

بررسی تغییرات مکانی - زمانی پتانسیل جدایش ذرات خاک در فرسایش شیاری مطالعه موردی؛ زمین‌های دیم‌زار منطقه دشمن‌زیاری استان فارس

حسین کریمی^۱ - امیر لکزیان^{۲*} - غلامحسین حق‌نیا^۳ - حجت امامی^۴ - مجید صوفی^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۱/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۲/۰۹

چکیده

فرسایش خاک به عنوان یکی از عوامل اصلی تخریب زمین معرفی شده و آگاهی و شناخت از فرایندهای پیچیده وقوع و توسعه آن مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. این پژوهش به منظور بررسی اثرات عوامل هیدرولیکی از قبیل تنش برشی و قدرت جریان بر تغییرات مکانی - زمانی جدایش ذرات خاک صورت پذیرفته است. محدوده مورد بررسی در زمین‌های با شیب میانگین شیب (۲۲/۵۶ درصد) زیر کشت دیم گندم در ۶۰ کیلومتری غرب شیراز واقع شده است. به منظور ایجاد شیاریهای ۱۰ متری با عرض و عمق ۰/۳۰ متر، شخم رایج از بالا به پایین شیب انجام و ریخت شناسی شیار در فاصله‌های یک متری با اندازه‌گیری شیب و مقطع عرضی اندازه‌گیری شد. بر روی شیارها دبی‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ لیتر بر دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه اعمال گردید. غلظت‌های رسوب در سه فاصله مساوی زمانی و مکانی اندازه‌گیری و از این مقادیر به منظور محاسبه نرخ جدایش ذرات در زمان‌ها و مقاطع مختلف استفاده گردید. نتایج نشان داد که تغییرات تنش برشی و قدرت جریان در طول شیار بر نرخ جدایش ذرات اثر می‌گذارد. بررسی میانگین نرخ جدایش ذرات خاک نشان داد که اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) بین مقطع اولیه شیار با بازه‌های طولی دنباله رو آن وجود دارد. همچنین نرخ جدایش ذرات خاک به طور عمده در بازه زمانی پایانی آزمایش صورت پذیرفته است. این مطالعه نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین میانگین جدایش ذرات خاک در دبی‌های متفاوت اعمال شده وجود ندارد.

واژه‌های کلیدی: فرسایش شیاری، هیدرولیک جریان، تنش برشی، قدرت جریان

مقدمه

به طور کلی فرسایش شیاری به عنوان یکی از چهار نوع فرسایش اصلی (فرسایش سطحی، شیاری، آب‌کندی و آبراهه‌ای) طبقه‌بندی شده است (۴). هدرروی خاک و عناصر غذایی سطحی به وسیله فرسایش شیاری علاوه بر کاهش حاصلخیزی خاک، موجب رسوب‌گذاری در مخازن سدها و کاهش کیفیت آب‌ها می‌گردد. ویرتز و همکاران به نقل از میر و همکاران (۵) عنوان کردند که در زمین‌هایی که فرسایش شیاری توسعه یافته، نرخ فرسایش سه برابر شده است. علاوه بر این مورگان و همکاران (۶) نیز مقدار تولید رسوب در مزارع ذرت دارای فرسایش شیاری را ۹ تا ۲۱ برابر بیشتر از حالتی که مزرعه دارای فرسایش سطحی بوده است گزارش کرده‌اند.

عامل اصلی جدایش ذرات خاک در فرسایش شیاری جریان تمرکز یافته است و انرژی قطرات باران نقش معنی‌داری در فرسایش بین شیاری (سطحی) ایفا می‌کنند (۷ و ۸). با توجه به اینکه ظرفیت انتقال در جریان تمرکز یافته بسیار بیشتر از قطرات باران است، شیاریهای حاصل از شخم در زمین‌های شیب‌دار می‌تواند موجب

فرسایش خاک یکی از عوامل اصلی تخریب زمین بوده (۱) و بر اساس پژوهش پیمنتال (۲)، ۹۹/۷ درصد از غذای بشر از خاک و تنها ۰/۳ درصد آن از اقیانوس‌ها و اکوسیستم‌های آبی تأمین می‌شود. در همین راستا سالانه در جهان ۱۰ میلیون هکتار از زمین‌های زیر کشت به دلیل فرسایش خاک غیر قابل استفاده می‌شوند (۳) و این امر می‌تواند تهدیدی جدی برای امنیت غذایی و زیست محیطی پیش روی بشر محسوب گردد (۲). بنا به گزارش لال در سال ۲۰۰۱ در ایران حدود ۲۶/۴ و ۳۵/۴ میلیون هکتار از زمین‌ها زیر تأثیر فرسایش آبی و بادی قرار داشته که این مقدار مساحتی حدود ۳۷/۸ درصد از کل کشور را شامل می‌شود (۱).

۱، ۲، ۳ و ۴ - به ترتیب دانشجوی دوره دکتری، استاد و دانشیاران گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

* نویسنده مسئول: (Email: lakzian@um.ac.ir)

۵ - دانشیار بخش حفاظت خاک و آب‌خیزداری، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس

توصیف و پیش‌بینی جدایش ذرات خاک^۱ و انتقال رسوب^۲ در شیاریها توسعه یافته و تلاش‌های فراوانی جهت بررسی مناسب بودن روش‌های فوق صورت گرفته است (۱۳ و ۱۶). متأسفانه علی‌رغم تلاش پژوهش‌گران مختلف در این زمینه، توصیف فرآیند فرسایش شیاری به دلیل اختلاف در روش‌های اندازه‌گیری و پایش به‌خوبی صورت نگرفته و نتایج مختلف به سختی قابل مقایسه می‌باشند (۸ و ۱۵).

بیشتر آزمایش‌های صورت گرفته بر روی فرسایش شیاری در شرایط آزمایشگاهی (۱۷، ۱۸) و شرایط مزرعه‌ای صورت گرفته (۱۹) و هدف اصلی این گروه‌های پژوهشی مشاهده تشکیل شبکه‌های شیاری، مشخص نمودن شرایط آغازین شیاری، بررسی توسعه ریخت‌شناسی سر شیاریها (۲۰) و بررسی عامل‌های اصلی هیدرولیکی از قبیل سطح مقطع، محیط خیس شده، شعاع هیدرولیکی، میانگین سرعت و تنش برشی در جدایش ذرات خاک و توسعه شیاری بوده است (۲۱). مشکل اصلی پژوهش‌ها در شرایط آزمایشگاهی قابل تعمیم نبودن نتایج آن به شرایط مزرعه و طبیعی می‌باشد. گیمنز و گوورز نشان دادند که بیشتر داده‌های به‌دست آمده در آزمایشگاه از بستری نسبتاً صاف با زبری کم حاصل شده که قابل مقایسه با شرایط بستر زیر و سخت مزرعه نمی‌باشد (۱۳).

هدف از این پژوهش بررسی اثر هیدرولیک شیاری (عامل‌های تنش برشی و قدرت جریان) در تغییرات زمانی و مکانی جدایش ذرات خاک شیاریها حاصل از شخم در اراضی شیب‌دار زیر کشت گندم دیم می‌باشد. آزمایش در شرایط شیاریهایی با ریخت‌شناسی متفاوت به همراه روان‌آب‌های مختلف طراحی شد، تا دینامیک تولید رسوب و جدایش ذرات خاک تحت این شرایط مورد بررسی قرار گیرند.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد پژوهش

منطقه مورد پژوهش در ۶۰ کیلومتری غرب شیراز در ناحیه تپه ماهوری دشمن‌زیاری و در زمین‌های بالادست سد پارسیان واقع شده است. این منطقه در محدوده ۵۱° و ۴۹' و ۵۴" تا ۵۲° و ۰۵' و ۰۸" طول شرقی و ۲۹° و ۵۳' و ۵۲" تا ۳۰° و ۰۳' و ۰۰" عرض شمالی قرار دارد. بر اساس بررسی نقشه‌های سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران، مواد مادری این مناطق از سازند زمین‌شناسی پایده‌گورپی تشکیل شده است.

افزایش تولید رسوب در این نواحی گردد (۹). بنا به گزارش سان و همکاران در پژوهشی که توسط لی و همکاران (۱۰) در چین صورت گرفت، مشخص گردید که سهم فرسایش شیاری در زمین‌های شیب‌دار بیش از ۷۰ درصد و این مقدار حدود ۵۰ درصد از کل فرسایش خاک را شامل می‌شود. علاوه بر نقش فرسایش شیاری در تولید رسوب، بر اساس پژوهش گاورز (۱۱) مشخص گردید که پس از تشکیل شیاری در زمین، شیاریها نقش زهکش خارج‌کننده برای رسوبات حاصل از فرسایش بین شیاری را ایفا کرده و فرسایش بین شیاری را نیز افزایش داده‌اند.

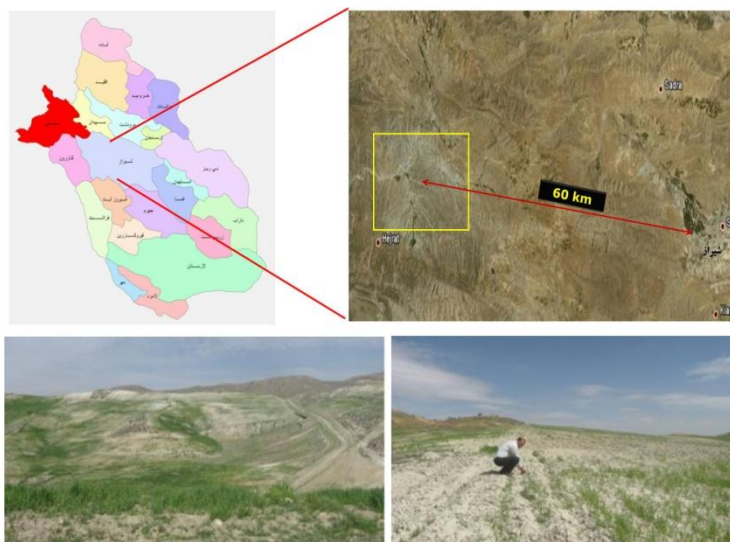
با توجه به اهمیت این نوع فرسایش در دامنه‌های شیب‌دار، شناخت فرآیند تشکیل و توسعه آن نه تنها موجب به‌کارگیری روش‌های مناسب در جلوگیری از رخداد آن‌ها در زمین‌های شیب‌دار کشاورزی می‌گردد، بلکه در پیش‌بینی مقدار این فرسایش در مدل‌های فرسایش موجود که طی دهه‌های گذشته توسعه یافته‌اند نیز مؤثر خواهد بود. از متغیرهای اصلی کنترل‌کننده جدایش و انتقال ذرات خاک در این نوع فرسایش، می‌توان به گرادیان شیب بستر، سرعت و عمق جریان و زبری هیدرولیکی شیاری اشاره نمود (۱۰). شرایط سطحی از قبیل زبری و پوشش سطحی خاک نیز نقش مهمی در ایجاد و گسترش این نوع فرسایش ایفاء می‌کنند (۱۲ و ۱۳)، به طوری که خاک‌های دارای شرایط سطحی متفاوت، با وجود شرایط اولیه مشابه، مقاومت‌های متفاوتی به هیدرولیک جریان نشان خواهند داد (۱۴).

رابطه‌های متفاوتی جهت توصیف هیدرولیک جریان و جدایش ذرات خاک در شیاریهای فعال ارائه شده است و اغلب آن‌ها از روابط موجود در رودخانه‌های آبرفتی به‌کار گرفته می‌شوند. از این رابطه‌ها می‌توان به معادله مانینگ در توصیف هیدرولیک شیاری و غلظت، نرخ انتقال و جدایش ذرات خاک در توصیف هیدرولیک رسوب اشاره نمود. استفاده از این روابط با آگاهی از تفاوت‌ها و شباهت‌های موجود بین هیدرولیک جریان و جدایش ذرات خاک در رودخانه و شیاری صورت می‌پذیرد (۸).

شیاریها نسبت به رودخانه‌ها دارای شرایط متفاوتی می‌باشند. شیاریها دارای ابعاد کوچک‌تر، مسیر جریان تمرکز یافته یکنواخت‌تر و عمق جریان در آنها بین چند میلی‌متر تا چند سانتی‌متر تغییر می‌کند و به‌طور عمده شیب در شیاریهای فرسایشی بیشتر از رودخانه‌ها می‌باشد. همچنین فرسایش در شیاریها نسبت به رودخانه‌های دائمی و فصلی در یک مقیاس زمانی بسیار کوتاه‌تر اتفاق می‌افتد. به‌منظور شناخت تغییرات زمانی و مکانی جدایش ذرات در جریان شیاری، نیاز به آگاهی از عامل‌های هیدرولیک جریان از قبیل سرعت جریان، شعاع هیدرولیکی و معادلات مرتبط با ویژگی‌های جریان و جدایش ذرات خاک می‌باشد (۱۵). در دهه‌های گذشته روش‌های مختلفی برای

1 - Soil Detachment

2 - Sediment Transport



شکل ۱- محدوده مورد پژوهش در استان فارس و زمین‌های شیب‌دار زیر کشت دیم در منطقه
Figure 1- Study area in Fars province and hillslope lands under dry farming

هر شیار به فواصل ۱ متری مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. بر روی هر یک از انواع جویچه‌ها، به وسیله ژنراتور برق و موتور پمپ آب، مقادیر ثابت دبی‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ لیتر در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه اعمال گردید. خاک در ابتدای آزمایش دارای یک در صد رطوبت (هوا خشک) بوده و زمان آزمایش پس از رسیدن جبهه آب به انتهای شیارها به مدت ده دقیقه در نظر گرفته شد. اندازه‌گیری رواناب و رسوب پس از گذشت ۳ دقیقه از رسیدن جبهه آب به انتهای شیار صورت پذیرفت (۲۴ و ۲۵). افزون بر این به منظور دستیابی به تغییرات زمانی رسوب، زمان‌های ۳/۳، ۶/۶ و ۱۰ دقیقه به عنوان زمان‌های اندازه‌گیری نمونه‌های روان آب و غلظت رسوب در نظر گرفته شد. نمونه‌های رسوب با استفاده از ظروف پلاستیکی با حجم مشخص (۲۵۰ سی‌سی) در مقاطع ۱/۳، ۲/۳ و انتهای شیار (نقاط اندازه‌گیری^۲) مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. به منظور جلوگیری از حرکت ذرات خاک در ابتدای شیار، حوضچه‌ای با پوشش پلاستیکی ایجاد تا ورود جریان به شیارها آرام و ثابت صورت گرفته (۵) و در انتهای هر شیار از جمع‌آوری کننده روان آب^۳ استفاده شد. شکل ۲ شیارهای ایجاد شده به همراه شیارمتر و جمع‌کننده روان آب در انتهای شیار را نشان می‌دهد.

به منظور محاسبه عامل‌های هیدرولیکی همانند تنش برشی و قدرت جریان ابتدا طول، مقاطع عرضی و شیب‌های موضعی شیارها در فاصله‌های یک متری به صورت زمین‌مرجع در نرم‌افزار ArcGIS 9.3 (۲۳) وارد و جویچه‌های کشت شبیه‌سازی شدند.

این سازند از نظر سنگ شناسی شامل مارن‌های تیره خاکستری متمایل به آبی، شیل و کمی آهک مارنی خاکستری رنگ است. متوسط بارندگی سالانه منطقه حدود ۵۵۱/۵ میلی‌متر (۲۲) و با توجه به حجم زیاد هدرروی خاک سطحی (۲۲) عمده خاک‌های تشکیل شده در محدوده مورد آزمایش در رده اینسپتی‌سول‌ها (Fine Loamy Carbonatic mesic Typic Calcixerepts) طبقه‌بندی می‌گردند. آزمایش در زمینی با شیب متوسط ۲۲/۵۶ درصد و با کشت غالب گندم دیم صورت گرفت. لازم به ذکر است صرف نظر از شیب زمین عمده عملیات خاک‌ورزی منطقه در جهت شیب زمین صورت می‌گیرد. علاوه بر این بر اساس تقویم کشت منطقه، زمین‌های کشاورزی در فصل بارندگی فاقد هرگونه پوشش بوده و مستعد فرسایش خاک در زمان بارندگی می‌باشند. شکل ۱ محدوده مورد مطالعه در استان فارس و زمین‌های شیب‌دار زیر کشت دیم را نشان می‌دهد.

آماده‌سازی زمین و اندازه‌گیری

به منظور اندازه‌گیری میزان رسوب تولیدی در کشت دیم گندم بر روی اراضی شیب‌دار، شخم به روش سنتی توسط کشاورزان منطقه صورت پذیرفت. ابعاد عمق و عرض شیارهای حاصل از شخم حدود ۰/۳ متر و طول شیار ۱۰ متر در نظر گرفته و بر اساس روش معمول کشاورزان منطقه، جهت شیارها از بالا به سمت پایین شیب در نظر گرفته شد. قبل از اعمال دبی‌های مختلف در جویچه‌های کشت، مقطع عرضی آنها با استفاده از شیارمتر^۱ اندازه‌گیری شد (۲۰ و ۲۳). شیارمتر با ۲۷ سوزن به فواصل ۲ سانتی‌متر ساخته و مقاطع عرضی

2- Measurement Points
3 - Runoff collector

1 - Rillmeter



شکل ۲- ایجاد شخم به روش سنتی و تولید شیار (A)، اندازه‌گیری در مقاطع مختلف (B)، اندازه‌گیری سطح مقطع به وسیله شیارمتر (C) و جمع‌آوری روان‌آب و رسوب در انتهای شیار (D)

Figure 2- conventional tillage and producing furrow rill (A), different measurement points (B), cross section measurement by rillmeter (C), collecting runoff and sediment (D)

(۳۲) از دیگر عامل‌های مؤثر در جدایش ذرات خاک از شیارهای ایجاد شده توسط جریان متمرکز می‌باشند.

$$\tau = \rho g R S \quad (۲)$$

در معادله τ تنش برشی جریان (Pa)، ρ چگالی آب (kg m^{-3})، S شتاب جاذبه زمین (m s^{-2})، R شعاع هیدرولیکی جریان (m) و ω گرادیان انرژی هیدرولیکی (m m^{-1}) می‌باشند. در معادله (۳) نیز قدرت جریان (Wm^{-2}) جریان را نشان می‌دهد.

$$\omega = \tau v \quad (۳)$$

به منظور تعیین نرخ جدایش ذرات^۴ از معادله ۴ استفاده شده است (۲۳). در این معادله D_r نرخ جدایش ذرات خاک ($\text{kg m}^{-2}\text{S}^{-1}$)، S_c غلظت رسوب (g L^{-1})، V سرعت جریان (m s^{-1})، A سطح مقطع جریان (m^2)، L طول جریان (m) و W_p محیط خیس شده (m) می‌باشند.

$$D_r = \frac{S_c \times V \times A}{L \times W_p} \quad (۴)$$

لازم به ذکر است از شیارها قبل از آزمایش نمونه برداری خاک صورت پذیرفته و پس از انتقال به آزمایشگاه خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها مطابق روش‌های متداول اندازه‌گیری شد. به منظور بررسی مقایسه میانگین‌ها از آزمون چند دامنه دانکن در نرم‌افزار Genstat 12 استفاده گردید.

شکل ۳ نمای سه بعدی بخشی از یک شیار ۱۰ متری و مقطع عرضی ترسیم شده را نشان می‌دهد. تمامی عامل‌هایی همچون عمق، سرعت، سطح مقطع جریان و محیط خیس شده مورد نیاز برای محاسبه تنش برشی، قدرت جریان و نرخ جدایش ذرات خاک محاسبه و مورد پایش قرار گرفت (۲۵).

این عامل‌ها از بالای شیار در فواصل یک متری بر اساس قانون بقای انرژی و با روش چرخش آزمایشی^۱ (۸) محاسبه شد. شایان گفتن است که در محاسبه‌ها، خروجی هر مقطع ورودی مقطع بعدی قرار گرفت (۲۶).

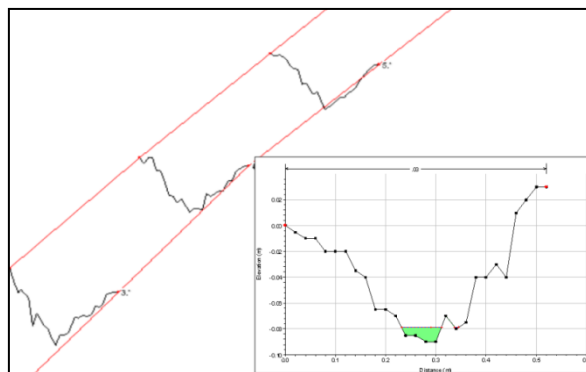
سرعت جریان بر اساس معادله مانینگ برآورد شد. این معادله (معادله ۱) یکی از معادلات اصلی برای نشان دادن ارتباط بین سرعت آب، هندسه و شیب شیار است (۲۷).

$$v = \frac{R^{2/3} S^{1/3}}{n} \quad (۱)$$

در این معادله v میانگین سرعت جریان در شیار (m s^{-1})، $R = \frac{A}{W_p}$ شعاع هیدرولیکی (m)، S شیب بستر شیار (mm^{-1})، n ضریب مانینگ ($\text{S m}^{1/3}$)، A سطح مقطع جریان (m^2) و W_p محیط خیس شده (m) می‌باشند. با توجه به جداول راهنما ضریب مانینگ برای آزمایش صورت گرفته برابر 0.03 در نظر گرفته شده است (۲۶). تنش برشی جریان^۲ ($0.15, 0.28-0.30$) و قدرت جریان^۳ ($0.15, 0.31$) و

3 - Stream Power
4 - Detachment Rate

1 - Iteration
2 - Flow Shear Stress



شکل ۳- نمای سه بعدی بخشی از شیار و مقطع عرضی ترسیم شده

Figure 3- Tree-dimensional view of simulate rill and drown cross section

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

Table 1- physiochemical properties of studied soils

Slope Length (m)	Discharge (L min ⁻¹)	pH	EC ($\mu\text{s m}^{-1}$)	OM (%)	Soil Particles (%)			Texture Class	CaCO ₃ (%)
					Sand	Silt	Clay		
	10	7.5	495.0	0.5	18.8	47.6	33.5	SiCL	54.4
10	15	7.7	485.3	0.4	17.7	50.1	32.1	SiCL	54.6
	20	7.5	554.3	0.4	18.1	53.2	28.7	SiCL	50.0

نتایج و بحث

۱۰ لیتر بر دقیقه بدست آمد (۱۰/۲۹ وات بر متر مربع) و کمترین این میانگین نیز همانند مقدار تنش برشی در مقطع انتهایی شیار ۲۰ لیتر بر دقیقه معادل ۲/۷۷ وات بر متر مربع برآورد گردید. به دلیل کم بودن مقادیر دبی اعمال شده در این شیارها، جریانی با عمق کم ایجاد شده که در این جریان کم عمق، نقش ریخت شناسی بستر شیار کاملاً برجسته می‌باشد. به همین دلیل با توجه به بستر ناصاف شیارهای حاصل از شخم، مقدار عامل‌های هیدرولیکی زیر تاثیر تغییرات بستر شیار همانند تغییرات مقطع عرضی و شیب موضعی بوده و مقادیر متفاوتی از عامل‌های هیدرولیکی در مقاطع مختلف شیار بدست آمده است. این موضوع و اهمیت بستر شیار با توجه به عمق کم جریان در فرسایش شیبی توسط گوورز و همکاران (۸) نیز مورد توجه قرار گرفته است. افزون بر این با توجه به جدول ۲ میانگین کل داده‌های نرخ جدایش ذرات خاک بدست آمده برابر ۰/۰۹ کیلوگرم بر متر مربع بر ثانیه می‌باشد و بیشترین مقدار آن در مقطع اولیه شیار ۲۰ لیتر بر دقیقه و برابر ۰/۲۲ کیلوگرم بر متر مربع بر ثانیه بدست آمد و کمترین مقدار آن نیز در همین شیار برابر ۰/۰۲ محاسبه شد.

بررسی تنش برشی و قدرت جریان در مقاطع مختلف شیار با دبی ۱۰ لیتر بر دقیقه نشان داد (جدول ۲) که در مقطع ابتدایی میانگین تنش برشی و قدرت جریان به ترتیب ۱۳/۹۸ و ۱۰/۲۹ می‌باشد به گونه‌ای که مقدار قدرت جریان در مقطع اولیه نسبت به مقاطع بعدی به ترتیب ۱/۸۸ و ۱/۶۰ برابر است و با توجه به عوامل مؤثر در

جدول ۱ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی هر یک از شیارهای مورد بررسی را نشان می‌دهد. این خاک‌ها در کلاس بافتی لوم رس سیلتی واقع شده و از لحاظ ماده آلی فقیر می‌باشند. مقادیر کربنات کلسیم خاک بین ۵۰ تا ۵۴/۴ بوده و درصد سیلت خاک‌ها که می‌تواند نشان‌دهنده فرسایش‌پذیری خاک‌ها باشد (۳۴)، دارای میانگین ۵۰/۳ درصد است. همچنین بر اساس این نتایج، شیارهایی که در معرض انرژی‌های متفاوت روان آب قرار گرفته‌اند، از نظر ویژگی‌های خاک به طور نسبی دارای شرایط یکنواختی می‌باشند.

ویژگی‌های هیدرولیکی جریان همانند تنش برشی و قدرت جریان که عامل جدا شدن ذرات خاک از بستر خود می‌باشند در فواصل یک متری محاسبه و میانگین این عامل‌ها برای هر یک از مقاطع ۱/۳، ۲/۳ و انتهای طول شیار در جدول ۲ ارائه شده است. افزون بر این با استفاده از غلظت رسوب اندازه‌گیری شده در عملیات صحرائی، میانگین نرخ جدایش ذرات خاک در مقاطع اندازه‌گیری شده نیز در این جدول آورده شده است. با توجه به این جدول مشخص شد که بیشترین مقدار میانگین تنش برشی در مقطع اولیه شیار با دبی ۲۰ لیتر بر دقیقه که معادل ۱۴/۰۷ پاسکال می‌باشد بدست آمد و کمترین مقدار آن نیز در مقطع سوم (۷/۴۱ پاسکال) همین شیار محاسبه شد. بیشترین مقدار میانگین قدرت جریان نیز در مقطع اولیه شیار با دبی

تعیین این مقادیر، به نظر می‌رسد ریخت شناسی شیار (شیب و تغییرات مقاطع عرضی) بیشترین نقش را در این خصوص داشته است.

جدول ۲- ویژگی‌های هیدرولیک جریان و جدایش ذرات خاک در مقاطع مختلف شیارها

Table 2- Runoff hydraulic properties and soil particles detachment in different measurement points

Length (m)	10								
	10			15			20		
Discharge (Lmin ⁻¹)	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Measurement points	1	2	3	1	2	3	1	2	3
طول Length (m)	3.33	6.67	10.00	3.33	6.67	10.00	3.33	6.67	10.00
تنش برشی Shear Stress (Pa)	13.98	11.38	12.19	12.65	10.22	11.51	14.07	13.92	7.41
قدرت جریان Stream Power (Wm ⁻²)	10.29	5.48	6.45	6.41	4.74	5.75	9.41	8.62	2.77
نرخ جدایش Detachment rate (kgm ⁻² S ⁻¹)	0.18	0.04	0.07	0.12	0.04	0.06	0.22	0.12	0.02

انتهایی، این ذرات از خاک جدا شده و مورد اندازه‌گیری قرار گرفته‌اند. علاوه بر این در مراحل پایانی آزمایش زمان کافی برای بریدگی و فرسایش بستر و زیرخوردگی کناره‌های شیار فراهم شده و پس از آن با ریزش و عقب‌روی دیواره‌های شیار حجم قابل توجهی از رسوبات ریزشی وارد روان آب گردیده و سهم جدایش ذرات خاک در مراحل پایانی را موجب شده‌اند. این فرآیند توسط ویرتز و همکاران (۲۳) نیز گزارش شده است.

اعمال دبی ۱۵ لیتر بر دقیقه بر روی شیار ۱۰ متری نشان داد که تغییرات قابل توجهی در مقادیر تنش برشی و قدرت جریان در طول شیار وجود ندارد (جدول ۲). مقادیر تنش برشی و قدرت جریان در طول شیار نسبتاً به صورت یکنواخت بوده و میانگین این مقاطع به ترتیب ۱۱/۴۶ (Pa) و ۵/۶۳ (Wm⁻²) بدست آمد که با وجود افزایش دبی جریان نسبت به تیمار ۱۰ لیتر بر دقیقه مقادیر میانگین تنش برشی و قدرت جریان کاهش یافته است (جدول ۲) هر چند که این کاهش چشمگیر نمی‌باشد. این کاهش را می‌توان به اهمیت نقش ریخت‌شناسی شیار (شیب موضعی و مقاطع عرضی) در ایجاد تنش برشی و قدرت جریان نسبت داد. اهمیت و نقش ریخت‌شناسی در تولید انرژی فرساینده در شیارهای فرسایشی توسط گوورز و همکاران (۸) و وونگ و همکاران (۳۷) نیز گزارش شده است.

همانند تیمار دبی ۱۰ لیتر بر دقیقه در این تیمار نیز نرخ جدایش در ابتدای شیار بیش از مقاطع بعدی می‌باشد به گونه‌ای که در مقطع اولیه میانگین نرخ جدایش ۰/۱۲ و در مقاطع بعدی ۰/۰۴ و ۰/۰۶ بدست آمد و نشان می‌دهد که مقدار نرخ جدایش در مقطع اولیه به ترتیب ۳ و ۲ برابر مقاطع دوم و سوم می‌باشد (شکل ۴).

شایان گفتن است که در بررسی زمانی تغییرات نرخ جدایش در مقاطع مختلف مکانی مشخص شد که سهم زیادی از افزایش نرخ جدایش در مقطع ابتدایی طول شیار مربوط به زمان ۳ دقیقه اول آزمایش می‌باشد که دلیل آن را می‌توان به وجود رسوبات فراهم بیشتر

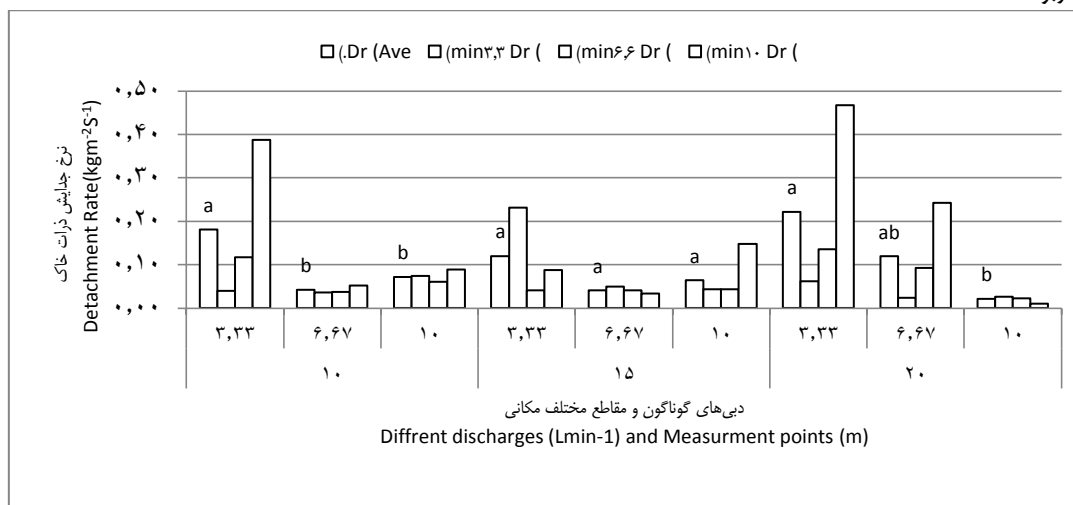
علاوه بر این با بررسی مقادیر میانگین نرخ جدایش ذرات خاک در زمان‌های مختلف، مشخص شد که مقدار میانگین نرخ جدایش در مقطع ابتدایی طول شیار (۰/۱۸ کیلوگرم در متر مربع در ثانیه) به صورت معنی‌داری ($P < 0.05$) بیش از سایر مقاطع بوده به طوری که این مقدار بیش از ۴ برابر مقطع دوم (۰/۰۴) و ۲ برابر مقطع سوم (۰/۰۷) می‌باشد (شکل ۴). تفاوت میانگین تنش برشی و قدرت جریان در مقاطع دوم و سوم طول شیار زیاد نبوده به گونه‌ای که میانگین این دو مقطع به ترتیب ۱۱/۷۹ (Pa) و ۵/۹۶ (Wm⁻²) بدست آمد. به همین دلیل نیز تفاوت معنی‌داری در میانگین نرخ جدایش ذرات خاک و تولید رسوب در دو مقطع انتهایی مشاهده نشد.

بررسی جدایش ذرات خاک در زمان‌های مختلف، مشخص نمود که عمده جدایش خاک در مقطع ابتدایی مربوط به یک سوم انتهایی زمان آزمایش می‌باشد به گونه‌ای که نرخ جدایش ذرات خاک در بازه زمانی انتهایی آزمایش در این مقطع برابر ۰/۳۹ کیلوگرم بر متر مربع بر ثانیه بدست آمد. در بازه اولیه آزمایش، انرژی روان آب تنها موجب انتقال رسوبات فراهم^۱ (ذرات خاکی که نیازی به جداسازی آنها از بستر شیار نمی‌باشد و به راحتی در معرض انتقال قرار می‌گیرند) می‌شوند و این فرآیند به عنوان اثر بولدزری^۲ معروف می‌باشد. وجود رسوبات فراهم از فرایندهای تصادفی دنباله‌روی نموده و مقدار آن در مقاطع مختلف متفاوت می‌باشد. پژوهش‌های سیگر و همکاران (۳۵) و گیمنز و همکاران (۳۶) نیز تایید کننده این موضوع می‌باشد.

افزایش جدایش ذرات خاک در بازه زمانی پایانی آزمایش (۱۰ دقیقه) را می‌توان بیانگر وجود فرایندهای مختلفی در کنترل نرخ جدایش ذرات در شیارهای آزمایشی دانست (۱۵، ۲۳). به نظر می‌رسد انرژی حاصل از تنش برشی و قدرت جریان، در ابتدای زمان آزمایش موجب سست کردن ذرات خاک از بستر خود گردیده و در زمان‌های

1- Available Sediment
2- Bulldozer-Effect

در این ناحیه مربوط دانست.



شکل ۴- تغییرات مکانی و زمانی نرخ جدایش ذرات با دبی‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ لیتر بر دقیقه

Figure 4- Spatial and temporal detachment rate changes in 10, 15 and 20 (Lmin-1) inflow rates

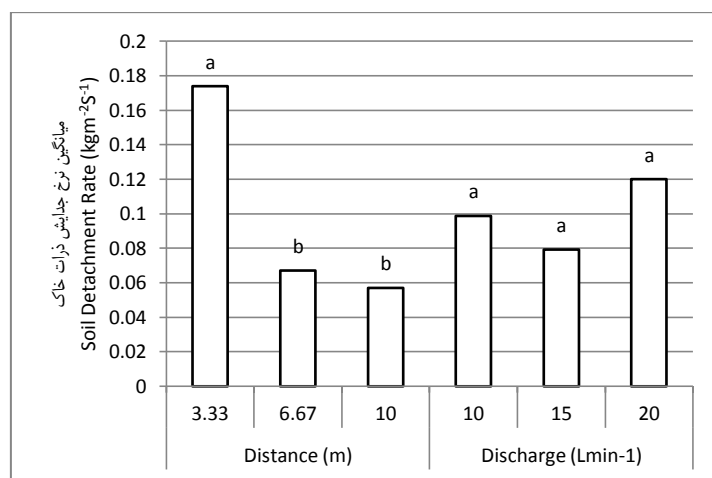
بررسی زمانی نرخ جدایش ذرات نیز حاکی از فرآیند اعمال شده در شیار با دبی ۱۰ لیتر بر دقیقه می‌باشد و نشان می‌دهد که نقش عوامل هیدرولیکی در جدایش ذرات خاک در مراحل پایانی زمان آزمایش چشمگیر بوده و عمده رسوبات جدا شده و منتقل شده در اواخر زمان آزمایش صورت گرفته است. لازم به ذکر است با توجه به جدول ۲ و شکل ۴ مشخص می‌شود مقدار نرخ جدایش ذرات خاک در مقطع انتهایی این شیار کاهش قابل توجهی یافته است. از دلایل این کاهش می‌توان به باز شدگی بستر شیار که موجب افزایش محیط خیس شدگی و کاهش سرعت جریان گردیده است نسبت داد. از دلایل دیگر کاهش نرخ جدایش در مقطع انتهایی می‌توان به کاهش توان حمل رسوب توسط جریان به دلیل افزایش بار رسوب اشاره نمود که پژوهش‌های بیشتری جهت ارزیابی کمی این فرآیند نیاز می‌باشد. بررسی کلی میانگین نرخ جدایش ذرات خاک در دبی‌های مختلف روان آب و فواصل مختلف اندازه‌گیری که با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن صورت گرفته است (شکل ۵) نشان داد که به‌طور کلی نرخ جدایش ذرات در مقطع ابتدایی شیارها دارای اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) نسبت به دو مقطع اندازه‌گیری شده بعدی می‌باشد. در خصوص این اختلاف علاوه بر موارد ذکر شده همانند تنش برشی و قدرت جریان موضعی و با توجه به سست بودن استحکام خاک در شیارهای ایجاد شده (زمین‌های تحت کشت) و مطابق نظر اوزت و همکاران (۴۰) که بیان کرده‌اند که عملیات شخم موجب به هم خوردگی استحکام خاک و حساسیت آن به نیروهای فرساینده می‌گردد می‌توان به زوج جدایش - انتقال^۲ نیز اشاره نمود. این پدیده نشان می‌دهد که انرژی اصلی جهت جدایش ذرات خاک در اثر تلاطم‌های

پژوهش‌های صورت گرفته در جدایش و انتقال ذرات خاک بیانگر وجود فرآیندهای تصادفی^۱ در ریخت‌شناسی، شیب و سایر ویژگی‌های بسترهای فرسایشی و جدایش و حرکت ذرات خاک می‌باشد. وجود رسوبات فراهم از این نوع بوده هر چند که نیاز به بررسی‌های دقیقتر با مقیاس‌های بزرگتر به منظور آگاهی بیشتر از فرآیندهای صورت گرفته می‌باشد. پژوهش‌های همساز و همکاران (۳۸)، سیدورچاک (۳۹) و آبورسولد و همکاران (۹) وجود این فرآیندهای تصادفی را در فرسایش و انتقال ذرات خاک نشان می‌دهد.

با توجه به مقادیر تنش برشی و قدرت جریان در شیار با دبی ۲۰ لیتر بر دقیقه (جدول ۲) مشخص شد که میانگین این عامل‌ها در دو مقطع اول بیشتر از مقطع انتهایی شیار می‌باشد. میانگین دو مقطع اول برای تنش برشی و قدرت جریان حدود ۱۴ و ۹/۰۱ بدست آمد. این مقادیر تفاوت چشمگیری با مقطع بعدی داشته که به ترتیب برابر ۷/۴۱ و ۲/۷۷ است. از طرفی میانگین نرخ جدایش ذرات خاک نیز مانند سایر تیمارها در مقطع اولیه بیش از دو مقطع دیگر می‌باشد که به ترتیب شامل مقادیر ۰/۲۲، ۰/۱۲ و ۰/۰۲ کیلوگرم بر متر مربع بر ثانیه می‌باشد. با توجه به بحث‌های صورت گرفته در شیار با دبی ۱۰ لیتر بر دقیقه، میانگین نرخ جدایش ذرات به افزایش تنش برشی و قدرت جریان مقاطع اول و دوم واکنش نشان داده و افزایش یافته‌اند به‌گونه‌ای که مقدار میانگین نرخ جدایش ذرات در ابتدای مسیر به‌صورت معنی‌داری ($P < 0.05$) نسبت انتهای شیار بیشتر (۱۱ برابر) می‌باشد. از طرفی با توجه به کمتر بودن عوامل هیدرولیکی در مقطع میانی نسبت به ابتدای مسیر، میانگین نرخ جدایش نسبت به مقطع ابتدایی کمتر ولی تفاوت بین آنها معنی‌دار نمی‌باشد.

انتقال رسوبات فراهم را داشته باشد جستجو کرد افزون بر این گوورز و همکاران (۸) در بررسی مطالعه‌های صورت گرفته در فرسایش شیاری بیان می‌کنند که در این فرسایش با توجه به عمق کم جریان و بستر ناصاف شیاریها انرژی وارد شده برای جدایش ذرات خاک زیر تاثیر مقاطع غیر هندسی شیاری و شیب‌های موضعی بوده و این عوامل نقش چشمگیری در انرژی فرساینده در طول شیاری و به دنبال آن جدا شدن ذرات خاک ایفا می‌کنند. این در حالی است که پژوهش‌ها در خصوص تعیین حد آستانه هیدرولیکی برای جدایش ذرات خاک الزامی می‌باشد.

موضعی روان آب در طول شیاری تأمین می‌گردد و این تلاطم با افزایش بار رسوب روان آب کاهش پیدا می‌کند (۳۳). بر همین اساس پس از بارگذاری رسوب و رسیدن به ظرفیت انتقال، انرژی روان آب تنها صرف انتقال رسوبات شده و جدایش ذرات از بستر شیاری کاهش و یا متوقف شود (۱۵). لازم به ذکر است در پژوهش‌های آتی می‌توان نسبت به بررسی ظرفیت انتقال رسوب در طول شیاریها آگاهی بیشتری حاصل نمود. علاوه بر این شکل (۵) بیان کننده عدم تفاوت معنی‌دار در جدایش ذرات خاک در دبی‌های مختلف آزمایش می‌باشد. علت عدم تفاوت در دبی‌های مختلف را می‌توان در سست بودن زمین‌های کشاورزی و اینکه کمترین دبی (۱۰ لیتر بر دقیقه) انرژی لازم برای



شکل ۵- مقایسه میانگین‌ها در دبی‌های مختلف و مقاطع مختلف

Figure 5- Compare mean of different inflow rates and measurement points

این امر را می‌توان ناشی از نیاز به زمان کافی برای جدایش ذرات خاک از بستر خود توسط روان آب و زیرخوردگی کناره‌های شیاری و ریزش دیواره‌ها پس از گذشت زمان لازم به‌شمار آورد. علاوه بر این نتایج دبی‌های متفاوت اعمال شده بر روی شیاریها، حاکی از عدم هرگونه اختلاف معنی‌دار در میانگین نرخ جدایش ذرات خاک بود که می‌توان آن را به اهمیت نقش ریخت‌شناسی بستر شیاری و سست بودن ذرات خاک در اثر عملیات خاکورزی و شخم نسبت داد به گونه‌ای که همان دبی ابتدایی (۱۰ لیتر بر دقیقه) توان جدا نمودن ذرات و انتقال آنها را داشته است. هرچند که نیاز به پژوهش‌های بیشتر در این مبحث وجود دارد.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج نشان داد که مقادیر عوامل هیدرولیکی در طول شیاری تغییر و موجب تغییراتی در نرخ جدایش ذرات خاک می‌گردد. بررسی بازه‌های مختلف در طول یک شیاری نشان داد که میانگین نرخ جدایش ذرات خاک در مقطع یک‌سوم (۳/۳۳ متر) اولیه شیاری اختلاف معنی‌داری ($P < 0/05$) با بازه‌های طولی دنباله رو آن داشت. از عوامل مؤثر در این پدیده می‌توان به وجود تنش برشی و قدرت جریان بیشتر در این مقاطع و عدم اشباع روان آب توسط رسوب (زوج جدایش-رسوب) اشاره کرد. بررسی‌های زمانی تغییرات نرخ جدایش ذرات خاک نشان داد که عمده این جدایش در بازه پایانی آزمایش صورت پذیرفته است.

منابع

- 1- Abrahams A.D., Li G. 1998. Effect of saltating sediment on flow resistance and bed roughness in overland flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, 953-960.
- 2- Auerswald K., Fiener P., Dikau R. 2009. Rates of sheet and rill erosion in Germany-A meta-analysis. *Geomorphology*, 111, 182-193.

- 3- Auzet A.V., Boiffin J., Papy F., Ludwig B., Maucorps J. 1993. Rill erosion as a function of the characteristics of cultivated catchments in the north of France. *Catena*, 20, 41-62.
- 4- Bahadori N. 2014. Measuring soil loss using the roots of trees and rills and comparison with MPSIAC, M.Sc Thesis. Islamic Azad University. Arsanjan Branch.
- 5- Brunner G.W. 1995. HEC-RAS River Analysis System. Hydraulic Reference Manual. Version 1.0, DTIC Document.
- 6- Bruno C., Stefano C.D., Ferro V. 2008. Field investigation on rilling in the experimental Sparacia area, South Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33, 263-279.
- 7- Faeth P. 1994. Building the Case for Sustainable Agriculture: Policy Lessons from India, Chile and the Philippines. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 36, 16-39.
- 8- Ghebreyessus Y., Gantzer C., Alberts E., Lentz R. 1994. Soil erosion by concentrated flow: shear stress and bulk density. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 37.
- 9- Gilley J.E., Kottwitz E., Simanton J. 1990. Hydraulic characteristics of rills. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1899-1906
- 10- Giménez R., Casali J., Grande I., Díez J., Campo M.A., Álvarez-Mozos J., and Goni M. 2012. Factors controlling sediment export in a small agricultural watershed in Navarre (Spain). *Agricultural Water Management*, 110, 1-8.
- 11- Gimenez R., Govers G. 2002. Flow detachment by concentrated flow on smooth and irregular beds. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 1475-1483.
- 12- Govers G. 1991. Rill erosion on arable land in central Belgium: rates, controls and predictability. *Catena*, 18, 133-155.
- 13- Govers G. 1992. Relationship between discharge, velocity and flow area for rills eroding loose, non-layered materials. *Earth Surface Processes and Landforms*, 17, 515-528.
- 14- Govers G., Giménez R., Van Oost K. 2007. Rill erosion: Exploring the relationship between experiments, modelling and field observations. *Earth-Science Reviews*, 84, 87-102.
- 15- Heimsath A.M., Dietrich W.E., Nishiizumi K., Finkel, R.C. 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.
- 16- Hessel R., Jetten V. 2007. Suitability of transport equations in modelling soil erosion for a small Loess Plateau catchment. *Engineering geology*, 91, 56-71.
- 17- Huang C.h., Laflen J.M. Bradford J.M. 1996. Evaluation of the detachment-transport coupling concept in the WEPP rill erosion equation. *Soil Science Society of American Journal*, 60, 734-739.
- 18- King K.W., Flanagan D.C., Norton L.D., and Laflen J.M. 1995. Rill erodibility parameters influenced by long-term management practices. *American Society of Agricultural Engineers*, 38:159-164.
- 19- Knapen A., Poesen J., Govers G., Gyssels G., Nachtergaele J. 2007. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. *Earth-Science Reviews*, 80, 75-109.
- 20- Lal R. 2001. Soil degradation by erosion. *Land degradation & development*, 12, 519-539.
- 21- Lyle W., Smerdon E. 1965. Relation of compaction and other soil properties to erosion resistance of soils. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 8, 419-422.
- 22- Merritt W.S., Letcher R.A., Jakeman A.J. 2003. A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling & Software*, 18, 761-799.
- 23- Morgan R.P.C., Martin L., Noble C. 1987. Soil erosion in the United Kingdom: a case study from mid-Bedfordshire. Silsoe College, Cranfield Institute of Technology. 0-63
- 24- Nearing M., Bradford J., Parker S. 1991. Soil detachment by shallow flow at low slopes. *Soil Science Society of America Journal*, 55, 339-344.
- 25- 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
- 26- Owoputi L., Stolte W. 1995. Soil detachment in the physically based soil erosion process: a review. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 38, 1099-1110.
- 27- Pimentel D. 2006. Soil erosion a food and environmental threat. *Environment, development and sustainability*, 8, 119-137.
- 28- Poesen J., Nachtergaele J., Verstraeten G., Valentin C. 2003. Gully erosion and environmental change importance and research needs. *Catena*, 50, 91-133.
- 29- Prosser I.P., Dietrich W.E. 1995. Field experiments on erosion by overland flow and their implication for a digital terrain model of channel initiation. *Water Resources Research*, 31, 2867-2876.
- 30- Rejman J., Brodowski R. 2005. Rill characteristics and sediment transport as a function of slope length during a storm event on loess soil. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30, 231-239.
- 31- Rose C., Williams J., Sander G., Barry D. 1983. A mathematical model of soil erosion and deposition processes: I. Theory for a plane land element. *Soil Science Society of America Journal*, 47, 991-995.

- 32- Seeger M., Errea M.P., Begueria S., Arnaez J., Martí C., Garcia-Ruiz J. 2004. Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish Pyrenees. *Journal of Hydrology*, 288, 299-311.
- 33- Sidorchuk A. 2005. Stochastic modelling of erosion and deposition in cohesive soils. *Hydrological processes*, 19, 1399-1417.
- 34- Sun L., Fang H., Qi D., Li J., Cai Q. 2013. A review on rill erosion process and its influencing factors. *Chinese Geographical Science*, 23, 389-402.
- 35- Takken I., Govers G. 2000. Hydraulics of interrill overland flow on rough, bare soil surfaces. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25, 1387-1402.
- 36- Wirtz S., Seeger M., Ries J. 2010. The rill experiment as a method to approach a quantification of rill erosion process activity. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 54, 47-64.
- 37- Wirtz S., Seeger, M., Remke A., Wengel R., Wagner J.F., Ries J.B. 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., Seeger, M., Ries, J.B., 2012. Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes. *Catena*, 91, 21-34.
- 39- Wong J.S., Freer J.E., Bates P.D., Sear D.A., Stephens E.M. 2014. Sensitivity of a hydraulic model to channel erosion uncertainty during extreme flooding. *Hydrological Processes*, 29, 261-279.
- 40- Zhang G.h., Liu B.y., Liu, G.b., He X.w., Nearing M. 2003. Detachment of undisturbed soil by shallow flow. *Soil Science Society of America Journal*, 67, 713-719.



Evaluation of Spatial-Temporal Variation of Soil Detachment Rate Potential in Rill Erosion, Case study: Doshmanziari Rainfed Lands, Fars province

H. Karimi¹ - A. Lakzian^{2*} - Gh. Haghnia² - H. Emami⁴ - M. Soufi⁵

Received: 19-04-2014

Accepted: 29-04-2015

Introduction: Soil erosion by water is one of the most widespread forms of land degradation and it has caused many undesirable consequences in last decades. On steep slopes, rill erosion is the most important type of erosion, which produces sediment and rill flow. It can be also considered as a vehicle for transporting soil particles detached from upland areas. Recent studies indicate that soil detachment rates are significantly influenced by land use. It is also known that there is a major difference between detachment rates of disturbed and natural soils (Zhang et al., 2003). Plowing rills especially in steep slopes increases sediment production. Sun et al. (2013) reported that the contribution of rill erosion in hill slope lands in china was more than 70%, which was approximately 50% of total soil erosion. In addition, measured soil loss is statistically related to hydraulic indicators such as slope, water depth, flow velocity, flow shear stress and stream power (Knapen et al., 2007). This study aims to evaluate the effects of hydraulic variables (shear stress and stream power) on spatial-temporal soil detachment rate. The focus is on the plowing rills in hillslope areas under wheat dry farming cultivation.

Materials and Methods: The study area is located in hilly slopes with the slope of 22.56% under dry farming wheat cultivation at 60 km of west of Shiraz, Iran. Top-down conventional plowing was carried out in order to create 10 meters furrows. Slope and cross sections of rills were measured throughout the experiment at 1 m intervals by rill-meter. Water was added to the top of the rills for 10 minutes and inflow rates were 10, 15 and 20 L min⁻¹. Hydraulic parameters such as shear stress and stream power were calculated measuring rill morphology and water depth. Flow velocity and hydraulic radius along the different rill experiments were also calculated. Sediment concentrations were measured in three equal regular time and distance intervals (measurement points (MPs)), they were considered to calculate sediment detachment rate in different times and sections of each rill experiment for spatial and temporal soil detachment rate evaluation. One-way analysis of variance (ANOVA) was employed to test the significance of differences of sediment detachment rate among different treatments.

Results and Discussion: The results showed that the maximum values of shear stress and stream power were 14.07 Pa and 10.29 Wm⁻² and the minimum values were 7.41 and 2.77 respectively. This research also indicated that changes in longitudinal profile of these hydraulic parameters along the rills affected the soil detachment rate values. Obtained average, minimum and maximum of the soil detachment rate were determined as 0.09, 0.02 and 0.22 kgm⁻²s⁻¹, respectively. Due to Detachment-Transport Coupling mechanism, there was a significant difference between the initial and following MPs (P<0.05) of soil detachment rate along the rills. This means that in the following MPs, the sediment load from rill upside could affect the capacity of flow to detach sediment from the rill bed. Accordingly, after sediment loading till sediment transport capacity, runoff energy is capable to transport the sediment. Soil particles detachment consequently is reduced or stopped. Temporal investigation identified that there was enough time for undercutting and falling rill bank, which provides available sediment in final stage of experiment for transportation. As a result, the contribution of soil detachment rate was higher than initial stages of the experiment. This study also showed that there is no significant difference among soil detachment rates in applied inflow rates. This result can be attributed to the important role of rill bed geometry when the flow depth is low. In other words, the initial inflow rate (10 L min⁻¹) is strong enough to detach soil particles and move them to the downstream. Under these conditions it could be inferred that high local turbulence plays the main role for soil detachment, which inversely is proportional to increasing flow sediment load.

Conclusion: This research showed that there was a significant difference between the initial MP and following MPs of soil particle detachment rate along the experimental rills. In addition, the soil detachment rate

1, 2, 3,4- Ph.D Student, Professor and Associate Professors, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, Respectively

(* - Corresponding Author Email: lakzian@um.ac.ir)

5- Associate Professor, Department of Soil Conservation and Watershed Management, Research Center of Agriculture and Natural Resources, Fars Province, Iran

contribution in final time slot was more than the initial time stage in different treatments. There was no significant difference among soil detachment rates under varied inflow rates.

Keywords: Rill Erosion, Flow Hydraulic, Shear Stress and Stream Power