Research Article

Agricultural Engineering., 48(3) (2025) 487- 506

ISSN (P): 2588-526X

DOI: 10.22055/agen.2025.49405.1778

ISSN (E): 2588-5944

Investigating the Effect of Initial Soil Moisture and Flow Characteristics on Rill Erosion in Two Soils: Silty clay and Silt loam

N. Gholami Roodbareh [1], S. Abrishamkesh[2*], S. Asadi[3] and N. Yaghmaeian[4]

1. MSc Graduate, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Iran;
2. Assistant Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Iran;
3. Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering , Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Iran;
4. Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering , Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Iran

Received: 05 May 2025 Accepted: 22 October 2025 *Corresponding Author: sabrishamkesh@guilan.ac.ir

Abstract

Introduction: Rill erosion is considered as one of the most significant forms of water erosion. Most existing erosion models have been developed to estimate soil loss and formulate conservation measures. As a result, the spatial and temporal variations of erosion at small scales, such as rill erosion, are often simplified in these models. In addition to soil and flow characteristics, soil resistance to erosion is influenced by dynamic external environmental variables. Among these, soil moisture is an external environmental characteristic that can affect soil resistance to erosion. However, there is limited information on the precise role of soil moisture content in resisting water erosion. Therefore, this research aimed to investigate the effects of initial soil moisture and flow characteristics on rill erosion in two erosion-prone soils that contain more than 40% silt but differ in textures.

Materials and Methods: Soil samples with silt loam and silty clay textures, having approximately similar silt content, were collected from the 0-10 cm of two rain-fed farmlands exhibiting signs of rill erosion in Shirkuh village, Rudbar, Gilan Province. Soil samples did not have considerable differences in other properties such as organic matter content, calcium carbonate equivalent, aggregate stability, and other characteristics. Rill detachment capacity (Dc) measurements for both soil types were conducted under simulated runoff conditions, employing four flow discharge rates (0.546, 0.986, 1.125, and 1.895 m^3h^{-1}) and two slope levels (0.061 and 0.121 m/m). This resulted a total of eight combinations of flow discharge and slope, tested at five initial moisture levels (5%, 10%, 15%, 20%, and 30% by mass) with three replications for each combination.

Results and Discussion: The results of the analysis of variance showed that the effects of soil type, moisture level, and the interaction effects between soil type and moisture level on Dc were significant at $p \leq 0.01$. Results indicated that in both silty clay and silt loam soils, Dc decreased with increasing soil initial moisture content. The soil detachment capacity in silt loam soil, after a decreasing pattern, increased from 0.015 kg m^{-2} s^{-1} at 20% moisture to 0.086 kg m^{-2} s^{-1} at 30% moisture, indicating the existence of a moisture threshold for changes in susceptibility to rill erosion. Whereas in silty clay soil, the trend of detachment capacity continued to decrease with increasing initial moisture content. Analysis of the rill erodibility factor at different moisture levels also revealed a pattern similar to the changes in detachment capacity. In the drier moisture range, initial moisture may lead to increased soil strength, and consequently, soil loss

© 2025 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

decreases until reaching a moisture content corresponding to the plastic limit. Reduced aggregate breakdown and increased cohesion due to the presence of water films likely explain the greater soil resistance with increasing initial moisture. However, there may be an optimal moisture content beyond which the trend of increasing soil resistance with initial moisture begins to decrease or at least does not show incremental changes. This soil moisture threshold depends on the characteristics of the soil under study, such as the plastic limit, which can also be influenced by texture, especially the clay content of the soil. Therefore, the difference in clay content between the two soils likely contributed to their differing behaviors at various moisture levels. Based on the Pearson correlation test results, the correlation of rill detachment capacity in both soils showed the highest correlation coefficient with the stream power parameter ($r = 0.76$ to 0.83 in silty clay soil and $r = 0.76$ to 0.94 in silt loam soil). In silty clay soil, increased moisture generally led to a higher correlation, whereas in silty loam soil, a more complex pattern emerged, with Dc at 10% moisture showing the strongest correlation for most parameters. Initial soil moisture had a significant impact on the relationship between detachment capacity and flow characteristics, though this effect varied between the two soil types.

Conclusion: This finding indicates that rill erodibility is not a constant value and varies depending on the interaction effects between initial soil moisture and the texture of the studied soil. Therefore, although some soil properties, such as soil texture, are considered unchangeable factors over specific time periods (e.g., days, months, or even years) affecting erosion, the manner in which time-dependent parameters, such as initial soil water content (referred to here as initial soil moisture), and their interaction with soil texture influence erosion remains a subject of interest. Results of correlation between soil detachment capacity and flow hydraulic and hydrodynamic properties suggest that stream power may be a reliable predictor for soil detachment. Overall, these findings suggest that the influence of dynamic external factors, such as initial moisture levels, should be considered for more accurate soil erosion modeling.

Keywords: Soil texture, Rill erodibility, Runoff, Stream power, Slaking

مهندسی زراعی (مجله علمی کشاورزی) جلد ۴۸، شماره ۳، ۱۴۰۴

مقاله پژوهشی

بررسی اثر رطوبت اولیه خاک و خصوصیات جریان بر فرسایش شیاری در دو خاک رس‌سلیتی و لوم‌سیلتی

نگین غلامی رودبره[۱]، سپیده ابریشم‌کش[۲*]، صفورا اسدی[۳] و نفیسه یغمائیان[۴]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران
۲- استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران
۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران
۴- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۵

پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۷/۳۰

کلمات کلیدی:

بافت خاک،

رواناب،

فرسایش‌پذیری شیاری،

قدرت جریان،

واپاشی

* عهده دار مکاتبات

Email: sabrishamkesh@guilan.ac.ir

چکیده

شناخت اثر عوامل موثر بر فرسایش‌شیاری جهت توسعه مدل‌های کارآمد پیش‌بینی فرسایش و روش‌های حفاظت خاک از اهمیت بسزایی برخوردار است. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر مقدار رطوبت اولیه بر فرسایش شیاری در دو خاک با بافت رس-سیلتی و لوم‌سیلتی انجام شد. علاوه‌براین، ارتباط بین ظرفیت جدا-شدگی شیاری (Dc) و خصوصیات جریان رواناب نیز موردبررسی قرار گرفت. نمونه‌های خاک از دو دیم‌زار با علائم وقوع فرسایش شیاری واقع در روستای شیرکوه رودبار استان گیلان برداشت شدند. آزمایش در پنج سطح رطوبت اولیه خاک (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰٪ جرمی) و چهار نوع جریان شبیه سازی شده با دبی‌های جریان ۰/۵٤٦، ۰/۹۸٦، ۱/۱۲۵ و ۱/۸۹۵ متر مکعب بر ساعت و دو سطح شیب ۰/۰٦۱ و ۰/۱۲۱ متر بر متر انجام شد. نتایج نشان داد که در هر دو خاک، Dc با افزایش مقدار رطوبت اولیه، کاهش یافت. به عنوان-مثال در رطوبت اولیه ۳۰ درصد، مقدار Dc خاک رس‌سیلتی و لوم-سیلتی درمقایسه با رطوبت اولیه ۵٪ به‌ترتیب ۸۹/۹ و ۹۳/۲ درصد کمتر بود. مقدار Dc درخاک لوم‌سیلتی پس از یک روند کاهشی، از مقدار ۰/۰۱۵ در رطوبت ۲۰ درصد به ۰/۰۸٦ کیلوگرم بر متر-مربع ثانیه در رطوبت ۳۰ درصد افزایش یافت، که بیان‌گر وجود یک حد آستانه رطوبتی برای تغییرات حساسیت در برابر فرسایش شیاری بود. اما در خاک رس‌سیلتی، روند تغییر Dc با افزایش میزان رطوبت اولیه، همچنان کاهشی بود. واپاشی کمتر خاکدانه‌ها و پیوستگی بیشتر ناشی از حضور غشاهای آبی می‌توانند علت مقاومت بیشتر خاک با افزایش رطوبت اولیه باشد. همچنین، اختلاف میزان رس دو خاک احتمالا باعث تفاوت رفتار آنها در رطوبت‌های مختلف شد. در هر دو خاک، Dc بیشترین ضریب همبستگی را پارامتر قدرت جریان نشان

داد (۰/۷۶ تا r=۰/۸۳ درخاک رس‌سیلتی و ۰/۷۶ تا ۰/۹٤ =r در خاک لوم‌سیلتی). رطوبت اولیه تأثیر قابل‌توجهی بر قدرت ارتباط بین Dc و خصوصیات جریان داشت، اما این تأثیر در دو نوع خاک متفاوت بود. در مجموع این یافته‌ها نشان می‌دهد که اثر عوامل محیطی مانند سطح رطوبت اولیه جهت مدل‌سازی دقیق‌تر فرسایش خاک می‌بایست موردتوجه قرار گیرد.

مقدمه

فرسایش آبی، تهدیدی جدی برای تخریب زمین در سراسر جهان می‌باشد، که موجب به مخاطره‌افتادن کشاورزی پایدار و صدمات زیست‌محیطی و اقتصادی بسیاری می‌گردد (۱۱). توسعه مدل‌های مؤثر پیش‌بینی فرسایش و ابزارهای برنامه‌ریزی حفاظت خاک جهت نیل به توسعه پایدار، بسیار حیاتی است (۴۲). بیشتر مدل‌های موجود فرسایش برای برآورد مقدار خاک از-دست‌رفته و تدوین اقدامات حفاظتی توسعه یافته‌اند، به همین‌دلیل، تغییرات مکانی و زمانی فرسایش در مقیاس-های کوچک، مانند فرسایش شیاری غالبا در این مدل‌ها ساده‌سازی می‌شوند. فرسایش شیاری به عنوان فرایند غالب جداسازی و انتقال خاک توسط جریان سطحی در مناطق شیاری تعریف می‌گردد که منبع مهم رسوب و همچنین مسیری برای انتقال رسوب می‌باشد(۱۳). هدر-رفت خاک ناشی از فرسایش شیاری در اراضی زراعی شیب‌دار می‌تواند ۵۰ تا ۷۰ درصد کل خاک فرسایش-یافته را به‌خود اختصاص دهد (۲۹). در مقایسه با انتخاب‌پذیری ذرات ریز توسط فرسایش بین‌شیاری، فرسایش شیاری، کمتر انتخاب‌گر است (۳۲)، اما مطالعات نشان داده‌است که ذرات ریز (کوچک‌تر از ۰/۵۴ میلی‌متر) با سهولت بیشتری توسط فرسایش شیاری جدا می‌شوند و به‌دلیل ابعاد کوچک شیارها، خاک منتقل‌شده در آن‌ها معمولا از ذرات ریز تشکیل شده‌است (۲۳) که می‌تواند به‌طورانتخابی موجب تخلیه عناصر غذایی و کاهش حاصلخیزی اراضی زراعی شود. در-حالت پیشرفته، ممکن است چندین شیار مجاور با یکدیگر ترکیب شوند و یک خندق موقت با عمق کم و عرض بیشتر را تشکیل دهند که ممکن است به خندقی با عمق بیشتر از عمق شخم تبدیل شود، دراین حالت، امکان پرکردن مجدد خندق با عملیات زراعی وجود ندارد، که درنهایت منجر به تخریب شدید زمین می‌گردد (۸ و ۴۰).

در اکثر مدل‌های فرسایشی فرایندی، فرسایش‌پذیری شیاری یک پارامتر ورودی مهم برای تخمین نرخ فرسایش شیاری محسوب می‌شود. فرسایش‌پذیری شیاری، نشان‌دهنده مقاومت خاک در برابر جداشدگی ناشی از جریان سطحی است. به‌عنوان مثال در مدل پروژه پیش‌بینی فرسایش آبی[1] (WEPP)، عامل فرسایش-پذیری شیاری به‌عنوان میزان افزایش ظرفیت جداشدگی خاک درنتیجه افزایش یک واحد تنش برشی جریان آب تعریف شده‌است (۱۰). ظرفیت جداشدگی شیاری[2] (Dc) نیز حداکثر نرخ جداشدگی خاک است زمانی که هیچ رسوبی در جریان شیار وجود ندارد (آب شفاف)، بنابراین حداکثر امکان جداشدگی خاک توسط جریان شیار را نشان می‌دهد (۲۸). ظرفیت جداشدگی خاک عمدتا توسط ویژگی‌های خاک و خصوصیات هیدرولیکی جریان کنترل می‌شود (۷، ۲۲ و ۳۸). بافت خاک، نوع کانی‌های رسی و میزان ماده آلی از مهم‌ترین ویژگی‌های خاکی موثر بر میزان جداشدگی خاک و مقاومت در برابر فرسایش هستند (۴۸). ویژگی‌های خاک می‌توانند با تاثیر مستقیم و غیرمستقیم بر فرایندهایی مانند نفوذ، شکستگی ذرات و جداسازی (۳۵)، فرسایش شیاری را تحت تأثیر قرار دهند. واعظی و

1- Water Erosion Prediction Project
2- Rill Detachment Capacity

محمدی (۱۳۹۹) در بررسی تاثیر بافت خاک (لوم، لوم-رسی و لوم‌رسی شنی) و شیب بر فرسایش شیاری گزارش دادند که خاک لوم‌رسی به دلیل ناپایداری ساختمان، حساس‌ترین بافت با بیشترین فرسایش و رواناب و خاک لوم‌رسی‌شنی به‌دلیل هدایت هیدرولیکی بالا، مقاوم‌ترین بافت را داشت. اما در یک خاک مشخص، ویژگی‌های هیدرولیکی جریان، فرایند جداشدگی خاک را کنترل می‌کند (۲۰ و ۴۷). شیب دامنه و دبی جریان، متغیرهای هیدرولیکی به‌راحتی قابل-دسترس و پارامترهای مهمی هستند که ویژگی‌های هیدرولیکی جریان شیاری را به طورمستقیم تعیین می-کنند. علاوه‌براین پارامترهای هیدرولیکی، تنش برشی جریان، قدرت جریان و قدرت جریان واحد از پارامترهای هیدرودینامیکی رایجی هستند که می‌توانند هیدرولیک جریان را از منظر نیرو و انرژی بازتاب دهند. بررسی رابطه بین ظرفیت جداشدگی خاک و پارامترهای هیدرودینامیکی و شناسایی بهترین پارامتری که بتواند ظرفیت جداشدگی خاک را به‌دقت پیش‌بینی کند، برای آشکارسازی مکانیسم دینامیکی جداشدگی خاک و توسعه یک مدل مبتنی بر فرآیند برای فرسایش شیاری بسیار حائزاهمیت است. کائو و همکاران[1] (۲۰۱۱) و وانگ و همکاران[2] (۲۰۱۲) گزارش دادند که که تنش برشی بهترین براوردکننده برای پیش‌بینی نرخ جداشدگی خاک است. اما نتایج برخی مطالعات دیگر نشان دادند که قدرت جریان نسبت به تنش برشی به‌عنوان پیش‌بینی‌کننده‌ی بهتری برای توصیف جداشدگی خاک و تولید رسوب ترجیح داده می‌شود (۲۹ و ۳۰). علاوه‌بر ویژگی‌های خاک و جریان، مقدار رطوبت اولیه به‌عنوان یک متغیر محیطی پویا می‌تواند بر مقاومت خاک در برابر فرسایش تأثیرگذار باشد (۹). اما اطلاعات اندکی در مورد نقش دقیق میزان رطوبت خاک بر مقاومت در برابر فرسایش آبی وجود دارد. یک تأثیر آشکار و مورد-مطالعه گسترده رطوبت خاک بر تولید رسوب، از طریق تولید رواناب است. خاک‌های خشک تمایل به تولید رواناب کمتری دارند (۶) و بنابراین ظرفیت حمل رسوب کمتری نسبت به خاک مرطوب دارند که در آن رواناب بیشتری تولید می‌شود و خاک بیشتری فرسایش می‌یابد (۴۴). اما نتایج برخی مطالعات نشان داده‌است که وجود سطح متوسط رطوبت در خاک می‌تواند پیوند میان ذرات خاک را تسهیل کند (۳۵). محمدپور و همکاران (۱۳۹۵) در مطالعه‌ای به فهم فرسایش شیاری در یک خاک لوم‌سیلتی در شرایط خشک و مرطوب پرداختند. نتایج آن مطالعه نشان داد که که فرسایش شیاری عمدتا از طریق انتقال مواد سست سطحی صورت می‌گیرد و در شرایط خاک خشک، مقدار فرسایش بسیار بیشتر از شرایط مرطوب بود. درمقابل، متوسط سرعت جریان رواناب و حجم رواناب خروجی در تیمار مرطوب بالاتر بود. تأثیر رطوبت اولیه بر حساسیت فرسایشی خاک‌ها با بافت‌های مختلف حائز اهمیت است، اما رابطه مشخصی بین رطوبت و مقاومت خاک برای انواع خاک‌ها شناسایی نشده که این امر منجر به نادیده گرفتن نقش صریح رطوبت اولیه در اکثر مدل‌های فرسایش شده است (۲۵). مطالعات محدودی درباره اثر رطوبت اولیه بر فرسایش‌پذیری خاک وجود دارد. ژانگ و همکاران[3] (۲۰۱۹) رفتار متفاوت دو خاک لوم‌سیلتی و لوم‌شنی را تحت‌تاثیر مقدار رطوبت اولیه را گزارش کردند. نتایج آن مطالعه نشان داد که در خاک لوم‌سیلتی، ظرفیت جداشدگی شیاری تا رطوبت ۹٪ افزایش و سپس کاهش یافت، اما در خاک لوم‌شنی، روند افزایشی داشت. لی و همکاران[4] (۲۰۲۲) گزارش دادند در خاک ریزبافت موردمطالعه آنها، فرسایش‌پذیری ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت. آن محققین، افزایش اولیه فرسایش‌پذیری خاک ریزبافت را به واپاشی بیشتر خاکدانه‌ها و تضعیف پیوندهای چسبنده، و کاهش نهایی آن را به نقش

1- Cao *et al.*
2- Wang *et al.*
3- Zhang *et al.*
4- Li *et al.*

روان‌کاری رطوبت در تقویت انسجام ذرات نسبت دادند. باتوجه به‌آن‌چه بیان شد؛ پژوهش حاضر با دو هدف، ۱: بررسی اثر میزان رطوبت اولیه خاک بر حساسیت در برابر فرسایش در دو خاک دارای میزان سیلت نسبتا زیاد و مستعد فرسایش شیاری و ۲: بررسی ارتباط بین ظرفیت جداشدگی شیاری (Dc) و خصوصیات جریان در سطوح مختلف رطوبتی خاک انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و تعیین ویژگی‌های اولیه خاک

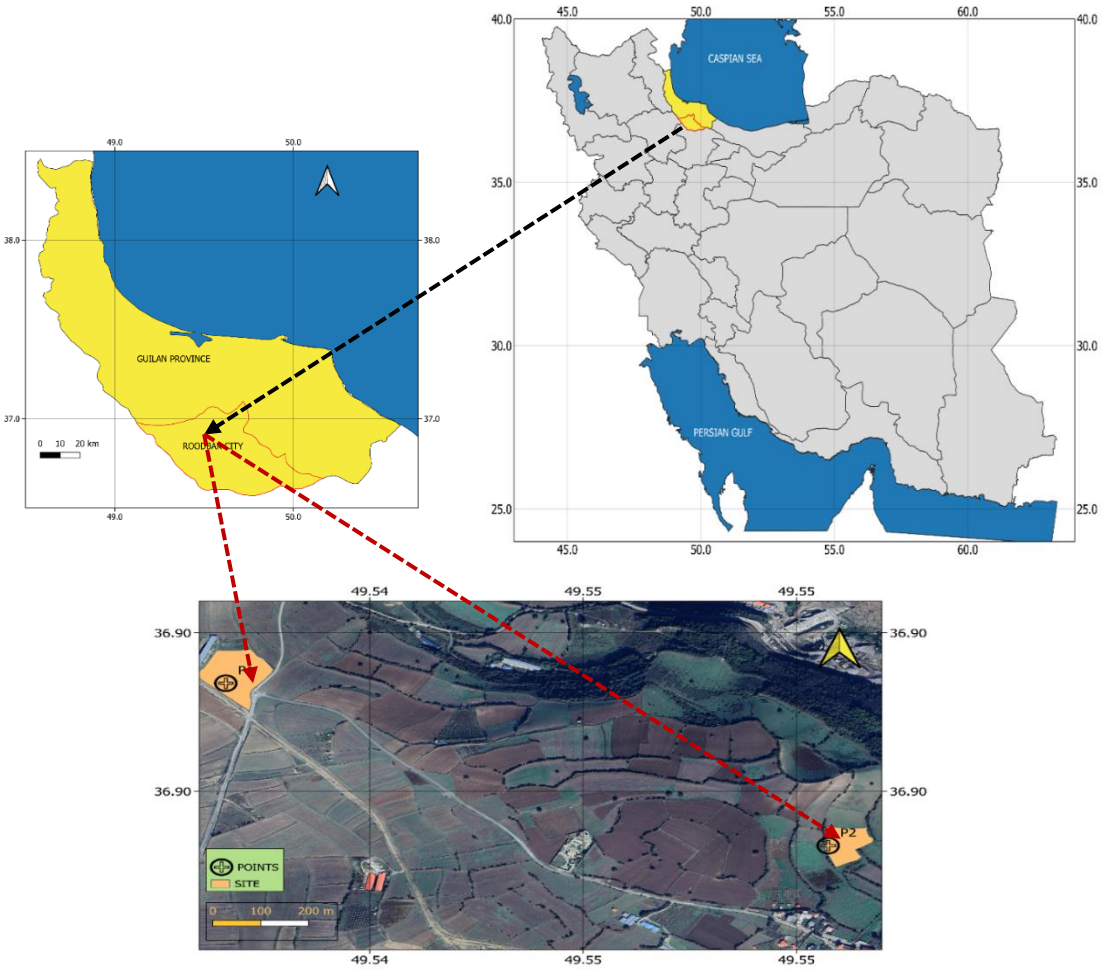
نمونه‌های خاک مورداستفاده در این مطالعه در پاییز ۱۴۰۲، از عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متر از دو دیم‌زار با علائم وقوع فرسایش شیاری واقع در روستای شیرکوه در شهرستان رودبار، استان گیلان برداشت شدند (شکل ۱). منطقه شیرکوه مشتمل بر دو تیپ اراضی تپه‌ماهوری و فلات است و از نظر زمین‌شناسی حاوی سنگ‌های با جنس آهک، شیل، توف آتشفشان و ماسه‌سنگ است. منطقه نمونه‌برداری با ارتفاع متوسط حدود ۳۵۰ متر از سطح دریا و براساس پایگاه داده GPM [1] و ERA5-Land دارای میانگین ده‌ساله بارش و دما (۲۰۲۴-۲۰۱۵) به‌ترتیب ۸۶۸ میلی‌متر و ۱۳/۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. پس از انتقال نمونه‌های خاک به آزمایشگاه، نمونه‌ها هواخشک، از الک ۲ میلی‌متری عبورداده و در ظروف سربسته نگهداری شدند. رطوبت حد اشباع به‌روش گل اشباع و رطوبت حد خمیری توسط روش استاندارد ASTM D4318 اندازه‌گیری شدند. سایر ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی اولیه خاک‌ها توسط روش‌های آزمایشگاهی متداول اندازه‌گیری شدند (۳۳). بافت خاک به‌روش هیدرومترو جرم ویژه ظاهری با استفاده از روش سیلندر فلزی تعیین شدند. برای اندازه‌گیری مقدار قابلیت هدایت الکتریکی و واکنش خاک نیز از نسبت ۲/۵ : ۱ خاک به آب استفاده و میزان ماده آلی و کربنات کلسیم معادل به‌ترتیب توسط روش اکسیداسون مرطوب و تیتراسیون تعیین شدند. پایداری خاکدانه به روش الک تر اندازه‌گیری شد.

آماده‌سازی نمونه‌های خاک

ابتدا میزان رطوبت خاک‌های موردمطالعه به سطوح موردنظر این پژوهش (۵، ۱۰، ۱۵ ، ۲۰ و ۳۰ درصد جرمی) رسانده‌شد. روش کار براساس مطالعه لی و همکاران [2] (۲۰۲۲)، به این‌صورت بود که ابتدا نمونه‌های خاک از الک دو میلی‌متر عبور داده‌شدند. سپس برای رساندن میزان رطوبت خاک به سطوح موردنظر، نمونه-های خاک در آون در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. سپس براساس میزان رطوبت جرمی نمونه-های خشک‌شده، مقدار آب مقطر لازم جهت رساندن رطوبت به سطوح موردنظر به خاک‌ها افزوده شد. مرطوب‌سازی به گونه‌ای انجام شد که آب به طور-یکنواخت به‌تمام سطح خاک اسپری و در ادامه، خاک‌ها به ظروف دربسته منتقل و به مدت ۱۵ دقیقه بر روی شیکر تکان داده و به‌مدت یک شبانه‌روز در همان ظرف دربسته نگهداری شدند تا از تاثیرگذاری رطوبت محیط بر نمونه خاک‌ها جلوگیری شود و همچنین آب فرصت کافی برای توزیع به تمام ذرات خاک را داشته باشد. مرحله دوم آماده‌سازی خاک در قالب با استفاده از کوبه [3] انجام شد. استفاده از کوبه، روشی رایج برای آماده‌سازی نمونه‌های خاک جهت آزمایش موردنظر است. برای پرکردن قالب‌های خاک و اعمال نیروی ثابت فشرده‌سازی، از کوبه‌ای مشابه با کوبه طراحی‌شده توسط لیو و همکاران [4] (۲۰۱۷) که توسط ژانگ و همکاران [5] (۲۰۱۹) اصلاح شده است استفاده شد.

1- Global Precipitation Measurement

2- Li *et al.*
3- Rammer
4- Liu *et al.*
5- Zhang *et al.*



شکل (۱) موقعیت محل برداشت نمونه‌های خاک.
Figure (1) location of soil samples collection.

به‌طورکلی، نیروی فشرده‌سازی ثابت و جرم ویژه ظاهری ثابت به عنوان دو شرط محدودکننده در آماده-سازی خاک هستند (۴۸). نیروی ثابت فشرده‌سازی برای بررسی تأثیر ماشین‌آلات کشاورزی بر زمین‌های زراعی ضروری است، درحالی‌که در روش حفظ جرم ویژه ظاهری ثابت، میزان نیروی فشرده‌سازی با تغییرات رطوبت اولیه خاک متفاوت است (۱۵). نمونه‌های خاک به درون قالب‌های فلزی (قطر۱۰/۵ و ارتفاع ۳ سانتی‌متر) انتقال داده‌شدند. خاک در لایه‌های یک سانتی‌متری در قالب‌های فلزی ریخته و سه‌مرتبه با کوبه تراکم یک کیلوگرمی به‌طور یکنواخت کوبیده شدند. این روند ادامه یافت تا قالب کاملا پر و خاک اضافی از لبه قالب تراشیده شد تا سطح خاک با لبه قالب حفظ گردد. در هر مرتبه آزمایش، با توزین قالب حاوی خاک و باتوجه به جرم قالب استوانه‌ای فلزی و سطح رطوبتی خاک، جرم خاک‌خشک تعیین و با تقسیم بر حجم قالب استوانه‌ای، جرم ویژه ظاهری خاک محاسبه شد.

شبیه‌سازی جریان شیاری

شبیه‌سازی رواناب توسط دستگاه فلوم هیدرولیک (طول ۲ و عرض ۰/۲ متر) انجام شد. دو سطح شیب ۳/۵ و ۷ درجه معادل ۰/۰۶۱ و ۰/۱۲۱ متر بر متر و چهار سطح دبی جریان ۰/۵۴۶، ۰/۸۹۶، ۱/۱۲۵ و ۱/۸۹۵ مترمکعب

بر ساعت به عنوان متغیرهای اصلی هیدرولیکی جریان رواناب در این مطالعه در نظر گرفته‌شدند. باتوجه به اثر خصوصیات هیدرولیکی جریان آب بر ظرفیت جدا-شدگی شیاری خاک علاوه بر شیب و دبی جریان، از روابط ۱ تا ۳ به‌ترتیب برای محاسبه تنش برشی، قدرت جریان و قدرت جریان واحد استفاده شد (۲۸ و ۴۶). پارامترهای هیدرولیکی و هیدرودینامیکی جریان رواناب مورداستفاده در جدول ۱ آورده شده‌است.

$$\tau = \rho g R S \qquad (۱)$$

$$\omega = \rho g R S V = \tau V \qquad (۲)$$

$$\varphi = S V \qquad (۳)$$

که در این روابط؛ τ: تنش برشی جریان (پاسکال)، ω: قدرت جریان (وات بر مترمربع)، φ : قدرت جریان واحد (متر بر ثانیه)، ρ :چگالی آب (کیلوگرم بر مترمکعب)، g: شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)، V: سرعت جریان (متر بر ثانیه) R: شعاع هیدرولیکی (متر) و S: شیب (متر بر متر) است.

قالب آماده‌شده نمونه خاک در بخش نگه‌دارنده استوانه ثابت در بستر فلوم قرار گرفت. مدت زمان سپری‌شده از زمان شروع شبیه‌ساز رواناب تا زمانی‌که عمق آبشستگی به حدود ۲ سانتی‌متر رسید، توسط کرونومتر ثبت شد. در زمان انجام این آزمایش، متوسط

$$D_c = K_r (\tau - \tau_c) \qquad (۵)$$

سرعت و عمق جریان نیز برای هر نمونه به‌صورت جداگانه اندازه‌گیری شد. در پایان آزمایش، خاک باقی-مانده در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک شد. محاسبه ظرفیت جداشدگی شیاری خاک (Dc) با استفاده از رابطه ۴ انجام شد.

$$D_c = \frac{M_0 - M_f}{At} \qquad (۴)$$

در این رابطه؛ Dc: ظرفیت جداشدگی خاک (کیلوگرم بر مترمربع ثانیه)، M: جرم خاک خشک در شروع آزمایش (کیلوگرم) ، Mf: جرم خاک باقی‌مانده پس از اتمام آزمایش (کیلوگرم)، A: مساحت نمونه خاک (مترمربع) و t : مدت زمان آزمایش (ثانیه) می-باشند. عامل فرسایش‌پذیری شیاری نیز توسط رابطه رگرسیون خطی بین ظرفیت جداشدگی شیاری خاک و تنش برشی جریان (رابطه ۵) استخراج شد (۱۰).

فرسایش‌پذیری شیاری (ثانیه بر متر)، τ :تنش برشی (پاسکال)، :τ_cتنش برشی بحرانی (پاسکال) می‌باشند.

جدول (۱) ویژگی‌های هیدرولیکی و هیدرودینامیکی جریان رواناب مورداستفاده در آزمایش.

Table (1) Hydraulic and hydrodynamic properties of the runoff flow used in the experiment

شماره آزمایش	شیب	دبی	عمق جریان	سرعت	تنش برشی	قدرت جریان	قدرت جریان واحد
Exp no	S	Q	h	**V**	$\boldsymbol{\tau}$	$\boldsymbol{\Omega}$	$\boldsymbol{\varphi}$
	($m\ m^{-1}$)	($m^3\ h^{-1}$)	(m)	($m\ s^{-1}$)	(Pa)	(Wm^{-2})	(ms^{-1})
1		0.546	0.09	0.360	5.19	1.86	0.02
2	0.061	0.896	0.11	0.380	5.92	2.28	0.02
3		1.125	0.12	0.43	6.41	2.77	0.02
4		1.895	0.14	0.44	7.34	3.23	0.02
5		0.546	0.11	0.48	12.33	5.87	0.06
6	0.121	0.896	0.13	0.50	13.46	6.73	0.06
7		1.125	0.16	0.53	16.62	8.77	0.06
8		1.895	0.18	0.57	18.09	10.34	0.07

طرح آزمایش و مطالعه آماری

آزمون بررسی نرمال‌بودن داده‌ها توسط آزمون کلموگروف-اسمیرنوف انجام شد. درصورت نرمال نبودن داده‌ها، نرمال‌سازی آن‌ها با تبدیلات موجود انجام گرفت. از آنجایی‌که جرم ویژه ظاهری می‌تواند بر ظرفیت جداشدگی خاک تاثیر بگذارد، مشابه مطالعه لی و همکاران[1] (۲۰۲۲) در مطالعه حاضر، در هر یک از دو خاک موردمطالعه (رس‌سیلتی و لوم‌سیلتی) تجزیه کواریانس یک‌طرفه با جرم ویژه ظاهری (کواریانت) بر-روی داده‌های ظرفیت جداشدگی انجام شد تا درصورت معنی‌دار بودن اثر آن حذف شود. سپس تجزیه و تحلیل آماری اثرات نوع خاک و سطح رطوبت اولیه بر ظرفیت جداشدگی شیاری خاک به صورت یک طرح فاکتوریل در قالب کاملا تصادفی با دو فاکتور: ۱-نوع خاک در دو سطح و ۲-میزان رطوبت اولیه در پنج سطح ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد جرمی در سه تکرار انجام شد. میانگین داده-های ظرفیت‌جداشدگی شیاری خاک با استفاده از آزمون توکی و در سطح احتمال پنج درصد مقایسه شدند. همبستگی بین ظرفیت جداشدگی خاک با ویژگی‌های جریان نیز توسط آزمون همبستگی پیرسون بررسی شد. کلیه تجزیه و تحلیل‌های آماری توسط نرم‌افزار SPSS انجام شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های اولیه خاک‌های مورد مطالعه

ویژگی‌های اولیه خاک‌های مورداستفاده در جدول ۲ آمده است. خاک شماره ۱ و ۲ با ۱۲/۶ و ۲۶/۶ درصد شن، ۴۴/۶ و ۵۰/۶ درصد سیلت و ۴۲/۸ و ۲۲/۸ درصد رس به ترتیب دارای بافت رس‌سیلتی و لوم‌سیلتی بودند. میزان سیلت در هر دو خاک بیش از ۴۰ درصد بود. تغییر جزئی در مقدار سیلت خاک به‌علت چسبندگی پایین و قابلیت انتقال آسان با تغییر قابل‌توجهی در میزان فرسایش‌پذیری خاک همراه است. براساس مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه، دو خاک موردمطالعه در دسته خاک‌های دارای خاکدانه‌های ناپایدار با قابلیت سله‌بندی فراوان قرار می‌گیرند. بنابراین باتوجه به مقدار زیاد سیلت و پایداری کم خاکدانه می‌توان انتظار داشت که خاک‌های منطقه موردمطالعه، دارای فرسایش‌پذیری زیاد باشند که شواهد موجود در منطقه نیز گواه آن بود. میانگین ظرفیت جداشدگی خاک‌ها (Dc) در رطوبت-های ۵ تا ۳۰٪ در جدول ۳ آورده شده‌است. بررسی ضریب چولگی، آزمون کلموگروف – اسمیرنوف و شاپیرو-ویلک بیان‌گر توزیع غیرنرمال داده‌های ظرفیت - جداشدگی خاک‌ها بود. بااستفاده از لگاریتم، نرمال-سازی داده‌ها انجام گرفت. استفاده از روش کوبه اصلاح‌شده منجر به جرم ویژه ظاهری قابل‌قبول برای خاک‌های موردمطالعه، به‌ترتیب ۱/۰۲ تا ۱/۱۵ و ۱/۱۳ تا ۱/۲۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب در خاک شماره ۱ (رس-سیلتی) و خاک شماره ۲ (لوم‌سیلتی) در رطوبت ۵ تا ۳۰ درصد شد (شکل ۲). نتایج تجزیه کواریانس در خاک-های موردمطالعه بیان‌گر غیرمعنی‌دار بودن تاثیر متغیر کواریانت جرم ویژه ظاهری بود. هانسون و رابینسون[2] (۱۹۹۳) بیان کردند که فرسایش‌پذیری تحت‌تأثیر جرم ویژه ظاهری خاک قرار دارد. اما لی و همکاران[3] (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای در مورد اثرات میزان رطوبت اولیه بر تنش برشی بحرانی و فرسایش‌پذیری شیاری دو خاک درشت و ریزبافت یافتند درحالی‌که رطوبت اولیه خاک عامل کلیدی در کنترل تنش برشی بحرانی بود اما تغییرات جرم ویژه ظاهری ناشی از رطوبت اولیه خاک تأثیر قابل‌توجهی بر تنش برشی بحرانی نداشت.

1- Li *et al.*

2- Hanson and Robinson
3- Li *et al.*

جدول (۲) ویژگی‌های اولیه خاک‌های مورد استفاده در مطالعه
Table (2) Basic properties of soils used in the experiment

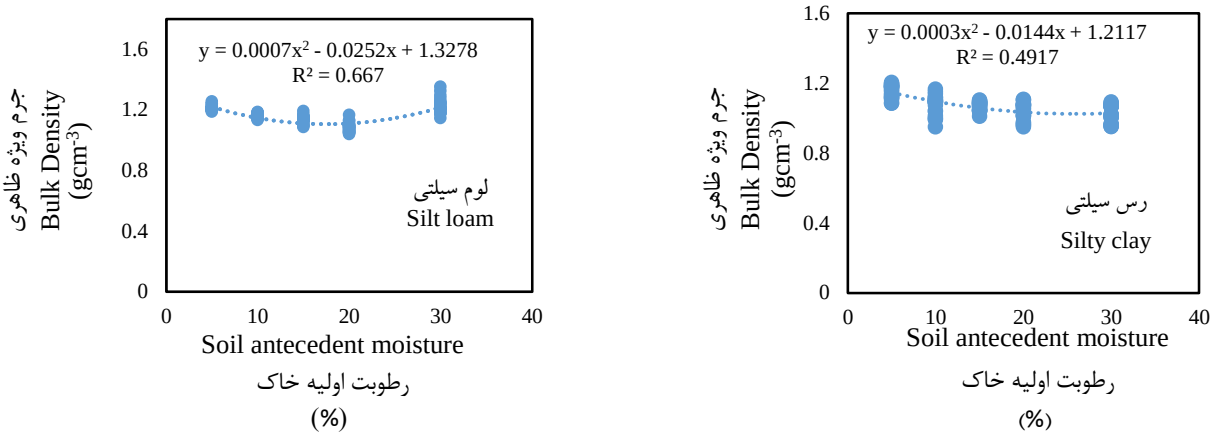
بافت Texture	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	واکنش pH	قابلیت هدایت الکتریکی EC (dSm^{-1})	کربن آلی OC (%)	کربنات کلسیم معادل CCE (%)	جرم ویژه ظاهری Bd (gcm^{-3})	میانگین وزنی قطر خاکدانه MWD (mm)	رطوبت اشباع Θs (%)	رطوبت حد خمیری PL (%)
Silty Clay	12.6	44.6	42.8	7.6	0.14	0.87	19	1.32	0.62	50.03	40
Silt loam	26.6	50.6	22.8	7.8	0.36	1.04	19	1.48	0.48	39.73	24

اثر رطوبت اولیه بر ظرفیت جداشدگی و فرسایش‌پذیری شیاری خاک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر نوع خاک و سطح رطوبت و اثرات متقابل نوع خاک و سطح رطوبت بر ظرفیت جداشدگی شیاری خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. مقایسه میانگین نشان داد که در هر دو خاک رس‌سیلتی و لوم‌سیلتی، ظرفیت جداشدگی شیاری با افزایش سطح رطوبت اولیه، کاهش یافته است. در خاک رس‌سیلتی، مقدار Dc از ۰/۵۵۲ در رطوبت ۵٪ به ۰/۰۵۶ $kg\ m^{-2}s^{-1}$در رطوبت ۳۰٪ کاهش یافت که نشان‌دهنده کاهش ۸۹/۹٪ است. در خاک لوم‌سیلتی، مقدار Dc از ۰/۲۲۳ در رطوبت ۵٪ به ۰/۰۱۵ $kg\ m^{-2}s^{-1}$ در رطوبت ۲۰٪ کاهش یافت (کاهش ۹۳/۲٪)، اما در رطوبت ۳۰٪ افزایش قابل‌توجه‌ای را نشان داد. در رطوبت‌های پایین (۵٪ تا ۱۵٪)، خاک رس-سیلتی، مقدار Dc بیشتری نسبت به لوم‌سیلتی داشت اما در رطوبت‌های بالا(۲۰٪ و ۳۰٪)، تفاوت بین دو خاک کمتر شده و در ۳۰٪ رطوبت، خاک لوم‌سیلتی، مقدار Dc بیشتر اما غیرمعنی‌دار نشان می‌دهد. بیشترین اختلاف معنی‌دار بین خاک رس‌سیلتی در رطوبت ۵٪ و سایر تیمارها مشاهده می‌شود. همچنین نتایج مقایسه میانگین نشان داد که تفاوت معنی‌دار مقدار Dc بین دو خاک تنها در سطوح رطوبتی ۱۵٪ و ۲۰٪ بود و در سایر سطوح رطوبت (۵٪، ۱۰٪ و ۳۰٪)، اختلاف معنی‌داری بین دو خاک مشاهده نشد (شکل ۳-الف). نتایج برازش معادله بر عکس‌العمل ظرفیت جداشدگی خاک‌ها نسبت به افزایش سطح رطوبت اولیه نشان داد که معادله درجه دوم با ضریب تعیین ۰/۹۷ و ۰/۹۹ برای برآورد Dc به‌ترتیب در خاک رس‌سیلتی و لوم‌سیلتی مناسب است (شکل ۳-ب). ضریب تعیین معادله در خاک لوم سیلتی (۰/۹۹۶) نزدیک به ۱ است که نشان می‌دهد تقریباً ۹۹/۶٪ از تغییرات در ظرفیت جداشدگی این خاک توسط مدل درجه دوم توضیح داده می‌شود و نشان می‌دهد رابطه بین رطوبت اولیه و Dc در این خاک بسیار منظم و قابل پیش‌بینی است. درمقابل، ضریب تعیین ۰/۹۷ برای خاک رس‌سیلتی اگرچه همچنان مقدار بسیار خوبی است، اما نشان می‌دهد حدود ۳٪ از تغییرات در ظرفیت جداشدگی این خاک با مدل درجه دوم قابل توضیح نیست. این تفاوت می‌تواند ناشی از میزان ذرات رس بیشتر در خاک رس‌سیلتی باشد که به‌دلیل داشتن ذرات کوچک‌تر و سطح ویژه بیشتر، حساسیت بیشتری به تغییرات رطوبت دارد.

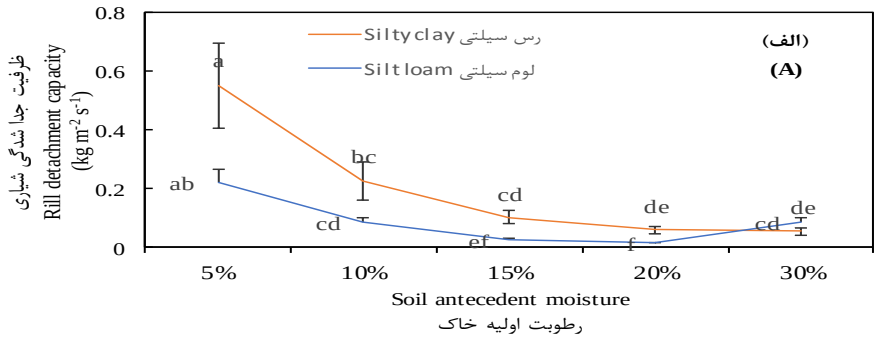
در جدول ۴، روابط رگرسیونی بین تنش برشی جریان و ظرفیت جداشدگی شیاری خاک به منظور یافتن عامل فرسایش‌پذیری شیاری به‌عنوان پارامتر اساسی بیان-

کننده مقاومت خاک در برابر فرسایش در رطوبت‌های اولیه متفاوت (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ درصد) مورداستفاده در این مطالعه آورده‌شده‌است. مقادیر ضریب تعیین رابطه‌های رگرسیونی بین ۰/۵۹ تا ۰/۹۲ بود و ضریب تعیین روابط رگرسیونی در خاک شماره ۲ (لوم‌سیلت) بیشتر از خاک شماره ۱ (رس‌سیلت) بود. در خاک رس-سیلتی، فرسایش‌پذیری شیاری با میزان رطوبت اولیه ارتباط عکس داشت (جدول ۴). در خاک لوم‌سیلتی تا سطح رطوبت ۲۰٪ رابطه عکس وجود داشت اما در رطوبت ۳۰٪ فرسایش‌پذیری شیاری افزایش و از میزان آن در سطح رطوبتی ۲۰ و ۱۵٪ بیشتر بود.



شکل (۲) جرم ویژه ظاهری خاک‌های مورد مطالعه در سطوح صفر تا ۳۰٪ رطوبت اولیه.

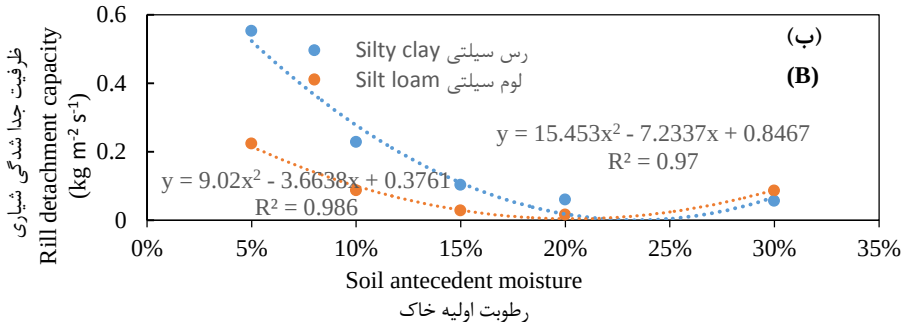
Figure (2) Bulk density of studied soils at antecedent moisture levels ranging from 0 to 30%.



جدول (۳) آماره‌های توصیفی ظرفیت جداشدگی شیاری خاک‌های موردمطالعه.

Table (3) Descriptive statistics of detachment capacity for the studied soils.

بافت خاک Soil Texture	میانگین Mean	میانه Median	حداکثر Maximum	حداقل Minimum	انحراف معیار Standard deviation	چولگی Kurtosis
				(kg m-^{2} s^{-1})		
Silty Clay	0.22	0.22	2.39	0.002	0.41	3.62
Silt loam	0.10	0.05	1.05	0.003	0.15	3.64



شکل (۳) الف) مقایسه میانگین اثر رطوبت اولیه بر ظرفیت جداشدگی شیاری و ب) ارتباط بین ظرفیت جداشدگی شیاری و رطوبت اولیه. میانگین‌های دارای حروف مشترک در سطح پنج درصد اختلاف معنی‌دار ندارند. هر یک از مقادیر نشان-دهنده میانگین ۲٤ داده همراه با خطای استاندارد است.

Figure (3) A) Mean comparisons of the effect of antecedent moisture on rill detachment capacity, and B) the relationship between rill detachment capacity and antecedent moisture level. Means that share similar letters are not significantly different at p<0.05. Each value represents the mean of 24 data points with standard error.

جدول (٤) عامل فرسایش‌پذیری شیاری خاک‌های موردمطالعه در سطوح صفر تا ۳۰٪ رطوبت اولیه.

Table (4) Rill erodibility factor of of studied soils in antecedent moisture levels of 0 to 30%.

	بافت خاک Soil Texture	رابطه رگرسیونی Regression equation	ضریب تعیین R^2	فرسایش‌پذیری شیاری Kr ($s\ m^{-1}$)
	رس‌سیلتی Silty clay	Dc(5%) = 0.1096 τ -0.6177	0.68	0.1096
		Dc(10%) = 0.0464 τ -0.2672	0.59	0.0464
		Dc(15%)= 0.0171 τ -0.0811	0.70	0.0171
		Dc(20%)= 0.0101 τ – 0.0479	0.68	0.0101
		Dc(30%) = 0.0097 τ -0.0476	0.67	0.0097
	لوم‌سیلتی Silt loam	Dc(5%) = 0.0409 τ – 0.1757	0.65	0.0409
		Dc(10%) = 0.0130 τ – 0.052	0.92	0.0130
		Dc(15%) = 0.0035 τ – 0.0094	0.76	0.0035
		Dc(20%) = 0.0024 τ – 0.0103	0.86	0.0024
		Dc(30%) = 0.0131 τ – 0.0543	0.74	0.0131

D_C:ظرفیت جداشدگی خاک در سطوح رطوبت اولیه صفر تا ۳۰٪، τ: تنش برشی جریان.

D_C: Soil detachment capacity at antecedent moisture levels ranging from 0 to 30%.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که ارتباط معکوسی بین میزان رطوبت اولیه و ظرفیت جداشدگی و عامل فرسایش‌پذیری شیاری هر دو خاک وجود دارد. اما در خاک لوم‌سیلتی از یک حد رطوبتی (۲۰٪) ارتباط بین مقدار رطوبت اولیه و ظرفیت جداشدگی و عامل فرسایش‌پذیری شیاری مستقیم شده و با افزایش سطح رطوبت اولیه، میزان ظرفیت جداشدگی نیز افزایش یافته است. عواملی مانند واپاشی[1] کمتر خاکدانه‌ها، پیوستگی ناشی از وجود نیروهای کشش سطحی غشاهای آبی و جهت‌گیری مجدد ذرات رس می‌توانند علت مقاومت

1- slaking

بیشتر خاک‌های مرطوب باشند (۲۶). اگرچه پدیده واپاشی، فرسایش محسوب نمی‌شود، اما با تخریب توده‌های خاک، آن را آماده فرسایش می‌کند (۲). واپاشی باعث می‌شود خاک بیشتری شکسته‌شده و رسوب بیشتری برای حمل‌ونقل توسط رواناب در دسترس قرارگیرند، در-حالی‌که خاک‌های مرطوب از واپاشی جلوگیری کرده و توانایی خاک برای تخریب را محدود می‌کنند (۱۴)، واپاشی به عنوان یکی از علل برجسته نرخ بالای فرسایش در خاک خشک شناخته‌شده است (۴). علاوه‌براین، وقتی رطوبت اولیه خاک کم باشد، فرسایش‌پذیری می‌تواند زیاد باشد زیرا ذرات خاک نمی‌توانند آزادانه خود را به موقعیتی با انرژی کم و چسبندگی بالا بین‌ذرات تغییر جهت دهند (۱۷). پارکر و همکاران[1] (۱۹۹۵) مشاهده کردند که فرسایش‌پذیری با کاهش مقدار رطوبت اولیه خاک در محدوده رطوبتی ۰/۲ تا ۰/۱۲۵ کیلوگرم بر کیلوگرم افزایش یافت. آن‌ها این پدیده را به تأثیر تداوم هوای خاک در فضای منافذ نسبت دادند، به‌طوری‌که با کاهش محتوای آب خاک، این تداوم افزایش یافته و منجر به فرسایش بیشتر می‌شود. ارتباط عکس فرسایش-پذیری شیاری با میزان رطوبت اولیه با یافته‌های پژوهش-های پیشین از قبیل ناچتگرگائل و پوسن[2] (۲۰۰۲) مطابقت دارد. ظرفیت جداشدگی خاک لوم‌سیلتی در رطوبت ۳۰٪ نسبت به ۲۰٪ افزایش را نشان داد، درحالی‌که در خاک رس‌سیلتی، روند تغییر ظرفیت جداشدگی خاک با افزایش میزان رطوبت اولیه همچنان کاهشی بود. در رطوبت پایین، ذرات خاک پیوند کمتری با هم دارند و راحت‌تر جدا می‌شوند، اما با افزایش رطوبت، نیروهای چسبندگی بین ذرات افزایش یافته و مقاومت خاک در برابر جداشدن بیشتر می‌شود؛ اما تفاوت در ذرات بافت به‌ویژه میزان رس خاک، باعث تفاوت در رفتار خاک در رطوبت‌های مختلف می‌شود. لوک و همیلتون[3] (۱۹۸۶) بیان کردند که در بازه رطوبتی خشک‌تر، رطوبت اولیه ممکن است منجر به افزایش استحکام خاک شود و در نتیجه، هدررفت خاک تا رسیدن به محتوای رطوبتی متناظر با حد خمیری کاهش یابد. حد خمیری، محتوای رطوبتی خاک را نشان می‌دهد که در آن خاک حالت قابل‌انعطاف پیدا می‌کند که این امر منجر به کاهش مقاومت برشی ماده و افزایش حساسیت آن به جداشدگی می‌شود(۱۶). بنابراین ممکن است یک محتوای رطوبتی بهینه وجود داشته باشد که فراتر از آن، روند افزایش مقاومت خاک با رطوبت اولیه شروع به کاهش کند (یا حداقل تغییرات افزایشی را نشان ندهد). چندین مطالعه وجود چنین محتوای رطوبتی بهینه را مورد توجه قرار داده‌اند (۱۸ و ۳۵). تفاوت در بافت به ویژه میزان رس خاک باعث تفاوت در رفتار خاک در رطوبت‌های مختلف می‌شود. با افزایش درصد رس خاک، حد خمیری افزایش می‌یابد زیرا رس‌ها به‌دلیل سطح ویژه بالا و خاصیت جذب آب، مقدار آب بیشتری را نگه می‌دارند. خاک رس‌سیلتی موردبررسی در این پژوهش با میزان رس بیشتر دارای حد خمیری بیشتری در مقایسه با خاک لوم‌سیلتی موردمطالعه بود (جدول ۲) و یکی از علل تفاوت رفتار دو خاک در رطوبت ۳۰٪ را می‌توان به پایین‌تر بودن رطوبت حد خمیری خاک لوم-سیلتی در مقایسه با خاک رس‌سیلتی نسبت داد. لاریونوف و همکاران[4] (۲۰۱۴) در یک آزمایش برای بررسی اثر محتوای رطوبت بر پیوستگی و فرسایش‌پذیری نمونه‌های خاک چرنوزم، دریافتند که نمونه‌های چرنوزم سنگین لومی که حاوی ۲۲-۲۴٪ رطوبت بودند، پایین‌ترین نرخ فرسایش را داشتند. در خاک لوم‌سیلتی در پژوهش حاضر نیز، الگوی مقعر فرسایش‌پذیری خاک نسبت به سطح رطوبت اولیه خاک (شکل ۳-ب) وجود یک محتوای بهینه آب خاک را تأیید کرد که در آن نیروهای چسبندگی حداکثر شده و فرسایش خاک به حداقل می‌رسد.

1- Parker *et al*.
2- Nachtergaele and Poesen
3- Luk and Hamilton
4- Larionov *et al*

ارتباط بین خصوصیات جریان و ظرفیت جداشدگی شیاری خاک

ضرایب همبستگی پیرسون بین ظرفیت جداشدگی خاک در سطوح مختلف رطوبتی (۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪ و ۳۰٪) با خصوصیات جریان برای دو خاک موردمطالعه (رس‌سیلتی و لوم‌سیلتی) در جدول ۵ آورده شده‌است. تمام همبستگی‌ها معنی‌دار هستند که نشان‌دهنده قوت روابط بین متغیرهاست. در هر دو خاک، قدرت جریان، قوی‌ترین ویژگی جریان مرتبط با Dc (۰/۷۶ تا r=۰/۸۳ در خاک رس‌سیلتی و ۰/۷۶ تا r=۰/۹۴ در خاک لوم-سیلتی). در خاک رس‌سیلتی، افزایش رطوبت عموماً سبب افزایش همبستگی می‌شود، در حالی‌که در خاک لوم‌سیلتی الگوی پیچیده‌تری مشاهده می‌شود و Dc در رطوبت ۱۰٪ بیشترین همبستگی را برای اکثر پارامترها نشان می‌دهد. ظرفیت جداشدگی خاک به طورعمده، توسط خصوصیات هیدرولیکی جریان و خواص خاک کنترل می‌شود (۳۸) و برای یک خاک معین، فرایند جداشدگی خاک عمدتا توسط ویژگی‌های هیدرولیکی جریان کنترل می‌شود(۴۷). شیب دامنه و دبی جریان ویژگی‌های هیدرولیکی به‌راحتی قابل دسترس هستند . مطالعه چن و همکاران[1] (۲۰۱۶) نشان داد که مقادیر تجمعی فرسایش با افزایش شیب دامنه و دبی جریان به طورخطی افزایش می‌یابد و شیب دامنه نقشی مهم در شدت کلی فرسایش ایفا می‌کند. ژیائو و همکاران[2] (۲۰۱۷) آزمایشی با استفاده از جریان متمرکز در مورد فرسایش روی بستر فلوم فرسایشی در دامنه‌های شیب‌دار لوسی انجام دادند و نتایج آنها نشان داد که بین نرخ جداشدگی خاک و دبی جریان و شیب دامنه یک تابع توانی وجود دارد و نرخ جداشدگی نسبت به دبی جریان، حساس‌تر از شیب دامنه بود. علاوه بر خصوصیات هیدرولیکی شیب و دبی جریان، پارامترهای هیدرودینامیکی شامل تنش برشی جریان، قدرت جریان و قدرت واحد جریان نیز می‌توانند از منظر نیرو و انرژی، خصوصیت هیدرولیکی جریان را منعکس کنند. بررسی رابطه بین ظرفیت جداشدگی شیاری خاک و پارامترهای هیدرودینامیکی و شناسایی پارامتر برتری که می‌تواند ظرفیت جداشدگی خاک را به دقت پیش‌بینی کند، برای روشن کردن مکانیزم دینامیکی جداشدگی خاک و توسعه مدل فرسایش شیاری فرایندی حائز اهمیت است. در مدل WEPP نیز، ظرفیت جداشدگی خاک به‌عنوان یک تابع خطی از تنش برشی جریان که بر خاک اثر می‌گذارد، توصیف می‌شود (۲۷). جیمنز و گاورز [3] (۲۰۰۲) فرسایش خاک را توسط جریان متمرکز بر بسترهای مختلف مطالعه کرده و عملکرد خوب تنش برشی در پیش‌بینی جداشدگی خاک را تأیید کردند. کائو و همکاران[4] (۲۰۱۱) نیز تأیید کردند که تنش برشی بهترین براوردکننده برای پیش‌بینی نرخ جداشدگی خاک است. نتایج مطالعه برخی محققین دیگر، بیانگر برتری پارامترهای هیدرودینامیکی دیگر می‌باشد.

به‌عنوان مثال نتایج مطالعه ژیائو و همکاران[5] (۲۰۱۷) نشان داد که قدرت جریان یک پارامتر بهینه برای توصیف جداشدگی خاک است. علی و همکاران[6](۲۰۱۳) نیز یک تابع حمل و نقل رسوب، مبتنی بر قدرت جریان واحد را برای پیش‌بینی فرسایش خاک ارائه نمودند. اما وانگ و همکاران[7] (۲۰۱۶) در بررسی همبستگی بین ظرفیت جداشدگی خاک و پارامترهای هیدرودینامیکی جریان گزارش دادند که عملکرد قدرت جریان واحد در پیش‌بینی ظرفیت جداشدگی خاک بسیار ضعیف است. بنابراین، قدرت جریان واحد ممکن است پیش‌بینی‌کننده‌ی خوبی برای حمل رسوب باشد، اما ممکن است برای پیش‌بینی جداشدگی خاک پیش‌بینی‌کننده‌ی خوبی نباشد.

1- Chen *et al.*
2- Xiao *et al.*
3- Gimenez and Govers
4- Cao *et al.*
5- Xiao *et al.*
6- Ali *et al.*
7- Wang *et al.*

جدول (۵) ضریب همبستگی پیرسون بین ظرفیت جداشدگی خاک و خصوصیات جریان.

Table (5) Pearson's correlation coefficient between soil detachment capacity and flow characteristics.

	بافت خاک Soil Texture		دبی Q ($m^3 h^{-1}$)	شیب S (mm^{-1})	سرعت V (ms^{-1})	تنش برشی τ (Pa)	قدرت جریان ω (Wm^{-2})	قدرت جریان واحد ρ (ms^{-1})
	رس سیلتی Silty clay	Dc (5%)	0.64**	0.52**	0.77**	0.76**	0.81**	0.65**
		Dc (10%)	0.65**	0.47*	0.72**	0.70**	0.76**	0.59**
		Dc (15%)	0.68**	0.53**	0.80**	0.78**	0.83**	0.66**
		Dc(20%)	0.74**	0.49*	0.79**	0.76**	0.81**	0.63**
		Dc (30%)	0.74**	0.49*	0.78**	0.76**	0.80**	0.62**
	لوم سیلتی Silt loam	Dc (5%)	0.40*	0.61**	0.73**	0.74**	0.76**	0.68**
		Dc (10%)	0.56**	0.71**	0.90**	0.91**	0.94**	0.82**
		Dc (15%)	0.63**	0.58**	0.82**	0.82**	0.86**	0.70**
		Dc (20%)	0.56**	0.67**	0.87**	0.87**	0.90**	0.78**
		Dc (30%)	0.65**	0.54**	0.80**	0.80**	0.84**	0.67**

D_C: ظرفیت جداشدگی خاک در سطوح رطوبت اولیه صفر تا ۳۰٪.

D_C: Soil detachment capacity at antecedent moisture levels ranging from 0 to 30%.

** بیانگر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد می‌باشد.

** denotes significance at $P \leq 0.01$.

نتیجه‌گیری

ظرفیت جداشدگی و فرسایش‌پذیری شیاری خاک، پارامترهای کلیدی برای توسعه مدل‌های فرسایش شیاری مبتنی بر فرایند فیزیکی و پیش‌بینی دقیق شدت فرسایش شیاری هستند. جداشدگی خاک اولین زیرفرایند فرسایش خاک است که موجب فراهمی رسوبات برای فرایندهای حمل و انتقال می‌شود و به طورعمده، توسط خصوصیات هیدرولیکی جریان و خواص خاک کنترل می‌شود. علاوه بر اثر ویژگی‌های خاک و خصوصیات جریان، یکی از این عوامل کنترلی که باید تأثیر آن بر ظرفیت جداشدگی خاک و همچنین سایر پارامترهای فرسایش شیاری مانند فرسایش‌پذیری شیاری کمی‌سازی شود، محتوای آب یا مقداررطوبت خاک است. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که ظرفیت جداشدگی شیاری خاک رس‌سیلتی رابطه معکوسی با افزایش میزان رطوبت اولیه از ۵ تا ۳۰٪ نشان داد، اما در خاک لوم‌سیلتی با وجود روند کاهشی تا رطوبت ۲۰٪، افزایش ظرفیت جداشدگی در رطوبت ۳۰٪ مشاهده شد که بیان‌گر یک حد آستانه رطوبتی در خاک لوم‌سیلتی بود. عواملی مانند کاهش واپاشی خاکدانه‌ها و تقویت نیروهای چسبندگی دلیل احتمالی افزایش مقاومت خاک مرطوب‌تر در برابر جداشدگی شیاری می‌توانند باشند. اما ممکن است یک محتوای رطوبتی بهینه وجود داشته باشد که فراتر از آن، روند افزایش مقاومت خاک با رطوبت اولیه شروع به کاهش کند یا حداقل تغییرات افزایشی را نشان ندهد. این حد آستانه رطوبت خاک بستگی به ویژگی‌های خاک مورد بررسی نظیر رطوبت حد خمیری دارد که آن‌ها نیز می‌توانند تحت تاثیر بافت به‌ویژه میزان رس خاک قرار بگیرند. روندی مشابه با نتایج ظرفیت جداشدگی در دو خاک مورد مطالعه، در مورد فرسایش‌پذیری شیاری که بیان‌گر حساسیت خاک در برابر فرایند فرسایش شیاری است، مشاهده شد. این یافته، بیان‌گر آن است که فرسایش‌پذیری شیاری، میزان ثابتی ندارد و بسته به اثرات متقابل میزان رطوبت اولیه و بافت خاک مورد بررسی، متغیر است. بنابراین اگرچه برخی ویژگی‌های خاک مانند بافت خاک به‌عنوان عوامل غیرقابل‌تغییر در بازه‌های زمانی معین مثلا طی روزها، ماه‌ها یا حتی سال‌ها بر فرسایش محسوب می‌شوند؛ با این‌حال، نحوه تأثیر

پارامترهای وابسته به زمان، مانند محتوای اولیه آب خاک (که در اینجا به‌عنوان رطوبت اولیه خاک ذکر شد) و اثر متقابل آن با بافت خاک بر فرسایش همچنان مورد توجه است. همبستگی بیشتر ظرفیت جداشدگی خاک با پارامترهای هیدرودینامیکی مانند قدرت جریان و تنش برشی در مقایسه با پارامترهای هیدرولیکی شیب و دبی جریان، بیانگر مناسب‌تر بودن پارامترهای توصیف‌کننده نیرو و انرژی جریان برای تغییرات ظرفیت جداشدگی خاک می‌باشد. درمورد اثر سطح رطوبت اولیه بر ارتباط بین خصوصیات جریان و ظرفیت جداشدگی خاک نیز می‌توان نتیجه‌گرفت که سطوح مختلف رطوبت اولیه خاک بر رابطه بین ظرفیت جداشدگی و خصوصیات جریان تأثیر می‌گذارد و بافت خاک بر نحوه تأثیرگذاری خصوصیات جریان بر ظرفیت جداشدگی مؤثر است. با این‌حال، لازم به‌ذکر است که یافته‌های این مطالعه بر-اساس نمونه خاک‌های با ویژگی‌های مشخص در شرایط آزمایشگاهی و تحت رواناب شبیه‌سازی‌شده به دست آمده است. همچنین باتوجه به تنوع قابل‌توجه خاک‌های رس‌سیلتی و لوم‌سیلتی از نظر توزیع اندازه ذرات، نوع و مقدار رس، میزان ماده آلی و سایر ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی، تعمیم مستقیم این نتایج به تمام خاک‌های با بافت مشابه نیازمند احتیاط است. انجام مطالعات تکمیلی با طیف گسترده‌تری از خاک‌ها و شرایط مختلف رطوبتی به‌ویژه در شرایط طبیعی خاک برای اطمینان از قابلیت تعمیم این یافته‌ها و شناسایی دقیق‌تر حد آستانه رطوبتی در انواع مختلف خاک توصیه می‌شود.

References

1. Aksoy, H., Gedikli, A., Yilmaz, M., Eris, E., Unal, N., Yoon, J., Kavvas, M. and Tayfur, G. 2020. Soil erosion model tested on experimental data of a laboratory flume with a pre-existing rill. Journal of Hydrology, 581: 5609-5624. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124391

2. Ali, M., Seeger, M., Sterk, G. and Moore, D. 2013. A unit stream power based sediment transport function for overland flow. Catena, 101: 197-204. https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.09.006

3. ASTM D4318-17. 2017. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA.

4. Auerswald, K. 1993. Influence of initial moisture and time since tillage on surface structure breakdown and erosion of loessial soil. Catena Supplement, 24: 93-101. https://doi.org/10.1016/0167-1987(94)90031-0

5. Cao, L.X., Zhang, K.L., Dai, H.L. and Guo, Z.L. 2011. Modeling soil detachment on unpaved road surfaces on the Loess Plateau. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 54(4): 1377-1384. https://doi.org/10.13031/2013.39039

6. Chen, X.Y., Huang, Y.H., Zhao, Y., Mo, B. and Mi, H.X. 2015. Comparison of loess and purple rill erosions measured with volume replacement method. Journal of Hydrology, 530: 476-483. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.001

7. Chen, X.Y., Zha, Y., Mi, H.X. and Mo, B. 2016. Estimating rill erosion process from eroded morphology in flume experiments by volume replacement method. Catena, 136: 135-140. https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.01.013

8. Daba, S., Rieger, W. and Strauss, P. 2003. Assessment of gully erosion in Eastern Ethiopia using photogrammetric techniques. Catena, 50: 273-291. https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00135-2

9. Fell, R., Hanson, G. J., Herrier, G., Marot, D., and Wahl, T. 2017. Relationship between the erosion properties of soils and other parameters. In S. Bonelli and S. Nicot (Eds.), Erosion in geomechanics applied to dams and levees (pp. 343-381). John Wiley & Sons, Inc. https://doi.org/10.1002/9781118577165.ch5

10. Flanagan, D.C. and Nearing, M.A. 1995. USDA-Water erosion prediction project: Hillslope profile and watershed model documentation. NSERL Report No. 10. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, IN.

11. Gil, E., Kijowska-Strugała, M. and Demczuk, P. 2021. Soil erosion dynamics on a cultivated slope in the Western Polish Carpathians based on over 30 years of plot studies. Catena, 207: 105682. https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105682

12. Gimenez, R. and Govers, G. 2002. Flow detachment by concentrated flow on smooth and irregular beds. Soil Science Society of America Journal, 66(5): 1475-1483. https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1475

13. Gyssels, G., Poesen, J., Nachtergaele, J. and Govers, G. 2002. The impact of sowing density of small grains on rill and ephemeral gully erosion in concentrated flow zones. Soil and Tillage Research, 64(3): 189-201. https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00263-X

14. Hanson, G.J. and Cook, K.R. 2004. Apparatus, test procedures, and analytical methods to measure soil erodibility in situ. Applied Engineering in Agriculture, 20(4): 455-462. https://doi.org/ 10.13031/2013.16492

15. Hanson, G.J. and Robinson, K.M. 1993. The influence of soil moisture and compaction on spillway erosion. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 36(5): 1349-1352. https:// doi.org/ 10.13031/2013.28469

16. Holz, D.J., Williard, K.W., Edwards, P.J. and Schoonover, J.E. 2015. Soil erosion in humid regions: a review. Journal of Contemporary Water Research and Education, 154(1): 48-59. https://doi.org/10.1111/j.1936-704X.2015.03187.x

17. Knapen, A., Poesen, J., Govers, G., Gyssels, G., and Nachtergaele, J. 2007. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review, Earth-Science Reviews, 80: 75-109. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.08.001

18. Larionov, G.A., Bushueva, O.G., Gorobets, A.V., Dobrovolskaya, N.G., Kiryukhina, Z.P., Krasnov, S.F., Litvin, L.F., Maksimova, I.A. and Sudnitsyn, I.I. 2018. Experimental study of factors affecting soil erodibility. Eurasian Soil Science, 51(3): 336-344. https://doi.org/10.1134/S1064229318030067

19. Legates, D.R., Mahmood, R., Levia, D.F., DeLiberty, T.L., Quiring, S.M., Houser, C. and Nelson, F.E. 2011. Soil moisture: A central and unifying theme in physical geography. Progress in Physical Geography, 35(1): 65-86. https://doi.org/10.1177/0309133310386514

20. Li, Z.W., Zhang, G.H., Geng, R., Wang, H. and Zhang, X. 2015. Land use impacts on soil detachment capacity by overland flow in the Loess Plateau, China. Catena, 124: 9-17. https://doi.org/10.1016/j.CATENA.2014.08.019

21. Li, M., Liu, Q., Zhang, H., Wells, R., Wang, L. and Geng, J. 2022. Effects of antecedent soil moisture on rill erodibility and critical shear stress. Catena, 216: 106356. https://doi.org/10.1016/j.CATENA.2022.106356

22. Liu, F., Zhang, G.H., Sun, L. and Wang, H. 2016. Effects of biological soil crusts on soil detachment process by overland flow in the Loess Plateau of China. Earth Surface Processes and Landforms, 41(7): 875-883. https://doi.org/10.1002/esp.387

23. Luk, S.H., Abrahams, A.D. and Parsons, A.J. 1993. Sediment sources and sediment transport by rill flow and interrill flow on a semi-arid piedmont slope, southern Arizona. Catena, 20: 93-111. https://doi.org/10.1016/0341-8162(93)90031-J

24. Mohamadpour, S., Ruhani, H., Ghorbani Vaghei, H. and Seyedian, S.M. 2016. Understanding rill erosion rate in dry-wet condition. Quarterly Journal of Environmental Erosion Research, 6: 16-29. (In Persian with English Abstrac)

25. Moragoda, N., Kumar, M. and Cohen, S. 2022. Representing the role of soil moisture on erosion resistance in sediment models: Challenges and opportunities. Earth-Science Reviews, 229: 104032. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104032

26. Nachtergaele, J. and Poesen, J. 2002. Spatial and temporal variations in resistance of loess-derived soils to ephemeral gully erosion. European Journal of Soil Science, 53(3): 449-463. https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2002.00443.x

27. Nearing, M.A., Foster, G.R., Lane, L.J. and Finkner, S.C. 1989. A process-based soil erosion model for USDA-Water erosion prediction project technology. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 32: 1587-1593. https://doi.org/ 10.13031/2013.31195

28. Nearing, M.A., Bradford, J.M. and Parker, S.C. 1991. Soil detachment by shallow flow at low slopes. Soil Science Society of America Journal, 55(2): 339-344. https://doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500020006x

29. Nearing, M.A., Norton, L.D., Bulgakov, D.A., Larionov, L.T. and Dontsova, K.M. 1997. Hydraulics and erosion in eroding rills. Water Resources Research, 33: 865-876. https://doi.org/10.1029/97WR00013

30. Nearing, M.A., Simanton, J.R., Norton, L.D., Bulygin, S.J. and Stone, J. 1999. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hillslope. Earth Surface Processes and Landforms, 24(8): 677-686. https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199908)24:8<677::AID-ESP981>3.0.CO;2-1

31. Parker, D.B., Michel, T.G. and Smith, J.L. 1995. Compaction and water velocity effects on soil erosion in shallow flow. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 121(2): 170-178. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1995)121:2(170)

32. Rauws, G. and Auzet, A.V. 1989. Laboratory experiments on the effects of simulated tractor wheelings on linear soil erosion. Soil and Tillage Research, 13: 75-81. https://doi.org/10.1016/0167-1987(89)90039-1

33. Shahbazi, K., Marzi, M., Mohammadi, M.H., Asadi, H., Fathi Garlidani, A., Hashemi, Nesb Zavareh, K.S., Toloi, R., Beheshti, M., Avizhgan, A. and Cheraghi, M. 2024. Methods of soil analysis: Sampling, chemical, and physical methods. Soil and Water Research Institute of Iran. ISBN: 978-622-6705-36-3.

34. Sheridan, G.J.A.C., So, H.B.A., Loch, R.J.B.D. and Walker, C.M.A. 2000. Estimation of erosion model erodibility parameters from media properties. Australian Journal of Soil Research, 38: 265-284. https://doi.org/ 10.1071/SR99041

35. Shainberg, I., Goldstein, D. and Levy, G.J. 1996. Rill erosion dependence on soil water content, aging, and temperature. Soil Science Society of America Journal, 60(3): 916-922. https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000030034x

36. Shi, Z.H., Yan, F.L., Li, L., Li, Z.X. and Cai, C.F. 2010. Interrill erosion from disturbed and undisturbed samples in relation to topsoil aggregate stability in red soils from subtropical China. Catena, 81(3): 240-248. https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.04.007

37. Stefano, C.D., Ferro, V., Pampalone, V. and Sanzone, F. 2013. Field investigation of rill and ephemeral gully erosion in the Sparacia experimental area, South Italy. Catena, 101: 226-234. https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.10.012

38. Su, Z.L., Zhang, G.H., Yi, T. and Liu, F. 2014. Soil detachment capacity by overland flow for soils of the Beijing region. Soil Science, 179(9): 446-453. https://doi.org/ 10.1097/SS.0000000000000089

39. Vaezi, A. and Mohammadi, E. 2022. Temporal variation pattern of runoff generation and rill erosion in different soils and slope gradients. Journal of Water and Soil Science, 25(4): 19-31. (In Persian with English Abstrac) https://doi.org/10.47176/jwss.25.4.12741

40. Valentin, C., Poesen, J. and Li, Y. 2005. Gully erosion: Impacts, factors and control. Catena, 63: 132-153. https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.06.00

41. Wang, J.G., Li, Z.X., Cai, C.F., Yang, W., Ma, R.M. and Zhang, G.B. 2012. Predicting physical equations of soil detachment by simulated concentrated flow in Ultisols (subtropical China). Earth Surface Processes and Landforms, 37(6): 633-641. https://doi.org/10.1002/esp.3195

42. Wang, B., Zhang, G.H., Shi, Y.Y., Zhang, X.C., Ren, Z.P. and Zhu, L.J. 2013. Effect of natural restoration time of abandoned farmland on soil detachment by overland flow in the Loess Plateau of China. Earth Surface Processes and Landforms, 38: 1725-1734. https://doi.org/10.1002/esp.3459

43. Wang, D.D., Wang, Z.L., Shen, N. and Chen, H. 2016. Modeling soil detachment capacity by rill flow using hydraulic parameters. Journal of Hydrology, 535: 473-479. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.013

44. Wei, L., Zhang, B. and Wang, M. 2007. Effects of antecedent soil moisture on runoff and soil erosion in alley cropping systems. Agricultural Water Management, 94: 54-62. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.08.007

45. Xiao, H., Liu, G., Liu, P.L., Zheng, F.L., Zhang, J.Q. and Hu, F.N. 2017. Response of soil detachment rate to the hydraulic parameters of concentrated flow on steep loessial slopes on the Loess Plateau of China. Hydrological Processes, 31(14): 2613-2621. https://doi.org/10.3390/w17010028

46. Yang, C. T. 1972. Unit Stream power and sediment transport. Journal of Hydraulics Division. ASCE, 981805 - 1826.

47. Zhang, G.H., Liu, B.Y., Liu, G.B., He, X.W. and Nearing, M.A. 2003. Detachment of undisturbed soil by shallow flow. Soil Science Society of America Journal, 67(3): 713-719. https://doi.org/10.2136/sssaj2003.7130

48. Zhang, H.Y., Li, M., Wells, R.R. and Liu, Q.J. 2019. Effect of soil water content on soil detachment capacity for coarse- and fine-grained soils. Soil Science Society of America Journal, 83(3): 697-7. https://doi.org/10.2136/sssaj2018.05.0208