



تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۲ | شماره ۱۲ | اسفند ۱۴۰۰ (ص ۳۰۸۲-۳۰۷۳)

<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2021.304810.669005>

(مقاله علمی - پژوهشی)

The Selectivity of Soil Particles in Relation to Flow Characteristics in Rill Erosion

ALI REZA VAEZI^{1*}, LEILA VARGHAEI²

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.
(Received: June. 26, 2021- Revised: Sep. 14, 2021- Accepted: Dec. 25, 2021)

ABSTRACT

Rill erosion is an important form of water erosion on cultivated slopes. Rills are flow paths that are created by concentrated flow on hillslope and causes higher rates of soil loss. The amount and type of particles transferred through the rills or the selectivity of the particles may be affected by various factors, especially the flow rate. This study was conducted to investigate the rill erosion and the particle selectivity under the flow characteristics. Field experiment was done in a rainfed land with a slope gradient of 10% in the rills/furrows with 6 m in long under different flow intensities (2, 2.5, 3, 3.5 and 4) using a randomized complete block with three replications. Field measurements were performed using a flow rate of 3 lit min⁻¹ at intervals of 5-min for 60 min. Rill erosion and the particle selectivity were determined along with flow characteristics for various flow intensities. Significant correlations were found between flow intensity and flow characteristics (velocity, shear stress and power), rill erosion and the selectivity of particles. With an increase in flow rate, flow characteristics increased in the rills and enhanced rill erosion as well as the selectivity of sand and clay, whereas the selectivity of silt decreased in the rills. Silt showed the highest sensitivity to selection by concentrated flow, so that flows with lower shear stress could erode it from the rills. Wholly, this study revealed that the flow rate is the most flow characteristics influencing rill erosion and the selectivity of soil particles.

Keywords: Particle Size Distribution, Shear Stress, Concentrated Flow, Flow Rate, Flow Power.

انتخاب پذیری ذرات خاک تحت تأثیر خصوصیات جریان در فرسایش شیاری

علی‌رضا واعظی^{۱*}، لیلا ورقائی^۱

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۴/۵ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۶/۲۳ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۰/۴)

چکیده

فرسایش شیاری از اشکال مهم فرسایش آبی در دامنه‌های تحت کشت می‌باشد. شیارها مسیرهای جریان هستند که در اثر تمرکز جریان روی دامنه به وجود آمده و هدررفت خاک در آنها زیاد است. مقدار و نوع ذرات منتقله از شیارها یا انتخاب-پذیری ذرات تحت تأثیر عوامل گوناگون به‌ویژه شدت جریان می‌تواند قرار بگیرد. این پژوهش به منظور بررسی فرسایش شیاری و انتخاب‌پذیری ذرات تحت تأثیر خصوصیات جریان انجام گرفت. آزمایش‌های صحرایی در کشت‌زاری دیم با شیب ۱۰ درصد در شیارهای با طول شش متر تحت شدت‌های مختلف جریان (۲، ۳، ۴ و ۵ لیتر بر دقیقه) در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. اندازه‌گیری‌ها با استفاده از جریانی با شدت ۳ لیتر بر دقیقه در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه به مدت ۶۰ دقیقه انجام گرفت و دانه‌بندی ذرات در کنار خصوصیات جریان در هر یک از شدت‌های جریان تعیین شد. بر اساس نتایج، همبستگی معنی‌داری بین شدت جریان و سایر خصوصیات جریان (سرعت جریان، قدرت جریان و تنش برشی)، فرسایش شیاری و انتخاب‌پذیری ذرات وجود داشت. با افزایش شدت جریان، سایر خصوصیات جریان (سرعت جریان، قدرت جریان و تنش برشی) بیشتر شد و افزایش مقدار فرسایش شیاری را به دنبال داشت. همچنین انتخاب‌پذیری ذرات رس و شن بیشتر شد، درحالی‌که انتخاب‌پذیری ذرات سیلت کاهش یافت. سیلت حساس‌ترین ذره به انتقال به‌وسیله جریان متمرکز بود؛ به‌طوری‌که جریان‌های با تنش برشی ضعیف نیز امکان انتقال آنها را داشتند. این پژوهش نشان داد که شدت جریان، مؤلفه مهم جریان در افزایش مقدار فرسایش شیاری و انتخاب‌پذیری ذرات خاک است.

واژه‌های کلیدی: توزیع اندازه ذرات، تنش برشی، جریان متمرکز، شدت جریان، قدرت جریان.

مقدمه

عوامل بسیاری از جمله شدت و مدت بارش، رواناب، خاک، پستی‌وبلندی زمین، پوشش گیاهی و سیستم‌های خاک‌ورزی، اثرات بسیار زیادی بر روی توسعه شیار و عملکرد رسوب دارند. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که گسترش فرسایش شیاری به‌شدت بارندگی، سرعت جریان آب، خصوصیات هیدرولیکی جریان، درجه، طول شیب (Li et al., 2006) و خصوصیات خاک (Romero et al., 2007) وابسته است. تأثیر خصوصیات خاک بر فرسایش شیاری را می‌توان در مفهوم فرسایش‌پذیری شیاری بیان کرد. سهولت جداشدن ذرات خاک در اثر جریان متمرکز آب روی دامنه و ایجاد کانال در مسیر شیار را فرسایش‌پذیری گویند (Vaezi, 2019). فرسایش‌پذیری شیاری در مدل‌های مختلف از جمله پروژه پیش‌بینی فرسایش آبی (WEPP) تابعی از تنش برشی جریان و ظرفیت جدا شدن رسوب بیان شده است (Foster et al., 1995). فرسایش‌پذیری خاک تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و اثرات متقابل بین آنها است (Refahi, 2016). ویژگی‌هایی مانند بافت، ساختمان، مواد آلی و نفوذپذیری در فرسایش‌پذیری خاک مؤثر هستند (Morgan, 1995). اندازه ذرات اولیه و

فرسایش شیاری از اشکال مهم فرسایش آبی در دامنه‌های تحت کشت می‌باشد زیرا علاوه بر داشتن ویژگی‌های فرسایش، ظرفیت انتقال ذرات از محیط خیس شده شیار و نیز انتقال مواد فراهم شده توسط فرسایش بین‌شیاری و پاشمانی را دارد (He et al., 2014). فرسایش شیاری به‌صورت برداشت ذرات خاک و انتقال آن توسط جریان متمرکز تعریف می‌شود (Kimaro et al., 2008). شیارها مسیرهای جریان متمرکز کوچکی هستند که در آنها عمق آب و سرعت جریان به مقادیر بیشتری نسبت به جریان زمینی می‌رسند (Govers et al., 2007). در نتیجه، انرژی جریان بیشتری برای جداکردن، حفر کردن و انتقال مواد خاک در دسترس است که منجر به افزایش آشکار میزان فرسایش خاک می‌شود (Wirtz et al., 2010). فرسایش شیاری به دلیل مقادیر زیادی از ذرات خاک فرسایش یافته و منتقل شده و ایجاد ویژگی‌های مورفولوژیکی کم‌وبیش پایدار که می‌تواند به دره تبدیل شود و مانع استفاده بیشتر از زمین شود، یکی از مهم‌ترین فرایندهای تأثیرگذار بر خاک محسوب می‌شود (Borrelli et al., 2017).

افزایش سرعت جریان و قدرت جریان افزایش یافت و بیشترین غیر همگنی ذرات رسوب در خاک سیلتی مشاهده شد. (2020) Hauo et al. به بررسی فرآیندهای فرسایش آب و تغییرات دینامیکی توزیع اندازه رسوب تحت تأثیرات بارندگی و جریان زمینی پرداختند. شدت جریان و شدت بارندگی با تأثیر بر فرآیندهای فرسایش نقش عمده‌ای در انتخاب ذرات دارند. نتایج بررسی‌های (2021) Asadi et al نشان می‌دهد که عامل اصلی تلفات خاک و تولید رسوب در دامنه‌ها، تشکیل و توسعه فرسایش شیاری است. (2019) Hao et al. به بررسی فرآیندهای فرسایش آب و توزیع اندازه رسوب تحت تأثیر بارندگی و رواناب در چین پرداختند. نتایج نشان داد که رسوبات > 0.05 میلی‌متر ترجیحاً توسط مکانیسم تعلیق - جهش منتقل شدند، درحالی‌که رسوبات $0.05-0.25$ میلی‌متر در مقابل انتقال مقاومت کردند. (2018) al Jiang et تند و باران‌های شدید، آزمایشاتی را در جعبه‌های به ابعاد (۱ متر در ۵ متر) تحت باران شبیه‌سازی شده با شدت‌های (۱، ۱/۳۳، ۱/۶۷، ۲ و ۲/۳۳ میلی‌متر بر ساعت) در شیب‌های (۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه) انجام دادند. نتایج نشان داد که در طول آزمایش اندازه ذرات رسوب به تدریج افزایش یافتند، سپس به حالت پایداری رسیدند و اغلب حالت نوسانات کوتاه‌مدت را با ادامه بارندگی نشان دادند.

مناطق نیمه‌خشک مناطقی هستند که میزان نزولات آسمانی در آن‌ها ۳۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر در سال بوده و به شکل رگبار با شدت زیاد و اغلب در فصل زمستان و یا بهار می‌باشد (Ahmadi, 1387). در این مناطق حدود ۳۳ درصد از بارندگی سالانه از طریق جریان‌های سطحی هدر می‌رود. خاک‌های مناطق نیمه‌خشک دارای ساختمان ضعیف بوده و به فرآیندهای فرسایش شیاری بسیار حساس هستند (Vaezi et al., 2017). اطلاعات اندکی در مورد ماهیت ذرات منتقله در فرسایش شیاری وجود دارد. آگاهی از توزیع اندازه ذرات انتقال‌یافته از سطح اراضی می‌تواند از جنبه‌های گوناگون از جمله تأثیر بر باروری خاک (اثرات درون عرصه‌ای فرسایش)، آلودگی منابع و ترسیب بر سطح اراضی (اثرات برون عرصه‌ای فرسایش) اهمیت دارد. از این رو این پژوهش با هدف بررسی انتخاب‌پذیری ذرات در شدت جریان‌های مختلف در زمین دیم انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

دامنه مورد بررسی

این پژوهش در کشتزار دیم تحت آیش در زنجان انجام گرفت. منطقه مورد بررسی واقع در مختصات عرض جغرافیایی " ۴۵ "

خاکدانه‌ها در یک خاک به نوبه خود تعیین‌کننده شدت فرآیند برداشت و انتقال است. فرآیندهای فرسایش شیاری همانند جداسازی، انتقال و رسوب‌گذاری عمدتاً به ویژگی‌های هیدرولیکی جریان آب در شیاریها وابسته است. با این وجود فرآیند ذاتی فرسایش شیاری هنوز هم به دلیل پیچیدگی آن، مخصوصاً، تحت فرآیندهای فیزیکی مختلف نامشخص است (Wirtz et al., 2010). قابلیت جدا شدن ذرات خاک در اثر نیروی عامل فرساینده مانند رواناب را می‌توان در مفهوم انتخاب‌پذیری ذره بیان کرد. توزیع اندازه ذرات رسوب بستگی به خصوصیات هیدرولیکی جریان، خصوصیات خاک، تراکم پوشش گیاهی و درجه شیب دارد. در خاک‌های با بافت درشت، جدایی‌پذیری ذرات با افزایش اندازه ذره کاهش می‌یابد که دلیل آن افزایش فیزیکی وزن ذره است، برای ذرات کوچک‌تر از 0.05 میلی‌متر، جدایی‌پذیری با کاهش اندازه ذرات کاهش می‌یابد که دلیل آن هم به افزایش چسبندگی ذرات مربوط می‌شود (Farmer, 1973). قابلیت جدا شدن ذرات در خاک‌های با رس و شن زیاد کمتر از خاک‌های با سیلت زیاد است (Gumiere et al., 2009). برخی گزارش‌ها نشان می‌دهد ذرات سیلت به آسانی از یکدیگر جدا می‌شوند و معمولاً سهم غالب در رسوب دارند (Wang & Shi, 2016). در خاک‌های سیلتی نیروی چسبندگی ضعیفی بین ذرات وجود دارد و تمایل به تشکیل سله نیز بیشتر است. این مسئله منجر به افزایش تولید جریان سطحی و در نتیجه برداشت آسان و زیاد ذرات خاک می‌شود (Gumiere et al., 2009). شیب عامل دیگر مؤثر بر انتخاب‌پذیری ذرات خاک در فرسایش و در نتیجه توزیع اندازه ذرات رسوب است. در شیب‌های تند، ذرات درشت به دلیل نیروی گرانش و نیروهای اینرسی در جهت شیب منتقل می‌شوند و به دلیل افزایش توان نیروهای فرساینده، انتقال ذرات به صورت غلتیدن افزایش می‌یابد (Shi et al., 2012)؛ بنابراین اهمیت فرآیند انتقال غلتیدن در انتخاب‌پذیری رسوب طی فرآیند فرسایش در شیب‌های بالا مهم‌تر از شیب‌های ملایم است (Vaezi and Sadegheain., 2018). نوع عامل فرساینده نیز در انتقال ذرات و انتخاب‌پذیری ذرات خاک مؤثر است. بارندگی و رواناب دو عامل اصلی فرساینده خاک، می‌توانند در تولید رسوب مؤثر باشند. بارندگی بیشترین اثر خود را روی جدایش ذرات می‌گذارد و زمینه را برای شسته شدن ذرات فراهم می‌کند (Vaezi and Sadegheain., 2018).

در برخی پژوهش‌ها به چگونگی انتقال ذرات و نوع ذرات منتقله در فرسایش آبی اشاره شده است. به‌عنوان مثال بررسی‌های Vaezi and Sadeghian. (2020) نشان داد که با افزایش شیب در همه کلاس‌های بافت خاک، ناهمگنی ذرات رسوب به دلیل

$$\omega = \tau V$$

که در آن: V متوسط سرعت جریان (متر بر ثانیه)، τ تنش برشی (پاسکال) و ω قدرت جریان (وات در مترمربع) است. برای محاسبه تنش برشی از رابطه زیر استفاده شد (Nearing et al., 1997):

$$\tau = \rho g R S$$

که در آن: ρ چگالی آب (کیلوگرم بر مترمکعب)، g شتاب گرانشی (متر بر مجذور ثانیه)، h عمق جریان (متر)، s درجه شیب و τ تنش برشی (پاسکال) است.

تعیین انتخاب پذیری ذرات

برای انجام آزمایش شدت جریان موردنظر را انتخاب کرده به مدت ۶۰ دقیقه در فواصل زمانی ۵ دقیقه نمونه‌های رسوب و رواناب جمع‌آوری شد. در طول آزمایش، عمق جریان، محیط قسمت خیس شده و سرعت جریان ثبت گردید. پس از پایان آزمایش جرم کل مخلوط رواناب و رسوب داخل سطل‌ها تعیین شد. جرم رسوب هر سطل نیز پس از خشک‌شدن در آون (دمای ۱۰۵ درجه، ۲۴ ساعت) تعیین شد. نمونه‌های رسوب خشک در آون از سری الک‌های ۲، ۱/۱۸، ۰/۶، ۰/۲۵، ۰/۰۵ میلی‌متر گذرانده شد و جرم ذرات مانده روی هر الک تعیین شد. ذراتی که بر روی الک‌های مذکور مانده بودند، اجزای شن را در رسوب نشان می‌دادند. برای تعیین دانه‌بندی سیلت و رس در ذرات عبور یافته از الک ۰/۰۵ میلی‌متر، از روش هیدرومتری استفاده شد (Bouyoucos, 1962). بدین صورت درصد ذرات سیلت و رس در نمونه ۴۰ گرمی رسوب با قرائت هیدرومتر در زمان‌های ۴۰ ثانیه و ۲۸۸۰۰ ثانیه تعیین گردید.



شکل ۲- سری الک‌ها (۲، ۱/۱۸، ۰/۶، ۰/۲۵، ۰/۰۵) برای جداسازی ذرات شن (الف) و آزمایش هیدرومتر برای تعیین دانه‌بندی ذرات ریز (ب)

تحلیل داده‌ها

داده‌های حاصل از اندازه‌گیری، قبل از تجزیه و تحلیل از نظر چگونگی توزیع آماری (توزیع نرمال داده‌ها) با روش چولگی و

۳۵ ۲۵° و ۲۴' ۱۵" شمالی و طول جغرافیایی "۱۲' ۱۴' ۴۷° و ۳۷' ۵۲" شرقی قرار داشت. آزمایش در زمینی با شیب ۱۰ درصد و رو به جنوب صورت گرفت. عملیات خاک‌ورزی با استفاده از خطی‌کار ۹ ردیفی در جهت شیب زمین صورت گرفت. فاصله ردیف کشت در دستگاه خطی‌کار ۲۰ سانتی‌متر و عمق شیارها پنج سانتی‌متر و فاصله آن‌ها از یکدیگر ۲۰ سانتی‌متر بود و شکل سطح مقطع نوار کشت سهمی بود (شکل ۱).



(ب)



(الف)

شکل ۱- زمین مطالعاتی تحت خاک‌ورزی و شیار به موازات شیب (الف) و اندازه‌گیری هدررفت خاک و توزیع رسوب در شیارها (ب)

انتخاب شدت‌های جریان

آزمایش در شیارهای با طول شش متر تحت تأثیر پنج شدت جریان (۲، ۳، ۳/۵، ۴ و ۴ لیتر بر دقیقه) در سه تکرار در دامنه-ای با شیب یکنواخت ۱۰ درصد انجام شد. برای رسیدن رطوبت به ظرفیت مزرعه، خاک‌ها به آرامی و بدون تخریب شیارها، اشباع شد و پس از گذشت ۲۴ ساعت از زمان اشباع، آزمایش شروع شد. برای انجام آزمایش، شدت جریان موردنظر را انتخاب کرده به مدت ۶۰ دقیقه در فواصل زمانی پنج دقیقه نمونه‌های رسوب و رواناب جمع‌آوری خواهد شد. در طول آزمایش، عمق جریان، محیط قسمت خیس شده و سرعت جریان ثبت گردید. پس از پایان آزمایش جرم کل مخلوط رواناب و رسوب داخل سطل‌ها تعیین شد. جرم رسوب هر سطل نیز پس از خشک‌شدن در آون (دمای ۱۰۵ درجه، ۲۴ ساعت) تعیین شد.

تعیین خصوصیات جریان

تعیین سرعت جریان، برای شدت‌های مختلف و طول شیارهای مختلف از ماده رنگی گواش و با غلظتی متوسط استفاده شد. به این صورت که از ابتدای شیار ماده رنگی ریخته شد و زمان آن تا انتهای شیار بر حسب (متر بر ثانیه) ثبت گردید. قدرت جریان در شیارها از رابطه زیر به دست آمد (Lu et al., 2016):

زیاد (۱۹ درصد)، بافت خاک کشتزار لوم شنی سنگریزه دار بود. چگالی ظاهری خاک به دلیل فراوانی ذرات درشت ۱/۵۲ گرم بر سانتی متر مکعب بود. باتوجه به مقدار آهک نسبتاً زیاد (۱۵/۶۱ درصد)، خاک کشتزار در گروه خاکهای آهکی (یا بیشتر ۱۰ درصد کربنات کلسیم معادل) قرار دارد. میانگین هدایت الکتریکی ۲/۵۷ دسی زمینس بر متر است و خاک از نظر شوری در گروه خاکهای غیر شور ($EC < 4 \text{ ds.m}^{-1}$) قرار دارد (Chartier et al., 2013). خاک کشتزار به لحاظ مقدار اندک ماده آلی (کمتر از ۱/۵ درصد) و نیز ذرات پیونددهنده مانند رس، دارای خاکدانه های کوچک تر و به نوبه خود دارای میانگین وزنی قطر خاکدانه های پایدار پایین تری (۱/۱ میلی متر) است (Vaezi, 2019) که احتمال فروپاشی خاکدانه ها تحت تأثیر نیروی آب را افزایش می دهد.

کشیدگی مورد بررسی قرار گرفتند. برای مقایسات میانگین شدت جریان از نظر خصوصیات جریان و انتخاب پذیری ذرات از روش تجزیه واریانس با آزمون دانکن استفاده شد. تأثیر شدت جریان بر خصوصیات جریان، انتخاب پذیری ذرات به روش ماتریس همبستگی تعیین شد. به منظور تجزیه و تحلیل داده ها از نرم افزار SPSS نسخه ۲۵ و جهت رسم نمودار از نرم افزار Excel نسخه ۲۰۱۶ استفاده شد.

نتایج و بحث

ویژگی های خاک

برخی از ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک کشتزار در جدول (۱) ارائه شده است. باتوجه به میانگین درصد شن (۶۰/۱۶ درصد)، (۲۰/۵۹ درصد) و رس (۱۹/۲۵ درصد) و وجود سنگریزه نسبتاً

جدول ۱- ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک کشتزار

ویژگی خاک	میانگین	انحراف معیار	ویژگی خاک	میانگین	انحراف معیار
شن (%)	۶۰/۲	۳/۶۴	چگالی ظاهری (g/cm^3)	۱/۵۲	۰/۱۲
سیلت (%)	۲۰/۶	۳/۹۹	آهک (%)	۱۵/۶۱	۳/۴۳
رس (%)	۱۹/۲	۵/۰۷	ماده آلی (%)	۱/۴۳	۰/۲۵
سنگریزه (%)	۱۸/۸۷	۵/۰۷	هدایت الکتریکی (dS/m)	۲/۵۷	۰/۴۳
میانگین وزنی قطر خاکدانه های پایدار (mm)	۱/۱	۰/۳۶	واکنش	۷/۳۲	۰/۰۸

تغییرات خصوصیات جریان

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تفاوت های معنی دار بین شدت های مختلف جریان از نظر خصوصیات جریان مانند سرعت، تنش برشی و قدرت ($p < 0/001$) وجود دارد. همچنین تفاوت های معنی دار بین شدت های مختلف جریان از نظر فرسایش شیار (جدول ۲) ($p < 0/001$) و انتخاب پذیری ذرات ($p < 0/001$) در وجود دارد (جدول ۲). با افزایش شدت جریان سرعت جریان افزایش یافته و موجب افزایش تنش برشی جریان می شود (Vaezi and Vatani, 2015) شدت برداشت خاک و انتقال خاک تحت تأثیر سرعت و شدت جریان است. در شدت های بالاتر، عمق جریان افزایش می یابد (Wang et al., 2016). سرعت جریان و قدرت جریان ارتباط نزدیکی با جداسدن ذرات خاک در جریان کم عمق داشته و با افزایش سرعت جریان، مقدار جداسدن ذرات خاک نیز افزایش می یابد. با افزایش شدت جریان، سرعت جریان افزایش می یابد. سرعت جریان آب در شیار مهم ترین ویژگی هیدرولیکی جریان از نظر تأثیر فرسایش شیار در کشتزار دیم است (Vaezi and Heidari., 2017). تنش برشی نتیجه شیب، عمق جریان و سایر عوامل است (Zhu et al., 2019). گزارش ها نشان می دهد بار رسوب با افزایش تنش برشی جریان افزایش یافته، منجر به افزایش

قدرت جریان می شود (Vaezi and Sadegian., 2019). انتخاب-پذیری ذرات سیلت تأثیر شدت جریان قرار گرفت (جدول ۲). در پژوهشی Rongsheng (1993) بیان کردند که شن ریز قابلیت جداسدگی بالاتری را نسبت به شن درشت دارد و ذرات رس به دلیل چسبندگی بالا، قابلیت جداسدگی کمتری دارند. از سوی دیگر با افزایش شدت باران، تخریب خاکدانه ها افزایش یافته و ذرات حساس بیشتری در معرض انتقال قرار می گیرند.

تغییرات خصوصیات جریان و فرسایش شیار

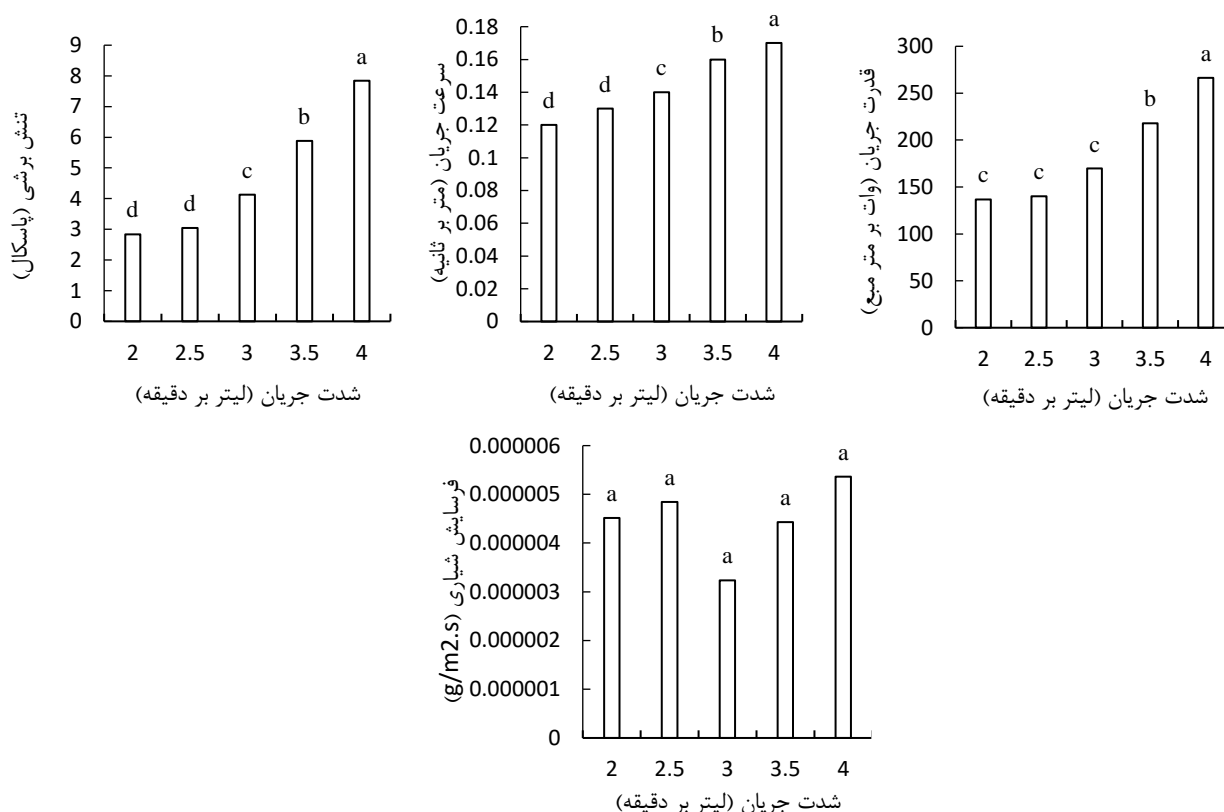
مقایسات میانگین خصوصیات جریان در شدت های مختلف جریان در شکل ۳ نشان داده شده است. با افزایش شدت جریان، سرعت و قدرت جریان افزایش یافت. گزارش ها نشان می دهد که قدرت جریان مستقیماً وابسته به سرعت جریان است و با افزایش عمق جریان، سرعت و در نتیجه قدرت جریان افزایش می یابد (Vaezi et al., 2020) و با کاهش سرعت جریان، انرژی جنبشی و قدرت جریان کاهش می یابد (Zangh et al., 2010). بار رسوب با کاهش قدرت جریان افزایش می یابد؛ بنابراین فرسایش شیار با کاهش سرعت جریان کاهش می یابد (Vaezi and Heidari., 2017). افزایش شدت جریان سبب افزایش قابل توجه تنش برش شد. بررسی ها نشان می دهد که افزایش عمق جریان باعث افزایش

دلیل کاهش شدید نفوذپذیری خاک در شدت‌های بالای باران بود (Vaezi and Vatani, 2006). در پژوهشی (2015) نیز نشان دادند که میزان هدررفت خاک در شیارها در اوایل بارندگی کم بوده و با گذشت زمان به دلیل انتقال ذرات فرسایش‌پذیر، هدررفت خاک در شیارها بیشتر شده و غلظت رواناب افزایش پیدا می‌کند.

تنش برشی می‌شود و این عامل مقدار فرسایش را افزایش می‌دهد و باعث افزایش قابل توجه بار رسوب می‌شود (Peng et al., 2015). با افزایش شدت جریان فرسایش شیباری افزایش یافت. با افزایش شدت جریان، مقدار نیروی برشی جریان که مهم‌ترین عامل در کندن ذرات خاک است افزایش می‌یابد. همچنین در جریان‌های شدید، ظرفیت جریان در انتقال ذرات خاک بیشتر می‌شود به

جدول ۲- تجزیه واریانس خصوصیات جریان و انتخاب‌پذیری ذرات در شدت‌های مختلف جریان

درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F	معنی‌داری (p)
تنش برشی	۵۳/۳۲۷	۱۳/۳۳۲	۵۲/۰۵۶	۰/۰۰۰
سرعت جریان	۰/۰۰۶	۰/۰۰۱	۱۰۲/۸۲۰	۰/۰۰۰
قدرت جریان	۳۶۷۴۷/۷۲۱	۹۱۸۶/۹۳۰	۲۲/۷۲۴	۰/۰۰۰
فرسایش شیباری	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۸۵۹	۰/۰۰۰
انتخاب‌پذیری شن	۰/۰۷۱	۰/۰۱۸	۱۰/۵۹۷	۰/۰۰۱
انتخاب‌پذیری سیلت	۱/۸۴۷	۰/۴۶۲	۳۱/۵۸۲	۰/۰۰۰
انتخاب‌پذیری رس	۰/۱۱۵	۰/۰۲۹	۱۳۸/۰۴۲	۰/۰۰۰



شکل ۳- مقایسات میانگین خصوصیات جریان و فرسایش شیباری در شدت‌های مختلف جریان

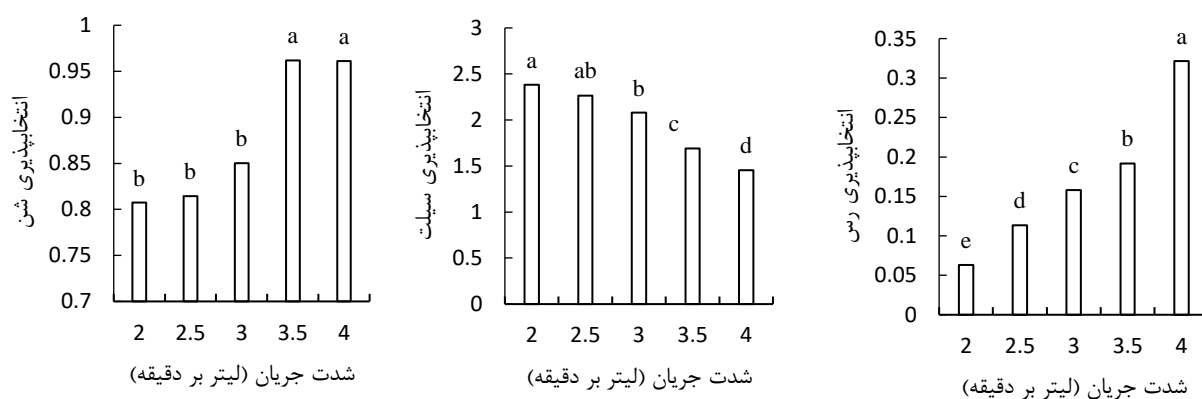
انتقال ذرات خاک به وسیله جریان سطحی وجود دارد آنها دلیل انتقال انتخابی ذرات با اندازه‌ها مختلف را مقاومت متفاوت ذرات با اندازه‌های مختلف در مقابل انتقال (انتقال‌پذیری متفاوت ذرات) یا وجود فرایندهای مختلف انتقال برای ذرات با اندازه‌های مختلف اعلام کردند. به‌طور کلی رابطه‌ای قوی و محکم بین ارتباط رسوب با چرخش و قدرت جریان وجود دارد (Shi et al., 2012) و بافت

انتخاب‌پذیری ذرات

انتخاب‌پذیری ذرات در شدت‌جریان‌های مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. بر اساس نتایج، انتخاب‌پذیری ذرات شن و رس با افزایش شدت جریان افزایش یافت و در مقابل انتخاب‌پذیری ذرات سیلت با افزایش شدت جریان کاهش یافت. مطالعه (Asadi et al., 2007) نشان داد یک الگوی انتخابی در

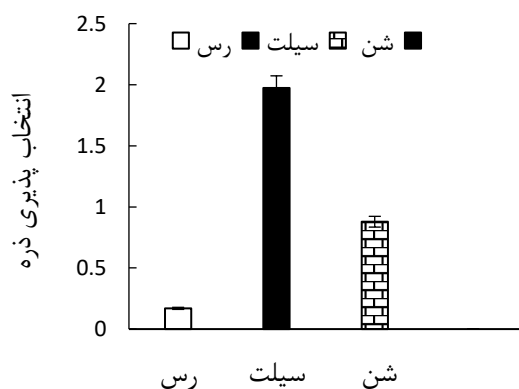
(Farmer, 1973). با افزایش شدت جریان انتقال ذرات سیلت بیشتر بود. نتایج نشان داد که خاک‌هایی که دارای سیلت بالایی هستند دارای بالاترین فرسایش پذیری شیلی و خاک‌هایی که دارای شن بالایی هستند دارای کمترین فرسایش پذیری بودند (Hao et al., 2019). ذرات سیلت به آسانی از یکدیگر جدا می‌شوند و معمولاً سهم غالب در رسوب دارند (Rienzi et al., 2013). در پژوهش (Wang et al, 2016) نشان دادند سرعت جریان و قدرت جریان ارتباط نزدیکی با جدا شدن ذرات خاک در جریان کم عمق داشته و با افزایش سرعت جریان، مقدار جدا شدن ذرات خاک نیز افزایش می‌یابد.

خاک عامل اصلی توزیع اندازه ذرات رسوب است (Young et al 2012). همچنین رس و ماده آلی همبستگی بالایی با فرسایش پذیری شیلی دارند (Remero et al., 2007). خاک‌هایی با بافت ریز دارای چسبندگی زیاد بوده و جدا شدن آنها در اثر عوامل فرساینده سخت بوده با این حال ذرات جدا شده به راحتی منتقل می‌گردد. در مقابل در خاک‌های درشت بافت، اگرچه ذرات سریع تر و راحت تر جدا می‌شوند، اما ذرات به سختی منتقل می‌شوند. این خاک‌ها به دلیل نفوذ پذیری بالا، رواناب کمتری نسبت به خاک‌های ریز بافت ایجاد می‌کنند (Meyer et al., 1984). در خاک‌های با بافت درشت، جدایی پذیری ذرات با افزایش اندازه ذره کاهش می‌یابد که دلیل آن افزایش فیزیکی وزن ذره برای ذرات کوچک تر از ۰/۰۵ میلی‌متر، جدایی پذیری با کاهش اندازه ذرات کاهش می‌یابد که دلیل آن به افزایش هم چسبندگی ذرات مربوط می‌شود



شکل ۴- مقایسات میانگین انتخاب پذیری ذرات در شدت‌های مختلف جریان

نفوذ پذیری خاک منجر به تولید ذرات حساس بیشتری می‌شود (Vaezi & Fromadi., 2017).



شکل ۵- انتخاب پذیری ذرات خاک در فرسایش شیلی

تأثیر خصوصیات جریان بر انتخاب پذیری ذرات

نتایج جدول ۲ نشان داد که دانه بندی ذرات شن سیلت و رس با

وضعیت کلی انتخاب پذیری ذرات در جریان‌های با شدت مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. این نتیجه نشان می‌دهد که صرف نظر از شدت جریان، انتخاب پذیری ذرات سیلت بیشتر از سایر ذرات معدنی خاک است. به طور کلی ذرات سیلت نسبت به ذرات شن و رس حساسیت بیشتری در انتقال داشتند. ذرات سیلت به دلیل عدم خاصیت چسبندگی، غالباً جدا از هم هستند و در خاک‌های با ساختمان ضعیف و ناپایدار در اثر جریان آب به صورت ذرات جدا از هم درمی‌آیند. این ذرات برخلاف ذرات شن سبک تر بوده و قابلیت جدا شدن و انتقال بیشتری توسط جریان آب دارند به طوری که حتی در جریان‌های ضعیف سهم انتقال آنها زیاد است. با افزایش شدت جریان به دلیل افزایش سرعت و تنش برشی جریان از یک سو و نیز افزایش ظرفیت انتقال جریان از سوی دیگر، قابلیت انتقال ذرات رس و شن تا حدی بیشتر می‌شود. یافته‌ها نیز نشان می‌دهد که افزایش شدت باران موجب تخریب بیشتر ساختمان خاک می‌گردد که در کنار کاهش بیشتر

نتایج Vaezi and Sadeghian (2019) نشان داد که با افزایش تنش برشی جریان، بار رسوب افزایش یافت. Zhang et al. (2010) دریافتند که بار رسوب با قدرت جریان افزایش می‌یابد. Rienzi et al. (2013) به این نتیجه رسیدند که ذرات سیلت به آسانی از یکدیگر جدا می‌شوند و معمولاً سهم غالب در رسوب دارند. طبق نتایج Gumiere (2009) قابلیت جدا شدن ذرات در خاک‌های با رس و شن زیاد کمتر از خاک‌های با سیلت زیاد است. نتایج نشان داد که وابستگی انتخاب‌پذیری ذرات شن به خصوصیات جریان کمتر از سایر ذرات خاک (سیلت و رس) است و این نشان می‌دهد که خصوصیات جریان عامل بارز در تعیین انتخاب‌پذیری ذرات شن همانند ذرات سیلت و رس نیست. به عبارت دیگر، ماهیت ذرات شن از نظر سنگینی باعث می‌شود انتخاب‌پذیری آنها وابستگی کمتری به افزایش خصوصیات جریان (سرعت، تنش و قدرت) داشته باشد.

شدت جریان، سرعت جریان، تنش برشی و قدرت جریان همبستگی معنی‌داری دارد. با افزایش شدت جریان، سرعت، تنش برشی و قدرت جریان افزایش یافت. به عبارت دیگر با افزایش شدت جریان، خصوصیت فرساینده‌گی جریان به‌ویژه تنش برشی آن افزایش قابل‌توجهی یافت، منجر به تغییرات قابلیت جدا شدن ذرات از شیار می‌شود. همچنین توان حمل جریان که تابع سرعت جریان است نیز افزایش یافته و منجر به افزایش حمل ذرات خاک می‌شود. گزارش‌ها نشان می‌دهد که سرعت جریان و قدرت جریان ارتباط نزدیکی با جدا شدن ذرات خاک در جریان کم‌عمق داشته و با افزایش سرعت جریان، مقدار جدا شدن ذرات خاک نیز افزایش می‌یابد. با افزایش عمق جریان سرعت جریان افزایش می‌یابد (Wang et al., 2016; Vaezi et al., 2019). افزایش تنش برشی جریان و شعاع هیدرولیکی موجب افزایش بار رسوب جریان می‌شود (Zhang et al., 2010; Wang et al., 2016) دریافتند که قدرت جریان به شدت تحت تأثیر شیب و سرعت جریان است.

جدول ۳- همبستگی بین شدت جریان، خصوصیات جریان و انتخاب‌پذیری ذرات

انتخاب‌پذیری رس	انتخاب‌پذیری سیلت	انتخاب‌پذیری شن	قدرت جریان	سرعت جریان	تنش برشی	شدت جریان
						۱
					۱	۰/۹۴**
			۱	۰/۹۱**	۰/۹۵**	۰/۹۸**
			۰/۸۳**	۰/۸۷**	۰/۸۵**	۰/۸۴**
	۱	- ۰/۹۵**	- ۰/۹۳**	- ۰/۹۶**	- ۰/۹۵**	- ۰/۹۴**
۱	- ۰/۹۱**	۰/۷۶**	۰/۹۳**	۰/۹۴**	۰/۹۵**	۰/۹۵**

*معنی‌داری در سطح ۹۹/۹۵ درصد و ** معنی‌داری در سطح ۹۹/۹۹ درصد

در جریان‌های ضعیف، سهم انتقال آنها زیاد است. با افزایش شدت جریان به دلیل افزایش سرعت و تنش برشی جریان از یک سو و نیز افزایش ظرفیت انتقال جریان از سوی دیگر، توان انتقال ذرات رس و شن تا حدی بیشتر می‌شود. وقوع جریان‌های ملایم در اغلب بارندگی‌ها در طی سال فراهم است و بدین ترتیب ذرات سیلت بیشترین سهم انتقال در فرسایش شیار را در اغلب بارندگی‌ها طی سال دارند. تنها هنگام وقوع بارندگی‌های شدید که احتمال وقوع جریان‌های با تنش برشی بالا فراهم است، سهم انتقال ذرات رس و شن تا اندازه‌ای افزایش پیدا می‌کند. به‌کارگیری روش‌های حفاظت خاک در خاک‌های با ساختمان ضعیف و با درصد سیلت بالا برای کاهش فرساینده‌گی جریان (سرعت، تنش و قدرت) و هدررفت بیشتر خاک از شیارها ضروری است.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در شدت جریان‌های بالا به دلیل کاهش فرصت نفوذ آب، سرعت جریان، تنش برشی و قدرت جریان افزایش می‌یابد و منجر به افزایش هدررفت خاک از شیارها می‌شود. همبستگی معنی‌دار بین مقدار فرسایش شیار و انتخاب‌پذیری ذرات با خصوصیات جریان وجود دارد. با افزایش شدت، سرعت، تنش برشی و قدرت جریان، انتخاب‌پذیری ذرات رس و شن به شدت افزایش یافت و موجب افزایش مقدار فرسایش شیار شد. این نتایج مؤید مقاومت بیشتر ذرات رس و شن در انتقال توسط جریان متمرکز آب در شیارها است. ذرات سیلت بیشترین حساسیت را به انتقال توسط جریان متمرکز دارند؛ به طوری که حتی در جریان‌های با شدت کمتر، انتخاب‌پذیری آنها زیاد است. این ذرات برخلاف ذرات شن سبک‌تر بوده و قابلیت جدا شدن و انتقال بیشتری توسط جریان آب دارند؛ به طوری که حتی

REFERENCES

- Ahmadi, H. 2008. Applied Geomorphology. Volume One (Water Erosion), University of Tehran, Third Edition, 668.
- Asadi, H., Vali, M. and Nasiri Saleh., 2021. Laboratory Study of the Motion Threshold and Temporal Variation of Sediment Concentration in Flow-induced Erosion. Iranian Journal of Soil and Water Research 51(7), 1869-1880.
- Asadi, H., Ghaderi, H., Hosseini, J., Hogarth, W.L. and Parhange, J.Y. 2007. Dynamic erosion of soil in steady sheet flow. Journal of Hydrology. 333 (2-4), 449-458.
- Bouyoucos, G. J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. Agronomy Journal. 54(5), 464-466.
- Borrelli, P., Robinson, D.A., Fleischer, L.R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., Meusburger, K., Modugno, S., Schutt, B., Ferro, V., Bagarello, V., Van Oost, K., Montanarella, L., Panagos, P., 2017. An assessment of the global impact of the 21st century land use change on soil erosion. Nat. Commun. 8, 1-13.
- Farmer, E.E. 1973. Relative detachability of soil particles by simulated rainfall. Soil Science Society American Journal 37, 629-633.
- Foster, G.R., Flanagan, D.C., Nearing, M.A., Lane, L.J., Risse, L.M. and Finkner, C. 1995. Hill slope erosion component. Chapter 11, In: Flanagan, D.C. and Nearing, M.A., (Eds.), USDA-Water Erosion Prediction Project, Technical Documentation. NSERL. Report No. 10, National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana.
- Gumiere, S.J., Le Bissonnais, Y. and Raclot, D. 2009. Soil resistance to interrill erosion: Model parameterization and sensitivity. Catena 77, 274-284.
- Govers, G., Gimenez, R. and Oost, K.V. 2007. Rill erosion: exploring the relationship between experiments, modeling and field observations. Earth Science Reviews. 8, 87-102.
- Hao, H., Wang, J., Guo, Z. and Li, h. 2019. Water erosion processes and dynamic changes of sediment size distribution under the combined effects of rainfall and overland flow. Catena 173, 494-504.
- He, J.J., Li, X.J., Jia, L.J., Gong, H.L. and Cai, Q.G., 2014. Experimental study of rill evolution processes and relationships between runoff and erosion on clay loam and loess. Soil Science Society of America Journal , 78, 1716-1725.
- Jiang, F., Zhan, Z. and Chen, J. 2018. Rill erosion processes on a steep colluvial deposit slope under heavy rainfall in flume experiments with artificial rain. Catena 169, 46-58.
- Kimaro, D.N., Poesen, J., Msanya, B.M. and Deckers, J.A., 2008. Magnitude of soil erosion on the northern slope of the Uluguru Mountains, Tanzania: interrill and rill erosion. Catena 75, 38-44.
- Li, M., Zhan-bi, L., Dingd, W.L. and Yaoa, W., 2006. Using rare earth element tracers and neutron activation analysis to study rill erosion process. Applied Radiation and Isotopes , 64, 402-408.
- Meyer, L. D. and Horton, W.C. 1984. Succceptibility of agriculture soil to interrill erosion. Soil Science Society of America Journal, 32, 1152-1157.
- Morgan R. P. C. 1995. Soil Erosion and Conservation. Second Edition. Longman Group Ltd. U.K. 290 p
- Nearing, M.A., Norton, L.D., Bulgakov, D.A. and Larionov, G.A., 1997. Hydraulics and erosion in eroding rills. Water Resources Research. 33 (4), 865-876.
- Romero, C.C. Stroosnijder, L. and Guillermo, A.B. 2007. Interrill and rill erodibility in the northern Andean Highlands. Catena 70, 105-113.
- Rongsheng F. and Zhanbin L. 1993. Rainsplash and sediment transport model on the slope. Journal of Hydraulic Engineering, 6, 24-29.
- Rienzi, E.A., Fox, J.F., Grove, J.H. and Matocha, C.H. 2013. Interrill erosion in soils with different land uses: The kinetic energy wetting effect on temporal particle size distribution. Catena 107, 130-138.
- Sadeghian, N. and Vaezi, A.L. 2019. Selectivity of Particles through Rill Erosion in Different Soil Textures. Journal of Hydrology and Soil Science 23(2), 1-12.
- Shi, Z. H., Fang, N.F., Wu, F.Z., Wang, L., Yue, B.J. and Wu, G.L. 2012. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes. Journal of Hydrology 454, 123- 130.
- Vaezi, A.R. and Vatani, A., 2015. Determining Rill Erodibility in Some Soils in Zanjan Province Under Simulated Rainfall. Journal of Hydrology and Soil Science 19, 59-68.
- Vaezi, A.R. 1399. Water erosion (processes and models), second edition, Zanjan University Press.
- Vaezi, A.L. and Heidari, M. 2018. The Effect of Wheat Straw on Flow Characteristics and Rill Erosion in Wheat Rainfed Field. Iranian Journal of Soil and Water Research 50(1), 53-63.
- Vaezi. A.L., Noghan. M. and Foroumadi. M. 2017. Dependency of runoff characteristics on the plot scale in rainfed land under semi-arid rainfalls. Journal of Water and Soil Resources Conservation 7(1), 15-29.
- Vatani. A. and Vaezi, A.L. 2014. Soil loss in Rills and Its Temporal Variation During Rainfall in Different Soil Textures. Quarterly Journal of Water and Soil Knowledge 24(3), 83-92.
- Valettea, S. Prevosta Laurent, L. and Lucasa, J. 2006. SoDA project: A simulation of soil surfacedegradation by rainfall. Gilles Computers



- and Graphics.30, 494-506.
- Wang, L., Z. H. Shi. 2016. Size selectivity of eroded sediment associated with soil texture on steep slopes. *Soil Science Society of American Journal* 79, 917-929.
- Wang, S., Fu, B., Piao, S., Lü, Y., Ciais, P., Feng, X. and Wang, Y., 2016. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. *Nature Geoscience*. 9 (1), 38.
- Wirtz, S., Seeger, M. and Ries, J.B., 2010. The rill experiment as a method to approach quantification of rill erosion process activity. *Geomorphol.* 54, 47-64.
- Wirtz, S., Seeger, M., Remke, A., Wengel, R., Wagner, J. F. and 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.
- Hao, H., Wang, J., Guo, Z. and Li, h. 2019. Water erosion processes and dynamic changes of sediment size distribution under the combined effects of rainfall and overland flow. *Catena* 173, 494-504.
- Zangh, H.W., Chen, S.C. and Xu, S.G. 2010. Soil loss and conservation in the black soil region of Northeast China. a retrospective study *Environmental Science and Policy* 8, 793-800.
- Zhu, X., Fu, S., Wu, Q. and Wang, A., 2019. Soil detachment capacity of shallow overland flow in Earth-Rocky Mountain Area of Southwest China. *Geoderma* (361), 114021.