

## بررسی تغییرات زمانی فرسایش شیاری در خاک حساس به فرسایش تحت باران‌های با شدت متفاوت

مجید فرومدی<sup>۱\*</sup>، علی‌رضا واعظی<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۱۵)

### چکیده

فرسایش شیاری، یکی از عوامل اصلی هدررفت خاک در سازندهای مارنی است. این سازندها بسیار حساس به فرآیندهای فرسایش آبی بوده و گستره نسبتاً بزرگی را در برخی حوزه‌های آبخیز مناطق خشک و نیمه‌خشک دربر می‌گیرد. اطلاعات در مورد تغییرات زمانی فرسایش شیاری طی یک رخداد بارندگی و تأثیر ویژگی‌های جریان بر آن می‌تواند در شناخت فرآیند فرسایش شیاری در دامنه‌ها کمک نماید. از این رو، این پژوهش با هدف بررسی تغییرات زمانی فرسایش شیاری و ویژگی‌های جریان در خاک مارنی تحت باران‌های با شدت متفاوت انجام شد. آزمایش در ۱۰ رخداد باران شبیه‌سازی شده با شدت‌های متفاوت از ۱۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت به مدت ثابت یک ساعت با سه تکرار در شرایط آزمایشگاهی انجام گرفت. نمونه‌های خاک از سازندهای مارنی در غرب زنجان برداشت شد و در فلومی به طول چهار متر و عرض ۰/۹۴ متر و با شیب ۱۰ درصد ریخته شد. فرسایش شیاری در کنار ویژگی‌های جریان (دبی و غلظت جریان) در فاصله زمانی پنج دقیقه از آغاز رواناب در هر یک از باران‌های شبیه‌سازی شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تفاوت‌های اساسی از نظر زمان آغاز جریان، دبی جریان، غلظت جریان و فرسایش شیاری بین شدت‌های بارندگی وجود داشت ( $p < 0.001$ ). جریان شیاری و فرسایش شیاری با افزایش شدت بارندگی سریع‌تر اتفاق افتاد. فرسایش شیاری با گذشت زمان به شدت افزایش یافت و در زمان‌های پایانی (حدود ۴۵ دقیقه) تقریباً ثابت شد. غلظت جریان نیز الگویی مشابه با فرسایش شیاری نشان داد. با این حال، دبی جریان در زمان‌های پایانی افزایش چشم‌گیر پیدا کرد. به‌طور کلی این پژوهش نشان داد که با تغییر شدت باران، آستانه وقوع فرسایش شیاری و اوج آن طی بارندگی تغییر کرد. همچنین روند تغییرات فرسایش شیاری طی بارندگی، با افزایش شدت بارندگی شدید شد.

**واژه‌های کلیدی:** دبی جریان، ذرات فرسایش‌پذیر، خاک مارنی، شبیه‌سازی باران، غلظت جریان

فرومدی م.، واعظی ع. ۱۳۹۸. بررسی تغییرات زمانی فرسایش شیاری در خاک حساس به فرسایش تحت باران‌های با شدت متفاوت. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۷ شماره ۲. ص: ۱۳۵-۱۴۷.

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان (مکاتبه کننده)

۲- استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

\* پست الکترونیک: [majid.foroumadi@znu.ac.ir](mailto:majid.foroumadi@znu.ac.ir)

## مقدمه

شیاری تابع تغییرات محیطی، مانند پوشش گیاهی و رطوبت خاک و باران است (Dunjo *et al.*, 2004). گاهی تغییرات فرسایش شیاری به صورت فصلی است، به طوری که طی فصل زمستان به دلیل کاهش نفوذپذیری خاک (Sadeghi *et al.*, 2010) و کاهش پوشش گیاهی (Dunjo *et al.*, 2004) مقدار فرسایش شیاری افزایش می‌یابد. رطوبت پیشین خاک از عواملی بوده که با تأثیر بر سرعت نفوذ آب به خاک به تغییر فرسایش شیاری منجر می‌شود (Lili *et al.*, 2008). این عامل، به عنوان متغیری پویا، تحت تأثیر شدت باران و تداوم بارش و فاصله بین بارش‌ها و ویژگی خاک و تبخیر و تعرق قرار می‌گیرد. در کنار تغییرات زمانی فرسایش شیاری طی یک سال، مقدار این فرسایش از رخدادی به رخداد دیگر تغییر می‌کند. همچنین، شدت وقوع فرسایش شیاری در دوره‌های زمانی مختلف طی بارندگی ممکن است متفاوت باشد (Merz *et al.*, 2006). الگوی تغییرات زمانی فرسایش شیاری طی یک رخداد ممکن است تحت تأثیر نوع خاک، شیب سطح و شدت بارندگی قرار گیرد. تاکنون مطالعات زیادی در مورد علل و عوامل مؤثر بر فرسایش شیاری در سراسر جهان انجام گرفته است که برای مثال می‌توان به مطالعات چن و همکاران (Chen *et al.*, 2014)، واعظی و وطنی (Vaezi & Vatani, 2014) و شن و همکاران (Shen *et al.*, 2016) اشاره کرد. با این وجود مطالعات در مورد تغییرات زمانی فرسایش شیاری محدود می‌باشد و اغلب مطالعات به تغییرات زمانی سایر شکل‌های فرسایش آبی از جمله فرسایش بارانی متمرکز شده‌اند. در این راستا آرووگان (Arowoogun, 2011) در پژوهشی به بررسی فرسایش پاشمانی<sup>۴</sup> در بازه‌های زمانی پنج دقیقه با شدت بارش ۱۱۸/۷۵ میلی‌متر بر ساعت در خاک شن‌لومی پرداختند. آن‌ها دریافتند با افزایش مدت زمان بارندگی، فرسایش هم تا ۱۵ دقیقه افزایش یافت و پس از آن تفاوت معنی‌داری در میزان فرسایش مشاهده نشد. واعظی و همکاران (Vaezi *et al.*, 2012) با بررسی مدت زمان بارندگی در بازه‌های زمانی ۷/۵ دقیقه دریافتند که پاشمان تا دقیقه ۴۵ افزایش و پس از آن افزایش معنی‌داری در میزان پاشمان مشاهده نشد. اولریچ و همکاران (Ulrich *et al.*, 2013) فرسایش شیاری را در

فرسایش شیاری<sup>۱</sup> عبارت از جدا شدن و انتقال رسوب به وسیله جریان متمرکز آب در کانالی باریک و فرسایش‌پذیر است. در زمین‌های شیب‌دار هنگامی که سرعت نفوذ آب به خاک به حد کم‌تر از شدت بارندگی برسد، جریان‌های سطحی پراکنده به وجود می‌آیند که با به هم پیوستن آن‌ها، جریان‌های متمرکز آب<sup>۲</sup> شکل می‌گیرند. در نقطه‌ای از مسیر جریان که نیروی برشی جریان از مقاومت خاک فزونی یافت، ذرات مسیر برداشته شده و انتقال می‌یابد. انتقال ذرات از بستر منجر به آشکار شدن شیاری در امتداد مسیر جریان می‌شود (Zhang *et al.*, 2008). وقوع فرسایش شیاری فرآیندی بسیار پیچیده می‌باشد، از این رو تعیین کمی چگونگی تأثیر رواناب بر فرسایش خاک تحت شرایط مختلف باران و سطح خاک دشوار است (Yan *et al.*, 2008). از طرفی، فرسایش شیاری در اثر غلبه آب جاری بر مقاومت برشی خاک پدیدار می‌شود (Knäpen *et al.*, 2007). از این رو عواملی که در تشکیل جریان متمرکز آب و مقاومت خاک مؤثر می‌باشند بر میزان وقوع فرسایش شیاری اثر می‌گذارند. این نوع فرسایش خاک، منبع و فرآیند عمده تولید رسوب در دامنه‌های شیب‌دار به‌ویژه تحت بارندگی‌های شدید است. فرسایش شیاری به‌طور گسترده در زمین‌های شیب‌دار به‌ویژه در مارن<sup>۳</sup>‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک مشاهده می‌شود (Vaezi & Vatani, 2014). مارن مخلوطی از رس، گچ و کربنات کلسیم بوده که میزان کربنات آن بین ۳۵ تا ۶۵ درصد بوده و از طریق فرسایش دیگر سنگ‌ها در طول فرآیند هوازدگی به وجود می‌آید که در عین حال حاوی مقادیر نسبتاً زیاد سیلت است. به طور کلی سازندهای مارنی به دلیل داشتن مقادیر زیاد سیلت نسبت به فرسایش بسیار حساس بوده و یکی از منابع مهم رسوب در حوزه‌های آبخیز می‌باشند. مساحت انواع مارن‌ها در سطح ایران حدود ۲۵ تا ۳۰ میلیون هکتار برآورد شده است. فرسایش شیاری در کنار تغییرات مکانی به تأثیر تغییرات زمانی نیز دچار می‌شود (Vaezi *et al.*, 2008; Merz *et al.*, 2006). منظور از تغییرات زمانی فرسایش شیاری، تغییرات شدت هدررفت خاک از شیاری در زمان‌های مختلف طی سال است. تغییرات زمانی فرسایش

3. Marl

4. Splash erosion

1. Rill erosion

2. Concentrated water flows

سوی دیگر به دلیل تغییر پایداری خاک‌دانه‌ها و میزان ذرات قابل انتقال طی بارندگی می‌باشد. با این حال اطلاعات اندکی در مورد تغییرات زمانی فرسایش شیاری طی بارندگی به‌ویژه در منطقه نیمه‌خشک وجود دارد. اهمیت این نوع فرسایش خاک در عرصه‌های ماری موجود در مناطق نیمه‌خشک حائز اهمیت است (Vaezi & Gharehdaghlilii, 2013). عرصه‌های ماری حدود ۲۵۰ هزار کیلومتر مربع از سطح ایران را دربرگرفته‌اند. منطقه غرب زنجان یکی از مناطق مهم گسترش چنین سازندهای زمین‌شناسی می‌باشد (Vaezi & Gharehdaghlilii, 2013). از نظر زمین‌شناسی این منطقه روی رسوبات کوارتزی واقع شده است. سازندهای ماری گستره وسیعی (حدود ۲۰ درصد) از این منطقه را دربرگرفته‌اند. این سازندها به علت داشتن ذرات قابل انتقال (رس و سیلت) و داشتن ترکیبات خاص نمکی (آهک و گچ)، نسبت به فرسایش بسیار حساس هستند، به‌طوری‌که این منطقه بیش‌ترین میزان فرسایش و تولید رسوب را در حوزه آبخیز سفیدرود دارد. یکی از ویژگی‌های عمده مارن‌های منطقه، ناپایداری ساختمان خاک می‌باشد. مقدار پایین بارش‌های آسمانی و پراکنش نامنظم آن‌ها عامل مهم محدودکننده رشد گیاهان در منطقه است. از این‌رو این عرصه‌ها فاقد پوشش گیاهی انبوه و دائمی بوده و استقرار پوشش گیاهی در آن‌ها با دشواری‌هایی روبه‌رو است (Vaezi & Gharehdaghlilii, 2013). فرآیند فرسایش در سازندهای ماری بسیار فعال است. بر حسب ترکیبات کانی‌شناسی، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، شرایط اقلیمی و توپوگرافی شکل‌های گوناگون فرسایش روی مارن‌ها مشاهده می‌شود. آگاهی از روند تغییرات زمانی فرسایش شیاری طی بارندگی و تشخیص زمان آستانه و اوج وقوع فرسایش شیاری طی زمان می‌تواند در پیش‌بینی نقش هر یک از شدت‌های باران در وقوع فرسایش شیاری سودمند باشد. در این ارتباط می‌توان برای هر رخداد بارندگی با شدت معین که برای مدتی کافی اتفاق بیافتد، زمان وقوع بیش‌ترین مقدار فرسایش شیاری را تعیین کرد و از آن برای تشخیص حداکثر میزان فرسایش شیاری برای باران‌های منطقه نیمه‌خشک استفاده کرد. از این رو پژوهش حاضر با هدف بررسی تغییرات زمانی فرسایش شیاری و رابطه آن با ویژگی‌های جریان در شدت‌های مختلف بارندگی در خاک ماری منطقه نیمه‌خشک انجام گرفت.

شش کرت به مساحت ۰/۲ مترمربع تحت باران شبیه‌سازی شده با شدت ثابت ۱۳ میلی‌متر بر ساعت به مدت ۶۰ دقیقه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که سرعت نفوذ در کرت‌ها در اواخر بارندگی کاهش یافت و میزان رواناب و فرسایش شیاری افزایش یافت. وطنی و واعظی (Vatani & Vaezi, 2013) در پژوهشی به بررسی تغییرات زمانی فرسایش شیاری در هشت نوع بافت مختلف، در کرت‌هایی به طول ۱/۲ متر و به عرض یک متر تحت باران شبیه‌سازی شده با شدت ۶۰ میلی‌متر بر ساعت و به مدت یک ساعت پرداختند. نتایج نشان داد که میزان هدررفت خاک در شیاری طی بارندگی به شدت تغییر کرده و به‌طور کلی در اوایل بارندگی، هدررفت خاک در شیاری کم بود و با گذشت زمان هدررفت خاک در شیاری افزایش یافت. دانگ‌دانگ و همکاران (Dongdong et al., 2016) در پژوهشی به بررسی یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی فرسایش شیاری ذرات خاک با استفاده از پارامترهای هیدرولیکی (سرعت جریان، تنش برشی و قدرت جریان) در فلومی به ابعاد ۴×۰/۱ متر مربع پرداختند. نتایج نشان داد که پیش‌بینی مقدار فرسایش شیاری با استفاده از سرعت جریان بهترین برآورد را می‌دهد. اسدی و همکاران (Asadi et al., 2017) در پژوهشی به بررسی تغییرات دینامیک غلظت رسوب در فرسایش شیاری در چهار دبی جریان و در سه شیب مختلف در شیاری دست‌ساز دوزنقه‌ای به طول سه متر و عرض کف پنج سانتی‌متر پرداختند. نتایج نشان داد که غلظت رسوب در دقایق اولیه آزمایش زیاد بود، اما با گذشت زمان کاهش یافته و به یک حالت کم و بیش پایدار رسید. واعظی و همکاران (Vaezi et al., 2017) در پژوهشی به بررسی اثر ضربه قطرات باران بر فرسایش آبی در هشت شدت باران (از ۱۰ تا ۸۰ میلی‌متر بر ساعت) و در ۴۲ کرت به ابعاد ۱/۲×۴ متر مربع پرداختند. نتایج نشان داد که مقدار رواناب و هدررفت خاک با افزایش شدت باران افزایش یافت و هم‌چنین با افزایش شدت باران سهم ضربه قطرات باران در مقدار رواناب و هدررفت خاک کاهش یافت. بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که فرسایش شیاری دچار تغییراتی از رخداد بارانی به رخداد دیگر و نیز تغییراتی طی فصول مختلف سال می‌شود. این تغییرات از یک سو به دلیل افزایش رطوبت خاک و تأثیر آن بر کاهش نفوذپذیری خاک است و از

## مواد و روش‌ها

### انتخاب خاک مورد بررسی

خاک مورد بررسی واقع در سازندهای مارنی در غرب حوزه آبخیز زنجان رود در شمال غرب استان زنجان با مختصات جغرافیایی ۴۸ درجه و ۴ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۵۸ دقیقه عرض شمالی بود (شکل ۱). میانگین بارندگی سالانه ۳۱۵ میلی‌متر و اقلیم منطقه به روش دمارتن، نیمه‌خشک می‌باشد. به دلیل کمبود بارندگی و پراکنش غیریکنواخت آن طی سال و نیز ساختمان ناپایدار خاک، این عرصه‌ها فاقد پوشش گیاهی مناسب می‌باشد تا از وقوع فرسایش خاک به ویژه در زمان وقوع باران‌های

شدید جلوگیری نماید. مشاهدات نشان می‌دهد که فرسایش شیاری در کنار سایر شکل‌های فرسایش از شکل‌های مهم فرسایش آبی در این سازندها است. این خاک‌ها از نظر شیمیایی اغلب شور بوده و از نظر عناصر غذایی فقیر هستند. با این حال در برخی سال‌ها به دلیل بارندگی‌های مناسب، چنین عرصه‌هایی تحت کشت گیاهان زراعی دیم از جمله گندم قرار می‌گیرند و در سال‌های خشک، رها می‌شوند (Vaezi et al., 2012). نوارهای کشت ایجاد شده در گندم دیم، رفتاری مشابه با شیار دارد که منجر به تشدید شدت فرآیندهای فرسایشی و در نتیجه هدررفت بیش‌تر خاک از شیارها می‌شود.



(b)



(a)

شکل ۱- فرسایش شیاری در دامنه مارنی (الف) و کشت گندم دیم در عرصه‌های مارنی طی سال‌های تر (ب) در منطقه مطالعاتی

Figure 1. Rill erosion in a marl hillslope (a) and cultivation of rainfed wheat in marl areas during wet years (b) in the study area

### تعیین ویژگی‌های خاک

حدود هشت تن خاک از دامنه‌ای تحت فرسایش شیاری از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر در سه نقطه در طول دامنه برداشت و با هم مخلوط و یک نمونه مرکب تهیه شد و پس از هواخشک شدن و عبور از الک شش میلی‌متر در آزمایشگاه مورد تجزیه فیزیکی و شیمیایی قرار گرفتند. انتخاب این محدوده از اندازه ذرات خاک از آن‌جا بود که در شرایط هواخشک، عرصه‌های مارنی اغلب دارای ساختمان کاذب شبیه به کلوخه بوده که در مواجهه با آب ناپایدار هستند. از این‌رو به دلیل فراوانی بالای چنین اندازه‌هایی از خاک‌دانه، این محدوده برای انجام آزمایش

انتخاب شد. برای این منظور توزیع نسبی اندازه ذرات به روش هیدرومتری (Gee & Bauder, 1986)، جرم ویژه ظاهری خاک<sup>۱</sup> با استفاده از سیلندر فلزی به قطر پنج سانتی‌متر و ارتفاع ۴/۹ سانتی‌متر در صحرا (Blake & Hartge 1986)، پایداری خاک‌دانه در خاک‌دانه‌های با قطر شش تا هشت میلی‌متر بر اساس میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌های پایدار<sup>۲</sup> در آب به روش الک تر برای مدت یک دقیقه (Ulrich et al., 2013)، هدایت هیدرولیکی اشباع<sup>۳</sup> به روش بار ثابت (Page, 1982)، واکنش خاک (pH) در گل اشباع به وسیله pH سنج<sup>۴</sup>، هدایت الکتریکی<sup>۵</sup> در عصاره گل اشباع به وسیله EC

4. pH meter  
5. Electrical conductivity

1. Bulk density  
2. Mean weight diameter of stable aggregate  
3. Saturated hydraulic conductivity

گچ ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) در خاک به روش استون (Page, 1982) تعیین شدند.

سنج<sup>۱</sup>، ماده آلی به روش واکلی و بلاک (Walkley & Black, 1947)، کربنات کلسیم معادل خاک به روش خنثی‌سازی با استفاده از اسیدکلریدریک نرمال و مقدار

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مارنی مورد مطالعه در غرب استان زنجان

Table 1. Physical and chemical properties of marl soil studied in west of Zanjan province

Physical property	Mean	Chemical property	Mean
Sand (%)	0.17	pH	7.45
Silt (%)	40.01	EC ( $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ )	6.35
Clay (%)	59.82	OM (%)	0.63
Bulk density ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	1.04	$\text{CaCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (%)	26.14
MWD (mm)	0.19	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (%)	12.30
Saturated hydraulic conductivity ( $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	1.81		

برای جمع‌آوری نمونه‌های رواناب و رسوب تعبیه شده بود. پس از پر کردن فلوم با خاک، سطح خاک به آرامی تسطیح شد و سپس سه شیار دست‌ساز مطابق با تحقیقات پیشین (Asadi *et al.*, 2017; Dongdong *et al.*, 2016) و شبیه به نوارهای کشت دیم با عمق هفت سانتی‌متر و فاصله ۳۰ سانتی‌متر شبیه به جویچه‌های کشت گندم (Zhang *et al.*, 2016) در طول فلوم ایجاد شد (شکل ۲). برای همسان‌سازی شرایط خاک داخل فلوم با شرایط خاک منطقه، خاک در چند مرحله مرطوب شد و به جرم مخصوص ظاهری خاک اولیه نزدیک شد.

### تعیین تغییرات زمانی متغیرهای جریان و فرسایش شیلی

برای بررسی مقدار متغیرهای جریان و فرسایش شیلی یک دستگاه فلوم به طول چهار متر و عرض ۹۴ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و با شیب ۱۰ درصد و از جنس آهن طراحی و ساخته شد. این ابعاد منطبق با فلوم‌های مورد استفاده در پژوهش‌های یان و همکاران (Yan *et al.*, 2015) و یان و همکاران (Yan *et al.*, 2008) بود. در کف فلوم، سوراخ‌هایی برای زهکشی آسان آب نفوذ یافته ایجاد شد. در قسمت پایین فلوم، سه قطعه لوله خروجی



شکل ۲- نمایی از فلوم فرسایشی و دستگاه شبیه‌ساز باران مورد استفاده در پژوهش

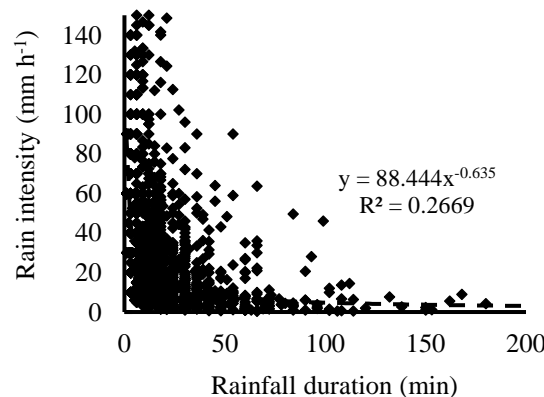
Figure 2. View of the flume erosion and rain simulator used in research

برای اعمال باران‌های با شدت متفاوت، یک دستگاه شبیه‌ساز باران با صفحه بارشی به طول ۴/۵ متر و به عرض ۱۰۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۸۰ سانتی‌متر طراحی و ساخته شد. صفحه بارش دستگاه شامل ۲۰ قطعه نازل آبپاش بود. قطر قطرات باران به روش گلوله آردی تعیین شد. بر این اساس قطر قطرات باران در محدوده ۰/۸۵ میلی‌متر تا ۲/۷ میلی‌متر و متوسط قطر آن‌ها ۱/۸۵ میلی‌متر بود. به دلیل وجود فشار بالای آب در سطح صفحه بارش (حداقل یک

قطر قطرات باران‌های با شدت متفاوت، یک دستگاه شبیه‌ساز باران با صفحه بارشی به طول ۴/۵ متر و به عرض ۱۰۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۸۰ سانتی‌متر طراحی و ساخته شد. صفحه بارش دستگاه شامل ۲۰ قطعه نازل آبپاش بود.

می‌باشند. از این رو به نظر می‌رسد وقوع فرسایش شیاری در منطقه اغلب در اثر باران‌های با شدت و مدت بالا اتفاق می‌افتد. چنین باران‌هایی غالباً فراوانی وقوع پایینی طی سال دارند و از این رو دوره بازگشت آن‌ها طولانی است. با این حال اهمیت آن‌ها در صورت وقوع، در ایجاد فرسایش چشم‌گیر است. انتخاب زمان ثابت برای کل باران‌های مذکور (از شدت ۱۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت) به دلیل امکان پایش تغییرات زمانی فرسایش شیاری در زمان نسبتاً طولانی و امکان مقایسه آماری باران‌ها با یک‌دیگر بود. بدین ترتیب در مجموع، این پژوهش در ۳۰ واحد آزمایشی (۱۰ شدت باران در سه تکرار) انجام گرفت. آب مورد نیاز دستگاه، از منبع آب شهری که دارای  $7/23$  pH و  $EC=0/385$  dS.m<sup>-1</sup> بود، از طریق لوله‌های پلاستیکی به صفحه بارش منتقل شد. نمونه‌های خاک تحت تأثیر باران‌های شبیه‌سازی شده قرار گرفتند. فرسایش شیاری تحت باران‌های شبیه‌سازی شده در فلوم مورد بررسی قرار گرفت. در فاصله زمانی پنج دقیقه، به مدت یک ساعت رواناب و رسوب حاصل از هر شیار در ظرفی معین جمع‌آوری شد (Vaezi & Gharehdaghlil, 2013). دبی جریان بر اساس حجم جریان تولید شده طی بارندگی به مدت زمان وقوع جریان به دست آمد (Vaezi & Gharehdaghlil, 2013). غلظت جریان از نسبت مقدار رسوب بر حجم مخلوط در هر بازه زمانی پنج دقیقه‌ای به دست آمد. مقدار فرسایش شیاری برابر با مقدار رسوب خروجی از هر شیار طی هر رخداد در واحد سطح و واحد زمان بود که بر اساس جرم رسوب هر شیار، مساحت شیار و مدت وقوع جریان (پنج دقیقه) محاسبه شد.

اتمسفر) و ماهیت نازل‌های دستگاه (آبپاش)، سقوط قطرات باران از سطح صفحه بارش به صورت غیرثقلی بوده و قطرات باران تحت فشار آب در لحظه برخورد با سطح خاک دارای سرعتی بالا بوده و به سرعت حد (شش متر بر ثانیه) رسیدند (Gunn & Kinzer, 1949). صفحه بارش قادر به تولید باران‌های با شدت متفاوت از ۱۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت بود. از آن‌جا که باران‌های با شدت کم‌تر از ۱۰ میلی‌متر بر ساعت در منطقه فرسایش‌زا نبودند (Besharat & Vaezi, 2015) از باران‌های با شدت بالاتر برای بررسی اثر تغییرات زمانی و شدت باران بر متغیرهای جریان و فرسایش شیاری استفاده شد. آزمایش در ۱۰ شدت باران (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت) با سه تکرار انجام گرفت. برای انتخاب شدت و مدت مناسب بارندگی، از تحلیل‌های انجام گرفته روی ۱۹۶۱ رخداد باران ثبت شده در ایستگاه باران‌نگاری قلتوق واقع در غرب زنجان طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۰ استفاده شد (Besharat & Vaezi, 2015). بر این اساس شدت بارندگی در منطقه از شدت حدود یک میلی‌متر بر ساعت تا شدت ۱۵۰ میلی‌متر بر ساعت تغییر می‌کند و تداوم آن‌ها بین پنج دقیقه تا بیش از سه ساعت بود (شکل ۳). باران‌های رایج در منطقه دارای شدتی حدود ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر بر ساعت (با حدود ۲۶ درصد فراوانی) با مدت بین ۷/۵ و ۱۵ دقیقه (با حدود ۳۲ درصد فراوانی) می‌باشند. بررسی‌های اولیه نشان داد که چنین باران‌هایی در شرایطی که خاک خشک می‌باشد، فرسایش‌زا نیستند. شدت‌های باران در منطقه در دامنه پنج تا ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت دارای فراوانی ۹۳ درصد و با تداوم سه تا ۶۰ دقیقه دارای فراوانی ۷۵ درصد



شکل ۳- منحنی شدت-مدت باران‌ها در ایستگاه قلتوق زنجان برای سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۰  
Figure 3. Intensity-duration curves rainfalls in Qoltuq station, Zanzan for 2001-2011

## تجزیه و تحلیل داده‌ها

به‌منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها، ابتدا نرمال بودن توزیع آماری داده‌ها بر مبنای تحلیل چولگی و کشیدگی داده‌ها تعیین شد (Kravchenko & Bullock, 1999). مقایسه میانگین بین بازه‌های زمانی پنج دقیقه‌ای در شدت‌های مختلف باران از نظر دبی جریان، غلظت جریان و فرسایش شیلیاری جریان به روش آزمون دانکن تعیین شد. برای این منظور از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۰ بهره گرفته شد. برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel نسخه ۲۰۱۳ استفاده شد.

## نتایج و بحث

## تفاوت زمانی متغیرهای جریان بین شدت‌های باران

باران‌های با شدت کم‌تر از ۳۰ میلی‌متر بر ساعت فرسایش‌زا نبودند. از این رو از داده‌های باران با شدت ۳۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت برای تعیین تفاوت زمانی متغیرهای جریان (زمان آغاز، دبی و غلظت جریان) بین شدت‌های باران استفاده شد. بررسی توزیع آماری متغیرهای جریان نشان داد که بیش‌ترین چولگی و کشیدگی به ترتیب مربوط به فرسایش شیلیاری و دبی

جریان بود. بر اساس این دو آماره، متغیرهای جریان از توزیع آماری نرمال پیروی کردند. نتایج تجزیه واریانس تفاوت زمانی متغیرهای جریان بین شدت‌های باران نشان داد که تفاوتی معنی‌دار بین شدت‌های باران از نظر تمام متغیرهای جریان وجود دارد ( $p < 0.0001$ ) (جدول ۲). افزایش شدت باران از یک سو به دلیل افزایش محتوای رطوبتی خاک، منجر به کاهش بیش‌تر نفوذ آب باران و در نتیجه تولید سریع رواناب و افزایش دبی آن می‌شود. افزایش دبی جریان می‌تواند افزایش بیش‌تر هدررفت خاک و در نتیجه تغییر غلظت رسوب را در پی داشته باشد. از سوی دیگر با افزایش شدت باران، تخریب خاک‌دانه‌ها افزایش یافته و ذرات حساس بیش‌تری در معرض انتقال قرار می‌گیرند. در پژوهشی واعظی و وطنی (Vaezi & Vatani, 2014) نیز نشان دادند که میزان هدررفت خاک در شیارها طی بارندگی به شدت تغییر می‌کند و به طور کلی در اوایل بارندگی هدررفت خاک در شیارها کم بوده و با گذشت زمان با انتقال ذرات فرسایش‌پذیر، هدررفت خاک در شیارها افزایش می‌یابد و مقدار غلظت رواناب افزایش پیدا می‌کند.

جدول ۲- تجزیه واریانس تأثیر تغییرات زمانی بر دبی جریان، غلظت جریان و فرسایش شیلیاری در شدت‌های مختلف باران

Table 2. The variance analysis effect of temporal variations on flow discharge, flow concentration and rill erosion in the rainfall different intensities

Variation resource	D.F	Mean of squares	Sum of squares	F	Significance	Skewness	Kurtosis
Flow start time	7	201.32	1408.62	185.75	0.000	0.16	-1.21
Flow discharge	7	$1.48 \times 10^{-12}$	$5.81 \times 10^{-8}$	4.33	0.000	-0.10	-1.43
Flow concentration	7	$6.01 \times 10^{-5}$	$1.52 \times 10^{-3}$	6.28	0.000	0.97	0.19
Rill erosion	7	$4.04 \times 10^{-6}$	$2.82 \times 10^{-4}$	6.68	0.000	0.18	-1.30

## تفاوت زمانی فرسایش شیلیاری بین شدت‌های باران

نتایج تجزیه واریانس تغییرات زمانی فرسایش شیلیاری بین شدت‌های مختلف باران نشان داد که تفاوتی معنی‌دار بین شدت‌های باران از نظر تغییرات زمانی فرسایش شیلیاری وجود دارد ( $p < 0.0001$ ) (جدول ۲). علت این موضوع به دلیل نقش مهم شدت باران در افزایش تأمین آب در سطح خاک در بازه‌های زمانی پنج دقیقه و در نتیجه تولید رواناب بیش‌تر در شیارها بود. تغییرات ساختمان خاک و میزان ذرات قابل انتقال در سطح نیز عاملی دیگر است که موجب تفاوت بین شدت‌های باران از نظر تغییرات زمانی

فرسایش شیلیاری می‌شود. به نظر می‌رسد با افزایش شدت باران، میزان تخریب خاک‌دانه‌های سطح طی بارندگی افزایش می‌یابد و در بازه‌های زمانی ابتدایی میزان تخریب خاک‌دانه‌ها بیش‌تر است و در نتیجه ذرات قابل انتقال بیش‌تری روی سطح خاک در معرض جریان قرار می‌گیرند.

## الگوی تغییرات زمانی متغیرهای جریان و فرسایش

## شیاری در شدت‌های بارندگی

بررسی الگوی تغییرات مقدار دبی جریان در بازه‌های زمانی پنج دقیقه‌ای در شدت‌های مختلف باران نشان داد

پایانی به حد تقریباً ثابتی رسید. بررسی‌های لی‌یو و همکاران (Liu *et al.*, 2011) نشان داد که در آغاز بارندگی به دلیل پایین بودن رطوبت خاک، سرعت نفوذ آب به خاک بالا و مقدار رواناب کم بود. با گذشت زمان و پرسدن خلل و فرج خاک، سرعت نفوذ کاهش یافته و میزان رواناب تولیدی رو به افزایش می‌گذارد و در نهایت به میزان ثابتی می‌رسد که این موضوع در شدت‌های بالاتر، در زمان کوتاه‌تری به دلیل حجم آب بالایی که خاک در زمان کوتاه دریافت می‌کند اتفاق می‌افتد. جدایش و انتقال ذرات خاک با گذشت زمان نیز تغییر می‌کند. مطالعه کالو و همکاران (Chalov *et al.*, 2014) نشان داد سهم زیادی از انتقال رسوب (۷۰-۸۰ درصد) مربوط به زمان‌های اوج جریان است. فرانتی و همکاران (Giménez *et al.*, 2012) نشان دادند که فرسایش پذیری خاک پس از عملیات شخم (مراحل اولیه فرسایش) بیش‌ترین مقدار خود را دارد و این به دلیل سست شدن خاک‌ها و از هم جدا شدن ذرات خاک در اثر شخم است. در بازه‌های زمانی ابتدایی، فراهمی ذرات قابل انتقال زیاد بوده و بخش عمده انرژی رواناب صرف انتقال این رسوبات می‌شود (Giménez *et al.*, 2012). در پژوهشی واعظی و همکاران (Vaezi *et al.*, 2012) در بررسی فرسایش پاشمانی نشان دادند که با تداوم بارندگی، میزان پاشمان ذرات خاک تا زمان ۴۵ دقیقه به دلیل تخریب بیش‌تر خاک‌دانه‌ها افزایش یافت و پس از این زمان، به دلیل تشکیل اندوده سطحی از تخریب بیش‌تر خاک‌دانه‌ها و تا اندازه‌ای از پاشمان بیش‌تر ذرات جلوگیری به عمل آمد و مقدار پاشمان و فرسایش خاک کاهش یافت.

#### رابطه بین فرسایش شیاری و تولید جریان در شدت‌های بارندگی

نتایج نشان داد که بین دبی جریان و فرسایش شیاری در بازه‌های زمانی پنج دقیقه‌ای در شدت‌های مختلف باران رابطه‌ای معنی‌دار وجود دارد و مقدار فرسایش شیاری با افزایش دبی جریان افزایش یافت. افزایش دبی جریان نشان‌دهنده افزایش قدرت حمل جریان می‌باشد. از این رو با افزایش دبی جریان طی بارندگی، میزان فرسایش شیاری نیز افزایش یافت. درجه وابستگی فرسایش شیاری به دبی جریان در شدت‌های مختلف باران متفاوت بود. این تفاوت به دلیل تغییر میزان ذرات قابل انتقال در سطح در شدت‌های مختلف باران بود. در

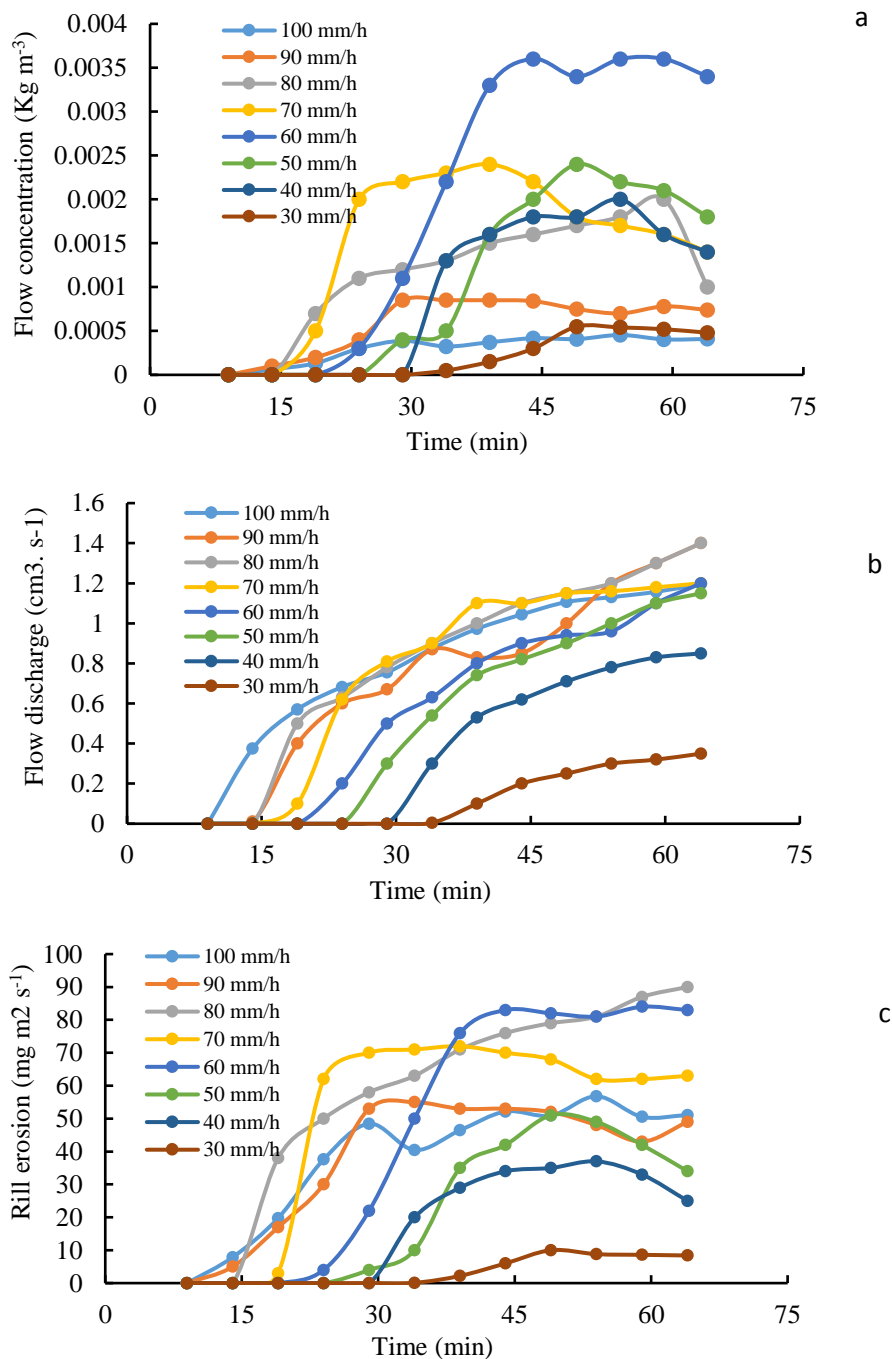
که با افزایش شدت باران مقدار دبی جریان در همه شدت‌ها روند افزایشی داشت و مقدار آن در شدت‌های بالاتر بیش‌تر بود که علت این موضوع به دلیل حجم بالای باران دریافتی خاک در شدت‌های بالا بود که باعث افزایش مقدار رواناب در این شدت‌ها شد (شکل ۴الف). در پژوهشی ویلیامز و همکاران (Williams *et al.*, 2004) با بررسی خاک‌های منطقه تگزاس آمریکا نشان دادند که طی رخ‌دادهای باران مقدار تولید رواناب نیز به دلیل افزایش محتوای رطوبتی خاک افزایش یافت ( $R^2=0/96$ ). در پژوهش حاضر تخریب خاک‌دانه‌های سطح و تشکیل اندوده سطحی عاملی دیگر بود که در شدت‌های بالا تأثیر زیادی بر تولید جریان و افزایش دبی جریان گذاشت. یو و همکاران (Yu *et al.*, 2014) نیز به بررسی تغییرات جدایش ذرات خاک در زمین‌های کشاورزی در کشور چین پرداختند. این پژوهش‌گران دریافتند که جدا شدن ذرات خاک به صورت معنی‌داری با گذشت زمان تغییر می‌کند. بررسی الگوی تغییرات مقدار غلظت جریان در بازه‌های زمانی پنج دقیقه‌ای در شدت‌های مختلف باران نشان داد که با گذشت زمان غلظت جریان روند افزایشی داشت اما از دقیقه ۴۵ به بعد تقریباً در همه شدت‌های باران مقدار آن دچار کاهش شد یا به روندی ثابت رسید. علت این موضوع افزایش زیاد مقدار رواناب و در مقابل عدم تغییرات چشم‌گیر در فرسایش شیاری در اواخر بارندگی بود. این موضوع در شدت‌های ۶۰ و ۸۰ میلی‌متر بر ساعت بارزتر بود (شکل ۴ب).

بررسی الگوی تغییرات زمانی فرسایش شیاری نشان داد که با افزایش شدت باران، زمان آغاز فرسایش شیاری کاهش یافت به طوری که در شدت ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت وقوع فرسایش شیاری در دقیقه نه و در شدت ۳۰ میلی‌متر بر ساعت در دقیقه ۳۲ رخ داد (شکل ۴ج). همچنین در اوایل بارندگی، هدررفت خاک در شیارها کم بود و با گذشت زمان با انتقال ذرات فرسایش‌پذیر، هدررفت خاک در شیارها افزایش یافت. روند افزایش شدت هدررفت خاک در شیارها در زمان‌های اولیه بارندگی در اغلب شدت‌ها زیاد بود و در شدت‌های بالاتر این روند از شدت بیش‌تری برخوردار بود. با این حال در ادامه بارندگی به دلیل انتقال بخش عمده ذرات فرسایش‌پذیر در زمان‌های اولیه، افزایش شدت هدررفت خاک در شیارها روندی تدریجی داشت و در لحظات

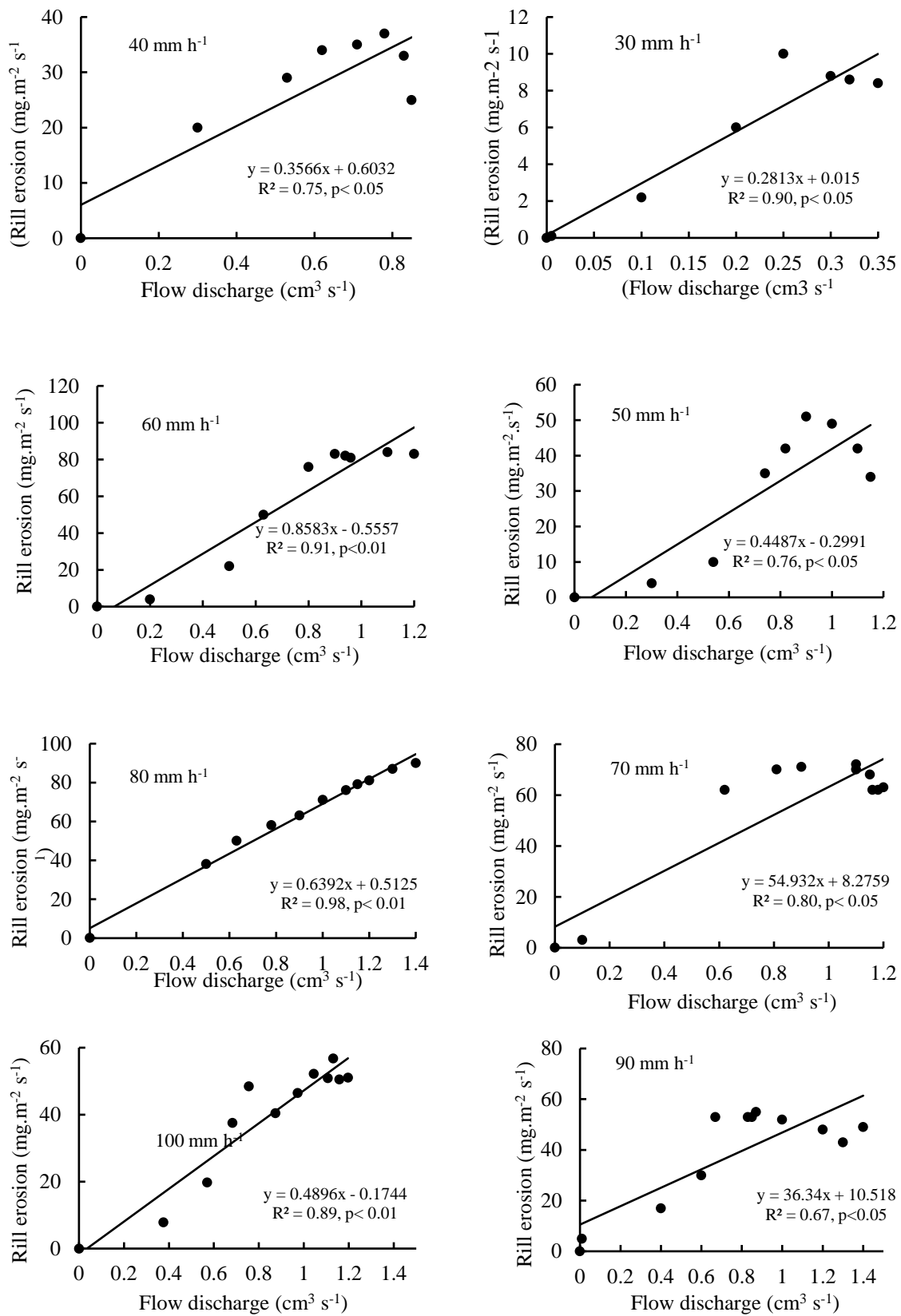


دبی جریان بسیار بیشتر از شدت فرسایش شیاری می‌باشد (شکل ۵). یافته‌های ژو و وو (Zhou & Wu, 2008) در حوزه‌های آبخیز شمال چین نشان داد که با افزایش رخ دادهای بارندگی، غلظت رسوب افزایش یافت و میزان ذرات منتقله نیز بیشتر شد.

شدت ۸۰ میلی‌متر بر ساعت، بیش‌ترین وابستگی بین فرسایش شیاری و دبی جریان وجود داشت. به نظر می‌رسد در این شدت باران هم‌چنان که دبی جریان طی بارندگی افزایش می‌یابد ذرات بیش‌تری نیز دچار فرسایش می‌شوند. در حالی که در شدت‌های دیگر روند افزایش



شکل ۴- رابطه بین زمان و دبی جریان (الف)، غلظت جریان (ب) و فرسایش شیاری (ج) در شدت‌های مختلف باران در خاک مارنی  
Figure 4. The relationship between time and flow discharge (a), flow concentration and rill erosion (c) in rainfall different intensities in a marl soil



شکل ۵- رابطه بین دبی جریان و فرسایش شیاری در شدت‌های مختلف باران در خاک مارنی

Figure 5. The relationship between flow discharge and rill erosion in rainfall different intensities in a marl soil

## نتیجه‌گیری کلی

است و در زمان‌های پایانی به دلیل انتقال بخش عمده ذرات فرسایش‌پذیر در زمان‌های قبل، الگوی تغییرات فرسایش شیاری شبیه به الگوی تغییرات دبی جریان نیست. به طور کلی این مطالعه نشان می‌دهد که پیش‌بینی تغییرات زمانی فرسایش شیاری منوط به آگاهی از شدت بارندگی می‌باشد. با آگاهی از شدت بارندگی، می‌توان زمان تولید بیش‌ترین جریان آب و فرسایش‌شیاری را پیش‌بینی کرد و فرسایش‌دهنده‌ترین باران‌های منطقه از نظر فرسایش شیاری را بر مبنای شدت و مدت آن‌ها تشخیص داد. شناخت این موضوع می‌تواند در برنامه‌ریزی زمانی اقدامات مدیریتی برای کاهش فرسایش شیاری مانند چرا و شخم سودمند باشد. هم‌چنین نتایج این پژوهش می‌تواند به گسترش معادلاتی برای کمی‌سازی تغییرات زمانی فرسایش شیاری در شدت‌های مختلف بارندگی و در نهایت مدل‌سازی دقیق این نوع فرسایش خاک کمک کند.

این پژوهش نشان داد که روند تغییرات زمانی فرسایش شیاری طی بارندگی در شدت‌های مختلف باران مشابه نیست. شدت تغییرات زمانی فرسایش شیاری با افزایش شدت بارندگی افزایش می‌یابد. با افزایش شدت باران از یک سو به دلیل افزایش محتوای رطوبتی خاک، نفوذپذیری خاک کاهش یافته و در نتیجه دبی جریان افزایش می‌یابد. از سوی دیگر افزایش شدت باران موجب تخریب بیش‌تر ساختمان خاک سطحی می‌گردد که این موضوع در کنار کاهش بیش‌تر نفوذپذیری خاک منجر به تولید ذرات حساس بیش‌تری در سطح خاک می‌شود. فرسایش شیاری در شدت‌های مختلف باران دچار تغییرات زمانی آشکاری بود. با گذشت زمان بارندگی به دلیل افزایش دبی جریان، غلظت جریان و در نتیجه فرسایش شیاری افزایش می‌یابد. در زمان‌های اولیه بارندگی، وابستگی فرسایش شیاری به دبی جریان بیش‌تر

## References

- Arowoogun E.O., 2011. The Influence of rainfall Duration on Splash Produced from A Loamy sand soil. *Master's thesis. Department of agricultural engineering in partial fulfillment Abeokuta ogun state.*
- Asadi H., Aligoli M., and Gorji M. 2017. Dynamic changes of sediment concentration in rill erosion at field experiments. *Journal of Water and Soil Sciences*, 20(78): 125- 139. (In Persian)
- Besharat F., and Vaezi A. R. 2015. Soil loss under simulated rainfalls rainfall during events on runoff and soil loss under simulated rainfalls. *Iranian Watershed Management Science and Engineering*, 9(29): 9-18. (In Persian)
- Blake G.R., and Hartge K. 1986. Bulk density, In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1, (2<sup>nd</sup> Ed.)*, Agronomy Monograph, 9. *American Society of Agronomy. Madison. WI*, 363-375.
- Chalov S.R., Jarsjö J., Kasimov N.S., Romanchenko A.O., Pietron J., Thorslund J., and Promakhova E.V. 2014. Spatio-temporal variation of sediment transport in the Selenga River Basin, Mongolia and Russia. *Environmental Earth Sciences*, 73: 1-18.
- Chen X.Y., Zhao Y., Mo B., and Mi H.X. 2014. An improved experimental method for simulating erosion processes by concentrated channel flow. *Plos one*, 9(6): p. e99660.
- Dongdong W., Zhanli W., Nan S., and Hao C. 2016. Modeling soil detachment capacity by rill flow using hydraulic parameters. *Journal of Hydrology*, 535(6): 473-479.
- Dunjo G., Pardini G., and Gispert M. 2004. The role of land use-land cover on runoff generation and sediment yield at a microplot scale, in a small Mediterranean catchment. *Journal of Arid Environment*, 57: 99-116.
- Franti T.G., Laflen J.M., and Watson D.A. 1985. Soil erodibility and critical shear under concentrated flow. *American Society of Agricultural Engineers*, 42: 329-335.
- Gee G.W., and Bauder W. 1986. Particle size analysis. In: *Methods of soil analysis. Part 1. 2<sup>nd</sup> (Ed.) Klute, A. (Ed). Agron. Monoger. 9. American Society Agronomy. Madison. WI*. pp: 383-411.
- Giménez R., Casali J., Grande I., Díez J., Campo M.A., Álvarez-Mozos J., and Goni M. 2012. Factors controlling sediment export in a small agricultural watershed in Navarre. Spain. *Agricultural Water Management*, 110: 1-8.
- Gunn R., and Kinzer G.D. 1949. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. *Journal of Meteorology*, 6(4): pp: 243-248.
- Knapen A., Poesen J., Govers G., Gyssels G., and Nachtergaele J. 2007. Resistance of soils to concentrated flow erosion: a review. *Earth Science Reviews*, 80(1-2): 75-109.

- Kravchenko A., and Bullock D.G. 1999. A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties. *Agronomy Journal*, 91(3): 393-400.
- Lili M., Bralts V.F., Yinghua P., Han L., and Tingwu L. 2008. Methods for measuring soil infiltration: State of the art. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 1(1): 22-30.
- Liu H., Lei T.W., Zhao J., Yuan C.P., Fan Y.T., and Qu L.Q. 2011. Effects of rainfall intensity and antecedent soil water content on soil infiltrability under rainfall conditions using the run off-on-out method. *Journal of Hydrology*, 396(1): 24-32.
- Merz R., Bloschl G., and Parajka J. 2006. Spatiotemporal variability of event runoff coefficients. *Journal of Hydrology*, 331: 591- 604.
- Page A.L. 1982. Method of soil analysis. Part 2: chemical and microbiological properties. *Soil Science Society of American Madison, Wisconsin, USA*.
- Sadeghi S.H.R., Mohammadpour K., and Dianatytilaki G.E. 2010. Temporal variability of runoff coefficient in the summer pastures of Kadir, Proceedings of the 6th National Conference of Science and Watershed Engineering and 4<sup>th</sup> National Conference of Erosion and Sediment, 28-29 April, Tehran, Iran. pp: 52-60. (In Persian)
- Shen H., Zheng F., Wen L., Han Y., and Hu W. 2016. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope. *Soil and Tillage Research*, 155: 429-436.
- Ulrich U., Dietrich A., and Fohrer N. 2013. Herbicide transport via surface runoff during intermittent artificial rainfall: a laboratory plot scale. *Catena*, 101: 38-49.
- Vaezi A.R., Ahmadi M., and Cerdà A. 2017. Contribution of raindrop impact to the change of soil physical properties and water erosion under semi-arid rainfalls. *Science of the Total Environment*, pp:382-392.
- Vaezi A.R., and Gharehdaghlilii H. 2013. Quantification of rill erosion development in Marl soils of Zanjanroud watershed in North West of Zanjan, Iran. *Journal of Water and Soil*, 27(5): 872-881. (In Persian)
- Vaezi A.R., and Vatani A. 2014. Determination of rill erodibility in some Zanjan soils under rain simulated. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 71: 59-67. (In Persian)
- Vaezi A.R., Bahrami H.A., Sadeghi S.H.R., and Mahdian M.H. 2008. Spatial variations of runoff in a port of calcareous soils of semi-arid region in northwest of Iran. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 15 (5): 56-65. (In Persian)
- Vaezi A.R., Rostami A., and Mohammadi M.H. 2012. Temporal variation of soil degradation and splash processes in Marl under Simulated rainfall. *Journal of Soil Research*, 25 (4): 362-371. (In Persian)
- Vatani A., and Vaezi A.R. 2013. Soil loss in rills its temporal variation during rainfall in different soil texture. *Journal of Soil and Water*, 24(3): 84-92. (In Persian)
- Walkley A., and Black A. 1947. Determination of organic matter in the soil by chromic acid digestion. *Soil Science*, 63: 251-264.
- Williams B.M., Martinez-Mena S., and Deeksb L. 2004. Exponential distribution theory and aggregate erosion. *Soil Science Society of America Journal*, 6: 382-391.
- Yan L., Lei T., Zhang J., Zhang Q., and Qu L. 2015. Finite element method for one-dimensional rill erosion simulation on a curved slope. *International Soil and Water Conservation Research*, 3(1): 28-41.
- Yan L.J., Yu X.X., Lei T.W., Zhang Q.W., and Qu L.Q. 2008. Effects of transport capacity and erodibility on rill erosion processes: A model study using the Finite Element method. *Geoderma*, 146(1): 114-120.
- Yu Y.C., Zhang G.H., Geng R., and Sun L. 2014. Temporal variation in soil detachment capacity by overland flow under four typical crops in the Loess Plateau of China. *Biosystems Engineering*, 122: 139-148.
- Zhang P., Tang H., Yao W., Zhang N., and Xizhi L.V. 2016. Experimental investigation of morphological characteristics of rill evolution on loess slope. *Catena*, 137: 536-544.
- Zhang Q., Lei T., and Zhao J. 2008. Estimation of the detachment rate in eroding rills in flume experiments using an REE tracing method. *Geoderma*, 147: 8-15.
- Zhou W., and Wu B. 2008. Assessment of soil erosion and sediment delivery ratio using remote sensing and GIS: a case study of upstream Chaobaihe River catchment, north China. *International Journal Sediment Research*, 23(2): 167-173.

## Investigating Temporal Variation of Rill Erosion in an Erosion-Susceptible Soil under Different Rainfall Intensities

Majid Foroumadi<sup>1\*</sup>, Ali Reza Vaezi<sup>2</sup>

(Received: October 2017      Accepted: February 2018)

### Abstract

Rill erosion is a major factor of soil loss in the marl formations. The marl formations are very susceptible to water erosion processes and cover a wide area in some watersheds in arid and semi-arid regions. Knowledge of temporal variation of rill erosion and its effect during a rainfall event can provide information on the mechanism of rill erosion in the hill slopes. Therefore, this study was conducted to investigate the temporal variation of flow characteristics and rill erosion in a marl soil under different simulated rainfalls. A laboratory experiment was carried out using 10 simulated rainfall intensities ranging from 10 mm h<sup>-1</sup> to 100 mm h<sup>-1</sup> with three replications. Soil samples were collected from the marl formations in west of Zanzan and separately purred to a flume with 4m in length and 0.94 m in width putted on 10% slope. Rill erosion and flow characteristics (discharge and concentration) were measured at 5-min from starting flow/ runoff in each rainfall intensity. Results indicated that there are substantial differences in the flow starting time, flow concentration and rill erosion among the rainfall intensities ( $P < 0.0001$ ). Rill flow and erosion rapidly occurred with increasing rainfall intensity. Rill erosion increased speedily during rainfall and reached to approximately constant value in the last times (about 45 min). The flow concentration appeared also a similar trend with the rill erosion, while flow discharge showed an increasing trend in the last times. The study revealed that the threshold and pick time of rill erosion were strongly varied during rainfall. The variation trend of rill erosion during rainfall increases with increasing the rainfall intensity.

**Keywords:** Erodible particles, Flow concentration, Flow discharge, Marl soil, Rainfall simulation

Foroumadi M., Vaezi A.R. 2019. Investigating temporal variation of rill erosion in an erosion-susceptible soil under different rainfall intensities. *Applied Soil Research*, 7(2): 135-147.

1. Ph.D. Student of Soil Science, Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Zanzan (Corresponding author)

2. Professor of Soil Science, Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Zanzan

\*Corresponding Author Email: [majid.foroumadi@znu.ac.ir](mailto:majid.foroumadi@znu.ac.ir)