



Investigating the particle size distribution of interrill erosion in different soils under land slope gradient

Yasin Salehi¹ and Ali Reza Vaezi^{2*}

¹ PhD Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran

² Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of of Zanjan, Zanjan, Iran

Received: 14 February 2023

Accepted: 29 May 2023

Extended abstract

Introduction

Soil erosion is the most important aspect of land degradation and one of the most important environmental, agricultural and food production problems in the world. More than half of the agricultural lands in semi-arid regions are under rainfed cultivation, and the tensions caused by erosion and destruction of land are important in terms of the effects within the field of erosion, such as soil fertility, and the effects outside the field, such as soil pollution. Information about the size distribution of eroded particles is a substantial step for managing the loss of nutrients and the transfer of pollutants from the soil. For this purpose, this study was conducted to investigate the particle size distribution of sediments resulting from interrill erosion under the influences of slope gradient and soil texture in some soils of the semi-arid region of Zanjan Province.

Materials and methods

Toward this, four hillslopes having different soil textures (sandy loam, silty loam, sandy clay loam and clay loam) in four north-south slope percent (five, 10, 15 and 20%) were investigated using a simulated rainfall with an intensity of 60 mmh⁻¹ for 60 minutes. In order to monitor the runoff and sediment samples from the beginning of the runoff until reaching a stable state, were taken at 5-min intervals from the initiation of runoff. The particles size distribution of sediment was determined by the method of particle separation using a series of sieves with diameters of 75, two, one, 0.5, 0.25, 0.1 and 0.05 mm. Also, the percentage of finer particles (silt and clay) was calculated by hydrometer method. Then the sediment particles are divided into eight categories: gravel (1-75 mm), very coarse sand (1-2 mm), coarse sand (0.5-1 mm), medium sand (0.25-0.5 mm), fine sand (0.1-0.25 mm), very fine sand (0.05-0.1 mm), silt (0.002-0.05 mm) and clay (<0.002 mm) were categorized.

Results and discussion

The results showed that, with the increase in the slope of the land surface, the size distribution of sediment particles changed in all soils. So that, the transport of particles larger than 0.1 mm (including very coarse sand, coarse sand, medium sand and fine sand) increased with increasing slope. While the percentage of silt particles (0.002-0.05 mm) decreased in all textures. Also, particles with the size class of medium sand and fine sand formed between 40 and 50% of the sediment particles for each texture and did not change significantly with the increase of the slope. The highest ratio of particles in the sediment to the main soil was related to silt particles and in silty loam texture (4.33 times) and the lowest was related to clay particles and in silty loam texture (0.26 times). Sand and silt particles in different textures, had high transmission ratios. Silt particles in three textures of sandy loam, clay loam and silty loam had a ratio of more than one and clay particles less than one. Except in clay loam soil, sand particles changed in the range of 0.83 to 1.24 times compared to the main soil and the overall average ratio of its availability in sediment to original soil was 0.98 times.

* Corresponding author: vaezi.alireza@gmail.com

Conclusion

In general, this research showed that with increasing slope, the selectivity of fine particles decreases and the share of coarse particles increases. The effects of these changes are more visible in fine-textured soils. Due to the increase in the destruction of aggregates and flow rate with the increase of the surface slope, it is very important to prevent the removal of vegetation and observe the principles of tillage in order to reduce the direct impact of raindrops on the soil surface and reduce the transportability of particles by the flow. Also, the results show that the ratio of particles in the soil texture and the characteristics of soil structure (abundance and stability of aggregates) are the determining factors of particle transport and it is necessary to consider these characteristics in choosing soil conservation methods.

Keywords: Flow transport power, Particle selectivity, Rainfall simulation, Soil loss, Soil texture

Cite this article: Salehi, Y., Vaezi, A.R., 2024. Investigating the particle size distribution of interrill erosion in different soils under land slope gradient. *Watershed Engineering and Management* 15(4), 519–534.

© 2024, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



تغییرپذیری توزیع اندازه ذرات ناشی از فرسایش بین شیاری در بافت‌های مختلف تحت تاثیر درجه شیب

یاسین صالحی^۱ و علی‌رضا واعظی^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری فیزیک و حفاظت خاک، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

^۲ استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۵

چکیده مبسوط

مقدمه

فرسایش خاک یکی از عوامل تخریب اراضی و از مهم‌ترین معضلات محیط زیست، کشاورزی و تولید غذا در جهان است. بیش از نیمی از مهم‌ترین اراضی کشاورزی در مناطق نیمه‌خشک، تحت کشت دیم هستند و تنش‌های ناشی از فرسایش و تخریب اراضی به صورت مستقیم از دو جهت، اثرات درون عرصه فرسایش همچون حاصلخیزی خاک و اثرات برون عرصه‌ای مانند آلودگی خاک، حائز اهمیت است. شناخت توزیع اندازه ذرات فرسایش یافته، گام اساسی برای مدیریت هدررفت عناصر غذایی و انتقال آلاینده‌ها از خاک است. برای این منظور، این پژوهش با هدف بررسی توزیع اندازه رسوبات حاصل از فرسایش بین شیاری تحت تاثیر درجه شیب و بافت خاک در برخی خاک‌های منطقه نیمه‌خشک زنجان، انجام شد.

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش، چهار دامنه دارای خاک با بافت مختلف (لوم شنی، لوم سیلتی، لوم رسی و لوم رسی) در چهار اندازه شیب شمال به جنوب (پنج، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد) با استفاده از باران شبیه‌سازی شده، با شدت ۶۰ میلی‌متر بر ساعت به مدت ۶۰ دقیقه، مورد بررسی قرار گرفت. رواناب و رسوب در بازه‌های زمانی پنج دقیقه از آغاز رواناب تا رسیدن به حالت پایدار، در ظرف‌های مدرج مجزا جمع‌آوری و حجم و وزن آن اندازه‌گیری شد. توزیع اندازه ذرات رسوب به روش جداسازی ذرات با استفاده از سری الک‌های به قطر ۷۵، دو، یک، ۰/۵، ۰/۲۵، ۰/۱ و ۰/۰۵ میلی‌متر تعیین شد. همچنین، درصد ذرات ریزتر (سیلت و رس) از روش هیدرومتر محاسبه شد. سپس، ذرات رسوب در هشت دسته شامل سنگریزه (دو تا ۷۵ میلی‌متر)، شن بسیار درشت (یک تا دو میلی‌متر)، شن درشت (۰/۵ تا یک میلی‌متر)، شن متوسط و شن ریز (۰/۲۵-۰/۵ میلی‌متر)، شن ریز (۰/۱-۰/۲۵ میلی‌متر)، شن بسیار ریز (۰/۰۵-۰/۱ میلی‌متر)، سیلت (۰/۰۵-۰/۰۲ میلی‌متر) و رس (۰/۰۲ < میلی‌متر) دسته‌بندی شدند.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد، با افزایش شیب سطح زمین، توزیع اندازه ذرات رسوب در همه خاک‌ها دچار تغییر شد. به طوری که انتقال ذرات درشت‌تر از ۰/۱ میلی‌متر (شامل شن بسیار درشت، شن درشت، شن متوسط و شن ریز) با افزایش شیب بیشتر می‌شود. در حالی که درصد ذرات سیلت (از ۰/۰۲ تا ۰/۰۵ میلی‌متر) در همه بافت‌ها کاهش یافت. همچنین، ذرات در طبقه اندازه

شن متوسط و شن ریز که بین ۴۰ تا ۵۰ درصد ذرات رسوب برای هر بافت را تشکیل دادند، با افزایش شیب، تغییر معنی‌داری نداشتند. بیشترین نسبت ذرات در رسوب به خاک اصلی، مربوط به ذرات سیلت در بافت لوم سیلتی (۴/۳۳ برابر) و کمترین آن نیز مربوط به ذرات رس در بافت لوم سیلتی (۰/۲۶ برابر) بود. ذرات شن و سیلت در بافت‌های مختلف، دارای نسبت‌های انتقال بالایی بودند. ذرات سیلت در سه بافت لوم شنی، لوم رسی و لوم سیلتی دارای نسبت بیش از یک و ذرات رس دارای نسبت کمتر از یک بودند. ذرات شن نیز به جز در بافت لوم رسی، در بیشتر بافت‌ها در محدوده ۰/۸۳ تا ۱/۲۴ برابر نسبت به خاک اصلی تغییر کرد و میانگین کلی نسبت فراهمی آن در رسوب به خاک اصلی، ۰/۹۸ برابر بود.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، این پژوهش نشان داد با افزایش شیب، سطح انتخاب‌پذیری ذرات ریز کاهش و سهم ذرات درشت افزایش می‌یابد. اثرگذاری این تغییرات در خاک‌های ریزبافت بیشتر خود را نمایان می‌کند. با توجه به افزایش تخریب خاکدانه‌ها و شدت جریان با افزایش شیب سطح، جلوگیری از حذف پوشش گیاهی و رعایت اصول خاک‌ورزی در جهت کاهش برخورد مستقیم قطرات باران بر سطح خاک و کاهش انتقال‌پذیری ذرات به‌وسیله جریان بسیار با اهمیت است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که نسبت ذرات در بافت خاک و خصوصیات ساختمان خاک (فراوانی و پایداری خاکدانه‌ها)، از عوامل تعیین‌کننده انتقال ذرات بوده‌اند و در نظر گرفتن این ویژگی‌ها در انتخاب روش‌های حفاظت خاک، ضروری است.

واژه‌های کلیدی: انتخاب‌پذیری ذرات، بافت خاک، شبیه‌سازی باران، قدرت حمل جریان، هدررفت خاک

مقدمه

تاثیر فرسایش بین شیاری در هدررفت خاک و عناصر غذایی، به‌خصوص در اراضی کشاورزی مناطق خشک و نیمه‌خشک بسیار قابل توجه است. در این مناطق، پوشش سطحی و گیاهی کم است و امکان انتقال ذرات ریز خاک را از طریق رواناب و پاشمان آسان می‌کند که این امر موجب شده که فرسایش بین شیاری دارای اهمیت ویژه‌ای باشد (Rienzi et al., 2013).

فرسایش بین شیاری، تحت تاثیر عوامل گوناگونی قرار می‌گیرد. ویژگی‌هایی مانند شدت بارندگی، عمق جریان، شیب زمین، پوشش گیاهی هر کدام در شرایط متفاوت جغرافیایی، اثرات متفاوتی در شدت فرسایش بین شیاری می‌توانند ایجاد کنند (Sun et al., 2021). فرسایش بین شیاری، به واسطه جریان سطحی با توان حمل پایین، ماهیت انتخابی دارد و معمولاً میانگین اندازه ذرات رسوب یافته از توده خاک اصلی، کوچک‌تر بوده است. همچنین، ذرات رس و سیلت که عمدتاً به‌صورت تعلیقی و یا جهشی انتقال می‌یابند، بخش بزرگی از فرسایش بین شیاری را شامل می‌شوند (Vaezi, 2020).

آگاهی از توزیع اندازه ذرات فرسایش یافته، از چندین جهت با اهمیت است. اثر فرسایش بر کیفیت و وضعیت حاصلخیزی اراضی به ریزی یا درشتی ذرات هدررفته بستگی دارد (Asadi et al., 2011) و توزیع اندازه ذرات رسوب در میزان آلودگی شیمیایی منابع آبی نیز تعیین‌کننده است (Ozturk, 2017). همچنین، انتقال ذرات ریز به منابع آبی از عوامل رشد گیاهان و گسترش جلبک‌های سطح آب هستند (Asadi et al., 2007). توزیع اندازه ذرات رسوب به‌وسیله عوامل متعددی مانند ویژگی‌های خاک (Zhang and Greenwood, 2020)، شرایط سطح خاک قبل از بارندگی (Shi, Tuladhar et al., 2020)، ماهیت بارندگی (Mukhopadhyay et al., 2012)، نوع جریان (Pieri et al., 2019؛ Kinnell et al., 2005) و نوع جریان (2009) تعیین می‌شود.

Rose and Proffitt (1991)، معتقد بودند که قابلیت انتقال رسوب و توزیع اندازه ذرات رسوب به رواناب و پتانسیل آن برای رسوبدهی بستگی دارد و همچنین، می‌توان انتظار داشت که ویژگی‌های اندازه رسوبات فرسایش یافته بسته به این‌که کدام فرایند فرسایش (شدت باران،

که اثرگذاری بافت خاک و پایداری خاکدانه‌ها بر توزیع اندازه ذرات رسوب و تغییرات زمانی دانه‌بندی رسوبات نسبت به ارتفاع رواناب نقش تعیین‌کننده‌تری داشته است. Wang and Shi (2015)، توزیع اندازه ذرات خاک را برای چهار بافت خاک با درصد رس متفاوت و سه شیب ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درجه مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند که با افزایش شیب، اندازه ذرات رسوب یافته درشت‌تر شده و درصد ذرات بزرگ‌تر نسبت به ذرات ریز افزایش یافت. Kiani-Harchegani et al., (2019)، با مطالعه اثر سه شدت ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت و سه شیب پنج، ۱۵ و ۲۵ درصد، بر توزیع اندازه ذرات رسوب در یک خاک لوم سیلتی گزارش کردند که ذرات رسوب بیش از دو میکرومتر و کمتر از هشت میکرومتر به‌طور قابل توجهی تحت تاثیر شیب قرار دارند. درحالی که اثر شدت باران بر ذرات بیش از هشت میکرومتر بیش از شیب زمین بود.

Kubínová et al., (2021)، به بررسی توزیع اندازه ذرات و خاکدانه‌های رسوب در سه شیب ۲۲، ۳۰، ۳۴ درجه، پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در ابتدای بارش ۱۰۰ درصد اندازه ذرات رسوب را ذرات با اندازه کمتر از یک میکرومتر به خود اختصاص می‌دهند و با افزایش شیب و مدت بارندگی توزیع اندازه ذرات به بیش از ۱۰۰۰ میکرومتر رسید. Sun et al., (2021) با هدف بررسی فرایندهای فرسایش‌های بارانی، ورقه‌ای، شیاری و بین شیاری گزارش کردند، اثر شیب می‌تواند اثرگذاری خصوصیات خاک را بر هدررفت ذرات خاک تغییر دهد. همچنین، بار رسوب با میزان رس رابطه مثبت و محتوای ماده آلی رابطه منفی دارد. Zhu et al., (2021)، گزارش کردند که هرچه پوشش خاک بیشتر باشد، انتخاب‌پذیری ذرات خاک متفاوت‌تر خواهد بود، به‌صورتی که در این پژوهش ذرات درشت به‌صورت انتخابی و ذرات ریز بدون انتخاب‌پذیری رسوب یافتند.

به‌طور کلی، بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که توزیع اندازه ذرات خاک فرسایش یافته تابعی از ویژگی‌های خاک از جمله پایداری خاکدانه‌ها، شدت فرسایش، نسبت ذرات حساس به فرسایش و ویژگی‌های

شیب زمین و یا عمق جریان) غالب باشد، متفاوت است. برخی مطالعات نشان داده‌اند که در فرسایش بین شیاری هنگامی که شدت باران نقش اصلی را در فرسایش دارد، منجر به تغییر بافت خاک فرسایش یافته نسبت به خاک اصلی شده است (Greenwood and Zhang, 2020).

در برخی پژوهش‌ها، به بررسی تغییرات توزیع اندازه ذرات در فرسایش خاک پرداخته شده است. به‌عنوان مثال، Golykalrod et al., (2011) با بررسی توزیع اندازه ذرات رسوب تحت تاثیر دبی جریان و شیب با استفاده از شبیه ساز باران، دریافتند که در قدرت جریان‌های کم، ذرات ریز، عمده ذرات رسوب را تشکیل می‌دهند، درصورتی که با افزایش قدرت جریان، سهم ذرات ریز کمتر و ذرات درشت افزایش می‌یابد. Vaezi and Ebadi (2017)، در مطالعه‌ای با هدف بررسی انتقال‌پذیری ذرات اولیه خاک به‌وسیله رواناب سطحی بر روی یک خاک رسی لومی در پنج شیب (صفر تا ۴۰ درصد) گزارش کردند که با افزایش شیب، انتقال‌پذیری ذرات سیلت افزایش و ذرات شن کاهش یافته است و البته میزان انتقال ذرات رس با تغییر شیب به‌صورت معنی‌داری تحت تاثیر قرار نگرفت.

همچنین، شیب ۱۰ درصد به‌عنوان آستانه وقوع فرسایش سطحی خاک بود. Pieri et al., (2009) بیان کرده‌اند که میزان چیرگی توزیع اندازه ذرات در رسوبات به توزیع اندازه ذرات خاک اصلی وابسته است و وجود یک دامنه نزدیک اندازه ذرات در رسوبات، نشان‌دهنده چیرگی این دامنه در خاک اصلی و یا مقاومت بالای سایر ذرات در مقابل جدا شدن و انتقال است. Armstrong et al., (2012)، تغییرات فرسایش بین شیاری را در خاک لوم سیلتی و در شیب‌های سه، شش و نه درصد را در شدت بارندگی ۴۷ میلی‌متر بر ساعت با استفاده از شبیه‌ساز باران مورد بررسی قرار دادند و بر اساس نتایج به‌دست آمده، غلظت رسوبات در شیب‌های مختلف دارای تفاوت در توزیع اندازه ذرات بودند، به شکلی که در شیب سه درصد، عمدتاً ذرات ریز منتقل شدند و با افزایش درصد شیب، اندازه ذرات رسوب افزایش یافت. Rienzi et al., (2013)، تغییرات زمانی توزیع اندازه ذرات رسوب را تحت تاثیر انرژی جنبشی باران بررسی کردند و نتایج آن‌ها نشان داد

میانگین درجه حرارت سالانه آن ۲۳/۳ درجه سانتی‌گراد است. متوسط بارندگی سالانه منطقه نیز ۳۰۹ میلی‌متر است. این منطقه بر اساس طبقه‌بندی اقلیم به روش دومارتن، دارای اقلیم خشک است. عرصه‌های مطالعاتی دارای ارتفاع حدود ۱۵۰۰ متر از سطح دریا هستند و در مختصات جغرافیایی "۴۰'۴۰" تا "۲۰'۴۱" عرض شمالی و "۱۰'۲۳" تا "۳۰'۲۴" طول شرقی قرار گرفتند.

برای بررسی تغییرپذیری توزیع اندازه ذرات ناشی از فرسایش بین شیاری در بافت‌های مختلف، تحت تاثیر درجه شیب، پس از بررسی‌های میدانی، چهار دامنه با بافت خاک مختلف (لوم شنی، لوم سیلتی، لوم رس شنی و لوم رسی) انتخاب شد. در هر یک از دامنه‌ها، تغییرات شیب در سطح دامنه واضح بوده است و به این ترتیب در هر دامنه، چهار درجه شیب پنج، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد برای ایجاد کرت‌های مطالعاتی در نظر گرفته شدند.

با توجه به این‌که بارش‌هایی با شدت حدود ۶۰ میلی‌متر بر ساعت، به‌عنوان باران‌های فرساینده در منطقه رخ می‌دهند، به‌خصوص در اوایل بهار، زمانی که پوشش گیاهی مناسبی روی سطح دامنه‌ها تشکیل نشده است (Kord et al., 2017)، شدت ۶۰ میلی‌متر بر ساعت، به مدت ۶۰ دقیقه، مبنای پیش‌آزمایش‌ها در سبک‌ترین بافت برای وقوع فرسایش بین شیاری مورد بررسی قرار گرفت (Besharat and Vaezi, 2015). بدین ترتیب، در مجموع، این مطالعه در ۳۲ واحد آزمایشی شامل چهار شیب، در چهار بافت، در یک شدت باران و در دو تکرار، انجام گرفت.

نمونه‌برداری و تعیین ویژگی‌های خاک: نمونه‌برداری خاک به روش مخلوط، از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری سطح خاک تهیه و از الک دو میلی‌متر برای انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی عبور داده و به آزمایشگاه انتقال داده شد. برای تعیین جرم مخصوص ظاهری خاک، نمونه‌های دست‌نخورده با استفاده از سیلندر فلزی (Gee and Bauder, 1986) به ارتفاع هفت سانتی‌متر و قطر ۴/۷ سانتی‌متر، برداشت شدند. متوسط اندازه خاکدانه با جداسازی خاکدانه‌ها با استفاده از سری الک‌ها (به‌ترتیب

محیطی همچون توپوگرافی و پوشش سطح در هر منطقه است. مناطق نیمه‌خشک، جز حساس‌ترین مناطق به فرسایش‌های آبی هستند. در این مناطق، ضعف پوشش گیاهی سطح، امکان انتقال ذرات ریز خاک را از طریق رواناب و پاشمان آسان می‌کند. این موضوع موجب شده که فرسایش بین شیاری دارای اهمیت ویژه‌ای در دامنه‌ها از نظر هدررفت خاک و افت باروری خاک دامنه باشد.

بیش از نیمی از اراضی کشاورزی در مناطق نیمه خشک، تحت کشت دیم هستند و تنش‌های ناشی از فرسایش و تخریب اراضی به‌صورت مستقیم از دو جهت، اثرات درون عرصه فرسایش همچون حاصلخیزی خاک و اثرات برون عرصه‌ای مانند آلودگی خاک، حایز اهمیت است. با این وجود، مطالعات کلی در مورد فرسایش بین شیاری و هدررفت خاک در این فرسایش که عمدتاً نیز به صورت آزمایشگاهی و در کرت‌های دست‌ساز انجام شده است، وجود دارد.

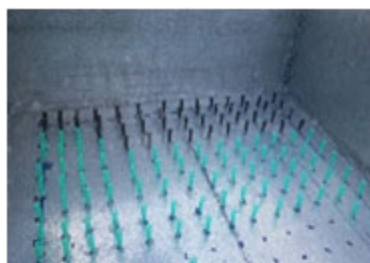
طراحی و ساخت یک دستگاه باران‌ساز، با دقت بالا در ایجاد شدت باران مورد نظر و با قابلیت حمل آسان به نقاط مختلف و استفاده در شیب‌های متفاوت به‌صورت صحرایی یکی از نقاط عطف این پژوهش است. همچنین، مطالعات اندک در خصوص بررسی توزیع اندازه ذرات رسوب ناشی از فرسایش بین شیاری در شیب‌های مختلف به‌صورت صحرایی با وجود نیاز به تحقیقات دقیق و حساسیت موضوع نیز بیان ضرورت مساله را به خوبی نشان می‌دهد. از این رو، با توجه به اهمیت بافت خاک و شیب زمین بر میزان فرسایش بین شیاری و انتقال‌پذیری ذرات خاک به واسطه این فرسایش در مناطق نیمه‌خشک، این مطالعه با هدف بررسی توزیع اندازه ذرات خاک فرسایش یافته تحت تاثیر درجه شیب زمین و بافت خاک در منطقه‌ای نیمه‌خشک در شمال غرب ایران، انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: این پژوهش در منطقه‌ای از استان زنجان انجام گرفت که دارای تنوعی از دامنه‌هایی با خاک‌های مختلف و شیب‌های متفاوت بودند. منطقه دارای کمینه دمایی منفی ۳۰ و بیشینه ۴۰ درجه سانتی‌گراد و

ساخته شد (شکل ۱). برای ایجاد صفحه بارش از ۲۰۰ قطعه نازل با قطر دو میلی‌متر استفاده شد و به‌منظور تامین آب شبیه‌ساز باران، از مخزن ۲۰۰ لیتری نصب شده بر صفحه بارش استفاده شد (Baliani and vaezi, 2017). برای تامین آب مورد نیاز کل آزمایش نیز از یک تانکر ۱۰۰۰ لیتری استفاده شد.

شدت بارش از طریق ارتفاع آب در مخزن تعیین و با محاسبه خروجی آب از طریق نازل‌ها به همان میزان، آب به‌طور همزمان به مخزن اضافه شد و در تمام طول آزمایش بار آبی ثابت مهیا بود. برای کربندی از یک فلوم با دیواره از جنس گالوانیزه با ضخامت دو میلی‌متر و با طول ۵۰، عرض ۴۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر استفاده شد. در پایین دست فلوم، لوله انتقال با قطر هفت سانتی‌متر، برای انتقال رواناب و رسوب متصل شد.



شکل ۱- نمایی از اجزای دستگاه شبیه‌ساز باران و شیوه نمونه‌برداری

Fig. 1. A view of rainfall simulator and sampling method

تعیین دانه‌بندی ذرات فرسایشی: رواناب و رسوب، در بازه‌های زمانی پنج دقیقه از آغاز رواناب تا رسیدن به حالت پایدار در ظرف‌های مدرج مجزا، جمع‌آوری و حجم و وزن آن اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در محلی ساکن قرار داده و پس از ته‌نشست کامل، رسوب به آن انتقال داده شد. توزیع اندازه ذرات رسوب پس از خشک شدن به روش جداسازی با سری الک‌های (دو، یک،

۰/۵، ۰/۲۵، ۰/۱ و ۰/۰۵ میلی‌متر) جداسازی و با استفاده از روش هیدرومتر، درصد ذرات سیلت و رس در رسوب محاسبه شد. سپس، بر اساس جزبندی سامانه آمریکایی (USDA)، درصد هر جز از خاک (Kemper and Rosenau, 1986) مشخص و در دسته‌های سنگریزه (دو تا ۷۵ میلی‌متر)، شن بسیار درشت (۲-۱ میلی‌متر)، شن درشت (۱-۰/۵

با اندازه چهار، دو، یک، ۰/۵۰، ۰/۲۵ و ۰/۰۵ میلی‌متر) تعیین شد (Kemper and Rosenau, 1986). پایداری خاکدانه‌ها نیز از روش الک تر به مدت یک دقیقه و با سرعت ۲۰ دور در دقیقه در خاکدانه‌های با قطر شش تا هشت میلی‌متر با حذف بخش شن و سنگریزه (Kemper and Rosenau, 1986). انجام گرفت.

توزیع اندازه ذرات به روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون با اسید کلریدریک یک نرمال (Jones, 2001) و محتوای کربن آلی به روش والکی بلاک (Walkley and Black, 1934) تعیین شدند.

طراحی و ساخت شبیه‌ساز باران: آزمایش‌ها به‌صورت صحرائی و با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز باران انجام گرفت. به این منظور، شبیه‌ساز بارانی با طول ۶۰ سانتی‌متر، عرض ۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع یک متر، طراحی و

تعیین دانه‌بندی ذرات فرسایشی: رواناب و رسوب، در بازه‌های زمانی پنج دقیقه از آغاز رواناب تا رسیدن به حالت پایدار در ظرف‌های مدرج مجزا، جمع‌آوری و حجم و وزن آن اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در محلی ساکن قرار داده و پس از ته‌نشست کامل، رسوب به آن انتقال داده شد. توزیع اندازه ذرات رسوب پس از خشک شدن به روش جداسازی با سری الک‌های (دو، یک،

میلی‌متر)، شن متوسط (۰/۲۵-۰/۵ میلی‌متر)، شن ریز (۰/۱-۰/۲۵ میلی‌متر)، شن بسیار ریز (۰/۰۵-۰/۱ میلی‌متر)، سیلت (۰/۰۰۲ < میلی‌متر) و رس (۰/۰۰۲ < میلی‌متر) دسته‌بندی شدند (شکل ۲).

میلی‌متر)، شن متوسط (۰/۲۵-۰/۵ میلی‌متر)، شن ریز (۰/۱-۰/۲۵ میلی‌متر)، شن بسیار ریز (۰/۰۵-۰/۱ میلی‌متر)، سیلت (۰/۰۰۲ < میلی‌متر) و رس (۰/۰۰۲ < میلی‌متر) دسته‌بندی شدند (شکل ۲).



شکل ۲- نمایی از تعیین دانه‌بندی ذرات رسوب

Fig. 2. A view of determining the granulation of sediment particles

۷/۶۱ و هدایت الکتریکی نیز در محدوده ۰/۸۹ تا ۱/۲۵ دسی‌زیمنس بر متر قرار داشت.

بنا بر تقسیم‌بندی آزمایشگاه شوری خاک آمریکا (Soil Salinity Laboratory Staff, 1954)، خاک‌های با هدایت الکتریکی کمتر از چهار دسی‌زیمنس و واکنش خاک کمتر از ۸/۵۰، خاک‌های غیرشور نامیده شدند. در خاک دامنه‌های مورد آزمایش، کمترین مقدار ماده آلی خاک در خاک لوم شنی با مقدار ۰/۲۴ درصد و بیشترین آن در خاک لوم سیلتی ۲/۳۸ درصد، است. گزارش‌ها نشان می‌دهد ماده آلی خاک با بهبود پایداری خاکدانه‌ها و ساختمان‌سازی منجر به مقاومت خاک در برابر فرسایش می‌شود (An et al., 2010).

دامنه تغییرات کربنات کلسیم معادل خاک، بین ۲۰/۵۰ و ۲۹/۵۸ درصد بود که نشان از آهکی بودن خاک‌های منطقه دارد. وجود آهک در خاک به دلیل وجود کاتیون‌های تبدلی مانند کلسیم و ایجاد شرایط لازم برای هم‌آوری ذرات رس، تشکیل خاکدانه‌ها را تقویت می‌کند (Ajwa and Trout, 2006). هم‌آوری ذرات خاک با ایجاد خاکدانه‌های مقاوم در برابر ضربه قطرات باران می‌تواند منجر به کاهش فرسایش خاک شود (Sun et al., 2021). کمترین مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک لوم رسی ۸/۶۹ سانتی‌متر بر ساعت و بیشترین آن در خاک لوم شنی ۱۵/۷۴ سانتی‌متر بر ساعت بود که

تجزیه و تحلیل داده‌ها: بررسی معنی‌دار بودن اثر شدت باران در هر بافت خاک بر توزیع اندازه ذرات در فرسایش بین شیاری با استفاده از روش ANOVA و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در نرم‌افزار SPSS انجام شد. ترسیم نمودارها و تعیین ضریب تبیین هر نمودار نیز با استفاده از نرم‌افزار Microsoft Excel انجام شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک دامنه‌ها: ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دامنه‌های مورد بررسی در جدول ۱، آمده است. با توجه به توزیع اندازه ذرات، خاک دامنه‌ها به ترتیب در چهار گروه بافتی شامل لوم شنی، لوم سیلتی، لوم رسی شنی و لوم رسی، قرار دارند. جرم مخصوص ظاهری، خاک‌های لوم شنی، لوم سیلتی و لوم رسی بسیار نزدیک به هم از ۱/۲۵ تا ۱/۴۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب بودند. مقدار پایداری خاکدانه‌ها در برابر آب کمتر از یک میلی‌متر و مقدار الک خشک کمتر از ۲/۵۳، نشان‌دهنده پایداری پایین خاک هستند. پایداری کم ذرات خاک، می‌تواند منجر به مقاومت کم ذرات خاک در برابر عامل فرساینده شود که با توجه به نتایج، پایداری خاکدانه در خاک‌های لوم شنی (۰/۹۹ میلی‌متر) و لوم رسی (۰/۹۶ میلی‌متر) کم بود و خاک‌های لوم سیلتی (۱/۸۶ میلی‌متر) و لوم رسی شنی (۱/۰۶ میلی‌متر)، پایداری بهتری داشتند (An et al., 2010). واکنش خاک در محدوده ۷/۴۱ تا

هرچه ورود آب به خاک در شرایط اشباع بیشتر باشد، قسمت بیشتری از بارندگی به خاک نفوذ کرده و رواناب کمتری ایجاد می‌شود (Karami et al., 2017).

نشان می‌دهد خاک لوم شنی به دلیل داشتن ذرات درشت دانه زیاد، از نفوذپذیری بیشتری برخوردار است. هدایت هیدرولیکی اشباع، بیانگر نفوذ آب به خاک در حالت اشباع بوده و بر حجم رواناب تولیدی موثر است. از این جهت که

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دامنه‌های مورد بررسی

Table 1- Some physical and chemical characteristics of examined Hillslopes soil

Variable	Unit	Hillslope 1	Hillslope 2	Hillslope 3	Hillslope 4
Sand	(%)	59.50	33.90	54.86	26.89
Silt	(%)	30.50	53.60	22.62	35.60
Clay	(%)	10.00	12.50	22.52	37.51
Soil texture	-	Sandy loam	Silty loam	Sandy clay loam	Clay loam
BD	g.cm ⁻³	1.28	1.27	1.41	1.25
MWD _{dry}	mm	1.40	2.57	2.80	1.45
MWD _{wet}	mm	0.99	1.86	1.06	0.96
pH	-	7.60	7.47	7.61	7.56
EC	dS.m ⁻¹	0.89	1.25	0.95	1.29
Ks	cm.h ⁻¹	15.74	9.27	11.29	8.69
OM	(%)	0.24	2.38	0.61	0.79
Equiv .CaCO ₃	(%)	29.58	26.83	20.50	23.33

خاک با احتمال ۹۵ درصد معنی‌دار نبود. بنابراین، فرض صفر که نرمال بودن داده‌ها است رد نمی‌شود و داده‌ها از توزیع نرمال تبعیت کرده است.

آزمون نرمال بودن داده‌ها: نتایج بررسی تابعیت داده‌ها از توزیع نرمال، در جدول ۲ آمده است. بر اساس نتایج به دست آمده از آزمون‌های کولوموگروف-اسمیرنوف و شاپیرو-ویلک، کلیه مقادیر مربوط به توزیع اندازه ذرات

جدول ۲- آزمون نرمال بودن داده‌های رسوب

Table 2- Normality test of sediment data

particle size (mm)	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Value	df	Sig.	Value	df	Sig.
2-75	0.157	32	0.20	0.89	32	0.55
1-2	0.227	32	0.27	0.89	32	0.55
0.5-1	0.18	32	0.18	0.93	32	0.28
0.25-0.5	0.09	32	0.20	0.99	32	0.99
0.1-0.25	0.08	32	0.20	0.97	32	0.81
0.05-0.1	0.12	32	0.20	0.95	32	0.51
0.002-0.05	0.16	32	0.20	0.91	32	0.14
<0.002	0.16	32	0.20	0.93	32	0.27

میلی‌متر بیشترین فراوانی را در رسوب حاصل از فرسایش بین شیاری دارند و در مقابل، ذرات محدوده سنگریزه ۷۵-۲ میلی‌متر کمترین فراوانی را دارند.

با بررسی فراوانی ذرات در رسوب و مقایسه آن با فراوانی ذرات در خاک می‌توان فهمید که ذرات سیلت ۰/۰۵ تا ۰/۰۰۲ میلی‌متر حساس‌ترین ذرات به فرسایش

توزیع اندازه ذرات رسوب در دامنه‌های با شیب متفاوت: شکل ۳، تغییرات فراوانی ذرات رسوب هشت محدوده اندازه ذرات را در دامنه‌های با شیب متفاوت ارائه می‌دهد. با توجه به نتایج، مشاهده می‌شود که توزیع اندازه ذرات رسوب نسبت به شیب دارای تغییراتی است. نمودار نشان می‌دهد که ذرات محدوده شن متوسط ۰/۵-۰/۲۵

زاویه برخورد قطرات باران بر سطح خاک زیاد شده است و جابه‌جایی ذرات نیز بیشتر می‌شود و خاکدانه‌های مقاوم تر تخریب می‌شوند. از سوی دیگر، به دلیل نیروی گرانشی زیاد، فرصت نفوذ کاهش یافت و افزایش ارتفاع و شدت رواناب سریع تر رخ می‌دهد (Wang et al., 2015)؛ (Algayer et al., 2014). در این شرایط، با گذشت زمان جریان سطحی می‌تواند ذرات با قطر بزرگ‌تر و مقاوم‌تر به فرسایش حمل کند که شیوه انتخاب‌پذیری ذرات نیز از بین می‌رود (Asadi, 2011).

عمده انتقال ذرات در شیب‌های پایین به صورت معلق است، در صورتی که در شیب‌های بالاتر انتقال به صورت بار بستر نیز رخ می‌دهد (Sadeghian and Vaezi, 2019). Kubinová et al., (2021). نتایج مشابهی را برای شیب‌های ۲۲، ۳۰ و ۳۴ درجه گزارش کردند. Shi et al., (2012) نیز گزارش کردند که با ادامه بارش و افزایش شیب سطح، درصد ذرات درشت‌تر در رسوب افزایش می‌یابد.

توزیع اندازه ذرات رسوب در خاک‌ها تحت تاثیر شیب دامنه: تغییرات درصد فراوانی ذرات فرسایش یافته از خاک‌ها تحت تاثیر شیب دامنه در شکل ۴، نشان داده شده است. با افزایش شیب دامنه، توزیع اندازه ذرات رسوب در همه خاک‌ها دچار تغییر شد. به صورتی که درصد ذرات درشت‌تر (ذرات بزرگ‌تر از ۰/۵ میلی‌متر) با افزایش شیب دامنه بیشتر شد. در حالی که درصد ذرات فرسایش یافته با قطر کمتر (از ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۵) که شامل ذرات سیلت می‌شوند، با افزایش شیب کم شد. این تغییرات برای ذرات با طبقه اندازه ۰/۲۵-۰/۵ میلی‌متر) و (۰/۱-۰/۲۵ میلی‌متر) که بین ۴۰ تا ۵۰ درصد ذرات رسوب برای هر بافت را تشکیل می‌دهند، با افزایش شیب تغییرات محسوسی نداشتند.

بیشترین درصد ذرات سیلت و رس که دچار فرسایش بین شیاری شدند، در خاک لوم سیلتی مشاهده شد که نسبت به خاک‌های لوم شنی، لوم رس شنی و لوم رسی به ترتیب ۴۵، پنج و ۳۶ درصد بیشتر بود. همچنین، بیشترین فراوانی ذرات درشت فرسایشی (شن تا شن درشت) در خاک لوم رسی (۷۶ درصد) و کمترین آن در خاک لوم رس شنی (۶۳ درصد) بود که می‌تواند به

بین شیاری هستند. علت بالا بودن حساسیت ذرات سیلت به فرسایش بین شیاری به دلیل چسبندگی پایین تر نسبت به ذرات رس و همچنین، وزن کمتر نسبت به ذرات شن بوده است.

نتایج مطالعات مختلف نشان می‌دهد که حساسیت ذرات به انتقال به نوع فرسایش خاک بستگی دارد. Shi et al., (2012) و (Vaezi and Ebadi, 2017)، نشان دادند که انتقال ذرات در فرسایش بین شیاری با توجه به جریان نسبتاً ضعیف عمدتاً مربوط به ذرات ریز (سیلت و رس) خاک است. (Asadi et al., 2011) نیز گزارش کردند که در فرسایش شیاری پس از ایجاد شیار، انتقال ذرات بزرگ تر غالب است.

بررسی انتقال ذرات در شیب‌های مختلف نیز نشان می‌دهد که برهم کنشی میان اندازه ذره انتقال یافته و درجه شیب وجود دارد، به طوری که انتقال ذرات درشت‌تر از ۰/۱ میلی‌متر (شامل شن بسیار درشت، شن درشت، شن متوسط و شن ریز) با افزایش شیب دامنه بیشتر می‌شود. این موضوع به دلیل سنگینی این نوع ذرات و وجود جریان‌های سطحی بیشتر برای انتقال آن‌ها را نشان می‌دهد. به طوری که در شیب‌های تند به دلیل افزایش تولید رواناب سطحی، قدرت حمل جریان نیز بیشتر شده و ذرات درشت‌دانه بیشتری انتقال می‌یابند.

در مقابل، انتقال ذرات ریزدانه (کوچک‌تر از ۰/۱۵ میلی‌متر) با افزایش شیب دامنه کمتر می‌شود. چنین ذراتی آن قدر سبک هستند که با رواناب سطحی ضعیف که در شیب‌های ملایم تولید می‌شود به آسانی جابه‌جا می‌شوند. با افزایش درجه شیب دامنه به دلیل افزایش قدرت جریان، ذرات درشت دانه نیز همراه جریان منتقل می‌شوند و در نتیجه، فراوانی ذرات ریزدانه در رسوب کمتر می‌شود. گزارش‌ها نشان می‌دهد که وجود جریان سطحی کم‌عمق در شیب‌های پایین، منجر به انتخاب ذرات با حساسیت بیشتر نسبت به فرسایش می‌شود و ذرات ریزتر در رسوب به دلیل نیروی اینرسی و نیروی کششی کمتر، غالبیت بیشتری پیدا می‌کنند (Nguyen et al., 2016).

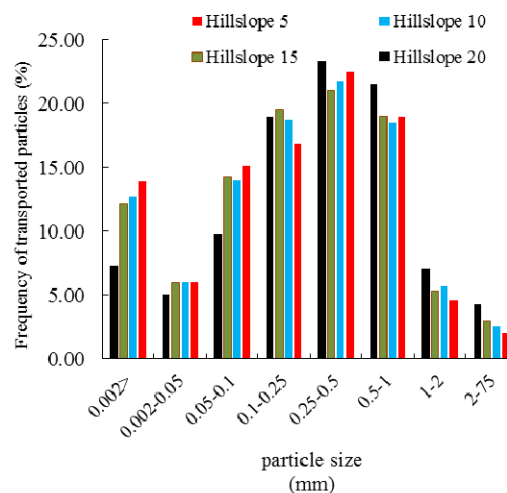
افزایش شیب موجب تغییر در شدت فرسایش بین شیاری می‌شود، به صورتی که با افزایش شیب از یک سو

این طبقه برای خاک لوم سیلتی مربوط به طبقات شن درشت (۱-۰/۵ میلی‌متر)، شن متوسط (۰/۵-۰/۲۵ میلی‌متر)، شن ریز (۰/۲۵-۰/۱ میلی‌متر) و رس (<0.002 میلی‌متر) بوده است. بیشترین اندازه ذرات رسوب خاک لوم رسی شنی طبقات شن درشت (۱-۰/۵ میلی‌متر)، شن متوسط (۰/۲۵-۰/۵ میلی‌متر)، شن بسیار ریز (۰/۱-۰/۰۵ میلی‌متر)، رس (<0.002 میلی‌متر) و برای خاک لوم رسی نیز مربوط به طبقات شن درشت (۱-۰/۵ میلی‌متر)، شن متوسط (۰/۲۵-۰/۵ میلی‌متر) و شن ریز (۰/۲۵-۰/۱ میلی‌متر) بود.

به صورت کلی، در همه خاک‌ها ذرات با اندازه بین ۰/۰۵ تا ۰/۵ میلی‌متر، بیشترین سهم ذرات را در رسوب داشتند. ذرات در این دامنه از نظر فراوانی عددی نسبت به ذرات ریزتر تعداد کمتری داشتند، اما با توجه به فراوانی بسیار بیشتر نسبت به ذرات درشت‌تر و وزن بیشتر و فراوانی نزدیک به ذرات ریزتر توانستند سهم بیشتری از توزیع اندازه ذرات در رسوب را به خود اختصاص دهند. دامنه گسترده اندازه ذرات فرسایش یافته در خاک‌های لوم رسی شنی را می‌توان به توزیع اندازه ذرات در خاک اصلی لوم رسی شنی نسبت داد و در زمانی که نسبت‌های برابر وجود داشته باشند، مخصوصاً در شیب‌های پایین‌تر انتخاب ذرات ریزتر در اولویت خواهد بود (Vaezi and Ebadi, 2017).

در خاک‌ها سیلتی به دلیل عدم مشارکت ذرات سیلت در پایدارسازی خاکدانه‌ها منجر به فرسایش‌پذیری بیشتر خاک می‌شوند (Wildhaber et al., 2012). در پژوهشی، Koiter et al., (2017) نیز نشان دادند که ذرات سیلت و شن بسیار ریز می‌توانند به فرسایش کمک کنند، زیرا از ایجاد خاکدانه‌های مقاوم جلوگیری کرده، خاک را مستعد انتقال از طریق جریان سطحی می‌کنند.

پایداری خاکدانه پایین و ساختمان ضعیف‌تر خاک لوم رسی نسبت به خاک‌های دیگر مرتبط باشد.

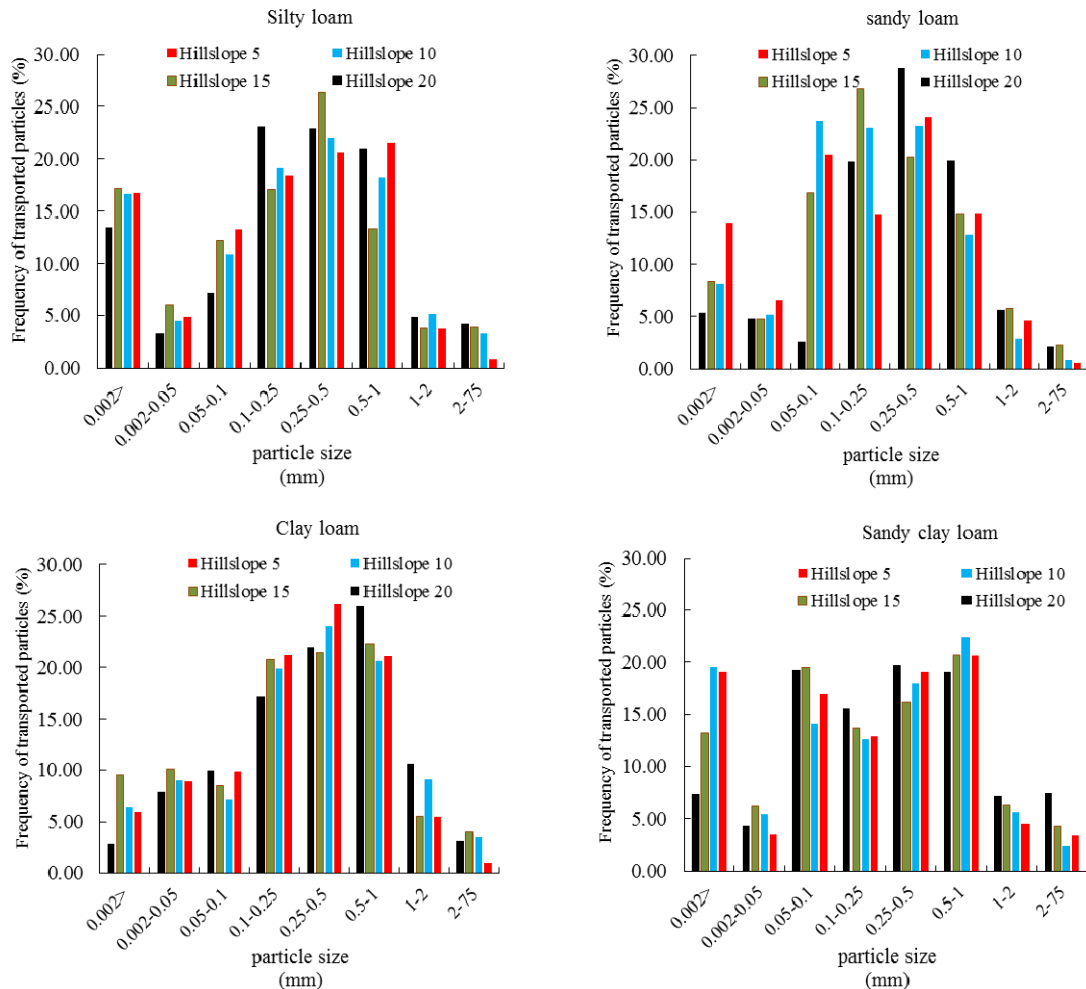


شکل ۳- تغییرات فراوانی ذرات رسوب فرسایش بین شیاری در دامنه‌های با شیب متفاوت

Fig. 3. Variations of inter-rill erosion sediment particles frequency in different slopes

در خاک لوم رسی، محتوای ماده آلی خاک که از عوامل موثر در بهبود ساختمان و نفوذپذیری خاک است (Salehi et al., 2021)، بسیار پایین بود و قاعده انتخاب‌پذیری ذرات ریز را تحت تاثیر قرار داده و منجر به تفاوت در اندازه ذرات رسوب نسبت به اندازه ذرات خاک اصلی شده است (Sadeghian and Vaezi, 2019).

با در نظر گرفتن میانگین کمینه ۱۵ درصد، سهم هر جز از ذرات خاک در رسوب به عنوان ذرات با حمل به صورت انتخابی (Shi et al., 2012)، در خاک لوم رسی، ذرات در طبقه اندازه شن متوسط (۰/۲۵-۰/۵ میلی‌متر) و شن ریز (۰/۲۵-۰/۱ میلی‌متر) بیشترین انتخاب‌پذیری را داشته‌اند.



شکل ۴- تغییرات درصد فراوانی ذرات فرسایش یافته در هر بافت خاک تحت تاثیر شیب دامنه
 Fig. 4. Variations of eroded particles frequency in each soil texture under the influence of slope

افزایش قدرت جریان در کندن ذرات درشت‌تر با افزایش شیب عنوان کردند. اثر متقابل شیب و بافت خاک نیز بر نسبت ذرات در رسوب به خاک اصلی برای ذرات شن با احتمال $p < 0.001$ و برای ذرات رس و سیلت با احتمال $p < 0.05$ معنی‌دار بود.

شکل ۵، نسبت فراوانی ذرات در رسوب به خاک اصلی، تحت تاثیر شیب دامنه را نشان می‌دهد. بیشترین نسبت ذرات در رسوب به خاک اصلی در بافت‌های مختلف مربوط به ذرات سیلت و در خاک لوم سیلتی با ۴/۳۳ برابر و کمترین آن نیز مربوط به ذرات رس و در بافت لوم سیلتی با ۰/۲۶ برابر بود. ذرات رس، شن، سیلت و رس در خاک-های مختلف دارای نسبت‌های انتقال متفاوتی بودند. به جز

نسبت توزیع اندازه ذرات فرسایش یافته به خاک اصلی: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بافت خاک بر نسبت انتقال‌پذیری ذرات شن ($p < 0.001$)، رس ($p < 0.001$) و سیلت ($p < 0.001$) اثر معنی‌دار داشتند (جدول ۳). دلیل این موضوع به فراوانی ذرات در خاک اصلی و همچنین، تفاوت در پایداری خاکدانه‌ها و ساختمان خاک متفاوت در هر خاک بوده است (جدول ۱) که با نتایج Sun et al., (2021) نیز مطابقت دارد.

اثر شیب بر نسبت ذرات در رسوب به خاک اصلی، تنها بر میزان شن ($p < 0.05$) معنی‌دار بود. Kubínová et al., (2021) نیز افزایش معنی‌دار اندازه ذرات رسوب یافته با افزایش شیب را گزارش کرده‌اند، آن‌ها از عوامل این امر را

در نوسان بود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که نسبت انتقال ذرات در خاک علاوه بر شیب به ویژگی‌های خاک همچون پایداری خاکدانه‌ها، ساختمان خاک و ماده آلی خاک نیز وابسته است (Sun et al., 2021). این نتایج با یافته‌های (Sadeghian and Vaezi (2019) مطابقت دارد.

در بافت لوم رسی و بافت لوم رسی شنی در شیب پنج درصد، در بقیه بافت‌ها ذرات سیلت دارای نسبت بیشتر از یک و ذرات رس کمتر از یک بودند. نسبت ذرات شن نیز به جز در بافت لوم رسی (در محدوده ۱/۱۱ تا ۱/۵۶ با میانگین ۱/۳۳) در بیشتر بافت‌ها در محدوده ۰/۸۳ تا ۱/۲۴ برابر و با میانگین ۰/۹۸ برابر

جدول ۳- تجزیه واریانس نسبت انتقال‌پذیری ذرات تحت تاثیر بافت خاک و شیب زمین

Table 3- Variance analysis of particle transmissibility ratio under the influence of soil texture and land slope

Source	Dependent variables	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Texture	Sand	0.74	3	0.25	11.12	0.000
	Clay	2.50	3	0.83	638.22	0.000
	Silt	59.55	3	19.85	95.17	0.000
Slope	Sand	0.30	3	0.10	4.45	0.012
	Clay	0.004	3	0.001	1.10	0.368
	Silt	0.75	3	0.25	1.20	0.332
Texture * Slope	Sand	0.56	9	0.06	2.81	0.000
	Clay	0.03	9	0.006	6.40	0.050
	Silt	5.21	9	0.58	2.77	0032
Total	Sand	38.32	32			
	Clay	14.64	32			
	Silt	228.68	32			

افزایش قدرت جریان سطحی ۳۲ درصد افزایش یافت که در خاک لوم سیلتی این نتیجه آشکارتر بود. یکی از ویژگی‌های خاک‌های سیلتی چسبندگی ضعیف بین ذرات خاک است که از طرفی نیز، بالا بودن نسبی درصد شن در این خاک، این ویژگی را تشدید کرده است.

نسبت ذرات سیلت با افزایش شیب افزایش یافت (از چهار به ۴/۶۷) که می‌توان دلیل آن را مقدار این ذره در خاک اصلی مرتبط دانست. نسبت ذرات شن و سیلت در خاک اصلی بافت لوم رسی شنی، تقریباً مساوی است و همچنین، بیش از نیمی از ذرات آن را ذرات شن تشکیل داده است. در این بافت، نسبت به بافت‌های لوم رسی و لوم سیلتی نسبت ذرات رسوب به خاک اصلی نزدیک‌تر است. در شیب پنج درصد، تنها نسبت ذرات شن بیش از یک بود. با افزایش شیب به ۱۰ و ۱۵ درصد، نسبت ذرات سیلت افزایش یافت و از نسبت ذرات شن کم شد. با افزایش تدریجی شدت جریان و فراهم آمدن شرایط انتقال

در بافت لوم شنی، ذرات رس کمترین نسبت فراوانی را در رسوب به خاک اصلی (حدود ۰/۵) داشتند که دلیل آن را می‌توان به مقدار آن در خاک اصلی (۱۰ درصد) مرتبط دانست. از طرفی، بخشی از ذرات رس با توجه به اندازه خلل و فرج بافت لوم شنی در اثر پاشمان و جریان سطحی اولیه با ورود به منافذ و بخش زیرسطحی خاک، بخش کمتری از فرسایش سطحی را در این خاک تشکیل می‌دهند. ذرات شن نیز به دلیل وزن زیاد انتقال‌پذیری کمتری داشتند.

در مقابل، ذرات سیلت در این بافت با توجه به پایداری خاکدانه و ماده آلی پایین و هم از نظر اندازه و چسبندگی، حساس‌ترین ذرات به فرسایش بین شیاری بودند (Greenwood and Zhang, 2020) و سهم غالب رسوب را در شیب‌های پنج تا ۱۵ درصد تشکیل دادند. با افزایش شیب، به تدریج از نسبت سیلت کاسته شد و نسبت شن افزایش یافت و در شیب ۲۰ درصد نسبت به شیب پنج درصد، انتقال ذرات شن رسوب به خاک اصلی به دلیل

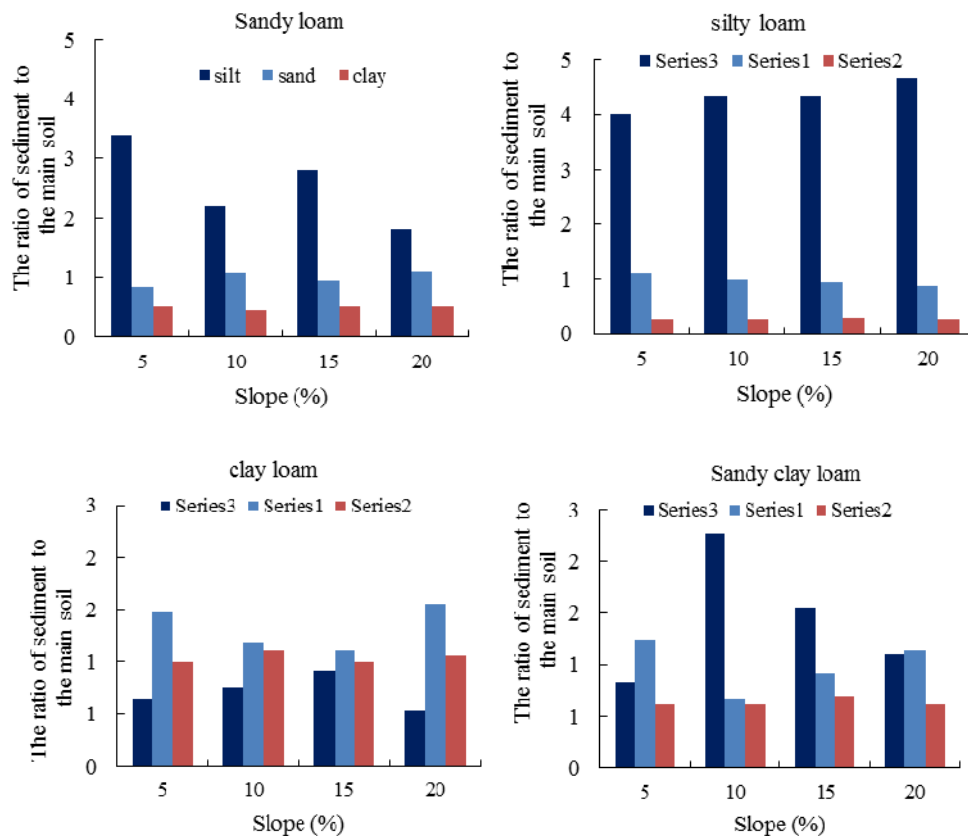
محققین متعددی این نتایج را برای شرایط مختلف گزارش کرده‌اند که این نتایج نشان می‌دهد، دانه‌بندی ذرات رسوب حاصل از فرسایش بین شیاری به نوع بافت خاک وابسته است.

در این راستا، یافته‌های Warrington و همکاران (۲۰۰۹) در فرسایش شیاری و Shi et al., (2012) در فرسایش بین شیاری و Sun et al., (2021) برای فرسایش‌های شیاری، بین شیاری و ورقه‌ای نیز نشان داد که بافت خاک به شدت نسبت انتقال ذرات در رسوب را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در پژوهشی دیگر، سایر ویژگی‌های خاک مانند پایداری خاکدانه‌ها، نسبت ذرات حساس به فرسایش و رطوبت خاک در کنار بافت خاک به‌عنوان عوامل موثر بر توزیع اندازه ذرات رسوب بیان شدند (Geng et al., 2017).

ذرات، ابتدا ذراتی که چسبندگی و وزن کمتری دارند انتخاب می‌شوند (Asadi et al, 2011).

با افزایش شیب و تشدید تنش برشی جریان، این انتخاب‌پذیری کاهش یافته است، به‌صورتی که در شیب ۲۰ درصد قابلیت انتقال ذرات شن و رس با افزایش ظرفیت انتقال ذرات تا حدی بیشتر شده و به نزدیک به یک رسید. خاک لوم رسی نسبت به دیگر با خاک‌ها نتایج متفاوت را نشان داد.

در این بافت نیز توزیع اندازه ذرات رسوب به شدت تحت تاثیر درصد اجزای بافت خاک اصلی است. بر خلاف دیگر بافت‌ها، نسبت ذرات رس و شن در همه شیب‌ها یک یا بیشتر از یک بود. درحالی که این نسبت برای ذرات سیلت کمتر از یک بود. به‌صورت کلی، نتایج نشان داد نسبت انتخاب‌پذیری ذرات رسوب به خاک اصلی بیشتر از هر چیزی تحت تاثیر خاک اصلی قرار دارد.



شکل ۵- بررسی نسبت ذرات فرسایش یافته به خاک اصلی برای هر بافت تحت تاثیر شیب دامنه

Fig. 5. Investigating the ratio of eroded particles to the main soil for each soil texture under the influence of slop

نتیجه‌گیری

به‌صورت کلی، نتایج پژوهش نشان داد که با افزایش قدرت جریان، انتخاب‌پذیری ذرات ریز کاهش و سهم ذرات درشت افزایش می‌یابد. اثرگذاری این تغییرات در خاک‌های ریزبافت بیشتر خود را نمایان می‌کند. به‌صورت کلی، کاهش در دسترس بودن ذرات عرصه با جلوگیری از حذف پوشش گیاهی و مدیریت خاکورزی در جهت شیب در انتقال ذرات بسیار با اهمیت است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که فراوانی ذرات در خاک اصلی و ساختمان خاک (فراوانی و پایداری خاکدانه‌ها)، از عوامل تعیین‌کننده انتقال ذرات بوده‌اند و در نظر گرفتن این ویژگی‌ها در اولویت‌بندی و روش‌های حفاظت خاک ضروری است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان، مراتب تشکر و قدردانی خود را از دانشگاه زنجان، برای در اختیار قرار دادن امکانات، جهت انجام این پژوهش، بیان می‌کنند.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مساله مورد تایید همه نویسندگان است.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که افزایش شیب در بافت‌های مختلف منجر به تفاوت در انتخاب‌پذیری ذرات خاک می‌شود. با افزایش شیب، انتقال ذرات بزرگ‌تر افزایش می‌یابد، به‌صورتی که در شیب‌های پایین‌تر، انتخاب‌پذیری ذرات ریز به واسطه جریان ضعیف رواناب سطحی غالبیت بیشتری داشتند و با افزایش شیب به‌دلیل افزایش دو عامل شدت جریان سطحی و قدرت تخریب قطرات باران، جدا شدن و انتقال ذرات رس و شن تا حدی بیشتر شده و توزیع اندازه ذرات رسوب تغییر کرده است. جدای از این دو عامل، میزان انتقال ذرات به ویژگی‌های خاک همچون پایداری خاکدانه‌ها، ساختمان خاک و ماده آلی خاک نیز وابسته بود.

توزیع اندازه ذرات رسوب در بافت‌های مختلف نیز متفاوت بود. ذرات شن و سیلت در خاک‌های مختلف دارای نسبت‌های انتقال بالایی بودند. ذرات سیلت در سه بافت لوم شنی، لوم رسی و لوم سیلتی دارای نسبت بیش از یک و ذرات رس کمتر از یک بودند. ذرات شن نیز به جز در خاک لوم رسی، در بیشتر بافت‌ها در محدوده ۰/۸۳ تا ۱/۲۴ برابر نسبت به خاک اصلی تغییر کرد و میانگین نسبت انتقال آن به خاک اصلی ۰/۹۸ برابر بود.

منابع مورد استفاده

- Ajwa, H.A., Trout, T.J., 2006. Polyacrylamide and water quality effects on infiltration in sandy loam soils. *J. Soil Sci. Soc. Am.* 70, 643-650.
- Algayer, B., Wang, B., Bourenane, H., Zheng, F., Duval, O., Li, G., Le, Y., Darboux, F., 2014. Aggregate stability of a crusted soil: differences between crust and sub-crust material and consequences for interrill erodibility assessment. An example from the Loess Plateau of China. *Eur. J. Soil Sci.* 65, 325-335.
- An, S., Mentler, A., Meyer, H., Blume, W.H., 2010. Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China. *Catena* 81, 226-233.
- Armstrong, A., Quinton, J.N., Heng, B.C.P., Chandler, J.H., 2011. Variability of interrill erosion at low slopes. *Earth Surf. Process. Landf.* 36(1), 97-106.
- Asadi, H., Moussavi, A., Ghadiri, H., Rose, C.W., 2011. Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of sediment. *J. Hydrol.* 406, 73-81.
- Asadi, H., Ghadiri, H., Rose, V.W., Rouhipour, H., 2007. Interrill soil erosion processes and their interaction on low slopes. *Earth Surf. Process. Landf.* 32(5), 711-724.
- Besharat, F., Vaezi, A.R., 2015. Soil loss under simulated rainfalls during events on runoff and soil loss under simulated rainfalls. *J. Iran-Watershed Sci. Eng. Manage.* 9(29), 9-18 (in Persian).
- Gee, G.W., Bauder, J.W., 1986. Particle size analysis. In: Klute, (Ed.) *Methods of soil analysis*. Part 1, 2nd ed. America Society of Agronomy, Madison, 383-411 pages.
- Geng, R., Zhang, G.H., Ma, Q.H., Wang, H., 2017. Effects of landscape positions on soil resistance to rill erosion in a small catchment on the Loess Plateau. *Bios. Eng.* 160, 95-108.

- Golykalrod, M.A., Asadi, H., Gorji, M., 2011. Effect of bed flow rate and slope on changes in concentration and particle size distribution of sediment due to rill erosion. 12th Iranian Soil Science Congress (in Persian).
- Greenwood, P., Zhang, Y., 2020. Comparing grain size composition of inter-rill and rill-eroded sediment from cultivated hillslope soils using caesium-134 and cobalt-60 as tracers. *Soil. Tillage. Rese* 198, 104532.
- Jones, J.B., 2001. Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis. Press, Boca Raton, FL. 27-160 pages.
- Kemper, W.D., Rosenau, R.C., 1986. Aggregate stability and size distribution models. *Geoderma* 123, 363-371.
- Kiani-Harchegani, M., Sadeghi, S.H., Singh, V.P., Asadi, H., Abedi, M., 2019. Effect of rainfall intensity and slope on sediment particle size distribution during erosion using partial eta squared. *Catena* 176, 65-72.
- Kinnell, P.I.A., 2005. Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: a review. *J. Hydrol. Proc.* 19(14), 2815-2844.
- Koiter, A.J., Owens, P.N., Petticrew, E.L., Lobb, D.A., 2017. The role of soil surface properties on the particle size and carbon selectivity of interrill erosion in agricultural landscapes. *Catena* 153, 194-206.
- Kord, M., Vaezi, A.R., Mahdian, M.H., 2017. Temporal variability of runoff production under slope gradients in different soil. *J. Soil Water Res.* 48(1), 77-85 (in Persian).
- Kubínová, R., Neumann, M., Kavka, P., 2021. Aggregate and particle size distribution of the soil sediment eroded on steep artificial slopes. *Applied Sci.* 11(10), 4427.
- Mukhopadhyay, S., Masto, R.E., Tripathi, R.C., Srivastava, N.K., 2019. Application of soil quality indicators for the phytoremediation of mine spoil dumps. *Phytomanage. Pollut. Site.* 361-388.
- Nguyen, V.B., Nguyen, Q.B., Zhang, Y.W., Lim, C.Y.H., Khoo, B.C., 2016. Effect of particle size on erosion characteristics. *Wear* 348, 126-137.
- Ozturk, M., 2017. Sediment size effects in acoustic doppler velocimeter-derived estimates of suspended sediment concentration. *Water* 9(7), 2-18
- Proffitt, A.P.B., Rose, C.W., 1991. Soil erosion processes: I. the relative importance of rainfall detachment and runoff entrainment. *Aust. J. Soil Res.* 29, 671-683.
- Rienzi, E.A., Fox, J.F., Grove, J.H., Matocha, C.J., 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., Vaezi, A.R., 2019. Selectivity of particles through rill erosion in different soil textures. *J. Water Soil Sci* 23(2), 1-12 (in Persian).
- Salehi, Y., Moghadam, N.K., Lajayer, B.A., Astatkie, T., 2022. Soil conservation using mechanical and non-mechanical methods. *Soils in Urban Ecosystem*, Springer, Singapore, 219-241 pages.
- Shi, Z.H., Fang, N.F., Wu, F.Z., Wang, L., Yue, B.J., Wu, G.L., 2012. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes. *J. Hydrol.* 454, 123-130.
- Sun, L., Zhou, J.L., Cai, Q., Liu, S., Xiao, J., 2021. Comparing surface erosion processes in four soils from the loess plateau under extreme rainfall events. *Int. Soil Water Conserv. Res.* 9(4), 520-531.
- Tuladhar, R., Marshall, A., Sivakugan, N., 2020. Use of recycled concrete aggregate for pavement construction. *Advances in Construction and Demolition Waste Recycling*. Woodhead Publishing, 181-197 pages.
- Vaezi, A.R., Ebadi, M., 2017. Particle size distribution of surface-eroded soil in different rainfall intensities and slope gradients. *Water Soil* 5(1), 216-229 (in Persian).
- Vaezi, A.R., 2020. Water erosion (process and models). Zanjan University Press (in Persian).
- Walkley, A., Black, I.A., 1934. Estimation of soil organic carbon by the chromic acid titration method. *J. Soil Sci.* 37, 29-38.
- Wang, L., Shi, Z.H., 2015. Size selectivity of eroded sediment associated with soil texture on steep slopes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 79(3), 917-929.
- Warrington, D.N., Mamedov, A.I., Bhardwaj, A.K., Levy, G.J., 2009. Primary particle size distribution of eroded material affected by degree of aggregate slaking and seal development. *Eur. J. Soil Sci.* 60(1): 84-93.
- Wildhaber, Y.S., Banninger, D., Burri, K., Alewell, C., 2012. Evaluation and application of a portable rainfall simulator on subalpine grassland. *Catena* 91, 56-62
- Zhu, F., Li, Y., Cheng, J., 2021. Size characteristics of sediments eroded under different masson pine litter covers in South China. *Water* 13(16), 2190.