

## تعیین فرسایش پذیری شیاری در برخی خاک‌های استان زنجان تحت باران شبیه‌سازی شده

علی‌رضا واعظی\* و امین وطنی<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۲/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱/۱۶)

### چکیده

فرسایش شیاری عبارت از فرآیند جدا شدن و انتقال ذرات خاک توسط جریان متمرکز رواناب است. این فرسایش شکل رایج فرسایش آبی در دامنه‌ها می‌باشد. فرسایش پذیری شیاری بیان‌گر میزان جدا شدن ذرات خاک و انتقال آنها توسط نیروی برشی جریان متمرکز است. این آزمایش به منظور تعیین فرسایش پذیری شیاری در برخی خاک‌های استان زنجان تحت باران شبیه‌سازی شده انجام گرفت. برای این منظور نمونه‌هایی از هشت خاک با بافت مختلف شامل رسی، لوم رسی، لوم سیلتی، لوم رس شنی، لوم شنی، شن لومی، لومی و شنی از سطح استان جمع‌آوری و به داخل کرت‌های کوچک (۱۲۰ × ۱۰۰ سانتی‌متر) مستقر روی زمینی با شیب یکنواخت (۱۰ درصد) انتقال یافت. کرت‌ها تحت پنج رخداد باران با شدت ۶۰ میلی‌متر در ساعت به مدت یک ساعت قرار گرفتند. براساس نتایج، فرسایش پذیری شیاری در خاک‌های با بافت مختلف تفاوتی معنی‌دار داشت ( $P < 0/01$ ). فرسایش پذیری شیاری خاک‌ها همبستگی معنی‌داری با درصد بخش معدنی (شن، رس و سنگریزه) و درصد سدیم تبادل داشت. با افزایش درصد شن و سنگریزه، نفوذپذیری خاک افزایش یافت و در نتیجه تولید جریان متمرکز کاهش یافت. تجزیه رگرسیون خطی چندگانه نشان داد که فرسایش پذیری شیاری در خاک‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای رابطه‌ای معنی‌دار با درصد سدیم تبادل خاک دارد ( $R^2 = 0/85$ ,  $P < 0/01$ ). در خاک رسی به دلیل وجود درصد سدیم تبادل بالا (حدود ۱۳) نسبت به سایر خاک‌ها بالاترین میزان فرسایش پذیری شیاری بین خاک‌ها مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: بافت خاک، جریان متمرکز، درصد سدیم تبادل، نفوذپذیری خاک

۱. گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [vaezi.alireza@gmail.com](mailto:vaezi.alireza@gmail.com)

## مقدمه

فرسایش شیاری عبارت از جداسازی ذرات و انتقال آنها توسط جریان متمرکز آب روی دامنه است که به شکل کانال فرسایش پذیر باریک و دراز نمایان می شود (۵). فرسایش شیاری در کنار فرسایش ورقه ای بیشترین نقش را در فرسایش خاک در دامنه ها ایفاء می کند (۳۳). نیروی برشی آب یکی از عوامل مهم در ایجاد فرسایش شیاری است. با افزایش نیروی برشی آب، قدرت آب در کندن خاک بیشتر شده و به تدریج شیاری در سطح خاک به وجود می آید. هر چه نیروی برشی آب بیشتر باشد، خاک بیشتری کنده شده و شیاری عمیق تری ایجاد می شود (۸). تحقیقات نشان می دهد که گسترش فرسایش شیاری به شدت بارندگی، سرعت جریان آب، خصوصیات هیدرولیکی جریان، درجه، طول شیب (۲۶) و خصوصیات خاک (۳۶) وابسته است.

تأثیر خصوصیات خاک بر فرسایش شیاری را می توان در مفهومی به نام فرسایش پذیری شیاری (Rill Erodibility) بیان کرد. فرسایش پذیری شیاری عبارت از قابلیت خاک ها در ایجاد شیاری است (۱۳). به عبارت دیگر سهولت جدا شدن ذرات خاک در اثر جریان متمرکز آب روی دامنه و ایجاد کانال در مسیر جریان را فرسایش پذیری شیاری گویند. هر چه مقاومت خاک در برابر جریان متمرکز بیشتر باشد، فرسایش پذیری خاک کمتر شده و ذرات کمتری از خاک کنده می شوند و در نتیجه از گسترش شیاری جلوگیری می شود (۲۲). فرسایش پذیری شیاری در مدل های مختلف تابعی از تنش برشی جریان، تنش برشی آستانه و ظرفیت جدا شدن رسوب است (۱۴).

فرسایش پذیری خاک عاملی پیچیده است که تحت تأثیر ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک و اثرات متقابل بین آنها قرار می گیرد (۱ و ۳۶). ویژگی هایی مانند بافت، ساختمان، مواد آلی و نفوذپذیری در فرسایش پذیری خاک مؤثر هستند (۱۸ و ۳۲). توزیع اندازه ذرات (بافت خاک) عاملی مهم در مقاومت خاک در برابر جریان متمرکز آب است. در خاک هایی با مقدار سیلت و شن خیلی ریز بالا، مقدار فرسایش پذیری شیاری بیشتر

می باشد. هم چنین رس و ماده آلی همبستگی بالایی با فرسایش پذیری شیاری دارند (۳۶). خاک هایی با بافت ریز دارای چسبندگی زیاد بوده و جدا شدن آنها در اثر عوامل فرساینده سخت بوده با این حال ذرات جدا شده به راحتی منتقل می گردد. در مقابل در خاک های درشت بافت، اگر چه ذرات سریع تر و راحت تر جدا می شوند، اما ذرات به سختی منتقل می شوند. این خاک ها به دلیل نفوذپذیری بالا، رواناب کمتری نسبت به خاک های ریز بافت ایجاد می کنند (۲۹). قابلیت نگهداری آب در خاک نیز عامل تعیین کننده در فرسایش شیاری می باشد. به طوری که فرسایش شیاری در خاک رسی به دلیل میزان جذب آب بالا، بیشتر از خاک لوم سیلتی می باشد (۳۹). نفوذپذیری خاک عاملی مؤثر در فرسایش پذیری شیاری است (۳۱). به طوری که با کاهش نفوذپذیری، رواناب بیشتری تولید شده و میزان فرسایش شیاری افزایش می یابد.

فرسایش پذیری خاک به مفهوم کلی شاخصی است که تأثیر آن بر کل فرسایش آبی در تحقیقات مختلف (۷، ۹ و ۲۴) مورد بررسی قرار گرفته است. با این حال برای پیش بینی دقیق میزان فرسایش آبی در یک دامنه، بررسی فرسایش پذیری شیاری حائز اهمیت است. خاک دامنه نقشی مهم در میزان تولید جریان متمرکز داشته و حساسیت آن در میزان جدا شدن و انتقال توسط جریان به ویژگی های مختلف خاک وابسته است. بافت خاک از ویژگی های مهم و تقریباً ثابت خاک است که در قابلیت تولید جریان متمرکز مؤثر بوده و قابلیت جدا شدن و انتقال ذرات را تحت تأثیر قرار می دهد. هدف از این آزمایش بررسی فرسایش پذیری شیاری در خاک های با بافت مختلف و تعیین ویژگی های خاک مؤثر بر آن تحت باران شبیه سازی شده بود.

## مواد و روش ها

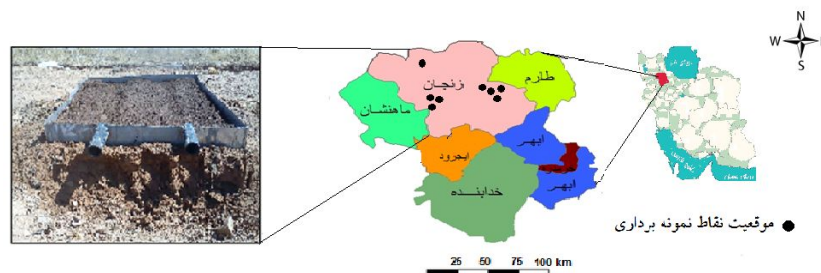
### خاک های مورد بررسی و استقرار کرت ها

برای انجام این پژوهش پس از نمونه برداری های متعدد و بررسی های اولیه آزمایشگاهی، نهایتاً هشت خاک با بافت

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در هشت خاک مورد بررسی و مقایسه میانگین آنها

درصد سدیم تبادل	کربنات کلسیم معادل (%)	ماده آلی (%)	ضریب آب‌گذری اشباع (cm/h)	میانگین وزنی قطر خاکدانه پایدار (mm)	جرم مخصوص ظاهری (g/cm <sup>3</sup> )	سنگریزه (%)	رس (%)	بیلت (%)	شن (%)	بافت خاک
۱۲/۹ <sup>a</sup>	۱۹/۱ <sup>b</sup>	۰/۷ <sup>de</sup>	۰/۲ <sup>f</sup>	۰/۴ <sup>cd</sup>	۱/۰ <sup>d</sup>	۴/۱ <sup>g</sup>	۵۷/۸ <sup>a</sup>	۳۰/۱ <sup>d</sup>	۱۲/۱ <sup>h</sup>	رسی
۱۱/۲ <sup>b</sup>	۲۴/۱ <sup>a</sup>	۰/۹ <sup>bc</sup>	۰/۲ <sup>f</sup>	۰/۳ <sup>d</sup>	۱/۲ <sup>c</sup>	۱۰/۲ <sup>e</sup>	۳۳/۳ <sup>b</sup>	۳۷/۲ <sup>b</sup>	۲۹/۵ <sup>f</sup>	لوم رسی
۹/۶ <sup>c</sup>	۱۰/۲ <sup>d</sup>	۰/۸ <sup>cd</sup>	۰/۷ <sup>de</sup>	۰/۶ <sup>b</sup>	۱/۳ <sup>b</sup>	۱۰/۴ <sup>e</sup>	۲۴/۷ <sup>d</sup>	۵۱/۲ <sup>a</sup>	۲۴/۱ <sup>g</sup>	لوم سیلتی
۸/۳ <sup>d</sup>	۱۷/۹ <sup>bc</sup>	۰/۸ <sup>cd</sup>	۰/۶ <sup>e</sup>	۰/۴ <sup>cd</sup>	۱/۳ <sup>b</sup>	۱۶/۱ <sup>c</sup>	۲۹/۰ <sup>c</sup>	۲۳/۹ <sup>e</sup>	۴۷/۱ <sup>d</sup>	لوم رس شنی
۷/۴ <sup>e</sup>	۱۸/۹ <sup>b</sup>	۰/۹ <sup>b</sup>	۰/۸ <sup>d</sup>	۰/۵ <sup>bc</sup>	۱/۲ <sup>b</sup>	۱۹/۲ <sup>b</sup>	۱۹/۲ <sup>e</sup>	۲۰/۷ <sup>f</sup>	۶۰/۱ <sup>c</sup>	لوم شنی
۸/۷ <sup>d</sup>	۱۰/۸ <sup>d</sup>	۰/۷ <sup>de</sup>	۳/۸ <sup>b</sup>	۰/۵ <sup>bc</sup>	۱/۴ <sup>b</sup>	۱۴/۳ <sup>d</sup>	۶/۲ <sup>f</sup>	۱۳/۶ <sup>g</sup>	۸۰/۲ <sup>b</sup>	شن لومی
۶/۸ <sup>e</sup>	۱۵/۱ <sup>c</sup>	۱/۱ <sup>a</sup>	۱/۳ <sup>c</sup>	۱/۳ <sup>a</sup>	۱/۲ <sup>b</sup>	۸/۸ <sup>f</sup>	۲۴/۰ <sup>d</sup>	۳۰/۶ <sup>c</sup>	۴۵/۴ <sup>e</sup>	لومی
۵/۱ <sup>f</sup>	۵/۴ <sup>e</sup>	۰/۶ <sup>e</sup>	۸/۱ <sup>a</sup>	۰/۰ <sup>e</sup>	۱/۷ <sup>a</sup>	۲۴/۰ <sup>a</sup>	۲/۳ <sup>g</sup>	۱/۹ <sup>h</sup>	۹۵/۸ <sup>a</sup>	شنی

\* حروف انگلیسی نتایج مقایسه میانگین متغیرهای مورد بررسی بین بافت‌های خاک را نشان می‌دهند.



شکل ۱. موقعیت نقاط تحت نمونه‌برداری خاک و نمایی از یک کرت فرسایشی

کرت‌های با ابعاد بزرگ (ذکر ابعاد) استفاده می‌شود (۱۶ و ۳۰)، در این تحقیق از آنجا که انتقال‌پذیری ذرات درون شیاری مد نظر بود، کرت‌های کوچک استفاده گردید و شیاریها به صورت دست‌ساز در طول کرت ایجاد شدند. از سوی دیگر ایجاد کرت‌های بزرگ از نظر انتقال حجم زیادی خاک و بهره‌گیری از دستگاه‌های باران‌ساز بزرگ همواره دچار محدودیت‌هایی است. موقعیت جغرافیایی نقاط تحت نمونه‌برداری خاک و نمایی از کرت احداث شده در شکل ۱ آمده است.

به منظور استقرار کرت‌ها، پیرامون آنها با استفاده از ورق گالوانیزه به ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر و طول ۴/۴ متر بسته شد. سپس هر یک از خاک‌ها به درون کرت‌ها منتقل شدند. در مراحل

مختلف که دارای خصوصیات متفاوتی بودند (جدول ۱)، در سطح استان زنجان در سال ۱۳۹۱ شناسایی شد. سپس حدود ۳۰۰ کیلوگرم از هر خاک جمع‌آوری و به دامنه‌ای با شیب یکنواخت واقع در محدوده دانشگاه زنجان انتقال یافت. پیش از ریختن خاک‌ها به سطح دامنه، ابتدا سطح زمین با استفاده از تسطیح‌کن مکانیکی صاف و شیب مناسب و یکنواخت (۱۰ درصد) در سطح آن ایجاد شد. شیب ۱۰ درصد از شیب‌های غالب به‌ویژه در خاک‌های دیم در منطقه مطالعاتی می‌باشد. سپس هشت کرت با ابعاد ۱/۲ × ۱ متر (به صورت طولی در راستای شیب) و با فاصله‌ی ۳ متر از هم در عرض شیب، ایجاد شد. اگرچه برای مطالعه تولید شیاری روی دامنه معمولاً از

رسوب هر کرت، مساحت کرت و مدت بارندگی محاسبه شد. تنش برشی بحرانی با استفاده از شیب نمودار بین تنش برشی ( $\dagger$ ) و ظرفیت جداسازی رسوب برای آب زلال ( $D_c$ ) محاسبه گردید. مقدار تنش برشی ( $\dagger$ ) نیز از رابطه زیر به دست آمد.

$$\tau = \gamma \cdot R \cdot S \quad [2]$$

که در آن:  $\gamma$  جرم مخصوص آب (برابر ۹۸۱۰ نیوتن بر مترمربع)،  $R$  شعاع هیدرولیکی شیار (متر) و  $S$  شیب هیدرولیکی جریان شیار (بدون واحد) است (۱۲). از آنجا که سطح مقطع شیاریها سهمی شکل بود، برای محاسبه شعاع هیدرولیکی از رابطه زیر استفاده شد (۱):

$$R = d/1.5 \quad [3]$$

که در آن:  $d$  عمق شیار برحسب متر است. مقدار  $d$  برابر با میانگین عمق دو شیار در کرت بود.

### اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک

برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها، نمونه‌ای از هر خاک به آزمایشگاه منتقل شد. توزیع اندازه ذرات خاک به روش هیدرومتری (۱۵)، درصد سنگریزه با عبوردادن نمونه‌ها از الک‌های ۲ و ۸ میلی‌متری (۲۱)، ماده آلی به روش والکی بلاک (۴۱)، کربنات کلسیم معادل به روش خشتی‌سازی به وسیله اسیدکلریدریک یک نرمال (۳۴) و درصد سدیم تبدیلی به روش استات آمونیوم (۴۰) اندازه‌گیری شد. هم‌چنین ضریب آب‌گذری اشباع خاک ( $K_s$ )، به روش بار آبی ثابت در نمونه دست‌نخورده تعیین شد (۱۰). جرم مخصوص ظاهری به روش سیلندر فلزی (با ارتفاع ۵ سانتی‌متر و قطر ۴/۸۵ سانتی‌متر) در صحرا (۶) و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار به روش الک تر در خاکدانه‌هایی بین ۴ تا ۶ میلی‌متر به روش مکانیکی با استفاده از الک‌های ۴/۷۵، ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵، ۰/۱۵ و ۰/۰۵ میلی‌متر (۴۳) به مدت یک دقیقه اندازه‌گیری شد.

### تجزیه و تحلیل داده‌ها

به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها، ابتدا نرمال بودن توزیع آماری

زمانی مختلف اندکی رطوبت (۱۰ درصد) به سطح خاک‌ها افزوده شد تا نشست طبیعی خاک ایجاد شود. سپس تعداد دو شیار به طول ۱ متر و عرض ۶ سانتی‌متر و عمق ۲/۵ سانتی‌متر با فاصله ۵۰ سانتی‌متر به موازات طول کرت در هر کرت ایجاد شد. در انتهای هر کرت لوله‌ی انتقال رواناب و رسوب به قطر ۵ سانتی‌متر و مخزن جمع‌آوری ۲۰ لیتری قرار داده شد.

### تعیین فرسایش‌پذیری شیاری

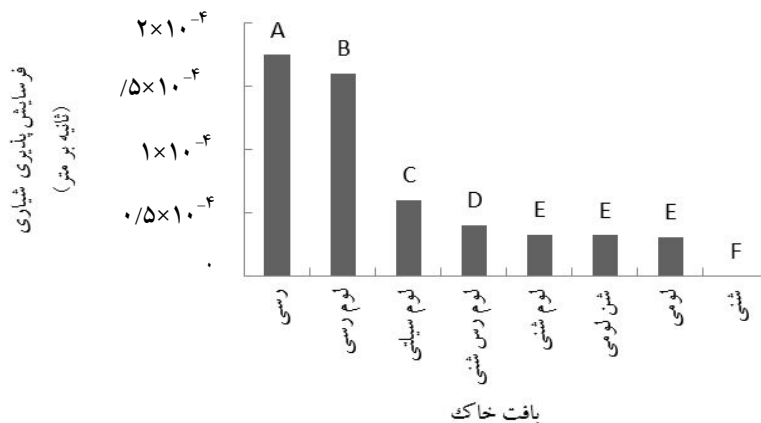
فرسایش‌پذیری شیاری تحت باران‌های شبیه‌سازی شده در کرت‌ها مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور یک دستگاه شبیه‌ساز باران با ابعاد  $1/4 \times 1/4$  متر به ارتفاع ۲/۲۵ متر استفاده گردید. دستگاه مذکور توانایی تولید باران‌هایی با شدت ۶۰ میلی‌لیتر بر ساعت با متوسط قطر قطره ۲/۵۶ میلی‌متر را داشت. هر یک از خاک‌های مورد بررسی تحت پنج رخداد مشابه باران شبیه‌سازی شده با شدت ۶۰ میلی‌لیتر بر ساعت به مدت یک ساعت با فاصله زمانی پنج روز قرار گرفتند. در مجموع تعداد ۴۰ آزمایش ( $8 \times 5$ ) انجام گرفت. در فاصله زمانی پنج دقیقه، رواناب و رسوب حاصل از هر شیار در ظروفی معین جمع‌آوری شد. پس از برداشت یک نمونه همگن از مخلوط هر ظرف، در آزمایشگاه رسوب از رواناب با استفاده از کاغذ صافی (Wattman, 42) جدا شد. با محاسبه مقدار رسوب برحسب گرم در حجم مشخصی از نمونه همگن، مقدار رسوب نمونه و نهایتاً مقدار کل رسوب جمع شده در ظرف پایین هر کرت به دست آمد. برای تعیین فرسایش‌پذیری خاک از رابطه Elliot و همکاران (۱۲) استفاده شد:

$$K_r = \frac{D_c}{(\tau - \tau_c)} \quad [1]$$

که در آن:  $K_r$  فرسایش‌پذیری شیاری (ثانیه بر منبر  $\frac{S}{m}$ )،  $D_c$  ظرفیت جداسازی رسوب برای آب زلال (ثانیه هر در مترمربع بر کیلوگرم)  $\tau_c$ ، تنش برشی بحرانی (پاسکال) و  $\dagger$  تنش برشی جریان (پاسکال) است. مقدار  $D_c$  برابر با مقدار رسوب خروجی از هر کرت طی هر رخداد در واحد سطح (مترمربع) و واحد زمان (ثانیه) بود که بر اساس جرم

جدول ۲. تجزیه واریانس شاخص فرسایش پذیری شیاری در خاک‌های مختلف

منبع	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	معنی داری
بافت خاک	۷	$2/1 \times 10^{-4}$	$1/1 \times 10^4$	۰/۰۰۱
اشتباه آزمایشی	۳۲	$1/8 \times 10^{-12}$		



شکل ۲. مقایسه میانگین فرسایش پذیری شیاری در خاک‌های مورد بررسی

زاد با استفاده از چولگی و کشیدگی داده‌ها تعیین شد (۲۳). مقایسه میانگین بین خاک‌ها از نظر فرسایش پذیری شیاری به روش آزمون دانکن تعیین شد. برای تعیین ویژگی‌های خاک مؤثر بر فرسایش پذیری شیاری ( $K_r$ ) از ماتریس همبستگی استفاده شد. برای این منظور از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۸ بهره گرفته شد. برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel نسخه ۲۰۱۰ استفاده شد.

زیاد بودن درصد سدیم تبادلی این خاک‌ها بود. بیشترین مقدار پایداری خاکدانه در خاک لومی مشاهده شد. این موضوع به دلیل بالا بودن مقدار ماده آلی در این خاک (۱/۱ درصد) و پایین بودن درصد سدیم تبادلی ( $6/8$  میلی‌اکی‌والان در صد گرم خاک) بود. ضریب آب‌گذری اشباع در خاک‌ها از  $0/2$  سانتی‌متر در ساعت (در خاک رسی) تا  $8/1$  سانتی‌متر در ساعت (در خاک شنی) متغیر بود.

نتایج تجزیه واریانس اثر بافت خاک بر فرسایش پذیری شیاری (جدول ۲) نشان داد که فرسایش پذیری شیاری تفاوتی معنی‌دار در خاک‌های با بافت مختلف داشت ( $P < 0/01$ ).

مقایسه میانگین فرسایش پذیری شیاری در خاک‌های با بافت مختلف (شکل ۲) نشان داد که خاک رسی دارای بیشترین میزان فرسایش پذیری شیاری ( $1/75 \times 10^{-4}$  ثانیه بر متر) بود و خاک شنی دارای کمترین میزان فرسایش پذیری شیاری (صفر) بود. بالا بودن درصد سدیم تبادلی عاملی مهم در کاهش پایداری خاکدانه‌ها در خاک رسی بود. وجود تخلخل درشت پایین عاملی دیگر برای کاهش نفوذپذیری خاک و در نتیجه افزایش

داده‌ها با استفاده از چولگی و کشیدگی داده‌ها تعیین شد (۲۳). مقایسه میانگین بین خاک‌ها از نظر فرسایش پذیری شیاری به روش آزمون دانکن تعیین شد. برای تعیین ویژگی‌های خاک مؤثر بر فرسایش پذیری شیاری ( $K_r$ ) از ماتریس همبستگی استفاده شد. برای این منظور از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۸ بهره گرفته شد. برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel نسخه ۲۰۱۰ استفاده شد.

## نتایج و بحث

نتایج ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. مقایسه میانگین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها نشان داد که تفاوتی معنی‌دار بین خاک‌ها از نظر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی وجود دارد. میزان کربنات کلسیم در خاک‌ها به جز در مورد خاک شنی، بیشتر از  $10$  درصد بوده و این خاک‌ها از نوع آهکی بودند. به دلیل عدم وجود خاکدانه در خاک شنی، پایداری خاکدانه‌ها در آن عملاً صفر بود. خاک رسی و لوم رسی دارای پایداری خاکدانه بسیار پایین بودند که دلیل آن

جدول ۳. ماتریس همبستگی فرسایش پذیری شیاری و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی

K <sub>r</sub>	ESP	CaCO <sub>3</sub>	OM	K <sub>s</sub>	MWD	BD	Gravel	Clay	Silt	Sand	ویژگی
										۱	Sand
									۱	-۰/۸۷**	Silt
								۱	۰/۵۶	-۰/۸۹**	Clay
							۱	-۰/۷۹*	۰/۷۱*	۰/۸۷**	Gravel
						۱	۰/۷۸*	-۰/۸۲*	-۰/۸۲*	۰/۷۸*	BD
					۱	-۰/۴۴	-۰/۴۹	۰/۱۵	۰/۱۵	-۰/۳۲	MWD
				۱	-۰/۴۶	۰/۸۵**	۰/۷۰	-۰/۷۴*	-۰/۷۸*	۰/۸۶**	K <sub>s</sub>
			۱	-۰/۸۵**	-۰/۷۹*	-۰/۷۴*	-۰/۵۶	۰/۴۱	۰/۵۹	-۰/۵۶	OM
		۱	۰/۶۸	-۰/۸۰*	۰/۱۶	-۰/۷۸*	-۰/۴۸	۰/۶۸	۰/۴۰	-۰/۶۲	CaCO <sub>3</sub>
	۱	۰/۶۱	۰/۲۹	-۰/۶۷	-۰/۰۷	-۰/۷۱*	-۰/۸۰*	۰/۸۳*	۰/۵۹	-۰/۸۱*	ESP
۱	۰/۹۳***	۰/۷۰	۰/۲۳	-۰/۵۸	-۰/۱۲	-۰/۷۰	-۰/۷۴*	۰/۸۵**	۰/۵۰	-۰/۷۸*	K <sub>r</sub>

\*, \*\* و \*\*\* به ترتیب معنی داری در سطح ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱.

غضنفرپور و همکاران (۳) نیز مطابقت دارد. فرسایش پذیری شیاری با درصد رس دارای همبستگی معنی دار مثبت بود ( $R^2=0/85$ ,  $P<0/01$ ). این نتیجه با یافته‌های Zhang و همکاران (۴۴) نیز مطابقت دارد. به طور کلی خاک‌های ریزدانه از جمله خاک رسی به دلیل داشتن تخلخل درشت پایین، نفوذپذیری کم داشته و در نتیجه رواناب بیشتری تولید می‌کند (۲). فرسایش پذیری شیاری همبستگی مثبت معنی داری با درصد سدیم تبادلی داشت. تحقیقات نشان می‌دهد که فرسایش پذیری خاک به طور معنی داری با افزایش درصد سدیم تبادلی افزایش می‌یابد (۳۸). درصد سدیم بالا، پراکنش پذیری ذرات رس و در نتیجه تخریب خاکدانه‌ها را افزایش می‌دهد (۱۹). در پژوهش حاضر در خاک‌های با درصد بالای ذرات رس، درصد سدیم تبادلی بیشتر بوده و در نتیجه فرسایش پذیری شیاری بالا بود. تحقیقات نشان می‌دهد که رس زمانی پایداری را افزایش می‌دهد که میزان کاتیون سدیم در خاک کم باشد. با این حال در حضور کاتیون سدیم زیاد، رس تأثیر منفی بر پایداری دارد و باعث افزایش فرسایش پذیری می‌شود (۲۰). در برخی تحقیقات ارتباط منفی بین رس و پایداری خاکدانه‌ها

تولید رواناب در خاک رسی بود. تحقیقات نشان می‌دهد که خاک‌های ریزبافت با نفوذپذیری کم، رواناب بیشتری نسبت به خاک‌های درشت‌بافت با نفوذپذیری بالا داشته (۲۷) و فرسایش پذیری بالایی دارند. همچنین آزمایش کانی شناسی در خاک رسی نشان داد که این خاک دارای رس‌های تورم‌پذیر از جمله اسمکتایت می‌باشد این عامل در کنار عوامل بیان شده در بالا در کاهش نفوذپذیری خاک و در نتیجه افزایش فرسایش پذیری شیاری در خاک رسی مؤثر بود.

بررسی همبستگی بین فرسایش پذیری شیاری و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها (جدول ۳) نشان داد که فرسایش پذیری شیاری تحت تأثیر درصد ذرات شن کاهش یافت. بالا بودن نفوذپذیری در خاک شنی موجب شد روانابی طی مدت بارندگی ظاهر نشود. از این رو خاک شنی دارای کمترین مقدار فرسایش پذیری شیاری (صفر) بود. همبستگی منفی بین رواناب و درصد ذرات شن در نتایج Adekalu و همکاران (۴) در جنوب غربی نیجریه در سه نوع خاک کشاورزی نیز نشان داده شده است. همبستگی منفی ذرات شن با فرسایش پذیری خاک با نتایج Santos و همکاران (۳۷) و

جدول ۴. تجزیه رگرسیون خطی بین فرسایش پذیری شیاری و ویژگی‌های خاک ( $R^2=0/85, P<0/01$ )

معنی‌داری	t	ضریب استاندارد	ضرایب غیراستاندارد		مدل
		Beta	B خطای استاندارد		
0/006	-4/2		$3/5 \times 10^{-5}$	$-14/6 \times 10^{-5}$	مقدار ثابت
0/001	6/3	0/9	$3/8 \times 10^{-6}$	$2/4 \times 10^{-5}$	درصد سدیم تبدیلی

به دیگر ویژگی‌های خاک بارز بود.

### نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که بافت خاک از ویژگی‌های مهم خاک در فرسایش پذیری شیاری می‌باشد. در خاک‌های ریزبافت مانند خاک‌های رسی به دلیل پراکنش پذیری بالای ذرات و نفوذپذیری پایین خاک، تولید رواناب و در نتیجه فرسایش پذیری شیاری بیشتر بود. بالا بودن درصد سدیم تبدیلی از یک سو و از سوی دیگر وجود رس‌های تورم‌پذیر از جمله اسمکتایت در خاک رسی از عواملی مهم افزایش فرسایش پذیری شیاری در خاک رسی بودند. در خاک‌های شنی به دلیل نفوذپذیری بالا، تولید رواناب و فرسایش پذیری شیاری صفر بود. در خاک لومی به دلیل پایین بودن درصد سدیم تبدیلی و بالا بودن پایداری خاکدانه، فرسایش پذیری شیاری پایین بود. همبستگی منفی معنی‌داری بین فرسایش پذیری شیاری با درصد شن و درصد سنگریزه و همبستگی مثبت معنی‌داری با درصد رس و درصد سدیم تبدیلی مشاهده شد. نتایج تجزیه رگرسیون خطی چندگانه نشان داد که فرسایش پذیری شیاری در خاک‌های منطقه با درصد سدیم تبدیلی خاک مرتبط است ( $R^2=0/85, P<0/01$ ). نقش یون سدیم در پراکنش ساختن ذرات رس و افزایش شدت فرسایش پذیری شیاری نسبت به دیگر ویژگی‌های خاک بارزتر بود.

مشاهده شده است (۲۸ و ۴۲). در خاک رسی ذرات به دلیل پراکنش پذیری بالا در اثر خیس شدن و ضربه قطرات باران به آسانی جدا شده و به دلیل انتقال پذیری آسان انتقال یافتند. از این رو خاک رسی دچار بیشترین میزان فرسایش پذیری شیاری شد. اگرچه ذرات سیلت به دلیل عدم مشارکت در پایداری خاکدانه و نیز انتقال پذیری نسبتاً آسان در افزایش فرسایش خاک مؤثر می‌باشند (۳۵)، لیکن در این پژوهش ذرات سیلت در فرسایش پذیری شیاری مؤثر واقع نشدند.

این نتیجه برخلاف بسیاری از تحقیقات پیشین بود که در آن فرسایش پذیری خاک با افزایش درصد ذرات سیلت به شدت افزایش یافته بود (۱۱ و ۳۶). نقش غالب ذرات شن در افزایش نفوذپذیری از یک سو و پراکنش پذیری و انتقال پذیری آسان ذرات رس از سوی دیگر موجب شد تا تأثیر ذرات سیلت در فرسایش پذیری شیاری بارز نگردد. همچنین فرسایش پذیری شیاری با درصد سنگریزه دارای همبستگی منفی معنی‌دار بود. تحقیقات نشان داد که وجود سنگریزه در سطح و داخل خاک به طرق مختلف باعث کاهش فرسایش پذیری خاک می‌شود (۲۵).

نتایج تجزیه رگرسیون خطی بین فرسایش پذیری شیاری و ویژگی‌های خاک (جدول ۴) نشان داد که فرسایش پذیری شیاری در خاک‌های منطقه رابطه‌ای معنی‌دار با درصد سدیم تبدیلی دارد ( $R^2=0/85, P<0/01$ ). در واقع نقش یون‌های سدیم در پراکنش ساختن ذرات رس و افزایش شدت فرسایش پذیری (۱۷) نسبت

## منابع مورد استفاده

۱. رفاهی، ح. ق. ۱۳۸۸. *فرسایش آبی و کنترل آن*. انتشارات دانشگاه تهران، صفحه ۴۳۵.
۲. زارع خورمیزی، م.، ع. نجفی نژاد، ن. نورا و ع. کاویان. ۱۳۹۱. اثرشیب و خصوصیات خاک بر رواناب و هدررفت خاک با استفاده از شبیه‌ساز باران، حوزه آبخیز چهل چای استان گلستان. *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک* ۱۹(۲): ۱۶۵-۱۷۸.
۳. غضنفرپور، ن.، ح. ر. مرادی و س. فیض‌نیا. ۱۳۸۹. رسوب‌زایی و فرسایش‌پذیری بین‌شیاری در بخشی از مراتع سجزی کوهپایه اصفهان با استفاده از باران‌ساز مصنوعی. *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک* ۱۷(۴): ۱۹۹-۲۰۶.
4. Adekalu, K. O., I. A. Olorunfemi and J. A. Osunbitan. 2007. Grass mulching effect on infiltration, surface runoff and soil loss of three agricultural soils in Nigeria. *Bioresource Technol.* 98: 912-917.
5. Bagnold, R. A. 1966. An approach to the sediment transport problem from general physics. US Geological Survey Paper 422, Washington.
6. Blake, G. R. and K. H. Hartge. 1986. Bulk Density, PP. 363-375. *In: Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 1, 2nd Edition. Agronomy Monograph, Vol. 9. American Society of Agronomy, Madison, WI.*
7. Brayan, R. B. 2000. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology* 32: 385-415
8. Chanson, H. 1999. *The Hydraulics of Open Channel Flow. An Introduction.* John Wiley & Sons Inc, New York, USA. 495 p.
9. De Baets, S., J. Poesen., G. Gyssels and A. Knapen. 2006. Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow. *Geomorphology* 76: 54-67.
10. Dena, J. H. and G. C. Topp. 2002. Method of Soil analysis. Part 4: Physical method. Soil Science Society of America Books Series: 5. Madison, WI: Soil Sci. Soc. of Am. J.
11. Duiker, SW., DC. Flanagan. and R. Lal. 2001. Erodibility and Infiltration Characteristics of Five Major Soils of Southwest Spain, *Catena* 45(2): 103-121.
12. Elliot, W. J., A. M. Liebenow., J. M. Lafflen and K. D. Kohl. 1989. A compendium of soil credibility data from WEPP crop land soil field credibility experiments 1987 and 1988. NSERL Report No. 3, the Ohio State University and United State Department America - American Rose Society, 316 p.
13. Foster, G. R., L. D. Meyer. and C. A. Onstad. 1977. An erosion equation derived from basic principles. *Transactions of the ASAE.* 20(4): 678-682.
14. Foster, G. R., D. C. Flanagan., M. A. Nearing., L. J. Lane., L. M. Risse and . C. Finkner. 1995. Hillslope erosion component. Chapter 11, *In: Flanagan, D.C. and Nearing, M.A., (Eds.), USDA-Water Erosion Prediction Project, Technical Documentation. NSERL. Report No. 10, National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana.*
15. Gee, G. H. and J. W. Bauder. 1986. Particle size analysis. PP. 383-411. *In: A. Klute, (Ed.), Methods of soil Analysis. Physical Properties. SSSA, Madison, WI.*
16. Giménez, R. and G. Govers. 2008. Effects of freshly incorporated straw residue on rill erosion and hydraulics. *Catena* 72: 214-223.
17. Greenland, J. and D. Payne. 1975. Determination of the structural stability class of English and welsh soil using a water coherence test *J. Soil Sci.* 46: 294-303.
18. Iowa Department of Natural Resources (IDNR). 2006. Iowa Construction Site Erosion Control Manual Hand Book, 147 p.
19. Kazman, Z., I. Shainberg and M. Gal. 1983. Effect of low levels of exchangeable Na and applied phosphogypsum on infiltration rate of various soils. *Soil Sci. Soc. of Am. J.* 135: 184-192.
20. Kemper, WD. and EJ. Koch. 1966. Aggregate stability of soils from western USA and Canada. *ASDA, Tech. Bull,* 1355.
21. Klute, A. 1986. *Methods of Soil Analysis. Part 1, Physical and Mineralogical Methods.* Madison, Wisconsin, United States of America.
22. Knapen, A., J. Poesen. G. Govers. G. Gyssels and J. Nachtergaele. 2007. Resistance of soils to concentrated flow erosion. *Earth Sci. Rev.* 80: 75-109.
23. Kravchenko, A. and D. G. Bullock. 1999. A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties. *Agron. J.* (91): 393-400.
24. Lei, T. W., Q. W. Zhang., L. J. Yan., J. Zhao and Y. H. Pan. 2008. A rational method for estimating erodibility and critical shear stress of an eroding rill. *Geoderma* 244 (4): 628-633.



25. Li, X. Y. 2003. Gravel-sand mulch for soil and water conservation in the semiarid loess region of northwest China. *Catena* 52: 105-127.
26. Li, M., L. Zhan-bin., W. L. Dingd and W. Yaoa. 2006. Using rare earth element tracers and neutron activation analysis to study rill erosion process. *Appl. Rad. Isot.* 64: 402-408.
27. Martinez-Mena, M., J. Albaladejo and V. M. Castillo. 1998. Factors influencing surface runoff generation in a Mediterranean semi-arid environment: Chicamo watershed, SE Spain. *Hydrol. Proc.* 12: 741-754.
28. Mbagwu, J. S. C. and P. Bazzoffi. 1998. Soil characteristics related to resistance of breakdown of dry soil aggregates by water-drops. *Soil and Till. Res.* 45:133-145.
29. Meyer, L. D. and W. C. Horton. 1984. Susceptibility of agriculture soil to interrill erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 32: 1152-1157.
30. Mirzaee, S. M, Gorji and A. Jafari. 2012. Effect of Rock Fragments on Distance of Rill Erosion Initiation and Overland Flow Hydraulics. *Intr. J. of Soil Sci.* 7(3): 100-107.
31. Moreno-de lasHeras, M., J. M. Nicolau and M. T. Espigares. 2008. Vegetation succession in reclaimed coal mining slopes in a Mediterranean-dry environment. *Ecol. Engr.* (34):168-178.
32. Morgan R. P. C. 1995. *Soil Erosion and Conservation*. Second Edition. Longman Group Ltd. U.K. 290 p.
33. Opsomer, J. D., C. Botts and J. Y. Kim. 2003. Small area estimation in a watershed erosion assessment survey. *J. Agr. Biol. Envir. St.* 8(2): 139-152.
34. Page, M. C., D. L. Sprrks and M. R. Noll. 1987. Kinetics and mechanisms of potassium release from sandy middle Atlantic coastal. Plain soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 1460-1465.
35. Parysow, P., G. Wang., G. Gertner and A. B. Anderson. 2003. Spatial Uncertainly Analysis for Mapping Soil Erodibility Based on Joint Sequential Simulation, *Catena* 73: 1-14.
36. Romero, C. C., L. Stroosnijder and A. B. Guillermo. 2007. Interrill and rill erodibility in the northern Andean Highlands. *Catena* 70: 105-113.
37. Santos, F. L., J. L. Reis., O. C. Martins., N. L. Castanheria. and RP. Serralherio. 2003. Comparative assessment of infiltration, runoff and erosion of sprinkler irrigation soils. *Bio systems Engineering* 86(3): 355-364.
38. Singer, M. J., P. Janitzky. and J. Blackard. 1982. The influence of exchangeable sodium ercentage on soil erodibility. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 117-121.
39. Sirjacobs, D., I. Shainberg., I. Rapp and G. J. Levy. 2001. Flow Interruption Effects on Intake Rate and Rill Erosion in Two Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 828-834.
40. Sumner, ME. 1993. Sodic soils: New perspectives. *Aust. J. of Soil Res.* 31: 683-750.
41. Walkly, A. and I. A. Black. 1934. An examination of digestion methods for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic and titration. *Soil Sci. Soc. of Am. J.* 37: 29-38.
42. Wustamidin, L. and A. Douglas. 1985. Aggregate breakdown in relation to raindrop energy. *Soil Sci.* 139: 239-242.
43. Yoder, R. E. 1936. A direct method of aggregate analysis and a study of a physical nature of erosion losses. *J. of Am. Agron.* 28: 337-351.
44. Zhang, K., S. Li., W. Peng and B. Yu. 2004. Erodibility of agricultural soils and loess plateau of China. *Soil and Till. Res.* 76: 157-165.