

## بررسی ضریب تغییرات مکانی و زمانی هدرروی خاک تحت جریان متمرکز در شیارهای زراعت گندم دیم

حسین کریمی<sup>۱\*</sup>، امیر لکزیان<sup>۲</sup>، غلامحسین حق‌نیا<sup>۳</sup>، حجت امامی<sup>۳</sup> و مجید صوفی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، <sup>۲</sup> استاد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، <sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، <sup>۴</sup> دانشیار، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی فارس

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۱/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۸/۱۰

### چکیده

در دهه‌های گذشته نقش فرسایش خاک مورد توجه بسیاری از پژوهشگران بوده، به طوری که آگاهی از عامل‌های مؤثر در آن و تغییرات گسترده این عوامل از نیازهای اولیه مدیریت سرزمین است. هدف از این پژوهش، بررسی ضریب تغییرات مکانی و زمانی متغیرهای فرسایشی و عامل‌های هیدرولیکی در شیارهای حاصل از شخم در زراعت دیم گندم در دامنه‌های با شیب ۲۰ درصد است. در این رابطه، ابتدا شخم رایج منطقه از بالا به سمت پایین شیب انجام و شیارهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ متری ایجاد شد. پس از اعمال دبی‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ لیتر بر دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه، متغیرهای هیدرولیکی و غلظت‌های رسوب در سه فاصله زمانی و مکانی مساوی اندازه‌گیری و نرخ جدایش و انتقال ذرات محاسبه شد. به منظور بررسی ضریب تغییرات عامل‌های یاد شده نیز شاخص خطای نسبی محاسبه شد. نتایج نشان داد که خطای نسبی نرخ جدایش، انتقال و غلظت رسوب اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد را با عامل‌های هیدرولیکی دارند. این اختلاف بین قدرت جریان خطای نسبی نرخ جدایش و انتقال در سطح پنج درصد معنی‌دار شد. بررسی زمانی هدرروی خاک نیز نشان داد که ضریب تغییرات در بازه زمانی انتهایی و ابتدایی بیشتر از بازه میانی است، ولی بین این بازه‌ها تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد. علت آن را می‌توان به وجود رسوبات فراهم در مراحل اولیه و زیرخوردگی و ریزش دیواره‌ها در مراحل پایانی نسبت داد. بررسی مکانی مقدار ضریب تغییرات نرخ جدایش نشان داد که این عامل در مقطع ابتدایی شیارها از مقاطع بعدی در سطح یک درصد بوده و بیشتر است، در حالی که بین مقاطع دوم و سوم اختلاف معنی‌داری وجود نداشت.

**واژه‌های کلیدی:** تنش برشی، خطای نسبی، قدرت جریان، متغیرهای فرسایشی، نرخ جدایش خاک

### مقدمه

پژوهشگران و برنامه‌ریزان قرار گرفته است. بنابراین، ارزیابی اثرات اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی این پدیده برای توسعه برنامه‌های مدیریتی در مقیاس‌های

در سالیان اخیر فرسایش خاک و نقش مخرب آن بر سرویس‌های زیست‌بوم<sup>۱</sup> مورد توجه بسیاری از

<sup>۱</sup> Ecosystem Services

\* مسئول مکاتبات: skarimi343@gmail.com

داشته و در پژوهش ایشان بین ۴۰ تا ۹۰ درصد هدرروی خاک در فاصله ۹ تا ۱۵ متری انتهای جویچه (شیار) صورت گرفت.

جدایش و انتقال ذرات خاک با گذشت زمان نیز تغییر می‌کند. مطالعه Chalov و همکاران (۲۰۱۴) نشان داد، سهم زیادی از انتقال رسوب (۸۰-۷۰ درصد) مربوط به زمان‌های پیک جریان است. Yu و همکاران (۲۰۱۴) نیز به بررسی تغییرات جدایش ذرات خاک در زمین‌های کشاورزی در کشور چین پرداختند. این پژوهشگران دریافتند که جدا شدن ذرات خاک به صورت معنی‌داری با گذشت زمان تغییر می‌کند. Franti و همکاران (۱۹۸۵) نشان دادند که فرسایش پذیری خاک پس از عملیات شخم (مراحل اولیه فرسایش) بیشترین مقدار خود را دارد و این به دلیل سست شدن خاک‌ها و از هم جدا شدن ذرات خاک در اثر شخم است. در بازه‌های زمانی ابتدای رسوبات فراهم زیاد بوده و انرژی رواناب صرف انتقال این رسوبات می‌شود (Auerswald و همکاران، ۲۰۰۹؛ Giménez و همکاران، ۲۰۱۲؛ Wirtz و همکاران، ۲۰۱۲).

وجود تصادفی این رسوبات فراهم در بخش‌های مختلف شیار که به وسیله برخی پژوهشگران نیز گزارش شده است (Heimsath و همکاران، ۲۰۰۱؛ Lisle و همکاران، ۱۹۹۸)، موجب افزایش ضریب تغییرات داده‌های رسوب شده است. افزون بر این، به باور برخی پژوهشگران، با گذشت زمان زیرخوردگی کناره‌های شیار و ریزش توده‌های خاک به درون جریان صورت پذیرفته (Wirtz و همکاران، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳) و با توجه به وقوع تصادفی این ریزش‌های توده‌ای (Sidorchuk، ۲۰۰۵)، ضریب تغییرات داده‌ها در زمان وقوع ریزش‌های توده‌ای افزایش می‌یابد.

در چند دهه گذشته به دلیل صرفه‌جویی در وقت و هزینه در اندازه‌گیری مستقیم هدرروی خاک، مدل‌های متفاوتی نظیر مدل‌های تجربی، فیزیکی و شبه‌فیزیکی به وسیله پژوهشگران معرفی و توسعه یافته است. Knapen و همکاران (۲۰۰۷) مدل‌های فیزیکی را بر پایه استفاده از تنش برشی یا قدرت جریان در برآورد جداسدن و انتقال ذرات خاک از یکدیگر متمایز می‌کنند. با توجه به این‌که قدرت جریان از حاصل-

منطقه‌ای و جهانی ضروری است (Boardman، ۲۰۰۶). فرسایش جویچه‌ای در جویچه‌های حاصل از شخم در اثر آبیاری سطحی و یا رواناب حاصل از بارندگی ایجاد می‌شود. در این نوع فرسایش هدرروی خاک به اندازه و یا شکل هندسی کانال (جویچه)، سرعت آب و حساسیت خاک به فرسایش بستگی دارد. به باور Mailapalli و همکاران (۲۰۱۳)، در بررسی تغییرات مکانی رسوب، گنجایش جدایش و انتقال رسوبات در طول شیار تغییر می‌یابد و این تغییرات به گونه‌ای است که موجب کاهش جدایش و انتقال ذرات خاک به سمت پایین دست می‌شود. این در حالی است که در مقاطع مکانی پایین تر می‌توان رسوبگذاری را نیز مشاهده کرد. Mailapalli و همکاران (۲۰۰۹) و Mateos و Giráldez (۲۰۰۵) عامل‌های موثر در جدا شدن و انتقال ذرات خاک در جویچه‌های کشت را دبی جریان، نوع خاک، شیب زمین و طول شیار معرفی کردند.

مطالعات Chalov و همکاران (۲۰۱۴) نیز نشان داد که در مقیاس مکانی عمده رسوبات از بالادست تامین می‌شود به گونه‌ای که به باور Merten و همکاران (۲۰۰۱) با افزایش بار رسوب در طول شیار جدایش ذرات خاک از بستر شیار کاهش می‌یابد. بررسی‌های Bruno و همکاران (۲۰۰۸) نیز نشان دادند که جریان پس از رسیدن به گنجایش انتقال رسوب در طول شیار، تنها به انتقال رسوبات بالادست می‌پردازد. این در حالی است که به عقیده Cremers و همکاران (۱۹۹۶) تغییرات موضعی و تصادفی بستر جویچه‌های کشت می‌تواند در عامل‌های هیدرولیکی تاثیرگذار بوده و جدایش ذرات خاک را به صورت موضعی زیر تاثیر خود قرار دهد. بررسی Trout (۱۹۹۶) در توزیع مکانی رسوب نیز نشان داد که نرخ رسوب در یک چهارم بالایی شیار شش تا ۲۰ برابر بزرگ‌تر از میانگین نرخ فرسایش کل شیار است. این در حالی است که Fernández-Gómez و همکاران (۲۰۰۴) نیز در مطالعه خود در خاک‌های آبرفتی با بافت‌های لومی و لوم رسی (به همراه شکاف‌های رسی) دریافتند که نرخ خالص هدرروی خاک در بخش بالایی جویچه‌های کشت بیش از شش برابر نرخ میانگین کل شیار است. هر چند که Everts و Carter (۱۹۸۱) نظری متفاوت

جریان به ترتیب برابر  $10/2$  و  $28$  درصد است. این در حالی است که این عامل در نرخ انتقال رسوب، غلظت رسوب و نرخ جدا شدن ذرات خاک بیش از  $65$  درصد است و عدم مشابهت ضریب تغییرات بین عامل‌های فوق نمی‌تواند توجیه کننده رابطه خطی بین این عوامل باشد، نظیر آنچه که در معادلات مدل‌های فیزیکی فرسایش ارائه شده است. بنابراین بررسی ضریب تغییرات داده‌های حاصل از ویژگی‌های هیدرولیکی جریان و جدا شدن و هدرروی خاک در شرایط مختلف غیرآزمایشگاهی برای اعتبارسنجی مدل‌های فرسایشی اجتناب‌ناپذیر است (Nearing, 2000). Risse و همکاران (1993)، Wendt و همکاران (1986) و Rüttimann و همکاران (1995) نیز در پژوهش‌های خود به ارائه مشکل در این زمینه اشاره کرده‌اند.

بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که عدم مشابهت ضریب تغییرات داده‌های هیدرولیکی و رسوب نشان‌دهنده پیچیدگی روابط بین عوامل به وجود آورنده فرسایش و هدرروی خاک است و شناخت بیشتر آن‌ها برای بررسی مجدد بانک‌های اطلاعاتی مدل‌های برآورد رسوب است. زیرا، این مدل‌ها از روابط خطی برای ارتباط بین عوامل هیدرولیکی و تولید رسوب استفاده می‌کنند و پژوهش‌های تکمیلی با توجه به تغییرات زمانی و مکانی این عوامل موجب به دست آمدن روابط دقیق‌تری بین آن‌ها می‌شود. پژوهشگران متعددی (Giménez و همکاران، 2012؛ Wirtz و همکاران، 2013) به منظور بررسی این تغییرات، از خطای نسبی (ضریب تغییرات) استفاده نموده‌اند و در این روش برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از اختلاف هر داده با میانگین داده‌ها استفاده شده است.

هدف از این پژوهش، در ابتدا بررسی ضریب تغییرات عامل‌های هیدرولیک جریان و رسوب حاصل از جریان متمرکز در شیارهای حاصل از شخم در اراضی شیب‌دار بود. در گام بعدی، بررسی ضریب تغییرات زمانی و مکانی عامل‌های جدایش ذرات خاک، نرخ انتقال و غلظت رسوب مورد توجه قرار گرفت و علاوه بر آن این موضوع که آیا مدل‌های فیزیکی فرسایش خاک می‌توانند فرسایش شیارهای را در

ضرب تنش برشی در سرعت جریان به دست می‌آید، بنابراین تنش برشی را می‌توان از عامل‌های پایه‌ای مدل‌های فرایندی فرسایش خاک بر شمرد (Giménez, 2002). در این مدل‌ها از مجموعه‌ای از داده‌های ورودی همانند شیب، سرعت جریان، شعاع هیدرولیکی، محیط خیس شده، سطح مقطع جریان و عمق رواناب استفاده می‌شود (Lisle و همکاران، 1998). مطالعات Giménez و Govers (2002) نشان داد که قابلیت کاربرد مدل‌های فرسایش شیارهای شیارهای واقعی که بستری ناهموار دارند، می‌تواند با دقت کم همراه باشد.

نتایج Govers و همکاران (2007) نشان داد که نیاز به پژوهش‌های فرایند مدار<sup>1</sup> وجود داشته تا بتوان با اضافه کردن داده‌های حاصل از شیارهای طبیعی و میدانی به مدل‌هایی که اغلب آن‌ها حاصل مطالعات آزمایشگاهی هستند، اعتباربخشی آن‌ها را افزایش داد. افزون بر این پژوهش‌های مختلفی که به وسیله Ghebreiyessus و همکاران (1994)، Lyle و Smerdon (1965) و Nearing و همکاران (1997) انجام شده، نشان می‌دهد که در این مدل‌ها بین عامل‌های هیدرولیکی جریان و جدا شدن و انتقال ذرات خاک رابطه خطی وجود دارد. این بدین معنی است که ضریب تغییرات عامل‌های هیدرولیکی جریان از لحاظ مقدار باید با ضریب تغییرات هدرروی خاک (نرخ جدا شدن و انتقال ذرات خاک) مشابه باشند (Wirtz و همکاران، 2013). Knapen و همکاران (2007) با مطالعه‌ای که بر روی بانک داده‌های مدل WEPP انجام دادند، رابطه بین عامل‌های هیدرولیکی و جدا شدن ذرات خاک و فرسایش را خطی ندانسته و گزارش کردند که این رابطه خطی، قبل و بعد از رسیدن رواناب به حد آستانه جدا کردن ذرات خاک متفاوت است.

Wirtz و همکاران (2013) مناسب بودن رابطه خطی بین عامل‌های هیدرولیکی و جدا شدن و انتقال ذرات خاک در مدل‌های فرسایشی را در شرایط غیر آزمایشگاهی مورد تردید قرار دادند. مطالعه ایشان نشان داد که ضریب تغییرات سرعت و تنش برشی

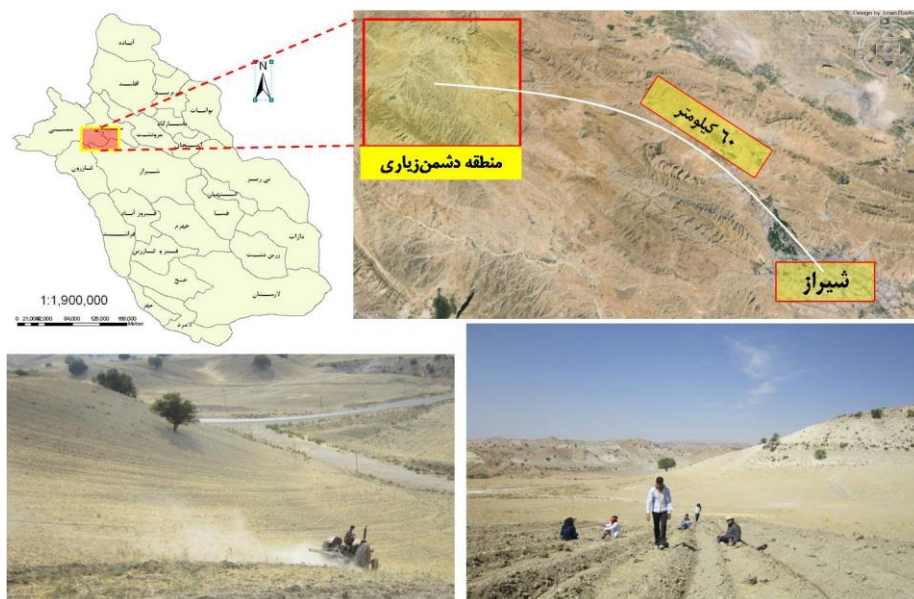
<sup>1</sup> Process Oriented

این شیارها توصیف کنند، مورد بررسی قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد پژوهش:** منطقه مورد پژوهش در محدوده  $51^{\circ} 49' 54''$  تا  $52^{\circ} 08' 05''$  طول شرقی و  $29^{\circ} 53' 52''$  تا  $30^{\circ} 03' 00''$  عرض شمالی واقع شده است. این منطقه در ناحیه دشمن‌زیاری استان فارس بوده و از نظر ریخت‌شناسی در تیپ تپه‌ماهوری قرار گرفته و از مواد مادری پابده‌گورپی تشکیل شده است. متوسط بارندگی سالانه منطقه حدود ۶۰۰

میلی متر و با توجه به حجم زیاد هدرروی خاک سطحی، عمده خاک‌های تشکیل شده در محدوده مورد آزمایش در رده اینسپتی سول‌ها طبقه‌بندی می‌شوند. کشت غالب منطقه گندم دیم بوده (شیب حدود ۲۰ درصد) و خاک‌ورزی در راستای شیب صورت می‌پذیرد. زمین‌های شیب‌دار منطقه در فصل بارندگی فاقد هرگونه پوشش بوده و با توجه به ایجاد شخم در راستای شیب به‌وسیله کشاورزان، مستعد فرسایش خاک است. شکل ۱ موقعیت منطقه در استان و وضعیت خاک‌ورزی آن را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه در استان فارس و وضعیت خاک‌ورزی منطقه

پس از رسیدن جبهه آب به انتهای شیارهای مورد آزمایش در نظر گرفته شد. اندازه‌گیرهای زمانی و مکانی غلظت رسوب پس از ایجاد شرایط ماندگار صورت پذیرفت (Stefanovic و Bryan، ۲۰۰۹؛ Wirtz و همکاران، ۲۰۱۲). افزون بر این، به‌منظور دستیابی به تغییرات زمانی رسوب، زمان‌های ۳/۳، ۶/۶ و ۱۰ دقیقه (مقاطع زمانی یک، دو و سه) به‌عنوان زمان‌های نمونه‌برداری رسوب در نظر گرفته شدند. نمونه‌های رسوب در مقاطع ۱/۳، ۲/۳ و انتهای شیار (مقاطع مکانی یک، دو و سه) مورد اندازه‌گیری قرار گرفته و به‌منظور جلوگیری از حرکت ذرات خاک در ابتدای شیار، حوضچه‌ای با پوشش پلاستیکی ایجاد تا ورود جریان به شیارها آرام و ثابت صورت گیرد (Govers،

به‌منظور انجام آزمایش، شخم به روش سنتی و در راستای شیب و با طول شیارهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ متر در زمین‌های با شیب متوسط حدود ۲۰ درصد به‌وسیله کشاورزان منطقه صورت پذیرفت. قبل از اجرای دبی‌های مختلف در شیارهای کشت، مقطع عرضی آن‌ها به فواصل یک متری با استفاده از شیارمتر<sup>۱</sup> اندازه‌گیری شد (Auerswald و همکاران، ۲۰۰۹؛ Wirtz و همکاران، ۲۰۱۳).

بر روی هر یک از انواع شیارها، به‌وسیله موتور پمپ آب، مقادیر ثابت دبی‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ لیتر در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه اعمال شد. زمان ۱۰ دقیقه

<sup>۱</sup> Rillmeter

به وسیله شیارمتر و جمع کننده رواناب در انتهای شیار را نشان می دهد.

در انتهای هر شیار از جمع آوری کننده رواناب استفاده شد. شکل ۲ اندازه گیری سطح مقطع شیار



شکل ۲- اندازه گیری سطح مقطع شیار به وسیله شیارمتر (راست) و جمع کننده رواناب (چپ)

جریان ( $\text{kgS}^{-3}$ ) جریان را نشان می دهد.

$$\omega = \tau v \quad (3)$$

معادلات (۴) و (۵) به ترتیب روش محاسبه نرخ انتقال رسوب<sup>۳</sup> و جدایش ذرات خاک<sup>۴</sup> را نشان می دهند (Wirtz و همکاران، ۲۰۱۳).

$$T_R = S_c \times V \times A \quad (4)$$

$$D_r = \frac{S_c \times V \times A}{L \times W_p} \quad (5)$$

که در آن ها،  $T_R$  نرخ انتقال رسوب ( $\text{kgS}^{-1}$ ),  $D_r$  نرخ جدایش ذرات خاک ( $\text{kgm}^{-2}\text{S}^{-1}$ ),  $S_c$  غلظت رسوب ( $\text{kgm}^{-3}$ ),  $V$  سرعت جریان ( $\text{mS}^{-1}$ ),  $A$  سطح مقطع جریان ( $\text{m}^2$ ),  $L$  طول جریان ( $\text{m}$ ) و  $W_p$  محیط خیس شده ( $\text{m}$ ) است.

از هریک از مقاطع اندازه گیری مخلوط رواناب و رسوب در ظروف با حجم مشخص نمونه برداری شد. تعیین غلظت رسوب نیز پس از انتقال نمونه های همگن به آزمایشگاه با روش خشک کردن نمونه در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد (۲۴ ساعت) صورت گرفت (Auerswald و همکاران، ۲۰۰۹). به منظور مقایسه ضریب تغییرات عامل های مختلف، میانگین خطای نسبی<sup>۵</sup> (RE) بر حسب درصد با استفاده از معادله (۶) محاسبه شد (Wirtz و همکاران، ۲۰۱۳).

$$RE = \frac{|X_i - X_m|}{X_m} * 100 \quad (6)$$

که در آن،  $X_i$  مقدار هر داده و  $X_m$  مقدار میانگین

مقادیر سرعت جریان بر پایه معادله مانینگ برآورد شد. معادله (۱) یکی از معادلات اصلی برای نشان دادن ارتباط بین سرعت آب، هندسه و شیب شیار است (Takken و Govers، ۲۰۰۰).

$$v = \frac{1.49 R^{2/3} S^{1/3}}{n} \quad (1)$$

که در آن،  $v$  میانگین سرعت جریان در شیار ( $\text{ms}^{-1}$ ),  $R = \frac{A}{W_p}$ ,<sup>۱</sup> شعاع هیدرولیکی ( $\text{m}$ ),  $S$  شیب بستر شیار ( $\text{mm}^{-1}$ ),  $n$  ضریب مانینگ ( $\text{Sm}^{-1/3}$ ),  $A$  سطح مقطع جریان ( $\text{m}^2$ ) و  $W_p$  محیط خیس شده ( $\text{m}$ ) است. با توجه به جداول راهنما، ضریب مانینگ برای آزمایش صورت گرفته ۰/۰۳ در نظر گرفته شده است (Brunner، ۱۹۹۵).

تنش برشی جریان<sup>۱</sup> (Ghebreiyessus و همکاران، ۱۹۹۴؛ Knapen و همکاران، ۲۰۰۷؛ Lyle و Smerdon، ۱۹۶۵؛ Nearing و همکاران، ۱۹۹۷) و قدرت جریان<sup>۲</sup> (Auzet و همکاران، ۱۹۹۳؛ Knapen و همکاران، ۲۰۰۷؛ Stefanovic و Bryan، ۲۰۰۹) از دیگر عامل های موثر در جدایش ذرات خاک از شیاهای ایجاد شده به وسیله جریان متمرکز است.

$$\tau = \rho g R S \quad (2)$$

که در آن،  $\tau$  تنش برشی جریان ( $\text{kgm}^{-1}\text{S}^{-2}$ ),  $\rho$  چگالی آب ( $\text{kgm}^{-3}$ ),  $g$  شتاب جاذبه زمین ( $\text{mS}^{-2}$ ),  $R$  شعاع هیدرولیکی جریان ( $\text{m}$ ) و  $S$  گرادیان انرژی هیدرولیکی ( $\text{mm}^{-1}$ ) است. در معادله (۳) نیز  $\omega$  قدرت

<sup>3</sup> Sediment Transport Rate

<sup>4</sup> Detachment Rate

<sup>5</sup> Relative Errors

<sup>1</sup> Flow Shear Stress

<sup>2</sup> Stream Power

میانگین‌ها از نرم‌افزار SPSS 22 استفاده شد.

### نتایج و بحث

با بررسی جدول ۱، مشخص می‌شود که شیارهای ایجاد شده در خاک‌هایی با مقدار ماده آلی کم (کمتر از ۰/۵ درصد) واقع شده‌اند. درصد ذرات شن که موجب افزایش نفوذپذیری و کاهش سهم رواناب در پدیده فرسایش است، نیز کم (۱۸/۲-۱۷/۶ درصد) است. از سویی، درصد سیلت خاک‌های مورد آزمایش زیاد بوده (حدود ۵۰ درصد) که نشان‌دهنده مستعد بودن خاک‌های مزبور به فرسایش است (Hamblin و Davies، ۱۹۷۷؛ Poesen و همکاران، ۲۰۰۳).

تمامی خاک‌ها در طبقه بافتی لوم رسی سیلتی طبقه‌بندی می‌شوند و دارای کربنات کلسیم حدود ۵۰ درصد می‌باشند. وجود کربنات کلسیم در خاک موجب کاهش فرسایش‌پذیری خاک می‌شود (Bissonais، ۱۹۹۶). ضریب تغییرات مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های منطقه بین ۲/۷۸ تا ۲۹/۹۰ درصد برای اسیدیته و هدایت الکتریکی متغیر است. این در حالی است که ضریب تغییرات عمده ویژگی‌های خاک زیر ۲۰ درصد است. کم بودن ضریب تغییرات ویژگی‌های خاک نشان‌دهنده همگن بودن خاک‌های تحت تأثیر تیمارهای مختلف آزمایش است.

در جدول ۲، مقادیر میانگین عامل‌های ریخت‌شناسی، هیدرولیک جریان و رسوب شیارهای مورد آزمایش ارائه شده است. مقاطع مختلف شیارهای مورد مطالعه در میانگین شیب ۲۰/۶۸ درصد واقع و بین شیب‌های ۱۵/۸۶ تا ۲۹/۷۳ درصد متغیر است. عامل شیب از عامل‌های اصلی سرعت دهی رواناب در زمین‌های شیب‌دار است و انرژی آب برای جدا نمودن و انتقال خاک را کنترل می‌کند. از عامل‌های مهم هیدرولیکی موثر در تولید رسوب می‌توان به سرعت جریان، تنش برشی جریان و قدرت جریان اشاره نمود. میانگین سرعت جریان در شیارهای مورد آزمایش برابر ۰/۴۳ متر بر ثانیه بود که به عواملی همانند زبری بستر، شیب و ریخت‌شناسی شیار بستگی دارد. کمترین مقدار این متغیر ۰/۳۴ متر بر ثانیه مربوط به شیار با طول ۲۰ متر و دبی ۱۰ لیتر بر دقیقه و بیشترین مقدار آن ۰/۵۲ متر بر ثانیه مربوط به شیار

کل داده‌ها برای هر شیار است. در این پژوهش خطای نسبی، انحراف نتایج از میانگین داده‌ها بوده که نشان‌دهنده ضریب تغییرات و پراکندگی داده‌ها است. با توجه به متفاوت بودن شرایط هر آزمایش، به‌منظور برآورد میانگین خطای نسبی ابتدا هر یک از داده‌ها با میانگین هر شیار محاسبه و سرانجام از مقادیر خطاهای نسبی میانگین‌گیری شد (Wirtz و همکاران، ۲۰۱۳).

داده‌های اندازه‌گیری شده صحرائی مورد نظر همانند غلظت رسوب و نرخ جدا شدن ذرات خاک دارای داده‌های کرانه‌ای و پرت بودند. داده‌های پرت به دلیل شرایط واقعی رخداد آن‌ها و وجود فرایندهای پیچیده توسعه فرسایش شکاری (نظیر ریزش دیواره‌های شیار) ایجاد شده‌اند. با توجه به این‌که در روش‌های برآورد خطا در آمار کلاسیک داده‌های پرت نادیده گرفته می‌شوند و وجود این داده‌ها در مجموعه اطلاعات جمع‌آوری شده این پژوهش حیاتی است، لذا از روش‌های آمار کلاسیک برای برآورد خطا استفاده نشد و مقدار میانگین داده‌های هر شیار را به‌عنوان مقدار صحیح در نظر گرفته و سایر داده‌ها نسبت به آن مقایسه شد.

Wirtz و همکاران (۲۰۱۳) و Elliot و همکاران (۱۹۹۷) نیز به دلایل مشابه، این روش را پیشنهاد نموده‌اند. در گام بعدی به‌منظور نشان دادن تغییرپذیری، از ضریب تغییرات<sup>۱</sup> (CV) استفاده شد که بر پایه معادله (۷) به‌دست آمده است. در این معادله  $\delta$  انحراف معیار و  $\mu$  میانگین داده‌ها است.

$$CV = \frac{\delta}{\mu} * 100 \quad (7)$$

از هر یک از مقاطع اندازه‌گیری شیارها، نمونه‌برداری مرکب خاک (۳۰-۰ سانتی‌متر) انجام شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک پس از انتقال به آزمایشگاه و عبور از الک با قطر دو میلی‌متر و با استفاده از روش‌های معمول اندازه‌گیری شد. برای ترسیم ویژگی‌های مورفولوژی و تعیین ابعاد شیارها و عامل‌های هیدرولیکی جریان، برنامه الحاقی HecGeoRAS در محیط ArcGIS استفاده شد. افزون بر این به‌منظور تعیین روابط رگرسیونی و مقایسه

<sup>1</sup> Coefficient of Variation

عواملی هستند که میزان فرسایش خاک تحت انرژی رواناب اعمال شده به شیاه را منعکس می کنند. میانگین غلظت رسوب در مقاطع زمانی و مکانی اندازه گیری شده برابر  $213/89$  گرم در لیتر بود که از مقادیر زیر  $100$  تا بیش از  $300$  گرم در لیتر تغییر می کرد. افزون بر این، جدول ۲ نشان می دهد که میانگین نرخ جدا شدن ذرات خاک برابر  $0/03 \text{ kgm}^{-2} \text{ S}^{-1}$  و نرخ انتقال رسوب  $0/04 \text{ kgS}^{-1}$  است.

$30$  متری با دبی  $20$  لیتر بر دقیقه بود. تنش برشی جریان و قدرت جریان از جمله عامل های هیدرولیکی به شمار می روند که در بیشتر مدل های فیزیکی برآورد فرسایش به عنوان شاخص های اصلی انرژی رواناب برای تولید رسوب محسوب می شوند. میانگین تنش برشی  $7/61 \text{ kgm}^{-1} \text{ S}^{-2}$  و قدرت جریان  $3/54 \text{ kg S}^{-3}$  برآورد شده است (جدول ۲).  
غلظت رسوب، نرخ انتقال و جدا شدن ذرات خاک

جدول ۱- میانگین ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک های مورد مطالعه

بافت	کربنات کلسیم (درصد)	توزیع اندازه ذرات (درصد)			ماده آلی (درصد)	هدایت الکتریکی ( $\mu\text{s m}^{-1}$ )	اسیدیته	طول شیب (m)
		رس	سیلت	شن				
SiCL	52/98	31/45	50/33	18/22	0/42	511/56	7/60	10
SiCL	53/24	32/23	49/79	17/98	0/34	455/89	7/66	20
SiCL	47/43	28/78	53/58	17/64	0/31	593/22	7/64	30
	10/93	20/12	10/66	14/61	20/72	29/90	2/78	درصد ضریب تغییرات

آمد.

شکل ۴ نشان می دهد که تغییرات خطای نسبی و ضریب تغییرات، ارتباط و همبستگی زیادی (ضریب تبیین بیش از ۹۵ درصد) داشتند و به دلیل این تشابه به منظور بررسی ضریب تغییرات مکانی و زمانی تنها از عامل خطای نسبی برای تجزیه و تحلیل نتایج استفاده شد. افزون بر این، به منظور بررسی معنی دار بودن مقایسه میانگین ها از آزمون  $LSD^1$  استفاده شد. جدول ۲ نشان می دهد که ضریب تغییرات (خطای نسبی) نرخ جدایش ذرات خاک اختلاف معنی داری در سطح یک درصد با عامل های هیدرولیکی همانند سطح مقطع جریان، محیط خیس شده، شعاع هیدرولیکی، سرعت جریان و تنش برشی داشتند. این اختلاف برای قدرت جریان در سطح پنج درصد معنی دار بود. همین روند برای نرخ انتقال و غلظت رسوب با عامل های هیدرولیکی نیز مشاهده شد و مشخص شد که تفاوت نرخ انتقال با قدرت جریان در سطح پنج درصد معنی دار و بین غلظت رسوب و قدرت جریان تفاوت معنی داری مشاهده نشد (جدول ۳).

در محاسبه نرخ انتقال ذرات خاک در طول شیاه

**تغییرات خطای نسبی و ضریب تغییرات:** میانگین خطای نسبی و ضریب تغییرات می توانند بیانگر تغییرپذیری عامل های مختلف هیدرولیک جریان و رسوب به شمار آیند. در هر دو شاخص مورد نظر، متغیرهای مربوط به اندازه گیری رسوب (غلظت، نرخ انتقال و جدا شدن ذرات خاک) بیشترین مقادیر را به خود اختصاص دادند و در میان متغیرهای رسوب، میانگین خطای نسبی مقدار نرخ جدایش بیشتر از نرخ انتقال و نرخ انتقال بیشتر از غلظت رسوب مشاهده شد (شکل ۳).

این روند در ضریب تغییرات داده های مورد نظر نیز مشاهده شد. در نمودار خطای نسبی (شکل ۳ راست)، بیشترین مقدار مربوط به نرخ جدایش ذرات ( $80/6$  درصد) است. به جز متغیرهای رسوب و قدرت جریان سایر متغیرها مانند تنش برشی، شیب و سرعت جریان دارای خطای نسبی کمتر از  $40$  درصد بودند. این روند در ضریب تغییرات متغیرهای مورد بررسی نیز مشاهده شد (شکل ۳ چپ) به طوری که متغیرهای رسوب ضریب تغییراتی بیش از  $80$  درصد را دارا بودند. در حالی که ضریب تغییرات برای سایر عوامل (به جز قدرت جریان) کمتر از  $50$  درصد بود و کمترین ضریب تغییرات برای سرعت جریان ( $14/2$  درصد) به دست

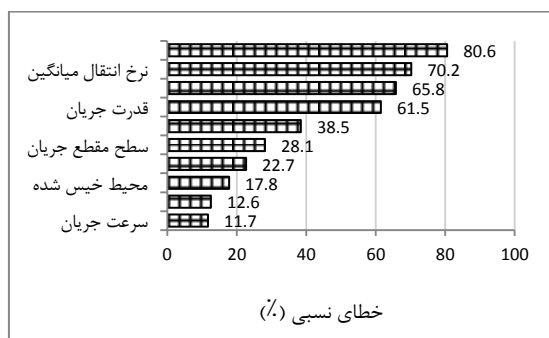
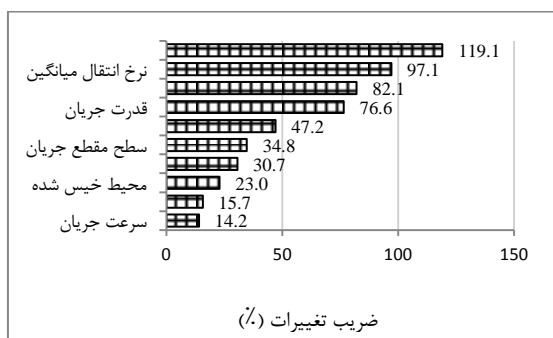
<sup>1</sup> Least Significant Difference

(۲۰۱۳) غیر متشابه بودن ضریب تغییرات این عوامل بیان کننده عدم رابطه خطی بین عامل های هیدرولیکی با نرخ جدایش ذرات و یا سایر عوامل برآورد رسوب است. در پژوهش ایشان که در سال ۲۰۱۳ بر روی شیارهای طبیعی صورت گرفت، این عدم تشابه در ضریب تغییرات عامل های هیدرولیکی و رسوب مشاهده و روابط خطی این عوامل مورد تردید قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که ضریب تغییرات عامل های فوق در شرایطی متفاوت از مطالعه پیشین (Wirtz و همکاران، ۲۰۱۳) بر روی شیارهای حاصل از شخم نیز دارای تفاوت معنی داری بود و می تواند مجددا روابط خطی ارائه شده در مدل های فیزیکی را مورد تردید قرار دهد، هر چند که مطالعات بیشتر در تعیین روابط بین این عوامل ضروری است. مطالعه Knappen و همکاران (۲۰۰۷) نیز عدم خطی بودن این روابط را تایید نموده است.

علاوه بر غلظت رسوب، از سرعت جریان و سطح مقطع جریان نیز استفاده می شود و در محاسبه نرخ جدا شدن ذرات خاک مواردی همانند ریخت شناسی و طول شیار نیز به آن اضافه می شود. بنابراین، بر پایه تعداد عامل های موثر در نظر گرفته شده در هر یک از متغیرهای رسوب، میانگین خطای نسبی (ضریب تغییرات) نرخ جدایش ذرات بیش از نرخ انتقال ذرات خاک و نرخ انتقال ذرات خاک بیش از غلظت رسوب بود. با افزایش عامل های موثر در محاسبه این متغیرها، منابع جدید خطا به محاسبات اضافه شده و میانگین خطای نسبی و تغییرات داده ها افزایش یافته است. پژوهش های مختلفی نشان می دهد که در مدل های فیزیکی فرسایش خاک بین عامل های هیدرولیکی جریان و جدایش ذرات خاک رابطه خطی وجود دارد (Ghebreiessus و همکاران، ۱۹۹۴؛ Lyle و Smerdon، ۱۹۶۵). بنا به نظر Wirtz و همکاران

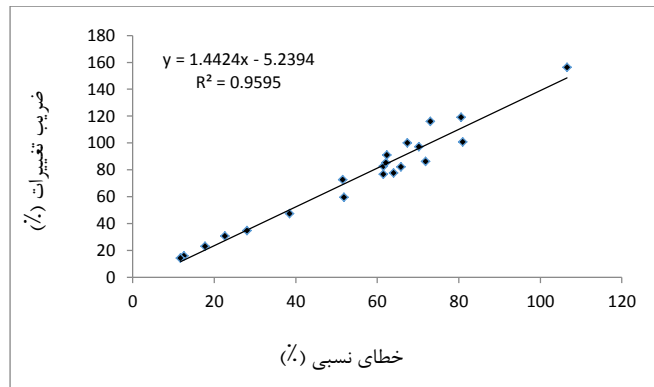
جدول ۲- میانگین مقادیر عامل های هیدرولیکی و رسوب اندازه گیری شده

میانگین	۳۰			۲۰			۱۰			طول شیار (m)		دبی جریان (L min <sup>-1</sup> )
	۲۰	۱۵	۱۰	۲۰	۱۵	۱۰	۲۰	۱۵	۱۰	واحد	عامل	
۲۰/۶۸	۱۷/۶۲	۱۷/۸۲	۱۹/۰۷	۱۸/۳۳	۲۹/۷۳	۱۵/۸۶	۲۱/۵۵	۱۶/۴۴	۲۹/۶۹	%	شیب	
۴/۸۶	۸/۷۳	۴/۲۶	۲/۷۲	۷/۰۲	۳/۹۴	۳/۵۷	۵/۶۴	۴/۲۲	۳/۶۸	cm <sup>2</sup>	سطح مقطع جریان	
۸/۳۵	۱۰/۹۶	۸/۱۰	۵/۹۸	۱۱/۲۱	۷/۱۴	۷/۶۲	۱۰/۳۳	۶/۹۴	۶/۸۸	cm	محیط خیس شده	
۰/۵۷	۰/۷۳	۰/۵۳	۰/۴۵	۰/۶۵	۰/۵۵	۰/۴۸	۰/۵۹	۰/۶۱	۰/۵۳	cm	شعاع هیدرولیکی	
۰/۴۳	۰/۵۲	۰/۳۹	۰/۳۷	۰/۴۳	۰/۴۶	۰/۳۴	۰/۴۶	۰/۴۲	۰/۴۶	ms <sup>-1</sup>	سرعت جریان	
۷/۶۱	۱۰/۹۹	۷/۲۴	۳/۴۰	۹/۶۴	۷/۲۹	۳/۵۰	۱۱/۸۰	۹/۱۰	۵/۵۲	kg m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup>	تنش برشی	
۳/۵۴	۶/۳۴	۲/۹۳	۰/۸۸	۴/۸۱	۲/۸۷	۰/۹۵	۶/۹۳	۴/۲۵	۱/۹۳	kg s <sup>-3</sup>	قدرت جریان	
۲۱۳/۸۹	۱۶۹/۲۵	۱۸۱/۲۵	۲۵۵/۲۰	۳۲۸/۰۸	۱۹۰/۷۴	۱۷۱/۵۶	۸۵/۰۶	۲۵۱/۵۴	۲۹۲/۳۷	g L <sup>-1</sup>	غلظت رسوب	
۰/۰۴	۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۱۰	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۵	kg s <sup>-1</sup>	نرخ انتقال	
۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۰۷	kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	نرخ جدایش	



شکل ۳- میانگین درصد خطای نسبی (راست) و ضریب تغییرات (چپ) عامل های هیدرولیک جریان و رسوب





شکل ۴- ارتباط بین درصد خطای نسبی و ضریب تغییرات

جدول ۳- ماتریس مقدار P (P-Value) خطای نسبی بین عامل‌های مختلف رسوب و هیدرولیک جریان

عوامل هیدرولیک و رسوب	نرخ جدایش	نرخ انتقال	غلظت رسوب	شیب	مقطع جریان	محیط خیس شده	شعاع هیدرولیکی	سرعت جریان	تنش برشی	قدرت جریان
نرخ جدایش	۱/۰۰									
نرخ انتقال	۰/۲۱	۱/۰۰								
غلظت رسوب	۰/۰۷	۰/۵۹	۱/۰۰							
شیب	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰						
سطح مقطع جریان	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۵۱	۱/۰۰					
محیط خیس شده	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۵۵	۰/۲۱	۱/۰۰				
شعاع هیدرولیکی	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۲	۰/۰۶	۰/۵۳	۱/۰۰			
سرعت جریان	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۹	۰/۰۵	۰/۴۷	۰/۹۲	۱/۰۰		
تنش برشی	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۶	۰/۲۱	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	
قدرت جریان	۰/۰۲	۰/۲۹	۰/۶۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۱/۰۰

### تغییرات زمانی خطای نسبی و ضریب تغییرات:

میانگین ضریب تغییرات زمانی داده‌های رسوب نیز روند مشابهی همانند ضریب تغییرات کلی داده‌ها را نشان داد (شکل ۵). درصد خطای نسبی در نرخ جدایش ذرات بیشتر از بقیه بود، ولی این تفاوت با نرخ انتقال و غلظت رسوب معنی‌دار نبود. بیشتر بودن نرخ جدایش ذرات خاک نسبت به سایر عوامل می‌تواند به دلیل اضافه شدن خطای عامل‌های مختلف و تصادفی بودن رخداد این عوامل (همانند ریخت‌شناسی بستر شیاری) در محاسبه نرخ جدایش ذرات باشد. پژوهش‌های Heimsath و همکاران (۲۰۰۱) و Auerswald و همکاران (۲۰۰۹) نیز وجود این فرایندهای تصادفی را در ریخت‌شناسی، شیب و سایر ویژگی‌های بسترهای فرسایشی نشان داده است.

بررسی بازه‌های زمانی یک، دو و سه (بازه زمانی مساوی در ۱۰ دقیقه)، نشان داد که در بازه‌های

ابتدایی (۷۳/۰۹ درصد) و انتهایی آزمایش (۱۰۶/۵۷ درصد)، مقادیر درصد میانگین خطای نسبی نرخ جدایش ذرات خاک بیش از بازه میانی (۶۲/۱۰ درصد) بود. همین روند برای نرخ انتقال ذرات نیز مشاهده شد. مقادیر این متغیر در بازه اولیه آزمایش ۶۷/۳۷ درصد و بازه‌های میانی و انتهایی به ترتیب ۶۲/۳۵ و ۸۰/۹۹ درصد است. جدول ۴ نشان می‌دهد که با وجود بیشتر بودن درصد خطای نسبی نرخ جدایش ذرات خاک در بازه انتهایی نسبت به بازه‌های اول و دوم آزمایش تفاوت معنی‌داری بین این بازه‌ها وجود ندارد. این عدم اختلاف معنی‌دار برای نرخ انتقال ذرات خاک و غلظت رسوب نیز محاسبه شد.

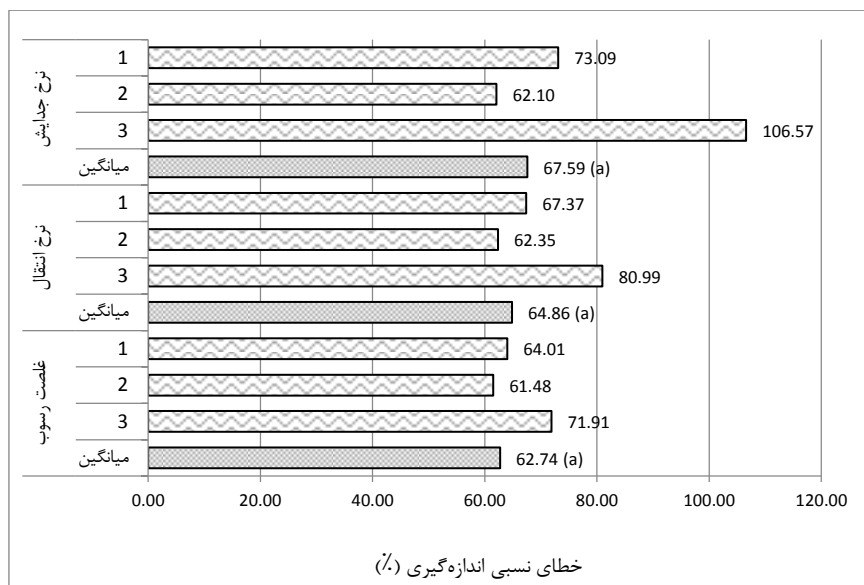
در بازه زمانی ابتدای آزمایش، وجود رسوبات فراهم<sup>۱</sup> (Giménez و همکاران، ۲۰۱۲) و چسبندگی

<sup>1</sup> Available Sediment

نشان‌دهنده نقش کمتر رسوبات فراهم مراحل اولیه آزمایش در مقایسه با ریزش دیواره‌ها در ضریب تغییرات داده‌ها در بازه‌های انتهایی آزمایش باشد. شکل ۶ هر یک از بازه‌های زمانی شیارهای آزمایشی را نشان می‌دهد. مرحله ابتدایی نشان‌دهنده انتقال رسوبات فراهم است.

این در حالی است که در مرحله میانی به دلیل کاهش رسوبات سست شرایط یکنواخت‌تری مشاهده می‌شود. بازه زمانی سوم نیز نشان‌دهنده زیرخوردگی دیواره‌های شیار و ریزش دیواره‌های آن است. ریزش دیواره‌ها موجب عدم یکنواختی و ضریب تغییرات بیشتر داده‌ها در مرحله پایانی آزمایش شد و از دلایل آن می‌توان به زمان کافی برای زیرخوردگی کناره‌های شیار و ریزش دیواره‌های آن اشاره نمود (Govers, ۱۹۸۷).

کم ذرات خاک به دلیل عملیات خاک‌ورزی و کشت و کار (Auzet و همکاران، ۱۹۹۳) و تصادفی قرار گرفتن این رسوبات در مسیر جریان رواناب موجب شده تا ضریب تغییرات (خطای نسبی) در این مرحله بیش از زمان میانی آزمایش شود. در بازه میانی با توجه به کم شدن رسوبات فراهم ضریب تغییرات کاهش یافته و داده‌های یکنواخت‌تری برداشت شده‌اند. با ادامه آزمایش، در اثر فرایندهای پیچیده توسعه فرسایش شیار در کناره‌های شیارها خوردگی ایجاد شده و دیواره‌ها ریزش می‌یابند (Govers, ۱۹۸۷؛ Stefanovic و Bryan, ۲۰۰۹). ریزش دیواره‌ها و تولید رسوب موجب افزایش ضریب تغییرات داده‌ها در این مرحله شده است. از سویی، افزایش ۷۰ درصدی ضریب تغییرات بین بازه‌های انتهایی و ابتدایی (به ترتیب ۱۰۶/۵۷ و ۷۳/۰۹) نرخ جدایش، می‌تواند



شکل ۵- تغییرات زمانی درصد خطای نسبی متغیرهای رسوب

جدول ۴- ماتریس مقدار P (P-Value) خطای نسبی پارامترهای رسوب در بازه‌های زمانی مختلف

بازه زمانی	نرخ جدایش خاک			نرخ انتقال خاک			غلظت رسوب		
	بازه زمانی								
	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳
۱	۱/۰۰			۱/۰۰			۱/۰۰		
۲	۰/۶۵	۱/۰۰		۰/۷۸	۱/۰۰		۰/۸۴	۱/۰۰	
۳	۰/۱۷	۰/۰۷	۱/۰۰	۰/۴۵	۰/۳۰	۱/۰۰	۰/۵۴	۰/۴۲	۱/۰۰



شکل ۶- انتقال رسوب در بازه‌های زمانی ابتدایی (۱)، میانی (۲) و انتهایی (۳) آزمایش

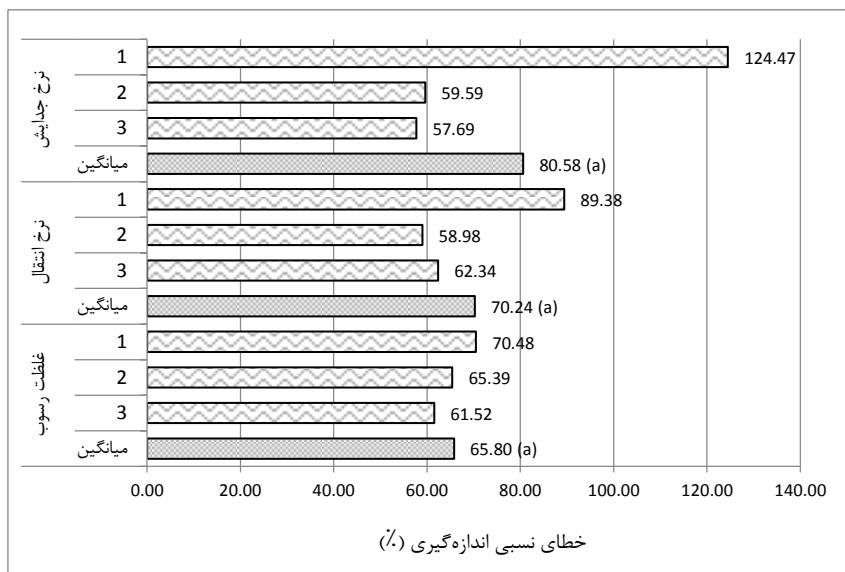
### تغییرات مکانی خطای نسبی و ضریب تغییرات:

میانگین خطای نسبی نشان‌دهنده کاهش درصد میانگین خطای نسبی از نرخ جدایش ذرات به غلظت رسوب است (شکل ۷). این در حالی است که این کاهش از نظر آماری در سطح پنج درصد معنی‌دار نبوده و با بررسی مکانی این عامل مشخص شد که درصد خطای نسبی در بازه ابتدایی طول شیاری به بیش از ۷۰ درصد رسیده است.

مقدار ضریب تغییرات نرخ جدایش ذرات در مقطع ابتدایی شیاری برابر ۱۲۴/۴۷ درصد و بیش از دو برابر مقاطع بعدی بود و اختلاف معنی‌داری (در سطح یک درصد) با مقاطع بعدی داشت. این در حالی است که مقطع دوم و سوم مشابه بوده و دارای اختلاف معنی‌دار نبودند. افزون بر این، جدول ۵ نشان می‌دهد که بین مقاطع مختلف مکانی نرخ انتقال و غلظت رسوب اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. بیشتر بودن ضریب

تغییرات در بازه‌های ابتدایی شیاری، بیان‌کننده فعال بودن رواناب در این مقطع است. به طوری که در سهم عمده‌ای از طول شیاری (مقاطع ۲ و ۳)، ضریب تغییرات نرخ جدایش ذرات ثابت بود. عدم اشباع رواناب به وسیله رسوب در مقطع ابتدایی موجب شده تا رفتار هیدرولیکی رواناب برای جدایش و انتقال رسوب نسبت به بازه‌های بعدی بیشتر پدیدار شود.

در مقاطع بعدی به دلیل کمتر شدن توان حمل رسوب به وسیله رواناب، یکنواختی بیشتر و ضریب تغییرات کمتری در داده‌های رسوب مشاهده می‌شود. در این مرحله انرژی رواناب به طور عمده صرف انتقال شده و جدا شدن ذرات خاک از بستر شیاری کاهش می‌یابد (Knapen و همکاران، ۲۰۰۷). با توجه به پیچیده بودن فرایندهای توسعه شیاریهای فرسایشی، نیاز به پژوهش‌های گسترده‌تر و با مقیاس دقیق‌تر برای آگاهی از فرایندهای موجود است.



شکل ۷- تغییرات مکانی درصد خطای نسبی متغیرهای رسوب

جدول ۵- ماتریس مقدار P (P-Value) پارامترهای رسوب در بازه‌های مکانی مختلف

بازه مکانی	نرخ جدایش خاک			نرخ انتقال خاک			غلظت رسوب		
	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳
۱	۱/۰۰			۱/۰۰					
۲	۰/۰۱	۱/۰۰		۰/۲۳	۱/۰۰		۱/۰۰	۰/۹۷	
۳	۰/۰۱	۰/۹۴	۱/۰۰	۰/۴۷	۰/۹۹	۱/۰۰	۰/۸۳	۰/۹۹	۱/۰۰

رسوبات حاصل از ریزش دیواره‌ها در بازه پایانی آزمایش موجب ضریب تغییرات بیشتر این مراحل شده است. بررسی مکانی این شاخص مشخص کرد که مقدار ضریب تغییرات نرخ جدایش ذرات در مقطع ابتدایی شیار برابر ۱۲۴/۴۷ درصد و به صورت معنی داری (در سطح یک درصد) بیش از دو برابر مقاطع بعدی بود، این در حالی است که اختلاف معنی داری بین مقاطع دوم و سوم مشاهده نشد.

عدم اشباع رواناب به وسیله رسوب در مقطع ابتدایی شیار موجب شده تا رفتار هیدرولیکی رواناب برای جدایش و انتقال رسوب نسبت به بازه‌های بعدی بیشتر پدیدار شود. افزون بر این غیرمتشابه بودن ضریب تغییرات عامل‌های هیدرولیکی و رسوب بر روی شیارهای حاصل از شخم می‌تواند بیان‌کننده عدم رابطه خطی بین عامل‌های هیدرولیکی با نرخ جدایش ذرات و یا سایر عوامل برآورد رسوب باشد و روابط خطی ارائه شده در مدل‌های فیزیکی را مورد تردید قرار دهد.

نتایج این پژوهش نشان داد که میانگین خطای نسبی می‌تواند بیانگر ضریب تغییرات عامل‌های مختلف هیدرولیک جریان و رسوب به شمار آید. در این شاخص، متغیرهای مربوط به اندازه‌گیری رسوب (غلظت، نرخ انتقال و جدا شدن ذرات خاک) بیشترین مقدار را به خود نسبت دادند. خطای نسبی و ضریب تغییرات نرخ جدایش ذرات خاک، نرخ انتقال و غلظت رسوب اختلاف معنی داری (در سطح یک درصد) را با عامل‌های هیدرولیکی نشان دادند.

هر چند که این اختلاف بین قدرت جریان با نرخ جدایش و نرخ انتقال در سطح پنج درصد معنی دار بود و این عامل با غلظت رسوب اختلاف معنی داری نشان نداد. بررسی ضریب تغییرات در بازه‌های زمانی یک، دو و سه نشان داد که در بازه‌های ابتدایی (۷۳/۰۹ درصد) و انتهای آزمایش (۱۰۶/۵۷ درصد)، مقادیر درصد میانگین خطای نسبی نرخ جدایش بیش از بازه میانی (۶۲/۱۰ درصد) بود، ولی این اختلاف‌ها از نظر آماری معنی دار نبود. وجود رسوبات فراهم در بازه ابتدایی و

#### منابع مورد استفاده

1. Auerswald, K., P. Fiener and R. Dikau. 2009. Rates of sheet and rill erosion in Germany, A meta-analysis. *Geomorphology*, 111: 182-193.
2. Auzet, A.V., J. Boiffin, F. Papy, B. Ludwig and J. Maucorps. 1993. Rill erosion as a function of the characteristics of cultivated catchments in the north of France. *Catena*, 20: 41-62.
3. Bissonnais, Y.L. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 47: 425-437.
4. Boardman, J. 2006. Soil erosion science: reflections on the limitations of current approaches. *Catena*, 68: 73-86.
5. Brunner, G.W. 1995. HEC-RAS river analysis system. Hydraulic Reference Manual. Version 1.0., DTIC Document.
6. Bruno, C., C.D. Stefano and V. Ferro. 2008. Field investigation on rilling in the experimental Sparacia area, South Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33: 263-279.
7. Chalov, S.R., J. Jarsjö, N.S. Kasimov, A.O. Romanchenko, J. Pietron, J. Thorslund and E.V. Promakhova. 2014. Spatio-temporal variation of sediment transport in the Selenga River Basin, Mongolia and Russia. *Environmental Earth Sciences*, 73: 1-18.
8. Cremers, N., P. Van Dijk, A. De Roo and M. Verzaandvoort. 1996. Spatial and temporal variability of soil surface roughness and the application in hydrological and soil erosion modelling. *Hydrological Processes*, 10: 1035-1047.

9. Elliot, W., J. Laflen, A. Thomas and K. Kohl. 1997. Photogrammetric and rillmeter techniques for hydraulic measurement in soil erosion studies. *Transactions of the ASAE*, 40: 157-165.
10. Everts, C.J. and D.L. Carter. 1981. Furrow erosion and topsoil losses. College of Agriculture, University of Idaho, Moscow, Russia.
11. Fernández-Gómez, R., L. Mateos and J. Giráldez. 2004. Furrow irrigation erosion and management. *Irrigation Science*, 23: 123-131.
12. Franti, T.G., J.M. Laflen and D.A. Watson. 1985. Soil erodibility and critical shear under concentrated flow. *American Society of Agricultural Engineers*, 42: 329-335.
13. Ghebreyessus, Y., C. Gantzer, E. Alberts and R. Lentz. 1994. Soil erosion by concentrated flow: shear stress and bulk density. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 37 pages.
14. Giménez, R., J. Casalí, I. Grande, J. Díez, M.A. Campo, J. Álvarez-Mozos and M. Goni. 2012. Factors controlling sediment export in a small agricultural watershed in Navarre, Spain. *Agricultural Water Management*, 110: 1-8.
15. Giménez, R. and G. Govers. 2002. Flow detachment by concentrated flow on smooth and irregular beds. *Soil Science Society of America Journal*, 66: 1475-1483.
16. Govers, G. 1987. Spatial and temporal variability in rill development processes at the Huldenberg experimental site. *Catena, Supplement*, 8: 17-34.
17. Govers, G., R. Giménez and K. Van Oost. 2007. Rill erosion: Exploring the relationship between experiments, modelling and field observations. *Earth-Science Reviews*, 84: 87-102.
18. Hamblin, A. and D. Davies. 1977. Influence of organic matter on the physical properties of some East Anglian soils of high silt content. *Journal of Soil Science*, 28: 11-22.
19. Heimsath, A.M., W.E. Dietrich, K. Nishiizumi and R.C. Finkel. 2001. Stochastic processes of soil production and transport: Erosion rates, topographic variation and cosmogenic nuclides in the Oregon Coast Range. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26: 531-552.
20. Knapen, A., J. Poesen, G. Govers, G. Gyssels and J. Nachtergaele. 2007. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. *Earth-Science Reviews*, 80: 75-109.
21. Lisle, I., C. Rose, W. Hogarth, P. Hairsine, G. Sander and J.Y. Parlange. 1998. Stochastic sediment transport in soil erosion. *Journal of Hydrology*, 204: 217-230.
22. Lyle, W. and E. Smerdon. 1965. Relation of compaction and other soil properties to erosion resistance of soils. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 8: 419-422.
23. Mailapalli, D.R., N. Raghuvanshi and R. Singh. 2009. Sediment transport in furrow irrigation. *Irrigation Science*, 27: 449-456.
24. Mailapalli, D.R., N.S. Raghuvanshi and R. Singh. 2013. Sediment transport model for a surface irrigation system. *Applied and Environmental Soil Science*, 2013: 1-10.
25. Mateos, L. and J.V. Giráldez. 2005. Suspended load and bed load in irrigation furrows. *Catena*, 64: 232-246.
26. Merten, G., M. Nearing and A. Borges. 2001. Effect of sediment load on soil detachment and deposition in rills. *Soil Science Society of America Journal*, 65: 861-868.
27. Nearing, M. 2000. Evaluating soil erosion models using measured plot data: accounting for variability in the data. *Earth Surface Process and Landforms*, 25: 1035-1043.
28. Nearing, M., L. Norton, D. Bulgakov, G. Larionov, L. West and K. Dontsova. 1997. Hydraulics and erosion in eroding rills. *Water Resources Research*, 33: 865-876.
29. Poesen, J., J. Nachtergaele, G. Verstraeten and C. Valentin. 2003. Gully erosion and environmental change importance and research needs. *Catena*, 50: 91-133.
30. Risse, L., M. Nearing, J. Laflen and A. Nicks. 1993. Error assessment in the universal soil loss equation. *Soil Science Society of America Journal*, 57: 825-833.
31. Rüttimann, M., D. Schaub, V. Prasuhn and W. Rüeegg. 1995. Measurement of runoff and soil erosion on regularly cultivated fields in Switzerland-some critical considerations. *Catena*, 25: 127-139.
32. Sidorchuk, A. 2005. Stochastic modeling of erosion and deposition in cohesive soils. *Hydrological Processes*, 19: 1399-1417.
33. Stefanovic, J.R. and R.B. Bryan. 2009. Flow energy and channel adjustments in rills developed in loamy sand and sandy loam soils. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34: 133-144.
34. Takken, I. and G. Govers. 2000. Hydraulics of interrill overland flow on rough, bare soil surfaces. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25: 1387-1402.
35. Trout, T. 1996. Furrow irrigation erosion and sedimentation: On-field distribution. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 39(5): 1717-1723.
36. Wendt, R., E. Alberts and A. Hjelmfelt. 1986. Variability of runoff and soil loss from fallow experimental plots. *Soil Science Society of America Journal*, 50: 730-736.

37. Wirtz, S., M. Seeger, A. Remke, R. Wengel, J.F. Wagner and J.B. Ries. 2013. Do deterministic sediment detachment and transport equations adequately represent the process-interactions in eroding rills? An experimental field study. *Catena*, 101: 61-78.
38. Wirtz, S., M. Seeger and J.B. Ries. 2012. Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes. *Catena*, 91: 21-34.
39. Wirtz, S., M. Seeger, A. Zell, C. Wagner, J.F. Wagner and J.B. Ries. 2013. Applicability of different hydraulic parameters to describe soil detachment in eroding rills. *PLOS ONE*, 8: e64861.
40. Yu, Y.C., G.H. Zhang, R. Geng and L. Sun. 2014. Temporal variation in soil detachment capacity by overland flow under four typical crops in the loess plateau of China. *Biosystems Engineering*, 122: 139-148.

## Spatial and temporal coefficient of variations of soil loss under concentrated flow in furrows of dryland wheat

Hossein Karimi<sup>\*1</sup>, Amir Lakzian<sup>2</sup>, Gholamhossein Haghnia<sup>2</sup>, Hojat Emami<sup>3</sup> and Majid Soufi<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Ph.D Student, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, <sup>2</sup>Professor, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, <sup>3</sup>Associate Professor, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran and <sup>4</sup>Associate Professor, Department of Soil Conservation and Watershed Management, Research Center of Agriculture and Natural Resources, Fars Province, Iran

Received: 01 November 2014

Accepted: 31 January 2014

### Abstract

In the past decades, the study of soil erosion has gained considerable attention by many researchers. This was thorough understanding of soil erosion processes and variable factors affecting it which is essential for making land management decisions. The aim of this study was to investigate the spatial-temporal coefficient of variation of soil erosion and flow hydraulic parameters in top-down conventional ploughing rills with 20 percent average slope. The artificial rills were produced with a length of 10, 20 and 30 meters. Hydraulic parameters and sediment concentration were measured at three equal time and distance intervals after applying 10, 15 and 20 Lmin<sup>-1</sup> inflow rates for 10 minutes. Consequently, sediment detachment and transport rates were calculated. In addition, relative errors (RE) of these parameters were calculated in order to investigate the coefficient of variations. The results showed that there was a significant difference ( $P<0.01$ ) between sediment (soil detachment rate, transport rate and sediment concentration) and hydraulic parameters. Stream power was significantly different with sediment detachment and transport rates ( $P<0.05$ ). Temporal evaluation revealed that coefficient of variations in the first and final time intervals of RE values of detachment and transport rates were more than middle time slot. This is perhaps due to stochastically movement of available sediment in the first step and undercutting and bank failure of rills in final stage. Spatial variability showed that the RE in the primary section is significantly ( $P<0.01$ ) greater than following sections, whereas there was no significant difference between second and third sections.

**Key words:** Coefficient of Variation, Detachment Rate, Relative Error, Shear Stress, Stream Power

---

\* Corresponding author: skarimi343@gmail.com