



مرکز تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی و منابع طبیعی فارس

# پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مژده با هم  
کشاورزی  
جهد

## صحت‌سنجی استفاده از خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز برای برآورد فرسایش پاشمانی و سطحی

رضا زارعی<sup>۱</sup>، مصطفی آدمی<sup>۲</sup>، عبدالواحد خالدی درویشان<sup>۳\*</sup>

- ۱ - دانشجوی دکتری آبخیزداری، گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران
- ۲ - دانشجوی دکتری آبخیزداری، گروه احیا مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
- ۳ - دانشیار گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

### چکیده مبسوط

#### مقدمه و هدف

فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی، منابع طبیعی و کشاورزی در جهان به‌شمار می‌رود. پاشمان خاک اولین مرحله بعد از برخورد قطرات باران بر سطح خاک است که موجب نابودی خاکدانه‌ها، جدا شدن ذرات خاک و سرانجام باعث فرسایش پاشمانی می‌شود. پس از این فرآیند کاهش نفوذپذیری خاک، افزایش رواناب و در نتیجه فرسایش سطحی رخ خواهد داد. بنابراین، برآورد صحیح فرسایش پاشمانی و سطحی برای موفقیت اقدام‌های حفاظت خاک و مهار فرسایش و کاهش بحران‌های طبیعی ضروری است. در این راستا، روش‌های جدیدی با استفاده از عکس‌برداری و فنون پردازش تصویر برای برآورد فرسایش پاشمانی و سطحی ابداع شده است. هدف از این پژوهش صحت‌سنجی استفاده از خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز برای برآورد فرسایش پاشمانی و سطحی بود.

#### مواد و روش‌ها

ابتدا خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز با استفاده از ذرات پوکة معدنی و رنگ بتن زرد تهیه شد. سپس، خاک با بافت سیلتی-رسی-لومی از کناره‌های جاده مرزن‌آباد-کندلوس برداشت شد و خاکدانه‌های طبیعی و رنگی دست‌ساز با قطرهای ۱/۷۷، ۲/۸۹ و ۴/۰۵ میلی‌متر تفکیک شد. سپس، فرسایش سطحی در کرت‌های ۲۰×۴۰ سانتی‌متری اندازه‌گیری شد. همچنین، فرسایش پاشمانی با روش فنجان پاشمان در شدت بارندگی ۶۰ میلی‌متر در ساعت با دوام ۱۰ دقیقه و در سه تکرار اندازه‌گیری شد.

#### نوع مقاله: پژوهشی

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: a.khaledi@modares.ac.ir

استناد: زارعی، ر، آدمی، م، خالدی درویشان، ع. ۱۴۰۳. صحت‌سنجی استفاده از خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز برای برآورد فرسایش پاشمانی و سطحی. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۷ (۴): ۱۳۴-۱۱۹.

شناسه دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2024.364785.1573

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۳، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۲۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۸، تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۳، دوره ۳۷، شماره ۴، شماره پیاپی ۱۴۵، زمستان ۱۴۰۳، صفحه‌های ۱۱۹ تا ۱۳۴.

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



## نتایج و بحث

نتایج نشان داد که برای قطرهای ۱/۷۷، ۲/۸۹ و ۴/۰۵ میلی‌متر خاکدانه، میانگین پاشمان خالص به ترتیب ۷۳/۷۲، ۳۸/۷۳ و ۲۰/۶۸ گرم بر مترمربع بود و میانگین پاشمان کل نیز به ترتیب ۱۹۲/۶۱، ۷۳/۹۷ و ۴۴/۴۶ گرم بر مترمربع بود. این نتایج نشان داد با افزایش قطر خاکدانه‌ها میانگین پاشمان خالص و پاشمان کل کاهش یافت. افزون‌بر این، ضریب‌های تبیین روابط خطی برآورد پاشمان خالص، پاشمان کل و فرسایش سطحی با استفاده از روش خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز به ترتیب ۸۲، ۷۰ و ۸۲٪ بود که بیانگر کارایی قابل قبول این روش است. همچنین، برای قطرهای ۱/۷۷، ۲/۸۹ و ۴/۰۵ میلی‌متر خاکدانه میانگین هدررفت خاک به ترتیب ۹۴/۶۹، ۸۳/۲۲ و ۴۲/۲۰ گرم بر مترمربع بود. به بیان دیگر، فرسایش سطحی با افزایش قطر خاکدانه‌های سطح خاک کاهش یافت.

## نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بر اساس نتایج این پژوهش می‌توان گفت با استفاده از خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز در زمان کوتاه‌تر می‌توان فرسایش پاشمانی و فرسایش سطحی را با دقت قابل قبول در مقیاس کرت برآورد کرد. از آنجایی که در این روش نمونه‌برداری از رواناب و رسوب کرت لازم نبود، هزینه انجام پژوهش‌های فرسایش و رسوب نیز کاهش یافت. همچنین، روش خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز موجب دست‌خوردگی سطح خاک نشد و از نظر محیط زیستی نیز مشکلی ایجاد نکرد. از این رو، پیشنهاد می‌شود که برای برآورد غیرمستقیم فرسایش پاشمانی و فرسایش سطحی در پژوهش‌های میدانی و آزمایشگاهی از این روش استفاده شود.

واژگان کلیدی: رسوب، رواناب، شبیه‌ساز باران، فرسایش ورقه‌ای، فنجان پاشمان

## مقدمه

ساختمان خاک، بسیار حساس هستند. این خاکدانه‌ها در اثر برخورد قطرات باران با سرعت متوسط، میانگین قطر قطرات ۱/۰۷ میلی‌متر، انرژی جنبشی ۸/۹ ژول بر ثانیه و ضریب یکنواختی ۰/۸۸ (خالدی درویشان و همکاران ۲۰۱۴) و یا مرطوب شدن در اثر فرسایش پاشمانی از هم گسیخته شده و باعث جداسازی ذرات خاک می‌شود و با ادامه بارندگی به دلیل افزایش رطوبت لایه سطحی و ذرات خاک و کاهش چسبندگی، خاکدانه‌ها با سرعت بیشتری نابود و جدا می‌شوند (خالدی درویشان و همکاران ۲۰۱۶، وانگ و همکاران ۲۰۲۳، خالدی درویشان و همکاران ۲۰۲۳). با ادامه بارندگی به دلیل شکستن و جابه‌جایی خاکدانه‌های سطحی و مسدود شدن منافذ به وسیله ذرات ریز خاک، اندوده سطحی تشکیل می‌شود (وی و همکاران ۲۰۰۷، آسولین ۲۰۱۱، زارعی و خالدی درویشان ۲۰۲۰، گراندینی و همکاران ۲۰۲۲). این روند باعث کاهش نفوذ و افزایش سرعت آب در سطح خاک شده و رواناب تشکیل می‌شود و در نتیجه فرسایش سطحی رخ می‌دهد (جیووانینیو همکاران ۲۰۰۱، والتیا و همکاران ۲۰۰۶، کوکال و سرکار ۲۰۱۱، ما و همکاران ۲۰۲۲). در پژوهشی، دویرن‌سایگین و اریپول (۲۰۱۲) روابط میان فرسایش پاشمانی و پایداری سنگ‌دانه‌ها در شرایط آزمایشگاهی را با استفاده از خاک‌های سه کاربری

فرسایش خاک<sup>۱</sup> یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی، منابع طبیعی و کشاورزی در جهان به‌شمار می‌آید که در سال‌های گذشته با افزایش جمعیت و دگرگونی فعالیت‌های انسانی بر این فرآیند افزوده شده است (بایرامین و همکاران ۲۰۰۳، بوریلو و همکاران ۲۰۱۴، بوریلو و همکاران ۲۰۲۱). در این میان مدیریت منابع خاک با مهار و کاهش فرسایش خاک به منظور تولید و بهره‌برداری پایدار ضروری به نظر می‌رسد. در این راستا، شناخت عامل‌های مؤثر و اندازه‌گیری اندازه فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین مراحل مدیریت عرصه‌های منابع طبیعی است (وانگ و همکاران ۲۰۲۲، صادقی و همکاران ۲۰۲۳). یکی از گسترده‌ترین انواع فرسایش، فرسایش آبی است (ژنگ ۲۰۰۵، لیو و همکاران ۲۰۲۲). اولین مرحله در فرسایش آبی، برخورد قطرات باران بر سطح خاک و نابودی خاکدانه‌ها و پاشمان خاک و تشکیل رواناب و شروع فرآیند فرسایش سطحی (ورقه‌ای) خاک است که به‌عنوان رویدادهای اولیه، در فرسایش خاک می‌باشند (خالدی درویشان و همکاران ۲۰۱۲، سان و همکاران ۲۰۲۲). از پیامدهای نامطلوب فرسایش پاشمانی و سطحی می‌توان به کاهش نفوذپذیری و افزایش رواناب اشاره کرد (خالدی درویشان و همکاران ۲۰۲۱). خاکدانه‌های سطح زمین، در مقابل نیروهای ویرانگر

جنگل‌زدایی باعث افزایش پنج برابری فرسایش خاک شد. افزون بر این، در پژوهش نامبرده اثرات جنگل‌زدایی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در خاک‌های سطحی و زیرسطحی بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد انباشت کربن آلی خاک به اندازه ۱۴ میلی‌گرم در هکتار کاهش یافت. در جنوب‌غربی چین، لی و همکاران (۲۰۲۳) توزیع مجدد خاک و فرآیند فرسایش خاک در طول یک نوار اندازه‌گیری شده (ترانکست) در یک آبخیز معمولی کارستی را با استفاده از سزیم-۱۳۷ ارزیابی کردند. در این پژوهش توزیع سزیم-۱۳۷ با تنوع فضایی زیاد در کل نوار اندازه‌گیری شده در آبخیز (انحراف معیار  $0.6/0.4$ ) مشاهده شد و شیب میانی شدیدترین فرسایش را نشان داد (بیشترین نرخ فرسایش  $13/49$  تن در هکتار در سال بود). در این راستا، خالدی‌درویشان و همکاران (۲۰۱۴) فرسایش سطحی را با استفاده از خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز colour اندازه‌گیری کردند. نتایج این پژوهش نشان داد محدوده منتقل شده از کل خاک میان  $90/34$  و  $1360/93$  گرم بر مترمربع بود و فرسایش خالص پاشمان میان  $36/82$  و  $295/78$  اینچ گرم در مترمربع بود. لایبورد و همکاران (۲۰۲۱) تأثیر قطرات باران بر سطح خاک را اندازه‌گیری کردند. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده همبستگی خطی میان پایداری خاک‌دانه و فرسایش پاشمانی با ضریب تبیین  $0/65$  برای هر سه خاک آزمایش شده بود. خالدی‌درویشان و همکاران (۲۰۲۰) سهم‌بندی رسوب در کرت‌های آزمایشگاهی را با استفاده از ردیابی خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز و پردازش تصویر انجام دادند. نتایج این پژوهش بیانگر آن بود که استفاده از این روش برای تهیه نمودارهای سهم رسوب در مقیاس کرت مفید است. با افزایش شدت بارندگی سهم فرسایش بین‌شیاری در تولید رسوب افزایش یافت، و نسبت بازتوزیع رسوب در کرت کاهش یافت. میانگین نسبت تحویل رسوب برای شدت‌های بارندگی ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ میلی‌متر در ساعت به ترتیب  $7/30$ ،  $8/54$ ،  $11/74$  و  $15/64$  به‌دست آمد. همچنین، خالدی‌درویشان و همکاران (۲۰۲۳) استفاده از خاکدانه رنگی دست‌ساز را برای اندازه‌گیری پاشمان ارزیابی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد با افزایش قطر خاکدانه‌های طبیعی و دست‌ساز خاک، اندازه فرسایش کل پاشمان و خالص کاهش یافت. همچنین، با افزایش قطر خاکدانه از  $1/77$  به  $4/50$  میلی‌متر (افزایش بیش از ۲ برابری قطر خاکدانه‌ها) اندازه پاشمان کل و خالص به ترتیب  $6/1$  و  $5/4$  برابر برای خاکدانه‌های طبیعی و دست‌ساز کاهش یافت. در پژوهش‌های نامبرده، استفاده از خاکدانه‌های

گونگون کشاورزی، مرتع و جنگل تعیین و بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که خاکدانه‌های بزرگ‌تر در کاربری جنگل بیش‌تر شکسته شدند و در نتیجه در شرایط بارندگی شدید اندازه فرسایش پاشمانی در این کاربری در مقایسه با خاک‌های کاربری کشاورزی و علفزار با خاکدانه‌های کوچک‌تر، بیش‌تر بود. بلیانی و واعظی (۲۰۱۷) گزارش کردند که بافت خاک، رطوبت پیشین و شدت باران هر کدام به‌طور جداگانه بر اندازه فرسایش پاشمانی تأثیرگذار بودند و بیش‌ترین اندازه فرسایش در خاک سیلتی و کم‌ترین اندازه فرسایش در خاک شنی مشاهده شد. در پژوهشی، خالدی‌درویشان و شریفی‌مقدم (۲۰۱۶) تغییرات پاشمان خاک در قطرهای  $1/75$ ،  $3/55$  و  $5/18$  میلی‌متر خاکدانه در یک خاک لومی-رسی - شنی ارزیابی کردند. نتایج این پژوهش بیانگر آن بود که با افزایش میانگین قطر خاکدانه از  $1/75$  به  $3/55$  میلی‌متر (افزایش دو برابری قطر خاکدانه‌ها)، اندازه پاشمان ذرات خاک  $57/$  کاهش یافت. همچنین، با افزایش میانگین قطر خاکدانه از  $1/75$  به  $5/18$  میلی‌متر (افزایش سه برابری قطر خاکدانه‌ها)، اندازه پاشمان خاک  $84/$  کاهش یافت. برای اندازه‌گیری و برآورد فرسایش پاشمانی و سطحی، روش‌های نوینی ارائه شده است. در این راستا، می‌توان به پژوهش دیوسی و کوینتون (۲۰۱۰) اشاره کرد. این پژوهشگران فرسایش سطحی با اکسیدهای حاکی را با روش سم‌پاشی غیر نفوذی برآورد کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که منبع اصلی رسوبات فرسایش یافته نواحی شیب‌دار بود. در پژوهشی، خالدی‌درویشان و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از خاکدانه رنگی دست‌ساز<sup>۲</sup> و فن پردازش تصویر، فرسایش پاشمانی خاک را اندازه‌گیری کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که می‌توان از روش‌های نامبرده برای اندازه‌گیری پاشمان پایین دست خاک، و برآورد اندازه و شدت آن استفاده کرد. پارسونز و همکاران (۲۰۱۴) برای مطالعه فرسایش خاک از برجسب‌های شناسایی فرکانس رادیویی<sup>۳</sup> (RFID) استفاده کردند. در این پژوهش به‌منظور ایجاد چگالی مشابه ذرات کوارتز، ذرات جایگزین خاک با برجسب‌های RFID و خاک رس سیلیکونی و پودر برنز پوشانده شدند. این برجسب‌ها راه‌کاری جدید برای بررسی حرکت ذرات خاک در طول فرآیندهای فرسایش است. خدادای و همکاران (۲۰۲۳) اثرات تبدیل جنگل‌ها به تاکستان‌های معمول آبخیز دریاچه زیروار ایران، را با استفاده از سزیم-۱۳۷ و سرب-۲۱۰ بررسی کردند. این پژوهشگران بر اساس نرخ خالص فرسایش خاک به‌دست آمده به‌وسیله رویکردهای سزیم-۱۳۷ و سرب-۲۱۰ گزارش کردند که

2- Synthetic Colour-Contrast Aggregates (SCCA)

3 - Radio Frequency Identification

شدت بارندگی ۶۰ میلی‌متر در ساعت با دوام ۱۰ دقیقه بعد از شروع رواناب در کرت‌های ۲۰×۴۰ و بلندی ۱۵ سانتی‌متر و فنجان پاشمان (طرح مورگان ۱۹۷۸) با قطر ۲۵ سانتی‌متر و بلندی ۱۰ سانتی‌متر با کمی تغییر در ابعاد (خالدی‌درویشان و همکاران ۲۰۱۲ و ۲۰۲۳) و با شیب ۳۰٪ (متناسب با شرایط مادری خاک) در سه تکرار انجام شدند. برخی از این آزمایش‌ها قبلاً برای تعیین مدت زمان بهینه شبیه‌سازی بارندگی انجام شدند تا تعدادی از خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز در سطح خاک باقی بمانند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز پس از ۲۰ دقیقه از سطح خاک کاملاً حذف شدند و مشخص شد که پس از آن نمی‌توان تراکم خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز را تعیین کرد. از این رو، مدت زمان بهینه ۱۰ دقیقه در نظر گرفته شد (خالدی‌درویشان و همکاران ۲۰۱۴). نتایج ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مطالعه‌شده در جدول ۱ آورده شده است. موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه‌شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

رنگی دست‌ساز برای اندازه‌گیری و امکان‌سنجی برآورد فرسایش پاشمانی و سطحی خاک، بررسی شده است. از این رو، این پژوهش با هدف صحت‌سنجی استفاده از خاکدانه‌های رنگی در برآورد فرسایش پاشمانی و سطحی خاک انجام شد. در این پژوهش با استفاده از روش نوآورانه خاکدانه‌های رنگی، امکان برآورد دقیق‌تر و تحلیل جامع‌تر از فرسایش پاشمانی و سطحی خاک فراهم شد.

## مواد و روش‌ها

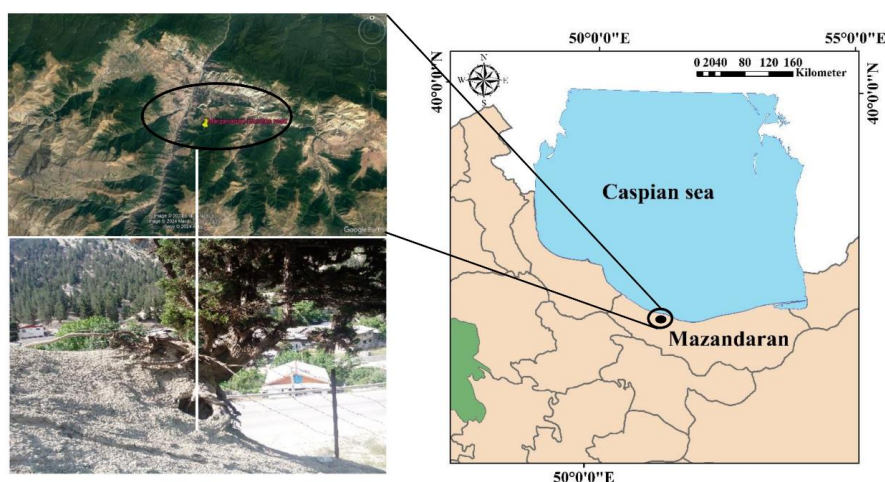
### معرفی منطقه مطالعه‌شده

نمونه‌های خاک سطحی (۲۰-۰ سانتی‌متر) برای انجام این پژوهش از کناره‌های جاده مرزن‌آباد-کندلوس جمع‌آوری شد. بر اساس روش پیشنهادشده به وسیله کوال و سرکار (۲۰۱۰) و مینا و همکاران (۲۰۲۰) نمونه‌های خاک برای انجام آزمایش آماده شدند. سپس، نمونه‌ها به آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و رسوب دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس منتقل شدند. به منظور صحت‌سنجی استفاده از خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز برای برآورد فرسایش پاشمانی و سطحی، آزمایش‌های مربوطه در

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مطالعه‌شده.

Table 1- Physical and chemical characteristics of the studied soil.

Soil texture	Soil particles (%)			Soil structure	Electrical conduction ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	pH	Organic carbon (%)	Specific gravity of the soil ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
	Sand	Silt	Clay					
Silty-clay-loamy	14	46	40	granular	217.9	7.65	0.18	1.25



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعه‌شده در استان مازندران و ایران.

Figure 1- Location of the study area in Mazandaran Province and Iran

به منظور ایجاد بیشترین تشابه میان ویژگی‌های فیزیکی باران شبیه‌سازی‌شده (دانه‌بندی و قطر قطرات) با باران طبیعی، پیش‌بینی‌ها، اندازه‌گیری‌ها و واسنجی‌های لازم در ساختار شبیه‌ساز باران انجام شد (خالدی‌درویشان و همکاران ۲۰۱۶). با آزمایش‌های پرشمار و با استفاده دو

## مشخصات دستگاه شبیه‌ساز باران

شبیه‌ساز باران که در این پژوهش استفاده شد از نوع تحت فشار بود که بلندای ریزش قطرات باران به وسیله آن ۲/۵ متر بود که برای دسترسی نسبی به سرعت حد قطرات مناسب بود (خالدی‌درویشان و همکاران ۲۰۱۶).

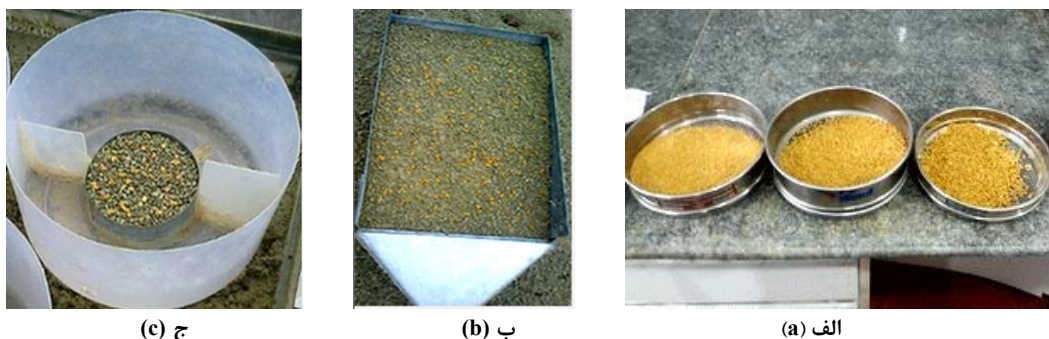


نازل استاندارد شرکت BEX شرایط بارش فراهم شد. همچنین، فشارهای گوناگون از نظر شدت، توزیع یکنواخت، قطر قطره و پوشش زمینی واسنجی شد (خالدی درویشان و همکاران ۲۰۱۶).

**آماده سازی کرت ها و فنجان های پاشمان و اجرای آزمایش**  
از روش پیشنهاد شده به وسیله کوکال و سرکار (۲۰۱۱) برای آماده سازی نمونه های خاک استفاده شد. به این منظور ابتدا نمونه های خاک هوا خشک شد و بقایای گیاهی، سنگ و سنگ ریزه آن جدا شد. سپس، برای جداسازی خاکدانه های طبیعی خاک با قطرهای ۱/۷۷، ۲/۸۹ و ۴/۰۵ میلی متر به ترتیب از الک هایی با شماره مش ۴، ۶، ۸ و ۱۶ (شکل ۲ الف) و با رطوبت حجمی ۳۰٪ استفاده شد (خالدی درویشان و همکاران ۲۰۱۴). در این پژوهش، از سه کرت کوچک مکعبی با ابعاد ۴۰×۲۰ و با بلندی ۱۵ سانتی متر (شکل ۲ ب) و فنجان پاشمان طرح مورگان با کمی تغییر (خالدی درویشان و همکاران ۲۰۱۲) استفاده شد (شکل ۲ ج). برای شبیه سازی بهتر شرایط طبیعی، یک لایه ۱۵ سانتی متری پوکه معدنی در زیر خاک آزمایش ریخته شد (داربوکس و همکاران ۲۰۰۱، دفرشا و همکاران ۲۰۱۱، صادقی و همکاران ۲۰۱۵). سپس، خاک ها با قطرهای جداسازی شده هر کدام تا رسیدن به جرم مخصوص ظاهری نمونه آزمایشی دست نخورده (۱/۲۵ گرم بر سانتی متر مکعب) به آرامی و به شکلی که خاکدانه ها نشکنند، غلطک زده شدند (کاموبرکو و همکاران ۱۹۹۶، خالدی درویشان و همکاران ۲۰۱۴). خالدی درویشان و شریفی (۲۰۱۶). سپس، خاکدانه های رنگی دست ساز از ترکیب ذرات دانه ریز پوکه معدنی سفید با قطرهای یک تا پنج میلی متر به عنوان ذرات پایه همراه با سیمان سفید و پودر بتن زرد رنگ تهیه شده از شرکت آلمانی Lanxess

تهیه شدند. سپس، خاکدانه های رنگی دست ساز به تعداد ۲۰۰ عدد و به شکل یکنواخت در سطح کرت پخش شدند و غلطک به آرامی و به شکلی که خاکدانه ها نشکنند روی سطح خاک کرت حرکت داده شد تا خاکدانه های رنگی دست ساز به شکل یکنواخت در درون خاک و در میان خاکدانه های طبیعی خاک قرار بگیرند (خالدی درویشان و شریفی مقدم ۲۰۱۶). نکته مهم در این روش این بود که خاکدانه های رنگی دست ساز باید در یک میلی متری سطح خاک قرار بگیرند (توری و پوسن ۱۹۹۲).

فرسایش پاشمانی خاک با استفاده از فنجان پاشمان طرح مورگان (مورگان ۱۹۷۸، نانکو ۲۰۰۸) با اندکی تغییر در ابعاد آن اندازه گیری شد (خالدی درویشان و همکاران ۲۰۱۲). سپس، به منظور اندازه گیری و صحت سنجی خاکدانه های رنگی برای برآورد فرسایش پاشمانی در فنجان های پاشمان حاوی خاکدانه های طبیعی با قطرهای مدنظر به تعداد ۳۰ عدد خاکدانه رنگی دست ساز با قطرهای متناسب و هم اندازه با قطر خاکدانه های طبیعی روی سطح خاک اضافه شد (مرتنز و السن ۲۰۰۶). نکته مهم در این روش این است که خاکدانه های رنگی دست ساز باید در یک میلی متری سطح خاک قرار بگیرند و سطح خاک درون فنجان به آرامی غلطک زده شد به شکلی که خاکدانه ها نشکنند (توری و پوسن ۱۹۹۲، خالدی درویشان و شریفی مقدم ۲۰۱۶) تحت شبیه ساز باران در سه تکرار برای هر قطر قرار گرفتند. همچنین، به منظور تأمین شرایط رطوبت پیشین خاک و متناسب با شرایط طبیعی، کرت های آماده شده به مدت ۲۴ ساعت با ژرفای ۱۰ سانتی متر تحت شرایط اشباع بودند و بعد از این مرحله به مدت ۲۴ ساعت در هوای آزاد رها شدند تا رطوبت نزدیک به رطوبت مزرعه شود (کوکال و سرکار ۲۰۱۱).



شکل ۲- جداسازی ذرات خاکدانه رنگی دست ساز به وسیله الک (الف)، خاکدانه های رنگی دست ساز روی سطح کرت (ب) و خاکدانه های رنگی دست ساز در درون ظرف پاشمان (ج).

Figure 2- Separation of synthetic colour-contrast aggregates particles by sieve (a), synthetic colour-contrast aggregates on the surface of the plot (b) and synthetic colour-contrast aggregates inside the splash container (c)

رنگی دست‌ساز با شرایط ثابت و مشابه پیشین، اندازه‌گیری ذرات خاک پاشمان‌یافته در قسمت‌های بالادست و پایین‌دست فنجان جمع‌آوری شد. سپس، نمونه‌ها مشابه روش پیشین اندازه‌گیری شدند (خالدی‌درویشیان و همکاران ۲۰۱۶). سپس داده‌ها در نسخه ۲۰۱۳ نرم‌افزار Excel جمع‌آوری و ثبت شدند و برای تحلیل آماری از نسخه ۲۲ نرم‌افزار SPSS استفاده شد.

### نتایج و بحث

به‌منظور بررسی صحت‌سنجی استفاده از خاکدانه‌های رنگی در برآورد فرسایش سطحی و پاشمانی، اندازه رسوب خروجی و تعداد خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز موجود در رسوب خروجی از کرت، از سطح کرت‌ها و فنجان‌های پاشمان اندازه‌گیری شد. نتایج فرسایش سطحی و پاشمانی برای هر سه قطر (۱/۷۷، ۲/۸۹ و ۴/۰۵) در جدول‌های ۲ و ۳ آورده شده است.

پس از شبیه‌سازی باران به مدت ۱۰ دقیقه و پس از شروع رواناب از کرت‌ها، نمونه‌های رواناب و رسوب با استفاده از روش تخلیه آب (صادقی و همکاران ۲۰۱۵، غلامی و همکاران ۲۰۱۶) اندازه‌گیری شدند. سپس، نمونه‌های رواناب و رسوب به مدت ۲۴ ساعت به حالت سکون رها شدند و پس از تخلیه آب، رسوب ته‌نشین شده با آب مقطر به درون ظرف‌های آلومینیومی با وزن مشخص منتقل شد و به مدت ۲۴ ساعت در کوره با دمای  $105^{\circ}\text{C}$  خشک شدند. با توزین نمونه‌های رسوب و کسر وزن ظروف آلومینیومی، وزن رسوبات در حجم مشخصی از رواناب محاسبه شد (والینگ و همکاران ۲۰۰۱). سرانجام با شمارش چشمی تعداد خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز فرسایش‌یافته (به‌دلیل تعداد کم خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز در فرسایش سطحی و پاشمانی) به نسبت کل آن و وزن رسوب خروجی از کرت صحت‌سنجی برآورد شد. همچنین، برای برآورد و صحت‌سنجی فرسایش پاشمانی با استفاده از خاکدانه‌های

جدول ۲- نتایج فرسایش سطحی با استفاده از خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز.

Table 2- The results of surface erosion using synthetic colour-contrast aggregates method.

Soil aggregate diameter	Replication	Sediment mass (gr)	Number SCCA (before rainfall)	Number SCCA (after rainfall)	SCCA reduction ratio	EA ( $\text{cm}^2$ )	EV ( $\text{cm}^3$ )	EM (gr)	Sediment yield ( $\text{gr}/\text{m}^2$ )
1.77	1	11.63	200	184	0.08	800	80	98	96.92
	2	9.223	200	186	0.07	700	70	85.75	76.86
	3	13.232	200	181	0.95	950	95	116.38	110.29
Average		11.36	200	183.66	0.081	816.66	81.66	100.04	94.69
	S.D.	2.02	0	2.52	0.081	125.83	12.58	15.41	16.83
2.89	1	7.806	200	193	0.035	350	35	42.88	65.05
	2	11.048	200	191	0.045	450	45	55.13	92.07
	3	11.106	200	188	0.06	600	60	73.50	92.55
Average		9.98	200	190.66	0.046	466.66	46.66	57.17	83.22
	S.D.	1.89	0	2.52	0.01	125.83	12.58	15.41	15.74
4.05	1	5.855	200	194	0.03	300	30	36.75	48.79
	2	4.094	200	197	0.015	150	15	18.38	34.12
	3	5.246	200	196	0.02	200	20	24.50	43.72
Average		5.065	200	195.66	0.021	216.66	21.66	26.54	42.2
	S.D.	0.89	0	1.53	0.01	76.38	7.64	9.36	7.45

SCCA: خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز، EA: ناحیه فرسایش‌یافته، EV: حجم فرسایش‌یافته و EM: جرم فرسایش‌یافته

SCCA: Synthetic colour-contrast aggregates, EA: eroded area, EV: eroded volume and EM: eroded mass

جدول ۳ - نتایج فرسایش پاشمانی با استفاده از خاکدانه های رنگی دست ساز.

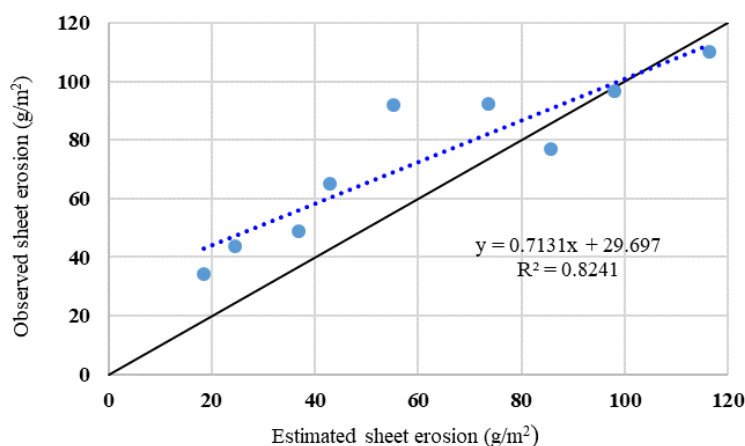
Table 3- The results of splash erosion using synthetic colour-contrast aggregates method

Soil aggregate diameter	Replication	Upstream splash (gr)	Downstream splash (gr)	Total splash (gr/m <sup>2</sup> )	Net splash (gr)	Net splash (gr/m <sup>2</sup> )	SCCA (before rainfall)	Upstream SCCA (after rainfall)	Downstream SCCA (after rainfall)	Total SCCA (after rainfall)	SCCA reduction ratio	EA	EV	EM	Correction coefficient
1.77	1	0.396	1.125	209.81	0.855	108.92	30	1	6	23	0.23	2333.33	233.33	285.83	86.62
	2	0.369	0.866	157.32	0.497	63.31	30	1	5	24	0.20	2000.00	200.00	245.00	74.24
	3	0.635	1.019	210.70	0.384	48.92	30	1	3	26	0.13	1333.33	133.33	163.33	49.49
<b>Average</b>		0.466	1.045	192.61	0.578	73.72	30	1	4.66	24.33	0.18	1888.89	188.89	231.39	70.12
<b>S.D.</b>		0.146	0.194	30.56	0.246	31.32	0	0	2	2	0.05	509.18	50.92	62.37	18.90
2.89	1	0.185	0.323	64.71	0.138	17.58	30	0	3	27	0.10	1000.00	100.00	122.50	37.12
	2	0.077	0.345	53.76	0.268	34.14	30	1	4	25	0.17	1666.67	166.67	204.17	61.87
	3	0.153	0.659	103.44	0.506	64.46	30	1	3	26	0.13	1333.33	133.33	163.33	49.49
<b>Average</b>		0.138	0.442	73.97	0.304	38.73	30	0.66	3.33	26	0.13	1333.33	133.33	163.33	49.49
<b>S.D.</b>		0.055	0.188	26.10	0.187	23.77	0	1	1	1	0.03	333.33	33.33	40.83	12.37
4.05	1	0	0	0	0	0	30	0	0	30	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	30	0	0	30	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	30	0	0	30	0	0	0	0	0
<b>Average</b>		0	0	0	0	0	30	0	0	30	0	0	0	0	0
<b>S.D.</b>		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.05	1	0.093	0.248	43.44	0.155	19.75	30	0	0	30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	0.105	0.301	51.72	0.196	24.97	30	0	0	30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	3	0.082	0.218	38.22	0.134	17.32	30	0	1	29	0.03	333.33	33.33	40.83	12.37
<b>Average</b>		0.093	0.255	44.46	0.162	20.68	30	0	0.33	29.66	0.01	111.11	11.11	13.61	4.12
<b>S.D.</b>		0.012	0.042	6.81	0.031	3.91	0	0	1	1	0.02	192.45	19.25	23.58	7.14

SCCA: خاکدانه های رنگی دست ساز، EA: ناحیه فرسایش یافته، EV: حجم فرسایش یافته و EM: جرم فرسایش یافته

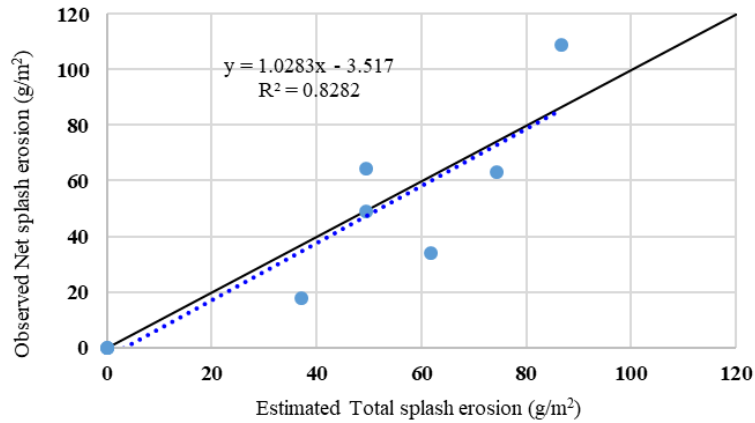
SCCA: Synthetic colour-contrast aggregates, EA: eroded area, EV: eroded volume and EM: eroded mass

نمودارهای رابطه فرسایش پاشمانی و سطحی نشان داده شده است. همچنین، نمودارهای جعبه ای مربوط به فرسایش پاشمانی در شکل ۶ نشان داده شده است. اندازه گیری شده و برآورد شده در شکل های ۳، ۴ و ۵

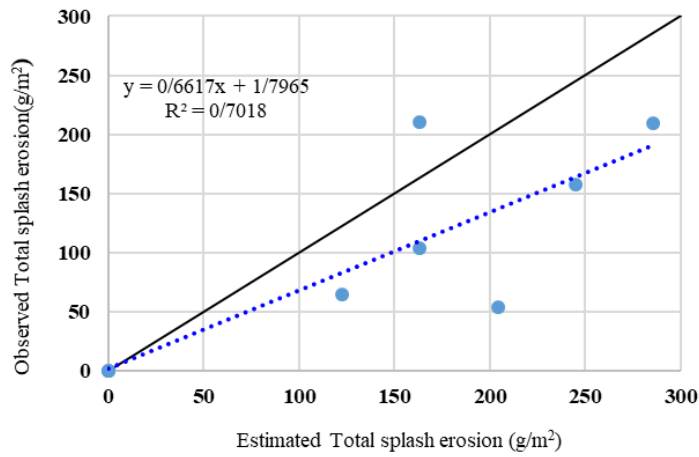


شکل ۳- رابطه میان فرسایش سطحی اندازه گیری شده و برآورد شده از خاکدانه های رنگی دست ساز.

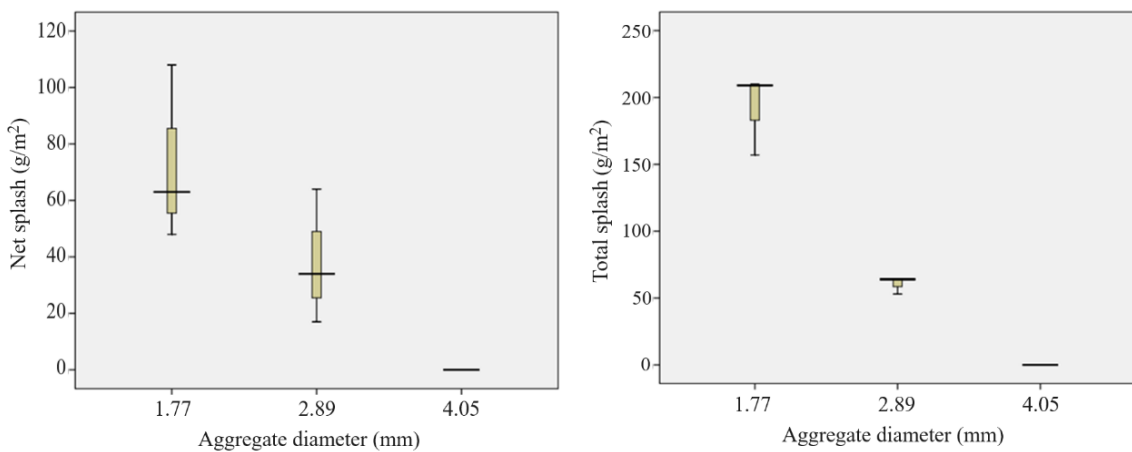
Figure 3- Relationship between observed and estimated surface erosion using synthetic colour-contrast aggregates.



شکل ۴- رابطه میان پاشمان خالص اندازه‌گیری شده و برآوردشده با استفاده از خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز.  
Figure 4- Relationship between observed and estimated net splash using synthetic colour-contrast aggregates.



شکل ۵- رابطه میان پاشمان کل اندازه‌گیری شده و برآوردشده با استفاده از خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز.  
Figure 5- Relationship between observed and estimated total splash using synthetic colour-contrast aggregates.



شکل ۶- نمودارهای جعبه‌ای پاشمان خالص و پاشمان کل در قطرهای گوناگون خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز.  
Figure 6- Boxplots of net and total splash in various synthetic colour-contrast aggregate diameters.



خاکدانه طبیعی خاک، ضریب کاهش خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز بیشتر بود و در قطرهای ۱/۷۷، ۲/۸۹ و ۴/۰۵ میلی‌متر میانگین ضریب کاهش خاکدانه‌های رنگی به ترتیب ۰/۰۸۱، ۰/۰۴۶ و ۰/۰۲۱ به دست آمد (جدول ۳). میانگین تعداد خاکدانه‌های رنگی جابه‌جاشده در پاشمان پایین دست برای قطرهای ۱/۷۷، ۲/۸۹ و ۴/۰۵ میلی‌متر خاکدانه به ترتیب ۴/۶۶، ۳/۳۳ و ۰/۳۳ به دست آمد در حالی که این نسبت برای پاشمان بالادست به ترتیب ۰/۶۶، ۱ و ۰/۳۳ به دست آمد. نتایج نشان داد پاشمان و انتقال خاکدانه‌های رنگی مصنوعی در جهت پایین دست بیش تر از بالادست بود که با نتایج خالدی درویشان و همکاران (۲۰۱۴) و خالدی درویشان و همکاران (۲۰۲۳) نیز هماهنگی دارد.

بر اساس نمودارهای شکل ۴ و ۵ مشخص شد که رابطه میان پاشمان خالص و کل اندازه‌گیری شده (گرم در مترمربع) با فرسایش پاشمان خالص و کل برآورد شده (گرم در مترمربع) به وسیله خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز خطی و با ضریب تبیین به ترتیب ۸۲ و ۷۰٪ است. نتایج نشان داد که با افزایش قطر خاکدانه‌ها، اندازه فرسایش کل و خالص کاهش یافت. همچنین، الگوی پراکنش جعبه پلات‌ها بیانگر آن بود که در قطرهای کم (قطر ۱/۷۷ میلی‌متر) تغییرات فرسایش زیاد بود ولی در قطر ۴/۰۵ میلی‌متر خاکدانه با توجه به شکل جعبه پلات و به دلیل افزایش فیزیکی وزن ذره، جدایش پذیری با افزایش اندازه خاکدانه‌ها کاهش یافت (شکل ۶). نتایج این پژوهش با یافته‌های لگودویس و همکاران (۲۰۰۵) و وندایک و همکاران (۲۰۰۲) که نشان دادند با افزایش قطر خاکدانه، اندازه پاشمان کاهش یافت، هماهنگی دارد. در این راستا، خالدی درویشان و همکاران ۲۰۲۳ گزارش کردند میانگین اندازه پاشمان کل و خالص با افزایش قطر خاکدانه‌های طبیعی خاک و خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز به طور معنی‌داری کاهش یافت و با افزایش قطر از ۱/۷۷ به ۴/۰۵ میلی‌متر (حدود ۲ برابر)، اندازه پاشمان کل و خالص به ترتیب ۶/۱ و ۵/۴ برابر برای خاکدانه‌های طبیعی و دست‌ساز کاهش یافت.

دلیل این موضوع اندازه مقاومت برشی در مقابل برخورد قطرات باران است که در خاکدانه‌های درشت مقاومت برشی بیش تر از خاکدانه‌های ریز است. از این رو، پاشمان با افزایش قطر کاهش یافت (رفاهی ۲۰۰۶، چو و همکاران ۲۰۱۸). همچنین، انرژی قطرات باران پس از برخورد با خاکدانه‌های درشت تر، بیش تر صرف تلاشی کردن خاکدانه و جدا شدن ذرات خاک از هم می‌شود (ساترلند و همکاران ۱۹۹۶).

برای درک بهتر متغیرهای فرسایش سطحی و پاشمانی در واحد سطح، واحد داده‌ها از گرم در سطح کرت و سطح فنجان پاشمان به گرم در مترمربع تبدیل شد. بر اساس نتایج فرسایش سطحی، میانگین وزن رسوب (گرم بر مترمربع) برای قطرهای ۱/۷۷، ۲/۸۹ و ۴/۰۵ میلی‌متر خاکدانه به ترتیب ۹۴/۶۹، ۸۳/۲۲ و ۴۲/۲ گرم بر مترمربع به دست آمد. این نتایج نشان داد که فرسایش سطحی با افزایش قطر خاکدانه‌های سطح خاک کاهش یافت (جدول ۲).

این یافته‌ها با نتایج پژوهش خالدی درویشان و همکاران (۲۰۱۴) هم‌راستا است. همچنین، برای قطرهای ۱/۷۷، ۲/۸۹ و ۴/۰۵ میلی‌متر خاکدانه، میانگین ضریب کاهش خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز در فرسایش سطحی به ترتیب ۰/۰۸۱، ۰/۰۴۶ و ۰/۰۲۱ به دست آمد که متقابلاً کاهش فرسایش سطحی با افزایش قطر خاکدانه‌های سطح خاک را تأیید می‌کند. نتایج بررسی فرسایش سطحی اندازه‌گیری شده و فرسایش سطحی برآورد شده با استفاده از خاکدانه‌های رنگی نشان داد که رابطه میان فرسایش سطحی برآورد شده (گرم در مترمربع) با فرسایش سطحی اندازه‌گیری شده (گرم در مترمربع) خطی با ضریب تبیین ۰/۸۲ بود (شکل ۳). همچنین، بر اساس نتایج به دست آمده، افزایش قطر خاکدانه‌ها موجب کاهش چشم‌گیر حجم رسوبات شد.

در پژوهشی موحدان و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند خاکدانه‌های با قطر بزرگ‌تر به دلیل پیوندها و زنجیره‌های مولکولی طولی‌تر در مقابل فرسایش آبی مقاوم‌تر بودند و حجم رسوبات کم‌تری تولید کردند. نتایج این پژوهش با یافته‌های این پژوهشگران هم‌راستا است.

بر پایه نتایج جدول ۳ میانگین اندازه پاشمان خالص برای قطرهای ۱/۷۷، ۲/۸۹ و ۴/۰۵ میلی‌متر خاکدانه به ترتیب ۷۳/۷۲، ۳۸/۷۳ و ۲۰/۶۸ گرم بر مترمربع بود. همچنین، میانگین پاشمان کل برای قطرهای نامبرده به ترتیب ۱۹۲/۶۱، ۷۳/۹۷ و ۴۴/۴۶ به دست آمد. این نتایج بیانگر کاهش میانگین اندازه پاشمان خالص و پاشمان کل با افزایش قطر خاکدانه‌ها است. این نتایج با پژوهش‌های لگودویس و همکاران (۲۰۰۵) و خالدی درویشان و همکاران (۲۰۲۳) که نشان دادند با افزایش قطر خاکدانه‌ها فرسایش پاشمانی کاهش یافت، مطابقت دارد. دلیل این موضوع آن است که قطرات باران می‌توانند ذرات با قطر کمتر از ۲ میلی‌متر را جدا کنند، در حالی که ذرات درشت تر را نمی‌توانند جدا کنند. از این رو، ذرات با قطر بیش تر از ۲ میلی‌متر سست و مستعد به فرسایش سطحی می‌شوند. افزون بر این، در قطر ۴/۰۵ میلی‌متر

**نتیجه‌گیری و پیشنهادها**

امروزه یکی از مشکلات اساسی در اکثر کشورها بحث فرسایش و رسوب است و از آنجایی که خاک به‌عنوان اصلی‌ترین عامل تولید غذا در جهان شناخته‌شده است، از این رو، برآورد دقیق شدت فرسایش برای موفقیت برنامه‌های حفاظت خاک در راستای دستیابی به توسعه پایدار ضروری است. نتایج این پژوهش بیانگر آن بود که روش اندازه‌گیری فرسایش سطحی و پاشمانی به‌وسیله خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز افزون بر کاهش هزینه‌ها، صحت و دقت قابل قبولی داشتند. از مهم‌ترین نتایج این پژوهش می‌توان به رابطه معکوس میان میانگین اندازه پاشمان خالص و پاشمان کل با قطر خاکدانه رنگی دست‌ساز و رابطه مستقیم میان فرسایش پاشمانی خالص و کل اندازه‌گیری‌شده و برآوردشده در خاکدانه

رنگی دست‌ساز به‌شکل مشابه با خاکدانه‌های طبیعی اشاره کرد. به بیان دیگر می‌توان گفت در هر دو خاکدانه طبیعی و دست‌ساز پاشمان خالص و پاشمان کل با افزایش اندازه خاکدانه‌ها، کاهش یافت. از سوی دیگر، برای استفاده از خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز به دست‌کاری سطح خاک، مانند آنچه در نصب فنجان پاشمان رخ می‌دهد، نیازی نیست و نمونه‌برداری از رواناب و رسوب خروجی کرت برای محاسبه هدررفت خاک از کرت، لازم نیست. از این رو، با توجه به مزیت‌های برشمرده و هزینه بسیار کم روش خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز در مقایسه با دیگر روش‌ها، پیشنهاد می‌شود برای برآورد غیرمستقیم فرسایش پاشمانی و فرسایش سطحی در پژوهش‌های میدانی و آزمایشگاهی از این روش استفاده شود.

## فهرست منابع

- Assouline, S. 2011. Soil Surface Sealing and Crusting. In: Gliński, J., Horabik, J., Lipiec, J. (eds), Encyclopedia of Agrophysics. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht. pp. 786-791. Doi.org/10.1007/978-90-481-3585-1\_156
- Baliani A, Vaezi A. 2017. The susceptibility of different texture soils to splash erosion under different rainfall intensity and antecedent water content. Journal of Water and Soil Conservation. 24(2): 67-85. (In Persian). Doi.org/ 10.22069/jwfs.2017.3676
- Bayramin IO, Baskan D, Parlak M. 2003. Soil erosion risk assessment with ICONA model. Case study: Beypazarı Area. Turkish Journal of Agriculture and Forestry. 27(2): 105-116.
- Borrelli P, Alewell C, Alvarez P, Anache JAA, Baartman J, Ballabio C, Bezak N, Biddoccu M, Cerda A, Chalise D, Chen S, Chen W, Maria De, Girolamo A, DestaGessesse G, Deumlich D, Diodato N, Efthimiou N, Erpul G, Fiener P, Freppaz M, Panagos P. 2021. Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. Science of the Total Environment. 780: 146494. Doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494
- Burylo M, Dutoit T, Rey f. 2014. Species traits as practical tools for ecological restoration of marly eroded lands. Restoration Ecology. 22(5): 633-640. Doi.org/10.1111/rec.12113
- Choo H, Park KH, Won J, Burns SE. 2018. Resistance of coarse-grained particles against raindrop splash and its relation with splash erosion. Soil and Tillage Research .184: 1-10. Doi.org/10.1016/j.still.2018.06.009
- Darboux F, Davy P, Gascuel-Odoux C, Huang C. 2002. Evolution of soil surface roughness and flow path connectivity in overland flow experiments. Catena. 46(2-3):125-139. Doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00162-X
- Deasy C, Quinton JN. 2010. Use of rare earth oxides as tracers to identify sediment source areas for agricultural hillslopes. Solid Earth. 1(1): 111-118. Doi.org/10.5194/se-1-111-2010
- Defersha, MB, Quraishi S, Melesse A. 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(7): 2367-2375. Doi.org/10.5194/hess-15-2367-2011
- Deviren Saygin S, Erpul G. 2012. Interactive assessment of the splash erosion and aggregate breakdown mechanism for the soils of different semi-arid land uses. In EGU General Assembly Conference Abstracts. 786 p.
- Gholami L, Sadeghi SHR, Homae M. 2016: Different effects of sheep manure conditioner on runoff and soil loss components in eroded soil. Catena. 139: 99-104. Doi.org/10.1016/j.catena.2015.12.011
- Giovannini G, Vallejo R, Lucchesi S, Bautista S, Ciompi S, Llovet J. 2001. Effects of land use and eventual fire on soil erodibility in dry mediterranean conditions. Forest Ecology and Management. 147(1): 15-23. Doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00437-0
- Grandinetti L, Cantero-Martínez C, Ramos MC. 2022. Aggregate stability and soil surface sealing in irrigated soils under no-tillage versus conventional tillage. Land Degradation and Development. 33(13): 2379-2389. Doi.org/10.1002/ldr.4316
- Hawke RM, Price AG, Bryan BR. 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. Doi.org/10.1016/j.catena.2005.11.013
- Khaledi darvishan A, Homayonfar V, Sade-

- ghi SHR. 2016. Designing, construction and calibration of a portable rainfall simulator for field runoff and soil erosion studies. *Iranian Journal OF Watershed Management Science and Engineering*. 10(34): 105-112. (In Persian).
- Khaledi Darvishan A, Katebikord A, Gholami L, Filipovic M, Spalevic V. 2023. Evaluation of synthetic-colour-contrast aggregates for soil splash measurement. *Journal of Environmental Protection and Ecology*. 23(8): 3433-3439.
- Khaledi Darvishan A, Sadeghi SHR, Homae M, Arabkhedri M. 2014. Measuring sheet erosion using synthetic colour-contrast aggregates. *Hydrological Processes*. 28(15): 4463-4471. Doi.org/10.1002/hyp.9956
- Khaledi Darvishan A, Sadeghi SHR, Homae M, Arabkhedri M. 2021. Sediment budgeting in laboratory plots under rainfall simulation. *Watershed Management Research Journal*. 34(2): 15-31. (In Persian). Doi.org/10.22092/wmej.2020.123819.1164
- Khaledi Darvishan, A, H. Sadeghi SHR, Homae M, Arab khedri M. 2014. Influence of start time and runoff coefficient on rainfall intensity and previous soil moisture in laboratory plots. *Iranian Water Research*, 8(15): 41-49 (In Persian).
- Khaledi Darvishan A, Sadeghi SHR, Homae M, Arankhedri M. 2012. Potential use of synthetic colour-contrast aggregates and a digital image processing technique in soil splash measurements. *IAHS Publication*. 356: 364-368.
- Khaledi Darvishan A, Sharifi Moghadam E. 2016. Effects of aggregate diameter on soil splash under laboratorial conditions. *jwmseir*. 10(32): 33-38 (In Persian).
- Khodadadi M, Alewell C, Mirzaei M, Ehssan-Malahat E, Asadzadeh F, Strauss P, Meusbürger K. 2023. Understanding deforestation impacts on soil erosion rates using <sup>137</sup>Cs, <sup>239+240</sup>Pu, and <sup>210</sup>Pbex and soil physicochemical properties in western Iran. *Journal of Environmental Radioactivity*. 257: 107078. Doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.107078
- 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. Doi.org/10.1080/03650340903208871
- Kukul SS, Sarkar M. 2011. Laboratory simulation studies on splash erosion and crusting in relation to surface roughness and raindrop size. *Journal of the Indian Society of Soil Science*. 59(1): 87-93.
- Laburda T, Krása J, Zúmr D, Devátý J, Vrána M, Zambon N, Doštal T. 2021. SfM-MVS Photogrammetry for splash erosion monitoring under natural rainfall. *Earth Surface Processes and Landforms*. 46(5): 1067-1082. Doi.org/10.1002/esp.5087
- Leguédois S, Planchon O, Legout C, Le Bissonnais Y. 2005. Splash projection distance for aggregated soils. *Soil Science Society of America Journal*. 69(1): 30-37. Doi.org/10.2136/sssaj2005.0030
- Li H, Guan Q, Sun Y, Wang Q, Liang L, Ma Y, Du Q. 2022. Spatiotemporal analysis of the quantitative attribution of soil water erosion in the upper reaches of the Yellow River Basin based on the RUSLE-TLSD model. *Catena*. 212: 106081. Doi.org/10.1016/j.catena.2022.106081
- Li Y, Li K, Cai L, Zhu D, Liu Z, Wei X. 2023. Assessment of soil redistribution in a typical karst catchment using <sup>137</sup>Cs. *Journal of Environmental Radioactivity*. 257: 107087. Doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.107087
- Liu J, Hu F, Xu C, Du W, Yu Z, Zhao S, Zheng F. 2022. Specific ion effects on soil aggregate stability and rainfall splash erosion. *International Soil and Water Conservation Research*. 10(4): 557-564. Doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.02.001
- Ma G, Li G, Mu X, Hou W, Ren Y, Yang

- M. 2022. Effect of raindrop splashes on topsoil structure and infiltration characteristics. *Catena*. 212: 106040. Doi.org/10.1016/j.catena.2022.106040
- Meena RS, Lal R, Yadav GS. 2020. Long-term impacts of topsoil depth and amendments on soil physical and hydrological properties of an Alfisol in central Ohio, USA. *Geoderma*. 363: 114164. Doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114164
- Mertens G, Elsen J. 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(8): 1453-1459. Doi.org/10.1016/j.cem-conres.2006.03.004
- Morgan RPC. 1978. Field studies of rains plash erosion. *Earth Surface Processes*. 3(3):295-299. Doi.org/10.1002/esp.3290030308
- Movahedan M, Abbasi N, Keramati M. 2013. Effect of polyvinyl acetate polymer on stability of dry aggregates. *Iranian Journal of Soil Research*. 27(1): 71-83. (In Persian). Doi.org/10.22092/ijsr.2013.126225
- Nanko K, Mizugaki S, Onda Y. 2008. Estimation of soil splash detachment rates on the forest floor of an unmanaged Japanese cypress plantation based on field measurements of throughfall drop sizes and velocities. *Catena*. 72(3): 348-361. Doi.org/10.1016/j.catena.2007.07.002
- Parsons AJ, Onda Y, Noguchi T, Patin J, Cooper J, Wainwright J, Sakai N. 2014. The use of RFID in soil-erosion research. *Earth Surface Processes and Landforms*. 39(12): 1693-1696. Doi.org/10.1002/esp.3628
- Refahi H. 2015. Water erosion and its control. Fifth Edition. Tehran University Press. 671 p. (In Persian).
- Roy P, Pal SC, Chakraborty R, Saha A, Chowdhuri I. 2023. A systematic review on climate change and geo-environmental factors induced land degradation: Processes, policy-practice gap and its management strategies. *Geological Journal*. 58(9): 3487-3514. Doi.org/10.1002/gj.4649
- Sadeghi SHR, Gholami L, Sharifi Moghadam E, Khaledi Darvishan A. 2015. Scale effect on runoff and soil loss control using rice straw mulch under laboratory conditions. *Solid Earth*. 6(1): 1-8. Doi.org/10.5194/se-6-1-2015
- Sadeghi SHR, Kalehhouei M, Noori A, Naderi Marangeli N, Havasi M, Payfeshoordeh A, Khairparast M, Mostafaei Younjali S, Pirooznia Z, Hamzeh Bibalani M. 2023. Spatial soil erosion risk at the Brimvand watershed in kermanshah province, Iran. *Water and Soil*. 37(3): 443-456. (In Persian). Doi.org/10.22067/jsw.2023.80775.1247
- Sadeghi SHR, Sharifi Moghadam E, Khaledi Darvishan A. 2016. Effects of subsequent rainfall events on runoff and soil erosion components from small plots treated by vinnasse. *Catena*. 138: 1-12. Doi.org/10.1016/j.catena.2015.11.007
- Sun X, Miao L, Wang H, Chen R, Wu L. 2022. Bio-cementation for the mitigation of surface erosion in loess slopes based on simulation experiment. *Journal of Soils and Sediments*. 22(6): 1804-1818. Doi.org/10.1007/s11368-022-03190-3
- Sutherland RA, Wan Y, Ziegler AD, Lee CT, El-Swaify V. 1996. Splash and wash dynamics: an experimental investigation using an Oxisol. *Geoderma*. 69(1-2): 85-103. Doi.org/10.1016/0016-7061(95)00053-4
- Torri D, Poesen J. 1992. The effect of soil surface slope on raindrop detachment. *Catena* 19(6): 561-578. Doi.org/10.1016/0341-8162(92)90053-E
- Valette G, Prévost S, Lucas L, Léonard J. 2006. SoDA Project: A simulation of soil surface degradation by rainfall. *Computers and Graphics*. 30(4): 494-506. Doi.org/10.1016/j.cag.2006.03.016
- Walling DE, Collins AL, Sichinabula HA, Leeks GJL. 2001. Integrated assessment of catchment suspended sediment budgets, a Zambian example. *Land and Degradation Development*

- opment. 12(5): 387-415. Doi.org/10.1002/ldr.461
- Wang X, Qin X, Tan J, Yang L, Ou L, Duan X, Deng Y. 2023. Effect of the moisture content and dry density on the shear strength parameters of collapsing wall in hilly granite areas of South China. *International Soil and Water Conservation Research*. Doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.09.006
- Wang, X. 2022. Managing land carrying capacity: Key to achieving sustainable production systems for food security. *Land*. 11(4): 484. Doi.org/10.3390/land11040484
- Wei L, Zhang B, Wang M. 2007. Effects of antecedent soil moisture on runoff and soil erosion in alley cropping systems. *Agricultural Water Management*. 94(1): 54-62. Doi.org/10.1016/j.agwat.2007.08.007
- Zarei R, Khaledi Darvishan A. 2020. The role of surface sealing caused by subsequent rainfall in the runoff components at the Kojour watershed Mazandaran. *Watershed Management Research Journal*. 33(4): 77-93. (In Persian). Doi.org/10.22092/wmej.2020.123725.1161
- Zheng FL. 2005. Effects of accelerated soil erosion on soil nutrient loss after deforestation on the loess plateau. *Pedosphere*. 15(6): 707-715.





## Validation of the Use of Synthetic Colour-Contrast Aggregates for Estimating Splash and Surface Erosion

Reza Zarei <sup>1</sup>, Mostafa Adami <sup>2</sup>, Abdulvahed Khaledi Darvishan <sup>3\*</sup>

1- Ph.D. Student, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

2- Ph.D. Student, Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

3- Associate Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

### Extended Abstract

#### Introduction and Goal

Soil erosion is one of the most important environmental, natural resource and agricultural issues in the world. Soil splash is the initial stage following the impact of raindrops on the soil surface, leading to the breakdown of the soil aggregates and the detachment of soil particles, ultimately causing splash erosion. This process is followed by a decrease in soil permeability, an increase in runoff, and consequently, surface erosion. Therefore, the accurate estimation of splash and surface erosion is necessary for the success of soil conservation erosion control and reduction of natural hazards. In this regard, innovative methods have been developed that utilize photography and image processing techniques to estimate splash and surface erosion. The aim of this research was to validate the splash and surface erosion estimates using synthetic colour-contrast aggregates.

#### Materials and Methods

Synthetic colour-contrast aggregates were initially prepared using mineral pumice particles and yellow concrete colour. Then, soil with a silty-clay-loamy texture was sampled from the

**Article Type:** Research Article

**\*Corresponding Author E-mail:** a.khaledi@modares.ac.ir

**Citation:** Zarei, R., Adami, M., Khaledi Darvishan, A. 2024. Validation of the Use of Synthetic Colour-Contrast Aggregates for Estimating Splash and Surface Erosion. *Watershed Management Research*. 37(4): 119-134.

**DOI:** 10.22092/WMRJ.2024.364785.1573

**Received:** 23 January 2024, **Received in revised form:** 13 February 2024, **Accepted:** 18 March 2024

**Published online:** 01 January 2025

*Watershed Management Research*, VOL. 37, No.4, Ser. No:145, Winter 2025, pp. 119-134.

**Publisher:** Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center © Author(s)



Marzanabad-Kandalus road bank, and natural and synthetic colour-contrast aggregates with diameters of 1.77, 2.89 and 4.05 mm were separated. Surface erosion was then measured in 20×40 cm plots. Additionally, splash erosion was measured using the splash cup method under a rainfall intensity of 60 mm hr<sup>-1</sup> lasting 10 min in three repetitions.

### **Results and Discussion**

The results showed that the average rates of net splash for different soil aggregate diameters of 1.77, 2.89 and 4.05 mm, were 73.72, 38.73 and 20.68 g m<sup>-2</sup>, respectively, and also the average rates of total splash were 192.61, 73.97, and 44.46 g m<sup>-2</sup>, respectively. These results indicate a decrease in the average amount of net and total splash with increasing in the soil aggregate diameter. The results showed that synthetic colour-contrast aggregates demonstrate an acceptable efficiency in measuring net splash, total splash and surface erosion with coefficients of determination of 82, 70 and 82%, respectively. The results also showed that the average soil loss for different soil aggregate diameters of 1.77, 2.89, and 4.05 mm, was 94.69, 83.22, and 42.20 g m<sup>-2</sup>, respectively. in other words, surface erosion decreased with an increase in the diameter of soil aggregates on the soil surface.

### **Conclusion and Suggestions**

The results of this study indicate that using synthetic colour-contrast aggregates allows for a quicker and reasonably accurate estimation of splash and surface erosion at the plot scale. As this method does not require sampling runoff and sediment from the plot, it reduces the cost of erosion and sediment research. Additionally, the synthetic colour-contrast aggregates do not disturb the soil surface and are environmentally friendly. Therefore, it is recommended to use this method for indirect estimation of splash and surface erosion in field and laboratory studies.

**Keywords:** Rainfall simulator, runoff, sediment, splash cup, surface erosion