



دانشگاه گوارن و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و پنجم، شماره دوم، ۱۳۹۷

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2018.12419.2705

## ارزیابی حساسیت اندازه‌های خاکدانه به فرسایش بین‌شیری بر اساس شاخص‌های پایداری خاکدانه

\*علی‌رضا واعظی<sup>۱</sup>، سعید رحمتی<sup>۲</sup> و حسین بیات<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه زنجان، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشگاه زنجان

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۰/۶؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۳/۱

### چکیده

**سابقه و هدف:** پایداری خاکدانه یک شاخص فیزیکی مهم برای بیان حساسیت خاک‌ها به فرسایش می‌باشد. بسته به اندازه خاکدانه، پایداری خاکدانه می‌تواند دچار تغییر شود. برخی روش‌ها شامل الک خشک، الک تر و رهاسازی قطره‌ی آب، به‌طور رایج برای ارزیابی پایداری خاکدانه‌ها در سراسر دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرند. شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در هر دو روش الک خشک و الک تر مورد استفاده قرار می‌گیرد و در روش آزمون قطره آب، تعداد قطره مورد نیاز برای تخریب خاکدانه تعیین می‌شود. این شاخص‌ها تنها برای ارزیابی پایداری خاکدانه در نمونه‌های خاکدانه با اندازه یکسان انجام می‌شود. بنابراین استفاده از این شاخص‌ها در نمونه‌های خاکدانه با توزیع اندازه مختلف ممکن است سبب برخی از خطاها در ارزیابی حساسیت خاک به فرسایش شود. بنابراین، این مطالعه به‌منظور ارائه شاخص مناسب پایداری خاکدانه برای اندازه‌های خاکدانه در برابر فرسایش بین‌شیری در یک نمونه خاک منطقه نیمه‌خشک انجام گرفت.

**مواد و روش‌ها:** چهار کلاس اندازه خاکدانه شامل کوچک‌تر از ۲، ۲ تا ۴، ۴ تا ۸ و ۸ تا ۱۱ میلی‌متر از یک خاک کشاورزی با بافت لوم رسی در غرب زنجان، واقع در شمال‌غرب ایران جمع‌آوری شد. حدود ۶۰۰ کیلوگرم نمونه از هر اندازه خاکدانه از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر با استفاده از الک‌های مربوطه از زمینی کشاورزی از حجمی معادل ۱۰ مترمکعب خاک برداشت شد. نمونه‌های خاکدانه به کرت‌هایی با ابعاد ۱۲۰ سانتی‌متر در ۱۳۰ سانتی‌متر تحت شیب ۹ درصد منتقل شدند. در مجموع ۱۲ کرت با استفاده از طرح بلوک‌های کامل تصادفی برای چهار کلاس اندازه خاکدانه با سه تکرار مورد بررسی قرار گرفت. کرت‌ها در معرض هفت رخداد باران شبیه‌سازی شده با شدت یکسان ۷۰ میلی‌متر بر ساعت به مدت ۳۰ دقیقه با فواصل زمانی هفت روز قرار گرفتند. در پایان هر رخداد مقدار هدررفت خاک هر اندازه خاکدانه اندازه‌گیری شد. پایداری خاکدانه در برابر ضربه مکانیکی ( $MWD_{dry}$ )، خیس شدن در آب ( $MWD_{wet}$ ) و ضربه قطره آب (WDT) به‌ترتیب با استفاده از روش‌های الک خشک، الک تر و رهاسازی قطره آب برای هر کلاس اندازه خاکدانه تعیین شد. به‌علاوه پایداری خاکدانه به‌ازای جرم خاکدانه به‌ترتیب برای هر سه روش با شاخص‌های  $MWD_{dry-m}$ ،  $MWD_{wet-m}$  و  $WDT_m$  بیان شد. در کنار آن، سایر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی شامل

\* مسئول مکاتبه: [vaezi.alireza@gmail.com](mailto:vaezi.alireza@gmail.com)

توزیع اندازه ذرات، سنگ‌ریزه، چگالی ظاهری، ضریب آب‌گذری اشباع، کربن آلی و کربنات کلسیم در آزمایشگاه اندازه‌گیری شدند.

**یافته‌ها:** بر اساس نتایج، هم‌بستگی مثبت معنی‌دار بین اندازه خاکدانه و پایداری خاکدانه اندازه‌گیری شده با روش‌های خشک ( $r=0/99$ )، الک تر ( $r=0/89$ ) و آزمون قطره آب ( $r=0/93$ ) وجود داشت. با افزایش اندازه خاکدانه، پایداری خاکدانه بر اساس این روش‌ها، افزایش یافت. با این وجود ارزیابی پایداری خاکدانه به‌ازای جرم خاکدانه نشان داد که هم‌بستگی منفی بین اندازه خاکدانه و پایداری خاکدانه به‌ازای جرم خاکدانه در روش الک تر ( $r=-0/95$ )، الک خشک ( $r=-0/88$ ) و آزمون قطره آب ( $r=-0/88$ ) وجود دارد. اگرچه خاکدانه‌های درشت نسبت به خاکدانه‌های کوچک، پایداری بیشتری در برابر تنش‌های خارجی مانند ضربه مکانیکی، خیس شدن در آب و ضربه قطره آب دارند اما پایداری آن‌ها نسبت به جرم خود، کم‌تر از خاکدانه‌های کوچک می‌باشد. بر خلاف انتظار، هدررفت خاک هر کلاس اندازه خاکدانه با افزایش پایداری خاکدانه اندازه‌گیری شده با روش‌های خشک، الک تر و آزمون قطره آب، افزایش یافت در صورتی‌که هدررفت خاک با افزایش پایداری خاکدانه به‌ازای جرم خاکدانه، کاهش یافت.

**نتیجه‌گیری:** این پژوهش نشان داد که شاخص‌های MWDwet، MWDdry و WDT، شاخص‌هایی مناسب برای ارزیابی پایداری اندازه‌های خاکدانه در یک خاک در برابر فرسایش بین‌شیاری نیستند؛ بلکه پایداری خاکدانه تعیین شده در این سه روش به‌ازای جرم خاکدانه مفهومی بهتر برای ارزیابی حساسیت اندازه‌های خاکدانه به فرسایش بین‌شیاری هستند. در این میان،  $MWD_{wet-m}$  به‌عنوان مناسب‌ترین شاخص در این زمینه است.

**واژه‌های کلیدی:** پایداری خاکدانه به‌ازای جرم، روش آزمون قطره آب، روش الک تر، روش الک خشک، زنجان

## مقدمه

دارای اهمیت بسیاری است (۲۳). یکی از مشخصه‌های ساختمان خاک که در فرسایش‌پذیری آن مؤثر می‌باشد، پایداری خاکدانه است. پایداری خاکدانه بیان‌گر مقاومت خاک در حفظ ساختمان خود در برابر نیروهای خارجی از جمله ضربه قطرات باران، خیس شدن و غیره است (۳۱). پایداری خاکدانه تحت‌تأثیر ویژگی‌هایی مانند مقدار رس، مواد آلی، کربنات کلسیم و اکسیدهای آهن و آلومینیوم قرار می‌گیرد (۶). پایداری خاکدانه شاخصی کلیدی برای بیان حساسیت خاک‌ها در برابر تنش‌های مکانیکی مانند ضربه قطرات باران، روان‌آب سطحی و در نتیجه فرسایش بین‌شیاری است (۱۲). عدم پایداری خاکدانه‌ها عامل افزایش حساسیت خاک‌ها به فرسایش بین‌شیاری است. پراکندگی خاکدانه‌ها به ایجاد اندوده

فرسایش بین‌شیاری یکی از انواع فرسایش آبی است که در اثر تأثیر توأم ضربه قطرات باران و جریان سطحی ضعیف ایجاد می‌شود (۳۲). شدت وقوع فرسایش بین‌شیاری در کنار عواملی مانند ویژگی‌های باران، خصوصیات شیب و پوشش گیاهی، به ویژگی‌های خاک وابسته است. تأثیر ویژگی‌های خاک بر فرسایش را می‌توان در ویژگی به نام فرسایش‌پذیری خاک بیان نمود. این عامل نشان‌دهنده سهولت جدا شدن ذرات خاک در اثر ضربه قطرات باران و نیروی برشی روان‌آب است (۴۰). در میان ویژگی‌های خاک مؤثر بر فرسایش‌پذیری خاک، نقش ساختمان خاک به‌دلیل تأثیر آن بر میزان جدا شدن ذرات در برابر باران و نیز تأثیر بر نفوذپذیری خاک

سطحی در سطح خاک منجر می‌شود و این مسأله موجب کاهش نفوذپذیری و افزایش روان‌آب می‌شود و سرانجام به افزایش پتانسیل فرسایش می‌انجامد (۳۷ و ۴۵). در بسیاری از پژوهش‌ها به نقش مؤثر پایداری خاکدانه در کاهش فرسایش‌پذیری خاک اشاره شده است (۲۲، ۲۴، ۳۳ و ۳۴). اهمیت پایداری خاکدانه در کاهش فرسایش‌پذیری خاک در خاک‌های منطقه نیمه‌خشک نیز به اثبات رسیده است (۷ و ۳۹). پایداری خاکدانه به‌نوبه خود تحت‌تأثیر اندازه خاکدانه قرار می‌گیرد. حساسیت خاکدانه‌ها با اندازه‌های مختلف در برابر فرآیند فرسایش متفاوت است (۲۹). انرژی لازم برای متلاشی کردن خاکدانه با افزایش اندازه‌ی خاکدانه‌های پایدار افزایش می‌یابد. بنابراین خاکدانه‌های بزرگ و پایدار نسبت به خاکدانه‌های سست و کوچک، فرسایش‌پذیری کم‌تری دارند (۵ و ۱۶). آگاشیرا و همکاران (۱۹۸۳) عنوان داشتند که با افزایش اندازه خاکدانه، پایداری خاکدانه کاهش پیدا می‌کند (۱۷). از طرفی، هویوس و کامرفورد (۲۰۰۵) نشان دادند که تفاوت معنی‌داری بین پایداری خاکدانه‌ها در اندازه‌های مختلف وجود ندارد (۲۴).

روش‌ها و شاخص‌های زیادی برای ارزیابی پایداری ساختمان خاک پیشنهاد شده است که بسته به نوع نیروی فرساینده و هدف از پژوهش، از یک یا ترکیبی از آن‌ها استفاده می‌شود. روش رایج برای ارزیابی پایداری ساختمان خاک، بررسی توزیع اندازه‌ی خاکدانه‌ها تحت‌تأثیر تنش‌های مختلف است. توزیع اندازه خاکدانه‌ها معمولاً به کمک دو روش الک تر و الک خشک اندازه‌گیری می‌شود و بر اساس میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار توصیف می‌شود. روش الک خشک بیشتر برای بررسی تأثیر خاک‌ورزی بر خردشدگی و نرم‌شدگی خاک و

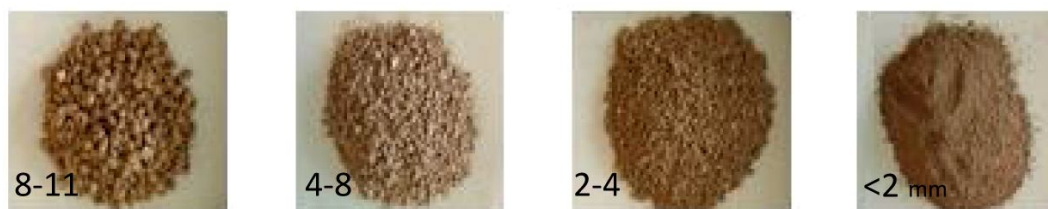
ارزیابی فرسایش‌پذیری خاک در برابر باد به‌کار می‌رود (۲۷). در صورتی‌که روش الک تر عموماً برای تعیین پایداری خاکدانه‌های درشت در برابر تنش‌های آبی استفاده می‌شود (۴۴). بریان (۱۹۶۸) با مطالعه شاخص‌های فرسایش‌پذیری در برابر آب، بهترین شاخص را پایداری خاکدانه‌ها در آب برشمرد (۱۱). واعظی و همکاران (۲۰۰۸) با بررسی خاک‌های آهکی منطقه نیمه‌خشک در شمال‌غرب ایران دریافتند که عامل فرسایش‌پذیری خاک (K)، هم‌بستگی معنی‌داری با پایداری خاکدانه‌ها در روش الک تر ( $P < 0.05$ ) دارد (۳۹). روحی‌پور و همکاران (۲۰۰۴) گزارش کردند که بین عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) و درصد خاکدانه‌های پایدار در آب با قطر بزرگ‌تر از ۰/۲۵ میلی‌متر هم‌بستگی قوی و منفی معنی‌داری ( $r = -0.968$ ) وجود دارد (۳۵). روش آزمون قطره آب<sup>۱</sup> یا روش رهاسازی قطره آب روشی دیگر برای ارزیابی پایداری ساختمان خاک است (۲۵). کانتون و همکاران (۲۰۰۹) با بررسی رابطه بین پایداری خاکدانه و فرسایش و روان‌آب به این نتیجه رسیدند که اگرچه رابطه‌ای معنی‌دار بین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و میزان فرسایش و روان‌آب دیده نشد، اما رابطه بین تعداد قطرات در آزمون قطره و میزان فرسایش و روان‌آب معنی‌دار بود (۱۳).

اگرچه شاخص‌های مختلفی برای بیان پایداری خاکدانه‌ها پیشنهاد شده است ولی این شاخص‌ها برای ارزیابی حساسیت خاکدانه‌های با اندازه معین در خاک‌های مختلف به فرآیندهای فرسایشی ارائه شده‌اند. این‌که کدام یک از اندازه‌های خاکدانه می‌تواند گویای مقاومت کل توده خاک در برابر فرآیندهای فرسایشی باشد موضوعی قابل بررسی می‌باشد. در این راستا بررسی نقش اندازه خاکدانه در

### مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری خاکدانه: برای انجام این پژوهش، خاک لومرسی به‌عنوان بافت خاک غالب منطقه و نسبتاً پایدار در برابر فرآیند تخریب توسط قطرات باران (۲) انتخاب گردید. سعی شد خاک مورد بررسی دارای کم‌ترین مقدار سنگ‌ریزه باشد. خاک مذکور از زمین کشاورزی در محدوده اراضی کشاورزی دانشگاه زنجان واقع در  $36^{\circ} 41' 01''$  عرض شمالی و  $22^{\circ} 24' 48''$  طول شرقی مورد نمونه‌برداری قرار گرفت. برای این منظور تعداد چهار کلاس اندازه خاکدانه شامل کوچک‌تر از ۲، ۲ تا ۴، ۴ تا ۸ و ۸ تا ۱۱ میلی‌متر که بیش‌ترین فراوانی را در خاک داشتند، به‌منظور ارائه شاخصی مناسب برای پایداری خاکدانه از نظر فرسایش‌پذیری آن‌ها در نظر گرفته شدند (شکل ۱). از هر اندازه خاکدانه، مقدار حدود ۶۰۰ کیلوگرم نمونه خاکدانه از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر با استفاده از الک‌های مربوطه در مزرعه طی دوره دو ماهه در بهار تهیه شد و برای انجام آزمایش‌های فرسایشی به زمینی با شیب یکنواخت ۹ درصد در محدوده اراضی دیم دانشگاه زنجان منتقل شد. شیب ۹ درصد به‌عنوان شیب رایج در اغلب پژوهش‌های صحرایی فرسایش خاک می‌باشد (۳۹ و ۴۳).

فرسایش دارای اهمیت است. از این‌رو به‌نظر می‌رسد شاخص‌های پایداری خاکدانه نمی‌توانند در خاکی که دارای توزیع متفاوتی از خاکدانه‌ها می‌باشند، بیان‌گر حساسیت خاکدانه‌ها در برابر فرآیندهای فرسایشی باشند. از سوی دیگر اگرچه مطالعات متعددی در مورد نقش پایداری خاکدانه در فرسایش آبی در خاک‌های منطقه نیمه‌خشک انجام شده است (۲، ۶ و ۱۲) ولی پژوهش‌های دقیقی در راستای ارائه شاخصی برای ارزیابی پایداری خاکدانه در خاک‌های منطقه نیمه‌خشک انجام نگرفته است. در مناطق نیمه‌خشک، خاک‌ها به‌دلیل بارندگی کم و ضعف پوشش گیاهی دارای ماده آلی کم‌تر بوده و از نظر ساختمانی کم‌تر توسعه یافته‌اند. به این دلیل خاک‌ها معمولاً مقاومت کم‌تری در برابر فرآیندهای فرسایش آبی دارند (۳۸). استفاده از شاخص مناسب برای بیان پایداری خاک‌دانه‌ها، گامی مهم برای ارزیابی پایداری ساختمانی یک خاک به فرآیندهای فرسایشی خواهد بود. از این‌رو هدف از این پژوهش، ارائه شاخص مناسب پایداری خاکدانه برای ارزیابی حساسیت اندازه‌های مختلف خاکدانه به فرسایش آبی بر روی خاکدانه‌های یک نمونه خاک از یک منطقه نیمه‌خشک است.



شکل ۱- کلاس‌های مختلف اندازه خاک‌دانه در خاک لومرسی.  
Figure 1. Different classes of aggregate size in clay loam.

این اندازه، تأثیر فرآیندهای پاشمان و در کرت‌های بزرگتر از آن تأثیر فرآیندهای فرسایش شیاری در هدررفت خاک افزایش می‌یابد. کرت‌ها در راستای طول شیب قرار گرفته و برای جلوگیری از ورود و خروج روان‌آب و رسوب، پیرامون کرت‌ها با پشته‌های خاکی به ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر بسته شد (۳۹). انتهای کرت‌ها (عرض پایین کرت‌ها) را با استفاده از ورق گالوانیزه به شکل مثلثی ساخته و لوله انتقال روان‌آب و مخزن جمع‌آوری در آن‌ها تعبیه شد (۳۶). زمین، تسطیح شده و در سطح محل ایجاد کرت‌ها، از یک لایه‌ای سنگ‌ریزه به عمق ۵ سانتی‌متر برای زهکشی آسان آب استفاده شد. نمونه‌های خاک‌دانه تا عمق ۱۵ سانتی‌متر به کرت‌ها منتقل شد (شکل ۲).



شکل ۲- نمایی از کرت فرسایشی حاوی خاکدانه‌های خاک.

Figure 2. View of erosion plot filled with the soil aggregates.

استقرار کرت‌های فرسایشی: به‌منظور بررسی قابلیت فرسایشی هر اندازه خاکدانه، نیاز به احداث کرت‌های فرسایشی بود. برای این منظور زمین مورد نظر با استفاده از گاوآهن برگردان‌دار در جهت شیب شخم زده و علف‌های هرز و بقایای گیاهی آن جمع‌آوری شد. سپس، به‌منظور افزایش یکنواختی عملیات شخم، زمین در جهت شیب دیسک زده شد (۳۹). پس از آماده‌سازی زمین، ۱۲ کرت (سه تکرار برای چهار اندازه خاکدانه) به طول ۱/۳۰ و به عرض ۱/۲۰ متر و با فاصله ۱/۵ متر ایجاد شدند. این ابعاد منطبق بر ابعاد دستگاه شبیه‌ساز باران بوده و هدف از آن امکان ایجاد بارش یکنواخت بر روی سطح کرت و وقوع فرسایش بین‌شیاری طی بارندگی بود. از طرف دیگر در کرت‌های کوچک‌تر از

قطرات که با استفاده از روش گلوله آردی (۱۴) به‌دست آمد، برابر با ۲/۶۵ میلی‌متر بود. صفحه بارش شامل چهار قطعه نازل از نوع آبپاش بود (شکل ۳- ب). آب مورد نیاز دستگاه، از آب لوله‌کشی شهری تأمین شده و برای کنترل فشار آب ورودی به دستگاه شبیه‌ساز باران از یک فشارسنج ۵ بار استفاده شد. ارتفاع بیش از ۱۲۰ سانتی‌متر برای شبیه‌ساز قابل حمل در صحرا امکان‌پذیری نیست. از سوی دیگر

طراحی دستگاه شبیه‌ساز باران: برای بررسی حساسیت خاکدانه‌ها به فرسایش آبی نیاز به بهره‌مندی از دستگاه شبیه‌ساز باران بود. برای این منظور یک دستگاه شبیه‌ساز قابل حمل طراحی شد. دستگاه مذکور از چهار پایه فلزی با ابعاد ۱۳۰ در ۱۴۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۲۰ سانتی‌متر تشکیل شده بود (شکل ۳- الف). ابعاد صفحه ریزش باران ۱۲۰ در ۱۳۰ سانتی‌متر و هم سطح با کرت‌های فرسایشی بود. قطر

شدت‌های کم‌تر از ۷۰ میلی‌متر بر ساعت نشان داد که غیریکنواختی در توزیع باران در سطح صفحه بارش دستگاه شبیه‌ساز باران ایجاد می‌شود و از سوی دیگر باران‌های با شدت پایین اغلب توانایی تولید روان‌آب سطحی و در نتیجه وقوع فرسایش بین‌شیاری را ندارند (۸). از این‌رو با وجود آن‌که فراوانی وقوع باران‌های با شدت ۷۰ میلی‌متر بر ساعت در منطقه پایین است ولی چنین باران‌ها هستند که اغلب در منطقه منجر به وقوع شدید فرسایش بین‌شیاری می‌شوند. برای حذف تأثیر باد بر سقوط آزاد قطرات، از پوشش پلاستیکی پیرامون دستگاه استفاده شد. اعمال اولین رخداد باران بر سطح کرت‌ها در شرایط کاملاً هوا خشک خاک‌ها آغاز شد. در رخدادهای بعدی باران، مقدار رطوبت خاک متأثر از رخداد قبلی و شرایط اقلیمی بود.

فشار آب ورودی به صفحه بارش دستگاه شبیه‌ساز حدود ۰/۵ بار بود. تحت این شرایط، سقوط قطرات باران از دهانه نازل از حالت ثقلی خارج شده و قطرات با سرعتی بیش‌تر به سطح خاک برخورد می‌نمایند. برای بررسی مقدار هدررفت خاک در اندازه‌های خاکدانه، تعداد هفت رخداد باران به فاصله شش روز از هم‌دیگر روی ۱۲ کرت فرسایشی اعمال شد. رطوبت اولیه خاک قبل از اعمال اولین باران، در شرایط هوا خشک بود و در رخدادهای بعدی، مقدار رطوبت خاک تحت‌تأثیر بارندگی قبلی و شرایط اقلیمی قرار داشت. در مجموع ۸۴ رخداد بارندگی طی تابستان ۱۳۹۵ انجام گرفت. شدت و مدت بارندگی در تمام رخدادهای ثابت و به‌ترتیب برابر ۷۰ میلی‌متر بر ساعت و ۳۰ دقیقه بود. علت استفاده از چنین بارشی این بود که از یک‌سو پیش‌آزمایش در



شکل ۳- نمایی از باران‌ساز مورد استفاده در آزمایش (الف) و صفحه بارش آن (ب).

Figure 3. View of rainfall simulator used to the erosion experiments (a) and its rainfall plate (b).

ارزیابی حساسیت خاکدانه‌ها به فرسایش بین‌شیاری: در هر رخداده باران شبیه‌سازی‌شده، برای اندازه‌گیری هدررفت خاک، ابتدا حجم کل مخلوط آب و خاک مخزن‌ها به وسیله ظرفی با حجم معین اندازه‌گیری شد. سپس ظرف محتوی مخلوط را به‌طور دستی کاملاً هم‌زده و نمونه‌ای همگن از آن با حجم حدود ۰/۵ لیتر به آزمایشگاه منتقل و حجم و وزن آن تعیین شد (۲۱). به این ترتیب در هر رخداده باران شبیه‌سازی‌شده، تعداد ۱۲ نمونه یکنواخت تهیه شد. در آزمایشگاه رسوب نمونه‌ها با کاغذ صافی واتمن ۴۲، جدا شد. رسوبات در آن به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک و مقدار رسوب نمونه و غلظت آن مشخص شد. از روی غلظت هر نمونه، مقدار هدررفت خاک در هر رخداده باران تعیین شد (۳۹).

**تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاکدانه‌ها:** ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اندازه‌های مختلف خاکدانه‌ها در آزمایشگاه در سه تکرار اندازه‌گیری شد. برای این منظور درصد ذرات معدنی خاک به روش هیدرومتر (۲۰)، فراوانی سنگ‌ریزه (قطر بین ۲ تا ۱۱ میلی‌متر) به روش وزنی، چگالی حقیقی به روش پیکنومتر (۲۸)، واکنش خاک در گل اشباع با استفاده از pH متر، هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع با استفاده از EC متر، محتوای کربن آلی به روش والکی-بلاک (۳۳) و کربنات کلسیم معادل به روش خشتی‌سازی با اسید کلریدریک یک نرمال (۲۶) اندازه‌گیری شدند. هم‌چنین برای آگاهی از تراکم خاکدانه‌های ریخته شده به داخل کرت، چگالی ظاهری به روش سیلندر فلزی (۱۵) اندازه‌گیری شد. ضریب آب‌گذری اشباع به روش بار ثابت (۱۰) تعیین شد.

برای ارزیابی پایداری خاکدانه‌ها در هر اندازه خاکدانه، از روش‌های رهاسازی قطره آب، الک خشک و الک تر استفاده شد. در روش آزمون قطره

آب (WDT)، قطراتی با قطر ۲/۵ میلی‌متر از دهانه یک بورت از ارتفاع ۲ متری بر روی خاکدانه‌ها (۱۰ خاکدانه) رها شدند. اعمال ارتفاع بیش‌تر در این آزمایش منجر به وقوع خطا در برخورد مستقیم قطره بر سطح خاکدانه می‌شود. در چنین ارتفاعی، قطرات باران می‌توانند در لحظه برخورد بر سطح خاک به حدود ۷۵ درصد سرعت حد خود (۷/۲ متر بر ثانیه) برسند. در این آزمایش تعداد قطره‌های لازم برای شکستن خاکدانه‌ها به‌عنوان شاخص پایداری خاکدانه‌ها بیان شد (۲۵). روش الک خشک، اگرچه اغلب برای ارزیابی حساسیت خاک‌ها به فرسایش بادی مورد استفاده قرار می‌گیرد به‌نوبه خود بیان‌گر میزان به‌هم چسبندگی ذرات خاک می‌باشد و در برخی پژوهش‌ها برای ارزیابی حساسیت خاک به فرسایش آبی نیز استفاده شده است (۱ و ۱۳). در این روش ۱۰۰ گرم از خاکدانه‌ها روی یک‌سری الک (به‌ترتیب از بالا به پایین ۸، ۶/۳، ۴/۷۵، ۲، ۱/۱۸، ۰/۶ و ۰/۲۵ میلی‌متر) به‌طور یکنواخت ریخته شده و در دستگاه شیکر به مدت ۳ دقیقه (۲۷) تکان داده شد. سپس خاکدانه‌های باقی‌مانده روی هر الک توزین شدند. در روش الک تر نیز مراحل کار همانند روش الک خشک بود با این تفاوت که سری الک‌ها در داخل آب با دامنه نوسان ۶/۲ سانتی‌متر بالا و پایین برده شد. مدت آزمایش پس از واسنجی، برای دستیابی به تفاوت بین اندازه‌های خاکدانه، ۱ دقیقه انتخاب شد. سپس خاکدانه‌های باقی‌مانده روی هر الک شسته شده و در آن در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک و وزن شدند. پس از جداسازی شن و سنگ‌ریزه، جرم خاکدانه‌های باقی‌مانده روی هر الک تعیین شد. از شاخص میانگین وزنی قطر (MWD) برای ارزیابی پایداری خاکدانه‌ها در روش الک خشک (MWD<sub>dry</sub>) و الک تر (MWD<sub>wet</sub>) استفاده شد (۴۴):

تحلیل آماری از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۰ استفاده شد. ابتدا آزمون نرمال بودن توزیع آماری داده‌ها (۱۲ داده برای هر متغیر) با آزمون شاپیرو-ویلک مورد بررسی قرار گرفت. تفاوت ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بین اندازه‌های مختلف خاکدانه با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد بررسی شد. همچنین تفاوت بین ۷ رخداد بارندگی از نظر فرسایش بین‌شیرازی با استفاده از آزمون مذکور بررسی شد. برای ارائه شاخص مناسب پایداری خاکدانه، رابطه بین هدررفت خاک در اثر فرسایش و شاخص‌های پایداری خاکدانه به روش هم‌بستگی پیرسون (r) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel استفاده گردید.

### نتایج و بحث

**ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاکدانه‌ها:** ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی کلاس‌های مختلف اندازه خاکدانه در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس درصد ذرات معدنی، بافت خاک مورد مطالعه لوم رسی است. خاک مورد مطالعه دارای واکنش قلیایی (بیشتر از ۷)، شوری کم (کمتر از ۴ دسی‌زیمنس بر متر) و ضریب آب‌گذری متوسط (به‌طور میانگین ۲/۱۸ سانتی‌متر بر ساعت) می‌باشد. خاکدانه‌ها دارای محتوای ماده آلی کم (کمتر از ۱ درصد) بوده و از پایداری پایینی برخوردار هستند. یکی از دلایل پایین بودن نسبی محتوای کربن آلی، تلفات ماده‌ی آلی در اثر کشت و کار بیش از حد (۱۸) و حذف بقایای گیاهی پس از برداشت محصول می‌باشد. آن و همکاران (۲۰۱۰) ماده آلی خاک را مهم‌ترین عامل در پایداری خاکدانه‌ها و بهبود ساختمان خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک دانستند (۳). مقدار زیاد کربنات کلسیم خاک (بیشتر از ۱۰ درصد) به‌دلیل نوع سازندهای

$$MWD = \sum_{i=1}^n W_i \times \bar{X}_i$$

که در آن،  $\bar{X}_i$  میانگین قطر خاکدانه‌های باقی‌مانده بر روی الک  $i$  ام (میانگین قطر سوراخ‌های الک بالایی و پایینی)،  $n$  تعداد الک‌ها و  $W_i$  نسبت وزن خاکدانه‌های روی هر الک به وزن کل خاکدانه‌های به‌کار برده شده در ابتدای آزمایش پس از کسر ذرات شن و سنگ‌ریزه می‌باشد. مقدار  $W_i$  از رابطه زیر محاسبه شد:

$$W_i = \frac{w_i - w_{i(s)}}{w_t - \sum_{i=1}^n w_{i(s)}}$$

که در آن،  $w_i$  وزن ذرات روی الک  $i$  ام،  $w_{i(s)}$  وزن ذرات شن بر روی الک  $i$  ام و  $w_t$  وزن خشک خاک می‌باشد. بر این اساس جرم هر اندازه خاکدانه تعیین شد و تعداد قطرات لازم برای تخریب هر اندازه خاکدانه به جرم خاکدانه تقسیم شد.

در کنار شاخص‌های فوق، پایداری خاکدانه بر مبنای پایداری آن در برابر نیروی عامل تخریب‌کننده به‌ازای جرم خاکدانه تعیین شد. بر این اساس، شاخص رهاسازی قطره‌ی آب به‌ازای جرم خاکدانه با محاسبه تعداد قطره‌های لازم برای شکستن خاکدانه‌ها به‌ازای جرم خاکدانه به‌دست آمد ( $WDT_m$ ). برای این منظور جرم هر کلاس اندازه خاکدانه تعیین شد و تعداد قطرات لازم برای تخریب هر کلاس اندازه خاکدانه به جرم آن تقسیم شد. همچنین شاخص‌های میانگین وزنی قطر خاکدانه در دو حالت خشک و تر به‌ازای جرم خاکدانه نیز تعریف شد. بر این اساس  $MWD_{dry-m}$  و  $MWD_{wet-m}$  به‌عنوان میانگین وزنی قطر خاکدانه به‌ازای جرم خاکدانه به‌ترتیب برای روش الک خشک و تر محاسبه شدند.

**تجزیه و تحلیل داده‌ها:** پس از جمع‌آوری و ثبت داده‌ها در محیط نرم‌افزاری Excel، برای تجزیه و



خاکدانه‌ها وجود دارد (جدول ۱). این نتایج نشان می‌دهد که تغییر در اندازه خاکدانه، همراه با تغییرات اساسی در ویژگی‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی می‌باشد. در برخی پژوهش‌های پیشین نیز تفاوت بین خاکدانه‌ها از نظر ویژگی‌هایی مانند فراوانی ذرات معدنی، ماده آلی، چگالی ظاهری و پایداری به اثبات رسیده است (۹، ۱۹ و ۳۰).

زمین‌شناسی مناطق نیمه‌خشک می‌باشد. با توجه به ناپایداری خاکدانه‌ها، انتظار می‌رود خاک مقاومت کم‌تری در برابر نیروهای فرساینده داشته و در نتیجه نفوذ آب به خاک کاهش یابد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تفاوت معنی‌داری ( $P < 0.01$ ) بین اندازه‌های خاکدانه از نظر کل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مورد بررسی در

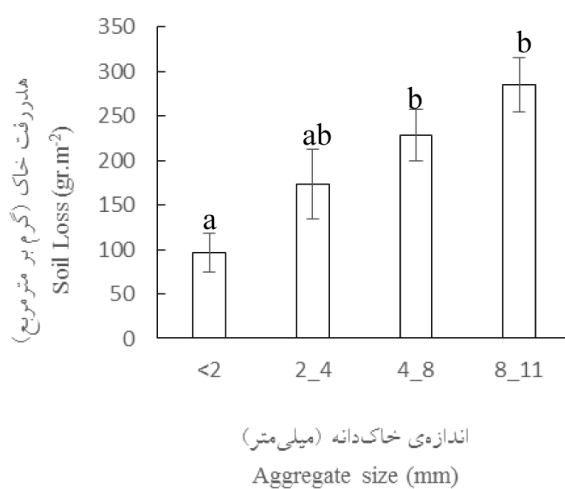
جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اندازه‌های خاکدانه و تجزیه واریانس آن‌ها.

Table 1. Physicochemical properties of the soil aggregate sizes and their analysis variance.

میانگین مربعات Mean Squares	اندازه خاکدانه (میلی‌متر) Aggregate size (mm)				ویژگی‌های خاک Soil properties
	8-11	4-8	2-4	< 2	
191.52***	25.94	24.04	24.52	42.82	شن (%) Sand (%)
26.02***	31.84	29.70	31.01	24.29	سیلت (%) Silt (%)
88.17***	42.20	46.25	44.44	32.90	رس (%) Clay (%)
175.14***	16.10	12.89	4.37	0	سنگ‌ریزه (%) Gravel (%)
0.03***	1.23	1.28	1.30	1.49	چگالی ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب) Bulk density (gr.cm <sup>3</sup> )
0.32***	2.50	2.38	2.28	1.53	ضریب آب‌گذری اشباع (سانتی‌متر بر ساعت) Saturated hydraulic conductivity (cm.h <sup>-1</sup> )
0.27***	0.78	0.84	0.42	0.22	میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت تر (میلی‌متر) Aggregate stability against water force (mm)
2684.55***	2.75	10.01	43.07	67.06	میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت تر به‌ازای جرم خاکدانه (میلی‌متر بر گرم) MWD of water-stable aggregates per aggregates mass (mm.g <sup>-1</sup> )
11.64***	5.34	3.30	2.29	0.62	میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت خشک (میلی‌متر) Aggregate stability against mechanical impact (mm)
29185.09***	18.39	40.30	216.08	178.77	میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت خشک به‌ازای جرم خاکدانه (میلی‌متر بر گرم) MWD of dry-stable aggregates per aggregates mass (mm.g <sup>-1</sup> )
36.27***	10.2	5.2	3.2	2.5	پایداری خاکدانه در برابر قطره آب Aggregate stability against water drop
201732.52***	35.73	61.32	326.53	735.30	پایداری خاکدانه در برابر قطره آب به‌ازای جرم خاکدانه Aggregate stability against per aggregate mass
0.01***	8.12	8.19	8.17	8.33	واکنش pH
0.31***	2.51	2.44	2.33	1.65	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) EC (dS.m <sup>-1</sup> )
0.01**	0.16	0.20	0.28	0.20	ماده آلی (%) Organic matter (%)
45.21***	17.50	18.39	17.50	26.25	کربنات کلسیم معادل (%) Calcium carbonate equivalent (%)

قابل توجه بود. به‌طورکلی با افزایش اندازه خاکدانه، مقدار هدررفت خاک افزایش یافت. اگرچه خاکدانه‌های درشت نسبت به خاکدانه‌های کوچک، پایداری بیشتری در برابر تنش‌های خارجی مانند ضربه مکانیکی، خیس شدن و ضربه قطره دارند، اما پایداری آن‌ها نسبت به جرم خود، کم‌تر از خاکدانه‌های کوچک می‌باشد. از این‌رو مجموع هدررفت خاک ناشی از بارندگی در کرت‌هایی که حاوی خاکدانه‌های کوچک می‌باشند، کم‌تر از هدررفت خاک در کرت‌های محتوی خاکدانه‌های درشت می‌باشد. در واقع، حساسیت خاکدانه‌های کوچک واقع در سطحی معین از زمین در برابر فرآیندهای فرسایشی کم‌تر از خاکدانه‌های بزرگ در همان سطح از زمین می‌باشد.

حساسیت خاکدانه‌ها به فرسایش بین‌شیاری: بر اساس نتایج، تفاوت معنی‌داری بین کلاس‌های مختلف اندازه خاکدانه از نظر هدررفت خاک در اثر باران‌های شبیه‌سازی شده وجود داشت ( $P < 0/05$ ). همچنین نتایج مقایسه‌های میانگین برای اندازه‌های مختلف خاکدانه نشان داد (شکل ۴) که بیش‌ترین مقدار هدررفت خاک (۲۸۵/۳۰ گرم بر مترمربع) در بزرگ‌ترین اندازه خاکدانه (۹/۵ میلی‌متر) و کم‌ترین مقدار هدررفت خاک (۹۶/۶۸ گرم بر مترمربع) در کوچک‌ترین اندازه خاکدانه (کم‌تر از ۲ میلی‌متر) می‌باشد. اگرچه تفاوتی معنی‌دار بین کلاس‌های ۸ تا ۱۱، ۴ تا ۸ و ۲ تا ۴ میلی‌متر وجود نداشت، ولی تفاوت بین درشت‌ترین کلاس خاکدانه (۸ تا ۱۱ میلی‌متر) و ریزترین کلاس (کم‌تر از ۲ میلی‌متر)



شکل ۴- مقایسه میانگین اثر اندازه‌های خاکدانه بر هدررفت خاک در اثر فرسایش بین‌شیاری.

Figure 4. Mean comparison of the effect aggregate size classes on soil loss caused by interrill erosion.

بر اساس شاخص‌های میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت خشک ( $r=0/99$ )، میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت تر ( $r=0/89$ ) و آزمون قطره آب ( $r=0/93$ ) وجود داشت. با این‌حال بین اندازه خاکدانه و پایداری خاکدانه به‌ازای جرم خاکدانه (در هر سه حالت)

ارزیابی شاخص‌های پایداری خاکدانه: جدول ۲ ماتریس هم‌بستگی هدررفت خاک و شاخص‌های پایداری خاکدانه برای اندازه‌های خاکدانه را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، هم‌بستگی مثبت معنی‌دار ( $P < 0/01$ ) بین اندازه خاکدانه و پایداری خاکدانه

ضعیف‌تر می‌باشند. به بیان دیگر، اگرچه خاکدانه کوچک ذاتاً پایداری کم‌تری نسبت به خاکدانه درشت دارد (۱۶، ۲۴ و ۴۱) اما فراوانی آن در کرت‌های مطالعاتی به مراتب بیشتر از فراوانی خاکدانه‌های درشت می‌باشد. از این‌رو پایداری کل کرت حاوی خاکدانه‌های کوچک بیشتر از پایداری کل کرت حاوی خاکدانه‌های درشت می‌باشد. این نتیجه بر خلاف یافته‌های پیشین است که در آن نشان دادند که خاک حاوی خاکدانه‌های ریز نسبت به خاکدانه‌های درشت قابلیت انتقال بیش‌تری داشته (۴) و فرسایش‌پذیرتر است (۵).

هم‌بستگی منفی معنی‌دار مشاهده شد (به ترتیب  $r = -0/88$  و  $r = -0/95$ ). در واقع اگرچه با افزایش اندازه خاکدانه، پایداری خاکدانه‌ها بر اساس شاخص‌های میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت خشک، میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت تر و آزمون قطره آب افزایش می‌یابد، ولی پایداری خاکدانه به‌ازای جرم خاکدانه در هر سه حالت به‌شدت کاهش یافت. دلیل کاهش پایداری خاکدانه به‌ازای جرم خاکدانه با افزایش اندازه خاکدانه این است که خاکدانه‌های درشت‌تر از نظر پایداری با مجموع خاکدانه‌های کوچک که جرم یکسانی با خاکدانه درشت دارند،

جدول ۲- ماتریس هم‌بستگی بین هدررفت خاک و شاخص‌های ارزیابی پایداری خاکدانه در کلاس‌های اندازه خاکدانه.

**Table 2. The correlation matrix of soil loss and aggregate stability indices in the aggregate size classes.**

Variable <sup>1</sup>	Aggregate size	MWD <sub>dry</sub>	MWD <sub>dry-m</sub>	MWD <sub>wet</sub>	MWD <sub>wet-m</sub>	WDT	WDT <sub>m</sub>	Soil loss
Aggregate size	1							
MWD <sub>dry</sub>	0.99**	1						
MWD <sub>dry-m</sub>	-0.88**	-0.83**	1					
MWD <sub>wet</sub>	0.89**	0.88**	-0.89**	1				
MWD <sub>wet-m</sub>	-0.95**	-0.96*	0.88**	-0.98**	1			
WDT	0.93**	0.92**	-0.79**	0.72**	-0.81*	1		
WDT <sub>m</sub>	-0.88**	-0.88**	0.81**	-0.93**	0.94**	-0.68*	1	
Soil loss	0.79**	0.82**	-0.64*	0.74**	-0.80**	0.82**	-0.65*	1

<sup>1</sup> MWD<sub>dry</sub>: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در روش الک خشک، MWD<sub>dry-m</sub>: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در روش الک خشک به‌ازای جرم خاکدانه، MWD<sub>wet</sub>: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در روش الک تر، MWD<sub>wet-m</sub>: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در روش الک تر به‌ازای جرم خاکدانه، WDT: آزمون قطره آب و WDT<sub>m</sub>: آزمون قطره آب به‌ازای جرم خاکدانه. \* و \*\* به‌ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد و ۵ درصد.

همکاران (۲۰۰۹) و بار و همکاران (۲۰۱۰) بود که نشان دادند بین هدررفت خاک و اندازه خاکدانه هم‌بستگی منفی وجود دارد. خاکدانه‌های درشت، پایداری و مقاومت بیش‌تری در برابر ضربه قطرات باران دارند و موجب کاهش هدررفت خاک می‌شوند

وجود هم‌بستگی مثبت بین هدررفت خاک با پایداری خاکدانه بر اساس شاخص‌های میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت خشک، میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت تر و آزمون قطره آب بر خلاف یافته‌های ویلیامز و همکاران (۲۰۰۴)، کانتون و

چنین نتیجه‌ای برخلاف یافته‌های پیشین است که در آن‌ها پایداری خاکدانه با شاخص  $MWD_{wet}$  محاسبه شده است و نشان داده‌اند که در خاک‌هایی که شاخص مذکور بالاتر می‌باشد، فرسایش‌پذیری خاک کم‌تر است. بین هدررفت خاک و شاخص پایداری خاکدانه به‌ازای جرم خاکدانه رابطه‌ای کاهشی مشاهده شد. در واقع حساسیت خاک‌های حاوی خاکدانه‌های کوچک به فرسایش بین‌شیاری کم‌تر از خاک‌های حاوی خاکدانه‌های درشت بود. این پژوهش نشان داد که شاخص‌های  $MWD_{dry}$ ،  $MWD_{wet}$  و  $WDT$ ، شاخص‌هایی مناسب برای ارزیابی پایداری اندازه‌های خاکدانه در یک خاک در برابر فرسایش بین‌شیاری نیستند. از این‌رو شاخص‌های جدیدی بر مبنای پایداری خاکدانه به‌ازای جرم خاکدانه بیان شد و نتایج نشان داد که بین مقدار فرسایش بین‌شیاری و شاخص‌های تعریف شده بر اساس میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت خشک و تر و یا آزمون قطره آب به‌ازای جرم خاکدانه، هم‌بستگی منفی وجود دارد. مقایسه بین شاخص‌های مذکور نشان می‌دهد که هدررفت خاک در اندازه‌های مختلف خاکدانه بیش‌ترین هم‌بستگی را با شاخص پایداری خاکدانه به‌ازای جرم در روش الک تر ( $MWD_{dry-m}$ ) دارد ( $r = -0.80$ ). به‌نظر می‌رسد در این روش از آن‌جا که خاکدانه‌ها در کنار خیس شدن فیزیکی تحت تنش مکانیکی حاصل از حرکت الک‌ها قرار می‌گیرند این شاخص بهتر می‌تواند رفتار خاکدانه را در برابر فرآیندهای فرسایش بین‌شیاری تبیین نماید. بنابراین می‌توان از شاخص  $MWD_{dry-m}$  برای ارزیابی نقش اندازه خاکدانه در فرسایش بین‌شیاری با اطمینان بیش‌تر استفاده کرد.

(۵، ۱۳ و ۴۲). وجود هم‌بستگی منفی بین هدررفت خاک و پایداری خاکدانه به‌ازای جرم خاکدانه بیان‌گر این است که مجموع پایداری خاکدانه‌های کوچک در نمونه‌ای با جرم معین، بیش‌تر از مجموع پایداری خاکدانه‌های درشت به‌ازای نمونه‌ای با جرم یکسان می‌باشد. در واقع افزایش پایداری کل خاکدانه‌های ریز موجب کاهش شدت فروپاشی آن‌ها در اثر بارندگی شده و در نتیجه فرسایش‌پذیری کرت حاوی خاکدانه‌های ریز، کم‌تر می‌باشد. با توجه به وجود چنین هم‌بستگی منفی به‌نظر می‌رسد شاخص پایداری خاکدانه به‌ازای جرم خاکدانه ( $MWD_{wet-m}$ ) بهتر بتواند گویای نقش اندازه خاکدانه در حساسیت آن به فرسایش آبی باشد.

### نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که خاکدانه‌های با اندازه متفاوت، اختلاف معنی‌داری از نظر ویژگی‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی به‌ویژه پایداری خاکدانه دارند. اگرچه افزایش اندازه خاکدانه منجر به افزایش پایداری خاکدانه در روش‌های الک خشک، الک تر و رهاسازی قطره آب می‌شود، ولی پایداری خاکدانه به‌ازای جرم خاکدانه کاهش می‌یابد. از آن‌جا که فراوانی خاکدانه‌های کوچک در کرت‌های فرسایشی به‌مراتب بیش‌تر از فراوانی خاکدانه‌های درشت است، مجموع پایداری ساختمانی در کرت حاوی خاکدانه‌های کوچک، بیش‌تر از مقدار آن در کرت حاوی خاکدانه‌های درشت است. حساسیت خاکدانه‌ها به فرسایش با افزایش اندازه خاکدانه افزایش یافت؛ به‌طوری‌که بین فرسایش بین‌شیاری در کلاس‌های اندازه خاکدانه و شاخص‌های میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت خشک ( $MWD_{dry}$ ) و تر ( $MWD_{wet}$ ) و آزمون قطره آب ( $WDT$ )، هم‌بستگی مثبت وجود داشت.

## منابع

1. Ahmadi, A., Neyshabouri, M.R., Rouhipour, H., and Asadi, H. 2011. Fractal dimension of soil aggregates as an index of soil erodibility. *J. Hydrol.* 400: 3. 305-311.
2. Akbari, S., and Vaezi, A.R. 2015. Investigating aggregates stability against raindrops impact in some soils of a semi-arid region, North west of Zanzan. *Water and Soil Science.* 25: 2. 65-77. (In Persian)
3. An, S., Mentler, A., Mayer, H., and Blum, W.E.H. 2010. Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China. *Catena.* 81: 226-233.
4. Arjmand Sajjadi, S., and Mahmoodabadi, M. 2014. Aggregate breakdown and surface seal development influenced by rain intensity, slope gradient and soil particle size. *Solid Earth Discussions.* 6: 3303-3331.
5. Bare, A., Kainz, M., and Veihe, A. 2010. The spatial variability of erodibility and its relation to soil type, a study from northern Ghana. *Geoderma.* 106: 101-120.
6. Barthes, B.G., Kouo Kouo, E., Larre-Larrouy, M.C., Razafimbelo, T.M., de Luca, E.F., Azontonde, A., Neves, C.S., de Freitas, P.L., and Feller, C.L. 2008. Texture and sesquioxide effects on water stable aggregates and organic matter in some tropical soils. *Geoderma.* 143: 14-25.
7. Belaid, H., and Habaieb, H. 2015. Soil aggregate stability in a Tunisian semi-arid environment with reference to fractal analysis. *J. Soil Sci. Environ. Manage.* 6: 2. 16-23.
8. Besharat, F., and Vaezi, A.R. 2015. Soil Loss under Simulated Rainfalls Rainfall During Events on Runoff and Soil Loss under Simulated Rainfalls. *Iran. J. Water. Manage. Sci. Engin.* 9: 29. 9-18. (In Persian)
9. Boix-Fayos, C., Calvo-Cases, A., Imeson, A.C., and Soriano-Soto, M.D. 2001. Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators. *Catena.* 44: 47-67.
10. Bouwer, H., and Jackson, R.D. 1974. Determining soil properties, P 611-627, *Drainage for Agriculture*, ASA Monograph Number 17, Madison, WI.
11. Bryan, R.B. 1968. The development, use and efficiency of indices of soil erodibility. *Geoderma.* 2: 5-26.
12. Canasveras, J.C., Barron, V., Del Campillo, M.C., Torrent, J., and Gomez, J.A. 2010. Estimation of aggregate stability indices in Mediterranean soils by diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma.* 158: 78-84.
13. Canton, Y., Sole-Benet, A., Asensio, C., Chamizo, S., and Puigdefabregas, J. 2009. Aggregate stability in range sandy loam soils relationship with runoff and erosion. *Catena.* 77: 192-199.
14. Carter-Cade, E., Greer, D., Braud, J., and Floy, M. 1974. Raindrop characteristics in southcentral United States. *Transactions of ASAE.* 17: 6. 1033-1037.
15. Culley, J.L.B. 1993. Density and compressibility. *Soil sampling and methods of analysis.* Pp: 529-539.
16. Dominguez, J., Negrin, M.A., and Rodriguez, C.M. 2001. Aggregate water stability, particle size and soil solution properties in conducive and suppressive soils to Fusarium wilt of banana from Canary island (Spain). *Soil Biology and Biochemistry.* 33: 449-455.
17. Egashira, K., Kaetsu, Y., and Takuma, K. 1983. Aggregate stability as an index of erodibility of Andosols. *Soil Science and Plant Nutrition.* 29: 473-481.
18. Eynard, A., Schumacher, T.E., Lindstrom, M.J., and Malo, D.D. 2004. Aggregate sizes and stability in cultivated South Dakota prairie Ustolls and Usterts. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 68: 1360-1365.
19. Fallahzade, J., and Hajabbasi, M.A. 2010. Evaluation of organic matter storage in aggregate of clayey soils under degraded pasture and cropland in central Zagros. *J. Water Soil Cons.* 17: 179-194. (In Persian)

20. Gee, G.W., Bauder, J.W., and Klute, A. 1986. Particle-size analysis. Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. Pp: 383-411.
21. Girmay, G., Sing, B.R., Nyssen, J., and Borrosen, T. 2009. Runoff and sediment associated nutrient losses under different land uses in Tigray, Northern Ethiopia. *J. Hydrol.* 376: 70-80.
22. Gupta, O.P. 2002. Water in relation to soils and plants. Agrobios, India. Pp: 31-34.
23. Hoyos, N. 2005. Spatial modeling of soil erosion potential in a tropical watershed of the Colombian Andes. *Catena.* 63: 85-108.
24. Hoyos, N., and Comerford, N.B. 2005. Land use and landscape effects on aggregate stability and total carbon of Andisols from the Colombian Andes. *Geoderma.* 129: 268-278.
25. Imeson, A., and Vis, M. 1984. Assessing soil aggregate stability by water-drop impact and ultrasonic dispersion. *Geoderma.* 34: 185-200.
26. Jackson, M.L. 1967. Soil chemical analysis, Prentice-Hall of India, Private Limited, New Delhi. Klocke, A. 1-3.
27. Kemper, W.D., and Rosenau, R.C. 1986. Aggregate stability and size distribution, in: Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods, Klute, A., Ed. Pp: 425-442.
28. Klute, A. 1986. Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. 2<sup>nd</sup> edition. Agron. Monog. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
29. Mahmoodabadi, M. 2011. Consecutive application of organic matter and sodicity on secondary particle size distribution. *Environmental Erosion Researchs.* Number 2. (In Persian)
30. Mahmoodabadi, M., and Ahmadbeygi, B. 2013. Effect of primary particle size distribution on aggregate stability at different size classes. *Water and Soil Science.* 23: 3. 207-219. (In Persian)
31. Mataix-Solera, J., Cerda, A., Arcenegui, V., Jordan, A., and Zavala, L.M. 2011. Fire effects on soil aggregation: a review. *Earth-Science Reviews.* 109: 44-60.
32. Meyer, L.D., and Harmon, W.C. 1984. Susceptibility of agricultural soils to interrill erosion. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 48: 1152-1157.
33. Nelson, D.W., and Sommers, L. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties methods of soil, Pp: 539-579.
34. Nzeyimana, I., Hartemink, A.E., Ritsema, C., Stroosnijder, L., Lwanga, E.H., and Geissen, V. 2017. Mulching as a strategy to improve soil properties and reduce soil erodibility in coffee farming systems of Rwanda. *Catena.* 149: 43-51.
35. Rouhipour, H., Farzaneh, H., and Asadi, H. 2004. Relationship between some indicators of soil aggregate stability with soil erodibility factor using a rainfall simulator. *Iran. J. Range. Des. Res.* 11: 236-254. (In Persian)
36. Sadeghi, S.H.R., Hazbavi, Z., Younesi, H., and Bahramifar, N. 2016. Trade-off between runoff and sediments from treated erosion plots and polyacrylamide and acrylamide residues. *Catena.* 142: 213-220.
37. Unjer, P.W., Fulton, J.L., and Jones, O.R. 1990. Land-leveling effects on soil texture, organic matter content, and aggregate stability. *J. Soil Water Cons.* Pp: 412-415.
38. Vaezi, A.R. 2014. Modeling runoff from semi-arid agricultural lands in Northwest Iran. *Pedosphere.* 24: 595-604.
39. Vaezi, A.R., Sadeghi, S.H.R., Bahrami, H.A., and Mahdian, M.H. 2008. Modeling the USLE K-factor for calcareous soils in northwestern Iran. *Geomorphology.* 97: 414-423.
40. Veihe, A. 2002. The spatial variability of erodibility and its relation to soil types: a study from northern Ghana. *Geoderma.* 106: 101-120.
41. Wang, J.G., Yang, W., Yu, B., Li, Z.X., Cai, C.F., and Ma, R.M. 2016. Estimating the influence of related soil properties on macro-and micro-aggregate stability in ultisols of south-central China. *Catena.* 137: 545-553.

42. Williams, B.M., Martinez, M., and Deeks, L. 2004. Exponential distribution theory and aggregate size. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 6: 382-391.
43. Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation Planning, *Agriculture Handbook*. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC. 537: 13-27.
44. Yoder, R.E. 1936. A direct method of aggregate analysis and a study of a physical nature of erosion losses. *J. Amer. Agron.* 28: 337-351.
45. Zhi-Hua, Sh., Feng-Ling, Y., Lu, L., Zhao-Xia, L., and Chong-Fa, C. 2010. Interrill erosion from disturbed and undisturbed samples in relation to topsoil aggregate stability in red soils from subtropical China. *Catena*. 81: 240-248.



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 25(2), 2018*

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2018.12419.2705

## Evaluating the susceptibility of aggregate sizes to interrill erosion based on aggregate stability indices

\*A.R. Vaezi<sup>1</sup>, S. Rahmati<sup>2</sup> and H. Bayat<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Associate Prof., Dept. of Soil Science, University of Zanjan,

<sup>2</sup>M.Sc. Graduate, Dept. of Soil Science, University of Zanjan

Received: 12.26.2016; Accepted: 05.22.2018

### Abstract

**Background and Objectives:** Soil aggregate stability is an important physical indicator of the soil's susceptibility to erosion. Aggregate stability can vary, depending on the aggregate size. Some methods including the dry-sieving, wet-sieving and water-drop test have been commonly used worldwide to evaluate the stability of aggregates. Mean weight diameter of stable aggregates was used for the dry-sieving and wet-sieving method. In the water-drop test, aggregate stability is evaluated using the number of water drops needed for disrupting the aggregates. These indices are only used to evaluate the soil structural stability in aggregate samples of the same size. So, application of these indices may cause some errors in evaluating the soil's susceptibility to water erosion processes. Therefore, this study was conducted to develop a proper aggregate stability for different aggregate sizes in view point of interrill erosion in a semi-arid soil sample.

**Materials and Methods:** Four aggregate size classes including < 2, 2-4, 4-8, 8-11 mm were collected from an agricultural soil with texture of clay loam in western Zanjan, north west of Iran. A-600 kg aggregate sample was taken from 0-30 cm surface soil with about 10 m<sup>3</sup> in volume for each aggregate sizes by sieving the aggregates in the field. The aggregate samples were packed to the erosion plots with 120 cm × 130 cm in dimensions installed in a 9% uniform slope. A total of twelve plots were investigated using the randomized complete block design for four aggregate size classes with three replications. The plots were exposed to seven simulated rainfalls with 70 mm h<sup>-1</sup> in intensity for 30-min with 7-day interval. Soil loss resulted by interrill erosion from each aggregate size was determined during each rainfall simulation. The stability of each aggregate size against mechanical impact (MWD<sub>dry</sub>), wetting force (MWD<sub>wet</sub>) and raindrop impact (WDT) was determined using the dry-sieving, wet-sieving and water-drop test methods for each aggregate size class, respectively. Additionally, the aggregate stability per aggregate mass were computed and defined as MWD<sub>wet-m</sub>, MWD<sub>dry-m</sub> and WDT<sub>m</sub>, respectively. Beside this, other physicochemical properties including particle size distribution, gravel, bulk density, saturated hydraulic conductivity, organic carbon and calcium carbonate were determined using the conventional methods in the lab.

**Results:** Based on the results, significant positive correlations were found between the aggregate size and the stability of aggregates determined using the methods of dry-sieving ( $r=0.99$ ), wet-sieving ( $r=0.89$ ) and water-drop-test ( $r=0.93$ ). The aggregate stability determined using all methods increased with an increase in the aggregate size. Nevertheless, evaluating the aggregate stability per aggregate mass indicated that negative correlations exist between the aggregate size and MWD<sub>wet-m</sub> ( $r= -0.95$ ), MWD<sub>dry-m</sub> ( $r= -0.88$ ) and WDT<sub>m</sub> ( $r= -0.88$ ). Although the coarse aggregates rather than smaller aggregates are resistant against external stresses such as mechanical impacts, wetting force and raindrop impact but their stability per

---

\* Corresponding Author; Email: vaezi.alireza@gmail.com



their mass is small. Contrary to our expectation, soil loss by interrill erosion of each aggregate size classes increased with increasing the aggregate stability determined using the dry-sieving, wet-sieving and water-drop-test methods whereas decreased with increasing the aggregate stability on the basis of the aggregate mass.

**Conclusion:** This study revealed that MWDwet, MWDdry and WDT are not the proper indices to evaluate the stability of aggregate size against interrill erosion. The aggregate stability per aggregate mas determined in these methods is a new approch to evaluate the susceptibility of various aggregate sizes of a soil to interrill erosion. Among these indices, MWDwet-m is the best indicator in this field.

**Keywords:** Aggregate stability per mass, Water-drop test method, Wet sieving method, Dry-sieving method, Zanjan

