



دوره‌ی ۳۴، شماره‌ی ۲، شماره‌ی پیاپی ۱۳۱، تابستان ۱۴۰۰، صفحه‌های ۳۱-۱۵
شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/wmej.2020.123819.1164

مقاله‌ی پژوهشی

پژوهش‌های آبخیزداری

سهم‌بندی رسوب در کرت‌های آزمایشگاهی با شبیه‌سازی باران

عبدالواحد خالدی درویشان

(نویسنده‌ی مسئول)* دانشیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران، ایران

سیدحمیدرضا صادقی

استاد گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران، ایران

مهدی همایی

استاد گروه خاک‌شناسی، دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

محمود عرب‌خردی

دانشیار پژوهشکده‌ی حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

*رایانامه‌ی نویسنده‌ی مسئول: a.khaledi@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۹ مهر ۱۳۹۷ تاریخ پذیرش: ۳۰ شهریور ۱۳۹۹

چکیده

تولید رسوب در هر یک از مرحله‌های فرسایش و بازتوزیع آن در مقیاس‌های مختلف آبخیز، دامنه و حتا کرت متفاوت است. در دو دهه‌ی اخیر به تهیه‌کردن نمودارهای سهم رسوب در مقیاس آبخیز و دامنه توجه شده است. بررسی این ابزار در مقیاس کرت نیز ممکن است به شناخت بهتر فرآیند تولید، بازتوزیع و تحویل رسوب کمک کند. این پژوهش با هدف سهم‌بندی رسوب در کرت‌های آزمایشگاهی با خاک شنی بافت متوسط و با شبیه‌سازی باران با شدت‌های ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ میلی‌متر در ساعت انجام شد. رسوب در سطح کرت‌ها با سنجش تغییر تراکم خاک‌دانه‌های رنگی مصنوعی با پردازش تصویر ردیابی شد. نتیجه نشان داد که این روش برای تهیه‌کردن نمودارهای سهم رسوب در مقیاس کرت سودمند است. با افزایش یافتن شدت بارندگی سهم فرسایش بین‌شیاری در تولید رسوب افزایش، و نسبت بازتوزیع رسوب در کرت کاهش یافت. متوسط نسبت تحویل رسوب برای شدت‌های بارندگی ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ میلی‌متر در ساعت به ترتیب ۷/۳۰، ۸/۵۴، ۱۱/۷۴ و ۱۵/۶۴٪ بود. تاکید می‌شود که به دلیل زمان کوتاه آزمایش، این نسبت در مقیاس کرت کوچک است و در پژوهش‌های آزمایشگاهی باید به آن توجه شود.

واژگان کلیدی: خاک‌دانه‌های رنگی مصنوعی، فرسایش بین‌شیاری، فرسایش پاشمانی، نسبت تحویل رسوب، نمودار سهم رسوب

مقدمه

فرسایش خاک و آسیب‌های رسوب ایجاد شده از آن مدیریت صحیح زمین و توسعه‌ی منابع آب را در بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته به شدت به خطر انداخته است (جانسون و لويس ۱۹۹۵). نمودار سه‌م رسوب در مقیاس‌های مکانی مختلف تعریف می‌شود، و از این رو می‌توان آن را برای دامنه‌ی از سامانه‌های مکانی زیست‌محیطی از جمله آبخیزها، ساحل‌ها، دریاچه‌ها و یخچال‌های طبیعی، و زیرسامانه‌های کوچک‌تر در آن‌ها مانند دامنه، مخروط افکنه یا حتماً آبراه به کار برد. نمودار سه‌م رسوب شاخص پاسخ رسوب آبخیز است (فیلیپس ۱۹۹۱؛ والینگ ۱۹۹۹) و ادراک مناسب و فهمیدنی را از تعامل بین حرکت رسوب، حمل، ذخیره و هدررفت خاک نشان می‌دهد (دیتریخ و دان ۱۹۷۸؛ اسلی میکر ۲۰۰۳). اگرچه برخی تاریخچه‌ی اولین کاربرد مفهوم سه‌م رسوب برای آبخیز را آغاز قرن بیستم و پژوهش گیلبرت در رسوب حاصل از معدن‌ها در رودخانه‌ی ساکرامنتو در کالیفرنیا می‌دانند، اما این مفهوم را در حقیقت اولین بار جاکلسی (۱۹۵۷) و رپ (۱۹۶۰) به کار بردند که برای مستندسازی شدت انتقال رسوب و حمل آن در آبخیزهای کوچک تلاش کردند (والینگ و کولینس، ۲۰۰۸). سپس کار ایشان را دیگر پژوهش‌گران ادامه دادند، از جمله در نمودار سه‌م رسوب دقیق برای آبخیزی با مساحت ۱۶/۲ کیلومتر مربع (دیتریخ و دان، ۱۹۷۸) و مفهوم‌سازی نمودار سه‌م رسوب در سطح آبخیزی بزرگ (مید و تریمبل، ۱۹۷۴؛ تریمبل، ۱۹۸۳).

بررسی نقش مهم ذخیره در تاثیر‌گذاری ارتباط بین فرسایش سراب یا حمل رسوب و هدررفت خاک در پایاب از برجستگی‌های پژوهش‌های با موضوع نمودار سه‌م رسوب در این سال‌ها بوده است. در نهایت نمودار سه‌م رسوب برای درک فرسایش و تحویل رسوب^۱ آبخیزها تهیه شد. مفهوم سه‌م رسوب در سراب آبخیز رودخانه‌ی کالیا در جنوب زامبیا (مساحت ۶۳ کیلومتر مربع) و با هدف تفکیک کردن سه‌م مشارکت کاربری‌های مختلف در تولید رسوب به کار برده شد، و نشان داد که کاربری کشاورزی با تولید ۷۶٪ و بوته‌زار با تولید ۱۶٪ مهم‌ترین منبع رسوب آبخیز است (والینگ و همکاران، ۲۰۰۱). در این دوره مفهوم بازتوزیع رسوب در سطح آبخیز و در مسیر انتقال به رودخانه بررسی شد. ذخیره‌ی رسوب در مخزن‌های محلی و مرز دشت سیلابی رودخانه‌ی اصلی نیز با کاربرد مفهوم نمودار سه‌م رسوب در پژوهش والینگ و همکاران (۲۰۰۱) و والینگ (۲۰۰۶) بررسی شد. نمودار سه‌م رسوب برای دو آبخیز پانگ (۱۶۶ کیلومتر مربع) و لامبورن (۲۳۴ کیلومتر مربع) در جنوب انگلستان با کاربرد ترکیبی از روش‌های اندازه‌گیری ذره‌های پرتوزا^۲، انگشت‌نگاری،

اندازه‌گیری رسوب‌دهی در خروجی آبخیزها و انباشت رسوب در بستر رودخانه تهیه و مقایسه شد، و به کمک نمودار سه‌م رسوب مشخص شد که هدررفت خاک در هر دو آبخیز بسیار کم است و سه‌م کمی از آن به‌مانند رسوب از آبخیز خارج می‌شود (والینگ، ۲۰۰۶).

کیسترا و همکاران (۲۰۰۹)، گلینز و همکارتن (۲۰۱۱)، مینلا و همکاران (۲۰۱۴)، گریمالدی و همکاران (۲۰۱۵)، پورتو و همکاران (۲۰۱۶)، زیناتو و همکاران (۲۰۱۷)، اسمیتاوا و همکاران (۲۰۱۷)، کاندولف و همکاران (۲۰۱۸)، اسمیت و همکاران (۲۰۱۹)، روزان و همکاران (۲۰۲۰) و صدیقی و همکاران (۲۰۲۱) نمودار سه‌م رسوب را برای مقیاس آبخیز تهیه کردند و با هدف‌های متنوعی به کار بردند. این هدف‌ها شامل تفکیک کردن سه‌م بخش‌های مختلف آبخیز یا تفکیک کردن سه‌م نوع‌های خاصی از فرسایش در تولید رسوب و نسبت‌های بازتوزیع و تحویل رسوب بود. در این زمینه حتی دو مقاله‌ی معتبر والینگ و کولینس (۲۰۰۸) و فرینگس و همکاران (۲۰۱۸) مشخصاً بر ضرورت و اهمیت تهیه‌کردن نمودارهای سه‌م رسوب برای مدیریت کردن آبخیزها تاکید کرد.

یکی از مهم‌ترین مفهوم‌ها در سه‌م‌بندی رسوب نسبت تحویل رسوب است. نسبت تحویل رسوب حاصل تقسیم رسوب‌دهی سطحی معین در دوره‌ی زمانی خاص به میزان فرسایش رخ داده در همان سطح و بازه‌ی زمانی است (والینگ، ۱۹۸۳؛ هان و همکاران ۱۹۹۴؛ دِ وِنْتِه و همکاران ۲۰۰۷). این نسبت بیش از هر عامل دیگر به سطح وابسته است، و هر قدر آن سطح بزرگ‌تر باشد بخش بیش‌تری از فرسایش قبل از رسیدن به خروجی در اثر فرآیندهای بازتوزیع قرار می‌گیرد و نسبت تحویل رسوب کاهش می‌یابد، اما در سطح‌های کوچک کرت‌ها نیز عملاً هیچ‌گاه این نسبت ۱۰۰٪ نیست. دلیل آن بازتوزیع بخشی از بار رسوب قبل از رسیدن به نقطه‌ی خروجی است. در تحلیل این موضوع توجه به اثر متقابل مقیاس‌های مکانی و زمانی بسیار مهم است. با افزایش مساحت امکان به‌تله‌اندازی رسوب قبل از رسیدن به خروجی بیش‌تر می‌شود، در حالی‌که با افزایش زمان فرصت انتقال بار رسوب به خروجی مهیا می‌شود. در نمودارهای سه‌م رسوب علاوه بر مشخص‌بودن مجموع کل فرسایش، مقداری از رسوب که به خروجی آبخیز نرسیده و دوباره در بخش‌های مختلف ته‌نشین شده است بازتوزیع رسوب دانسته می‌شود. از طرفی، نمودار سه‌م رسوب برای آبخیز تهیه شده است، و بررسی سابقه‌ی پژوهش نشان داد که به ویژه در دو دهه‌ی اخیر توجه به نمودارهای سه‌م رسوب ابزار بسیار کارآی مدیریت آبخیز بوده است. از طرف دیگر آگاهی از نسبت بازتوزیع و تحویل رسوب، که مولفه‌های اصلی

1 - Sediment Delivery Ratio (SDR)

2 - Radionuclides

جابه‌جایی ذره‌های خاک در سطح کرت به کار برد شد که مقدار پاشمان را نیز در خود دارد.

مواد و روش‌ها

پژوهش در آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش دانشکده‌ی منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. در این سامانه سه کرت بزرگ آزمایشگاهی ۱×۶ متر با ژرفای ۰/۵ متر، ۲۷ افشانه‌ی با فشار در ارتفاع کمینه و بیشینه‌ی چهار و شش متری از سطح کرت‌ها، همراه با زیرسامانه‌های ذخیره‌سازی و انتقال آب، مهار فشار، و شدت و مدت باران است (شکل ۱).



شکل ۱- نمایی از سامانه‌ی شبیه‌ساز باران و کرت‌های به کار رفته.

زیرین جلوگیری کند (داربوکس و همکاران، ۲۰۰۱؛ خالدی درویشان و همکاران، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۴). بافت خاک منطقه‌ی شنی با بافت متوسط (با رس، لای و شن به ترتیب ۱۴، ۲۴ و ۶۲٪)، مواد آلی ۲/۱۶۷٪، وزن مخصوص ظاهری ۱/۳۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب، پی‌اچ ۷/۹۵ و هدایت الکتریکی ۷۵/۵ میکروموس بر سانتی‌متر ارزیابی شد. ماده‌سازی خاک برای انتقال به کرت‌ها بر اساس روش کوکال و سرکار (۲۰۱۱) انجام شد. خاک در معرض هوا تا حد رطوبت بهینه خشک، و از الک هشت میلی‌متری عبور داده شد تا ضمن حفظ شدن ساختمان اصلی خاک (آغاسی و برادفورد، ۱۹۹۹؛ دفرشا و همکاران، ۲۰۱۱)، مانده‌های گیاهی و سنگ‌ریزه‌ها حذف کرده شود (آغاسی و برادفورد، ۱۹۹۹، و لایه‌بندی همگن و مناسب رعایت شود. خاک به کرت‌ها انتقال داده شد، و غلظتی از لوله‌ی پی‌وی‌سی برای رساندن جرم مخصوص ظاهری خاک به شرایط طبیعی منطقه‌ی برداشت به کار برده شد (شکل ۲).

سه‌م رسوب در مقیاس کرت است، نیز ضروری است و می‌تواند به افزایش دانش در زمینه‌ی فرآیندهای درگیر در مقیاس کرت‌های آزمایشگاهی کمک شایانی کند. در حالی که سه‌م‌بندی رسوب برای مقیاس کرت تاکنون کم‌تر بررسی شده است. در این پژوهش نمودار سه‌م رسوب برای تفکیک کردن فرآیندهای پاشمان، فرسایش بین‌شیاری و رسوب در مقیاس کرت به کار برده شد. نوآوری مشخص این پژوهش تهیه کردن نمودارهای سه‌م رسوب در مقیاس کرت است. در نمودارهای سه‌م رسوب تهیه‌شده، نسبت تحویل رسوب برابر با نسبت هدررفت خاک از کرت و فرسایش بین‌شیاری ناشی از روان‌آب در کرت در نظر گرفته شد. برای اندازه‌گیری فرسایش بین‌شیاری^۳ اندازه‌گیری کل

خاک

خاک مرتع‌های ییلاقی در فاصله‌ی سه کیلومتری شمال روستای کجور در مجاورت جاده‌ی کجور-کدیر به دلیل نزدیکی به دانشکده‌ی منابع طبیعی و آزمایشگاه شبیه‌ساز باران، و امکان به‌کاربردن داده‌های پژوهش‌های پیشین انتخاب شد. زمان برداشت و انتقال خاک فصل تابستان و دست کم یک هفته پس از آخرین بارندگی انتخاب شد، زیرا محتوای رطوبتی خاک کم و شرایط برای جمع‌آوری و انتقال مناسب بود. پس از جمع‌آوری خاک از لایه‌ی ۲۰ سانتی‌متری (کوکال و سرکار، ۲۰۱۰) و انتقال آن به آزمایشگاه، برای شبیه‌سازی بهتر شرایط طبیعی خاک لایه‌ی زهکشی از جنس پوک‌ه‌ی معدنی به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر در کف کرت‌ها گذاشته شد (داربوکس و همکاران ۲۰۰۱؛ دفرشا و همکاران، ۲۰۱۱؛ خالدی درویشان و همکاران، ۲۰۱۶). سپس یک لایه گونی کفنی نفوذپذیر در حد فاصل لایه‌ی زهکشی ریزدانه و خاک گذاشته شد تا اصطکاک در مرز خاک و دیواره‌ی شیشه‌ی کرت را افزایش دهد و از ترکیب شدن خاک و لایه‌ی



(ب)



(الف)



(د)



(ج)



(ه)



(و)

شکل ۲- مرحله‌های برداشت (الف)، انتقال به آزمایشگاه (ب)، هواخشک کردن (ج)، آماده‌سازی (د)، انتقال به کرت‌ها و هموارسازی (ه)، و کاربرد غلتک برای تنظیم تراکم خاک در کرت (و).

داده‌های باران‌نگاری نزدیک‌ترین ایستگاه هم‌دید به منطقه‌ی برداشت خاک (ایستگاه کجور) و داده‌های ایستگاه‌های بلده و سیاه‌بیشه و بررسی منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی تهیه‌شده برای ایستگاه‌های قراخیل و نوشهر، شدت‌های بارندگی ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت دامنه‌ی شدت‌های با فراوانی زیاد (دوره‌ی بازگشت کم‌تر از ۲۰ سال)، و زمان برابر با مدت آزمایش (۱۰ تا ۱۵ دقیقه) تعیین کرده‌شد.

از آن‌جاکه به دلیل شرایط خاص تیمارها و زمان انجام آزمایش‌ها فرصت کافی برای تشکیل شدن فرسایش شباری در سطح کرت مهیا نشد، همه‌ی فرسایش ایجاد شده در کرت‌ها حاصل دو مرحله‌ی آغازین فرسایش آبی شامل فرسایش پاشمانی و فرسایش بین‌شیاری بود. پس از اندازه‌گیری هدررفت خاک در پنج بازه‌ی زمانی دو دقیقه‌ی (۱۰ دقیقه) با جمع‌آوری نمونه‌های روان‌آب و اندازه‌گیری غلظت رسوب به روش برجاگذاری و تخلیه^۵ (شی و همکاران، ۲۰۱۲) و فرسایش بین‌شیاری رخ داده در هر تیمار حاصل کاربرد روش خاک‌دانه‌های رنگی مصنوعی^۶ و اندازه‌گیری‌های پردازش تصویر (خالدی درویشان و همکاران، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۴)، نسبت تحویل رسوب با تقسیم کردن هدررفت خاک به فرسایش بین‌شیاری محاسبه کرده‌شد. سه قاب ۴۰×۴۰ سانتی‌متری (مرتس و السن، ۲۰۰۶) در سه مقطع از طول شش متری کرت‌ها (فاصله‌های ۰/۵، ۳/۰ و ۵/۵ متری از سراب به ترتیب در کرت‌های یک، دو و سه) به گونه‌ی گذاشته شد که در هر کرت فقط یک قاب تصویربرداری باشد. خاک‌دانه‌های رنگی مصنوعی با قطر منفذ ۱/۵ میلی‌متر و با تراکم متوسط ۲۸۷۵ عدد در متر مربع در سطح خاک با پراکنش یک‌نواخت (ونتورا و همکاران، ۲۰۰۲) گذاشته شد، و با غلطکی کوچک در لایه‌ی یک میلی‌متری سطح خاک (برابر با متوسط قطر خاک‌دانه‌های طبیعی خاک) گذاشته شد. چگونگی جا دهی قاب‌ها، سه پایه و دوربین برای عکس‌برداری از خاک‌دانه‌های رنگی مصنوعی در کرت‌های سه‌گانه در شکل ۳ نشان داده شده‌است.

تیمارهای رطوبت پیشین خاک

به‌دلیل اثر رطوبت پیشین خاک بر روان‌آب و در نتیجه فرسایش، و با هدف افزایش دادن اعتبار نتیجه‌ها، دامنه‌ی از سطح‌های مختلف رطوبت پیشین خاک برای تهیه کردن نمودار سهم رسوب در مقیاس کرت انتخاب شد. اهمیت رطوبت پیشین خاک تا آن‌جا است که می‌تواند در بارندگی‌های با شدت کم تا متوسط، به‌ویژه در منطقه‌های نیمه‌خشک، کاملاً معنی‌دار بر روان‌آب تأثیر بگذارد (کاستیلو و همکاران، ۲۰۰۳)، و از طرف دیگر میزان فرسایش بارانی در دامنه‌ی تغییر رطوبت پیشین خاک از حد خشک تا نزدیک به اشباع، تا بیش از پنج برابر تغییر می‌کند (لوک، ۱۹۸۵؛ لوک و هامیلتون، ۱۹۸۶).

چهار حسگر دیتالاگر^۴ رطوبت‌سنج خاک (IDRG SMS-St) در هر کرت با فاصله‌ی دست‌کم ۱۰ سانتی‌متر از دیوار شیشه‌ی و در فاصله‌های ۱/۲ متر در جهت طولی (تریبلی و همکاران، ۲۰۱۰) در هر یک از کرت‌های شش متری نصب کرده شد.

سطح‌های رطوبت خاک با در نظر گرفتن حالت هواخشک (۱۲٪) و رطوبت نزدیک به اشباع (۴۴٪) (ارشم و همکاران، ۲۰۰۹) و نسبتاً مشابه با گزارش‌های موجود و در نظر گرفتن سه تراز رطوبتی دیگر در حد فاصل ۱۲ و ۴۴٪ شامل نسبتاً خشک (۱۹٪)، میانگین رطوبت سالانه (۲۹٪) و میانگین رطوبت فصل مرطوب سال (۳۶٪) تعیین کرده شد.

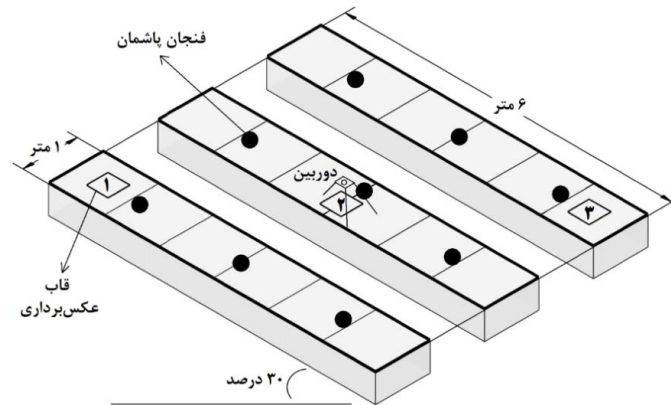
اجرای آزمایش‌ها

از آن‌جاکه رطوبت پیشین خاک در دقیقه‌های اول پس از شروع بارندگی بیش‌ترین اثر مستقیم بر مقاومت خاک‌دانه‌ها و فرآیند تخریب و تغییر ویژگی‌های سطح خاک، و زمان تشکیل روان‌آب دارد (هاوکه و همکاران، ۲۰۰۶)، و با گذشت زمان و افزایش رطوبت لایه‌ی سطحی خاک اثرهای مستقیم رطوبت پیشین کم‌رنگ‌تر می‌شود، زمان آزمایش ۱۰ تا ۱۵ دقیقه (بسته به زمان تشکیل روان‌آب) تعیین کرده شد. با استناد به

5 - Data Logger

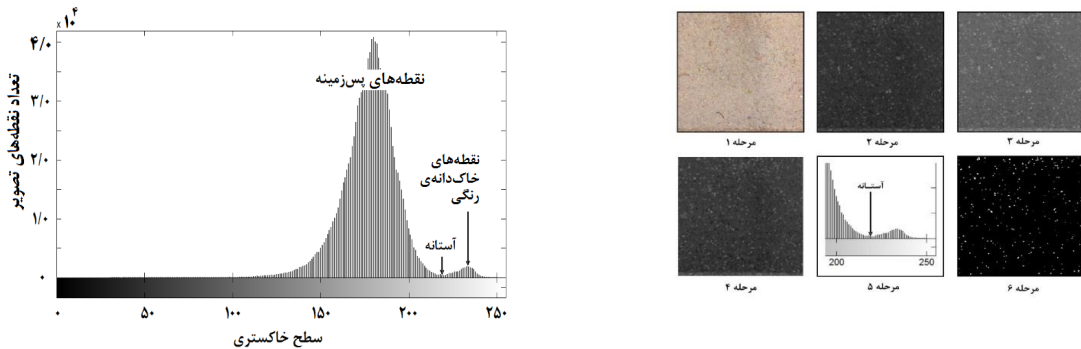
6 - Decantation method

7 - Synthetic Color-Contrast Aggregates (SCCA)



شکل ۳- چگونگی جا دهی قاب‌ها، سه پایه و دوربین عکس برداری از خاک‌دانه‌های رنگی مصنوعی و چینش فنجان‌های پاشمان در کرت‌ها.

خلاصه‌ی روش کار پردازش تصویر برداشته‌شده از خاک‌دانه‌های رنگی مصنوعی برای یک تکرار از تیمارها در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- مرحله‌های اصلی پردازش تصویر برای قاب عکس برداری یک در شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر در ساعت و رطوبت پیشین خاک ۲۹٪ (راست) و میله‌بی تشخیص چشمی آستانه برای قاب عکس برداری یک در شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر در ساعت و رطوبت پیشین خاک ۲۹٪ (چپ).

یک از کرت‌ها (طول شش متر) محاسبه کرده‌شد. در محاسبه‌ی نسبت تحویل رسوب، مخرج کسر مقدار فرسایش ناخالص به‌وقوع پیوسته در کرت و برابر با فرسایش ناشی از روان‌آب است، و اندازه‌ی پاشمان در آن تاثیر داده نمی‌شود، زیرا اثر پاشمان در جداکردن ذره‌های خاک و آماده‌کردن آن‌ها برای برده‌شدن با روان‌آب پیش‌بینی شده‌است. با چهار تراز از تیمار شدت بارندگی (۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ میلی‌متر در ساعت) و پنج تراز از تیمار رطوبت پیشین خاک (۱۲، ۱۹، ۲۹، ۳۶ و ۴۴٪ حجمی) در کل ۲۰ تیمار ترکیبی در طرح عاملی بررسی شد. سه کرت آزمایشگاهی نیز برای سه تکرار برای هر تیمار گرفته‌شد.

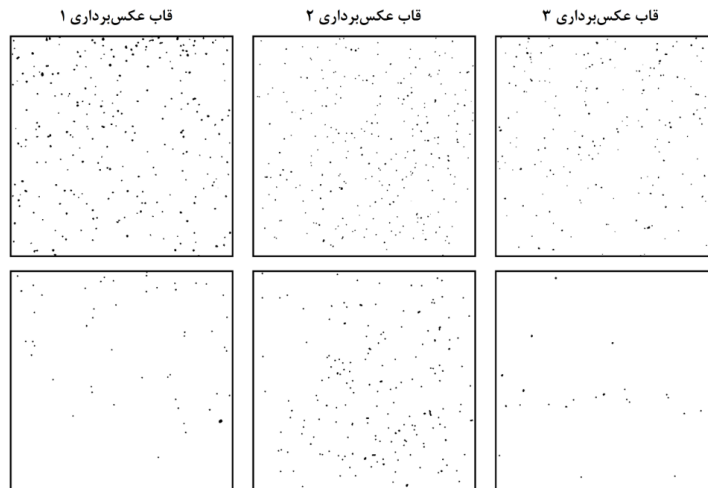
نتایج

فرسایش بین‌شیاری رخ داده در هر تیمار با روش خاک‌دانه‌های رنگی مصنوعی و اندازه‌گیری‌های پردازش تصویر محاسبه کرده‌شد.

با محاسبه‌های لازم بر مبنای روش کار و استدلال خالدي درویشان و همکاران (۲۰۱۴) مساحت، حجم و جرم لایه‌ی سطحی خاک جابه‌جا شده در هر متر مربع از کرت بر اثر اجراکردن تیمارهای مختلف تعیین، و با ضرب کردن در مساحت کرت، کل مقدار جابه‌جایی محاسبه کرده‌شد. بر اساس این استدلال اعتبار این روش پذیرفتنی بود زیرا در حین اجراکردن تیمار نشانه‌های به‌وجودآمدن شیاری و فرسایش شیاری مشاهده نشد. سپس زمان همه‌ی تیمارها یکسان کرده‌شد. فرسایش بین‌شیاری با کم کردن پاشمان خالص از کل مقدار جابه‌جایی خاک محاسبه کرده‌شد. روش کار تهیه و کاربرد خاک‌دانه‌های رنگی مصنوعی نسبت بازتوزیع رسوب نیز که بخشی از فرسایش است که به خروجی کرت نرسیده است با کم کردن نسبت تحویل رسوب از ۱ محاسبه کرده‌شد. داده‌های فرسایش و میزان حمل مواد فرسایش یافته به خروج، و در نتیجه میزان ته‌نشست مواد در مسیر حمل در هر

(بالا) و بعد (پایین) از اجرا کردن تیمار در شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر در ساعت و رطوبت پیشین خاک ۲۹٪ حجمی را نشان می‌دهد.

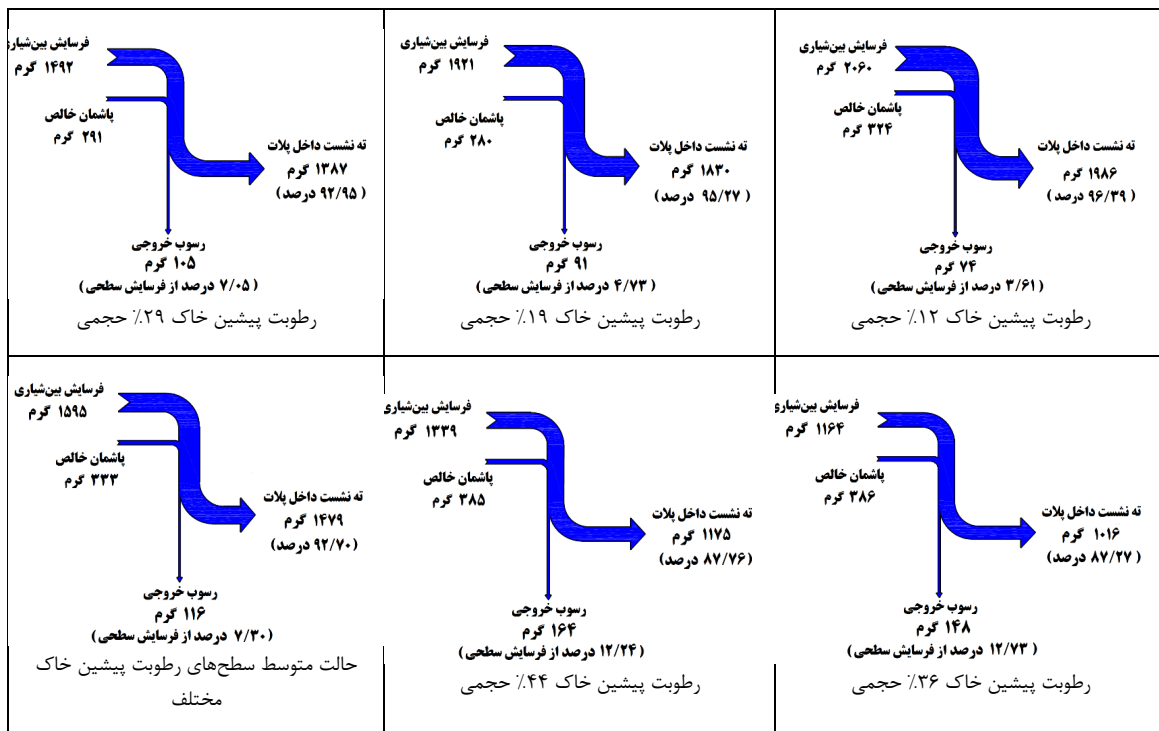
اندازه‌ی پاشمان خالص و فرسایش بین‌شیاری ورودی‌های نمودار سهم رسوب و بازتوزیع در کرت، و تحویل رسوب در خروجی کرت خروجی‌های نمودار سهم رسوب گرفته شد. شکل ۵ تصویرهای نهایی پردازش هر ۳ قاب عکس برداری قبل



شکل ۵- تصویرهای نهایی پردازش هر ۳ قاب عکس برداری قبل (بالا) و بعد (پایین) از اجرا کردن تیمار در شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر در ساعت و رطوبت پیشین خاک ۲۹٪ حجمی.

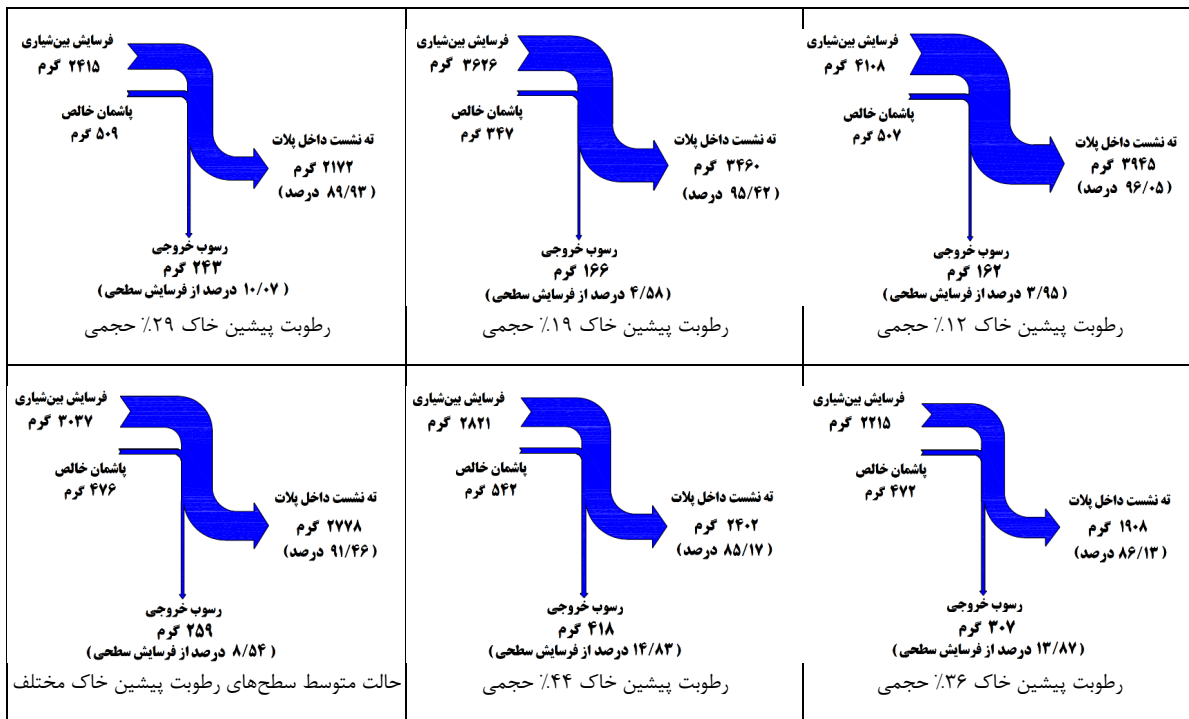
بین شیاری ناشی از روان‌آب در کرت دانسته شد. برای اندازه‌گیری فرسایش بین‌شیاری اندازه‌گیری کل جابه‌جایی ذره‌های خاک در سطح کرت به کار برده شد که مقدار پاشمان را نیز در خود دارد. جدول ۱ محاسبه‌ی نسبت تحویل رسوب در هر تیمار را نشان

شکل‌های ۶ تا ۹ اره‌های سهم رسوب را با مقیاس یکسان به ترتیب در هر یک از شدت‌های بارندگی ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ میلی‌متر در ساعت نشان می‌دهد. در نمودارهای سهم رسوب تهیه‌شده، نسبت تحویل رسوب برابر با نسبت هدررفت خاک از کرت و فرسایش

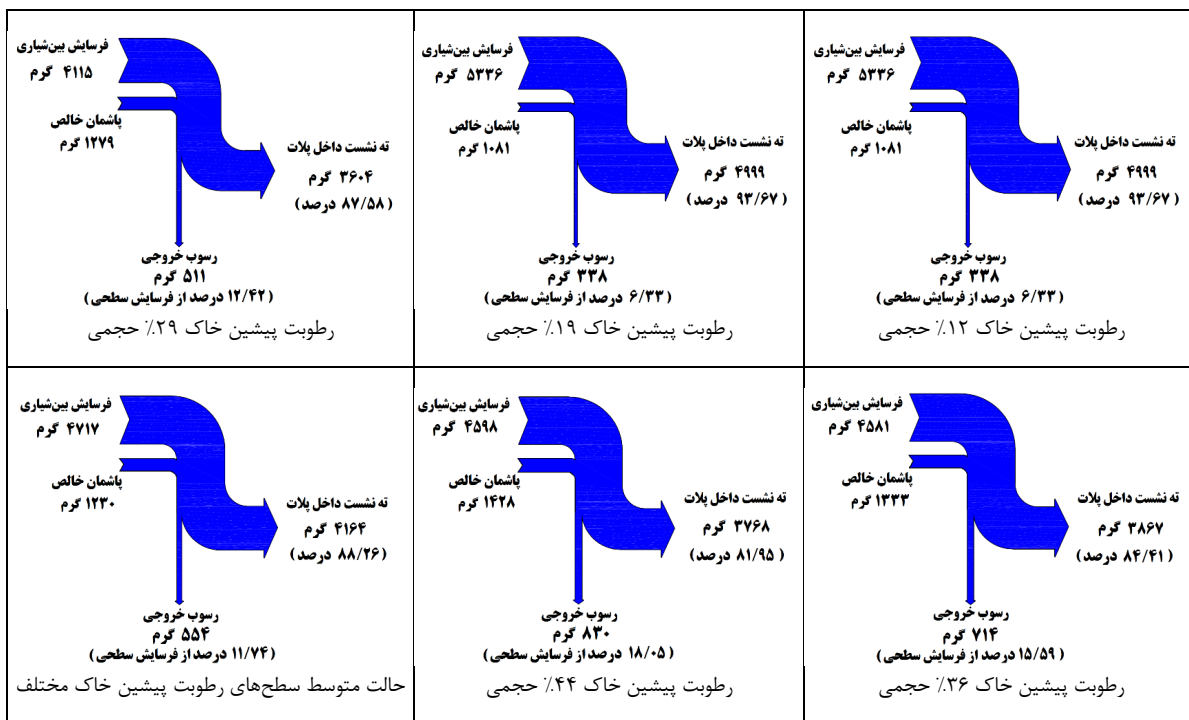


شکل ۶- نمودارهای سهم رسوب در شدت بارندگی ۳۰ میلی‌متر در ساعت و در سطح‌های مختلف رطوبت پیشین خاک.

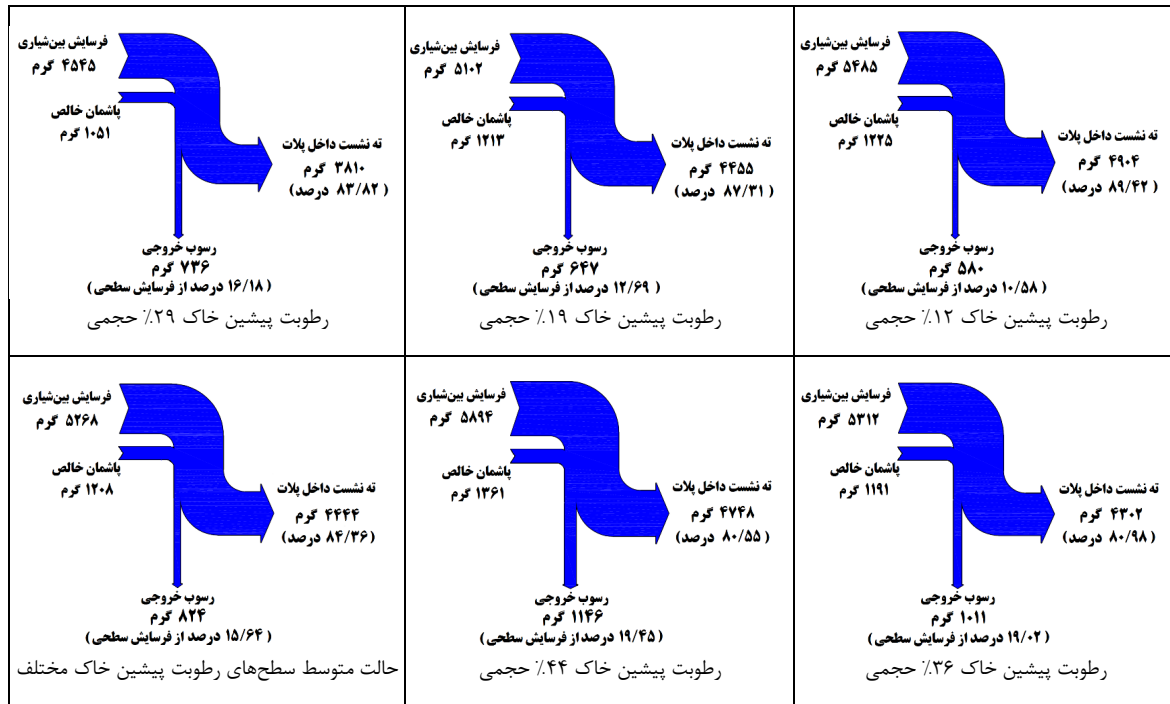
سه‌بندی رسوب در کرت‌های آزمایشگاهی با شبیه‌سازی باران



شکل ۷- نمودارهای سهم رسوب در شدت بارندگی ۵۰ میلی‌متر در ساعت و در سطح‌های مختلف رطوبت پیشین خاک.



شکل ۸- نمودارهای سهم رسوب در شدت بارندگی ۷۰ میلی‌متر در ساعت و در سطح‌های مختلف رطوبت پیشین خاک.



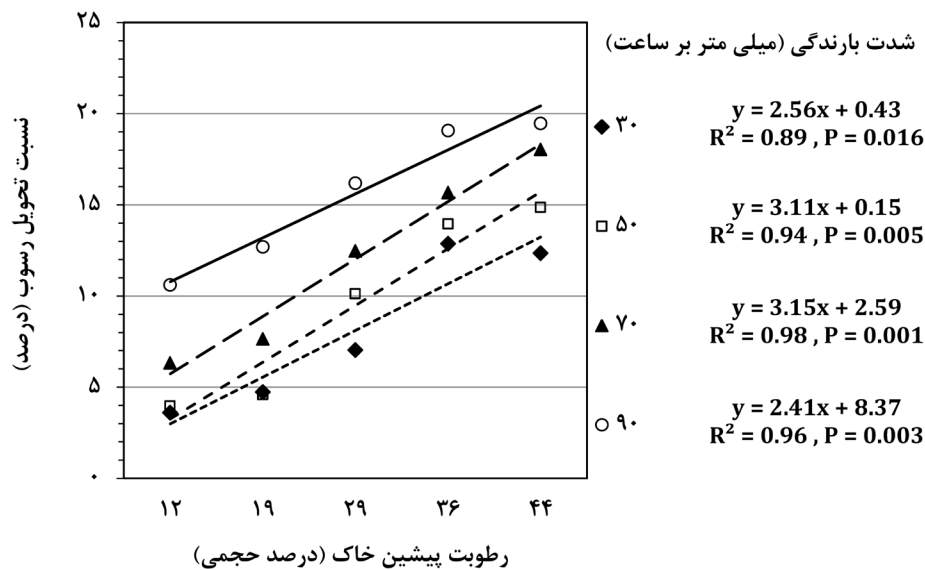
شکل ۹- نمودارهای سهم رسوب در شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر در ساعت و در سطح‌های مختلف رطوبت پیشین خاک.

در سطح‌های مختلف شدت بارندگی در شکل ۱۰ نشان داده شده‌است.

می‌دهد. ضریب همبستگی پیرسون بین نسبت تحویل رسوب و شدت بارندگی $0/538$ و رطوبت پیشین خاک $0/766$ بود ($P > 0,01$). رابطه‌ی نسبت تحویل رسوب و رطوبت پیشین خاک

جدول ۱- محاسبه‌ی نسبت تحویل رسوب در تیمارهای مختلف رطوبت پیشین خاک و شدت بارندگی.

نسبت تحویل رسوب (درصد)	هدررفت خاک از کرت (گرم)	فرسایش بین‌شیاری (گرم)	رطوبت پیشین خاک (درصد حجمی)	شدت بارندگی (میلی‌متر در ساعت)
۳/۶۱	۷۴/۳۱	۲۰۶۰/۴۹	۱۲	
۴/۷۳	۹۰/۸۲	۱۹۲۰/۷۶	۱۹	
۷/۰۵	۱۰۵/۲۳	۱۴۹۲/۰۴	۲۹	
۱۲/۷۳	۱۴۸/۲۷	۱۱۶۴/۳۳	۳۶	۳۰
۱۲/۲۴	۱۶۳/۷۹	۱۳۳۸/۶۵	۴۴	
۷/۳۰	۱۱۶/۴۸	۱۵۹۵/۲۶	میانگین	
۴/۲۲	۳۸/۱۲	۳۸۲/۲۹	انحراف معیار	
۳/۹۵	۱۶۲/۳۷	۴۱۰۷/۸۲	۱۲	
۴/۵۸	۱۶۶/۰۸	۳۶۲۵/۹۷	۱۹	
۱۰/۰۷	۲۴۳/۲۳	۲۴۱۵/۳۰	۲۹	
۱۳/۸۷	۳۰۷/۲۰	۲۲۱۵/۱۶	۳۶	۵۰
۱۴/۸۳	۴۱۸/۲۳	۲۸۲۰/۶۶	۴۴	
۸/۵۴	۲۹۵/۴۲	۳۰۳۶/۹۸	میانگین	
۵/۰۷	۱۰۷/۱۲	۸۰۶/۵۸	انحراف معیار	
۶/۳۳	۳۳۷/۸۵	۵۳۳۶/۳۸	۱۲	
۷/۵۹	۳۷۶/۲۲	۴۹۵۶/۰۴	۱۹	
۱۲/۴۲	۵۱۰/۹۱	۴۱۱۴/۵۱	۲۹	
۱۵/۵۹	۷۱۴/۰۳	۴۵۸۱/۴۴	۳۶	۷۰
۱۸/۰۵	۸۲۹/۷۸	۴۵۹۸/۰۵	۴۴	
۱۱/۷۴	۵۵۳/۷۶	۴۷۱۷/۲۸	میانگین	
۵/۰۳	۲۱۳/۲۲	۴۵۷/۲۴	انحراف معیار	
۱۰/۵۸	۵۸۰/۴۰	۵۴۸۴/۷۷	۱۲	
۱۲/۶۹	۶۴۷/۲۷	۵۱۰۲/۲۲	۱۹	
۱۶/۱۸	۷۳۵/۵۳	۴۵۴۵/۲۵	۲۹	
۱۹/۰۲	۱۰۱۰/۵۴	۵۳۱۲/۲۸	۳۶	۹۰
۱۹/۴۵	۱۱۴۶/۲۹	۵۸۹۳/۹۰	۴۴	
۱۵/۶۴	۸۲۴/۰۱	۵۲۶۷/۶۸	میانگین	
۳/۸۹	۲۴۳/۴۵	۴۹۷/۶۳	انحراف معیار	



شکل ۱۰- رابطه‌ی نسبت تحویل رسوب کرت با رطوبت پیشین خاک در شدت‌های مختلف بارندگی.

مقایسه‌ی عددی فرسایش بین شیاری محاسبه‌شده با کاوش تصویرها نیز بر تغییر عامل غالب جداشدن و برده‌شدن در سه محدوده‌ی سراب، میانه و پایاب کرت‌ها تأکید دارد.

بررسی چشمی نمودارهای سهم‌بندی در شکل‌های ۶ تا ۹ نشان داد که از طرفی مقدار فرسایش بین‌شیاری در کرت با افزایش یافتن شدت بارندگی افزایش یافت، اما از طرف دیگر نسبت بازتوزیع رسوب در کرت نسبتاً کاهش یافت، و در برابر، نسبت تحویل رسوب بیش‌تر شد. به‌عبارت دیگر در شدت‌های زیاد، بخش بیش‌تری از فرسایش به خروجی کرت رسید و با ماهیت رسوب ثبت شد، که تأییدکنندگی اثر افزایش روان‌آب است، که خود عامل حمل در افزایش نسبت تحویل رسوب در شدت‌های بارندگی زیاد است. بنابراین افزایش قدرت قطره‌های باران در شدت‌های زیاد و افزایش ضریب و حجم روان‌آب (عامل اصلی حمل) دلیل اصلی انتقال بیش‌تر مواد جداشده است.

در شدت ۳۰ میلی‌متر بر ساعت پاشمان ذره‌های خاک روند به‌خصوصی نداشت اما فرسایش بین‌شیاری در رطوبت ۱۲ تا ۴۴٪ به‌ترتیب با ۲۰۶۰، ۱۹۲۱، ۱۴۹۲، ۱۱۶۴ و ۱۳۳۵ گرم روند کاهش‌ی داشت. نتیجه‌ها نشان داد که در رطوبت کم‌تر (۱۲٪)، تأثیر روان‌آب در کنش ذره‌های خاک از سایر رطوبت‌ها در این شدت بیش‌تر، و در نتیجه مقدار رسوب ناشی از فرسایش بین‌شیاری بیش‌تر بود. ته‌نشست رسوب در کرت‌ها در رطوبت ۱۲٪ با مقدار ۱۹۸۶ گرم (۳۹/۹۶٪) بیش‌تر بود. علت آن را می‌توان به فرسایش پاشمانی نسبت داد زیرا بسیاری از ذره‌های کنده‌شده در اثر ضربه‌ی قطره‌های باران در سطح کرت به دام می‌افتد و روان‌آب نیز توان جابه‌جایی آن‌ها را به خروجی کرت ندارد، و در نتیجه ته‌نشست بیش‌تر می‌شود. رسوب خروجی از

بحث و نتیجه‌گیری

به‌دلیل جای قاب‌های سه‌گانه‌ی عکس‌برداری در کرت‌ها (شکل ۳)، امکان تحلیل کردن مقدار پاشمان در بخش‌های مختلف کرت، و بررسی اثر جداگانه و ترکیبی پاشمان و روان‌آب سطحی بر میزان فرسایش بین‌شیاری مهیا شد. در قاب شماره‌ی ۱ (سراب کرت شماره‌ی ۱) به‌دلیل جا داشتن در مرز سراب کرت و نبودن روان‌آب، و ضخامت لایه‌ی آب روی خاک حدود ۰/۲ میلی‌متر، پاشمان عامل غالب در ایجاد کردن فرسایش بین‌شیاری بود، در حالی که در قاب شماره‌ی ۲ (بخش میانی کرت شماره‌ی ۲) نیروی روان‌آب عامل اصلی فرسایش بین‌شیاری بود، که همراه با پاشمان در جدا کردن و حمل کردن ذره‌های سطح خاک نقش داشت. از طرف دیگر ضخامت متوسط روان‌آب (حدود ۱ میلی‌متر و بیش‌تر از یک‌سوم میانگین قطر قطره‌های باران) موجب شد که در جهت کاهش نیروی تخریبی قطره‌های باران هنگام برخورد به سطح خاک، و در نتیجه کاهش پاشمان عمل کند (ماچلر و لارسون، ۱۹۷۱؛ آئرسوالد و همکاران، ۱۹۹۴؛ کینل، ۲۰۰۵؛ قهرمانی و همکاران، ۲۰۱۱).

در قاب شماره‌ی ۳ (پایاب کرت شماره‌ی ۳) با افزایش یافتن ضخامت متوسط لایه‌ی روان‌آب سطحی تا حدود ۱/۵ میلی‌متر، حفاظت کامل‌تر سطح خاک با لایه‌ی خاک‌پوش آبی ایجاد شد و نیروی تخریبی ناشی از برخوردن قطره‌های باران، و در نتیجه مقدار پاشمان کاهش یافت. به‌همین دلیل در این محدوده از کرت (یک‌سوم پایاب)، نیروی روان‌آب عامل غالب ایجاد کردن فرسایش بین‌شیاری دانسته شد که با نتیجه‌های ماچلر و لارسون (۱۹۷۱) در عمل کرد بیش‌تر پاشمان در سراب و روان‌آب در پایاب دامنه‌ها کاملاً هم‌سو است. مقایسه‌ی چشمی تصویرهای پردازش‌شده و

خاک بر نسبت تحویل رسوب معنی‌دار نبود (شکل ۱۰). انتظار محسوس‌تر بودن اثرهای رطوبت پیشین خاک بر روان‌آب در نقش مهم‌ترین عامل حمل رسوب در شدت‌های بارندگی کم‌تر، نتیجه‌ی علمی و منطقی است (کاستیلو و همکاران، ۲۰۰۳؛ هاوکه و همکاران، ۲۰۰۶) اما در این پژوهش بیش‌ترین اثر رطوبت پیشین خاک در نسبت تحویل رسوب در شدت بارندگی ۵۰ میلی‌متر در ساعت رخ داد. مهم‌ترین دلیل این نتیجه را می‌توان کم‌تر بودن ضریب روان‌آب در شدت بارندگی ۳۰ از ۵۰ میلی‌متر در ساعت دانست که مانع ایجاد شدن روان‌آب کافی برای انتقال دادن رسوب در شدت بارندگی کم‌تر شد.

اگرچه کرت‌های آزمایشگاهی فرسایش و رسوب به‌دلیل اندازه‌ی کوچک به‌ندرت برای بررسی کردن توزیع و بازتوزیع رسوب به‌کار برده شده است، اما همواره باید بخش کمی از فرسایش در کرت نیز بازتوزیع رسوب در نظر گرفته شود (کانینگهام، ۲۰۰۸)، در این پژوهش با کاربرد روش جدید خاک‌دانه‌های رنگی مصنوعی و پردازش تصویرهای پراکنش آن‌ها قبل و بعد از اجرای تیمارها مشخص شد که در شرایط این پژوهش (کرت‌های آزمایشگاهی و مدت بارندگی حدود ۱۲ دقیقه)، بازتوزیع رسوب در کرت نه تنها کم نبود، بل که در برخی حالت‌ها بخش زیادی از فرسایش را شامل شد. نکته‌ی بسیار مهم در بررسی کردن نسبت تحویل رسوب در نظر گرفتن اثرهای مدت بارندگی است (ورهیجن و همکاران، ۲۰۰۹) به‌طوری‌که با شروع شدن بارندگی بخش زیادی از انرژی باران و روان‌آب صرف جدا شدن ذره‌های خاک می‌شود. با افزایش یافتن روان‌آب در نقش عامل اصلی حمل، ذره‌های جدا شده‌ی خاک به خروجی انتقال یافت و در جایگاه رسوب اندازه‌گرفته‌شد. در مقیاس آبخیز این زمان ممکن است از حد ساعت فراتر رود، اما در مقیاس کرت، حتا اختلاف چند دقیقه‌ی در مدت بارندگی ممکن است اختلاف کاملاً معنی‌داری در مقدار رسوب منتقل شده به خروجی کرت، و طبعاً در نسبت تحویل رسوب ایجاد کند. به‌همین دلیل با ادامه یافتن بارندگی در این پژوهش (با کرت شش متری و مدت بارندگی ۱۰ دقیقه پس از شروع روان‌آب)، به طور قطع سهم بیش‌تری از مواد جدا شده به خروجی منتقل و موجب افزایش یافتن نسبت تحویل رسوب می‌شد.

نوع فرآیند غالب فرسایش به‌ویژه سطحی یا متمرکز عمل کردن آن ممکن است در نسبت تحویل رسوب بسیار مؤثر باشد. به‌دلیل عمل کرد پاشمان و فرسایش بین‌شیاری و نبودن و توسعه نیافتن شیار، فقط بار رسوب منتقل شده با روان‌آب سطحی به خروجی کرت رسید. بنابراین نسبت تحویل رسوب کم‌تر از حالتی بود که در آن روان‌آب متمرکز وارد عمل شود. به‌همین دلیل می‌توان اصطلاح جدید 'نسبت تحویل رسوب فرسایش بین‌شیاری' را معرفی کرد. با وجود این، کم‌بودن نسبت تحویل رسوب در کرت با نتیجه‌های وین‌رایت و همکاران (۲۰۰۳)، پارسونس و همکاران

کرت در رطوبت ۴۴٪ بیش‌ترین مقدار (۱۶۴ گرم) بود. نتیجه‌ها نشان داد که روان‌آب در رطوبت زیاد، به‌علت اشباع بودن خاک، در زمان کم‌تری تشکیل شد و فرصت کافی برای حمل کردن ذره‌های کنده شده در اثر پاشمان و فرسایش شیاری را داشت، و ممکن است نسبت تحویل رسوب را در خروجی کرت افزایش داده و در نتیجه مقدار ته‌نشست کاهش یافته باشد (شکل ۱۰). در شدت ۵۰ میلی‌متر بر ساعت پاشمان روند ثابتی نداشت اما در رطوبت ۴۴٪ مقدار آن بیش‌تر برآورد کرده شد (۵۴۲ گرم). ته‌نشست رسوب در طول کرت روند کاهش داشت به‌طوری‌که در رطوبت ۴۴٪ کم‌ترین مقدار (۲۴۰۲ گرم) برآورد کرده شد. این نشان می‌دهد که در رطوبت‌های زیاد نفوذ خاک کم‌تر است، و در نتیجه روان‌آب بیش‌تری تشکیل می‌شود، و رسوب بیش‌تری را به خروجی کرت انتقال می‌دهد. در رطوبت ۴۴٪ مقدار رسوب خروجی ۴۱۸ گرم بود که در این فرآیند روند افزایشی است (شکل ۷).

پاشمان در شدت ۷۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت با افزایش رطوبت روند افزایش داشت و مقدار متوسط در این دو شدت به‌ترتیب ۱۲۳۰ و ۱۲۰۸ گرم بود، در حالی‌که ته‌نشست خاک با افزایش رطوبت به‌ترتیب روند کاهش و افزایش داشت. این نشان می‌دهد که در شدت ۹۰ میلی‌متر بر ساعت با وجود شدت زیاد و رطوبت زیاد، مقدار بازتوزیع رسوب بیش‌تر بود. یکی از دلیل‌های آن ممکن است کنش ناشی از پاشمان باشد که زبری سطح خاک را بیش‌تر می‌کند، و در نتیجه مقدار بیش‌تری از بار رسوب در این فضاها برجا می‌ماند، و مقدار ته‌نشست خاک در سطح کرت افزایش می‌یابد (شکل‌های ۶ و ۷).

بازتوزیع رسوب ۸۱ تا ۹۶٪ و تحویل رسوب ۴ تا ۱۹٪ از کل فرسایش را شامل شد (جدول ۱). ضریب همبستگی شدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک با نسبت تحویل رسوب به‌ترتیب با ۰/۷۶۶ و ۰/۵۳۸ در تراز اعتماد ۹۹٪ مثبت و معنی‌دار بود. بنابراین با افزایش شدت بارندگی و افزایش رطوبت پیشین خاک بر مقدار نسبت تحویل رسوب افزوده شد (شکل ۷). این نتیجه به‌دلیل رابطه‌ی مستقیم شدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک با ضریب روان‌آب، نشان‌دهنده‌ی اثر معنی‌دار حضور روان‌آب در نقش عامل حمل در نسبت تحویل رسوب است.

افزایش رطوبت پیشین خاک نیز اثر مستقیم بر نسبت تحویل رسوب داشت، به‌نحوی‌که افزایش یافتن رطوبت پیشین خاک از ۱۲ تا ۴۴٪ موجب افزایش یافتن نسبت تحویل رسوب تا ۳/۳۹، ۳/۷۵، ۲/۸۵ و ۱/۸۴ برابر به‌ترتیب در شدت‌های بارندگی ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ میلی‌متر در ساعت شد، که با نتیجه‌های زارتل و همکاران (۲۰۰۱) در افزایش نسبت تحویل رسوب با افزایش رطوبت پیشین خاک مطابقت دارد. این نتیجه نشان‌دهنده‌ی بیش‌ترین اثر رطوبت پیشین خاک در شدت بارندگی ۵۰ میلی‌متر در ساعت بود اما اثرهای متقابل شدت بارندگی و رطوبت پیشین

با کاربرد روش جدید خاک دانه‌های رنگی مصنوعی و پردازش تصویرهای پراکنش آن‌ها قبل و بعد از اجرای تیمارها مشخص شد که در شرایط این پژوهش (کرت‌های آزمایشگاهی و مدت بارندگی حدود ۱۲ دقیقه)، بازتوزیع رسوب در کرت نه‌تنها کم نبود بل که در برخی از آن‌ها بخش زیادی از فرسایش بود.

نتیجه‌های این پژوهش نشان داد که با افزایش یافتن شدت بارندگی مقدار فرسایش بین‌شیاری در کرت افزایش یافت، اما از طرف دیگر نسبت بازتوزیع رسوب در کرت نسبتاً کاهش یافت. در برابر، نسبت تحویل رسوب بیشتر شد. به عبارت دیگر در شدت‌های زیاد، بخش بیش‌تری از فرسایش به خروجی کرت رسید و رسوب ثبت شد، که تأییدکننده‌ی اثر افزایش روان‌آب در نقش عامل حمل در افزایش نسبت تحویل رسوب در شدت‌های بارندگی زیاد است.

نتیجه‌ی بسیار مهم دیگر این پژوهش این است که نسبت تحویل رسوب کرت تنها در مقیاس زمانی طولانی (یک سال و بیش‌تر) ممکن است ۱ (۱۰۰٪) فرض شود، زیرا در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌تر مانند بارندگی یا مدت‌های کوتاه در شبیه‌سازی‌های بارندگی در پژوهش‌های آزمایشگاهی، فرصت لازم برای انتقال یافتن رسوب تولیدشده فراهم نمی‌شود، و از این رو نسبت تحویل رسوب به نسبت زمان بارندگی و ایجاد روان‌آب بسیار کم‌تر از ۱ است. در پژوهش‌های کرت‌های آزمایشگاهی فرسایش و رسوب، کرت‌های صحرایی با شبیه‌سازی باران، و حتا در جاهایی که کرت‌های صحرایی با باران طبیعی ولی در مقیاس روی‌داد بررسی می‌شود باید به این نتیجه‌ها توجه کرد.

(۲۰۰۴)، پارسونس و استون (۲۰۰۶) و پسترس (۲۰۰۷) در نسبت تحویل رسوب کم‌تر از ۱۰۰٪. حتا در مقیاس کرت به سبب غالب بودن فرآیند فرسایش سطحی و بین‌شیاری مطابقت دارد، زیرا در هیچ‌کدام از آن تیمارها اثر فرسایش شیاری دیده نشد و فقط فرآیندهای پاشمان و فرسایش بین‌شیاری عامل جداشدن و حمل رسوب به خروجی کرت بود. چاپلات و پوسن (۲۰۱۲) نیز بیش از ۶۰٪ کاهش در میانگین تحویل رسوب از اندازه‌ی کرت ۱ متر مربع به کرت ۲/۵ متر مربع را گزارش کردند که تأییدکننده‌ی اختلاف هدررفت خاک از کرت و فرسایش واقعی رخ داده در آن است.

در مجموع استنباط می‌شود که اثرهای زمان بارندگی بر نسبت تحویل رسوب (ورهیجن و همکاران، ۲۰۰۹) عامل اصلی ایجادشدن تغییر آن حتا در مقیاس‌های مختلف مکانی و در نوع‌های مختلف فرسایش است، زیرا با تغییر کردن مقیاس از کرت به دامنه و آبخیز، زمان لازم برای انتقال رسوب به خروجی یا نقطه‌ی اندازه‌گیری بیش‌تر می‌شود. از طرف دیگر تغییر عامل‌ها و فرآیندهای غالب فرسایش از بین‌شیاری و نامتمرکز به شیاری و آبراهی نیز مستلزم داشتن زمان کافی است. در شرایط این پژوهش به دلیل زمان اجرای تیمارها در شرایط کرت‌های آزمایشگاهی با اندازه‌های بررسی‌شده، ۱۲ دقیقه برای جداشدن و حمل اولیه‌ی ذره‌ها کافی بود، اما روان‌آب تولیدشده برای انتقال ذره‌های فرسوده‌شده کافی نبود.

اگرچه اندازه‌ی کرت‌های آزمایشگاهی فرسایش و رسوب کوچک است، اما حتا در این اندازه‌ی کوچک نیز همواره بخش کمی از فرسایش در کرت بازتوزیع می‌شود (کانینگهام، ۲۰۰۸)،

- Agassi M, Bradford JM. 1999. Methodologies for interrill soil erosion studies. *Soil & Tillage Research*. 49: 277–287.
- Arsham A, Akhund Ali AM, Behnia A. 2009. Effect of soil Antecedent Moisture Contents on runoff and Sedimentation Values with Simulated Rainfall Method. *Iranian Journal of Rangeland and Desert Research*. 16(4): 445–455. (In Persian).
- Auerswald K, Mutchler CK, McGregor KC. 1994. The Influence of Tillage-Induced Differences in Surface Moisture Content on Soil Erosion. *Soil & Tillage Research*. 32: 41–50.
- Castillo VM, Gomez-Plaza A, Martinez-Mena M. 2003. The role of antecedent soil water content in the runoff response of semiarid catchments: A Simulation Approach. *Journal of Hydrology*. 284: 114–130.
- Chaplot V, Poesen J. 2012. Sediment, soil organic carbon and runoff delivery at various spatial scales. *Catena*. 88(1): 46–56.
- Cunningham LM. 2008. Sediment transport & vegetation change: A study using medium-scale landscape units as indicators of the influence of a vegetation transition on sediment production. Ph.D. Dissertation, University of Leicester. 175 p.
- Darboux F, Davy Ph, Gascuel-Oudou C, Huang C. 2001. Evolution of soil surface roughness and flowpath connectivity in overland flow experiments. *Catena*. 46: 125–139.
- De Vente J, Poesen J, Arabkhedri M, Verstraeten G. 2007. The sediment delivery problem revisited. *Progress in Physical Geography*. 31(2): 155–178.
- Defersha MB, Quraishi S, Mellese AM. 2011. The effect of slope steepness and antecedent moisture content on interrill erosion, runoff and sediment size distribution in the highlands of Ethiopia. *Hydrology and Earth System Sciences*. 15: 2367–2375.
- Dietrich WB, Dunne T. 1978. Sediment budget for a small catchment in mountainous terrain. *Zeitschrift fur Geomorphologie*. 29: 191–206.
- Frings RM, Ten Brinke WB. 2018. Ten reasons to set up sediment budgets for river management. *International Journal of River Basin Management*. 16(1): 35–40.
- Gellis, AC, Walling DE. 2011. Sediment source fingerprinting (tracing) and sediment budgets as tools in targeting river and watershed restoration programs. *Stream restoration in dynamic fluvial systems: Scientific Approaches, Analyses, and Tools*. 194: 263–291.
- Ghahramani A, Ishikawa Y, Gomi T, Miyata Sh. 2011. Downslope Soil Detachment-Transport on Steep Slopes via Rain Splash. *Hydrological Processes*. 25(15): 2471–2480.
- Grimaldi S, Angeluccetti I, Coviello V, Vezza P. 2015. Cost-effectiveness of soil and water conservation measures on the catchment sediment budget—the Laaba watershed case study, Burkina Faso. *Land Degradation & Development*. 26(7): 737–747.
- Haan CT, Barfield BJ, Hayes JC. 1994. Design hydrology and sedimentology for small catchments. Academic Press, INC, USA.
- Hawke RM, Price AG, Bryan RB. 2006. The effect of initial soil water content and rainfall intensity on near-surface soil hydrologic conductivity: A laboratory investigation. *Catena*. 65(3): 237–246.
- Johnson DL, Lewis LA. 1995. *Land Degradation: Creation and Destruction*. Blackwell: Oxford.
- Keesstra SD, Bruijnzeel LA, Van Huissteden

- J. 2009. Meso-scale catchment sediment budgets: combining field surveys and modeling in the Dragonja catchment, southwest Slovenia. *Earth Surface Processes and Landforms*. 34(11): 1547-1561.
- Khaledi Darvishan A, Homayounfar V, Sadeghi SHR. 2016. The impact of standard preparation practice on the runoff and soil erosion rates under laboratory conditions. *Solid Earth*. 7(5): 1293-1302.
- Khaledi Darvishan A, Sadeghi SH, Homae M, Arabkhedri M. 2012. Potential use of synthetic color-contrast aggregates and a digital image processing technique in soil splash measurements. *Erosion and Sediment Yields in the Changing Environment*. IAHS Publication. 356: 364-368.
- Khaledi Darvishan A, Sadeghi SH, Homae M, Arabkhedri M. 2014. Measuring sheet erosion using synthetic color-contrast aggregates. *Hydrological Processes*. 28(15): 4463-4471.
- Kinnell PIA. 2005. Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: A review. *Hydrological Processes*. 19: 2815-2844.
- Kondolf GM, Schmitt RJ, Carling P, Darby S, Arias M, Bizzi S, Castelletti A, Cochrane TA, Gibson S, Kumm M, Oeurng C. 2018. Changing sediment budget of the Mekong: Cumulative threats and management strategies for a large river basin. *Science of the Total Environment*. 625: 114-134.
- Kukul SS, Sarkar M. 2010. Splash erosion and infiltration in relation to mulching and polyvinyl alcohol application in semi-arid tropics. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 56(6): 697-705.
- KukulSS, Srakar 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 Sciences*. 59(1): 87-93.
- Luk SH, Hamilton H. 1986. Experimental effects of antecedent moisture and soil strength on rainwash erosion of two luvisols, ontario. *Geoderma*. 37: 29-43.
- Luk SH. 1985. Effect of Antecedent Soil Moisture Content on Rainwash Erosion. *Catena*. 12: 129-139.
- Meade RH, Trimble SW. 1974. Changes in sediment loads of rivers in the Atlantic drainage of the United States since 1900. *Effects of Man on the Interface of the Hydrological Cycle with the Physical Environment*; IAHS Publication. 113: 99-104.
- Mertens G, Elsen L. 2006. Use of computer assisted image analysis for the determination of the grain-size distribution of sands used in mortars. *Cement and Concrete Research*. 36: 1453-1459.
- Minella JP, Walling DE, Merten GH. 2014. Establishing a sediment budget for a small agricultural catchment in southern Brazil, to support the development of effective sediment management strategies. *Journal of Hydrology*. 519(Part B): 2189-2201.
- Mutchler C, Larson C. 1971. Splash Amounts from Waterdrop Impact on a Smooth Surface. *Water Resources Research*. 7: 195-200.
- Parsons AJ, Stone PM. 2006. Effects of intra-storm variations in rainfall intensity on interrill runoff and erosion. *Catena*. 67(1): 68-78.
- Parsons AJ, Wainwright J, Powell DM, Kaduk J, Brazier RE. 2004. A Conceptual model for determining soil erosion by water. *Earth Surface Processes and Landforms*. 29(10): 1293-1302.
- Peeters I. 2007. Spatial modelling of sediment redistribution patterns on a millennial time scale. Ph.D. Dissertation, Katholieke Uni-

- versiteit Leuven, 236 p.
- Phillips JD. 1991. Fluvial sediment budgets in the North Carolina Piedmont. *Geomorphology*. 4: 231–241.
- Porto P, Walling DE, La Spada C, Callegari G. 2016. Validating the use of 137 Cs measurements to derive the slope component of the sediment budget of a small rangeland catchment in southern Italy. *Land Degradation & Development*. 27(3): 798–810.
- Rainato R, Mao L, García-Rama A, Picco L, Cesca M, Vianello A, Preciso E, Scussel GR, Lenzi MA. 2017. Three decades of monitoring in the Rio Cordon instrumented basin: Sediment budget and temporal trend of sediment yield. *Geomorphology*. 291: 45–56.
- Rapp A. 1960. Recent development of mountain slopes in Karkevagge and surroundings, northern Scandinavia. *Geografiska Annaler*. 42(2–3): 65–200.
- Sedighi F, Khaledi Darvishan A, Zare MR. 2021. Effect of watershed geomorphological characteristics on sediment redistribution. *Geomorphology*. 375: 107–559.
- Shi ZH, Fang NF, Wu FZ, Wang L, Yue BJ, Wu GL. 2012. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes. *Journal of Hydrology*. 454-455: 123–130.
- Slaymaker O. 2003. The sediment budget as conceptual framework and management tool. *Hydrobiologia*. 494: 71–82.
- Smetanová A, Verstraeten G, Notebaert B, Dotterweich M, Létal A. 2017. Landform transformation and long-term sediment budget for a Chernozem-dominated lowland agricultural catchment. *Catena*. 157: 24–34.
- Tramblay Y, Bouvier C, Martin C, Didon-Lescot JF, Todorovik D, Domergue JM. 2010. Assessment of initial soil moisture conditions for event-based rainfall–runoff modeling. *Journal of Hydrology*. 387: 176–187.
- Trimble SW. 1983. A sediment budget for Coon Creek basin in the Driftless Area, Wisconsin, 1853–1977. *American Journal of Science*. 283: 454–474.
- Ventura E, Nearing MA, Amore E, Norton LD. 2002. The study of detachment and deposition on a hillslope using a magnetic tracer. *Catena*. 48(3): 149–161.
- Verheijen FGA, Jones RJA, Rickson RJ, Smith CJ. 2009. Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. *Earth-Science Reviews*. 94(1–4): 23–38.
- Wainwright J, Parsons AJ, Michaelides K, Powell DM, Brazier R. 2003. Linking short- and long-term soil erosion modelling. Lang A, Henrich K, Dikau R. (Eds.), *Long term hillslope and fluvial system modelling*. Lecture Notes in Earth Sciences. 101: 37–51.
- Walling DE, Collins AL, Sickingabula HM, Leeks GJL. 2001. Integrated assessment of catchment suspended sediment budgets: A zambian example. *Land Degradation & Development*. 12(5): 387–415.
- Walling DE, Collins AL. 2008. The catchment sediment budget as a management tool. *Environmental Science and Policy*. 11(2): 136–143.
- Walling DE, Collins AL. 2008. The catchment sediment budget as a management tool. *Environmental Science & Policy*. 11(2): 136–143.
- Walling DE. 1983. The sediment delivery problem. *Journal of Hydrology*. 65: 209–237.
- Walling DE. 1999. Linking land use, erosion and sediment yields in river basins. *Hydrobiologia*. 410: 223–240.
- Walling DE. 2006. Tracing versus monitoring: New challenges and opportunities in erosion and sediment delivery research. In: Owens PN, Collins AJ, Editors. *Soil Erosion and Sediment Redistribution in River Catchments*. CABI, Wallingford. pp. 13–27.



Watershed Management Research

VOL. 34, No. 2, Ser. No: 131, Summer 2021, pp.15 -31

DOI: 10.22092/wmej.2020.123819.1164

Research Paper

Sediment Budgeting in Laboratory Plots under Rainfall Simulation

Abdulvahed Khaledi Darvishan

(Corresponding Author)* Associate Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran, Iran

Seyed Hamid Reza Sadeghi

Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran, Iran

Mehdi Homaei

Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Mahmood Arabkhedri

Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Corresponding Author Email: a.khaledi@modares.ac.ir

Received: 21 October 2018 Accepted: 20 September 2020

Abstract

Sediment production at each stage of erosion and its redistribution vary at different scales in a watershed, a slope and even a plot. The preparation of sediment budgets on watershed and slope scales have been considered in the two preceding decades, and a review of this tool on a plot scale can also help to better understand the process of sediment production, redistribution and delivery. The present study was conducted to budget sediments in laboratory plots with sandy-loamy soil and under rainfall simulation with the intensities of 30, 50, 70 and 90 mm h⁻¹. Sediment tracing was performed on the surface of the plots by measuring the changes in the density of synthetic color-contrast aggregates using image processing. The results indicated the ability of this method to prepare sediment budgets on a plot scale. The contribution of interrill erosion in sediment production was increased with an increase in the rainfall intensity; however, the proportion of sediment redistribution within the plot was decreased. The average sediment delivery ratios for the rainfall intensities of 30, 50, 70 and 90 mm h⁻¹ were 7.30, 8.54, 11.74 and 15.64%, respectively. The insignificance of this ratio on a plot scale was emphasized due to the short period of the experiment and should be considered in laboratory research projects.

■ **Keywords:** Interrill erosion, sediment budget, sediment delivery ratio, splash erosion, synthetic color-contrast aggregates ■