

مقاله پژوهشی

## کارایی روش جایگزینی حجمی در برآورد فرسایش شیاری در شیب‌ها و خاک‌های با بافت مختلف در منطقه نیمه‌خشک، استان زنجان

علی رضا واعظی<sup>۱\*</sup> - الهام محمدی<sup>۲</sup> - نسرین صادقیان<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۱۴

### چکیده

فرسایش شیاری یکی از مهم‌ترین اشکال فرسایش خاک در دامنه‌ها است. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری این نوع فرسایش وجود دارد که یکی از آن‌ها روش جایگزینی حجمی است. هدف از انجام این پژوهش بررسی دقت روش جایگزینی حجمی در برآورد فرسایش شیاری در خاک‌های مختلف تحت شیب متفاوت است. برای انجام این مطالعه فرسایش شیاری در سه خاک با بافت مختلف (لوم، لوم رسی و لوم رس شنی) تحت چهار شیب متفاوت (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد) با استفاده از جریانی با دبی ثابت ۰/۵ لیتر بر دقیقه در فلو می به ابعاد ۰/۳×۰/۳۲×۴ متر اندازه‌گیری شد. برای برآورد مقدار فرسایش شیاری با استفاده از روش جایگزینی حجمی، شیار ایجاد شده توسط جریان با استفاده از خاک عبور داده شده از الک دو میلی‌متر، جایگزین و وزن خاک فرسایش‌یافته تعیین شد. خطای روش با استفاده از آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (ME) ارزیابی شد. بر اساس نتایج، مقدار فرسایش شیاری تحت تأثیر هر دو عامل (بافت خاک و درصد شیب) و برهمکنش بین آن دو قرار گرفت. بیشترین مقدار فرسایش شیاری در خاک لوم رسی (۳/۱۶ g/m<sup>2</sup>.sec) و کمترین آن در خاک لومی (۰/۱۰ g/m<sup>2</sup>.sec) مشاهده شد. در هر سه خاک مورد بررسی، روش جایگزینی حجمی منجر به بیش‌برآورد در فرسایش شیاری شد و بیش‌ترین خطای برآورد در خاک لوم رس شنی با ۲/۷۲ (g/m<sup>2</sup>.sec) RMSE= و ME= ۷/۰۱۷ (g/m<sup>2</sup>.sec) بود. با افزایش شیب سطح، مقدار خطای برآورد نیز افزایش یافت. این پژوهش نشان داد که روش جایگزینی حجمی، دچار عدم قطعیت در برآورد مقدار فرسایش شیاری با استفاده از نمونه خاک مشابه به ویژه در شیب‌های تندتر و خاک‌های حساس است. تغییرات فیزیکی خاک داخل شیار در اثر جریان آب و عدم مطابقت چگالی ظاهری نمونه خاک مشابه با خاک اصلی، از یک سو و رسوب‌گذاری پیوسته ذرات در طول شیار از سوی دیگر دلایل این موضوع بود.

واژه‌های کلیدی: جریان متمرکز، حجم شیار، جدا شدن خاک، فلوامیسی، عدم قطعیت

### مقدمه

خاک در شیارها به وسیله جریان آب به شرایط هیدرولیکی جریان وابسته است (۳۰). این نوع فرسایش، منبع و فرآیند عمده تولید رسوب در دامنه‌های شیب‌دار (۷)، به‌ویژه تحت بارندگی‌های شدید است (۵). وقوع فرسایش شیاری در زمین‌های حاصل‌خیز موجب خسارات زیاد در خاک‌های کشاورزی می‌شود (۲۵ و ۲۹). فرسایش شیاری در کنار فرسایش ورقه‌ای بیش‌ترین نقش را در فرسایش خاک<sup>۶</sup> در دامنه‌ها ایفا می‌کند (۲۵). بررسی روند برداشت ذرات از شیار، توسط جریان آب اطلاعاتی ارزشمند برای درک فرآیند فرسایش شیاری ارائه می‌دهد (۱۰). گسترش فرسایش شیاری به شدت بارندگی، خصوصیات هیدرولیکی جریان، درجه و طول شیب<sup>۷</sup> (۱۰، ۲۴ و ۳۵)، خصوصیات

فرسایش شیاری<sup>۴</sup> در اثر تولید جریان متمرکز در دامنه‌ها آغاز می‌شود و پس از سال‌ها، آبراه‌های کم‌عمق (کم‌تر از ۳۰ سانتی‌متر) در امتداد شیب به وجود می‌آید. در تعریفی دقیق‌تر، فرسایش شیاری عبارت از جدا شدن و انتقال رسوب به‌وسیله جریان متمرکز آب<sup>۵</sup> در کانالی باریک و فرسایش‌پذیر است (۳ و ۸). نوع و شدت انتقال ذرات

۱، ۲ و ۳- به ترتیب استاد، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد و دانش‌آموخته دکتری گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان  
(\*) نویسنده مسئول:  
(Email: vaezi.alireza@znu.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.v35i1.80261

4- Rill Erosion

5- Concentrated water flows

6- Soil Erosion  
7- Slope Length

خاک (۳۳)، و کاربری زمین (۱۷) وابسته است.

شدت فرسایش شیاری در یک دامنه را می‌توان به روش‌های مختلف از جمله با استفاده از شبیه‌ساز باران (۱۴)، اندازه‌گیری تغییرات تراز سطحی خاک (۲۷ و ۳۷) و ردیابی عناصر کم‌یاب (۲۵) مورد بررسی قرار داد. روش جایگزینی حجمی، روشی جدید برای تعیین مقدار فرسایش شیاری در دامنه است. این روش بر مطالعه تغییرات در حجم خاک فرسایش یافته از شیار استوار است. در استفاده از این روش، تغییراتی مانند حجم شیار بررسی شده و از آن طریق مقدار فرسایش شیاری تعیین می‌شود (۳۷). در روش‌های معمول اندازه‌گیری فرسایش شیاری در آزمایشگاه یا مزرعه، شدت فرسایش شیاری را با تولید جریان متمرکز آب و اندازه‌گیری مقدار خاک فرسایش یافته در واحد سطح و زمان به دست می‌آورند (۲، ۹ و ۴۰). با این وجود روش جایگزینی حجمی را می‌توان در دامنه‌هایی که بیشتر فرسایش شیاری در آنها رخ داده است، برای برآورد فرسایش شیاری مورد استفاده قرار داد. از مزایای این روش می‌توان به سادگی، امکان تعیین سریع فرسایش در مقاطع زمانی کوتاه (به‌طور مثال برای هر بارندگی) و نیز هزینه اندک آن اشاره نمود.

روش جایگزینی حجمی روشی است که یکسری از فضاهای مقطع عرضی را برای اندازه‌گیری و محاسبه حجم فرسایش و همچنین روند فرسایش در امتداد شیارهای فرسوده محاسبه می‌کند، این محاسبه و اندازه‌گیری مربوط به شرایطی است که حجم شیار با حجم خاک فرسایش یافته برابر است. این روش فرآیند فرسایش را در شیارهای فرسوده که حجم شیار با مقدار خاک فرسایش یافته برابر در نظر گرفته می‌شود، محاسبه و اندازه‌گیری می‌کند. در این روش اندازه و مورفولوژی شیار شاخصه‌هایی هستند که موجب خطاهای اندازه‌گیری می‌شوند (۶). این روش توسط ژانگ (۴۲) پایه‌ریزی شده و توسط پژوهشگران دیگر نیز توسعه داده شده است. از این روش می‌توان برای شبیه‌سازی فرآیند فرسایش شیاری و برآورد و تشخیص تمام شاخص‌های یک مدل از قبیل سرعت جداسازی<sup>۱</sup>، فرسایش پذیری، تنش برشی بحرانی و ظرفیت انتقال رسوب استفاده کرد (۲۲). روش دیگر آن است که شیار با خاک، ذرات فوم ریز یا دیگر مواد ممکن پر شوند البته این کار باید قبل از اینکه حجم و ظرفیت شیار برای تعیین میزان فرسایش، اندازه‌گیری شود، انجام گیرد (۱۳).

مطالعات اندکی در سراسر جهان در مورد استفاده از روش جایگزینی حجمی در برآورد فرسایش شیاری انجام گرفته است که می‌توان به پژوهش‌های چن و همکاران (۹) در فلات لسی چین اشاره کرد. آن‌ها با استفاده از روش جایگزینی حجمی به بررسی وضعیت فرسایش شیاری در خاک‌های چین پرداختند. برای این کار از فلوومی

به عرض ۰/۶ متر و طول ۱۲ متر و خاکی با بافت لوم سیلتی استفاده کردند. نتایج نشان داد که دامنه تولید رسوب بین ۳۴۰ تا ۹۲۰ کیلو گرم بر مترمربع متغیر بوده است. آنها نشان دادند که استفاده از این روش می‌تواند برای بررسی فرسایش شیاری مفید و کاربردی باشد. از دیگر پژوهش‌های انجام شده بر روی این روش می‌توان به پژوهش ما و همکاران (۲۴) و یوگان و همکاران (۴۱) اشاره کرد.

اطلاعات اندکی در مورد مقدار فرسایش شیاری در دامنه‌ها در سراسر سطح کره زمین وجود دارد چرا که اندازه‌گیری شدت این فرسایش وابسته به تولید جریان در هر دامنه است. طبیعتاً چنین کاری حتی در مقیاس آزمایشگاهی نیز هزینه‌بر و نیازمند صرف زمان است. از این رو دستیابی به روشی ساده و کم‌هزینه برای برآورد فرسایش شیاری می‌تواند راهکاری اساسی برای تخمین شدت این فرسایش در مناطق مختلف باشد. با توجه به وابستگی شدت فرسایش شیاری به نوع بافت خاک و شیب سطح، می‌توان روش جایگزینی حجمی را تحت تأثیر این عوامل مورد بررسی قرار داد. اهمیت این موضوع در خاک‌های مناطق نیمه‌خشک<sup>۲</sup> که از نظر ساختمانی ضعیف هستند و غالباً پوشش گیاهی<sup>۳</sup> ضعیفی بر روی آنها به وجود می‌آید، اهمیت دوچندانی دارد. بنابراین هدف از انجام این پژوهش ارزیابی روش جایگزینی حجمی در برآورد فرسایش شیاری در برخی خاک‌های منطقه نیمه‌خشک تحت شیب‌های متفاوت بود.

## مواد و روش‌ها

### طرح آزمایشی

این پژوهش در سه خاک با بافت متفاوت (لوم، لوم رسی و لوم رس شنی) در چهار شیب مختلف (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد) به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار به صورت آزمایشگاهی انجام گرفت. منای انتخاب شیب سطح، مشاهده فرسایش خاک در منطقه در چنین شیب‌هایی (۳۸) و علت انتخاب این بافت‌های خاک، فراوانی خاک‌های ذکر شده در منطقه بود. آزمایش از طریق تولید جریان آب با دبی ثابت ۰/۵ لیتر بر دقیقه انجام گرفت. این شدت جریان مطابق با حداکثر دبی مورد انتظار در باران‌های شدید منطقه بود و نتایج پیش‌آزمایش روی نمونه‌های خاک نیز نشان داد که چنین جریانی، آستانه شدت جریان وقوع فرسایش شیاری در خاک‌ها است. در مطالعه‌ای چن و همکاران (۱۰) نیز از شدت جریانی با دبی ۲، ۴ و ۸ لیتر بر دقیقه استفاده کرده‌اند. برای انجام آزمایش، خاک‌ها در محدوده دانشگاه زنجان شناسایی شدند. منطقه نمونه‌برداری دارای

2- Semi-Arid regions

3- Vegetation cover

1- Detachment Rate

### طراحی فلوم آزمایشی

برای بررسی فرسایش شیاری در آزمایشگاه، از فلومی به طول ۴ متر با عرض ۳۲ سانتی‌متر و با عمق ۳۰ سانتی‌متر از جنس آهن گالوانیزه استفاده شد. به منظور شبیه‌سازی لایه سخت کفه، از یک لایه رس با عمق ۵ سانتی‌متری در کف فلوم استفاده و سپس تراکم شد (۹). برای طراحی آزمایش در سه تکرار، عرض فلوم توسط ورق‌هایی از جنس پلی‌اتیلن به سه بخش مساوی جدا شد. بدین ترتیب سه بخش برای ایجاد سه قطعه شیار به عرض ۱۰ سانتی‌متر و به طول ۴ متر در فلوم قابل اجرا بود. هر شیار با سطح مقطع سهمی به عمق ۳ سانتی‌متر و عرض ۷ سانتی‌متر و با طول ۴ متر ایجاد شد. در انتهای فلوم نیز خروجی‌هایی برای جمع‌آوری روان‌آب<sup>۵</sup> و رسوب کار گذاشته شد. مقدار خاک لازم برای هر بخش از فلوم تا ارتفاع ۲۵ سانتی‌متری برای رساندن به چگالی ظاهری خاک طبیعی محاسبه و به درون فلوم ریخته شد. برای ایجاد تراکم خاک و نزدیک‌سازی چگالی ظاهری خاک داخل فلوم به شرایط طبیعی، خاک در پنج مرحله با عمق ۵ سانتی‌متر ریخته شد. برای این کار ابتدا خاک داخل فلوم مرطوب شد و به وسیله تخته (۷ سانتی‌متر در ۴ متر) و با اعمال فشار ثابت و یکنواخت (با گذاشتن وزنه بر روی تخته) فشرده شدند و زمانی که تفاوت چگالی ظاهری خاک داخل فلوم با خاک مزرعه به کمتر از ۱۰ درصد رسید، آزمایش‌های فرسایشی آغاز شد.

### اندازه‌گیری فرسایش شیاری

فرسایش شیاری در نمونه‌های خاک تحت شرایط رطوبتی ظرفیت مزرعه مورد بررسی قرار گرفت. در این شرایط رطوبتی، نگهداری جریان آب در خاک شیار به حداقل رسیده، فرسایش شیاری سریع‌تر رخ می‌دهد. برای این منظور، پیش از انجام آزمایش، خاک داخل فلوم ابتدا اشباع شد و سپس به مدت ۲۴ ساعت در شرایط زهکشی آزاد قرار گرفت تا به رطوبت ظرفیت مزرعه برسد. مقدار فرسایش شیاری، تحت شرایط هیدرولیکی ثابت در هر شیار با استفاده از جریانی با دبی ثابت ۰/۵ لیتر بر دقیقه در چهار شیب (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد) و در سه تکرار اندازه‌گیری شد. جریان آب از طریق شلنگ شیر آب با دبی ثابت به ابتدای هر قطعه شیار وارد شد (شکل ۱). برای جلوگیری از شستشوی مستقیم خاک در ابتدای شیار، از پارچه کفی برای حمایت سطح خاک استفاده شد (۱۸). مقدار خاک فرسایش یافته از هر شیار از زمان رسیدن جریان به انتهای شیار تا ۳۰ دقیقه پس از آن در مخزن انتهایی فلوم جمع‌آوری شد. مقدار فرسایش شیاری بر اساس جرم خاک فرسایش یافته از شیار در واحد سطح شیار بر حسب گرم بر متر

بارندگی سالانه بین ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌متر است و اقلیم آن بر اساس روش طبقه‌بندی اقلیمی دمارتن، نیمه‌خشک سرد است. خاک‌های منطقه نمونه‌برداری اغلب ماده آلی<sup>۱</sup> اندک دارند و پایداری آنها در برابر تنش‌های بیرونی مانند ضربه قطرات باران یا جریان آب بسیار اندک است. در این مناطق، خاک‌ها از پوشش گیاهی اندکی برخوردارند و گاه بدون پوشش گیاهی هستند. در دامنه‌های تحت این شرایط، خاک‌ها به شدت در معرض نیروی تخریبی باران و جریان آب ناشی از آن قرار می‌گیرند (۳۲).

### نمونه‌برداری خاک

پیش از نمونه‌برداری، چگالی ظاهری<sup>۲</sup> خاک‌ها در محل نمونه برداری به وسیله سیندر فلزی (۴) با قطر داخلی (۴/۸۵ سانتی‌متر) و ارتفاع ۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. هدف از این کار، شبیه‌سازی شرایط خاک در آزمایشگاه با شرایط مزرعه‌ای بود. خاک‌ها از الک ۸ میلی‌متری عبور داده شدند (۹ و ۱۹). همچنین نمونه‌های خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر برداشت شد.

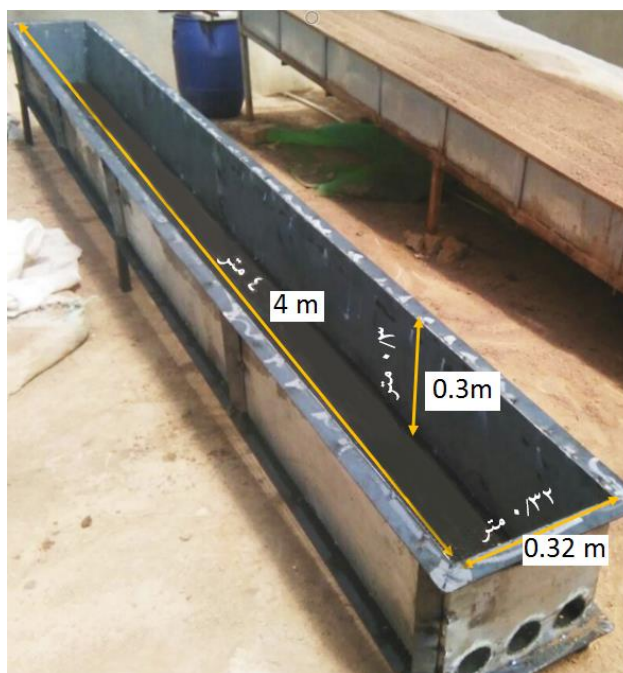
### تعیین ویژگی‌های خاک

برای تعیین متوسط اندازه خاکدانه، نمونه‌های خاک طبیعی به وسیله سری الک‌های ۸، ۴/۷۵، ۲/۳۶، ۲، ۱/۱۸، ۰/۶، ۰/۳، ۰/۲۵ و ۰/۱۵ میلی‌متری جدا و متوسط قطر آن با شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه (در حالت خشک) تعیین شد. پایداری خاکدانه به روش الک تر در خاکدانه‌های با قطر ۵/۶ تا ۸ میلی‌متر با سرعت ۲۰ دور در دقیقه به مدت یک دقیقه تعیین شد. برای این کار از سری الک‌ها با قطر سوراخ ۵/۶، ۲، ۱/۱۸، ۰/۶، ۰/۲۵ و ۰/۱۵ میلی‌متر برای جداسازی خاکدانه‌های پایدار در آب استفاده شد و نهایتاً پایداری خاکدانه با شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه پایدار در آب (الک تر) محاسبه شد. هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به روش بار ثابت (۱۲) اندازه‌گیری شد. در نمونه خاک‌های گذارنده شده از الک ۲ میلی‌متر، آزمایش‌های شیمیایی شامل محتوای کربنات کلسیم معادل خاک (CaCO<sub>3eqv</sub>) به روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک یک نرمال (۲۸)، کربن آلی به روش اکسیداسیون تر (۳۹)، ظرفیت تبادل کاتیونی<sup>۳</sup> به روش باور (۲۰)، مقدار کاتیون سدیم (Na<sup>+</sup>) به وسیله دستگاه فلیم فوتومتر (۳۶) و بر اساس آن درصد سدیم تبدالی<sup>۴</sup> و نسبت جذب سدیم (SAR) از روابط تجربی تعیین شدند (۳۶).

- 1- Organic Matter
- 2- Bulk Density
- 3- Cation Exchange Capacity
- 4- Exchangeable Sodium Percentage

مربع (g.m<sup>-2</sup>) محاسبه شد و شدت فرسایش شیاری بر اساس مقدار فرسایش شیاری در واحد زمان بر حسب گرم بر متر مربع در ثانیه

به دست آمد. (g.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>)



شکل ۱- نمایی از فلوم طراحی شده برای آزمایش‌های فرسایش شیاری  
Figure 1- A view of the designed flume for rill erosion experiments

قبلاً از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شده بود، جایگزین شد. برای این منظور، مقدار خاک لازم برای پر کردن بخش‌های فرسایش یافته با ترازو توزین شد. بر اساس جرم کل مقدار خاک جایگزین شده در واحد سطح، مقدار خاک فرسایش یافته از هر شیار بر حسب گرم بر متر مربع به دست آمد (شکل ۲).

### بررسی روش جایگزینی حجمی

برای برآورد فرسایش شیاری با استفاده از روش جایگزینی حجمی، شیارهای ایجاد شده در طول فلوم بررسی و با استفاده از نمونه خاک هواخشک شده جایگزین شد؛ به طوری که شکل مقطع شیار مشابه با شکل اولیه آن (قبل از ورود جریان به درون شیار) باشد. خاک جایگزین شده از نمونه خاک مشابه با خاک مورد آزمایش که



(ب)



(الف)

شکل ۲- نمایی از شیار ایجاد شده توسط جریان آب شبیه‌سازی شده (الف) و پر کردن شیار با خاک مشابه بر مبنای روش جایگزینی حجمی (ب)  
Figure 2- A view of rill created by the simulated water flow (a) and fill the rills using similar soil using the Volumetric Replacement Method (b)

## تحلیل داده‌ها

برای بررسی اثر عوامل مورد بررسی (بافت خاک و شیب سطح) بر فرسایش شیاری از روش تجزیه واریانس با استفاده از آزمون توکی در سطح احتمال ۹۵ درصد در محیط نرم‌افزار SPSS 24 استفاده شد. برای بررسی دقت روش جایگزینی حجمی در برآورد فرسایش شیاری، مقدار فرسایش خاک برآورد شده در مقابل مقدار فرسایش خاک اندازه‌گیری شده مورد مقایسه قرار گرفت و برای ارزیابی روش، از خط یک به یک و آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup> (RMSE) (۱۵) و میانگین خطای مطلق<sup>۲</sup> (ME) (۱۶) استفاده شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x_i^*)^2}{n}}$$

$$ME = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x_i^*)^2}{n x_i}}$$

که در آن ها؛  $x_i$  مقدار مشاهده‌ای فرسایش شیاری،  $x_i^*$  مقدار برآوردی فرسایش شیاری با استفاده از روش جایگزینی حجمی و  $n$  تعداد واحدهای آزمایشی (۱۲ واحد در ۳ تکرار) است.

## نتایج و بحث

### ویژگی‌های خاک‌ها

در جدول ۱ ویژگی‌های خاک‌های مورد بررسی ارائه شده است. نسبت جذب سدیم<sup>۳</sup> (SAR) از ۲/۸۶ در خاک لوم تا ۶/۷ در خاک لوم رسی متغیر بود و کم‌تر از حد سدیمی بوده و خاک‌های مورد مطالعه از این نظر در حد معمول قرار دارند. وجود مقدار زیاد کربنات کلسیم معادل در خاک‌ها (بین ۲۰ تا ۲۷ درصد) نشان از شرایط آهکی می‌باشد (۲۵). که به دلیل سنگ مادر آهکی خاک‌های منطقه بوده که به مرور زمان تحت تأثیر هوازدگی فیزیکی و شیمیایی قرار گرفته و خاک‌هایی سرشار از آهک را به وجود می‌آورد (۲۱). خاک‌ها از نظر ماده آلی بسیار فقیر (کم‌تر از ۰/۶ درصد) هستند و بیش‌ترین مقدار ماده آلی در خاک لوم با ۰/۵۸ درصد است. مواد آلی از طریق اتصال ذرات خاک به یکدیگر به فرآیند خاکدانه‌سازی و افزایش پایداری ساختمان خاک کمک می‌کند (۱۲). بیش‌ترین مقدار سنگریزه در خاک لوم رسی شنی (۱۸/۲۰ درصد) و کم‌ترین مقدار آن در خاک با بافت لوم رسی (۸/۷ درصد) است. تغییرات زیادی از نظر چگالی ظاهری بین خاک‌ها وجود ندارد به طوری که مقدار آن از ۱/۱۷ گرم بر

سانتی‌متر مکعب در خاک لوم رسی تا ۱/۲۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب در خاک لوم رسی شنی متغیر است. بیش‌ترین مقدار تخلخل در خاک لوم رسی (۵۶ درصد) است که دلیل آن وجود مقدار رس زیاد در این خاک است. بررسی ویژگی‌های ساختمانی خاک شامل متوسط اندازه خاکدانه‌ها (۱/۰۷ تا ۲/۴۳ میلی‌متر) و پایداری خاکدانه‌ها<sup>۴</sup> در برابر آب (میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها حاصل از آزمایش الک تر) نشان داد که خاک‌های منطقه از درجه خاکدانه‌سازی کم و پایداری اندکی (با میانگین وزنی قطر کم‌تر از ۱ میلی‌متر) برخوردار هستند. با توجه به پایداری پایین ساختمان خاک، انتظار می‌رود خاک مقاومت کمی در برابر نیروهای فرساینده مانند جریان آب داشته باشد. مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک‌ها بسیار متغیر بود و کم‌ترین مقدار آن در خاک لوم (۲/۸۲ سانتی‌متر بر ساعت) و بیش‌ترین مقدار در خاک لوم رس شنی (۸/۲۲ سانتی‌متر بر ساعت) است. این ویژگی خاک به شدت تحت تأثیر فراوانی ذرات اولیه، ساختمان و چگالی ظاهری قرار دارد و معمولاً در خاک‌های درشت بافت و حاوی سنگریزه زیاد مانند لوم رس شنی بیش‌تر است. وجود هدایت هیدرولیکی اشباع زیاد امکان زهکشی سریع آب از خاک را در بارندگی‌های شدید یا وقوع جریان‌های سطحی زیاد روی خاک فراهم می‌آورد.

### قابلیت روش جایگزینی حجمی

در شکل ۳ نمایی از شیارهای ایجاد شده توسط جریان در شیب ۱۰ درصد نشان داده شده است. شدت وقوع فرسایش شیاری در خاک‌های مورد بررسی متفاوت بود.

در شکل ۴ نتایج ارزیابی روش جایگزینی حجمی در بافت‌های مختلف خاک با مقایسه پراکنش داده‌ها پیرامون خط ۱:۱، نشان داده است. ارزیابی خطا با استفاده از آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (ME) نشان داد که مقدار RMSE از ۰/۶ (g/m<sup>2</sup>.sec) در خاک لوم تا ۲/۷۲ در خاک لوم رس شنی تغییر می‌کند و مقدار ME از ۳/۸۶ (g/m<sup>2</sup>.sec) در خاک لوم تا ۷/۰۲ (g/m<sup>2</sup>.sec) در خاک لوم رس شنی متغیر است. بررسی پراکنش داده‌های برآوردی و مشاهده‌ای در پیرامون خط ۱:۱ نشانگر وجود بیش‌برآوردی در روش جایگزینی حجمی است. یکی از علل برآورد بیش‌تر از مقدار واقعی حجم خاک فرسایش یافته از شیار، تغییرات ویژگی‌های فیزیکی خاک داخل شیار در اثر عبور جریان آب طی آزمایش است. چگالی ظاهری خاک که ویژگی مهم فیزیکی خاک است، قبل از اعمال جریان با مقدار آن پس از ورود جریان آب و در نتیجه وقوع فرسایش شیاری تغییر پیدا می‌کند.

- 1- Root of mean square Error
- 2- Mean Error
- 3- Sodium Adsorption Ratio

4- Aggregate Stability

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

Table 1- Physicochemical properties of the soils

ویژگی‌های خاک Soil property	لوم Loam	لوم رسی Clay Loam	لوم رس شنی Sandy Clay Loam
شن (%) Sand (%)	45.72	26.88	55.00
سیلت (%) Silt (%)	36.77	35.60	22.50
رس (%) Clay (%)	17.50	35.70	22.50
سنگ‌ریزه (%) Gravel (%)	15.60	8.70	18.20
چگالی ظاهری (g.cm <sup>-3</sup> ) BD (g.cm <sup>-3</sup> )	1.20	1.17	1.29
متوسط قطر خاکدانه‌ها MWD <sub>dry</sub> (mm)	2.22	1.07	2.43
پایداری خاکدانه‌ها (mm) MWD <sub>wet</sub> (mm)	0.97	0.52	0.97
هدایت هیدرولیکی اشباع (cm.h <sup>-1</sup> ) K <sub>s</sub> (cm.h <sup>-1</sup> )	2.82	5.34	8.22
تخلخل (%) Porosity (%)	54.70	55.80	47.90
نسبت جذب سدیم (meq. L <sup>-0.5</sup> ) SAR (meq. L <sup>-0.5</sup> )	2.80	6.70	2.90
کربنات کلسیم معادل (%) CaCO <sub>3</sub> (%)	27.00	23.30	20.00
ماده آلی (%) OM (%)	0.58	0.44	0.34

بیان کردند که در فرسایش شیاری اگر روند خروج رسوب از شیاریها افزایش یابد، می‌تواند از ظرفیت انتقال جریان بیش‌تر شود و در نتیجه بخشی از آن در داخل شیاریها قبل از اینکه به خروجی برسد مجدداً ته‌نشست شود، این امر نیز می‌تواند یکی از منابع خطا در برآورد مقدار خاک فرسایش یافته ناشی از ایجاد شیاری در روش جایگزینی حجمی باشد.

در شکل ۵ نیز مقایسه روش جایگزینی حجمی با مقدار واقعی فرسایش شیاری در شیب‌های مختلف نشان داده شده است. مقدار RMSE از ۱/۰۸ (g/m<sup>2</sup>.sec) در شیب ۱۰ درصد تا ۱/۸۶ (g/m<sup>2</sup>.sec) در شیب ۲۰ درصد تغییر می‌کند و مقدار ME از ۱/۸۶ (g/m<sup>2</sup>.sec) در شیب ۱۵ درصد تا ۸/۳۶ (g/m<sup>2</sup>.sec) در شیب ۵ درصد متغیر است. به‌طور کلی با افزایش شیب سطح، مقدار RMSE افزایش یافت (شکل ۶). این نتیجه نشان می‌دهد که روش جایگزینی حجمی، دقت کافی در برآورد مقدار فرسایش شیاری به ویژه در شیب‌های تندتر را ندارد.

علت دیگر وجود خطای بیش‌برآورد، فرسایش و رسوب‌گذاری پیوسته در طول شیاری اثر عبور جریان آب است. ذرات خاک از بخش‌هایی از شیاری برداشت شده اما در بخش‌های پایین‌تر رسوب یافته، از فلوام خارج نمی‌شوند. در این صورت ریخت‌شناسی شیاری حتی در بخش‌هایی از طول شیاری که در آن فرسایش رخ نداده، به دلیل رسوبگذاری مواد فرسایش یافته از بالادست شیاری تغییر می‌یابد. این پدیده موجب می‌شود خاک هدررفته از شیاری کم‌تر از مقدار فرسایش شیاری باشد. از این رو مقدار رسوب (خاک هدررفته) اندازه‌گیری شده در پایین شیاری اغلب کم‌تر از مقدار واقعی فرسایش در شیاری است. وانگ و لای<sup>۱</sup> (۴۲) با استفاده از اسکنر لیزری به بررسی و برآورد فرسایش شیاری پرداختند. نتایج این پژوهشگران نیز نشان داد که روش اسکنر لیزری نیز در زمان‌های مختلف همانند روش جایگزینی حجمی دچار بیش‌برآوردی است. همچنین هوانگ و همکاران (۱۸)





لوم رسی Clay loam



لوم Loam



لوم رس شنی Sandy clay loam

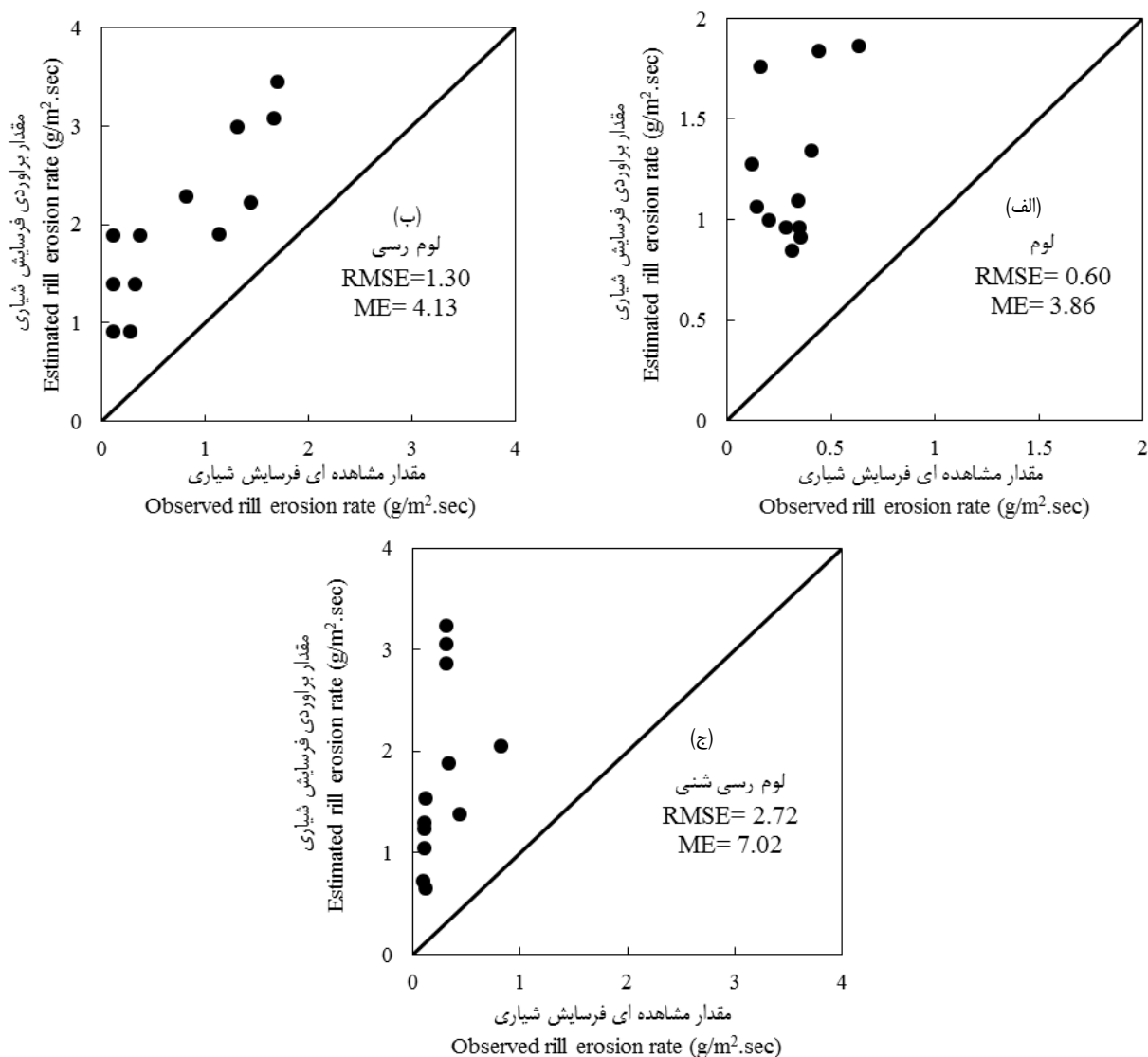
شکل ۳- نمایی از شیاریهای ایجاد شده در اثر جریان آب شبیه‌سازی شده در سه خاک مورد مطالعه در شیب ۱۰ درصد  
Figure 3- Views of the rills created by the simulated water flow in the soils under 10% slope gradient

مقدار فرسایش شیاری در خاک‌های مورد بررسی به جز خاک لوم تحت تأثیر شیب قرار گرفت؛ به طوری که با افزایش شیب سطح، شدت فرسایش شیاری افزایش معنی‌داری یافت (شکل ۷). در خاک لوم با افزایش شیب از ۵ تا ۱۵ درصد میزان فرسایش شیاری افزایش یافت که دلیل آن حساسیت ذرات و مستعد بودن آن‌ها برای انتقال و وجود مقادیر زیادی سیلت و شن ریز در این خاک است اما در شیب ۲۰ درصد از مقدار فرسایش به شدت کاسته شد. وضعیت ساختمانی بهتر این خاک از نظر متوسط اندازه خاکدانه (۲/۲۲ میلی‌متر) و پایداری زیاد خاکدانه‌ها (۰/۹۷ میلی‌متر) از یک سو و فراوانی اندک

در شکل ۶ تغییرات RMSE و ME در شیب‌های مختلف نمایش داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود تغییرات افزایش RMSE در شیب‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد اندک بوده اما در شیب ۲۰ درصد مقدار خطا (RMSE=۱/۸۶ g/m<sup>2</sup>.sec) افزایش بیشتری داشت. همچنین بررسی تغییرات ME نسبت به شیب نشان داد که با افزایش شیب مقدار ME کاهش یافت اما مقدار آن در شیب ۲۰ درصد نسبت به شیب ۱۵ درصد افزایش پیدا کرد. این نتیجه نشان می‌دهد که شیب عاملی مهم در کارایی روش جایگزینی حجمی در برآورد فرسایش شیاری در خاک‌های مورد بررسی است.

وجود تولید جریان بیشتر، هدررفت خاک از شیار کمتر شود.

ذرات ریز مانند رس از سوی دیگر، از دلایل حساسیت کمتر این خاک به فرسایش شیبی بود که موجب شد حتی در شیب تند (۲۰ درصد) با



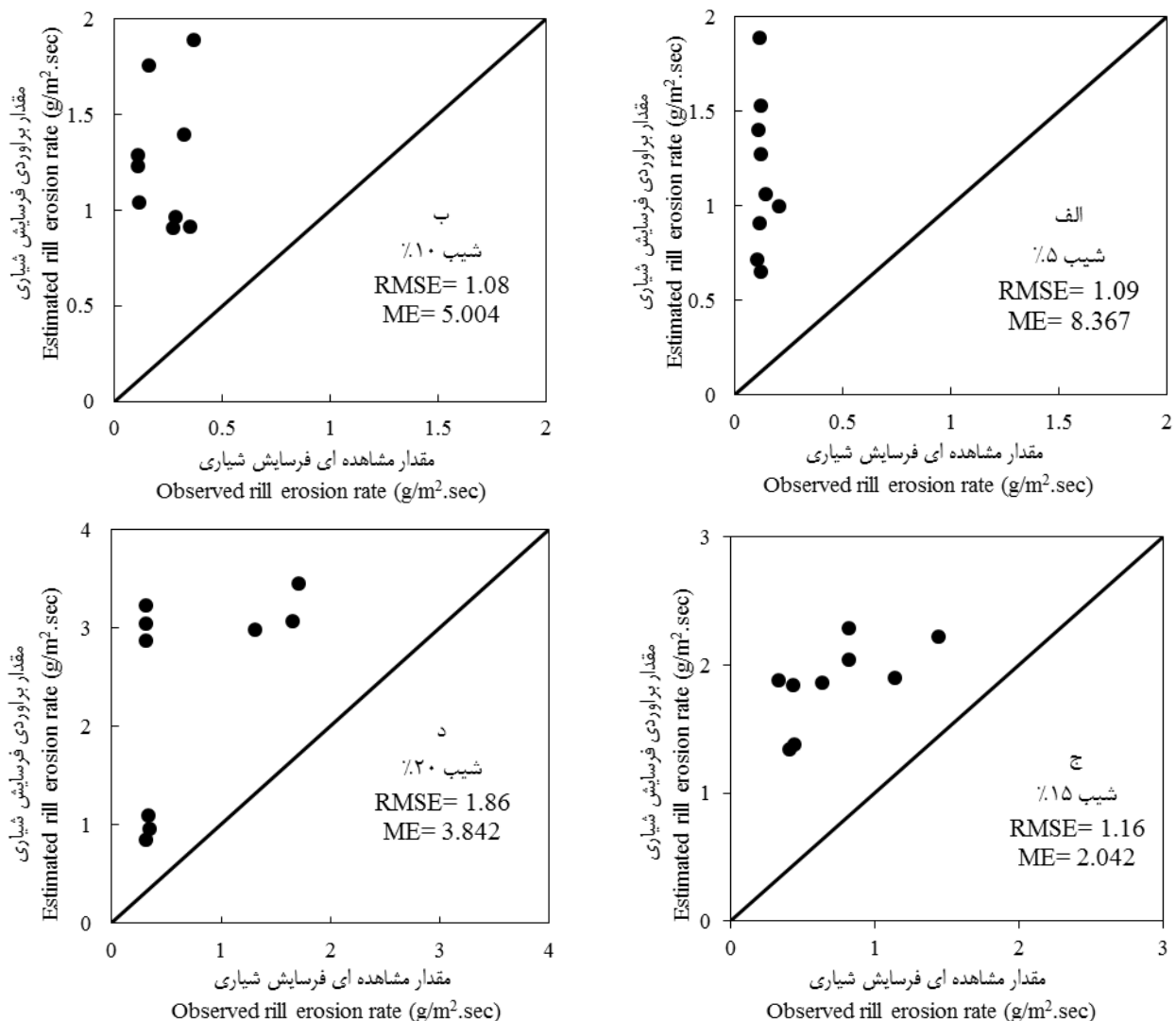
شکل ۴- مقدار برآوردی فرسایش شیبی بر اساس روش جایگزینی حجمی در برابر مقدار مشاهده‌ای آن در خاک لوم (الف) لوم رسی (ب) و لوم رسی شنی (ج)

Figure 4- Estimated values of rill erosion using the Volumetric replacement method versus the observed values in the study soils; Loam (a) Clay loam (b) and Sandy loam (c)

و سیلت، خاکدانه‌های ریز (اجتماع ذرات رس) نیز تولید می‌شوند و طبیعتاً به دلیل وزن کمی که چنین ذراتی دارند به آسانی جریان آب می‌تواند آنها را منتقل کند. علت افزایش شدت فرسایش شیبی با افزایش درجه شیب سطح، تشدید تولید جریان آب گزارش شده است. در این راستا چن و همکاران (۹) مطالعه‌ای در خاک لوم سیلتی تحت پنج درجه شیب ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ و سه دبی جریان دو، چهار و هشت لیتر بر دقیقه انجام و نشان دادند که با افزایش شیب، دبی جریان و در نتیجه مقدار فرسایش شیبی افزایش می‌یابد.

خاک لوم رسی، حساس‌ترین خاک به فرسایش شیبی با تغییر درجه شیب سطح بود. فراوانی بیشتر ذرات ریز به ویژه رس و سیلت (مجموعاً ۷۱/۳ درصد) و نیز مقدار اندک خاکدانه‌ها (۱/۰۷) و ناپایداری آن‌ها در برابر آب (۰/۵۳ میلی‌متر) از جمله عواملی هستند که حساسیت این خاک را به فرسایش شیبی افزایش می‌دهند. از این رو با افزایش شیب، به دلیل تخریب زیاد خاکدانه‌ها و موجودیت فراوان ذرات قابل انتقال مانند رس، شدت فرسایش شیبی نیز افزایش یافت. با تخریب خاکدانه، علاوه بر تولید ذرات اولیه مانند رس





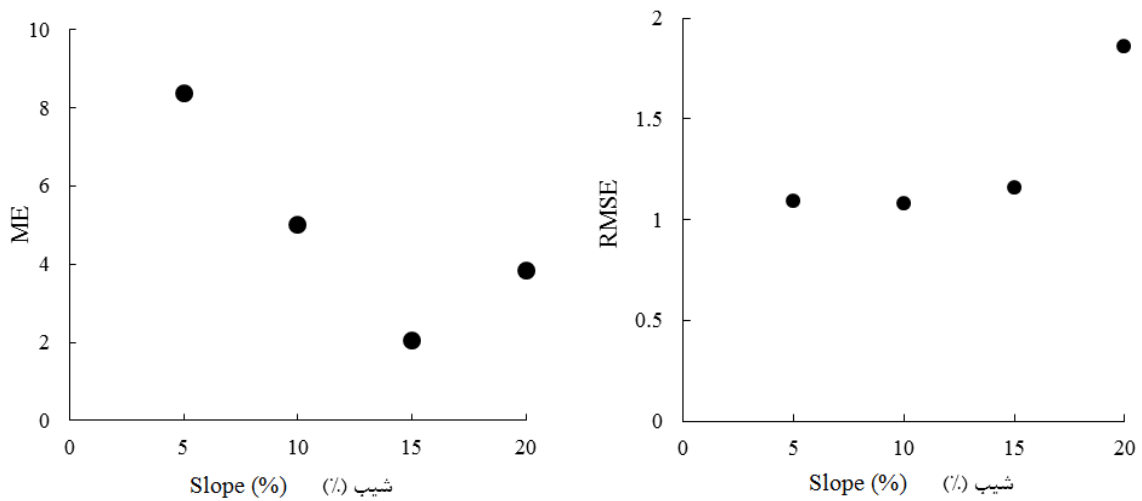
شکل ۵- مقدار برآوردی فرسایش شیاری بر اساس روش جایگزینی حجمی در برابر مقدار مشاهده‌ای آن در شیب ۵ (الف)، ۱۰ (ب)، ۱۵ (ج) و ۲۰ درصد (د)

Figure 5- Estimated values of rill erosion using the Volumetric Replacement Method versus the observed values under slope gradients; 5% (a), 10% (b), 15% (c) and 20% (d)

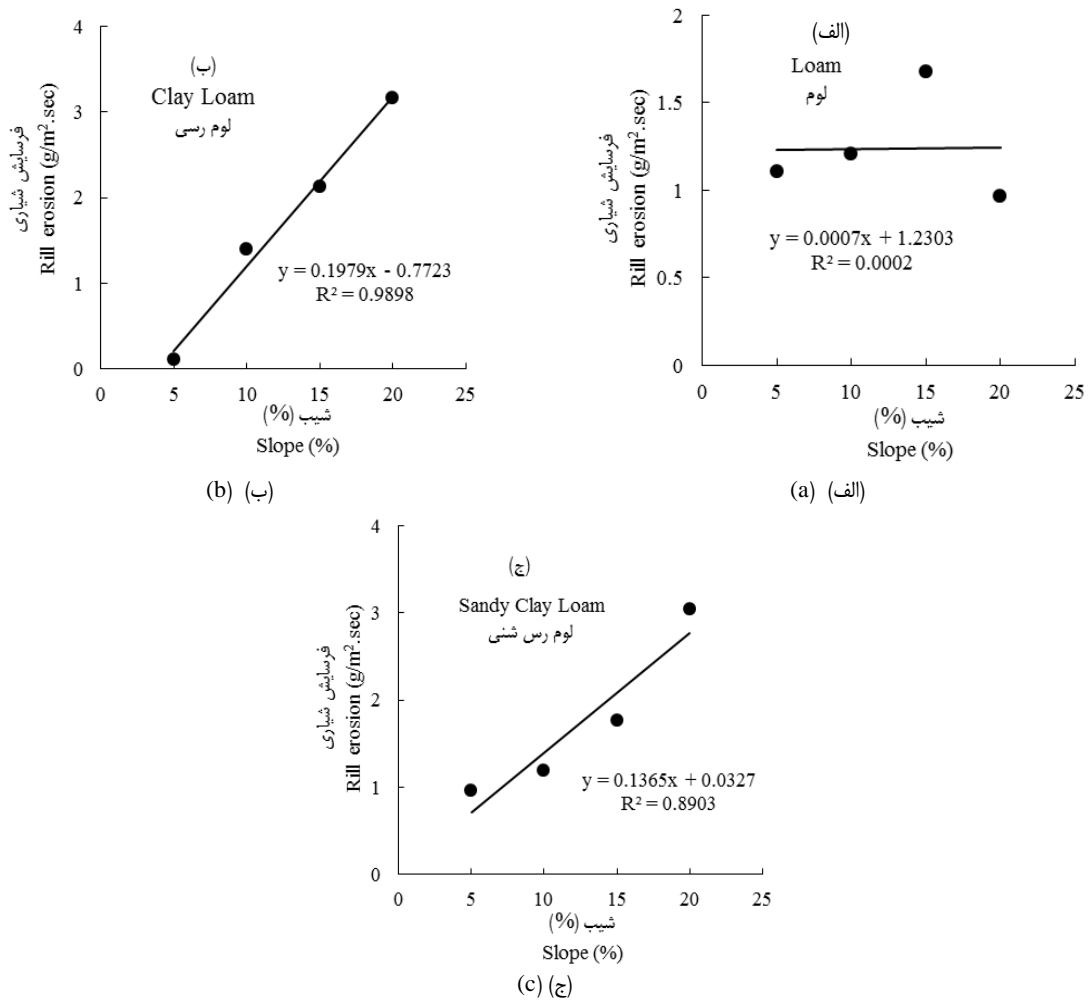
بررسی تأثیر شدت بارندگی و درجه شیب در ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در شیار و فرآیندهای پویا پرداختند. برای این منظور از فلومی به طول ۱۰، عرض ۱/۵ و ارتفاع ۰/۵ متر، تحت سه شدت بارندگی (۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ میلی متر در ساعت) و سه درجه شیب (۱۰، ۱۵ و ۲۰) استفاده شد. نتایج نشان داد که فرسایش شیاری به سرعت جریان شیار و قدرت جریان حساس بود. با وجود تأثیر مثبت شیب سطح بر فرسایش شیاری در اغلب خاک‌ها، مقدار خطای برآورد روش جایگزینی حجمی در شیب‌های تند، کم‌تر بود.

اکسوی<sup>۱</sup> و همکاران (۱) بیان کردند که با افزایش شیب مقدار رسوب خروجی از شیارها به صورت خطی افزایش می‌یابد. لی<sup>۲</sup> و همکاران (۲۲) بیان کردند که با افزایش شیب و دبی جریان، ظرفیت انتقال ذرات خاک و در نتیجه فرسایش شیاری افزایش می‌یابد. وانگ و لای (۴۰) نشان دادند که با افزایش شیب از ۵ تا ۲۵ درجه میزان فرسایش شیاری افزایش یافته است و از ۲۵ تا ۳۰ درجه مقدار فرسایش شیاری کاهش پیدا کرده است. شن و همکاران (۳۴) نیز به

1- Aksoy  
2- Lei



شکل ۶- تغییرات ریشه میانگین مربعات خطا یا RMSE (الف) و میانگین خطای مطلق ME در شیب‌های مختلف  
 Figure 6- Variation of the root mean squares error, RMSE (a) and mean absolute error, ME (b) in various slopes



شکل ۷- رابطه بین فرسایش شیار و شیب‌ها در خاک‌های مورد بررسی؛ لوم (الف، لوم رسی (ب) و لوم رس شنی (ج)  
 Figure 7- Relationships between rill erosion and slope gradient in the soils: loam (a), clay loam (b) and sandy clay loam (c)

فرسایش شیب‌ها است. میزان بیش‌برآورد بسته به بافت خاک و درجه شیب تغییر می‌کند و عمدتاً در خاک‌های با بافت ریز و در شیب‌های بالا بیش‌تر است. تغییر در ویژگی‌های فیزیکی خاک از جمله چگالی ظاهری در اثر جریان متمرکز آب، عاملی مهم است که محاسبه حجم شیار به‌وجود آمده در اثر جریان آب را دچار خطای زیاد می‌کند. در خاک‌های ریزبافت و در شیب‌های تند، شدت تغییر ویژگی‌های فیزیکی خاک در اثر جریان آب بیش‌تر است. از سوی دیگر، رسوب گذاری ذرات فرسایش یافته در بخش‌های مختلف طول شیار و عدم امکان انتقال آنها به نقطه خروجی شیار موجب می‌شود مقدار خاک هدررفته از شیار کم‌تر از مقدار خاک فرسایش یافته در شیار باشد. در پژوهش‌های آینده می‌توان روش جایگزینی حجمی را در شرایط طبیعی دامنه و تحت جریان‌های با دبی متفاوت و یا تحت باران‌های شبیه‌سازی شده همراه با اثر توأم فرسایش بین شیب‌ها مورد ارزیابی قرار داد تا مدیریت مناسب‌تر و دقیق‌تری برای مهار فرسایش در منطقه انجام داد.

این نتیجه نشان می‌دهد زمانی که مقدار فرسایش شیب‌ها به دلایل متعدد از جمله تندی شیب افزایش می‌یابد و شیارهای حجیم (عریض‌تر و عمیق‌تر) تشکیل می‌شود، روش جایگزینی حجمی با خطای زیادی روبرو می‌شود. به عبارت دیگر زمانی که شیارها کوچک‌تر هستند، دقت روش جایگزینی حجمی بیش‌تر است چرا که جایگزینی شیار کوچک با نمونه خاک مشابه با خطای کم‌تری مواجه است. در شرایطی که فرسایش شیب‌ها شدیدتر است، شکل هندسی مقطع شیار در طول شیار تغییرات زیادی پیدا می‌کند و حتی ممکن است در بخش‌هایی از طول شیار رسوب‌گذاری رخ دهد. از این رو جایگزینی خاک از دست رفته از شیار با نمونه خاک مشابه به صورتی که مقطع شیار مشابه با مقطع اولیه (پیش از فرسایش) باشد، سخت بوده و دچار خطای زیاد می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

ارزیابی روش جایگزینی حجمی در خاک‌های مورد بررسی تحت شیب‌های متفاوت نشان داد که این روش دچار بیش‌برآورد از نظر

### منابع

1. Aksoy H., Unal N. E., Cokgor S., Gedikli A., Yoon J., Koca K., and Pak G. 2013. Laboratory experiments of sediment transport from bare soil with a rill. *Hydrological sciences Journal* 58(7): 1505-1518.
2. Asadi H., Aligoli M., and Gorji M. 2017. Dynamic Changes of Sediment Concentration in Rill Erosion at Field Experiments. *JWSS-Isfahan University of Technology* 20(78): 125-139. (In Persian)
3. Bagnold R.A. 1966. An approach to the sediment transport problem from general physics. US government printing office.
4. Blake G.R., and Hartge K.H. 1986. Bulk Density 1. *Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods, (methodsofsoilan1)*, 363-375.
5. Bonilla C.A., and Johnson O.I. 2012. Soil erodibility mapping and its correlation with soil properties in Central Chile. *Geoderma* 189: 116-123.
6. Casalí J., Loizu J., Campo M.A., De Santisteban L.M., and Álvarez-Mozos J. 2006. Accuracy of methods for field assessment of rill and ephemeral gully erosion. *Catena* 67(2): 128-138.
7. Cerdan O., Le Bissonnais Y., Couturier A., Bourenane H., and Souchère V. 2002. Rill erosion on cultivated hillslopes during two extreme rainfall events in Normandy, France. *Soil and Tillage Research* 67(1): 99-108.
8. Chen X.Y., Huang Y.H., Zhao Y., Mo B., Mi H.X., and Huang C.H. 2017. Analytical method for determining rill detachment rate of purple soil as compared with that of loess soil. *Journal of Hydrology* 549: 236-243.
9. Chen X.Y., Zhao Y., Mi H.X., and Mo B. 2016. Estimating rill erosion process from eroded morphology in flume experiments by volume replacement method. *Catena* 136: 135-140.
10. Chen X.Y., Zhao Y., Mo B., and Mi H.X. 2014. An improved experimental method for simulating erosion processes by concentrated channel flow. *Plos one* 9(6): e99660.
11. Fallow D.J., Elrick D.E., Reynolds W.D., Baumgartner N., and Parkin G.W. 1994. Field measurement of hydraulic conductivity in slowly permeable materials using early-time infiltration measurements in unsaturated media. In *Hydraulic conductivity and waste contaminant transport in soil*. ASTM International.
12. Felton G.K. 1995. Temporal variation of soil hydraulic properties on municipal solid waste amended mine soils. *Transactions of the ASAE* 38(3): 775-782.
13. Fenli Z. 1989. A Research on Method of Measuring Rill Erosion Amount [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 4.
14. Gao Y., Zhu B., He N., Yu G., Wang T., Chen W., and Tian J. 2014. Phosphorus and carbon competitive sorption-desorption and associated non-point loss respond to natural rainfall events. *Journal of Hydrology* 517: 447-457.
15. Ghose D.K., and Samantaray S. 2019. Estimating Runoff Using Feed-Forward Neural Networks in Scarce Rainfall

- Region. In *Smart Intelligent Computing and Applications* (pp. 53-64). Springer, Singapore. RMSE
16. Goodarzi M.S., Amiri B.J., and Navardi S. 2018. Investigating the Optimization Strategies on Performance of Rainfall-Runoff Modeling. *EPIc Series in Engineering*, 3: 827-835. RMSE VAAAAAa ME
  17. Govers G., Giménez R., and Van Oost K. 2007. Rill erosion: exploring the relationship between experiments, modelling and field observations. *Earth-Science Reviews* 84(3-4): 87-102.
  18. Huang Y., Chen X., Luo B., Ding L., and Gong C. 2015. An experimental study of rill sediment delivery in purple soil, using the volume-replacement method. *PeerJ* 3: e1220.
  19. Jin K., Cornelis W. M., Gabriels D., Baert M., Wu H.J., Schiettecatte W., ... and Hofman G. 2009. Residue cover and rainfall intensity effects on runoff soil organic carbon losses. *Catena* 78(1): 81-86.
  20. Klute A. 1986. Water retention: Laboratory methods, *Methods of Soil Analysis, Part I*, A. Klute, 635-660. Am. Soc. Agron., Madison, Wisc.
  21. Kowalska J.B., Zaleski T., Józefowska A., and Mazurek R. 2019. Soil formation on calcium carbonate-rich parent material in the outer Carpathian Mountains—A case study. *Catena* 174: 436-451.
  22. Lei T.W., Zhang Q.W., and Yan L.J. 2009. Physically-based rill erosion model.
  23. Liu F., Zhang G. H., Sun L., and Wang H. 2016. Effects of biological soil crusts on soil detachment process by overland flow in the Loess Plateau of China. *Earth Surface Processes and Landforms* 41(7): 875-883.
  24. Ma Y., Lei T., and Xiusheng Y. 2015. Volume replacement method for partitioning contents of rocks, soil particles and water mixture. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 31(9): 85-91.
  25. Miao C., Ni J., Borthwick A.G., and Yang L. 2011. A preliminary estimate of human and natural contributions to the changes in water discharge and sediment load in the Yellow River. *Global and Planetary Change* 76(3-4): 196-205.
  26. Mirhasani M., Rostami N., Bazgir M., and Tavakoli M. 2019. Threshold friction velocity and soil loss across different land uses in arid regions: Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 12(3): 91.
  27. Najafi A., Solgi A., and Sadeghi S.H. 2009. Soil disturbance following four wheel rubber skidder logging on the steep trail in the north mountainous forest of Iran. *Soil and Tillage Research* 103(1): 165-169.
  28. Pansu M., and Gautheyrou J. 2007. *Handbook of soil analysis: mineralogical, organic and inorganic methods*. Springer Science and Business Media.
  29. Poesen J., Nachtergaele J., Verstraeten G., and Valentin C. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena* 50(2-4): 91-133.
  30. Refahi H. 2015. *Water erosion and control*, Tehran: university of Tehran press, 8th Edition. (In Persian)
  31. Refahi H.G. 2003. *Water erosion and control*, Tehran: university of Tehran press.
  32. Ries J.B., and Hirt U. 2008. Permanence of soil surface crusts on abandoned farmland in the Central Ebro Basin/Spain. *Catena* 72(2): 282-296.
  33. Romero C.C., Stroosnijder L., and Baigorria G. A. 2007. Interrill and rill erodibility in the northern Andean Highlands. *Catena* 70(2): 105-113.
  34. Shen H., Zheng F., Wen L., Han Y., and Hu W. 2016. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope. *Soil and Tillage Research* 155: 429-436.
  35. Su Z.L., Zhang G.H., Yi T., and Liu F. 2014. Soil detachment capacity by overland flow for soils of the Beijing region. *Soil Science* 179(9): 446-453.
  36. Sumner M. E. 1993. Sodic soils-New perspectives. *Soil Research* 31(6): 683-750.
  37. Toy T.J., Foster G.R., and Renard K.G. 2002. Soil erosion processes, prediction measurement under simulated rainfall. *Journal of Soil Science* 150: 787-798.
  38. Vaezi A.R., and Ebadi M. 2017. Particle size distribution of surface-eroded soil in different rainfall intensities and slope gradients. *Journal of Water and Soil* 31(1): 216-29. (In Persian with English abstract)
  39. Walkley A., and Black I. A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37(1): 29-38.
  40. Wang Y.C., and Lai C.C. 2018. Evaluating the erosion process from a single-stripe laser-scanned topography: A laboratory case study. *Water* 10(7): 956.
  41. Yuequn D., Fang L., Qingwen Zh., Tingwu L. 2015. Determining ephemeral gully erosion process with the volume replacement method, *CATENA* (131): 119-124.
  42. Zheng F.L. 1998. Study on interrill erosion and rill erosion on slope farmland of loess area. *Acta Pedologica Sinica* 35(1): 95-103. (In Chinese)

## Efficiency of the Volumetric Replacement Method in Estimating Rill Erosion under Different Slopes and Soil Textures in Semi-Arid Region, Zanzan Province

A.R. Vaezi<sup>1\*</sup>- E. Mohammadi<sup>2</sup>- N. Sadeghian<sup>3</sup>

Received: 10-06-2019

Accepted: 04-11-2020

**Introduction:** Rills are usually found on the sloping fields worldwide, especially in semi-arid slopes, where vegetation covers are often poor and soils are weakly aggregated. Rill erosion is recognized as an important process of water erosion on agricultural land in these regions and causes a grate amount of soil loss. Understanding rill erosion rate is important in the prediction of soil erosion and the prevention of soil loss in the lands. Rill erosion is often easy to observe but difficult to measure because of its complexity and stochastic nature. A common method used to determine rill erosion rate is measuring sediment concentration distribution of eroding rill flow under different flow rates. However, it is not only time-consuming but also had to measure. The volume Replacement Method is an easy method to estimate soil loss from rills in the sloped lands. Limited information is available concerning the ability of this method in different soil textures under slope gradients. Therefore, this study was conducted to evaluate the ability of the method to estimate rill erosion of semi-arid soils.

**Materials and Methods:** This study was conducted on three different soil textures i.e. loam, clay loam and sandy clay loam under four slope gradients including 5, 10, 15 and 20% using factorial arrangement based on completely randomized block design with three replications in the laboratory. A flume with 0.3 m width and 4 m length was subdivided into strips of 0.1 m width and 4 m length to imitate eroding rills. Soil samples for each soil texture were passed from 8-mm sieve and packed into the flumes at its bulk density in the field. Prior to each experimental run, the soil materials were pre-wetted to reach to water-holding capacity. Tap water was introduced into the rill from the upper end, through a water supply tank and a pump at a constant flow rate of 0.5 L.min<sup>-1</sup>. After erosion, the flume was lowered to the horizontal position for the measurements of eroded rill volumes. The rill volume was determined using soil samples passed from a 2-mm sieve. Soil loss mass eroded from soil surface was computed using rill volume and original soil bulk density packed into the flume. This value was considered as estimated value using the Volumetric Replacement Method for each soil texture under different slope gradients. The performance of the method was assessed using the measured data for each soil and slope gradient using error measures such as root mean square error (RMSE) and mean absolute error (ME).

**Results and Discussion:** Significant differences were found among soil textures and slope gradients as well as their interaction on rill erosion rate. The highest rill erosion rate was observed in clay loam (3.166 g.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>), whereas sandy clay loam showed the minimum susceptibility to rill detachment (0.962 g.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>). Higher fine particles (clay) and lower aggregation as well as weak aggregate stability are the major reasons for higher susceptibility of clay loam to rill erosion. The rill erosion was more sensitive to slope gradient than soil texture and the strongest dependency of rill erosion on slope gradient was found in clay loam (R<sup>2</sup>= 0.99). With an increase in slope gradient, rill erosion strongly increased except for loam. The Volumetric Replacement Method overestimated rill erosion in all soils and slope gradients. The highest overestimation was observed in sandy clay loam (RMSE= 2.72 g/m<sup>2</sup>.sec and ME= 7.02 g/m<sup>2</sup>.sec), whereas the lowest overestimation value was in loam (RMSE= 0.60 g/m<sup>2</sup>.sec and ME= 3.86 g/m<sup>2</sup>.sec). The performance of the Volumetric Replacement Method decreased in higher slope gradients and the highest overestimation was observed under 20% slope gradient (RMSE=1.86 g/m<sup>2</sup>.sec and ME= 3.84 g/m<sup>2</sup>.sec).

**Conclusion:** Rill erosion is strongly affected by soil texture and slope gradient. Particle size distribution, aggregates percentage and their stability can control the soil's susceptibility to detach by concentrated water flow. The Volumetric Replacement Method showed higher uncertainty as evaluated in the semi-arid soil textures especially under steep slopes. The change of soil physical properties by water flow especially bulk density result

1, 2 and 3- Professor, Former M.Sc. Student and Former Ph.D. Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanzan, respectively.

(\*- Corresponding Author Email: vaezi.alireza@znu.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.v35i1.80261

in errors in determination of rill volume by using this method. The higher change of physical properties by concentrated flow occurs in fine soil textures and steeper slopes. Additionally, continuous sedimentation along the rills imposes other errors in estimating soil loss mass from the rills.

**Keywords:** Concentrated flow, Experimental flume, Rill volume, Soil detachment, Uncertainty