

Investigating the Soil Susceptibility to Splash Erosion in Drylands in the Semi-Arid Region of Northwestern Iran

Ali Reza Vaezi*, Saeideh Akbari and Fereshteh Haghshenas¹

(Received: August 26-2025 ; Revised: December 1-2025 ; Accepted: December 16-2025)

1. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

* Corresponding Author, Email: vaezi.alireza@gmail.com

Abstract

Splash erosion is the initial stage of soil erosion by water, which can be significantly influenced by soil properties. The rate of this type of soil erosion in drylands of semi-arid regions is high due to sparse vegetation cover, particularly during the early stages of plant growth. This study was conducted to investigate the soil properties determining splash erosion in semi-arid drylands. Soil aggregates with a diameter of 6 to 8 mm were taken from the soil surface (0-30 cm depth) in thirty dryland farms at three replications. Soil aggregates were purred into splash bowls and exposed to simulated rainfalls with an intensity of 60 mm h⁻¹ for 30 minutes. Different soil properties were determined in ninety soil samples. Based on the results, the highest splash erosion occurred in clay loam (0.0021 gm⁻²s⁻¹), while the lowest value was in loamy sand texture (0.0008 gm⁻²s⁻¹). Splash erosion was significantly affected by grain size distribution; so that positive correlations were found with silt ($r = 0.43$), clay ($r = 0.44$), and dispersible clay ($r = 0.47$), whereas negative correlations existed with sand ($r = -0.46$) and gravel ($r = -0.53$). Furthermore, splash erosion was considerably influenced by organic matter ($r = -0.23$), calcium carbonate ($r = -0.22$), bulk density ($r = -0.60$), aggregate stability ($r = -0.44$), and hydraulic conductivity ($r = -0.44$). This study revealed that the drylands with fine-textured soils and having a lower amount of organic matter as well as calcium carbonate, have a higher susceptibility to splash erosion in semi-arid regions.

Keywords: Particle size distribution, Bulk density, Fine-texture soils, Dispersible clay, Organic matter

How to cite this article: Vaezi, A.R., Akbari, S. and Haghshenas, F. 2026. Investigating the Soil Susceptibility to Splash Erosion in Drylands in the Semi-Arid Region of Northwestern Iran. *J. Water and Soil Sci.* 30(1): 133-144. DOI: [10.47176/jwss.30.1.133018](https://doi.org/10.47176/jwss.30.1.133018)

Copyright © 2026 Vaezi et al. Published by Isfahan University of Technology.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

بررسی حساسیت خاک به فرسایش پاشمانی در کشتزارهای دیم منطقه نیمه‌خشک در شمال غربی ایران

علی‌رضا واعظی* , سعیده اکبری و فرشته حق‌شناس^۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۶/۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۹/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۹/۲۵)

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

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: vaezi.alireza@gmail.com

چکیده

فرسایش پاشمانی، مرحله آغازین فرسایش خاک توسط آب است که می‌تواند به طور قابل توجهی تحت تأثیر ویژگی‌های خاک قرار گیرد. شدت این نوع فرسایش خاک در کشتزارهای دیم مناطق نیمه‌خشک به دلیل پوشش گیاهی پراکنده، به‌ویژه در مراحل اولیه رشد گیاه زیاد است. این مطالعه با هدف بررسی نقش ویژگی‌های خاک در فرسایش پاشمانی در کشتزارهای منطقه نیمه‌خشک انجام شد. نمونه‌های خاکدانه‌ها با قطر ۶ تا ۸ میلی‌متر از سطح خاک (عمق ۳۰-۵۰ سانتی‌متر) از ۳۰ کشتزار دیم با سه تکرار برداشت شدند. خاکدانه‌ها در کاسه‌های پاشمانی ریخته شده و به مدت ۳۰ دقیقه در معرض بارندگی شبیه‌سازی شده با شدت ۶۰ میلی‌متر در ساعت قرار گرفتند. ویژگی‌های مختلف خاک در ۹۰ نمونه خاک تعیین شدند. بر اساس نتایج، بیشترین شدت فرسایش پاشمانی در خاک‌های با بافت لوم‌رسی ($0/0021 \text{ g.m}^{-2}.s^{-1}$) و کمترین مقدار آن در خاک‌های با بافت شن‌لومی ($0/0008 \text{ g.m}^{-2}.s^{-1}$) دیده شد. فرسایش پاشمانی به طور معنی‌داری تحت تأثیر توزیع اندازه ذرات قرار گرفت؛ به‌طوری که همبستگی‌های مثبتی با سیلت ($r=0/43$)، رس ($r=0/44$) و رس قابل پراکنش ($r=0/47$) یافت شد؛ درحالی که همبستگی‌های منفی با شن ($r=-0/46$) و سنگ‌ریزه ($r=-0/53$) داشت. علاوه بر این، فرسایش پاشمانی به طور قابل توجهی تحت تأثیر ماده آلی ($r=-0/23$)، کربنات کلسیم ($r=-0/22$)، چگالی ظاهری ($r=-0/60$)، پایداری خاکدانه ($r=-0/44$) و هدایت هیدرولیکی ($r=-0/44$) قرار گرفت. این مطالعه نشان داد که کشتزارهای دیم دارای خاک با بافت خاک‌ریز و مقدار اندک ماده آلی و آهک، حساسیت بیشتری به فرسایش پاشمانی در مناطق نیمه‌خشک دارند.

واژه‌های کلیدی: توزیع اندازه ذرات، چگالی ظاهری، خاک‌های ریزبافت، رس پراکنش پذیر، ماده آلی

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. © ۱۴۰۴.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت

شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



مقدمه

فرسایش خاک یک مسئله زیست‌محیطی جهانی است که منجر به تخریب اراضی، کاهش حاصلخیزی خاک و تهدیدی جدی برای امنیت غذایی و شرایط اجتماعی - اقتصادی در سراسر جهان شده است (۳۸). تخمین زده می‌شود که سالانه بیش از ۳۵ میلیارد تن خاک از اراضی خشکی جهان فرسایش می‌یابد و نرخ‌های از دست رفتن خاک از ۳/۹ تا ۴۱/۸ تن در هکتار در سال متغیر است که بسیار بیشتر از سرعت تشکیل خاک است (۳۰). فرسایش پاشماني نخستین گام در جداسازی و جابه‌جایی ذرات خاک در فرسایش آبی است (۴۰). فرسایش پاشماني، مرحله اولیه فرسایش هیدرولیکی خاک است و تأثیر قابل توجهی بر روند گسترش فرسایش خاک دارد (۱۷). این فرایندی پیچیده است که با برخورد قطرات باران به سطح خاک آغاز شده و شامل جدا شدن و انتقال ذرات خاک می‌شود (۴۱). ذرات ریز متلاشی‌شده زمینه انتقال مواد را برای رواناب را فراهم می‌کنند و با مسدود کردن منافذ خاک، نفوذپذیری را کاهش داده و رواناب را افزایش می‌دهند (۳۲). در فرسایش ناشی از باران، پایداری خاکدانه عمدتاً به تغییرات در ویژگی‌های بارندگی مانند شکل و اندازه قطرات باران، انرژی جنبشی، شدت و ترکیبات مختلف آنها بستگی دارد (۱۱). از طرف دیگر، فرسایش پاشماني تحت تأثیر ویژگی‌های خاک مانند مقدار رس، کربن آلی خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی و محتوای آب خاک نیز قرار می‌گیرد و این ویژگی‌های خاک عمدتاً بر پایداری خاکدانه تأثیر می‌گذارند (۲۵).

عوامل متعددی بر فرسایش پاشماني اثر می‌گذارند که می‌توان آنها را به طور کلی به سه دسته تقسیم کرد: فرسایش‌پذیری بارندگی، ویژگی‌های خاک و عوامل خارجی. عوامل بارندگی عمدتاً انرژی بارندگی را تغییر داده و بر فرسایش پاشماني تأثیر می‌گذارند. هنگامی که قطرات باران به سطح خاک برخورد می‌کنند، بخشی از انرژی توسط خاک جذب می‌شود و باقیمانده به عنوان نیروی پاشماني عمل می‌کند (۲۸). با افزایش شدت بارندگی، انرژی قطرات باران بر سطح خاک نیز افزایش می‌یابد و منجر به افزایش فرسایش پاشماني

می‌شود (۲۱). گزارش‌ها نشان می‌دهد که نیروی آبپوشی سطحی و نیروی دافعه الکترواستاتیک دو عامل مهم مؤثر بر جابه‌جایی ذرات طی باران هستند (۱۸). اثرهای فرسایش پاشماني می‌تواند شامل موارد زیر باشد: از دست رفتن مواد خاک، تخریب خاکدانه‌ها، تغییر شکل سطح خاک و تشکیل قشر سطحی با نفوذپذیری محدود. ویژگی‌های خاک از جمله توزیع اندازه ذرات، محتوای رطوبتی، مواد آلی و آب‌گریزی، و عوامل محیطی از جمله شیب زمین، پوشش گیاهی و شیوه‌های کشاورزی (۲، ۱۴ و ۴۴).

در مطالعات مختلف به نقش برخی عوامل در فرسایش پاشماني پرداخته شده است. در این راستا لی و همکاران (۱۹) به بررسی چگونگی اثر شدت پراکنش‌پذیری و رطوبت اولیه خاک بر فرسایش پاشماني خاک‌های پراکنش‌پذیر پرداختند. نتایج نشان داد که رابطه بین پراکنش‌پذیری و فرسایش پاشماني به شدت رطوبت خاک وابسته بود؛ به طوری که در رطوبت‌های کم، افزایش پراکنش‌پذیری فرسایش را کاهش می‌داد، اما در رطوبت‌های زیاد این اثر تشدید می‌یافت. همچنین، آنها مشاهده کردند که خاک‌های پراکنش‌پذیر در مقایسه با خاک‌های غیر پراکنش‌پذیر، حساسیت بیشتری به تغییرات رطوبتی در فرایند پاشمان نشان می‌دهند و پراکنش‌پذیری بر اندازه ذرات پاشیده‌شده و شدت رواناب تأثیرگذار بود. در پژوهشی بژک و همکاران (۴)، اثر شیب سطح بر پدیده پاشمان خاک ناشی از ضربه یک قطره باران ارزیابی شد. آنها اثر شیب را بر شدت و ترکیب مواد پاشمان‌یافته (خاک و آب) از سه نوع خاک با بافت‌های مختلف در دو وضعیت رطوبتی متفاوت بررسی کردند. نتایج نشان داد که تأثیر شیب بر شدت پاشمان به نوع خاک بستگی دارد؛ در خاک‌های مرطوب بافت و در خاک‌های خشک، شیب عاملی مهم‌تر بود. افزایش شیب منجر به پرتاب بیشتر مواد به سمت پایین‌دست شد. همچنین در پژوهشی زامبون و همکاران (۴۲) به ارزیابی تأثیر رطوبت اولیه و وضعیت سطح خاک (با تمرکز بر تشکیل سله) بر شدت فرسایش پاشماني تحت بارندگی مصنوعی پرداختند. یافته‌های آنها نشان داد که خاک‌های مرطوب که سطح آنها به دلیل تجمع آب و ایجاد سله حفظ

در فرسایش پاشمانی نیز تحت تأثیر عواملی مانند شیب و شدت باران است.

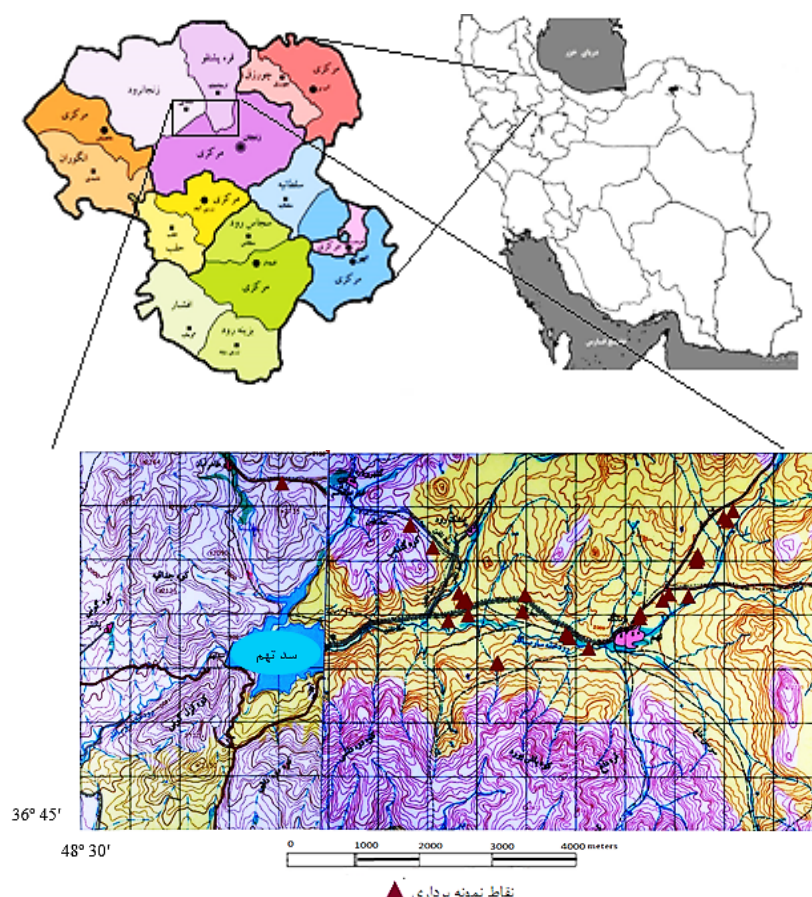
شدت فرسایش پاشمانی در مناطق مختلف اقلیمی به دلیل تفاوت در پوشش گیاهی و شرایط بارندگی متفاوت است. در مناطق نیمه‌خشک، به دلیل محدودیت‌های رطوبتی و کمبود مواد آلی، پایداری خاکدانه عموماً کم بوده و خاک‌ها مستعد فرسایش پاشمانی هستند. در کشتزارهای دیم که با محدودیت‌های رطوبتی و پوشش گیاهی کم مواجه هستند، فرسایش پاشمانی می‌تواند منجر به از دست رفتن لایه سطحی خاک، تخریب ساختمان و کاهش باروری خاک شود. چنین شرایطی اغلب در اوایل بهار که کشتزارهای دیم فاقد پوشش گیاهی مناسب هستند، فراهم است؛ بنابراین، بررسی حساسیت خاک‌ها به فرسایش پاشمانی و نقش ویژگی‌های خاک در آن در کشتزارهای دیم مناطق نیمه‌خشک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یافته‌های این پژوهش می‌تواند به توسعه راهکارهای مدیریتی مناسب برای حفاظت از خاک و افزایش بهره‌وری کشاورزی در کشتزارهای دیم کمک کند.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری خاک‌ها

این پژوهشی با هدف بررسی فرسایش پاشمانی در کشتزارهای دیم حوزه آبخیز تهم‌چای واقع در ۱۵ کیلومتری شمال غرب استان زنجان انجام شد (شکل ۱). برای این منظور، ۳۰ کشتزارهای دیم در محدود جغرافیایی $36^{\circ}47'58''$ عرض شمالی و طول $32^{\circ}45'$ 48° شرقی انتخاب شد و نمونه‌های خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر برداشت شد. گزارش‌ها نشان می‌دهد که خاک‌های منطقه اغلب آهکی هستند و از ماده آلی کمتری برخوردارند. دشت‌های مرتفع، خاک‌های متنوعی با عمق‌های متفاوت و شدت آهک متغیر را در برمی‌گیرند؛ به‌گونه‌ای که از خاک‌های عمیق با تجمع آهک تا خاک‌های سطحی با سنگ‌ریزه دیده می‌شود. بر اساس روش طبقه‌بندی خاک آمریکا (USDA)، اغلب خاک‌ها در زیر رده کلسی زیرپ قرار می‌گیرند (۳۴). فرسایش‌های آبی در کشتزارهای دیم

شده بود، به طور چشمگیری (تا ۷۰٪) فرسایش پاشمانی کمتری را نسبت به خاک‌های خشک نشان دادند. همچنین تشکیل سله در خاک سیلتی لومی با افت محسوس در هدایت هیدرولیکی اشباع همراه بود؛ درحالی‌که در خاک لومی شنی، به علت شکل‌گیری سریع‌تر سله‌های مقاوم، این کاهش به‌مراتب کمتر بود. با وجود اختلاف در شدت فرسایش اندازه‌گیری‌شده توسط دستگاه‌های باران‌ساز مختلف، روند کلی افزایش فرسایش با افزایش شدت بارندگی در هر دو نوع خاک مشابه بود. محمودآبادی و سجادی (۲۲) نشان دادند که مقدار انتقال مواد در فرسایش بارانی تحت تأثیر اثر متقابل قطره باران و جریان روی خاک است و با افزایش شیب، سهم انتقال ذرات با جریان آب کم می‌شود. سعیدی و همکاران (۲۵) چگونگی اثر مستقیم و غیرمستقیم ویژگی‌های خاک، به‌ویژه در شرایط کمبود پوشش گیاهی، بر شدت فرسایش پاشمانی در خاک‌های آهکی با پوشش گیاهی محدود منطقه لردگان ایران را بررسی کردند. نتایج نشان داد که میانگین قطر وزنی خاک (MWD) دارای بیشترین تأثیر مستقیم و مقاومت برشی سطحی (SSS) از طریق تأثیر بر MWD، دارای بیشترین تأثیر غیرمستقیم بر شدت فرسایش پاشمانی است. اثر معنی‌داری از اندازه ذرات خاک بر فرسایش در سطوح زیاد شیب و شدت بارندگی دیده نشد. جزء سیلت ریز خاک، نقش دوگانه‌ای در فرسایش پاشمانی ایفا کرد؛ از یک‌سو، قابلیت زیاد جداشدگی آن منجر به افزایش فرسایش شد و از سوی دیگر، توانایی آن در تشکیل پوسته سطحی، فرسایش را کاهش داد. تأثیر غیرمستقیم ماده آلی خاک از طریق ارتباط با پایداری ساختمان و مقاومت برشی به‌مراتب قوی‌تر از اثر مستقیم آن بر فرسایش بود. مطالعه‌ای مقدم و همکاران (۲۳) نشان دادند که کاربری اراضی و مدیریت خاک از طریق تأثیر بر ماده آلی و مقاومت برشی سطحی، نقش مهم‌تری در فرسایش پاشمانی نسبت به توزیع اندازه ذرات داشتند. مرتع تخریب‌شده بیشترین و مرتع کمترین شدت فرسایش پاشمانی را نشان داد. صادقی و همکاران (۲۶) نشان دادند که نوع ذرات انتقال‌یافته



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه و نقاط نمونه‌برداری خاک در کشتزارهای دیم در حوزه آبخیز تهیم، شمال غرب زنجان

به شکل‌های مختلف از جمله بارانی (پاشمائی)، بین‌شیاری، شیاری و حتی آب‌کندی در کشتزارهای دیم دیده می‌شود.

اندازه‌گیری فرسایش پاشمائی

به منظور بررسی فرسایش پاشمائی در کشتزارهای دیم، نمونه‌برداری از خاکدانه‌ها با قطر مشخص (۶ تا ۸ میلی‌متر) انجام شد. در این راستا، کاسه‌های پاشمان با قطر ۱۰ سانتی‌متر از جنس گالوانیزه با دیواره غیرقابل نفوذ و کف مشبک برای زهکشی مطلوب ساخته شدند. به منظور ایجاد شرایط زهکشی مناسب، در کف هر کاسه، ابتدا یک لایه توری و سپس دو سانتی‌متر شن قرار داده شد. خاکدانه‌ها با استفاده از الک‌های ۸ و ۶ میلی‌متر از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک برداشت شده و به درون ظروف پاشمان ریخته شدند. به منظور بررسی فرسایش پاشمائی،

از دستگاه شبیه‌ساز باران با ارتفاع ۲۸۷ سانتی‌متر و صفحه بارشی به ابعاد ۹۰ × ۱۲۸ سانتی‌متر استفاده شد. این دستگاه مجهز به ۵۰۰ نازل بود و قادر به تولید باران با شدت متغیر (۴۰ تا ۱۲۰ میلی‌متر بر ساعت) و قطر قطره حدود ۳ میلی‌متر بود. برای اطمینان از شدت بارندگی یکنواخت و با توجه به اینکه باران‌ساز استفاده‌شده از نوع قطره‌ساز با متوسط قطر قطره ۲/۶۵ میلی‌متر بود، شدت باران ۶۰ میلی‌متر بر ساعت تنظیم شد. هر ظرف پاشمان حاوی خاکدانه‌ها، چهار بار به مدت ۳۰ دقیقه و با فواصل زمانی ۱۴ روز تحت باران شبیه‌سازی‌شده قرار گرفت. برای تعیین شدت فرسایش پاشمائی خاک، سه کاسه پاشمان محتوی خاک روی سیمی قرار داده شدند و در زیر باران‌ساز قرار داده شد (شکل ۲). ذرات پاشمان‌یافته به درون سینی پاشمان در آون و در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک‌شده و توزین گردیدند. شدت فرسایش پاشمائی از مقدار خاک پاشمان‌یافته



شکل ۲. نمایی از کاسه پاشمان و حفاظ روی آن برای اندازه‌گیری پاشمان زیر دستگاه باران‌ساز

در واحد سطح و واحد زمان ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$) به دست آمد.

تعیین ویژگی‌های خاک

به منظور تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، از هر یک از ۳۰ کشتزار مورد بررسی، سه نمونه خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری تهیه شد. برای تعیین توزیع اندازه ذرات خاک از روش هیدرومتری (۱۲) استفاده شد. اندازه‌گیری رس پراکنش‌پذیر با روش هیدرومتری (۱۲) انجام شد. pH خاک در گل اشباع با استفاده از pH متر (۲۷)، هدایت الکتریکی (EC) در عصاره گل اشباع با EC متر (۲۴)، ماده آلی خاک به روش احتراق مرطوب (۳۷)، درصد کربنات کلسیم معادل با روش خنثی‌سازی اسیدکلریدریک نرمال (۲۴)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) و درصد سدیم تبادلی (ESP) با روش استات آمونیوم تعیین شد (۲۹). چگالی ظاهری با روش سیلندر فلزی (۵) تعیین شد. ضریب آب‌گذری اشباع (K_s) به روش بار ثابت (۱۵) تعیین شد. پایداری خاکدانه‌ها به دو روش تعیین شد: آزمون رهاسازی قطره آب و الک تر و در روش اول قطراتی با قطر حدود ۳ میلی‌متر از ارتفاع ۲/۵ متر بر خاکدانه‌ها برخورد داده شدند و تعداد قطرات لازم برای نابودی کامل خاکدانه‌ها تعیین شد. در روش الک تر، خاکدانه‌های با قطر ۶ تا ۸ میلی‌متر پس از قرارگیری روی سری الک‌ها با قطر ۶، ۴/۷۵، ۲، ۱/۱۸، ۰/۶

و ۰/۲۵ میلی‌متر، به مدت یک دقیقه در آب مقطر تحت تأثیر حرکت مکانیکی قرار گرفتند. زمان یک دقیقه بر اساس آزمایش‌های مقدماتی و به دلیل حساسیت زیاد خاکدانه‌ها به تخریب در آب انتخاب شد. در نهایت، با استفاده از معادلات ۱ و ۲، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار محاسبه شد.

$$\text{MWD}_{\text{wet}} = \sum_{i=1}^n W_i X_i \quad (1)$$

که در آن: X_i : میانگین قطر خاکدانه‌های روی هر الک (mm)، W_i : نسبت وزن خاکدانه‌های روی هر الک (gr) به وزن کل خاکدانه‌های خاک (gr) و n : تعداد الک است.

نسبت وزن خاکدانه‌ها به کمک معادله ۲ محاسبه شد.

$$W_i = \frac{W_i(a+s) - W_i(s)}{\sum_{i=1}^n W_i(a+s) - \sum_{i=1}^n W_i(s)} \quad (2)$$

که در آن: $W_i(a+s)$: جرم خاک روی هر الک (خاکدانه باقی‌مانده + شن) و $W_i(s)$: جرم شن روی هر الک (گرم) است (۳۹).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

داده‌های به‌دست‌آمده پیش از انجام تجزیه و تحلیل، از نظر توزیع نرمال به روش هیستوگرام و با تحلیل چولگی و کشیدگی داده‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. برای تعیین ویژگی‌های خاک مؤثر بر فرسایش پاشمانی، از ماتریس همبستگی به روش پیرسون استفاده شد. برای انجام تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۹ استفاده شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک‌ها

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس نتایج، خاک کشتزارهای مورد بررسی در چهار گروه بافتی شامل ۱۰ خاک لوم رسی، ۹ خاک لوم‌شنی، ۹ خاک لوم‌رس‌شنی و ۲ خاک شن‌لومی قرار داشتند. تغییرات زیادی از نظر درصد سنگ‌ریزه میان خاک‌ها بود؛ به‌طوری که کمترین مقد آن در خاک لوم رسی (۵/۱۵ درصد) و بیشترین مقدار آن در خاک لوم‌شنی (۱۲/۷۶ درصد) بود. خاک‌ها از مقدار بسیار کمی ماده آلی برخوردار هستند و مقدار آن از ۰/۷۵ درصد در خاک لوم‌شنی تا ۱/۱۶ درصد در خاک شن‌لومی متغیر است. خاک‌ها تقریباً آهکی هستند. با این حال تفاوت اساسی میان خاک‌ها از نظر مقدار کربنات کلسیم معادل وجود ندارد. بررسی مقدار درصد سدیم تبادلی نشان می‌دهد که خاک‌ها دارای ویژگی سدیمی نیستند. بین خاک‌ها، خاک رسی (۴/۷۳ درصد) از بیشترین مقدار درصد سدیم تبادلی برخوردار است. خاک‌ها از نظر پایداری خاکدانه تفاوت اساسی دارند و کمترین مقدار آن در خاک لوم رسی (۱/۱۷ میلی‌متر) و بیشترین مقدار در خاک شن‌لومی (۲/۳۹ میلی‌متر) است. این ویژگی از ویژگی‌های مهم فیزیکی است که می‌تواند مقاومت خاک را در برابر فرایندهای فرسایش بارانی تحت تأثیر قرار دهد (۲۰). هدایت هیدرولیکی اشباع که ویژگی مهم فیزیکی خاک از نظر رفتار آب در خاک است (۲۷)، از ۳/۱۸ سانتی‌متر بر ساعت در خاک لوم رسی تا ۶/۲۴ سانتی‌متر بر ساعت در خاک لوم‌شنی متغیر است. این ویژگی خاک از یک‌سو تحت تأثیر توزیع اندازه ذرات و از سوی دیگر تحت تأثیر پایداری ساختمان خاک (۱۰) است. وجود ذرات درشت معدنی (شن و سنگ‌ریزه) از یک‌سو و پایداری خاکدانه بالا از سوی دیگر در خاک لوم‌شنی باعث زیاد بودن هدایت هیدرولیکی اشباع در این خاک می‌شود.

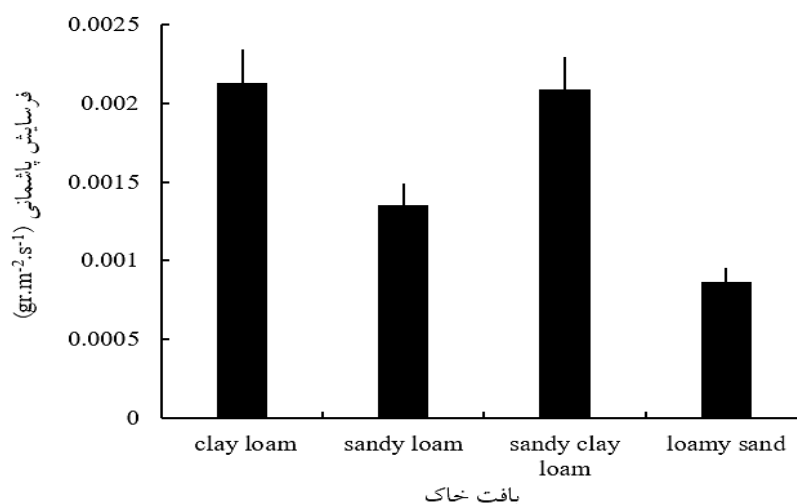
فرسایش پاشماني در خاک‌ها

فرسایش پاشماني در خاک‌های با بافت مختلف در شکل ۳ نشان

داده شده است. نتایج نشان داد بیشترین مقدار فرسایش پاشماني در خاک‌های با بافت لوم‌رسی ($0/0021 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) و کمترین شدت آن در خاک‌های با بافت شن‌لومی ($0/0008 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) دیده شد. فرسایش پاشماني در خاک‌های ریزبافت (لوم رسی و لوم رس‌شنی) به دلیل برخورداری از درصد بیشتری از ذرات ریز و امکان پراکنش آسان آنها با قطرات برگشت یافته زیاد است؛ درحالی‌که خاک‌های درشت‌بافت (لوم‌شنی و شن‌لومی) به دلیل ساختمان و پایداری بیشتر خاکدانه‌ها، مقاومت بیشتری در برابر فرسایش پاشماني نشان می‌دهند. از سوی دیگر، خاک‌های ریزبافت از رطوبت اولیه بیشتری برخوردارند. افزایش رطوبت اولیه خاک، نقش مهمی در ناپایداری خاکدانه‌ها و کاهش مقاومت آنها در برابر فرایند پاشمان ایفا می‌کند (۴۲). لی و همکاران (۱۹) دریافتند که افزایش پراکندگی ذرات خاک در رطوبت‌های کم، فرسایش پاشماني را کاهش می‌دهد؛ اما در رطوبت‌های زیاد یا اشباع، آن را تشدید می‌کند و همچنین حساسیت خاک به تغییرات رطوبت را افزایش می‌دهد. در پژوهشی واعظی و سهندی (۳۲) نشان دادند که خاک لوم‌شنی بیشترین حساسیت به فرسایش پاشماني را داشت و تخریب ساختمان خاک، فرسایش پاشماني آن را به طور قابل توجهی افزایش داد. همچنین، تخریب ساختمان خاک منجر به کاهش چگالی ظاهری، پایداری خاکدانه و هدایت هیدرولیکی اشباع شد. ارتباط معناداری بین تغییرات فرسایش پاشماني و هدایت هیدرولیکی اشباع دیده شد؛ به‌طوری که با کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع، فرسایش پاشماني افزایش یافت. در پژوهشی دیگر واعظی و فرومدی (۳۳) بیان کردند که بیشترین فرسایش پاشماني در خاک لوم رسی و کمترین آن در خاک لوم رس‌شنی رخ داد. با افزایش شیب، فرسایش پاشماني افزایش یافت. انتخاب‌پذیری ذرات تحت تأثیر توزیع اندازه ذرات، شیب سطح و برهم‌کنش آنها قرار گرفت. سیلت حساس‌ترین ذره به پاشمان و شن مقاوم‌ترین آنها بود. در بیشتر بافت‌ها، انتخاب‌پذیری ذرات سیلت در شیب‌های مختلف بیشتر از سایر ذرات بود؛ اما در خاک لوم، رس بیشتر از سیلت انتخاب شد. مطالعه‌ای که توسط

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مورد بررسی

ویژگی‌های فیزیکی	لوم رسی	لوم شنی	لوم رس شنی	شن لومی
شن (درصد)	۳۸/۰۸	۷۰/۴۵	۵۲/۵۵	۸۳/۹۵
سیلت (درصد)	۲۹/۴۱	۱۴/۶۴	۲۱/۲۴	۱۱/۲۰
رس (درصد)	۳۲/۴۹	۱۴/۹۰	۲۶/۲۰	۴/۸۳
سنگ‌ریزه (درصد)	۵/۱۵	۱۴/۱۶	۷/۴۷	۱۲/۷۶
رس پراکنش پذیر (درصد)	۱۷/۳۸	۱۰/۲۹	۱۵/۶۴	۶/۵۰
ماده آلی (درصد)	۰/۷۷	۰/۷۵	۰/۷۸	۱/۱۶
کربنات کلسیم معادل (درصد)	۱۰/۹۲	۹/۶۳	۹/۴۰	۹/۷۱
درصد سدیم تبادلی	۴/۷۳	۲/۲۹	۱/۷۶	۱/۶۴
چگالی ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۱/۲۹	۱/۴۴	۱/۳۲	۱/۴۱
پایداری خاکدانه (میلی‌متر)	۱/۱۷	۲/۲۵	۱/۲۹	۲/۳۹
هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی‌متر بر ساعت)	۳/۱۸	۶/۲۴	۳/۵۸	۴/۱۸



شکل ۳. شدت فرسایش پاشماني در خاک‌های با بافت مختلف

دارند؛ درحالی‌که خاکدانه‌های موجود در خاک‌هایی با بافت لوم‌سیلتی و شنی کم‌ترین پاشمان را دارند.

تأثیر ویژگی‌های خاک بر فرسایش پاشماني

نتایج تأثیر ویژگی‌های خاک بر پاشمان ذرات خاک به صورت ماتریس همبستگی در جدول ۲ نشان داده شده است. توزیع اندازه ذرات خاک به طور قابل توجهی بر شدت فرسایش پاشماني

بالیانی و همکاران (۳) به بررسی تغییرپذیری فرسایش پاشماني در خاک‌های با بافت‌های مختلف در ارتباط با تندی شیب پرداختند، نتایج نشان داد که فرسایش پاشماني به طور معناداری تحت تأثیر شیب سطح قرار می‌گیرد. در پژوهشی ون دایک و همکاران (۳۵) به این نتیجه رسیدند که خاک‌های مختلف به یک شدت پاشمان ندارند. خاک‌های لوم‌رس‌سیلتی و لوم‌رسی بیشترین مقاومت و استحکام را در برابر تخریب قطرات باران

جدول ۲. همبستگی بین فرسایش پاشمانی و ویژگی‌های خاک

	Sa	Si	Cl	Gr	D.Cl	BD	MWD	D.T	Ks	OM	ESP	CaCO ₃	Sp. E.
Sa ^۱	۱												
Si	-۰/۹۰ ^{۰۰}	۱											
Cl	-۰/۹۵ ^{۰۰}	۰/۷۳ ^{۰۰}	۱										
Gr	۰/۵۸ ^{۰۰}	-۰/۶۰ ^{۰۰}	-۰/۵۲ ^{۰۰}	۱									
D.Cl	-۰/۵۹ ^{۰۰}	۰/۶۱ ^{۰۰}	۰/۵۲ ^{۰۰}	-۰/۵۱ ^{۰۰}	۱								
BD	۰/۴۵ ^{۰۰}	-۰/۵۰ ^{۰۰}	-۰/۴۱ ^{۰۰}	۰/۷۶ ^{۰۰}	-۰/۵۱ ^{۰۰}	۱							
MWD	۰/۷۰ ^{۰۰}	-۰/۶۳ ^{۰۰}	-۰/۶۷ ^{۰۰}	۰/۴۴ ^{۰۰}	-۰/۵۷ ^{۰۰}	۰/۳۹ ^{۰۰}	۱						
D.T	۰/۴۸ ^{۰۰}	-۰/۴۶ ^{۰۰}	-۰/۴۴ ^{۰۰}	۰/۱۰	-۰/۲۱ ^۰	۰/۰۶	۰/۴۸ ^{۰۰}	۱					
Ks	۰/۷۵ ^{۰۰}	-۰/۶۹ ^{۰۰}	-۰/۶۸ ^{۰۰}	۰/۶۵ ^{۰۰}	-۰/۵۶ ^{۰۰}	۰/۵۲ ^{۰۰}	۰/۷۲ ^{۰۰}	۰/۳۵ ^{۰۰}	۱				
OM	-۰/۲۲ ^{۰۰}	-۰/۲۴ ^{۰۰}	-۰/۲۰	-۰/۱۴	-۰/۲۲ ^۰	-۰/۰۰	۰/۲۸ ^{۰۰}	۰/۱۰	-۰/۰۲	۱			
ESP	۰/۲۸ ^{۰۰}	-۰/۳۹ ^{۰۰}	-۰/۱۶	۰/۴۶ ^{۰۰}	-۰/۱۸	۰/۴۴ ^{۰۰}	۰/۰۳	۰/۰۸	-۰/۱۷	۰/۰۷	۱		
CaCO ₃	۰/۲۶ ^{۰۰}	-۰/۴۲ ^{۰۰}	-۰/۱۱	۰/۲۳ ^{۰۰}	-۰/۴۶ ^{۰۰}	۰/۱۶	۰/۵۴ ^{۰۰}	۰/۲۶ ^{۰۰}	-۰/۲۴ ^{۰۰}	۰/۱۶	۰/۲۳ ^{۰۰}	۱	
Sp. E.	-۰/۴۶ ^{۰۰}	۰/۴۳ ^{۰۰}	۰/۴۴ ^{۰۰}	-۰/۵۳ ^{۰۰}	۰/۴۷ ^{۰۰}	-۰/۶۰ ^{۰۰}	-۰/۴۴ ^{۰۰}	-۰/۱۱	-۰/۴۴ ^{۰۰}	-۰/۲۳ ^{۰۰}	-۰/۱۲	-۰/۲۲ ^{۰۰}	۱

°: معنی‌دار در سطح احتمال ۹۵ درصد ($p < ۰/۰۵$) و °°: معنی‌دار در سطح احتمال ۹۹ درصد ($p < ۰/۰۱$) است.
 Sa^۱: شن، Si: سیلت، Cl: رس، Gr: سنگ‌ریزه، D.Cl: رس پراکنش‌پذیر، BD: چگالی ظاهری، MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه، D.T: آزمون قطره آب، Ks: هدایت هیدرولیکی اشباع، OM: ماده آلی، ESP: درصد سدیم تبادل، CaCO₃: کربنات کلسیم معادل، Sp. E: فرسایش پاشمانی.

پاشمانی اثر می‌گذارد؛ به‌طوری که همبستگی مثبتی میان فرسایش پاشمانی و درصد ذرات سیلت ($r = ۰/۴۳$ و $p < ۰/۰۱$)، رس ($r = ۰/۴۴$ و $p < ۰/۰۱$) و رس پراکنش‌پذیر ($r = ۰/۴۴$ و $p < ۰/۰۱$) وجود دارد؛ بااین‌حال، همبستگی منفی بین فرسایش پاشمانی و درصد ذرات شن ($r = -۰/۴۶$ و $p < ۰/۰۱$) و سنگ‌ریزه ($r = -۰/۵۳$ و $p < ۰/۰۱$) دیده می‌شود. افزون بر این، سایر ویژگی‌های خاک شامل چگالی ظاهری ($p < ۰/۰۱$)

پاشمانی اثر می‌گذارد؛ به‌طوری که همبستگی مثبتی میان فرسایش پاشمانی و درصد ذرات سیلت ($r = ۰/۴۳$ و $p < ۰/۰۱$)، رس ($r = ۰/۴۴$ و $p < ۰/۰۱$) و رس پراکنش‌پذیر ($r = ۰/۴۴$ و $p < ۰/۰۱$) وجود دارد؛ بااین‌حال، همبستگی منفی بین فرسایش پاشمانی و درصد ذرات شن ($r = -۰/۴۶$ و $p < ۰/۰۱$) و سنگ‌ریزه ($r = -۰/۵۳$ و $p < ۰/۰۱$) دیده می‌شود. افزون بر این، سایر ویژگی‌های خاک شامل چگالی ظاهری ($p < ۰/۰۱$)

می‌گیرند (۶). بررسی‌های لگوت و همکاران (۲۰۰۵) نشان داد که بین شدت پاشمان و پایداری خاکدانه‌ها بر مبنای میانگین وزنی قطر همبستگی منفی وجود دارد (۱۶). عملیات خاک‌ورزی نقش مهمی در محتوای ماده آلی خاک و ساختمان خاک دارند. گزارش‌ها نشان می‌دهد حفظ بقایای گیاهی در خاک و برگرداندن آن به خاک در روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی می‌تواند در افزایش محتوای ماده آلی خاک و بهبود ساختمان خاک مفید بوده و از حساسیت خاک‌ها به فرسایش پاشمانی و تشکیل سله بکاهد (۴۳).

نتیجه‌گیری

بررسی حساسیت خاک کشتزارهای دیم در منطقه نیمه‌خشک به فرسایش پاشمانی نشان می‌دهد که خاک‌ها مقاومت متفاوتی در برابر فرایند پاشمانی ذرات دارند. کمترین مقاومت در برابر فرسایش پاشمانی در خاک‌های با بافت لوم رسی و بیشترین مقاومت در خاک‌های با بافت شن لومی دیده می‌شود. این موضوع از یک‌سو تحت تأثیر توزیع اندازه ذرات اولیه خاک و از سوی دیگر تحت تأثیر توزیع اندازه ذرات ثانویه خاک است. وابستگی مثبت بین پدیده پاشمان با درصد ذرات سیلت و رس و وابستگی منفی آن با درصد ذرات درشت‌دانه نشان از آن است که خاک‌های درشت‌بافت حساسیت کمتری به فرسایش پاشمانی را دارند. از سوی دیگر خاک‌های دارای خاکدانه پایدار، به دلیل مقاومت بیشتر در برابر ضربه قطرات و هدایت هیدرولیکی بیشتر، حساسیت کمتری نسبت به پدیده پاشمان دارند. در کشتزارهای که خاک آنها از عوامل پیونددهنده ذرات مانند ماده آلی و آهک برخوردارند و فراوانی کمتری از ذرات رس پراکنش‌پذیر و سدیم تبدلی دارند، قابلیت تولید خاکدانه پایدار و مقاوم در برابر فرایند پاشمان دارند. حفظ بقایای گیاهی و کاهش عملیات خاک‌ورزی می‌تواند نقش مثبت در تقویت ساختمان خاک و کاهش حساسیت آن به فرایند پاشمان در کشتزارهای دیم داشته باشد.

ذرات ریزدانه مانند رس و سیلت هستند، حساسیت کمتری به فرسایش پاشمانی دارند. در پژوهشی لی و همکاران (۱۹) بیان کردند که پراکنش‌پذیری خاک تأثیر قابل توجهی بر فرسایش پاشمانی دارد. در رطوبت‌های کم، افزایش پراکنش‌پذیری خاک فرسایش پاشمانی را کاهش می‌دهد؛ درحالی‌که در رطوبت‌های زیاد، آن را افزایش می‌دهد. همچنین، پراکنش‌پذیری خاک باعث کاهش نفوذ آب و افزایش رواناب سطحی می‌شود که در نتیجه، خطر انتقال ذرات خاک پاشمان‌شده توسط رواناب افزایش می‌یابد. در پژوهشی فن و لی (۹) بیان کردند که شن ریز قابلیت جداشدگی بیشتری را نسبت به شن درشت دارد و ذرات رس به دلیل چسبندگی قابلیت جداشدگی کمی دارند. در پژوهشی که توسط پژوهش‌الدوره و بردفورد (۱) انجام شد، نتایج نشان داد که عواملی مانند درصد رس، شدت ماده آلی، مقدار سدیم و شدت نمک‌های محلول خاک بر پاشمان مؤثر هستند و به طور کلی مقاومت برشی خاک بیشترین همبستگی را با شدت پاشمان خاک دارد.

ساختمان خاک و قابلیت نفوذ آب به خاک نیز از دیگر ویژگی‌های مهم فیزیکی خاک هستند که فرسایش پاشمانی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. خاک‌هایی که از ساختمان پایداری برخوردارند، قابلیت نفوذ آب به خاک بیشتر را دارند و در نتیجه مقاومت آنها در برابر تخریب در اثر ضربه قطرات باران بیشتر بوده و در حین بارندگی به میزان کمتری دچار افت شدت نفوذ آب به خاک در اثر اندوده بندی می‌شود (۷). چنین خاک‌هایی غالباً از مقدار ماده آلی و کربنات کلسیم معادل بیشتری برخوردارند. این دو عامل نقش مهمی در هم‌آوری ذرات اولیه خاک و در نتیجه تقویت ساختمان در خاک‌های منطقه نیمه‌خشک ایفا می‌کنند (۸). کلیشادی و همکاران (۱۳) نشان دادند که ویژگی‌های ساختمانی در کنار توزیع اندازه ذرات اولیه از عوامل مهم مؤثر بر پاشمان هستند. کویو (۱۹۹۱) نشان داد که شدت جداشدگی ذرات در اثر باران با ماده آلی نسبت عکس دارد. خاکدانه‌های درشت به دلیل برخورداری از محتوای ماده آلی زیاد کمتر تحت تأثیر جداشدگی ذرات در اثر باران قرار

References

منابع مورد استفاده

1. Al-Durrah, M. M. and J. M. Bradford. 1982. Parameters for describing soil detachment due to single waterdrop impact. *Soil Science Society of America Journal* 46(4): 836-840.
2. Bai, Y. and H. Cui. 2021. An improved vegetation cover and management factor for RUSLE model in prediction of soil erosion. *Environmental Science and Pollution Research* 28(17): 21132-21144.
3. Baliani, A., A. R. Vaezi and H. Emami. 2018. Variability of splash erosion from slope steepness and soil properties. *Iranian Journal of Watershed Science and Engineering* 12(41): 95-104 (in Farsi).
4. Beczek, M., M. Ryżak, R. Mazur, A. Sochan, C. Polakowski and A. Bieganski. 2022. Influence of slope incline on the ejection of two-phase soil splashed material. *Plos one* 17(1): e0262203.
5. Black, A. L. and K. H. Hartge. 1986. Bulk density. PP. 374-380. In: A. Klute (Ed.) *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Method*. American Society of Agronomy—Soil Science Society of America, Madison.
6. Ekwue, E.I.M. 1991. The effects of soil organic matter content, rainfall duration, and aggregate size on soil detachment. *Soil Technology* 4: 197-207.
7. Castiglioni, M. G., M. C. Sasal, M. Wilson and J. D. Oszust. 2018. Seasonal variation of soil aggregate stability, porosity and infiltration during a crop sequence under no tillage. *Terra Latinoamericana* 36(3): 199-209.
8. Chaney, K. and R. S. Swift. 1984. The influence of organic matter on aggregate stability in some British soils. *Journal of Soil science* 35(2): 223-230.
9. Fan, R. and Z. Li. 1993. Rainsplash and sediment transport model on the slope. *Journal of Hydraulic Engineering* 6: 24-29.
10. Fox, D. M., F. Darboux and P. Carrega. 2007. Effects of fire-induced water repellency on soil aggregate stability, splash erosion, and saturated hydraulic conductivity for different size fractions. *Hydrological Processes: An International Journal* 21(17): 2377-2384.
11. Fu, Y., G. L. Li, T. H. Zheng, and T. Zhang. 2017. Splash detachment and transport of loess aggregate fragments by raindrop action. *Catena* 150: 154-160.
12. Gee, G. W. and J. W. Bauder. 1986. Particle-size analysis. PP. 383-411. In: A. Klute (Ed.). *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, Madison.
13. Kelishadi, H., M.R. Mosaddeghi, S. Ayoubi and H. Asadi. 2019. Evaluation of different methods of soil structural stability determination for predicting splash erosion. *Agricultural Engineering* 41(4): 1-15.
14. Kinnell, P. I. A. 2022. Insights into the sediment transport processes operating in rain-impacted flows. *Catena* 217: 106452.
15. Klute, A. and C. Dirksen. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. PP. 687-734. In: A. Klute (Ed.). *Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical methods*, Agronomy Monograph, Madison.
16. Legout, C., S. Leguedois, Y. Le Bissonnais and O.M. Issa. 2005. Splash distance and size distribution for various soils. *Geoderma* 124 (3-4): 279-292.
17. Liu, T., J. Luo, Z. Zheng, T. Li and S. He. 2016. Effects of rainfall intensity on splash erosion and its spatial distribution under maize canopy. *Natural Hazards* 84(1): 233-247. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2418-6>
18. Li, S., H. Li, C.Y. Xu, X.R. Huang, D.T. Xie and J.P. Ni. 2013b. Particle interaction forces induce soil particle transport during rainfall. *Soil Science Society of America Journal* 77(5): 1563-1571.
19. Li, X., H. Fan, F. Xie, B. Lei and G. Ren. 2024. The role of soil dispersivity and initial moisture content in splash erosion: Findings from consecutive single-drop splash tests. *Biosystems Engineering* 243: 27-41.
20. Ma, R., F. Hu, C. Xu, J. Liu and S. Zhao. 2022. Response of soil aggregate stability and splash erosion to different breakdown mechanisms along natural vegetation restoration. *Catena* 208: 105775.
21. Ma, B., X.L. Yu, F. Ma, Z.B. Li and F.Q. Wu. 2014. Effects of crop canopies on rain splash detachment. *PLoS One* 9: e99717.
22. Mahmoodabadi, M. and S.A. Sajjadi. 2016. Effects of rain intensity, slope gradient and particle size distribution on the relative contributions of splash and wash loads to rain-induced erosion. *Geomorphology* 253: 159-167 (in Farsi).
23. Moghadam, B. K., M. Jabarifar, M. Bagheri and E. Shahbazi. 2015. Effects of land use change on soil splash erosion in the semi-arid region of Iran. *Geoderma* 241: 210-220.
24. Page, M. C., D. L. Sparks and M. R. Noll. 1987. Kinetics and mechanisms of potassium release from sandy middle Atlantic coastal. Plain soils. *Soil Science Society of America Journal* 51(6): 1460-1465.
25. Saedi, T., M. Shorafa, M. Gorji and B. K. Moghadam. 2016. Indirect and direct effects of soil properties on soil splash erosion rate in calcareous soils of the central Zagross, Iran: A laboratory study. *Geoderma* 271: 1-9.

26. Sadeghi, S.H., M. Kiani Harchegani and H. Asadi. 2016. Splash particle size distribution along the experimental flume under different rainfall intensities and slopes. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 47(4): 657-664 (in Farsi).
27. Sarki, A., M. S. Mirjat, A. A. Mahessar, S. M. Kori and A. L. Qureshi. 2014. Determination of saturated hydraulic conductivity of different soil texture materials. *Journal of Agriculture and Veterinary Science* 7(12): 56-62.
28. Sun, S.X., Y.X. Zhang and P.S. Lei. 2021. Mass exchange of water and soil on the soil surface in the rainfall splash erosion. *Front. Earth Science* 9: 739804.
29. Sumner, M. E. and W. P. Miller. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficients. *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods* 5: 1201-1229.
30. Tao, W., Q. Wang, L. Guo and H. Lin. 2020. A new analytical model for predicting soil erosion and nutrient loss during crop growth on the Chinese loess plateau. *Soil Tillage Research* 199: 104585 <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104585>
31. Thomas, G. W. 1996. Soil pH and soil acidity. PP. 475-490. In: Sparks (Ed.). *Methods of soil analysis: part 3 chemical methods*, Soil Science Society of America, Madison.
32. Vaezi, A.R. and K. Sahandi. 2019. The effect of soil structure destruction on splash erosion in soils with different textures. *Iranian Journal of Watershed Science and Engineering* 14(48): 11-20 (in Farsi).
33. Vaezi, A.R. and M. Fromadi. 2019. The effect of surface slope on particle selectivity in splash erosion in different soils. *Applied Soil Research* 8(2): 99-111 (in Farsi).
34. Vaezi, A. R., M. Ahmadi and A. Cerdà. 2017. Contribution of raindrop impact to the change of soil physical properties and water erosion under semi-arid rainfalls. *Science of the Total Environment* 583: 382-392.
35. Van Dijk, A. I. J. M., A. G. C. A. Meesters and L. A. Bruijnzeel. 2002. Exponential distribution theory and the interpretation of splash detachment and transport experiments. *Soil Science Society of America Journal* 66(5): 1466-1474.
36. Wang, L., F.L. Zheng, W. Hu, X.C.J. Zhang and H.Q. Shi. 2023b. Interactive effects of rainfall intensity, kinetic energy and antecedent soil moisture regime on splash erosion in the Ultisol region of South China. *Catena* 222: 106863.
37. Walkly, A. and I. A. Black. 1934. An examination of digestion methods for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic and titration. *Soil Science Society of America Journal* 37: 29-38.
38. Wuepper, D., P. Borrelli and R. Finger. 2020. Countries and the global rate of soil erosion. *Nature Sustainability* 3: 51-55. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0438-4>
39. Yoder, R. E. 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses 1. *Agronomy Journal* 28(5):337-351.
40. Yuan, C.J., J.Q. Lin, B.Wang, D.M. Yang, N.F. Fang, L.S. Ni and Z.H. Shi. 2023. Variable response of particles and inorganic carbon of two different soils during splash erosion. *Catena* 224: 106958.
41. Zambon, N., L.L. Johannsen, P. Strauss, T. Dostal, D. Zumr, M. Neumann, T.A. Cochrane and A. Klik. 2020. Rainfall parameters affecting splash erosion under natural conditions. *Applied Sciences* 10(12): 4103. <https://doi.org/10.3390/app10124103>
42. Zambon, N., L. L. Johannsen, P. Strauss, T. Dostal, D. Zumr, T. A. Cochrane and A. Klik. 2021. Splash erosion affected by initial soil moisture and surface conditions under simulated rainfall. *Catena* 196: 104827.
43. Zhang, Y., C. Tan, R. Wang, J. Li and X. Wang. 2021. Conservation tillage rotation enhanced soil structure and soil nutrients in long-term dryland agriculture. *European Journal of Agronomy* 131: 126379.
44. Zhu, X., W. Liu, X. Yuan, C. Chen, K. Zhu, W. Zhang and B. Yang. 2022. Aggregate stability and size distribution regulate rainsplash erosion: Evidence from a humid tropical soil under different land-use regimes. *Geoderma* 420: 115880.