

مقدمه

فرسایش خاک در اراضی بالادست معمولاً به سه جزء فرسایش شیاری، بین‌شیاری و آبکندی تقسیم می‌شود [۳۳]. فرسایش بین‌شیاری شامل جدا شدن ذرات خاک در اثر برخورد قطرات باران و انتقال این ذرات توسط پاشمان و جریان سطحی کم عمق است [۲۰ و ۳۶]. هر چند میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش شیاری به مراتب بیش تر از فرسایش بین‌شیاری است، ولی به طور کلی فرسایش بین‌شیاری در مکان‌هایی مانند اراضی مرتعی، زمین‌های شخم‌خورده و یا زمین‌هایی که شیب آن‌ها کم است، به عنوان فرآیند غالب فرسایش محسوب می‌شود. از آن‌جا که فرسایش بین‌شیاری سهم زیادی در انتقال ذرات ریز خاک دارد، این فرآیند به طور عمده مسئول کاهش حاصل‌خیزی خاک و آلودگی آب‌های سطحی نیز است [۲۶].

فرسایش بین‌شیاری تحت تأثیر عوامل متعددی مانند ویژگی‌های باران (قطر قطرات، انرژی جنبشی، مقدار و شدت باران)، ویژگی‌های هیدرولیک جریان سطحی (سرعت و عمق جریان)، ویژگی‌های خاک (بافت، توزیع اندازه خاک‌دانه، مقاومت برشی خاک و رطوبت اولیه) و شرایط سطحی زمین (شیب، پوشش گیاهی، پستی و زبری زمین) قرار می‌گیرد [۱۷ و ۲۲]. ویژگی‌های باران تعیین‌کننده قدرت باران و جریان سطحی ناشی از آن هستند و ویژگی‌های خاک و شرایط سطحی آن، جدایش‌پذیری و انتقال‌پذیری ذرات را تحت تأثیر قرار می‌دهند [۹]. در فرسایش بین‌شیاری قطرات باران و جریان سطحی حاصل از باران دو عامل مهم در جداسازی و انتقال ذرات از سطح خاک هستند [۱۶]. در سطوح بین‌شیاری به علت کم بودن درجه و طول شیب و تنش برشی کم جریان، جداسازی ذرات توسط جریان سطحی ناچیز است [۲۲]. شدت باران یکی از مهم‌ترین عوامل مهم مؤثر بر فرسایش بین‌شیاری است که همبستگی بالایی با هدررفت خاک دارد [۲۴]. شبیه‌سازهای باران ابزارهای مناسبی برای بررسی تغییرات خاک تحت فرآیند فرسایش و هم‌چنین ارزیابی شرایط محیطی مانند شیب زمین، رطوبت اولیه خاک و شدت باران از نظر فرسایش خاک هستند [۴]. بیش‌تر پژوهشگران برای بررسی اثرات شدت بارندگی بر فرسایش بین‌شیاری از شبیه‌سازهای باران استفاده کرده‌اند [۱۲ و ۲۸].

بررسی منابع علمی نشان می‌دهد تاکنون پژوهش‌های اندکی در زمینه فرسایش بین‌شیاری صورت گرفته است. در پژوهش‌های مختلف به اندازه‌گیری شدت فرسایش بین‌شیاری و بررسی تأثیر

تغییرات زمانی فرسایش بین‌شیاری تحت تأثیر شدت باران در خاک‌های منطقه نیمه‌خشک

مجید فرومدی^۱، علی‌رضا واعظی^۲ و جعفر نیکبخت^۳
تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۰۹

چکیده

فرسایش بین‌شیاری طی مدت بارندگی به دلیل تغییر شرایط خاک می‌تواند تغییر کند. این پژوهش به منظور بررسی تغییرات زمانی فرسایش بین‌شیاری در خاک‌ها تحت شدت‌های مختلف باران انجام گرفت. برای این منظور آزمایش در سه خاک با بافت مختلف در سه شدت بارندگی تحت شیب ۱۰ درصد در سه تکرار در مجموع با ۲۷ واحد آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. فرسایش بین‌شیاری در فاصله زمانی یک دقیقه از آغاز رواناب در هر یک از واحدهای آزمایشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تفاوت‌های اساسی از نظر آستانه زمانی وقوع رواناب سطحی و فرسایش بین‌شیاری و نیز شدت وقوع آن‌ها بین شدت‌های مختلف باران وجود دارد ($P < 0/001$). رابطه معنی‌دار بین مقدار فرسایش بین‌شیاری و شدت باران به دست آمد ($R^2 = 0/96$ و $P < 0/01$). فرسایش بین‌شیاری طی مدت بارندگی هم‌سو با افزایش تولید رواناب سطحی افزایش یافت اما در زمان‌های پایانی (حدود ۴۵ دقیقه)، روند وقوع فرسایش بین‌شیاری هم‌سو با تولید رواناب سطحی نبود. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که وابستگی زمانی فرسایش بین‌شیاری به تولید رواناب سطحی در اوایل بارندگی تحت تأثیر مقدار تولید رواناب و در زمان‌های پایانی تحت تأثیر شرایط خاک از نظر موجودیت ذرات فرسایش‌پذیر است.

کلیدواژه‌ها: جریان سطحی، ذرات فرسایش‌پذیر خاک، ضربه قطرات باران، غلظت جریان

۱- دانشجوی دکتری گروه خاک‌شناسی، دانشگاه زنجان
۲- نویسنده مسئول و استاد، گروه خاک‌شناسی، دانشگاه زنجان، پست الکترونیک: vaezi.alireza@gmail.com
۳- دانشیار گروه آب دانشگاه زنجان

تغییرات زمانی فرسایش بین‌شیاری در خاک‌ها تحت شدت‌های مختلف باران در شمال غرب کشور مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

خاک‌های مورد بررسی

خاک‌های مورد مطالعه در این پژوهش از مناطق مختلف استان زنجان شناسایی و نمونه‌برداری شد. این منطقه در ارتفاع ۱۳۲۹ متری از سطح دریا و موقعیت ۴۸ درجه و ۵ دقیقه و ۳۵ ثانیه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۵۷ دقیقه و ۳۹ ثانیه عرض شمالی واقع شده است. میانگین بارندگی سالانه ۳۱۵ میلی‌متر و اقلیم منطقه به روش دمارتن، نیمه‌خشک است. از نظر زمین‌شناسی این منطقه بر روی رسوبات کواترنری واقع شده است [۱]. خاک منطقه به شدت حساس بوده و تحت تأثیر فرسایش بارانی است. تخریب ساختمان خاک و ظهور سله که از پیامدهای این نوع فرسایش است [۲]، سراسر سطح آن را در بر گرفته است. در بسیاری از زمین‌های شیب‌دار فرسایش شیاری و آب‌بندی نیز به چشم می‌خورد. این منطقه یکی از منابع مهم تولید رسوب در حوزه آبخیز سفیدرود است [۳۲].

نمونه‌برداری خاک

نمونه‌های خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری از زمین‌هایی با کاربری کشاورزی برداشت و با الک هشت میلی‌متری غربال شدند [۱۲] تا شباهت نمونه‌های عبور داده شده از این الک با خاک طبیعی حفظ شود. در مجموع حدود سه تن خاک از منطقه مورد مطالعه برداشت شد. انتخاب عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر بر اساس مشاهده انتقال ذرات ریز از سطح دامنه‌ها و تشکیل فرسایش بین‌شیاری بود چرا که خاک زیرسطحی تحت فرآیندهای فرسایشی قرار نمی‌گیرد. در نمونه خاک گذرانده از الک، ذرات معدنی درشت (سنگ‌ریزه) به‌صورت دستی برداشت شدند و تنها خاک‌دانه‌های با قطر کوچک‌تر از هشت میلی‌متر برای انجام آزمایش‌های فرسایش مورد استفاده قرار گرفتند. مقداری خاک عبور داده شده از الک دو میلی‌متر نیز برای انجام آزمایش‌های معمول فیزیکی و شیمیایی تهیه و به آزمایشگاه منتقل شد.

تجزیه خاک

در آزمایشگاه، توزیع اندازه ذرات^۱ به روش هیدرومتری تعیین شد [۷]. چگالی ظاهری در نمونه خاک برداشت شده به‌وسیله سبلندر فلزی با قطر داخلی پنج سانتی‌متر و ارتفاع ۴/۹ سانتی‌متر تعیین شد [۶]. میانگین وزنی قطر خاک‌دانه (MWD) پایدار در آب بر اساس مقاومت خاک‌دانه‌ها در آب به روش الک تر [۱۴] در خاک‌دانه‌هایی با قطر کوچک‌تر از شش میلی‌متر با استفاده از دستگاه مکانیکی با نوسان ۳۰ دور در دقیقه به مدت یک دقیقه [۱۵]، متوسط اندازه خاک‌دانه با جداسازی خاک‌دانه‌ها به‌وسیله سری الک‌ها [۱۸]، هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار افتان، درصد ماده آلی به روش والکلی - بلک [۳۵]، درصد کربنات کلسیم معادل به روش

عوامل مختلف بر فرسایش بین‌شیاری پرداخته شده است. در این ارتباط نصیری صالح و همکاران [۲۷] به بررسی اثر رگبارهای با شدت متغیر بر رواناب و فرسایش بین‌شیاری پرداختند. نتایج نشان داد که اگرچه در هر دو نوع خاک حجم رواناب ناشی از رگبارهایی با پروفیل‌های مختلف تفاوت معنی‌داری نداشتند اما اثرپذیری حداکثر میزان رواناب از پروفیل رگبار به نوع خاک بستگی داشت. محمودآبادی و همکاران [۲۳] در پژوهشی به ارزیابی مدل فرآیندی WEPP در برآورد شدت فرسایش بین‌شیاری با استفاده از شبیه‌ساز باران پرداختند. نتایج نشان داد که در تنش برشی‌های کم‌تر از آستانه، مدل WEPP تمایل به بیش‌برآورد فرسایش بین‌شیاری دارد. سیفی و همکاران [۲۸] در پژوهشی به بررسی تأثیر اندوده سطحی بر فرسایش بین‌شیاری در شیب و شدت بارندگی مختلف در شرایط آزمایشگاهی پرداختند. نتایج نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین مقدار فرسایش بین‌شیاری در شیب‌های مختلف مشاهده شد اما بین مقدار فرسایش بین‌شیاری در شدت بارش‌های مختلف تفاوت معنی‌داری در هیچ کدام از خاک‌ها مشاهده نشد. ژانگ و وانگ [۴۰] در پژوهشی به بررسی اثرات متقابل شدت باران و عمق جریان بر روی قدرت انتقال رسوب و توسعه یک مدل فرسایش بین‌شیاری پرداختند. نتایج نشان داد که طول شیب رابطه منفی با سرعت فرسایش بین‌شیاری دارد. این همبستگی منفی در باران‌های شدید قوی‌تر به نظر می‌رسید که این نشان از اثر مبنایی عمق جریان بود. ژانگ و همکاران [۳۹] در پژوهشی به بررسی فرسایش بین‌شیاری با استفاده از ردیاب‌های عناصر کمیاب پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش طول شیب مقدار فرسایش بین‌شیاری در ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت.

فرسایش بین‌شیاری طی مدت بارندگی دچار تغییرات زمانی می‌شود؛ به این معنی که در زمان‌های مختلف طی یک رخداد باران، مقدار فرسایش بین‌شیاری ممکن است تغییرات زیادی داشته باشد. این تغییرات از یک سو می‌تواند به دلیل تغییر در شدت بارندگی و از سوی دیگر تغییر در شرایط فیزیکی خاک و نیز موجودیت ذرات فرسایش‌پذیر باشد. با وجود آن‌که در پژوهش‌های پیشین عوامل مؤثر بر فرسایش بین‌شیاری مورد بررسی قرار گرفته است، لیکن تحقیقات دقیق در مورد تغییرات زمانی فرسایش بین‌شیاری در یک رخداد باران در شدت‌های مختلف باران مورد بررسی قرار نگرفته است. اگرچه نقش باران به‌ویژه شدت بارندگی در تخریب فیزیکی خاک به‌ویژه از نظر تخریب خاک‌دانه، تشکیل اندوده، کاهش نفوذپذیری و افزایش تولید رواناب و رسوب در فرسایش سطحی مورد بررسی قرار گرفته است [۲ و ۳۴] لیکن چنین موضوعی در فرسایش بین‌شیاری به طور دقیق مورد بررسی قرار نگرفته است. اهمیت این موضوع در خاک‌های مناطق نیمه‌خشک که دارای ساختمان ناپایدار هستند [۲۹]، از این رو با توجه به حساسیت خاک‌های مناطق نیمه‌خشک به فرسایش بین‌شیاری به‌ویژه در زمان‌های وقوع باران‌های شدید، این پژوهش به منظور بررسی

1. Particle size distribution

شنی) در سه سطح شدت باران (۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی متر بر ساعت) تحت شیب ثابت ۱۰ درصد در سه تکرار در مجموع با ۲۷ واحد آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی در آزمایشگاه فرسایش خاک انجام گرفت.

اندازه‌گیری تغییرات زمانی رواناب سطحی و فرسایش بین‌شیاری

فرسایش بین‌شیاری برای خاک‌ها در فلومی فلزی به عرض ۵۰ سانتی‌متر و به طول ۷۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر [۴۰] تحت شیب ۱۰ درصد اندازه‌گیری شد. کف فلوم دارای یک لایه شنی با قابلیت زهکشی بود و در درون آن خاک تا عمق ۱۵ سانتی‌متر قرار گرفت. پس از پر کردن فلوم با خاک، سطح خاک به آرامی تسطیح شد. برای همسان‌سازی شرایط خاک منطقه، خاک در چند مرحله مرطوب شد و به چگالی ظاهری خاک اولیه نزدیک گردید. با توجه به محدودیت سطح بارش دستگاه باران‌ساز (۷۵ سانتی‌متر \times ۱۲۰ سانتی‌متر)، در هر آزمایش دو قطعه فلوم به عنوان دو تکرار از سه تکرار آزمایش در زیر دستگاه باران‌ساز قرار می‌گرفت. در تمامی آزمایش‌ها رطوبت خاک‌ها در شرایط هواخشک قرار داشت. جهت برابری شرایط آزمایش تکرار سوم با دو تکرار دیگر، کلیه شرایط آزمایش از جمله نحوه قرارگیری فلوم در زیر دستگاه شبیه‌ساز باران و همچنین شرایط رطوبتی و دمایی گلخانه مورد بررسی قرار گرفت. فلوم‌های آزمایشی محتوی خاک‌های مختلف تحت باران‌های شبیه‌سازی شده با شدت ۱۰ تا ۳۰ میلی‌متر بر ساعت به مدت ۶۰ دقیقه قرار گرفتند. پس از شروع رواناب و در فاصله زمانی یک دقیقه، به مدت یک ساعت رواناب و رسوب حاصل از هر فلوم در ظرفی معین جمع‌آوری شد. مقدار فرسایش بین‌شیاری از مقدار رسوب خروجی از هر فلوم طی هر رخداد (گرم) در واحد سطح (متر مربع) و واحد زمان (دقیقه) به دست آمد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها، ابتدا نرمال بودن توزیع آماری داده‌ها بر مبنای تحلیل چولگی و کشیدگی داده‌ها تعیین شد [۵]. تجزیه واریانس داده‌های مربوط به مقدار رواناب سطحی و فرسایش بین‌شیاری در شدت‌های مختلف باران با کمک آزمون دانکن انجام گرفت. برای این منظور از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۰ بهره گرفته شد. برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel نسخه ۲۰۱۳ استفاده شد.

نتایج

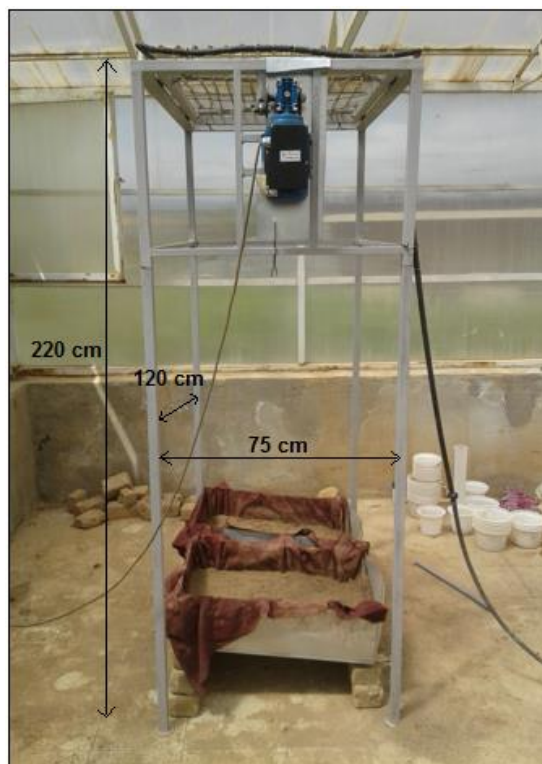
ویژگی خاک‌های مورد مطالعه

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده است. خاک‌های مورد مطالعه دارای مقادیر بسیار اندکی از ماده آلی (کم‌تر از یک درصد) هستند و به دلیل وجود درصد بالایی از کربنات کلسیم (۲۱ تا ۲۸ درصد) در گروه خاک‌های آهکی [۱۰] قرار دارند. پایداری خاک‌دانه‌ها در آب برای مدت یک دقیقه بسیار پایین (۰/۵۲ تا ۰/۹۷ میلی‌متر) است و نشان از حساسیت

خشتی‌سازی با اسید کلریدریک [۲۰] و درصد سدیم تبادلی خاک (ESP) به روش استات آمونیوم [۲۱] تعیین شدند.

شبیه‌ساز باران

در این پژوهش از یک دستگاه شبیه‌ساز باران متحرک با چارچوب فلزی با صفحه بارشی به طول ۱۲۰ و به عرض ۷۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۲۰ سانتی‌متر استفاده شد (شکل ۱). دستگاه شبیه‌ساز باران از قابلیت نوسان ۲۰ دور در دقیقه برخوردار بود. صفحه بارش باران‌ساز از ۴۸۰ قطعه نازل قطره‌ساز تشکیل شده بود. نازل‌ها به فاصله سه سانتی‌متری از هم برای ایجاد بارش یکنواخت باران قرار گرفتند. نازل‌ها توانایی تولید قطراتی با قطر ۲/۱ میلی‌متر را داشتند. قطر قطرات باران شبیه‌سازی شده به روش گلوله آردی [۸] تعیین شد. در این پژوهش از باران‌هایی با شدت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر بر ساعت استفاده شد. مدت بارندگی در تمام آزمایش‌ها یکسان و برابر ۶۰ دقیقه در نظر گرفته شد. انتخاب زمان ثابت (۶۰ دقیقه) برای کل آزمایش‌ها به دلیل امکان پایش تغییرات زمانی فرسایش بین‌شیاری در زمان نسبتاً طولانی و امکان مقایسه آماری آن‌ها با یکدیگر بود [۳۳].



شکل ۱- نمایی از فلوم فرسایشی و دستگاه شبیه‌ساز باران مورد استفاده در پژوهش

Fig 1. View of the erosion flume and rainfall simulator used in the research

طرح آزمایشی

آزمایش در سه خاک با بافت مختلف (لوم رسی، لوم و لوم رس

باران، تخریب خاک‌دانه‌ها افزایش یافته، ذرات حساس بیش‌تری در معرض انتقال قرار می‌گیرند [۳۳]. فرومندی و واعظی [۱۲] نیز در پژوهشی نشان دادند که شاخص‌های جریان (سرعت، دبی و تنش برشی جریان) و فرسایش شیبی تحت تأثیر شدت باران قرار دارد ($P < 0/001$) به‌طوری که با افزایش شدت باران، فرسایش شیبی افزایش یافت.

رابطه بین فرسایش بین‌شیاری و شدت باران در خاک‌های مختلف

رابطه بین فرسایش بین‌شیاری و شدت باران در خاک‌ها نشان داد که در تمام خاک‌ها میزان فرسایش با افزایش شدت باران افزایش یافت و رابطه معنی‌دار بین میزان فرسایش بین‌شیاری و درصد شیب به دست آمد (شکل ۲). مقدار فرسایش بین‌شیاری در خاک لوم هم‌بستگی بیش‌تری نسبت به سایر خاک‌ها به شدت باران داشت ($R^2 < 0/99$). فرومندی و واعظی [۱۲] نیز در پژوهشی نشان دادند که با افزایش شدت باران ظرفیت جدا شدن ذره و هدررفت خاک

بالای خاک به تخریب ساختمان در اثر بارندگی دارد [۲۵]. ضعف پوشش گیاهی و برگشت ناچیز بقایای گیاهی، عامل اصلی کمبود ماده آلی و کاهش درجه تشکیل و پایداری خاک‌دانه‌ها است [۳۰]. با توجه به مقدار بالای سدیم تبادلی خاک در خاک لوم (۵/۱۲ درصد) و لوم‌رس‌شنی (۶/۱۳ درصد)، این ویژگی خاک می‌تواند یکی از عوامل مهم ناپایداری خاک‌دانه‌ها و فروپاشی آن‌ها در این خاک‌ها باشد.

تفاوت زمانی رواناب سطحی و فرسایش بین‌شیاری تحت تأثیر شدت باران

نتایج تجزیه واریانس تفاوت زمان آغاز جریان، رواناب سطحی و فرسایش بین‌شیاری بین شدت‌های مختلف نشان داد که تفاوتی معنی‌دار بین شدت‌های مختلف از نظر زمان آغاز جریان، رواناب سطحی و فرسایش بین‌شیاری وجود دارد ($P < 0/000$) (جدول ۲). با افزایش شدت باران از یک سو به دلیل کاهش فرصت نفوذ آب، تولید رواناب سریع‌تر آغاز می‌شود؛ از سوی دیگر با افزایش شدت

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

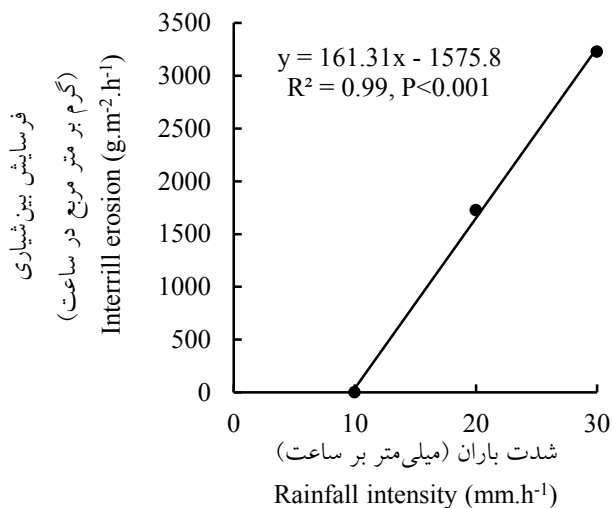
Table 1. Physical and chemical properties of soil studied

Soil texture خاک بافت			Soil properties		ویژگی‌های خاک
لوم‌رس‌شنی Sandy clay loam	لوم‌رسی Clay loam	لوم Loam			
55.50	26.42	45.80	Sand (%)		شن (درصد)
22.25	36.06	36.65	Silt (%)		سیلت (درصد)
22.25	37.52	17.55	Clay (%)		رس (درصد)
18.20	8.70	15.60	Gravel (%)		سنگ‌ریزه (درصد)
1.29	1.17	1.20	Bulk density (g.cm ⁻³)		چگالی ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
2.31	2.01	2.14	MWD (mm)		اندازه خاک‌دانه (میلی‌متر)
0.96	0.52	0.97	MWD _{wet} (mm)		پایداری خاک‌دانه (میلی‌متر)
8.22	5.34	2.82	Saturated hydraulic conductivity (cm.h ⁻¹)		هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی‌متر بر ساعت)
0.35	0.44	0.58	OM (%)		ماده آلی (درصد)
20.55	23.26	27.85	CaCO ₃ (%)		کربنات کلسیم معادل (درصد)
6.13	2.17	5.12	ESP		درصد سدیم تبادلی

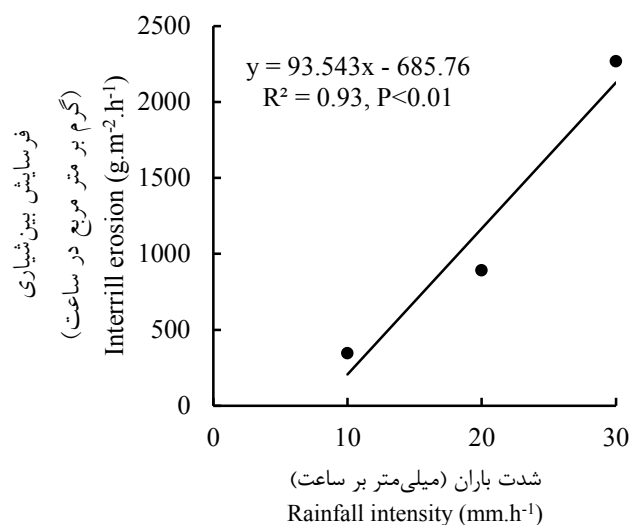
جدول ۲- تجزیه واریانس اثر شدت باران بر زمان آغاز جریان، رواناب سطحی و فرسایش بین‌شیاری

Table 2. The variance analysis effect of rainfall intensity on time of flow start, surface runoff and interrill erosion

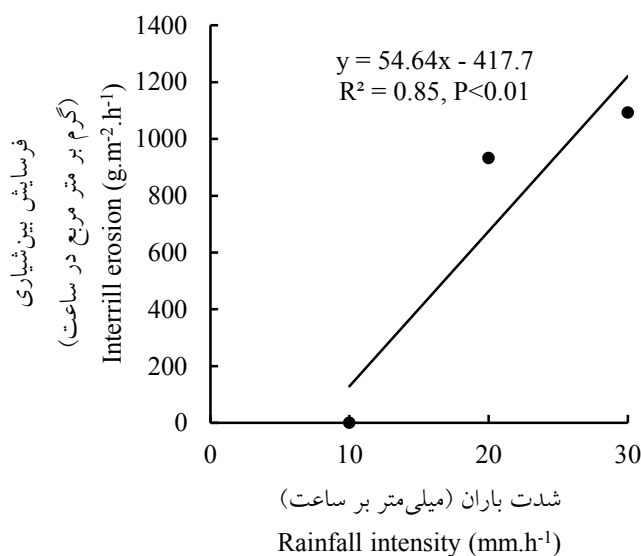
کشیدگی Kortosis	چولگی Skewness	معنی‌داری Significance	F	مجموع مربعات Sum of squares	میانگین مربعات Mean of squares	درجه آزادی Degree of freedom	منبع تغییرات Variation resource
1.97	1.46	0.000	39.21	3968.56	1984.28	2	زمان آغاز جریان Time of flow start
1.25	1.03	0.000	43.78	4.75×10 ⁵	2.37×10 ⁵	2	رواناب سطحی Surface runoff
1.61	1.17	0.000	48.32	1.23×10 ⁵	6.18×10 ⁴	2	فرسایش بین‌شیاری Interrill erosion



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۲- رابطه بین فرسایش بین‌شیاری و شدت باران در خاک لومرسی (الف)، لوم (ب) و لومرسی شنی (ج)

Fig 2. The relationship between the interrill erosion and rainfall intensity in clay loam soil (a), loam (b) and sandy clay loam (c)

شدت ۱۰ میلی‌متر بر ساعت رواناب رخ داد که علت آن را می‌توان از یک‌سو به دلیل وجود خاک‌دانه‌های ریز و ناپایدار و از سوی دیگر به دلیل محدودیت نفوذپذیری آن دانست. در پژوهش حاضر تخریب خاک‌دانه‌های سطح و تشکیل اندوده سطحی عاملی دیگر بود که در شدت‌های بالا تأثیر زیادی بر تولید جریان و افزایش رواناب سطحی گذاشت. الگوی تغییرات زمانی تولید جریان سطحی در خاک‌ها و شدت‌های مختلف باران متفاوت بود. تغییرات فیزیکی خاک طی بارندگی از نظر تخریب ساختمان، تشکیل اندوده سطحی و نگهداری آب عواملی هستند که شدت نفوذ آب و در نتیجه تولید رواناب طی بارندگی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. شدت تغییرات

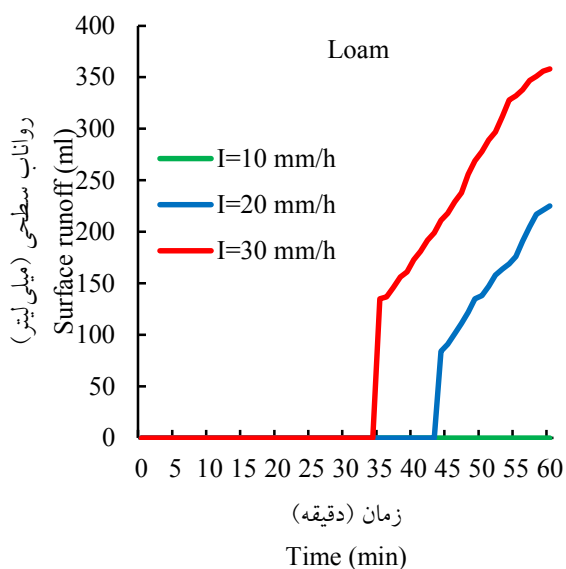
افزایش یافت.

تغییرات زمانی رواناب سطحی

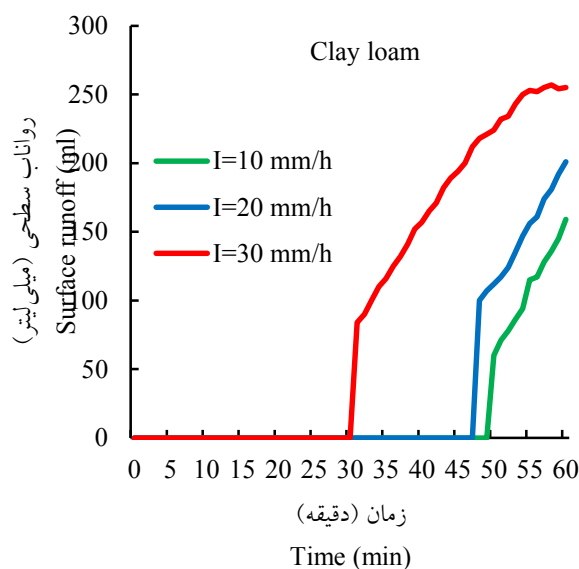
بررسی الگوی تغییرات مقدار رواناب سطحی در بازه‌های زمانی یک دقیقه‌ای در شدت‌های مختلف باران و در خاک‌های مختلف نشان داد که با افزایش شدت باران مقدار رواناب در همه شدت‌ها روند افزایشی داشت و مقدار آن در شدت‌های بالاتر بیش‌تر بود که علت این موضوع به دلیل حجم بالای باران دریافتی خاک در شدت‌های بالا بود که باعث افزایش مقدار رواناب در این شدت‌ها شد (شکل ۳). در خاک‌های لوم و لومرسی شنی در شدت ۱۰ میلی‌متر بر ساعت روانابی در فلوم‌ها ایجاد نشد و تنها در خاک لومرسی در

همچنین تحت باران شدیدتر رخ داد. در پژوهشی ویلیامز و همکاران [۳۷] با بررسی خاک‌های منطقه تگزاس آمریکا نشان دادند که طی رخ دادهای باران مقدار تولید رواناب نیز به دلیل افزایش محتوای رطوبتی خاک افزایش یافت ($R^2 < 0.96$). یو و همکاران [۳۸] نیز به بررسی تغییرات جدایش ذرات خاک در زمین‌های کشاورزی در کشور چین پرداختند. این پژوهشگران دریافتند که جدا شدن ذرات

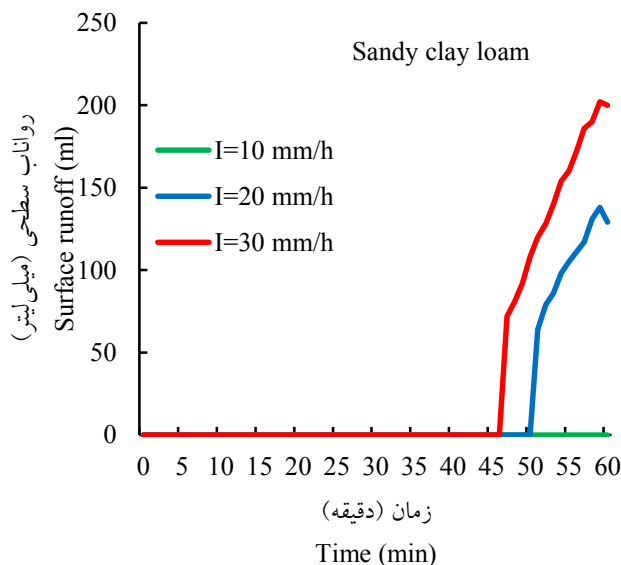
فیزیکی خاک طی بارندگی به نوع خاک و شدت بارندگی وابسته است [۳۱]. کم‌ترین تغییر در الگوی زمانی ظهور رواناب در شرایطی بود که شدت بارندگی پایین (۱۰ میلی‌متر بر ساعت) بود و نیز خاک از قابلیت نفوذ پایینی مشابه آنچه در خاک لوم (۲/۸۲ سانتی‌متر بر ساعت) مشاهده شد، برخوردار بود. در مقابل، بیش‌ترین تفاوت از نظر الگوی تغییرات زمانی رواناب در خاک با قابلیت نفوذ بالا و



(ب)

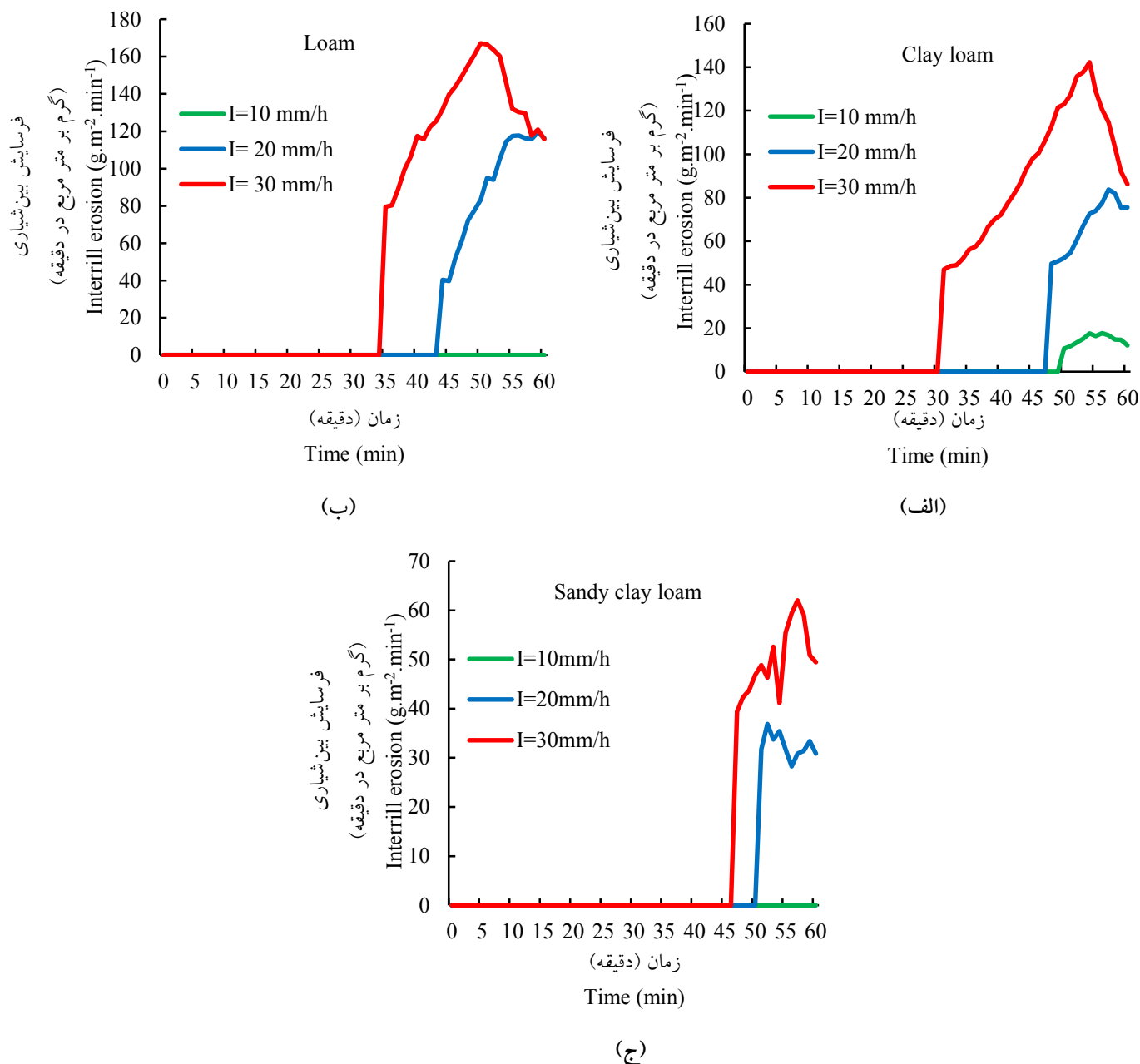


(الف)



(ج)

شکل ۳- تغییرات زمانی رواناب سطحی تحت شدت‌های مختلف بارندگی در خاک لومرسی (الف)، لوم (ب) و لومرسی شنی (ج)
 Fig 3. Temporal variation of surface runoff under different rainfall intensities in clay loam (a), loam (b) and sandy clay loam (c)



شکل ۴- تغییرات زمانی فرسایش بین‌شیاری تحت شدت‌های مختلف بارندگی در خاک لومرسی (الف)، لوم (ب) و لوم‌رسی (ج)
 Fig 4. Temporal variation of interrill erosion under different rainfall intensities in clay loam (a), loam (b) and Sandy clay loam (c)

الگوی تغییرات مقدار فرسایش بین‌شیاری در بازه‌های زمانی مختلف نشان داد که با افزایش شدت باران مقدار فرسایش بین‌شیاری در تمامی خاک‌ها روند افزایشی داشت و مقدار آن در شدت‌های بالاتر بیشتر بود که علت این موضوع به دلیل افزایش حجم و سرعت جریان در اثر افزایش شدت باران بود (شکل ۴).

در اوایل بارندگی، فرسایش بین‌شیاری در خاک‌ها کم بود و با گذشت زمان، هم‌زمان با انتقال بخش زیادی از ذرات فرسایش‌پذیر، فرسایش بین‌شیاری افزایش یافت. روند افزایش شدت فرسایش بین‌شیاری در زمان‌های اولیه بارندگی در اغلب شدت‌ها زیاد بود و در شدت‌های بالاتر این روند از شدت بیشتری برخوردار بود.

خاک به صورت معنی‌داری با گذشت زمان تغییر می‌کند.

تغییرات زمانی فرسایش بین‌شیاری

بررسی الگوی تغییرات زمانی فرسایش بین‌شیاری نشان داد که با افزایش شدت باران، زمان آغاز فرسایش بین‌شیاری مانند رواناب سطحی کوتاه شد به طوری که آستانه زمانی وقوع فرسایش بین‌شیاری در شدت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر بر ساعت به طور میانگین در سه خاک به ترتیب ۴۷، ۵۰ و ۳۷ دقیقه بود (شکل ۴). فرسایش بین‌شیاری هم‌زمان با وقوع جریان سطحی در خاک‌ها آغاز شد. افزایش شدت باران امکان تولید جریان سطحی قوی‌تر و سریع‌تر برای وقوع فرسایش بین‌شیاری فراهم می‌آورد. هم‌چنین بررسی

region, North West of Zanjan. Water and Soil Science. 25(2): 65-77. (In Persian).

3. Asadi, H. Mahammodi, SH. and Heidari, A. 2007. Effect of surface sealing on sheet erosion dynamic. Proceedings of the 12th Soil Science Congress of Iran, Karaj, Iran. 1148-1149. (In Persian).

4. Asadi, H. Moussavi, A. Ghadiri, H. and Rose, C.W. 2011. Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of sediment. Journal of Hydrology. 406(1-2): 73-81.

5. Berthouex, P.M. and Brown, L.C. 1994. Statistics for Environmental Engineers, Lewis Publishers. Spanish. Journal of Agriculture Research. 2(1): 42-58.

6. Blake, G.R. and Hartge, K.H. 1986. Bulk Density 1. Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods. (methodsofsoilan1). 363-375.

7. Bouyoucos, G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. Agronomy journal. 54(5): 464-465.

8. Carter, C.E. Greer, J.D. Braud, H.J. and Floyd J.M. 1974. Raindrop characteristics in south central United States. Transactions of the ASAE. 17(6): 1033-1037.

9. Dimoyiannis, D. Valmis, S. and Danalatos, N.G. 2006. Interrill erosion on cultivated Greek soils: modelling sediment delivery. Earth Surface Processes and Landforms. 31(8): 940-949.

10. Duiker, S.W. Flanagan, D.C. and Lal, R. 2001. Erodibility and infiltration characteristics of five major soils of southwest Spain. Catena. 45(2): 103-121.

11. Foroumadi, M. and Vaezi, A.R. 2017. Physical degradation and particle detachment capacity of rill in relation to rainfall intensity and raindrop impact in a marl soil. Journal of Water and Soil Science. 21(2): 263-277. (In Persian).

12. Foroumadi, M. and Vaezi, A.R. 2018. Flow characteristics and rill erodibility in relation to the rainfall intensity in a marl soil. Iranian Watershed Management Science and Engineering. 12(40): 11-22. (In Persian).

13. Foster, G.R. Flanagan, D.C. Nearing, M.A. Lane, L.J. Risse, L.M. and Finkner, S.C. 1995. Hillslope erosion component. WEPP: USDA-Water Erosion Prediction Project. 1-11.

14. Goh, T.B. Arnaud, R.S. and Mermut, A.R. 1993. Aggregate stability to water. Soil Sampling and Methods of Analysis. 177-180.

15. Hasanzadeh, H. Vaezi, A.R. and Mohammadi, M.H. 2013. Variation of runoff in plot size in soil samples with different texture under rainfall simulated events. Iranian Journal of Soil and Water Research 44(3): 245-254. (In Persian).

16. Hui-Ming, S. and Yang, C.T. 2009. Estimating overland flow erosion capacity using unit stream power. International Journal of Sediment Research. 24(1): 46-62.

17. Issa, O.M. Bissonnais, Y.L. Planchon, O. Favis-Mortlock, D. Silveira, N. and Wainwright, J. 2006. Soil detachment and transport on field and laboratory scale interrill areas: erosion processes and the size selectivity of eroded sediment. Earth

با این حال در ادامه بارندگی به دلیل انتقال بخش عمده ذرات فرسایش پذیر در زمان های اولیه، افزایش شدت فرسایش بین شیارهای روندی تدریجی داشت و در لحظات پایانی روندی کاهش داشت [۱۲]. در دو خاک لومرسی و لوم در شدت ۳۰ میلی متر بر ساعت مقدار فرسایش بین شیارها به شدت افزایش پیدا کرد و در ادامه به اوج خود رسید و در زمان های پایانی از روند کاهش پیروی کرد. همچنین شدت اوج فرسایش بین شیارها در خاک لوم و لومرسی نسبت به خاک لومرسی سنی بارزتر بود که علت این موضوع وجود ذرات شن بیشتر در خاک لومرسی سنی بود. پژوهش ها نشان داده اند بین رواناب و رسوب و مواد مادری خاکها وابستگی وجود دارد، به طوری که با افزایش میزان ذرات سیلت و رس خاک، تولید رواناب افزایش می یابد. این در حالی است که بخش شن، منجر به کاهش تولید رواناب می شود [۱۰]. همچنین پژوهش های انجام شده در واحدهای مارنی نشان داد که هر چه مقدار سیلت و رس بیشتر باشد، به دلیل کاهش قابلیت جذب آب، زمان شروع رواناب کم تر و حجم رواناب افزایش می یابد [۳].

بحث و نتیجه گیری

این پژوهش نشان داد که شدت باران نقش بسیار مهمی در مقدار رواناب سطحی و فرسایش بین شیارها دارد. با افزایش شدت باران از یک سو به دلیل افزایش دبی جریان، سرعت و حجم جریان افزایش می یابد و از سوی دیگر افزایش سرعت و حجم جریان موجب تخریب بیشتر ساختمان خاک سطحی می گردد که این دو منجر به تولید ذرات حساس بیشتر در سطح خاک شده و شدت فرسایش بین شیارها را افزایش می دهد. رواناب سطحی و فرسایش بین شیارها در شدت های مختلف دچار تغییرات آشکاری بود. در خاک های درشت بافت مانند لومرسی سنی به دلیل فراوانی بیشتر ذرات درشت دانه (شن و سنگ ریزه)، شدت فرسایش بین شیارها ناچیز است و با تداوم بارندگی، جریان سطحی به یکباره توانایی انتقال ذرات سطح را پیدا می کند. به طور کلی این مطالعه نشان می دهد که پیش بینی فرسایش بین شیارها در هر خاک منوط به آگاهی از شدت باران است. با آگاهی از شدت باران می توان زمان تولید بیشترین جریان آب و فرسایش بین شیارها را پیش بینی کرد و فرسایش بین شیارها در زمان باران منطقه از نظر فرسایش بین شیارها را تشخیص داد. همچنین نتایج این پژوهش می تواند به گسترش معادلاتی برای کمی سازی تغییرات فرسایش بین شیارها در شدت های باران مختلف و در نهایت مدل سازی دقیق این نوع فرسایش خاک کمک کند.

منابع

1. Abdinezhad, P. Feiznia, S. and Peirovan, H. 2013. Compare marl soils erodibility in Zanjan using simulator rainfall. Journal of Soil Research. 28(2): 408-419. (In Persian).

2. Akbari, S. and Vaezi, A.R. 2015. Investigating aggregates stability against raindrops impact in some soils of a semi-arid

agricultural lands in Northwest Iran. *Pedosphere*. 24(5): 595-604.

30. Vaezi, A.R. Abbasi, M. Bussi, G. and Keesstra, S. 2017. Modeling sediment yield in semi-arid pasture micro-catchments, NW Iran. *Land degradation & development*. 28(4): 1274-1286.

31. Vaezi, A.R. and Foroumadi, M. Temporal variation of runoff production and rill erosion in a marl soil under different rainfall intensities. *Journal of Water and Soil Conservation*. 24(1): 303-309. (In Persian).

32. Vaezi, A.R. and Gharehdaghi, 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).

33. Vaezi, A.R. and Vatani, A. 2015. Determining rill erodibility in some soils in Zanjan province under simulated rainfall. *Journal of Water and Soil Science*. 19(71): 59-67. (In Persian).

34. Valette, G. Prévost, S. Lucas, L. and Léonard, J. 2006. SoDA project: A simulation of soil surface degradation by rainfall. *Computers & Graphics*. 30(4): 494-506.

35. Walkley, A. and Black, I.A. 1947. Determination of organic matter in the soil by chromic acid digestion. *Soil Science*. 63: 251-264.

36. Watson, D.A. and Lafren, J.M. 1986. Soil strength, slope, and rainfall intensity effects on interrill erosion. *Transactions of the ASAE*, 29(1): 98-102.

37. 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.

38. 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.

39. Zhang, X.C. Nearing, M.A. and Garbrecht, J.D. 2017. Gaining insights into interrill erosion processes using rare earth element tracers. *Geoderma*. 299: 63-72.

40. Zhang, X.J. and Wang, Z.L. 2017. Interrill soil erosion processes on steep slopes. *Journal of Hydrology*. 548: 652-664.

Surface Processes and Landforms. 31(8): 929-939.

18. Kemper, W.D. and Rosenau, R.C. 1986. Aggregate stability and size distribution. 425-442.

19. Kiani Harchegani, M. Saeidi, P. and Sadeghi, S.H.R. 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).

20. Kinnell, P.I.A. 2005. Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: a review. *Hydrological Processes: An International Journal*. 19(14): 2815-2844. Klute, A. and Dirksen, C. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. *Methods of soil analysis: part I physical and mineralogical methods (methodsofsoilan1)*. 687-734.

22. Mahmoodabadi, M. and Cerdà, A. 2013. WEPP calibration for improved predictions of interrill erosion in semi-arid to arid environments. *Geoderma*. 204: 75-83.

23. Mahmoodabadi, M. Ghadiri, H. Rose, C. Yu, B. Rafahi H., and Rouhipour, H. 2014. Evaluation of GUEST and WEPP with a new approach for the determination of sediment transport capacity. *Journal of Hydrology*. 513: 413-421.

24. Mahmoodabadi, M. Refahi, H.G. and Rouhipur, H. 2014. Evaluation of WEPP process model for estimating intensity interrill erosion using rainfall simulator. *Iranian Journal of Soil Research*. 27(1): 24-34. (In Persian).

25. Mamedov, A.I. Levy, G.J. Shainberg, I. and Letey, J. 2001. Wetting rate, sodicity, and soil texture effects on infiltration rate and runoff. *Soil Research*. 39(6): 1293-1305.

26. Miller, W.P. and Baharuddin, M.K. 1987. Interrill erodibility of highly weathered soils. *Communications in soil science and plant analysis*. 18(9): 933-945.

27. Nasisi saleh, F. Alavinia, M. and Asadi, H. 2017. Effects of variable rainfall intensity events on interrill erosion. *Modares Civil Engineering journal*. 17(2): 215-224. (In Persian).

28. Seifi, M. Neyshabouri, M.R. Rouhipour, H. and Ahmadi, A. 2014. Effects of surface seal on interrill erodibility at various slopes and rainfall intensities under laboratory conditions. *Water and Soil Science*. 24(1): 55-67. (In Persian).

29. Vaezi, A.R. 2014. Modeling runoff from semi-arid



Temporal Variation of Interrill Erosion under Different Rainfall Intensities in Semi-arid Soils

M. Foroumadi¹, A.R. Vaezi² and J. Nikbakht³

Received: 21-07-2019

Accepted: 01-10-2019

Abstract

Interrill erosion can change during rainfall due to change of soil conditions. This research was carried out to investigate the temporal variation of interrill erosion in different soils under different rainfall intensities. For this purpose, laboratory experiments were carried out in three soil textures consists under three simulated rainfalls under slope of 10 percent in three replications. In total, twenty seven experiments were setted up according to completely randomized design in in soil erosion lab. The interrill erosion was measured using measurement of soil loss mass at 1 min intervals from beginning of surface runoff production. The results showed that there are significant differences between the rainfall intensities in the time threshold of surface runoff and interrill erosion and their rate ($P < 0.001$). Significant relationship was found between interrill erosion and rainfall intensity ($R^2 = 0.93$, $P < 0.01$). Interrill erosion increased during rainfall with the same trend with surface runoff production from beginning runoff, but after reaching to the maximum value (at 45th minute. As a consequence this study revealed that temporal trend of interrill erosion in most times of rainfall from beginning runoff can controlled by surface runoff rate and in final times it value is limited by the existence of erodible particles.

Keywords: : *Surface flow, Erodible soil particles, Raindrops impact, Flow concentration*

1. Ph.D. Student, Department of Soil Science, University of Zanjan

2. Corresponding author and Professor, Department of Soil Science, University of Zanjan, Email: vaezi.alireza@gmail.com

3. Associate Professor, Department of Water Engineering, University of Zanjan