

ارزیابی هم‌خوانی روش‌های مختلف تعیین پایداری ساختمان خاک برای برآورد فرسایش پاشمانی

حمید کلیشادی^۱، محمد رضا مصدقی^{۲*}، شمس‌اله ایوبی^۳ و حسین اسدی^۴

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲- استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۳- استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۴- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

| تاریخچه مقاله | چکیده |
|---|---|
| دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۱۳ | <p>پایداری خاکدانه‌ها یکی از عوامل مهم اثرگذار بر فرسایش خاک است. هدف از انجام این پژوهش مقایسه روش‌های مختلف برآورد پایداری خاکدانه‌ها، شامل اندازه‌گیری پاشمان، الک تر و مقاومت برشی اندازه‌گیری شده با فروسنج مخروطی اُفتان برای برآورد فرسایش پاشمان است. برای این منظور، ۲۸ نمونه خاک با ویژگی‌های اولیه متفاوت از نظر بافت، آهک و ماده آلی از خاک‌های سطحی استان‌های اصفهان و چهارمحال بختیاری جمع‌آوری شد. میزان پاشمان (S) با دستگاه شبیه‌ساز باران، مقاومت برشی (τ) با فروسنج مخروطی اُفتان و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (GMD) با استفاده از الک تر اندازه‌گیری شدند. نتایج همبستگی بین روش‌های مختلف نشان داد میزان پاشمان با τ و GMD همبستگی منفی و معنی‌دار و τ با GMD و MWD همبستگی مثبت و معنی‌دار داشت. نتایج نشان داد که S عمدتاً به توزیع اندازه ذرات، MWD و GMD به کربن آلی، و τ هم به توزیع اندازه ذرات و هم به کربن آلی خاک وابسته است. برای ارزیابی کارآیی روش‌ها در خاک‌های متفاوت، خاک‌های مورد مطالعه با استفاده از روش K-means در محیط نرم‌افزار MATLAB بر اساس ویژگی‌های اولیه خوشه‌بندی شدند. مقایسه میانگین بین خوشه‌ها با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. نتایج مقایسه میانگین نشان داد هر سه روش، روند تغییرات پایداری خاکدانه در گروه‌های مختلف را به طور مشابه برآورد می‌کنند؛ بنابراین روش‌های ذکر شده به جای یکدیگر قابل استفاده هستند و فروسنج مخروطی اُفتان را می‌توان به عنوان یک روش درجا برای اندازه‌گیری پایداری خاکدانه در برابر فرسایش پاشمانی معرفی کرد.</p> |
| پذیرش نهایی: ۱۳۹۶/۱۲/۲۱ | |
| واژه‌های کلیدی: | |
| پایداری خاکدانه، فروسنج مخروطی اُفتان، فرسایش پاشمانی، شبیه‌ساز باران چندمتغیره، الک تر | |
| * عهده دار مکاتبات | |
| Email: mosaddeghi@yahoo.com | |

نزدیکی با ویژگی‌های ذاتی خاک مانند ماده آلی، بافت، تخلخل خاک و مدیریت کاربری زمین، ریشه گیاهان، تغییرات کربن و هدررفت نیتروژن دارند (۳، ۷، ۲۹). روش‌های زیادی برای اندازه‌گیری پایداری ساختمان خاک وجود دارد، اما یک روش یکتا که در دامنه گسترده‌ای از خاک‌ها و کاربری‌های مختلف کاربرد داشته باشد، وجود ندارد (۲۰). الک تر، شبیه-سازی باران و لرزش اولتراسونیک رایج‌ترین روش‌ها برای اندازه‌گیری پایداری ساختمان خاک هستند. یکی از روش‌های اندازه‌گیری پایداری خاکدانه برای تعیین مقاومت خاکدانه در برابر قطرات باران و جداسدن، اندازه‌گیری میزان پاشمان با استفاده از شبیه‌سازهای باران است. پژوهش‌گران برای اندازه‌گیری مستقیم پاشمان خاک با دو مشکل اساسی مواجه هستند: (۱) جابجایی افقی قطره باران در سرعت نهایی و (۲) دشواری جمع‌آوری پاشمان (۱). ال-دوره و برادفورد^۳ (۱) از مقاومت برشی اندازه‌گیری شده با فروسنج مخروطی اُفتان برای برآورد میزان پاشمان خاک استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد یک رابطه خطی قوی ($S=0.36+0.007KE/\tau$) و نسبت انرژی جنبشی قطره $(R^2=0.97)$ بین میزان پاشمان (S) و نسبت انرژی جنبشی قطره به مقاومت برشی خاک (KE/τ) وجود دارد.

این پژوهش به منظور مقایسه روش‌های مختلف تعیین پایداری خاکدانه‌ها (الک تر، شبیه‌ساز باران و فروسنج مخروطی اُفتان) برای ارزیابی وضعیت پایداری خاکدانه‌ها در خاک‌های مناطق نیمه‌خشک در برابر فرسایش پاشمانی انجام شد. هم‌چنین بررسی وابستگی شاخص‌های پایداری اندازه-گیری شده با روش‌های مذکور با ویژگی‌های اولیه خاک از جمله بافت، آهک و ماده آلی مد نظر بود. هدف دیگر این پژوهش ارزیابی استفاده از روش‌های ذکر شده در گروه‌های خاک مختلف و انتخاب بهترین روش (ها) بود.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

با توجه به بانک اطلاعاتی موجود، تعداد ۲۸ نمونه خاک دست‌خورده با دامنه گسترده‌ای از بافت، ماده آلی و آهک از

در نتیجه تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بیش از ۲/۶ میلیارد نفر از مردم جهان با پدیده بیابان‌زایی و تخریب اراضی در مناطق خشک، نیمه‌خشک و نیمه مرطوب درگیر هستند. سالانه در کل جهان حدود شش میلیون هکتار از زمین‌های کشاورزی در اثر تخریب انسان‌زاد^۱، خاک حاصل‌خیزی خود را از دست می‌دهند (۳۱). بخش وسیعی از کشور ما دارای آب و هوای خشک و نیمه‌خشک بوده که بیش‌تر این مناطق بدون پوشش گیاهی با تراکم مناسب یا حتی کاملاً بدون پوشش هستند. از سوی دیگر، نقاطی هم که بایستی بنا به شرایط آب و هوایی مطلوب، دارای پوشش گیاهی مناسب باشند، اغلب بر اثر بهره‌برداری‌های بی‌رویه انسان و دام، بدون پوشش گیاهی شده‌اند؛ بنابراین بسیاری از مناطق کشور با خطر فرسایش و هدررفت خاک زیاد و حتی خیلی زیاد روبه‌رو هستند (۱۵). پژوهش‌ها نشان می‌دهد که میزان فرسایش آبی در کشور روندی رو به افزایش داشته، به شکلی که در ۵۰ سال اخیر (از سال ۱۳۳۰ تا ۱۳۸۰) حدود شش برابر شده است (میزان ۰/۵ میلیارد تن در سال ۱۳۳۰ به ۲/۷۵ تا ۳ میلیارد تن در سال ۱۳۸۰ رسیده است) (۱۴).

بنابراین به نظر می‌رسد که فرسایش و هدررفت خاک به عنوان یکی از اصلی‌ترین موانع در راستای تحقق چشم‌انداز توسعه پایدار در کشور مطرح باشد. بر اساس موارد اشاره‌شده، نیاز به روش‌های سریع و قابل اعتماد برای ارزیابی تخریب زمین در این مناطق احساس می‌شود. بارتز و رز^۲ (۳) گزارش کردند از آن‌جایی که اندازه‌گیری درجای حساسیت خاک به فرآیند جداسدن و انتقال اغلب زمان‌بر و هزینه‌بر است، بنابراین استخراج رابطه یا روابطی بین پایداری خاکدانه و فرسایش-پذیری خاک برای تخمین تخریب خاک می‌تواند مفید باشد.

پایداری ساختمان خاک به عنوان توانایی آن در نگهداری آرایش ذرات و منافذ در هنگام مواجه‌شدن با تنش‌های متفاوت تعریف می‌شود (۲). پایداری خاکدانه‌ها می‌تواند به عنوان مقاومت خاک در برابر نیروهای تخریب‌کننده خارجی، مانند بارندگی، روان‌آب و باد تعریف شود. این آثار هم‌چنین ارتباط

1- Anthropogenic

2- Barthes and Roose

3- Al-Durrah and Bradford

$$b = \left(0.01 \sum_{i=1}^n f_i \ln^2 M_i - a^2 \right)^{0.5}$$

که در این روابط، f_i درصد فراوانی جز i ام و M_i میانگین حسابی اندازه ذرات جز i ام است. این دو کمیت (d_g) و (σ_g) به خوبی توزیع غیرنرمال (لگ-نرمال) اندازه ذرات اولیه خاک را کمی می کنند.

در قسمت دیگر، نمونه خاک جدا شده، ابتدا کلوخه های نمونه با اسپری کردن آب مرطوب شدند و پس از رسیدن به رطوبت مناسب با دست (بدون استفاده از چکش) خرد شدند. پس از هوا-خشک شدن، نمونه ها از الک ۴ میلی متر عبور داده شدند و از این نمونه برای اندازه گیری پایداری خاکدانه به روش های الک تر، شبیه ساز باران و فروسنج مخروطی افتان استفاده گردید.

اندازه گیری پایداری خاکدانه با استفاده از روش الک تر

برای ارزیابی پایداری ساختمان خاک به روش الک تر (۱۷)، از ۵۰ گرم خاک عبور داده شده از الک ۴ میلی متر با استفاده از یک سری الک (به ترتیب از بالا به پایین ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۱ میلی متر) استفاده شد. ابتدا نمونه خاک با آب فشان کمی مرطوب شد و سپس الک-ها به مدت ۵ دقیقه با سرعت ۳۰ نوسان در دقیقه و دامنه ۵ سانتی متر در آب شهر در دمای ۲۵ درجه سلسیوس تکان داده شدند.

معیارهای مختلفی برای بیان پایداری ساختمان خاک به روش الک کردن استفاده می شوند. در این پژوهش شاخص های میانگین وزنی قطر (MWD) و میانگین هندسی قطر (GMD) با توجه به تصحیح اثر شن، با استفاده از روابط زیر محاسبه شد:

$$MWD = \sum_{i=1}^n w_i \bar{X}_i \quad (3)$$

$$GMD = \exp \left(\sum_{i=1}^n w_i \log \bar{X}_i \right) \quad (4)$$

در این روابط، n تعداد دامنه های اندازه خاکدانه،

خاک های سطحی استان های اصفهان و چهارمحال بختیاری (شهرستان های تیران و کرون در استان اصفهان، و بروجن و لردگان در استان چهارمحال بختیاری) در شهریور ۱۳۹۴ جمع آوری شد. اکثر این خاک ها روی سازندهای آهکی دوران سوم زمین شناسی قرار دارند. هم چنین کاربری های مرتع، دیم، کشت آبی و آیش کاربری های عمده زمین در این نقاط بودند.

اندازه گیری ویژگی های زودپافت خاک

پس از انتقال نمونه های هوا-خشک شده به آزمایشگاه، نمونه ها به دو دسته تقسیم شدند. قسمتی از نمونه ها کوبیده شده و از الک ۲ میلی متری عبور داده شدند و برای اندازه-گیری بافت، ماده آلی و آهک استفاده گردیدند. بافت خاک به روش پیپت (۱۳)، درصد ماده آلی خاک به روش اکسایش تر یا والکی-بلاک (۲۱) و آهک خاک به روش تیتراسیون اسید باقی مانده با سود یک نرمال (۲۲) اندازه-گیری شد. اجزاء شن خاک نیز، با توجه به تقسیم بندی فرعی ذرات شن توسط سری الک های USDA (ASTM) شامل شن خیلی درشت (۲ mm) -۱، شن درشت (۱ mm -۰/۵)، شن متوسط (۰/۵ mm -۰/۲۵)، شن ریز (۰/۲۵ mm -۰/۱) و شن خیلی ریز (۰/۲۵ mm -۰/۰۳۵) جدا سازی شدند. هم چنین چهار جزء سیلت خاک، با توجه به تقسیم بندی فرعی ذرات (۰/۰۳۵ -۰/۰۳۵ mm -۰/۰۲/۰۲ -۰/۰۱ -۰/۰۱ و ۰/۰۰۲ -۰/۰۱ میلی متر) نیز با استفاده از قانون استوکز و روش پیپت اندازه گیری گردید (۱۳).

میانگین هندسی قطر ذرات (d_g) و انحراف معیار هندسی اندازه ذرات (σ_g) هم برای گروه ذرات اصلی خاک و هم برای ذرات خاک، با توجه به تقسیم بندی فرعی آنها با استفاده از روابط شیرازی و بورسما^۱ (۲۷) محاسبه شد:

$$d_g = \exp(a) \quad (1)$$

$$a = 0.01 \sum_{i=1}^n f_i \ln M_i$$

$$\sigma_g = \exp(b) \quad (2)$$

(شدت بارش) از دو شیر تنظیم دبی در مسیر لوله رابط استفاده شد. این دستگاه دارای دو استوانه شامل استوانه اصلی و استوانه نمونه بود. استوانه اصلی، استوانه‌های به ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر و قطر ۳۰ سانتی‌متر بود که استوانه نمونه به قطر ۱۰ سانتی‌متر در درون آن قرار می‌گرفت. میزان فرسایش ایجاد شده توسط باران شبیه‌سازی شده، به وسیله استوانه اصلی جمع‌آوری گردیدند.

در این پژوهش باران با شدت ۶۰ میلی‌متر در ساعت از ارتفاع ۱/۵ متری با قطر قطرات ۲/۲۲ میلی‌متر (۰/۴۵ گرم) به مدت ۱۰ دقیقه روی نمونه‌ها شبیه‌سازی شد. قطر قطرات باران به روش وزنی تعیین شد. پس از پایان بارش، میزان خاک جدا شده از سطح خاک از استوانه اصلی به دقت جمع‌آوری شد و پس از خشک شدن در آون با استفاده از رابطه زیر میزان فرسایش خاک محاسبه شد:

$$S = \frac{M}{A \times T} \quad (5)$$

که در این رابطه، S نرخ فرسایش پاشمانی ($\text{g} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^2$)، M جرم خاک خشک شده در آون (g)، A سطح مقطع نمونه (m^2) و T زمان بارش (min) است.

\bar{X}_i میانگین قطر خاکدانه‌های روی هر الک نام، W_i نسبت وزن خشک خاکدانه‌های روی الک نام به وزن خشک کل خاکدانه‌هاست.

آماده‌سازی نمونه خاک برای اندازه‌گیری مقاومت برشی و پاشمان

برای اندازه‌گیری پاشمان و مقاومت برشی خاک از هر خاک، دو نمونه به طور جداگانه تهیه شد. نمونه‌های عبور داده شده از الک ۴ میلی‌متر، در ظروف پلاستیکی به قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۱ سانتی‌متر ریخته شدند. سپس نمونه‌ها تحت مکش ۷ سانتی‌متر از پایین به مدت ۲۴ ساعت مرطوب گردیدند. پس از مرطوب شدن نمونه‌ها، میزان خاک جدا شده (فرسایش پاشمانی) با دستگاه شبیه‌ساز باران و مقاومت فروروی خاک با استفاده از فروسنج مخروطی افنان روی نمونه‌های جداگانه اندازه‌گیری شد (شکل ۱).

اندازه‌گیری نرخ پاشمان در آزمایشگاه

برای اندازه‌گیری پاشمان، دستگاه پاشمان چندمتغیره، شبیه به دستگاه طراحی شده توسط خلیل‌مقدم و همکاران (۱۸)، طراحی و ساخته شد (شکل ۱a). این دستگاه شامل سیستم شبیه‌ساز باران، سیستم تأمین شیب، سیستم حرکت چرخشی نمونه و آزمون پاشمان است. سیستم شبیه‌ساز باران از یک مخزن آب، پایه، شیر تنظیم دبی و صفحه بارش تشکیل شده است. به منظور هم‌پوشانی کامل باران با نمونه خاک، با توجه به ابعاد نمونه (قطر ۱۰ سانتی‌متر، طبق الگوی مورگان، صفحه نازل با ابعاد ۱۵×۲۰ سانتی‌متر با ۳۰ نازل طراحی شد. برای این که قطرات باران به یک نقطه برخورد نکنند، از یک الکتروموتور با دور ۵ دور در دقیقه برای چرخاندن نمونه استفاده شد. هم‌چنین برای این که آب روی نمونه جمع نشود، با استفاده از سیستم تأمین شیب، شیب ۹٪ روی نمونه اعمال گردیدند. سیستم تأمین آب شامل یک مخزن با سطح آب تقریباً ثابت (۰/۵ سانتی‌متر تغییر سطح در طول آزمایش) بود که بالاتر از صفحه بارش قرار گرفته و توسط یک لوله رابط به صفحه بارش متصل شده بود. برای تنظیم دبی

آلی و آهک) با استفاده از روش K -means در محیط نرم افزار MATLAB خوشه بندی شدند.

خوشه بندی K -means یک روش جزء بندی است که در آن اجزاء (نمونه های) داخل یک خوشه که تا حد ممکن به یکدیگر نزدیک هستند و تا حد ممکن هم از نمونه های داخل خوشه دیگر دوراند، قرار می گیرند. هر خوشه توسط ویژگی های مرکز آن تعریف می شود. مرکز هر خوشه نقطه ای است که مجموع فاصله های تمام نمونه های موجود در آن خوشه از این نقطه حداقل است. روش K -means مرکز خوشه را به طور متفاوت از هر فاصله اندازه گیری شده برای حداقل کردن مجموع تفاوت ها محاسبه می کند (MATLAB v. 14 software, Mathworks, Inc., Natick, MA, USA). پس از خوشه بندی، مقایسه میانگین بین خوشه ها با روش مدل خطی تعمیم یافته^۱ (GLM) در سطح احتمال ۵ درصد در قالب طرح کاملاً تصادفی با آزمون حداقل تفاوت معنی دار^۲ (LSD) توسط نرم افزار SAS 9.0 انجام شد.

نتایج و بحث

توصیف آماری خاک های مورد مطالعه

توصیف آماری برخی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک های مورد بررسی در جدول ۲ نشان داده شده است. جزء سیلت در اکثر خاک ها بخش عمده ذرات معدنی خاک را تشکیل می دهد؛ به طوری که در نام-گذاری بافت اکثر خاک ها صفت «سیلتی» وجود دارد. دامنه درصد شن ۱/۵ تا ۵۱، درصد سیلت ۳۴ تا ۷۳، و درصد رس ۱۱ تا ۳۵ می باشد. عمده ذرات شن در بخش های شن ریز قرار می گرفت و عمده ذرات سیلت هم در بخش سیلت خیلی ریز قرار داشت؛ بنابراین توزیع ذرات شن و سیلت در اجزاء شان همگن نبودند. این دلیل اصلی، تفاوت میانگین هندسی قطر ذرات محاسبه شده با توجه به تقسیم بندی های فرعی و اصلی ذرات بود که باعث شد که میانگین هندسی قطر ذرات محاسبه شده از

اندازه گیری مقاومت برشی خاک با استفاده از فروسنج مخروطی اُفتان

برای اندازه گیری مقاومت برشی خاک، فروسنج مخروطی مشابه فروسنج مخروطی آزمایشگاهی جنونور مدل ۲۰۰ گرمی با اندکی تغییر طراحی و ساخته شد (شکل ۱b). ال-دوره و برادفورد (۱) بیان کردند فروسنج اُفتان یک روش سریع و ارزان برای اندازه گیری مقاومت برشی زهکشی نشده خاک است.

این دستگاه از پنج قسمت اصلی، شامل پایه، میله فروسنج، مخروط اُفتان، وزنه و ساعت اندازه گیری تشکیل شده است. ساعت اندازه گیری روی سر میله فروسنج قرار می گیرد و میزان فروروی مخروط را با دقت ۰/۰۱ میلی متر اندازه گیری می کند.

با استفاده از رابطه زیر، میزان فروروی اندازه گیری-شده با فروسنج مخروطی اُفتان را می توان به مقاومت برشی خاک (τ) تبدیل کرد:

$$\tau = K(Q/h^2) \quad (6)$$

که در این رابطه، Q وزن مخروط (g) و h میزان فروروی مخروط در خاک (mm) و K یک ضریب ثابت است که عمدتاً به بافت خاک بستگی دارد. برای بافت های مختلف مقدار K از جدول ۱ استخراج شد. اگر Q بر حسب گرم، h بر حسب میلی متر و از مقادیر جدول ۱ برای تخمین K در معادله ۶ استفاده شود، مقاومت برشی بر حسب kN/m^2 یا kPa به دست می آید.

تجزیه و تحلیل های آماری

تجزیه و تحلیل های آماری، شامل همبستگی و مقایسه میانگین توسط نرم افزار SAS 9.0 در سطح معنی داری ۵ درصد انجام شد. پس از بررسی همبستگی روش ها و شاخص های مختلف برآورد پایداری ساختمان و مقاومت خاک به منظور اعتبارسنجی و قابل مقایسه بودن روش های مختلف در خاک های متفاوت، خاک-های مورد مطالعه با توجه به ویژگی های اولیه (بافت، ماده

1- Generalized linear model

2- Least significant difference

کلیشادی و همکاران: ارزیابی همخوانی روش‌های مختلف...

روی تقسیم‌بندی فرعی، کوچک‌تر از میانگین هندسی قطر اجزاء اصلی (شن، سیلت و رس) باشد. دامنه مقدار ماده آلی بین ۰/۰۸ تا ۸/۸ درصد بود که نشان‌دهنده‌ی میزان ماده آلی کم تا زیاد خاک‌های مورد بررسی است. دامنه تغییرات کربنات کلسیم معادل خاک سطحی ۱۰ تا ۶۳ درصد بود.

میانگین وزنی قطر (MWD) و میانگین هندسی قطر (GMD) خاکدانه‌ها در خاک‌های مورد مطالعه کم و میزان پاشمان در این خاک‌ها زیاد بود. نتایج پژوهش خلیل مقدم و همکاران (۱۸) نشان داد که در خاک‌های آهکی زاگرس نیز فرسایش پاشمانی خیلی شدید است.



a



b

شکل (۱) نمایی از (a) شبیه‌ساز باران چند متغیره و (b) دستگاه فروسنج مخروطی اُفتان
Figure(1)–View of a) multiple splash set and b) fall-cone penetrometer

جدول (۱) مقادیر ضریب تجربی K برای بافت‌های مختلف خاک (اقتباس از تونر، ۱۹۳۰)
Table (1) Values of K coefficient for different soil textures (after Towner, 1973)

| K | بافت |
|------|---------------------------------|
| 7.8 | رسی (Clay) |
| 5.4 | لوم رسی (Clay loam) |
| 7.4 | لوم رسی سیلتی (Silty clay loam) |
| 10.0 | لوم سیلت (Silt loam) |
| 6.9 | لوم (Loam) |
| 16.0 | لوم شنی (Sandy loam) |

نشان داد. شاید علت این امر وابستگی این پارامترها به مقدار ماده آلی خاک (جدول ۴) و در نتیجه نیروی چسبندگی بین ذرات باشد. با توجه به نتایج جدول ۳، با افزایش مقاومت برشی خاک میزان پاشمان کاهش یافت. هنگامی که یک جسم صلب خارجی به درون خاک فرو می‌رود، میزان فروروی جسم در خاک به چسبندگی بین ذرات خاک و اصطکاک بین ذرات خاک و جسم بستگی دارد (۱۰). در این پژوهش اندازه‌گیری مقاومت برشی خاک با فروسنج مخروطی اُفتان در شرایط نزدیک اشباع انجام شد.

همبستگی بین روش‌های برآورد پایداری ساختمان و مقاومت خاک

ضرایب همبستگی بین شاخص‌های مختلف پایداری ساختمان و مقاومت خاک و فرسایش پاشمانی در جدول ۳ ارائه شده است. نرخ پاشمان با مقاومت برشی اندازه‌گیری شده با فروسنج مخروطی اُفتان و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها همبستگی منفی و معنی‌دار (در سطح ۵ درصد) داشت؛ هم‌چنین همبستگی قوی و معنی‌داری بین MWD و GMD مشاهده شد. مقاومت برشی نیز، با مقدار MWD و GMD همبستگی مثبت و معنی‌دار (در سطح ۱ درصد)

جدول (۲) توصیف آماری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد بررسی

| Property | unit | min | Max | Mean | CV |
|----------------------------------|--|--------|--------|--------|-------|
| S | $\text{g} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ | 18.21 | 97.18 | 67.06 | 27.9 |
| τ | kPa | 15.33 | 112.89 | 51.63 | 47.2 |
| GMD | mm | 0.423 | 0.792 | 0.597 | 14.0 |
| MWD | mm | 0.218 | 1.096 | 0.519 | 32.0 |
| OC | % | 0.08 | 8.88 | 1.17 | 145.2 |
| CCE | % | 10.7 | 63.2 | 36.3 | 37.4 |
| Sand (0.05–2mm) | % | 1.4 | 51.2 | 17.6 | 74.0 |
| Silt (0.002–0.05 mm) | % | 34.5 | 74.0 | 57.9 | 14.3 |
| Clay (0–0.002 mm) | % | 11.3 | 35.0 | 24.5 | 26.6 |
| Very course sand (1–2 mm) | % | 0.04 | 12.6 | 3.4 | 93.1 |
| Course sand (0.5–1 mm) | % | 0.0 | 10.9 | 2.40 | 102.6 |
| Medium sand (0.5–0.25 mm) | % | 0.06 | 9.1 | 2.82 | 80.6 |
| Fine sand (0.1–0.25 mm) | % | 0.3 | 27.2 | 5.0 | 103.9 |
| Very fine sand (0.05–0.1 mm) | % | 0.02 | 10.0 | 4.0 | 63.7 |
| Very course silt (0.035–0.05 mm) | % | 10.1 | 16.1 | 13.1 | 11.1 |
| Course silt (0.02–0.035 mm) | % | 5.3 | 14.2 | 9.8 | 20.2 |
| Medium silt (0.01–0.02 mm) | % | 3.8 | 12.9 | 9.0 | 23.0 |
| Very fine silt (0.002–0.01 mm) | % | 12.5 | 47.0 | 25.9 | 26.8 |
| d_g main fractions | mm | 0.0091 | 0.0109 | 0.0288 | 90.1 |
| σ_g main fractions | – | 4.47 | 12.59 | 8.53 | 24.9 |
| d_g all fractions | mm | 0.0051 | 0.0582 | 0.0155 | 79.5 |
| σ_g all fractions | – | 3.50 | 10.72 | 6.73 | 27.0 |

S: میزان پاشمان؛ τ : مقاومت برشی؛ GMD: میانگین هندسی قطر خاکدانه؛ MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه؛ OC: کربن آلی؛ CCE: کربنات کلسیم معادل؛ d_g و σ_g به ترتیب میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات با توجه به تقسیم‌بندی اصلی (main fractions) و فرعی ذرات (all fractions)؛ CV: ضریب تغییرات

جدول (۳) ضرایب همبستگی بین شاخص‌های مختلف برآورد پایداری ساختمان خاک و فرسایش پاشمانی

Table (3) Correlation coefficients between different indices of soil structural stability and splash erosion

| | S | τ | GMD | MWD |
|--------|---------|---------|---------|-----|
| S | 1 | | | |
| τ | -0.415* | 1 | | |
| GMD | -0.395* | 0.679** | 1 | |
| MWD | -0.287 | 0.693** | 0.928** | 1 |

S: میزان پاشمان؛ τ : مقاومت برشی؛ GMD: میانگین هندسی قطر خاکدانه، MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها
* و ** به ترتیب معنی‌داری در سطح ۵ و ۱ درصد.

باران بیش از نیروی چسبندگی بین ذرات خاک باشد، قطره باران قادر به جداکردن ذرات خاک و در نتیجه پاشمان می‌شود. بنابراین در یک شدت بارش ثابت، با افزایش چسبندگی بین ذرات مقدار پاشمان کاهش می‌یابد؛ بنابراین با افزایش نیروی چسبندگی بین ذرات مقاومت برشی افزایش یافته، در نتیجه پاشمان ذرات کاهش می‌یابد.

میانگین وزنی (MWD) و هندسی (GMD) قطر

جنس مخروط دستگاه از آلومینیوم است که صیقل داده شده است؛ بنابراین در این شرایط می‌توان از اصطکاک بین مخروط و ذرات خاک چشم‌پوشی کرد و می‌توان گفت عامل اصلی میزان فروروی مخروط اُفتان چسبندگی بین ذرات خاک است. با افزایش چسبندگی بین ذرات خاک، میزان فروروی مخروط در خاک کاهش یافته، مقاومت برشی افزایش می‌یابد (معادله ۶). از طرفی، هنگامی که نیروی وارد شده بر اثر برخورد قطره

تقسیم‌بندی فرعی ذرات (σ_g)، شن خیلی درشت، شن درشت، شن متوسط، شن ریز، سیلت ریز و سیلت خیلی ریز همبستگی معنی‌داری دارد؛ بنابراین میزان پاشمان، در مقایسه با دیگر شاخص‌های پایداری ساختمان خاک، بیش‌تر به ویژگی‌های بافت خاک (یا به عبارت دیگر اندازه ذرات) وابسته بود. بنابراین می‌توان گفت توزیع اندازه ذرات، عامل اصلی جداشدن و انتقال ذرات در فرسایش پاشمانی در خاک‌های مورد مطالعه بود.

میزان پاشمان با شن و اجزای شن (به جز شن خیلی ریز) همبستگی مثبت و معنی‌دار داشت. نتایج این پژوهش نشان داد که از نظر عددی، ضریب همبستگی شن و شن ریز با میزان پاشمان تقریباً برابر بود. در واقع، چون در خاک‌های مورد مطالعه عمده ذرات شن در اندازه شن ریز قرار گرفتند و شن ریز به فرسایش حساس است، بنابراین با افزایش درصد شن و شن ریز میزان پاشمان افزایش یافته است. برخلاف انتظار، همبستگی بین میزان سیلت و پاشمان منفی و معنی‌دار است. شاید دلیل آن به سبب بخش عمده سیلت در اندازه سیلت خیلی ریز باشد. نتایج کاراواکا و همکاران^۳ (۶) نشان داد سیلت ریز دارای هیومین و ماده آلی بیش‌تری نسبت به رس بوده و پایداری خاکدانه‌ها همبستگی زیادی با کربن آلی و هیومین موجود در جزء سیلت ریز دارد. از طرفی، لی‌بیوسینانس و همکاران (۱۹) گزارش کردند که پایداری خاکدانه به میزان ماده آلی خاک و مجموع رس و سیلت ریز وابسته است. مطالعه بیوکس-فایوس^۴ و همکاران (۵) نشان داد سیلت ریز یا شن درشت همبستگی مثبت و معنی‌داری با پایداری خاکدانه دارند.

میزان پاشمان با میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر با توجه به تقسیم‌بندی اصلی و فرعی ذرات همبستگی مثبت و معنی‌دار داشت. افزایش میانگین قطر ذرات نشان‌دهنده درشت‌تر بودن بافت خاک است. در واقع با افزایش میانگین هندسی قطر ذرات سهم ذرات درشت بیش‌تر می‌شود و چون ذرات درشت چسبندگی ندارد و سطح نمونه

خاکدانه‌های پایدار در آب در واقع نشان‌دهنده مقاومت خاکدانه‌ها در برابر نیروی تخریب‌کننده توسط آب است. شاید علت معنی‌دار نشدن همبستگی بین پاشمان و MWD ضعیف بودن همبستگی بین پاشمان و GMD به دلیل تفاوت در مکانیسم‌های جداسازی ذرات باشد. همان‌طور که بیان شد، در فرسایش پاشمانی، عامل جداکننده ذرات، انرژی وارد شده در اثر برخورد قطرات باران است؛ ولی در روش الک‌تر عامل اصلی جداشدن ذرات وارفتگی است (۱۱).

نتایج خلیل‌مقدم و همکاران (۱۸) نیز نشان داد که میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و مقاومت برشی خاک (اندازه‌گیری شده با پره برشی) بر دیگر پارامترها (بافت خاک و توپوگرافی) برای بررسی رفتار فرسایش پاشمانی خاک برتری دارند. نتایج آن‌ها نشان داد که ماده آلی، مقاومت برشی سطح خاک و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها فاکتورهای مناسب‌تری برای بررسی روند تغییرات پاشمان در کاربری‌های مختلف زمین هستند. سای‌گین و همکاران^۱ (۲۵) میانگین وزنی قطر خاکدانه (MWD) را به سه روش پیشنهاد شده توسط لی‌بیسونایس^۲ (۲۰) و روش سای‌گین و همکاران (۲۴) اندازه‌گیری کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که MWD محاسبه شده از روش‌های مختلف پیشنهادی توسط لی‌بیسونایس (۲۰) همبستگی مثبت و معنی‌دار قابل توجهی با یکدیگر دارند؛ اما تنها روش شکست مکانیکی پیشنهاد شده توسط لی‌بیسونایس (۲۰) با روش سای‌گین و همکاران (۲۴) همبستگی معنی‌دار داشت.

همبستگی بین شاخص‌های پایداری ساختمان و ویژگی‌های ذاتی خاک

ضرایب همبستگی بین شاخص‌های مختلف پایداری ساختمان و ویژگی‌های ذاتی خاک در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان پاشمان با شن، سیلت، میانگین هندسی قطر با توجه به تقسیم‌بندی فرعی ذرات (d_g)، انحراف معیار هندسی قطر با توجه به

3- Caravaca *et al.*
4- Biox-fayos

1- Saygin *et al.*
2- Le Bissonnais

پیوند بین ذرات اولیه و ثانویه خاک است که باعث افزایش مقدار، اندازه و پایداری خاکدانه‌ها می‌شود. به طور کلی مواد آلی با کاهش آب‌پذیری^۳ (سرعت جذب آب توسط خاک) و افزایش چسبندگی بین خاکدانه‌ها باعث افزایش پایداری خاکدانه‌ها می‌گردد (۸، ۱۹). نتایج سای‌گین و همکاران (۲۵)

نشان داد MWD محاسبه‌شده با چهار روش (سه روش پیشنهادی لی‌یوسیانس (۲۰) و روش سای‌گین و همکاران (۲۴)) همبستگی مثبت و معنی‌داری با میزان ماده آلی دارد؛ ولی میزان شن، سیلت و رس تاثیر معنی‌داری بر این پارامتر ندارند. آن‌ها بیان کردند میزان ماده آلی نسبت به دیگر پارامترها نقش اساسی در مقدار MWD در مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد. خزایی و همکاران (۱۶) در مطالعه‌ای روی ۲۱ مجموعه از خاک‌های استان همدان، پایداری خاکدانه‌ها را به روش الک‌تر با زمان‌های مختلف الک‌کردن اندازه‌گیری کردند. نتایج آن‌ها نشان داد ماده آلی بیش‌ترین نقش را در پایداری خاکدانه‌ها دارد و با افزایش مدت زمان الک‌کردن نقش ماده آلی در پایداری خاکدانه‌ها کاهش می‌یابد.

ارزیابی همخوانی شاخص‌های مختلف پایداری ساختمان و مقاومت برای خاک‌های مختلف

برای ارزیابی همخوانی نتایج روش‌های مختلف برآورد پایداری ساختمان خاک، خاک‌های مورد مطالعه بر اساس ویژگی‌های ذاتی خاک خوشه‌بندی شدند. خوشه‌بندی بر اساس ویژگی‌های ذاتی خاک، شامل ماده آلی، آهک، شن، سیلت و رس انجام گردید. این ویژگی‌ها در خاک‌های مورد مطالعه دارای دامنه گسترده-ای بودند (جدول ۲). برای خوشه‌بندی تعداد خوشه‌های مختلف امتحان شد. نتایج نشان داد مناسب‌ترین خوشه-بندی برای تفسیر نتایج، تعداد چهار خوشه بود. میانگین ویژگی‌های ذاتی خاک هر چهار خوشه در جدول ۵ ارائه شده است.

کوچک است، قطره باران قادر به جابه‌جایی ذرات درشت و ایجاد پاشمان است. در فرسایش پاشمانی در شرایط مزرعه، ذرات توسط قطرات باران جدا می‌شوند و سپس توسط جریان‌های ریزشیار^۱ به خارج از سطح یا شیار منتقل می‌شوند؛ ولی در این پژوهش و پژوهش‌های مشابه، چون سطح نمونه کوچک است قطره باران به طور مستقیم قادر است ذره جداشده از سطح خاک را به بیرون پرتاب کند.

جداشدن ذرات خاک توسط قطرات باران به چندین ویژگی قطره باران، شامل اندازه و جرم قطرات، سرعت قطره، انرژی جنبشی و زاویه برخورد قطره باران بستگی دارد (۴، ۲۶، ۲۸). خلیل مقدم و همکاران (۱۸) میزان پاشمان را در برخی خاک‌های زاگرس مرکزی اندازه‌گیری کردند. نتایج آن‌ها نشان داد فرسایش پاشمانی تحت تاثیر بافت خاک نبوده، به‌طور عمده تحت تاثیر کاربری زمین است. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد میزان پاشمان در خاک‌های ریزبافت کم‌تر است.

مقاومت برشی با کربن آلی، درصد سیلت، سیلت خیلی ریز و میانگین هندسی قطر ذرات اصلی و فرعی همبستگی معنی‌داری داشت. میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها همبستگی مثبت و معنی‌داری با میزان کربن آلی خاک داشت (جدول ۴). با افزایش ماده آلی، به دلیل نقش چسبانندگی ذرات به یکدیگر و خاکدانه‌سازی، مقاومت برشی، میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها افزایش یافته است. در واقع ماده آلی با افزایش چسبندگی بین ذرات مقاومت خاک را در برابر فروروی مخروط در خاک افزایش می‌دهد و مخروط تا عمق کم‌تری به درون خاک نفوذ می‌کند؛ بنابراین مقاومت برشی خاک افزایش می‌یابد. نتایج هوایی و همکاران (۱۲) نیز نشان داد مقاومت برشی اندازه‌گیری شده با جعبه برش صحرایی در محل همبستگی معنی‌داری با توزیع اندازه ذرات و میزان سنگ‌ریزه خاک دارد.

ساراه^۲ (۲۳) بیان کرد ماده آلی به عنوان یک عامل

1- Micro-rill
2- Sarah

3- Wettability

جدول (۴) ضرایب همبستگی بین شاخص‌های مختلف برآورد پایداری ساختمان و ویژگی‌های ذاتی خاک

Table(4) Correlation coefficients between different soil structural stability indices and intrinsic soil properties

| Property | S | τ | GMD | MWD |
|----------------------------------|----------|---------|---------|---------|
| OC | -0.134 | 0.691** | 0.610** | 0.803** |
| CCE | -0.109 | 0.050 | 0.270 | 0.174 |
| Sand (0.05–2mm) | 0.551** | -0.371 | -0.209 | -0.242 |
| Silt (0.002–0.05 mm) | -0.581** | 0.451* | 0.174 | 0.224 |
| Clay (0–0.002 mm) | -0.366 | 0.171 | 0.198 | 0.199 |
| Very course sand (1–2 mm) | 0.463* | -0.370 | -0.138 | -0.149 |
| Course sand (0.5–1 mm) | 0.428* | -0.363 | -0.134 | -0.154 |
| Medium sand (0.5–0.25 mm) | 0.483** | -0.372 | -0.190 | -0.217 |
| Fine sand (0.1–0.25 mm) | 0.518** | -0.284 | -0.241 | -0.273 |
| Very fine sand (0.05–0.1 mm) | 0.342 | -0.175 | -0.106 | -0.152 |
| Very course silt (0.035–0.05 mm) | 0.092 | 0.215 | 0.193 | 0.238 |
| Course silt (0.02–0.035 mm) | 0.068 | -0.196 | -0.211 | -0.247 |
| Medium silt (0.01–0.02 mm) | 0.382 | 0.043 | -0.186 | -0.117 |
| Very fine silt(0.002–0.01 mm) | -0.618** | 0.535** | 0.283 | 0.323 |
| d_g main fractions | 0.499** | -0.317 | -0.183 | -0.211 |
| σ_g main fractions | 0.535** | -0.412* | -0.183 | -0.243 |
| d_g all fractions | 0.505** | -0.352 | -0.171 | -0.193 |
| σ_g all fractions | 0.496** | -0.407* | -0.160 | -0.204 |

S: میزان پاشمان؛ τ : مقاومت برشی؛ GMD: میانگین هندسی قطر خاکدانه؛ MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه؛ OC: کربن آلی؛ CCE: کربنات کلسیم معادل؛ d_g : میانگین هندسی قطر ذرات؛ σ_g : انحراف معیار هندسی قطر ذرات؛ CV: ضریب تغییرات* و** به ترتیب معنی‌داری در سطح ۵ و ۱ درصد.

جدول (۵) میانگین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خوشه‌های مختلف خاک‌های مورد مطالعه

Table (5) Means of physical and chemical properties among different soil clusters

| | CCE | OC | Sand | Silt | Clay |
|-----------|------|------|------|------|------|
| Cluster 1 | 15.6 | 0.74 | 13.4 | 60.2 | 26.4 |
| Cluster 2 | 33.3 | 1.14 | 23.4 | 55.2 | 21.4 |
| Cluster 3 | 38.9 | 1.68 | 7.7 | 63.2 | 29.1 |
| Cluster 4 | 54.3 | 0.42 | 38.8 | 45.8 | 15.4 |

OC: کربن آلی؛ CCE: کربنات کلسیم معادل، cluster: خوشه

در این خوشه بیش‌تر از سایر خوشه‌هاست. هم‌چنین میزان سیلت و رس این خوشه نسبت به دیگر خوشه‌ها، بیش‌تر بوده و میزان شن این خوشه کم‌تر از سایر خوشه‌هاست (جدول ۵). در واقع ماده آلی، به‌عنوان یک ماده سیمان-کننده با چسباندن ذرات به یکدیگر باعث افزایش پایداری ساختمان خاک در این خوشه شده است. هم‌چنین میزان رس بیش‌تر در این خوشه، به‌عنوان یک ماده چسباننده ذرات باعث افزایش پایداری ساختمان خاک در این خوشه گردیده است. از طرفی، میزان شن کم‌تر در این خوشه باعث حضور کم‌تر هسته‌های درشت در مرکز خاکدانه‌ها و افزایش پایداری خاکدانه‌ها شده است.

مقایسه شاخص‌های پایداری ساختمان خاک در خوشه‌های مختلف در شکل ۲ ارائه شده است. اگرچه بر اساس جدول ۴، نرخ پاشمان، بیش‌تر با ویژگی‌ها و شاخص‌های توزیع اندازه ذرات خاک همبستگی معنی‌دار داشت و دیگر شاخص‌های پایداری ساختمان خاک با کربن آلی همبستگی معنی‌دار داشتند، ولی تقریباً هر چهار شاخص روند یکسانی را برای مقایسه پایداری ساختمان خاک در خوشه‌های مختلف نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، خوشه ۳ پایدارترین خوشه با در نظر گرفتن چهار شاخص پایداری ساختمان خاک است. همان‌طور که در جدول ۵ دیده می‌شود، میزان کربن آلی



شکل (۲) مقایسه همخوانی روش‌های مختلف برآورد پایداری ساختمان و مقاومت خاک در خوشه‌های مختلف
 Figure(2) Consistency comparisons among different methods of aggregate stability determination and soil strength in different clusters

خاک با ذرات رس کمپلکس شده و هرچه این نسبت بزرگتر باشد، یعنی پیوندهای بیشتری بین رس و کربن آلی تشکیل شده است (در واقع میزان رس بیشتری با کربن آلی اشباع شده است). اگر مقدار کربن آلی خاک از این نسبت بیشتر باشد، مقدار اضافی آن را کربن آلی کمپلکس نشده^۲ (NCOC) می‌نامند؛ بنابراین رفتار فیزیکی خاک را بخشی از کربن آلی که با ذرات رس کمپلکس تشکیل می‌دهند (نه مقدار کل کربن آلی) کنترل می‌کند. در این پژوهش، نسبت 100C/Clay برای خوشه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴، به ترتیب برابر ۰/۲۸، ۰/۵۳، ۰/۵۷ و ۰/۲۷ بود. روند تغییرات پایداری خاکدانه‌ها با روش‌های مختلف به خوبی با روند تغییرات

دکستر و همکاران (۹) به اثر چشم‌گیر کربن آلی و رس بر ویژگی‌های فیزیکی خاک اشاره کرده و دریافتند که در خاک‌های با ماده آلی کم، کربن آلی بیش‌تر در بخش کمپلکس بوده و مقدار کربن کمپلکس شده با رس^۱ (COC) ویژگی‌های فیزیکی خاک را کنترل می‌کند. آن‌ها گزارش کردند که حداکثر ۱۰ گرم رس قادر خواهد بود با ۱ گرم کربن آلی کمپلکس برقرار کند، که در این حالت گفته می‌شود خاک از نظر کربن آلی به حالت اشباع خود رسیده است. در این رابطه، دکستر و همکاران (۹) یک نسبت مساوی با ۱۰ برابر میزان کربن آلی تقسیم بر میزان رس خاک (100C/Clay) تعریف کردند. در صورتی که این نسبت، کوچک‌تر و برابر با ۱ باشد، تمامی کربن آلی

2- Non-complexed organic carbon

1- Complexed organic carbon

باران است؛ ولی در روش الک تر عامل اصلی جداسازی ذرات وارفتگی است. مقاومت برشی خاک که با فروسنگ مخروطی اُفتان اندازه‌گیری شد، هم به ماده آلی و هم به توزیع اندازه ذرات خاک وابسته بود. نتایج ارزیابی روش‌های مختلف برآورد پایداری ساختمان خاک در این پژوهش نشان داد که هر سه روش نتایج تقریباً مشابهی را برای گروه‌های خاک مختلف ارائه می‌دهند. مقاومت برشی اندازه‌گیری شده با فروسنگ مخروطی اُفتان همبستگی معنی‌داری با نتایج به دست آمده از شبیه‌ساز باران و الک تر داشت و هم‌چنین روند تغییرات پایداری ساختمان را در خاک‌های مختلف مانند روش‌های معمول ذکر شده ارزیابی کرد. بنابراین با توجه به قابل حمل بودن و قابلیت اندازه‌گیری صحرائی با دستگاه فروسنگ مخروطی اُفتان، می‌توان این روش را به عنوان یک روش سریع و درجا برای اندازه‌گیری پایداری و مقاومت خاک در برابر فرسایش پاشمان معرفی کرد.

100C/Clay هم‌خوانی دارد؛ به طوری که با کاهش این نسبت، پایداری خاکدانه‌ها نیز کاهش می‌یابد. هر چهار روش نشان دادند که بین خوشه‌های ۱، ۲ و ۴ تفاوت معنی‌داری وجود ندارد. یکسان بودن روند نتایج به دست آمده از روش‌های مختلف برآورد پایداری خاکدانه در خوشه‌های مختلف می‌تواند بیان‌گر این نتیجه باشد که این روش‌ها به جای یکدیگر برای مقایسه اثر تیمارهای مختلف، و ویژگی‌های خاک قابل استفاده هستند و به نتایج مشابهی منجر می‌شوند.

نتیجه‌گیری

به طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که پایداری ساختمان در خاک‌های مورد مطالعه کم بوده و میزان فرسایش پاشمانی در این خاک‌ها زیاد است. نتایج نشان داد که میزان پاشمان، به طور عمده به توزیع اندازه ذرات خاک وابسته است و پایداری خاکدانه‌ها به روش الک تر بیش‌تر به ماده آلی خاک حساس است. شاید علت این یافته به دلیل تفاوت در مکانیسم‌های جداسازی ذرات باشد. همان‌طور که گفته شد، در فرسایش پاشمانی عامل جداکننده ذرات انرژی وارده در اثر برخورد قطرات

منابع

1. Al-Durrah, M., Bradford, J. 1981. New methods of studying soil detachment due to waterdrop impact. *Soil Science Society of America Journal*, 45: 949–953.
2. Angers, D.A., and Carter, M.R. 1996. Aggregation and organic matter storing in cool, humid agricultural soils. In: Carter, M.R., and Stewart, B.A. (Eds.). *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils*. Advanced in Soil Science. Lewis Publishers, CRC Press, Inc., Boca Raton, FL. pp: 193–211.
3. Barthes, B., and Roose, E. 2002. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *Catena*, 47: 133–149.
4. Bhattacharyya, R., Fullen, M.A., Davies, K., and Booth, C.A. 2010. Use of palm-mat geotextiles for rainsplash erosion control. *Geomorphology*, 119: 52–61.
5. 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.
6. Caravaca, F., Lax, A., and Albaladejo, J. 2001. Soil aggregate stability and organic matter in clay and fine silt fractions in urban refuse-amended semiarid soils. *Soil Science Society of America Journal*, 65: 1235–1238.
 7. Cerda, A. 2000. Aggregate stability against water forces under different climates on agriculture land and scrubland in southern Bolivia. *Soil and Tillage Research*, 57: 159–166.
 8. Chenu, C., Le Bissonnais, Y., and Arrouays, D. 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal*, 64: 1479–1486.
 9. Dexter, A.R., Richard, G., Arrouays, D., Czyż, E.A., Jolivet, C., and Duval, O. 2008. Complexed organic matter controls soil physical properties. *Geoderma* 144, 620–627.
 10. Elbanna, E.B., and Witney, B.D. 1987. Cone penetration resistance equation as a function of the clay ratio, soil moisture content and specific weight. *Journal of Terramechanics* 24:41–56.
 11. Emerson, W.W. 1967. A classification of soil aggregates based on their coherence in water. *Australian Journal of Soil Research*, 5: 47–57.
 12. Havaee, S., Mosaddeghi, M.R., and Ayoubi, S. 2015. In situ surface shear strength as affected by soil characteristics and land use in calcareous soils of central Iran. *Geoderma*, 237–238: 137–148
 13. Gee, G.W., and Bauder, J.W. 1986. Particle size analysis. In: Klute, A. (Ed.), *Method of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, Agronomy Handbook No 9. ASA and SSSA, Madison, WI. pp. 383–411.
 14. Jalalian, A. 2011. Soil erosion and consequence in the country. 12th Iranian soil congress. 3–5 September. Tabriz. Iran. (In persian).
 15. Jaleh, A, 2006. Application of SWAT 2000 model for estimating runoff and sediment in Vanak watershed, a sub-basin of northern Karun. Msc thesis, Isfahan university of technology (in persian with english abstract).
 16. Khazaei, A., Mosaddeghi, M.R., Mahboubi, A.A. 2008. Structural stability assessment using wet sieving method and its relations with some intrinsic properties in 21 soil series from Hamedan province. (in persian with english abstract).
 17. Kemper, W., and Rosenau, R. 1986. Aggregate stability and size distribution, In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and mineralogical Methods*. 2nd ed. ASA, Madison, WI, pp. 425–442.
 18. Khalili Moghadam, B., Jabarifar, M., Bagheri, M., and Shahbazi, E. 2015. Effects of land use change on soil splash erosion in the semi-arid region of Iran. *Geoderma*, 241–242: 210–220.

19. Le Bissonnais, Y., Blavet, D., De Noni, G., Laurent, J.Y., Asseline, J., and Chenu, C. 2006. Erodibility of Mediterranean vineyard soils: relevant aggregate stability methods and significant soil variables. *European Journal of Soil Science*, 58: 188–195.
20. Le Bissonnais, Y., 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 47: 425–437.
21. Nelson, D.W., and Sommers, L.P. 1986. Total carbon, organic carbon and organic matter. *In: Buxton, D.R., (Ed.), Method of Soil Analysis, Part 2. Chemical Methods*, Agronomy Handbook No 9. ASA and SSSA, Madison, WI. pp. 539–579.
22. Nelson, R.E. 1982. Carbonate and gypsum. *In: Buxton, D.R., (Ed.), Method of Soil Analysis, Part 2. Chemical Methods*, Agronomy Handbook No 9. ASA and SSSA, Madison, WI. pp. 181–197.
23. Sarah, P. 2006. Soil organic matter and land degradation in semi-arid area, Israel. *Catena*, 67: 50–55.
24. Saygin, D.S, Cornelis, W., Gabriels, D., and Erpul, G. 2012. Comparison of different aggregate stability approaches for loamy sand soils. *Applied Soil Ecology*, 54: 1–6.
25. Saygin, S.D., Erpul, G., and Basaran, M. 2017. Comparison of aggregate stability measurement methods for clay-rich soils in Asartep catchment of Turkey. *Land Degradation and Development*, 28: 199–206.
26. Sharma, P.P., Gupta, S.C., and Foster, G.R. 1993. Predicting soil detachment by raindrops. *Soil Science Society of America Journal*, 57: 674–680.
27. Shirazi, M.A., and Boersma, L. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Science Society of America Journal*, 48: 142–147.
28. Singer, M.J., and Le Bissonnais, Y.L. 1998. Importance of surface sealing in the erosion of some soils from a Mediterranean climate. *Geomorphology*, 24: 79–85.
29. Six, J., Elliot, E.T., and Paustian, K. 2000. Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy. *Soil Science Society of America Journal*, 64: 1042–1049.
30. Towner., G.D. 1973. An examination of the fall-cone method for the determination of some strength properties of remolded agricultural soil. *European Journal of Soil Science*, 24: 470–479.