرسایش شیاری در کرت‌های آزمایشی

سیدحمیدرضا صادقی^{۱*}، عاطفه جعفرپور^۲، مهدی همایی^۳

۱. نویسنده مسئول، استاد گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران و عضو هسته آگروهیدرولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: sadeghi@modares.ac.ir
۲. دانش‌آموخته دکتری گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران و در حال حاضر استادیار گروه مهندسی محیط زیست و مهندسی طبیعت، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. رایانامه: atefeh.jafarpoor@modares.ac.ir
۳. استاد گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران و عضو هسته آگروهیدرولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: mhomaee@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۶ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۸	سابقه و هدف: فرسایش شیاری یکی از مهم‌ترین فرآیندهای فرسایش آبی است که در نتیجه تمرکز جریان به وجود می‌آید و یکی از منابع تولید رواناب و رسوب روی دامنه‌هاست. تشکیل شیار و حمل مواد مغذی در دامنه‌ها، حاصلخیزی خاک را کم کرده و باعث تهدید امنیت غذایی خواهد شد. از این رو، آگاهی از فرآیند توسعه شیار برای مدیریت منابع خاک و آب ضروری است. حال آن‌که فرآیند و ریخت‌سنجی آن به حد کفایت مورد توجه قرار نگرفته است. در همین راستا، پژوهش حاضر باهدف بررسی ریخت‌سنجی شیار در کرت‌های آزمایشی در شرایط آزمایشگاهی در آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش دانشگاه تربیت مدرس برنامه‌ریزی و انجام شد. مواد و روش‌ها: برای انجام پژوهش حاضر از بارش شبیه‌سازی شده ۵۰ میلی‌متر بر ساعت بادوام نیم ساعت به همراه رواناب اضافی ۲ لیتر در دقیقه بر خاک حساس به فرسایش منطقه مرزن‌آباد در سه کرت آزمایشی استفاده شد و رواناب تولیدی و هدررفت خاک اندازه‌گیری شد. همچنین پس از انجام آزمایش‌های شبیه‌سازی، مؤلفه‌های ریخت‌سنجی شیار شامل زمان شیاری شدن، طول، عرض، عمق و تراکم شیار اندازه‌گیری شد. ابزار اندازه‌گیری مؤلفه‌های ریخت‌سنجی شیارهای تشکیل‌شده در کرت‌های مطالعاتی شامل متر برای طول و خط‌کش برای اندازه‌گیری عرض و عمق بوده است. یافته‌ها: نتایج نشان داد که به‌طور متوسط میزان رواناب تولیدی در سه کرت مورد مطالعه ۲۱/۵۹، ۱۸/۶۳ و ۱۴/۳۳ لیتر بر مترمربع و هدررفت خاک نیز در کرت‌های آزمایشی ۹۶۲۲، ۲۶۶۵ و ۳۱۱۷ گرم بر مترمربع بوده است. بالا بودن میزان رواناب تولیدی در کرت‌های

مطالعاتی نشان‌دهنده وجود جریان متمرکز است که با شکل‌گیری شیار در سطح کرت آزمایشی، حمل‌کننده هدررفت بالایی از خاک بوده است. هم‌چنین تعداد شیارهای تشکیل‌شده در کرت‌های مورد مطالعه ۴، ۳ و ۴ شیار با مجموع طول ۷/۴۱، ۷/۰۴ و ۸/۱۱ متر و تراکم شیار ۱/۲۴، ۱/۱۷ و ۱/۳۵ متر بر مترمربع در کرت‌های مورد مطالعه مشاهده شد. هم‌چنین میانگین عرض شیارهای تشکیل‌شده در کرت‌های مطالعاتی ۶/۸±۳/۵، ۳/۵±۲/۰ و ۷/۲±۲/۷ سانتی‌متر و میانگین عمق شیارهای تشکیل‌شده ۶/۷±۱/۰، ۳/۰±۱/۰ و ۳/۹±۲/۰ سانتی‌متر بوده است.

نتیجه‌گیری: نتایج پژوهش حاضر نشان داد که انرژی حمل رسوب در کرت‌های آزمایشی پس از شروع جریان متمرکز ابتدا افزایش و سپس کاهش داشته است که باعث به وجود آمدن مراحل اولیه، فعال و رسوب‌گذاری در کرت‌های آزمایشی شده است. به عبارتی شیارهای تشکیل‌شده با نقش دوگانه هم منبع حمل هدررفت خاک و هم محل رسوب‌گذاری هستند. از این‌رو، نتایج پژوهش حاضر ضمن تأیید تغییرپذیری مؤلفه‌های مطالعاتی شیارهای مطالعاتی در کرت‌های آزمایشی، بر ضرورت انجام اقدامات پیشگیرانه و مهار فرسایش شیار در دامنه‌های حساس به فرسایش در مراحل ابتدایی تأکید دارد.

استناد: صادقی، سیدحمیدرضا، جعفرپور، عاطفه، همایی، مهدی (۱۴۰۳). ریخت‌سنجی فرسایش شیار در کرت‌های آزمایشی. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۴ (۴)، ۱۴۴-۱۳۱.

DOI: 10.22069/EJSMS.2025.20654.2076



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

فرسایش آبی یکی از مشکلات مهم تخریب زمین است که موجب کاهش قدرت تولید خاک، تهدید امنیت غذایی^۱ و مشکلات درون و برون منطقه‌ای می‌شود (۱، ۲)، که به‌طورمعمول از فرسایش پاشمانی^۲ شروع شده و با تمرکز جریان و بالا رفتن قدرت حمل رسوب باعث تشکیل فرسایش‌های خطی شیاری^۳ و آب‌کندی^۴ می‌شود (۳، ۴). در همین راستا، فرسایش شیاری به‌عنوان مرحله انتقالی از فرسایش سطحی به فرسایش خطی است و در نقاط مختلف جهان بیش از ۵۰ درصد فرسایش آبی را شامل می‌شود (۵، ۶، ۷، ۸). با تشکیل شیار، مؤلفه‌های ریخت‌سنجی تحت‌تأثیر قرار می‌گیرد و در صورت تداوم جریان متمرکز و رویدادهای بارشی، ابعاد شیارهای تشکیل‌شده شامل طول، عرض و عمق توسعه پیدا می‌کنند و حجم رسوب انتقالی چندین برابر افزایش می‌یابد (۹، ۱۰). از این‌رو درک فرآیندهای فرسایش شیاری به‌دلیل تأثیرگذاری بر رواناب، هدررفت خاک، ریخت‌شناسی و ویژگی‌های پویایی سطوح دامنه‌ها برای پیش‌بینی فرسایش و جلوگیری از هدررفت خاک و مدیریت بهتر دامنه‌های مستعد و حساس به فرسایش مهم است (۱۱، ۱۲، ۱۳). در همین راستا، مطالعات مختلفی (برای مثال ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷) در خصوص مؤلفه‌های مؤثر در شکل‌گیری شیار انجام‌شده است. در این خصوص، برگز و همکاران (۲۰۱۰) مراحل تشکیل و تکامل فرسایش شیاری در شرایط آزمایشگاهی در سه شیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد و شدت‌های متفاوت بارش ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ میلی‌متر بر ساعت را بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد که افزایش شدت بارش نسبت به شیب تأثیر بیش‌تری بر عملکرد رسوب داشته است.

هم‌چنین تراکم شیار و انرژی با گذشت زمان کاهش پیدا کرده و میزان انرژی، یک مؤلفه مؤثر در ایجاد شبکه شیاری در مقیاس آزمایشگاهی بوده است (۱۸). هم‌چنین تیان و همکاران (۲۰۱۷) در کرت‌های پنج در دو متر صحرایی به بررسی مؤلفه‌های فرسایش شیاری تحت شبیه‌سازی بارش با شدت ۶۰ میلی‌متر بر ساعت و دوام ۶۰ دقیقه‌ای با سه تیمار ترکیبی و جداگانه بارش و رواناب اضافی شش، ۱۲، ۲۴ و ۳۶ لیتر بر دقیقه پرداختند. هم‌چنین برای اندازه‌گیری سرعت جریان از ماده رنگی پرمنگنات، عکس‌برداری و تهیه فیلم استفاده کردند. نتایج ایشان نشان داد که با تمرکز رواناب، فرسایش از مرحله بین‌شیاری به مرحله شیاری وارد می‌شود و تشکیل شیار در سه مرحله ابتدایی، میانی و توسعه شیار اتفاق می‌افتد. با تشکیل شیار در مرحله ابتدایی میزان هدررفت و غلظت رسوب به دلیل موجودیت رسوب افزایش‌یافته است و به‌تدریج به حالت ثابت رسید (۱۲). صادقی و همکاران (۱۳۹۹) نیز روش‌های مختلف اسکنر نوری، شیارسنج و پارافین را در اندازه‌گیری فرسایش شیاری مقایسه کردند. نتایج مطالعه ایشان نشان داد که اسکنر نوری جزئیات و اطلاعات بیش‌تری از میزان هدررفت خاک و نیز جزئی‌ترین حرکات خاک را نشان می‌دهد (۱۹). از طرفی جعفرپور و همکاران (۲۰۲۲ الف)، تأثیر تلقیح سیانوباکتری‌های خاک‌زی بر مهار مؤلفه‌های ریخت‌سنجی، هیدرولیک و هیدرودینامیک فرسایش شیاری را موردبررسی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که تلقیح سیانوباکتری‌ها بر مهار مؤلفه‌های مختلف تأثیر معنی‌دار ($P < 0.05$) داشته است (۲۰). واعظی و محمدی (۱۴۰۰) تغییرات زمانی تولید رواناب و فرسایش شیاری در خاک‌های با سه بافت مختلف و چهار شیب متفاوت در زمان ۳۰ دقیقه را بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد تولید رواناب و فرسایش شیاری، تحت‌تأثیر بافت خاک، درجه شیب و

1- Food Security

2- Splash Erosion

3- Rill Erosion

4- Gully Erosion

برهمکنش بین آن دو است. تولید رواناب و فرسایش شیاری طی زمان در خاک‌ها و شیب‌ها دچار تغییر شد و زمان ۱۰ دقیقه، زمان اوج وقوع رواناب و فرسایش شیاری بوده است. همچنین الگوی افزایش فرسایش شیاری طی زمان، نامنظم و تدریجی بوده و تحت تأثیر موجودیت ذرات قابل انتقال خاک قرار داشته است (۲۱). صادقی و همکاران (۲۰۲۳ الف) نقش ریزموجودات خاک‌زی بر مهار مؤلفه‌های فرسایش شیاری را بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد تلقیح ریزموجودات بر طول، عرض، عمق و تراکم شیاری تأثیر معنی‌دار ($P < 0.05$) داشته و نقش مؤثری در حفظ منابع آب‌وخاک داشته است (۲۲). با وجود پژوهش‌های فراوان در طول دهه‌های اخیر، ویژگی‌های فرسایش شیاری و فرآیند شکل‌گیری آن هنوز مشخص نیست. از طرفی، با توجه به سهم فرسایش شیاری در هدررفت خاک در نقاط مختلف جهان و نیز قرارگیری آن در مرحله انتقالی و درعین حال قابل مدیریت فرسایش خاک، مهار و یا توقف توسعه آن در مراحل مقدماتی می‌تواند نقش ارزنده‌ای در مهار شکل‌های پیشرفته فرسایش خاک داشته باشد. بنابراین آگاهی از تغییرات ریخت‌سنجی شیاری در طول دامنه‌ها از ابزارهای مهم مدیریتی محسوب می‌شود. همچنین پژوهش‌های انجام‌شده در داخل کشور بر فرسایش شیاری اندازه‌گیری میزان هدررفت خاک ناشی از فرآیند فرسایشی و یا اندازه‌گیری مؤلفه‌های ریخت‌سنجی شیاری بوده و تاکنون پژوهشی مستند از مراحل شیاری‌شدن انجام‌نشده است. بر همین اساس در پژوهش حاضر به بررسی مراحل شیاری‌شدن و مؤلفه‌های شیاری‌های تشکیل‌شده و همچنین تولید رواناب و رسوب ناشی از فرسایش شیاری در کرت‌های آزمایشگاهی با بارش ۵۰ میلی‌متر بر ساعت و دوام نیم‌ساعته به همراه رواناب اضافی دو لیتر بر دقیقه و مساعدکننده شرایط تولید شیاری با سه تکرار در

آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش دانشگاه تربیت مدرس بر خاک حساس به فرسایش مرزن‌آباد انجام پذیرفت. نتایج پژوهش حاضر می‌تواند در شناسایی مراحل مختلف شیاری‌شدن، مدیریت و حفاظت منابع آب‌وخاک مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

خاک مادری مورد استفاده: در پژوهش حاضر خاک بررسی شده از لایه ۱۰ سانتی‌متری در معرض فرسایش و تخریب مستقیم، از منطقه مرزن‌آباد، غرب استان مازندران برداشت و به آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس منتقل شد. خاک منتقل‌شده به آزمایشگاه مرکزی دانشگاه تربیت مدرس پس از هوا خشک‌کردن، به‌منظور یکنواختی و حذف سنگ‌ریزه و بقایای گیاهی از الک دو میلی‌متری عبور داده شد. خاک مورد استفاده مارنی و با کاربری مرتع با بافت شنی‌لومی و میزان رس، سیلت و شن به ترتیب ۱۸/۴۳، ۱۶/۸۶ و ۶۴/۷۱ درصد بوده است. همچنین جرم ویژه ظاهری برابر با ۱/۱۶-۱/۴ گرم بر سانتی‌مترمکعب، هدایت الکتریکی برابر با ۱۲۵ میکروموس بر سانتی‌متر و اسیدیته برابر با ۷/۹۴ بوده است. مقادیر کربن کل، نیتروژن کل، فسفر قابل حل نیز به ترتیب ۰/۱۴ درصد، ۰/۰۸ درصد و ۶/۵۷ قسمت در میلیون بوده است (۲۲، ۲۳، ۲۴).

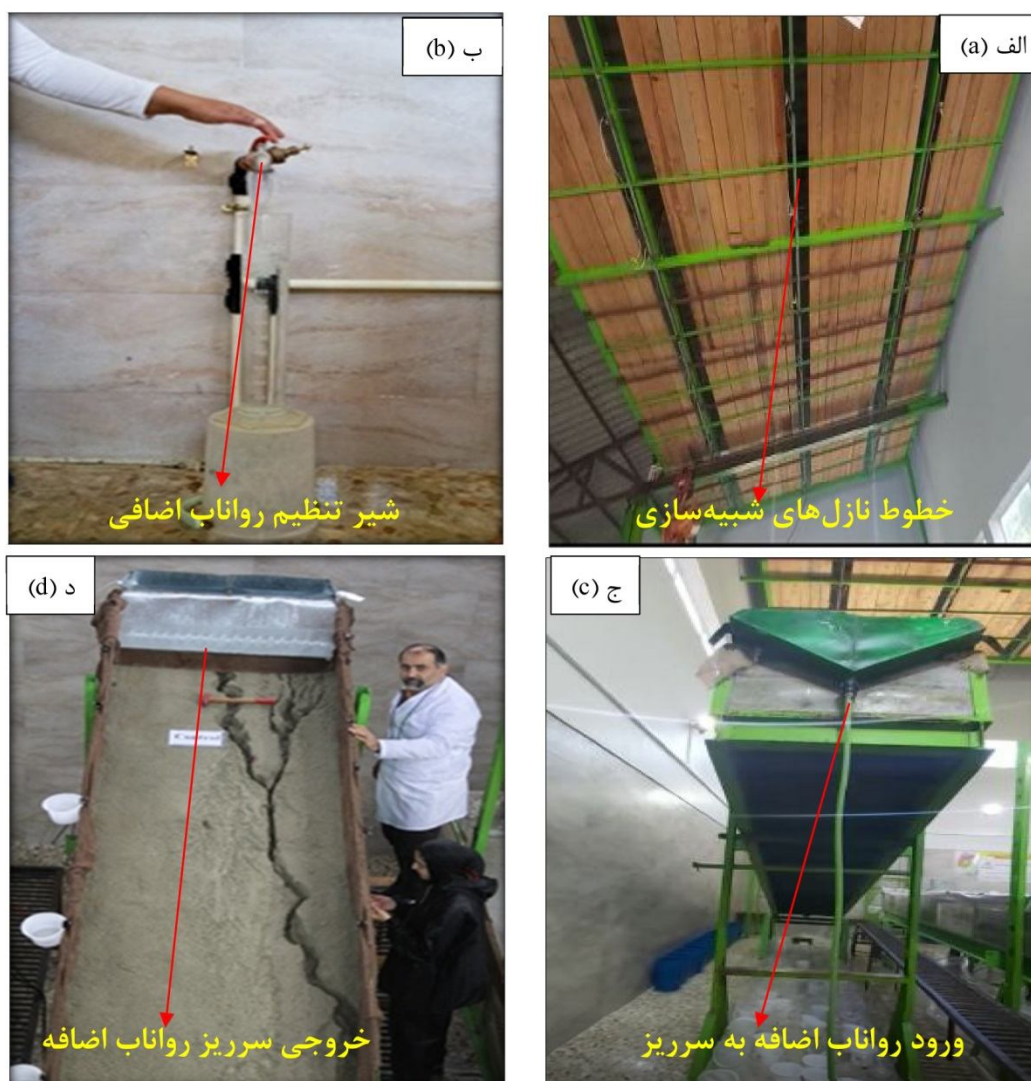
آماده‌سازی کرت‌های فرسایشی و سامانه شبیه‌ساز باران: پژوهش حاضر در سه کرت با ابعاد سطحی شش در یک و عمق نیم متر و ارتفاع بارش بین چهار تا شش متر، در محل آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش خاک دانشگاه تربیت مدرس و شیب ۳۰ درصد و متناسب با منطقه مورد مطالعه انجام گرفت. شبیه‌ساز باران مورد استفاده برای اجرای آزمایش شامل یک مخزن ۴۰۰۰ لیتری با ۲۱ نازل تحت فشار BEX: 3/8 S24W در سه خط (هر خط هفت نازل)

بوده است (۲۴). قبل از انتقال خاک به کرت‌ها، برای شبیه‌سازی بهتر شرایط طبیعی خاک، لایه زه‌کش از جنس پوکه معدنی به‌صورت تغییر تدریجی اندازه ذرات از بادامی تا ریزدانه به ضخامت حدود ۲۰ سانتی‌متر در کف کرت‌ها تعبیه شد. به‌منظور افزایش اصطکاک در مرز خاک و جداره شیشه‌ای کرت، یک گونی کفنی نفوذپذیر در جداره‌های کرت در نظر گرفته شد، به‌نحوی که ادامه آن در حدفاصل پالایه^۱ و خاک نیز قرار گرفته و علاوه بر جلوگیری از اختلاط خاک و پالایه، مانع افزایش سرعت رواناب در مرز خاک و جداره شیشه‌ای می‌شد (۲۵). لایه بالایی خاک نیز به‌صورت تدریجی تکمیل و تا سطح ۱۵ سانتی‌متری بالایی و مماس با لبه پایینی سرریز کرت پر شد. در مرحله بعد کوبیدگی لازم توسط غلتک دستی و شیوه کوبشی انجام و این عمل تا رسیدن به جرم ویژه ظاهری نمونه دست‌نخورده (حدود ۱/۴ تن بر مترمکعب) و وضعیت ظاهری مشابه با شرایط حاکم بر طبیعت ادامه یافت. قبل از شروع آزمایش‌ها، نمونه‌های خاک برای رسیدن به رطوبت طبیعی منطقه در زمان نمونه‌برداری، با بارش غیرفرساینده با شدت پنج میلی‌متر بر ساعت مرطوب شدند (۲۶). هم‌چنین شدت بارندگی استفاده‌شده در پژوهش حاضر حدود 5 ± 55 میلی‌متر بر ساعت بادوام نیم‌ساعته مطابق با شرایط منطقه بود که با استفاده از ظروف اندازه‌گیری و ثبت زمان بارش تنظیم شد. هم‌چنین ضریب یکنواختی بارش در پژوهش حاضر ۸۱ درصد بوده است (۲۷). از طرفی به‌منظور تشکیل شیار در کرت‌های آزمایشی رواناب شبیه‌سازی‌شده از بالادست کرت به‌میزان ۲ لیتر در دقیقه هم‌زمان با شروع رواناب سطحی به کرت وارد شد که نقش تطویل مجازی طول کرت را داشته است (۱۹، ۲۸، ۲۹). رواناب اضافه مورد استفاده قبلاً در آزمون‌های پیش‌آزمون در

طول شیب مشابه با توجه به میزان حجم رواناب اندازه‌گیری‌شده در انتهای کرت دو لیتر به‌دست‌آمده بود و در آزمایش‌های شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۱ سامانه شبیه‌ساز باران و رواناب اضافی مورد استفاده ارائه شده است.

اندازه‌گیری رواناب و هدررفت خاک: طی هر آزمایش در پژوهش حاضر در حین اجرای آزمایش، علاوه بر ثبت زمان شروع و خاتمه رواناب، میزان رواناب و هدررفت خاک خروجی از کرت‌ها پس از شروع رواناب در بازه زمانی دو دقیقه (۳۰، ۳۱) اندازه‌گیری شد. سپس با لحاظ مقدار رواناب رسیده به خروجی کرت و بارش ورودی، ضریب رواناب محاسبه شد. برای اندازه‌گیری میزان هدررفت خاک و غلظت رسوب نیز از روش برجای‌گذاری و توزین رسوب باقی‌مانده (۳۲، ۳۳) استفاده شد.

اندازه‌گیری مؤلفه‌های ریخت‌سنجی شیار: در پژوهش حاضر زمان تشکیل اولین شیار ثبت و پس از خاتمه آزمایش، مشخصات اصلی شیارهای ایجادشده شامل طول، عرض، عمق متوسط، فراوانی و تراکم با استفاده از متر و خط‌کش (۱۱، ۱۷، ۱۹، ۲۸) اندازه‌گیری شد. بدین‌صورت که برای اندازه‌گیری طول از متر و برای اندازه عرض و عمق از خط‌کش با مقیاس میلی‌متر استفاده شد. در همین راستا شیارهای تشکیل‌شده در کرت‌های آزمایشی با استفاده از متر اندازه‌گیری شدند و سپس برای اندازه‌گیری عرض و عمق در بازه‌های ده سانتی‌متر از خط‌کش با دقت میلی‌متر استفاده شد. در نهایت طول بزرگ‌ترین شیار تشکیل‌شده، مجموع طول شیارهای تشکیل‌شده، عرض، عمق متوسط و هم‌چنین تراکم شیار نیز محاسبه شد.



شکل ۱- سامانه شبیه‌ساز باران (الف)، شیر تنظیم رواناب اضافه (ب)، ورودی رواناب اضافه به سرریز (ج) و خروجی سرریز رواناب اضافه (د).

Figure 1. Rainfall simulation system (a), extra runoff adjustment valve (b), extra runoff inlet (c) and extra runoff outlet (d).

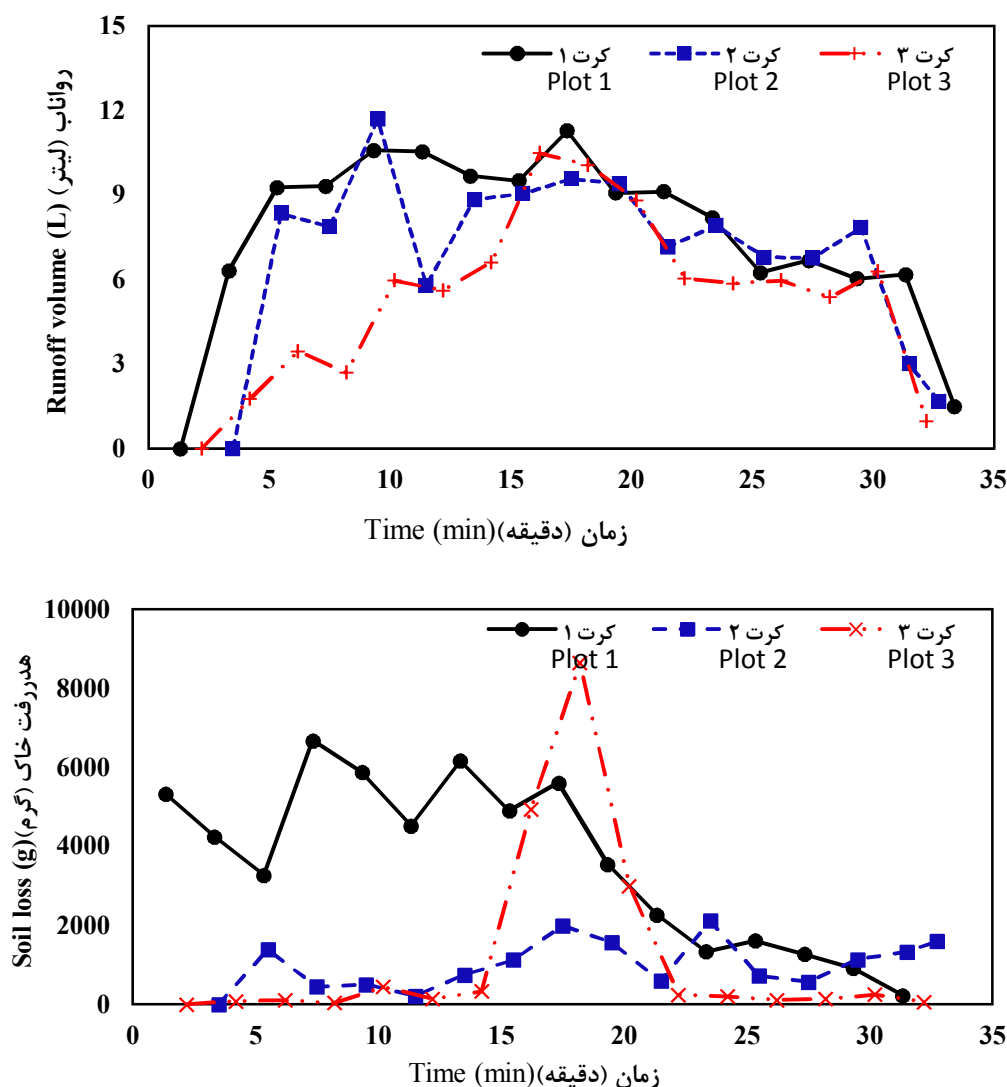
۹/۵۰ دقیقه و ۱۱/۶۹ لیتر، ۱۶/۲۱ دقیقه و ۱۰/۴۹ لیتر و انحراف معیار به ترتیب ۴/۲۳ و ۰/۶۱ بوده است. این یافته‌ها نشانگر وجود شرایط تقریباً مشابه در تولید رواناب در کرت‌های آزمایشی بوده است. با اندازه‌گیری مقدار بارش ورودی در مدت‌زمان شبیه‌سازی و میزان رواناب تولیدی، ضریب رواناب در کرت‌های مطالعاتی نیز ۵۴/۰۷، ۴۵/۳۸ و ۳۵/۱۸ درصد به دست آمد.

نتایج و بحث

رواناب و هدررفت خاک: نتایج مربوط به اندازه‌گیری مؤلفه‌های رواناب و هدررفت خاک در شکل ۲ ارائه شده است. نتایج نشان داد حجم رواناب تولیدی در کرت‌های آزمایشی ۱۲۹/۵۶، ۱۱۱/۷۶ و ۸۵/۹۸ لیتر با انحراف معیار ۲۱/۹۱ بوده است. همچنین زمان تا اوج و مقدار اوج دودقیقه‌ای در کرت‌های مورد مطالعه ۱۷/۳۳ دقیقه و ۱۱/۲۸ لیتر،

خواهد کرد. غلظت رسوب نیز ۴۴۵/۵۹، ۱۴۳/۰۷ و ۲۱۷/۴۹ گرم بر لیتر به دست آمده است. ویرتز و همکاران (۲۰۱۲) تغییر غلظت رسوب بین ۵/۲ تا ۴۳۸ گرم بر لیتر در فرآیند فرسایش شیاری را گزارش دادند که با نتایج پژوهش حاضر هم‌سو است (۳۴). هم‌چنین فرومدی و واعظی (۱۳۹۶) در پژوهشی اعلام داشتند که با ایجاد جریان متمرکز، تولید رواناب افزایش یافته و در نتیجه افزایش فرسایش و هدررفت خاک را به دنبال داشته است (۳۵).

مقدار هدررفت خاک در کرت‌های آزمایشی مورد مطالعه ۵۷۷۳۲، ۱۵۹۹۴ و ۱۸۷۰۴ گرم اندازه‌گیری شده است. تفاوت زیاد بین کرت‌های آزمایشی مورد مطالعه به شکل شیارهای تشکیل شده، عرض و عمق آن‌ها بوده است. به‌طوری‌که بر عکس فرسایش سطحی در صورتی‌که شرایط یکسان باشد انتظار مقدار هدررفت خاک نزدیک به هم نیز وجود خواهد داشت در فرسایش شیاری و با جریان متمرکز با افزایش ابعاد شیار میزان هدررفت خاک تا چند برابر افزایش پیدا

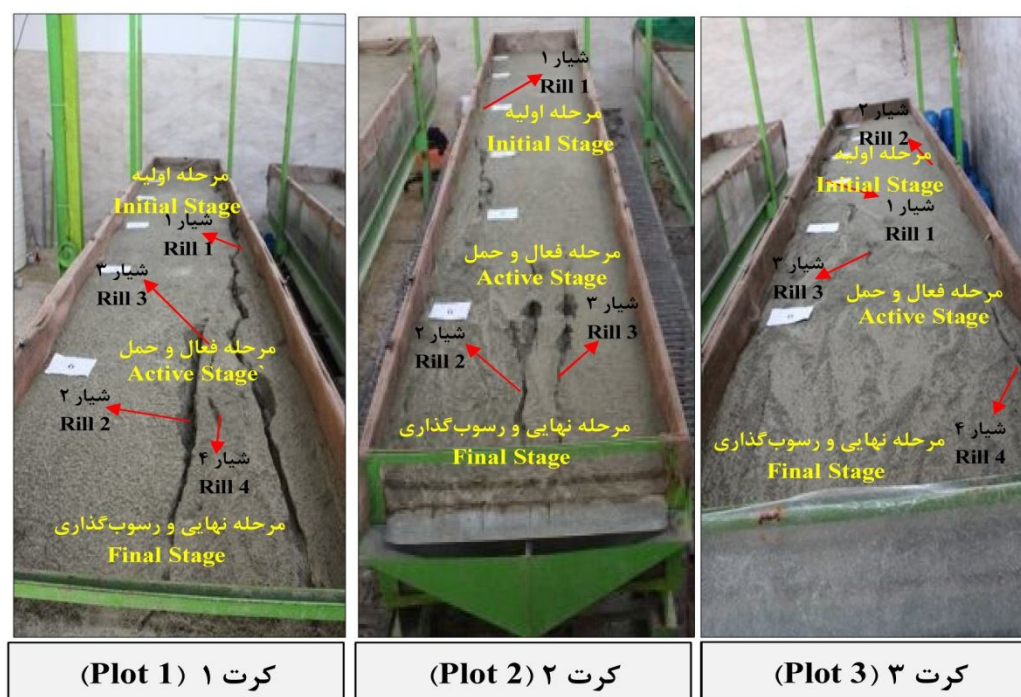


شکل ۲- تغییرات زمانی تولید رواناب (بالا) و هدررفت خاک (پایین) در کرت‌های آزمایشی مطالعاتی واجد فرسایش شیاری.

Figure 2. Temporal variation of runoff generation (top) and soil loss (bottom) in the study experimental plots with rill erosion.

ریخت‌سنجی شیار: در پژوهش حاضر پس از شبیه‌سازی فرآیند بارش و رواناب، مؤلفه‌های ریخت‌سنجی شیار اندازه‌گیری شد. در این خصوص در شکل ۳ شیارهای تشکیل‌شده در کرت‌های مطالعاتی ارائه‌شده است. نتایج نشان داد هرچند الگوی شکل‌گیری شیار در کرت‌های آزمایشی متفاوت بوده است و در کرت‌های ۱ و ۲ به‌صورت شیارهای موازی و در کرت ۳، انشعابی بوده است. بااین‌حال در هر سه کرت تشکیل شیار دارای هر سه مرحله جدایش و شکل‌گیری، حمل و رسوب‌گذاری بوده است. به‌طوری‌که در بالادست کرت‌های آزمایشی با تشکیل جریان متمرکز مراحل اولیه شکل‌گیری شیار تشکیل و سپس در بخش وسط کرت میزان انرژی جریان متمرکز و حمل رسوب زیاد و مرحله فعال را به وجود آورده و سپس در پایین‌دست کرت‌های آزمایشی انرژی جریان متمرکز کاهش‌یافته و مرحله نهایی شکل‌گیری شیار را به وجود آورده است. به عبارتی در بالادست کرت‌های آزمایشی بیش‌ترین کنش و حمل ذرات رخ داد. درحالی‌که در پایین‌دست کرت‌های آزمایشی انباشت رسوب غالب بوده است. نتایج پژوهش حاضر با نتایج تیان و همکاران (۲۰۱۷)، سان و همکاران (۲۰۲۱) و جعفرپور و همکاران (۲۰۲۲ الف) مبنی بر مراحل مختلف شکل‌گیری شیار هم‌خوانی دارد (۱۲، ۱۷، ۲۰). در جدول‌های ۱ و ۲ نیز مؤلفه‌های ریخت‌سنجی شیار اندازه‌گیری شده در کرت‌های مطالعاتی ارائه‌شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد زمان شروع شیار شدن در کرت‌های مطالعاتی از ۲/۵۰ تا ۳/۸۶ دقیقه پس از شروع فرآیند شبیه‌سازی باران بوده است. در کرت‌های شش مترمربعی مورد مطالعه در مدت‌زمان شبیه‌سازی ۳ تا ۴ شیار به وجود آمده است که طول بزرگ‌ترین شیار تشکیل‌شده در هر سه کرت مورد مطالعه بیش از سه متر و ۵۰ درصد طول کرت‌های آزمایشی بوده است. بااین‌حال، مجموع طول شیارهای تشکیل‌شده نیز در هر سه کرت مطالعاتی بیش از هفت متر بوده است و نهایتاً تراکم شیارهای تشکیل‌شده از ۱/۱۷ تا

۱/۳۵ متر بر مترمربع متغیر بوده است. اندازه‌گیری عرض و عمق شیارهای تشکیل‌شده در فواصل ده سانتی‌متری عرض شیار و عمق سمت‌های راست و چپ شیار و عمق وسط شیارهای تشکیل‌شده اندازه‌گیری شد. به‌طور فرضی در هر ده سانتی‌متر شیارها به شکل مستطیلی فرضی در نظر گرفته می‌شود و اندازه‌گیری‌ها انجام می‌شود (۷). نهایتاً در بازه‌های یک متری کرت‌های آزمایشی میانگین‌گیری شد و به‌صورت نتایج حداقل، حداکثر و میانگین نتایج حاصله در جدول ۳ ارائه‌شده است. نیو و همکاران (۲۰۲۰) نیز عرض و عمق را به‌عنوان پارامترهای ریخت‌شناسی پایه موردبررسی قرار دادند (۱۶). نتایج جدول ۳ نیز نشان داد که متوسط عرض شیارهای تشکیل‌شده در کرت‌های مطالعاتی ۶/۸۵، ۳/۵۰ و ۷/۲۱ سانتی‌متر بوده است. نتایج شن و همکاران (۲۰۱۵) نیز نشان داد عرض و عمق شیارهای تشکیل‌شده در بارش با شدت ۵۰ میلی‌متر بر ساعت کم‌تر از ۲۰ و ۱۵ سانتی‌متر بوده است (۱۱). هم‌چنین متوسط طول شیارهای تشکیل‌شده نیز ۶/۷۱، ۳/۰۱ و ۳/۹۵ سانتی‌متر بوده است. هرچند در کرت شماره ۲ تمام مؤلفه‌های ریخت‌سنجی شیار کم‌تر بوده است اما در کرت ۱ و کرت ۳ هیچ روند ثابتی برای اندازه مؤلفه‌های ریخت‌سنجی مورد مطالعه وجود نداشته است و نتایج نشان‌دهنده آن است که با شروع جریان متمرکز و شباری شدن ابعاد آن می‌تواند در جهات مختلف رشد داشته باشد. تیان و همکاران (۲۰۱۷) نیز در پژوهشی اعلام داشتند با تشکیل شیار در مرحله ابتدایی میزان هدررفت و غلظت رسوب به دلیل موجودیت رسوب افزایش‌یافته است و به‌تدریج به حالت ثابت رسید (۱۲). کیان و همکاران (۲۰۲۴) نیز فرآیند شکل‌گیری شیار را به دو مرحله جداگانه تقسیم کردند (۳۶). هم‌چنین یان و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهش خود نشان دادند که تراکم شیار مهم‌ترین شاخص برای توصیف فرسایش شباری بوده است (۳۷).



شکل ۳- شیاری‌های تشکیل‌شده در کرت‌های آزمایشی مورد مطالعه.

Figure 3. Rills formed in the studied experimental plots.

جدول ۱- زمان، تعداد، طول و تراکم شیاری‌های تشکیل‌شده در کرت‌های آزمایشی مورد مطالعه.

Table 1. Time, number, length and density of rills formed in the studied experimental plots.					
کرت	زمان تشکیل شیار (دقیقه)	تعداد شیار	مجموع طول شیاریها (متر)	طول بزرگ‌ترین شیار (متر)	تراکم شیار (متر بر مترمربع)
Plot	Time to rill initiation (min)	Number of rill	Total length of the rills (m)	Length of the largest rills (m)	Rill density ($m\ m^{-2}$)
1	2.50	4	7.41	5.55	1.24
2	3.86	3	7.04	3.79	1.17
3	3.33	4	8.11	4.85	1.35

جدول ۲- مقادیر اندازه‌گیری‌شده عرض و عمق شیار (سانتی‌متر) در کرت‌های آزمایشی مورد مطالعه.

Table 2. Measured values of rill width and rill depth (cm) in the studied experimental plots.								
تیمار	بازه (متر)	کرت ۱			کرت ۲			کرت ۳
		حداکثر	میانگین	حداقل	حداکثر	میانگین	حداقل	حداکثر
عرض شیار	Rill width	Max.	Mean	Min.	Max.	Mean	Min.	Max.
		17.2	13.5	7.6	2.1	1.4	1.7	25.7
		12.2	7.7	3.2	4.7	0.7	1.6	24.1
		9.1	4.6	1.1	3.7	0.8	1.5	9.3
		9.1	5.5	1.1	10.6	1.2	5.6	8.6
		12.3	5.6	2.3	10.5	1.3	4.9	17.6
عمق شیار	Rill depth	Max.	Mean	Min.	Max.	Mean	Min.	Max.
		7.8	3.9	2.1	12.3	1.4	4.9	8.4
		12.5	7.9	5.3	3.3	0.2	2.1	10.2
		10.4	6.0	1.8	5.0	0.6	2.8	14.0
		10.0	7.3	0.8	5.0	0.6	2.8	10.5
		9.2	6.9	4.1	7.6	0.6	4.3	6.2
		Max.	Mean	Min.	Max.	Mean	Min.	Max.
		9.8	6.9	0.6	10.2	1.3	0.4	6.4
		9.8	5.0	0.4	10.3	0.6	0.6	3.4

نتیجه‌گیری کلی

پژوهش حاضر باهدف بررسی تولید رواناب و هدررفت خاک و ریخت‌سنجی شیار در شرایط آزمایشگاهی و در کرت‌های متوسط آزمایشی برنامه‌ریزی شد. در این خصوص، با اضافه کردن رواناب شبیه‌سازی هم‌زمان با شروع رواناب سطحی شرایط تشکیل شیار ایجاد شده است. نتایج نشان داد میزان رواناب تولیدی در کرت‌های مطالعاتی از ۸۵/۹۸ تا ۱۲۹/۵۶ لیتر و هدررفت خاک نیز از ۱۵/۹۹ تا ۵۷/۷۳ کیلوگرم متغیر بوده است. هم‌چنین شکل‌گیری شیار نیز در کرت‌های مطالعاتی شامل سه مرحله شکل‌گیری، فعال و رسوب‌گذاری بوده است. در همین راستا، برای مدیریت و حفاظت منابع خاک در دامنه‌ها باید در حد امکان مرحله اولیه شکل‌گیری

شیار مهار شود زیرا با شکل‌گیری اولیه شیار و وجود جریان متمرکز می‌تواند در مرحله فعال هدررفت بالایی را حمل کند و خاک حاصلخیز را از دسترس خارج کند. به‌طور کلی پژوهش حاضر ضمن تغییرات مکانی ریخت‌شناسی شیار و فرآیند انتقال رسوب در بخش‌های مختلف شیار را تأیید می‌کند و نتایج مذکور می‌تواند در خصوص اقدامات مدیریتی قابل انجام در دامنه‌های حساس به فرسایش مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، انجام پژوهش‌های مرتبط با شرایط مختلف شدت و شیب در شرایط آزمایشگاهی و صحرایی برای مدیریت بهتر منابع آب‌و خاک در سطح دامنه‌ها پیشنهاد می‌شود.

منابع

1. Garcia-Ruiz, J. M., Beguería, S., Nadal-Romero, E., Gonzalez-Hidalgo, J. C., Lana-Renault, N., & Sanjuán, Y. (2015). A meta-analysis of soil erosion rates across the world. *Geomorphology*, 239, 160-173. doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.008.
2. Li, L., Du, S., Wu, L., & Liu, G. (2009). An overview of soil loss tolerance. *Catena*, 78 (2), 93-99. doi.org/10.1016/j.catena.2009.03.007.
3. Kinnell, P. I. A. (2020). The influence of time and other factors on soil loss produced by rain-impacted flow under artificial rainfall. *Journal of Hydrology*, 587, 125004. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125004.
4. Kinnell, P. I. A. (2016). A review of the design and operation of runoff and soil loss plots. *Catena*, 145, 257-265. doi.org/10.1016/j.catena.2016.06.013.
5. Evans, K. G., Loch, R. J., Silburn, D. M., Aspinall, T. O., & Bell, L. C. (1994). Evaluation of the CREAMS model. 4. Derivation of interrill erodibility parameters from laboratory rainfall simulator data and prediction of soil loss under a field rainulator using the derived parameters. *Soil Research*, 32 (4), 867-878. doi.org/10.1071/SR9940867.
6. Sadeghi, S. H. R., Najafi, S., Riyahi Bakhtiari, A., & Abdi, P., (2014). Ascribing soil erosion types for sediment yield using composite fingerprinting technique. *Hydrological Sciences Journal*, 59 (9), 1753-1762. doi.org/10.1080/02626667.2014.940955.
7. Ou, X., Hu, Y., Li, X., Guo, S., & Liu, B. (2021). Advancements and challenges in rill formation, morphology, measurement and modeling. *Catena*, 196, 104932. doi.org/10.1016/j.catena.2020.104932.
8. Zoratipour, A., & Moazami, M. (2016). The participation of hill slopes sediment delivery contribution in rainfalls different parents by determine of the degraded rills volume. *Journal of water and soil conservation*. 23 (3), 327-336. [In Persian]
9. Zhang, P., Yao, W., Liu, G., & Xiao, P. (2019). Experimental study on soil erosion prediction model of loess slope based on rill morphology. *Catena*,

- 173, 424-432. doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.034.
10. He, J. J., Sun, L. Y., Gong, H. L., & Cai, Q. G. (2018). Comparison of rill flow velocity regimes between developing and stationary rills. *Catena*, 167, 13-17. doi.org/10.1016/j.catena.2018.04.020.
11. Shen, H., Zheng, F., Wen, L., Lu, J., & Jiang, Y. (2015). An experimental study of rill erosion and morphology. *Geomorphology*, 231, 193-201. doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.11.029.
12. Tian, P., Xu, X., Pan, C., Hsu, K., & Yang, T. (2017). Impacts of rainfall and inflow on rill formation and erosion processes on steep hillslopes. *Journal of Hydrology*, 548, 24-39. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.051.
13. Jiang, F., Zhan, Z., Chen, J., Lin, J., Wang, M. K., Ge, H., & Huang, Y. (2018). Rill erosion processes on a steep colluvial deposit slope under heavy rainfall in flume experiments with artificial rain. *Catena*, 169, 46-58. doi.org/10.1016/j.catena.2018.05.023.
14. Raanan, H., Felde, V. J., Peth, S., Drahorad, S., Ionescu, D., Eshkol, G., Treves, H., Felix-Henningsen, P., Berkowicz, S. M., Keren, N., & Horn, R. (2016). Three-dimensional structure and cyanobacterial activity within a desert biological soil crust. *Environmental Microbiology*, 18 (2), 372-383. doi.org/10.1111/1462-2920.12859.
15. Mirzaee, S., & Ghorbani-Dashtaki, S. (2018). Deriving and evaluating hydraulics and detachment models of rill erosion for some calcareous soils. *Catena*, 164, 107-115. doi.org/10.1016/j.catena.2018.01.016.
16. Niu, Y., Gao, Z., Li, Y., Lou, Y., Zhang, S., Zhang, L., Jie, D., Zhang, X., & Luo, K. (2020). Characteristics of rill erosion in spoil heaps under simulated inflow: A field runoff plot experiment. *Soil and Tillage Research*, 202, 104655. doi.org/10.1016/j.still.2020.104655.
17. Sun, L., Wu, S., Zhang, B., & Lei, Q. (2021). Development of rill erosion and its simulation with Cellular Automata-Rill model in Chinese Loess Plateau. *Archives of Agronomy and Soil Science*, doi.org/10.1080/03650340.2020.1856819.
18. Berger, C., Schulze, M., Rieke-Zapp, D., & Schlunegger, F. (2010). Rill development and soil erosion: a laboratory study of slope and rainfall intensity. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35 (12), 1456-1467. doi.org/10.1002/esp.1989.
19. Sadeghi, S. H. R., Mirchooli, F., Hazbavi, Z., Khaledi Darvishan, A., & Khorsand, M. (2020). Comparative application of optic scanner, rillmeter and paraffin methods in rill erosion management. *Watershed Engineering and Management*. 12 (1), 125-136. [In Persian] doi.org/10.22092/ijwmse.2018.107710.1198.
20. Jafarpour, A., Sadeghi, S. H. R., Zarei-Darki, B., & Homaei, M. (2022a). Changes in Morphologic, Hydraulic, and Hydrodynamic Properties of Rill Erosion due to Surface Inoculation of Endemic Soil Cyanobacteria. *Catena*. 208, 105782. doi.org/10.1016/j.catena.2021.105782.
21. Vaezi, A., & Mohammadi, E. (2022). Temporal Variation Pattern of Runoff Generation and Rill Erosion in Different Soils and Slope Gradients. *Journal of Water and Soil Science*. 25 (4), 19-31. [In Persian] doi.org/10.47176/jwss.25.4.12741.
22. Sadeghi, S. H. R., Jafarpour, A., Homaei, M., & Zarei-Darki, B. (2023a). Changeability of rill erosion properties due to microorganism inoculation. *Catena*, 223, 106956. doi.org/10.1016/j.catena.2023.106956.
23. Sadeghi, S. H. R., Ashgevar Heydari, M., & Jafarpour, A. (2023b). Inhibitability of soil loss and sediment concentration during consecutive rainfalls from experimental plots treated by endemic microorganisms. *International Journal of Sediment Research*. doi.org/10.1016/j.ijsrc.2023.01.001.
24. Ashgevar Heydari, M., Sadeghi, S. H. R., & Jafarpour, A. (2023). Hydrological

- properties of rill erosion on a soil from a drought-prone area during successive rainfalls as a result of microorganism inoculation. *Sustainability*, 15, 14379. **doi.org/10.3390/su151914379.**
25. Khaledi Darvishan, A., Sadeghi, S. H. R., Homaei, M., & Arabkhedri, M. (2014). Measuring sheet erosion using synthetic color-contrast aggregates. *Hydrological Processes*, 28 (15), 4463-4471. **doi.org/10.1002/hyp.9956.**
26. Kiani Harchegani, M., Sadeghi, S. H. R., & Asadi, H. (2017). Changeability of concentration and particle size distribution of effective sediment in initial and mature flow generation conditions under different slopes and rainfall intensities. *Water Engineering and Management*. 9 (2), 205-216. [In Persian] **doi.org/10.22092/ijwmse.2017.109726.**
27. Mhaske, S. N., Pathak, K., & Basak, A. (2019). A comprehensive design of rainfall simulator for the assessment of soil erosion in the laboratory. *Catena*, 172, 408-420. **doi.org/10.1016/j.catena.2018.08.039.**
28. Jafarpour, A., Sadeghi, S. H. R., Zarei-Darki, B., & Homaei, M. (2022b). Changes in hydrologic components from mid-sized plots induced by rill erosion due to cyanobacterization. *International Soil and Water Conservation Research*. 10 (1), 143-148. **doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.05.002.**
29. Jafarpour, A., & Sadeghi, S. H. R. (2020). Analysis of rill formation with additional runoff injection at plot scale. 15th National Conference on Watershed Management Sciences and Engineering of Iran Watershed Management and National Security. 6 p. [In Persian]
30. Qin, C., Zheng, F., Wells, R. R., Xu, X., Wang, B., & Zhong, K. (2018). A laboratory study of channel sidewall expansion in upland concentrated flows. *Soil and Tillage Research*, 178, 22-31. **doi.org/10.1016/j.still.2017.12.008.**
31. Zhang, X. C. J., Liu, G., & Zheng, F. (2018). Understanding erosion processes using rare earth element tracers in a preformed interrill-rill system. *Science of the Total Environment*, 625, 920-927. **doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.345.**
32. Kukal, S. S., & Sarkar, M. (2011). Laboratory simulation studies on splash erosion and crusting in relation to surface roughness and raindrop size. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 59 (1), 87-93.
33. Sadeghi, S. H. R., Sadeghi Satri, M. S., Kheirfam, H., & Zarei-Darki, B. (2020). Runoff and soil loss from small plots of erosion-prone marl soil inoculated with bacteria and cyanobacteria under real conditions. *European Journal of Soil Biology*, 101, 103214. **doi.org/10.1016/j.ejsobi.2020.103214.**
34. Wirtz, S., Seeger, M., & Ries, J. B. (2012). Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes. *Catena*. 91 (1), 21-34. **doi.org/10.1016/j.catena.2010.12.002.**
35. Foromadi, M., & Vaezi, A. R. (2018). Flow characteristics and rill erodibility in relation to the rainfall intensity in a marl soil. *Iran Watershed Management Science & Engineering*. 12 (40), 11-23. [In Persian] **dor.20.1001.1.20089554.1397.12.40.5.2.**
36. Yan, Y., Tu, N., Cen, L., Gan, F., Dai, Q., & Mei, L. (2024). Characteristics and dynamic mechanism of rill erosion driven by extreme rainfall on karst plateau slopes, SW China. *Catena*, 238, 107890. **doi.org/10.1016/j.catena.2024.107890.**
37. Qian, X., Zhao, L., Fang, Q., Fan, C., Zi, R., & Fang, F. (2024). Rill formation and evolution caused by upslope inflow and sediment deposition on freshly tilled loose surfaces. *Soil and Tillage Research*, 235, 105868. **doi.org/10.1016/j.still.2023.105868.**