

Research Paper

The Effect of Cumulative Depth to Wet on Sediment in Different Rainfall Intensities and Slopes Using Rainfall Simulator

Akbar Norouzi-Shokrlu¹, Mahdi Pajouhesh^{2*}, Khodayar Abdolahi³

¹ Ph.D. Candidate at the Shahrekord University, Faculty of Natural Resources and Earth Science, Department of Natural Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

² Assistant professor, Faculty of Natural Resources and Earth Science, Department of Range and Watershed Management, Shahrekord University, Shahrekord, Iran,

³ Assistant professor, Faculty of Natural Resources and Earth Science, Department of Range and Watershed Management, Shahrekord University, Shahrekord, Iran



10.22125/iwe.2021.251743.1425

Received:
October 7, 2020
Accepted:
April 18, 2021
Available online:
August 4, 2025

Keywords:
Sediment, Runoff,
Rainfall simulator,
Depth to wet, Field
studies

Abstract

Soil erosion is an integrated process that results from the connection of sub-processes related to degradation, separation, transport of soil particles and sediment based on erosive factors such as runoff, rainfall intensity and slope. These factors change the amount and pattern of erosion and affect the total output of sediment. The purpose of this research was to investigate the effect of accumulate depth to wet on sediment in different slopes and intensities using rainfall simulator. This research was considered as a field survey and it was used three slopes of slight, moderate and steep at different rainfall intensities of 45, 60 and 70 mm/hr. Wetting depth was measured using a thin rod every 10 minutes diagonally inside the plot and it was measured using a ruler. Accordingly, the amount of runoff and sediment were collected from the plot surface and measured in the laboratory. The results of this study revealed that with increasing rainfall intensity in all treatments, the amount of sediment production increases in steep and medium slopes. Moreover, the highest and lowest amount of cumulative sediment production occurred at medium and slight slopes in intensity of 70 and 45 mm/h, respectively. This would be due to the larger volume of surface soil and exposing soil aggregates to the kinetic energy of raindrops and factors related to the slope angle, respectively, which has increased or decreased the protective effect of the surface layer. Further, the maximum cumulative wetting depth value increases from high to low intensity due to the possibility of sufficient water penetration into the soil.

* **Corresponding Author:** Mahdi Pajouhesh
Address: Assistant professor, Faculty of Natural Resources and Earth Science, Department of Range and Watershed Management, Shahrekord University, Shahrekord, Iran,

Email: pajouhesh.mehdi@sku.ac.ir
Tel: 03832324401

1. Introduction

Moisture is gathered in the near-surface region before advancing down through the soil as a distinct wetting front. Depth to wet presents the amount of water that penetrates into soil and wets that soil profile. Once the water infiltrates into the soil, this movement carry on under the effect of gravity and capillary forces. Water then travels to the deep depths across soil and rock pores. The main purpose of this research is to assess accumulated depth to wet on sediment in rainfall intensities (45, 60 and 70 mm/h) and slopes (10, 20 and 30%).

2. Materials and Methods

The rainfall simulator was equipped with a sort of drip systems with field plots of a 0.9 m long \times 0.5 m wide, with the rainfall apparatus height being almost 2.5 m. The plan view of the erosion flume was selected of the rectangular area from the watershed hillslope. The collected runoff along with suspended sediment in containers was transferred to the laboratory. The sediment was separated from the collected runoff samples and measured in laboratory individually. Each test was performed in three different replications on different slopes and intensities and it was proceeding 60 minutes according to the rainfall regime of the study area. Finally, Two-way analysis of variance was used to evaluate the cumulative wetting depth on cumulative sediment. Also, the mean comparisons were conducted for their significant differences in rainfall intensities of 45, 60 and 70 mm/h and slopes of 10, 20 and 30%.

3. Results

In rainfall intensity of 45 mm / h, the highest and lowest cumulative runoff volumes of 4.87 and 4.19 liters are related to steep and low slopes, respectively. The highest sediment production rate is produced at an intensity of 45 mm/h and on high slopes of the study area, and the lowest cumulative sediment production rate is produced on low slopes. In terms of wetting depth, the 10 percent slope has the highest wetting depth with an amount of 52.6 cm compared to the 30 and 20 slopes, and the highest sediment rate is related to the 30 percent slope, which indicates the high cumulative runoff volume at an intensity of 45 mm/h.

The cumulative runoff volume on medium slopes (20 percent) is higher than on low (10 percent) and steep (30 percent) slopes at an intensity of 60 mm/h. The upward trend in the sediment rate on medium slopes has been higher than on other slopes, and low and steep slopes have been lower than that. The lowest and highest wet depth values are related to the 30 and 10 percent slopes with 26.5 and 29.6 cm, respectively. The lowest and highest sediment values are related to the 10 and 20 slopes with 0.742 and 0.937 kg, respectively.

Based on the cumulative volume curve, the runoff occurring on the 20 percent slope with 9.08 liters has the highest runoff compared to the low and steep slopes at a rainfall intensity of 70 mm/h. Also, the cumulative sediment value on the medium slope is higher than the rest of the slopes. The lowest and highest cumulative wet depth values are related to the 20 and 30 percent slopes with 5.63 and 1.6 cm, respectively. The lowest and highest sediment values are related to the 30 and 20 percent slopes with 0.372 and 1.3 kg, respectively. In this section, the highest cumulative wet depth occurred on the steep slope (30 percent) and the sedimentation rate on this slope was lower than on other slopes.

4. Discussion and Conclusion

In rainfall intensity of 45 mm / h, with increasing degree of slope, the amount of sediment and cumulative runoff has increased and the amount of infiltration has decreased which is due to shear energy produced on the soil by raindrops causes runoff production and Soil eroded from upstream to downstream. On the other hand, the lower speed of runoff, the amount of sediment is low in gentle slopes and as a result, the amount of wetting depth is high. This is consistent with the research of Sharma et al., 1983. Also, in conditions of bare or uncovered soil, the absence of any protection on the soil surface allows the erosive power of rain to increase and cause more sediment. This is consistent with research by Schick et al., 2017.

The reason for the high amount of sediment on the 20% slope in rainfall intensity of 60 mm/h could be the increase in kinetic energy of raindrops and water depth due to the increase in rainfall intensity from 45 to 60 mm per hour. As the intensity of rainfall increases, the diameter of the raindrops increases and the impact of number of raindrops hit the soil surface increases and cause the destruction and dispersion of soil particles and the transfer of particles by runoff. Therefore, high intensity rains produced high kinetic energy and erosion. The results are in line with the research of Mineo et al., 2019.

In rainfall intensity of 70 mm / h with respect to the results of this research wetting depth occurred on the steep slope, although the amount of sediment at this slope is the lowest. This would be spatial heterogeneity

of characteristics of surface soil infiltration. This result is consistent with the results of Parsons and Stone (2006).

5. Six important references

- 1) Mineo, C., E. Ridolfi, B. Moccia, F. Russo and F. Napolitano. 2019. Assessment of rainfall kinetic-energy intensity relationships. *Water*, 11(10): 1994.
- 2) Parsons, A.J and P.M. Stone.2006. Effects of intra-storm variations in rainfall intensity on interrill runoff and erosion. *Catena*, 67(1):68-78.
- 3) Schick, J., I. Bertol, F.T. Barbosa, D.J. Miquelluti and N.P. Cogo. 2017. Water Erosion in a Long-Term Soil Management Experiment with a Humic Cambisol. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 41.
- 4) Sharma, K., H. Singh and O. Pareek.1983. Rainwater infiltration into a bare loamy sand. *Hydrological Sciences Journal*, 28: 417-424.
- 5) Vaezi, A.R., H. Hasanzadeh and A. Cerda. 2016. Developing an erodibility triangle for soil textures in semi-arid regions, NW Iran. *Catena*, 142:221-232.
- 6) Zhao, N., F.Yu, C. Li, H. Wang, J. Liu and W. Mu. 2014. Investigation of rainfall-runoff processes and soil moisture dynamics in grassland plots under simulated rainfall conditions. *Water*, 6(9):2671-2689

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to

تأثیر عمق خیسی تجمعی بر رسوب در شیب و شدت‌های های بارندگی مختلف با استفاده از شبیه ساز باران

اکبر نوروزی شکرلو^۱، مهدی پژوهش^{۲*}، خدایار عبدالهی^۳

تاریخ ارسال: ۱۳۹۹/۰۷/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۹

مقاله پژوهشی

چکیده

فرسایش خاک یک فرایند یکپارچه است که ناشی از اتصال زیرفرایندهای مرتبط با تخریب، جداسازی، حمل ذرات خاک و رسوب بر اثر عوامل فرساینده همچون رواناب، شدت بارندگی و شیب می‌باشد. این عوامل میزان و الگوی فرسایش را تغییر می‌دهند و بر میزان خروجی کل رسوب تأثیر می‌گذارد. هدف از این تحقیق بررسی تأثیر عمق خیسی تجمعی بر رسوب در شیب و شدت‌های های بارندگی مختلف با استفاده از شبیه ساز باران می‌باشد. این پژوهش به صورت مطالعات میدانی در سه شیب کم، متوسط و زیاد در شدت‌های مختلف بارندگی ۴۵، ۶۰ و ۷۰ میلی‌متر بر ساعت صورت گرفت. میزان عمق خیس شدگی با استفاده از میل بافت نازک در هر ۱۰ دقیقه به صورت قطری در داخل پلات صورت گرفت و در آخر عمق خیس شدگی با استفاده از خط کش اندازه گیری شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که با افزایش شدت بارندگی در همه تیمارها، میزان تولید رسوب در شیب‌های تند و متوسط افزایش می‌یابد. بعلاوه بیشترین و کمترین میزان تولید رسوب تجمعی در شیب متوسط و کم با شدت ۷۰ و ۴۵ میلی‌متر بر ساعت رخ داد. این امر به ترتیب می‌تواند ناشی از بیشتر بودن حجم خاک سطحی و در معرض قرار گرفتن خاکدانه‌های خاک در اثر انرژی جنبشی قطرات باران و فاکتورهای مربوط به زاویه شیب باشد که باعث افزایش و یا کاهش اثر محافظتی لایه سطحی شده است. همچنین حداکثر میزان عمق خیسی تجمعی از شدت بالا به طرف شدت پایین به دلیل فرصت نفوذ کافی آب در خاک زیاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: رسوب، رواناب، شبیه ساز باران، عمق خیس شدگی، مطالعات میدانی

^۱ دانشجوی دکتری آبخیزداری، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران تلفن تماس:

۰۹۱۴۷۴۲۹۱۱۶ آدرس پست الکترونیکی نویسنده اول norouzishokrlu65@gmail.com

^۲ استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران تلفن تماس:

۰۹۱۳۲۸۴۰۵۸۲ آدرس پست الکترونیکی نویسنده دوم pajouhesh.mehdi@sku.ac.ir (نویسنده مسئول)

^۳ استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران تلفن تماس:

۰۹۱۳۱۸۵۵۶۸۸ آدرس پست الکترونیکی نویسنده سوم kabdolla@sku.ac.ir

مقدمه

فرسایش خاک یکی از جدی‌ترین تهدیدهای محیط زیست در پایداری اکوسیستم‌های جهان است (محسنی و رزاقیان، ۱۳۹۲) که به پارامترهای زیادی از جمله ویژگی‌های بارندگی (مثلاً شدت بارندگی، مدت زمان، تفکیک زمانی، جهت حرکت و سرعت) بستگی دارد (Donjatee and Chinnarasri, 2012) که نشانگر شرایط سطح (مانند توپوگرافی، درجه شیب، و پوشش گیاهی) (Zhao et al., 2014)، خصوصیات هیدروفیزیکی خاک (Zhao et al., 2013)، فعالیت‌های انسانی (Kogo et al., 2019) و غیره می‌باشد. ضمناً فرسایش خاکی که به وسیله بارندگی رخ می‌دهد یک پدیده پیچیده ناشی از جدا شدن، انتقال ذرات خاک توسط قطرات باران و جریان سطحی است که می‌تواند انتقال ذرات را از منطقه خارج کند (زندى و همکاران، ۱۳۹۹؛ سیرجانی و محمودآبادی، ۲۰۱۴).

بنابراین بررسی تولید رواناب و رسوب یکی از فرآیندهای اصلی و مهم فرسایش و هدر رفت خاک بوده که آگاهی از ویژگی‌های مؤثر بر آن امری ضروری به نظر می‌رسد. لذا برنامه‌ریزی در زمینه‌ی مدیریت پایدار اراضی به ویژه در قالب طرح‌های حفاظت خاک و آبخیزداری، آگاهی از وضعیت فرسایش خاک و تولید رسوب در حوزه‌های آبخیز یکی از ابزارهای مهم تصمیم‌گیری برای برنامه‌ریزی این حوزه‌ها محسوب می‌شود. با توجه به موارد بالا فرایند رواناب- بارش به عنوان بخش مهمی از چرخه هیدرولوژیکی و خصوصیات تغییر زمانی و مکانی می‌باشد (Van de Giesen et al., 2000). تاکنون تحقیقات زیادی درباره شدت بارندگی، شیب و ارتباط آنها با رسوب صورت گرفته است. نظیف و ویلسون^۱ با بررسی تاثیر شیب و شدت بارندگی بر روی رواناب و نفوذ به این نتیجه رسیدند که یک رابطه قوی بین نفوذ در شرایط ماندگار و شدت باران برای خاک کشاورزی استاندارد وجود دارد. هوانگ^۲ و همکاران در

سال ۲۰۱۳ آزمایش باران را به منظور بررسی تأثیر شدت بارندگی، سطح زیرین و درجه شیب بر نفوذ خاک انجام دادند و نتایج آنها نشان داد که افزایش شدت بارندگی برای نفوذ خاک مؤثر نیست و ممکن است میزان نفوذ را کاهش دهد. حسن زاده و همکاران (۱۳۹۲) در خاک‌های با بافت مختلف در استان زنجان نیز نشان دادند که از رخداد اول تا رخداد چهارم، رطوبت خاک و تولید رواناب افزایش و زمان آغاز رواناب به طور معنی‌داری کاهش یافت. از رخداد پنجم به بعد، احتمالاً به دلیل به پایان رسیدن نسبی تخریب ساختمان خاک، تفاوت چشمگیری در مشخصه‌های رواناب دیده نشد. ژائو و همکاران در سال ۲۰۱۴ نتیجه گرفتند که فرایند رواناب- رسوب ارتباط نزدیکی با بسیاری از فاکتورها از قبیل شدت بارندگی، شیب منطقه، کاربری اراضی و خصوصیات خاک دارد. واعظی و همکاران (۲۰۱۶) با بررسی توسعه فرسایش‌پذیری مثلی برای بافت‌های خاک در مناطق خشک و نیمه خشک با استفاده از سامانه شبیه‌ساز باران به این نتیجه رسیدند که با افزایش توالی رخداد، به دلیل افزایش محتوای رطوبتی خاک و در معرض قرار گرفتن ذرات حساس بیشتر، هدر رفت خاک افزایش قابل توجهی پیدا کرد، به طوری که بیشترین مقدار هدررفت خاک مربوط به رخداد رگبار متوالی پایانی بود. رسولی کیا و کریم (۲۰۲۰) با شبیه سازی شدت بارندگی و درجه شیب برای تعیین ضریب رواناب خاک در مقیاس پلات کوچک به این نتیجه رسید که موقعی شدت بارندگی از ۱۰ به ۲۰ میلی‌متر بر ساعت افزایش پیدا می‌کند. تغییر قابل توجهی (به طور متوسط ۵۳ درصد) در هدر رفت خاک ایجاد می‌شود.

رطوبت قبل از پیشروی به درون خاک در منطقه ای نزدیک سطح زمین جمع می‌شوند که به عنوان عمق خیس می‌شوند. عمق خیس‌شدگی^۳ میزان آبی است که به درون خاک نفوذ پیدا می‌کند. زمانی که آب به درون خاک نفوذ پیدا می‌کند این جابجایی تحت اثر نیروی کاپیلاریته و گرانش ادامه می‌یابد. سپس آب از طریق

1 . Nassif and Wilson

2 . Huang

و ۷۰ میلی‌متر بر ساعت و در شیب‌های مختلف ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد با استفاده از شبیه‌ساز باران صورت گرفت. اگرچه پژوهش‌های متعددی در مورد تاثیر میزان رسوب بر روی رواناب انجام شده است؛ اما پژوهشی در ارتباط با تاثیر میزان عمق خیزی بر رسوب تجمعی طی شدت‌های بارندگی و شیب‌های مختلف بررسی نشده و به‌طور خاص‌تر در منطقه مورد مطالعه چنین مطالعاتی پیش‌تر صورت نگرفته است. بررسی این پژوهش درک و آگاهی کلی را برای محققان در ارتباط با نقش عمق خیزی در ایجاد رسوب در مناطق خشک و نیمه خشک میسر می‌سازد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه‌ی مورد مطالعه واقع در دامنه قلات شهر شهرکرد به وسعت ۱۷۱۷ متر مربع و با مختصات جغرافیایی " ۲۹ ' ۵۰ ° ۵۰ تا " ۵۰ ' ۵۰ ° ۵۰ طول شرقی و " ۱۷ ' ۲۱ ° ۳۲ تا " ۲۱ ' ۹۲ ° ۳۲ عرض شمالی می‌باشد که ۲۱۸۶ متر ارتفاع از سطح دریا واقع شده است. میانگین دمای سالانه از ۸/۵- تا ۱۲/۴۵ درجه سلسیوس متغیر است. میزان بارندگی سالانه ۳۲۰/۹ میلی‌متر می‌باشد. متوسط رطوبت نسبی در این منطقه ۴۴ درصد می‌باشد. بافت خاک منطقه مورد مطالعه لومی تا سندی-کلی-لوم می‌باشد.

روش تحقیق

برای این کار از سامانه شبیه ساز باران با ارتفاع ۲/۵ متر نوع قطره‌ای در پلاتی به اندازه ۰/۹ متر در طول و ۰/۵ متر در عرض استفاده شد. مشخصات باران‌سازها به نوع قطرات استفاده شده، و چگونگی تنظیم قطرات باران بستگی دارد. علاوه بر این شدت بارندگی و روش اندازه‌گیری آن روی اندازه قطرات تأثیر می‌گذارد (Marques et al, 2007). این دستگاه از قسمت‌های مختلفی از جمله: موتور برق برای تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز دستگاه، سیستم کامپیوتری کنترل نازل‌ها، مخزن، پمپ آب و فشارسنج، سیستم پاشش قطرات باران، چهارچوب دستگاه با پایه‌های قابل تنظیم ارتفاع تا ۲/۴۰ متر و کورت آزمایش

منافذ خاک به اعماق پیموده می‌شود. نلسون^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۱ با بررسی عمق خیزی و منطقه فعال خاک‌های رس توسعه یافته و نفوذ گیاهان روی پایه‌های کم عمق به این نتیجه رسیدند که محتوای آب به دلیل ورود آب از منابع خارجی (بارش، آبیاری، عبور از خطوط آب و غیره) افزایش یافته یا به دلیل تبخیر کاهش می‌یابد. ولز^۲ و همکاران در سال ۲۰۰۷ با بررسی تکنیک‌های ساده برای اندازه‌گیری عمق خیزی در خاک‌های انتخاب شده، عمق خیزی را به ویژه در خاک‌هایی که دارای ترک و یا شرایط خشک داشته باشند نمایانگر اندازه‌گیری نفوذ دانست. محمدی و کاویان^۳ در سال ۲۰۱۰ نشان دادند که رواناب، رسوب و عمق خیزی در شرایط محیطی مختلف به دلیل تغییرات مکانی مختلف نتایج متفاوتی را به دنبال دارد. به طوری که تولید رواناب و رسوب تحت تأثیر تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک تغییر می‌یابند، قابلیت خاک در تولید رواناب و رسوب در طی زمان نیز ثابت نیست بلکه با تغییرات اقلیم و ویژگی‌های خاک و باران تغییر می‌یابد.

پژوهش حاضر به صورت میدانی با استفاده از سامانه شبیه‌ساز باران برای شناخت فرسایش خاک و فرایندهای مربوط به آن مورد استفاده قرار گرفت (Boulangue et al., 2019; Norouzi et al., 2020). این سامانه با ارتفاع ۲/۵ متر نوع قطره‌ای در پلاتی به اندازه ۰/۹ متر در طول و ۰/۵ متر در عرض به کار برده شد. سه شیب ۱۰ درصد (شیب کم)، ۲۰ درصد (شیب متوسط) و ۳۰ درصد (شیب زیاد) در شدت ۴۵، ۶۰ و ۷۰ میلی‌متر بر ساعت با توجه به محدوده شدت فرسایش طی بازه زمانی ۶۰ دقیقه ای در منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه شدت بارندگی و شیب از عوامل موثر در تولید رسوب به حساب می‌آید، به نظر می‌رسد ارتباط پیچیده‌ای در مناطق مختلف بین این دو متغیر برقرار باشد. بنابراین این تحقیق با هدف بررسی تاثیر عمق خیزی تجمعی بر رسوب در شدت بارندگی های ۴۵، ۶۰

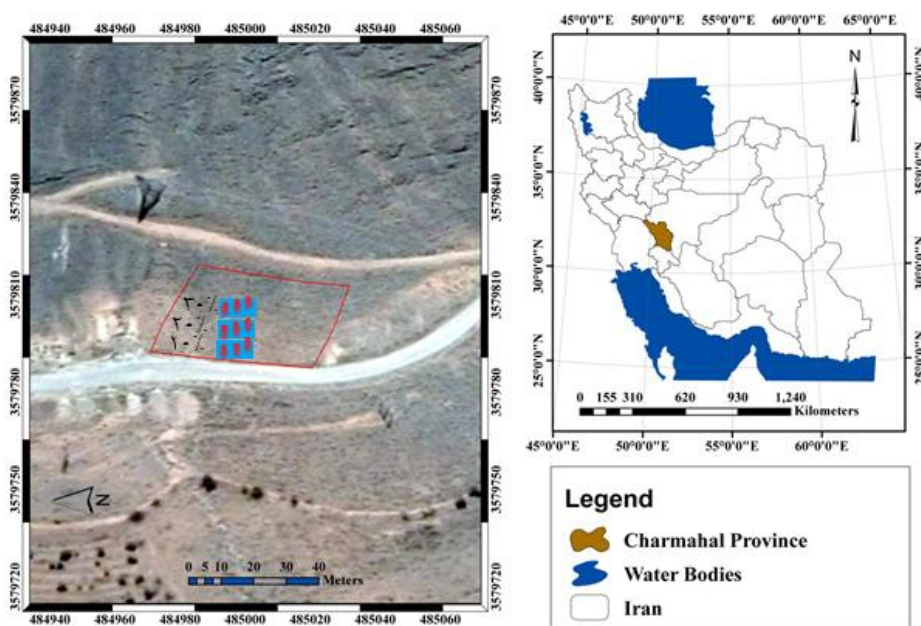
1. Nelson
2. Wells
3. Mohammadi and kavian

که زمان بارش باید مساوی یا بیشتر از زمان تمرکز باشد تا رواناب حاصل از بارندگی در همه سطح خروجی مشارکت داشته باشد (میرزایی و مصطفی زاده، ۱۳۹۷). بازه زمانی ۶۰ دقیقه‌ای به ۶ قسمت ۱۰ دقیقه‌ای تقسیم شد و در آخر میزان رواناب و رسوب از سطح پلات جمع‌آوری و در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. با استفاده از خط کش یا میل های بافت نازک میزان عمق خیس شدگی را در هر ۱۰ دقیقه به صورت قطری با ۳ تکرار در داخل پلات اندازه‌گیری شد. این امر برای شدت‌ها و شیب‌های فوق الذکر صورت گرفت. بعد از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی ناشی از حجم رواناب و میزان رسوب، داده‌های مورد نظر به اکسل انتقال داده شد. به کار بردن عمق خیزی تجمعی و رسوب تجمعی در این تحقیق به دلیل کاهش تاثیر میزان ناهمگنی در خاک سطحی است. به منظور کمتر کردن اختلاف میان آزمایش‌ها از سه تکرار میانگین گرفته شد.

به منظور ارزیابی میزان عمق خیزی تجمعی بر رسوب تجمعی از آزمون آماری تجزیه واریانس دو طرفه استفاده گردید. همچنین برای اختلاف معنی داری آنها در شدت‌های بارندگی ۴۵، ۶۰ و ۷۰ میلی‌متر بر ساعت و شیب‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد از مقایسه میانگین‌ها بهره گرفته شد.

تشکیل شده است. مخزن آب باران ساز از طریق شیلنگ‌هایی به سر نازل‌ها وصل شده است و از طریق شیرهای که در بالای آن قرار دارد جهت تنظیم شدت بارندگی مورد استفاده قرار گرفت. سه شیب ۱۰ درصد (شیب کم)، ۲۰ درصد (شیب متوسط) و ۳۰ درصد (شیب زیاد) در شدت ۴۵، ۶۰ و ۷۰ میلی‌متر بر ساعت با توجه به محدوده شدت فرساینده‌گی در منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. به دلیل محدودیت دستگاه شبیه ساز باران در شدت‌های پایین به شدت‌های ۴۵، ۶۰ و ۷۰ میلی‌متر بر ساعت پرداخته شد. از طرف دیگر با توجه به اینکه تقریباً ۷۰ درصد مساحت حوزه دارای شیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد است، لذا عملیات شبیه‌سازی در سه شیب مذکور صورت گرفت (بهرهی و همکاران، ۱۳۹۷). دستگاه شبیه ساز باران بر روی خاک طبیعی در منطقه مورد مطالعه تعبیه شده است. در این تحقیق آزمایش‌ها بر روی خاک لخت منطقه صورت گرفته است. همچنین از عمق ۳۰-۰ سانتی متری در شیب‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد نمونه برداشته شد و به آزمایشگاه منتقل شد. در این تحقیق از عامل پوشش گیاهی صرف‌نظر شده است.

هر تست در ۳ تکرار مختلف بر روی شیب‌ها و شدت‌های مختلف صورت گرفت، و هر تست با توجه به رژیم بارندگی منطقه مورد مطالعه ۶۰ دقیقه طول کشید. دلیل انتخاب مدت زمان ۶۰ دقیقه ناشی از این امر است



شکل (۱): موقعیت حوزه آبخیز و پلات‌های اندازه‌گیری در استان چهارمحال بختیاری و کشور



شکل (۲): نمایی از دستگاه شبیه ساز باران در منطقه مورد مطالعه

تحت شبیه‌ساز باران بر روی شیب‌های مختلف صورت گرفت.

رابطه بین حجم رواناب و رسوب تجمعی و عمق خیزی تجمعی در شدت ۴۵ میلی‌متر بر ساعت

نتایج و بحث

این پژوهش با هدف بررسی تاثیر عمق خیزی تجمعی بر رسوب طی مدت زمان ۶۰ دقیقه حجم رواناب تجمعی،

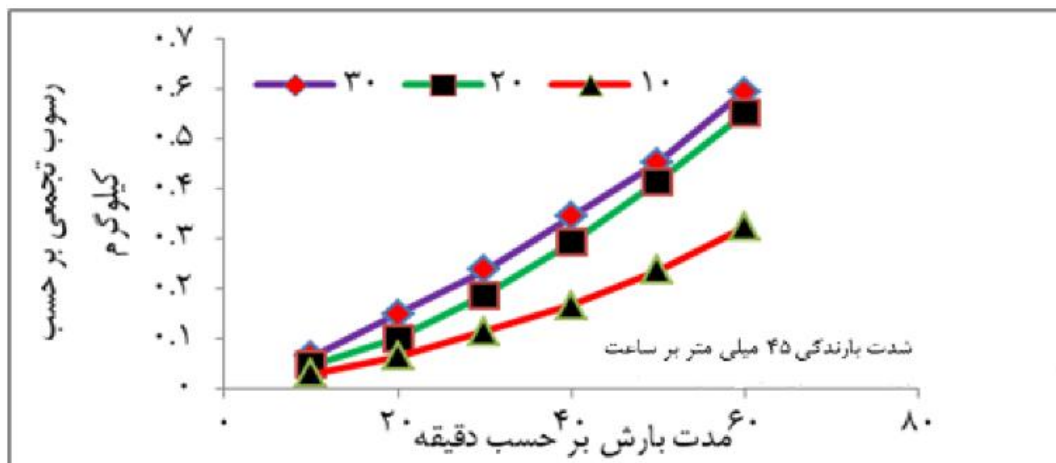
شیب رخ دهد. بیشترین میزان رسوب مربوط به شیب ۳۰ درصد می باشد که نشانگر بالا بودن حجم تجمع روئاناب در شدت ۴۵ میلی متر بر ساعت است. بنابراین می توان گفت که با افزایش درجه شیب، میزان روئاناب و رسوب تجمع یافته و میزان نفوذ کاهش می یابد که این امر با تحقیق فوکس و برایان^۱ در سال ۱۹۹۷ و زیادت و تایمه^۲ در سال ۲۰۱۳ مطابقت دارد

شکل ۳ حجم روئاناب تجمع یافته با شدت بارندگی ۴۵ میلی متر بر ساعت به عنوان تابعی از زمان بارندگی طی شیب های مختلف نشان می دهد. بیشترین و کمترین حجم تجمع روئاناب به میزان ۴/۸۷ و ۴/۱۹ لیتر به ترتیب مربوط به شیب تند و کم می باشد. دلیل این امر می تواند ناشی از نفوذپذیری کمتر و یا مربوط به تاثیر زاویه برخورد قطرات در شیب های بالا باشد. نتایج این تحقیق با پژوهش های Zhao et al., و Ran et al., 2012 و Zhao et al., 2015 مطابقت دارد.

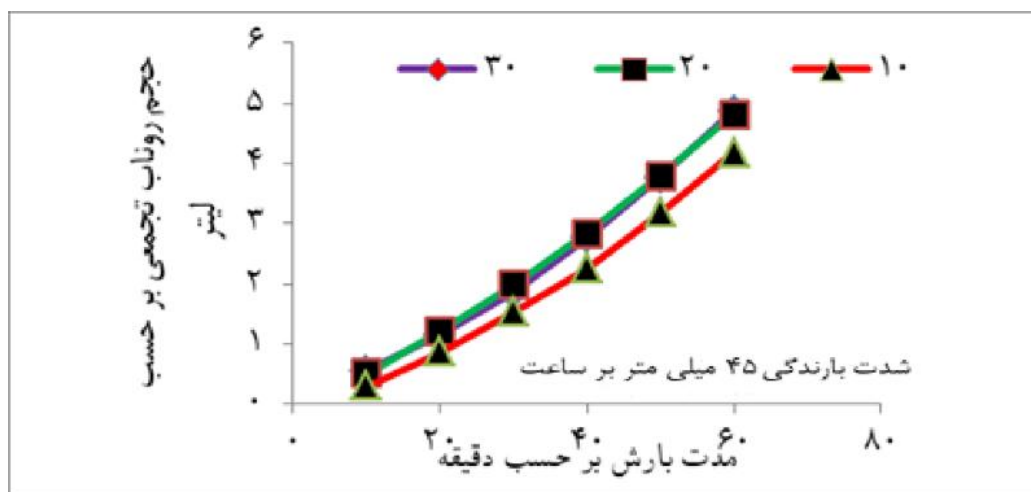
شکل ۴، میزان رسوب تجمع یافته را به عنوان تابعی از شدت بارندگی ۴۵ میلی متر بر ساعت در شیب های متفاوت نشان می دهد. همان طور که شکل مذکور نشان می دهد، میزان رسوب در مراحل اولیه ناشی از شیب های مختلف مشابه بوده اما با افزایش روئاناب تجمع یافته، میزان رسوب در شیب های ۲۰ و ۳۰ درصد به تدریج زیاد می شود. بنابراین می توان نتیجه گرفت که بیشترین میزان تولید رسوب، در شدت ۴۵ میلی متر بر ساعت و در شیب های بالای منطقه مورد مطالعه تولید می شود و کمترین میزان رسوب تجمع یافته در شیب های کم تولید می شود. این امر می تواند ناشی از این امر باشد که در شیب های کم ظرفیت نفوذ بهتر بوده و با افزایش شیب ظرفیت نفوذ کمتر شده و منجر به افزایش میزان رسوب گردیده است. این موضوع با نتایج نظیف و ویلسون و همکاران (۱۹۷۵) مطابقت دارد. آنها با تحقیق بر روی تاثیر شیب بر روی روئاناب و نفوذ به این نتیجه رسیدند که در خاک های نفوذپذیر هرچه شیب بیشتر باشد، ظرفیت نفوذ کاهش می یابد و در خاک های نفوذناپذیر این امر تاثیر بسیار کم و یا اصلا تاثیر ندارد.

شکل ۵ میزان رسوب تجمع یافته را به عنوان تابعی از شدت بارندگی ۴۵ میلی متر بر ساعت در شیب های متفاوت در ارتباط با عمق خیزی نشان می دهد. از لحاظ عمق خیزی، شیب ۱۰ درصد با میزان ۶/۵۲ سانتی متر بیشترین عمق خیزی را نسبت به شیب های ۳۰ و ۲۰ داشته است. این امر ناشی از کمتر بودن حجم تجمع روئاناب در شیب ۱۰ درصد نسبت به حجم تجمع روئاناب بقیه شیب ها است، که باعث شده رسوب کمتری در این

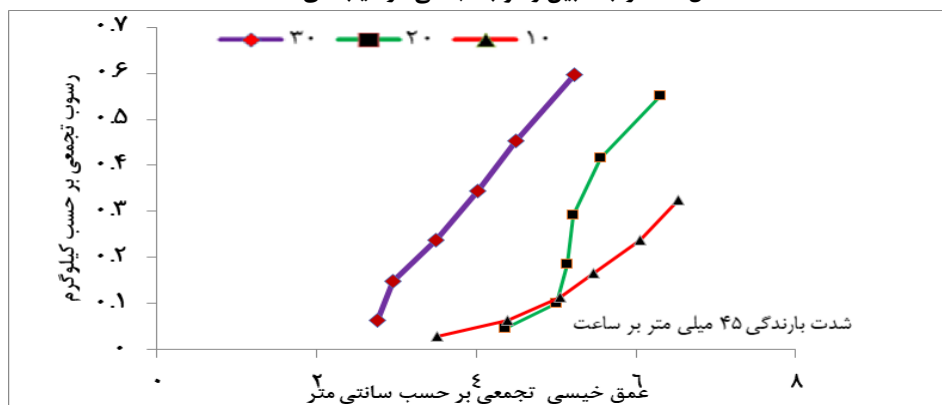
1 . Fox and Brayn
2 . Ziadat and Taimeh



شکل (۲): ارتباط بین حجم تجمعی رواناب در شیب‌های مختلف



شکل (۴): ارتباط بین رسوب تجمعی در شیب‌های مختلف

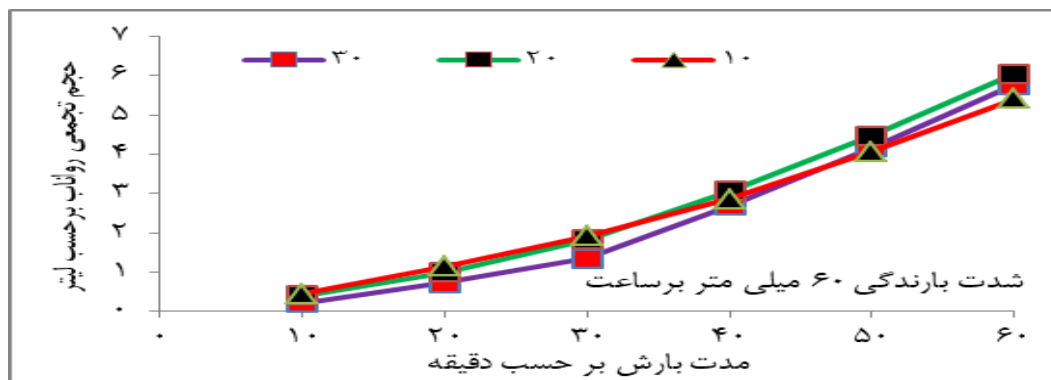


شکل (۵): رابطه بین رسوب تجمعی و عمق خیسی تجمعی در شدت ۴۵ میلی متر بر ساعت

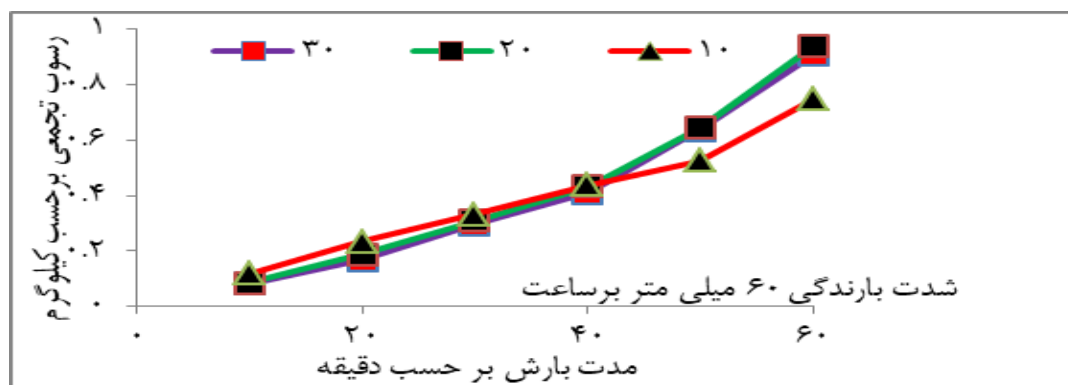
که باعث افزایش و یا کاهش اثر محافظتی لایه سطحی شده است. نتایج این تحقیق هم راستا با تحقیق Zhao et al., 2015 می باشد.

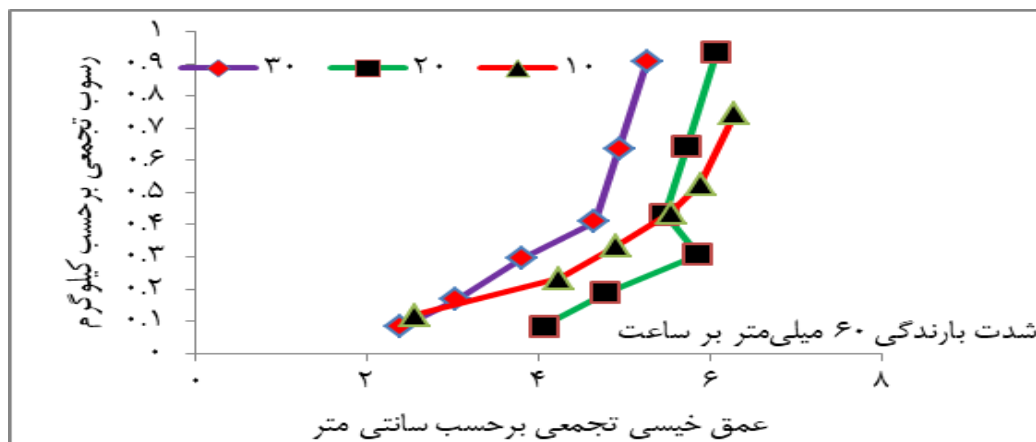
همان طور که در شکل ۸ نشان داده شد، کمترین و بیشترین میزان عمق خیسی به ترتیب مربوط به شیب ۳۰ و ۱۰ درصد با میزان ۵/۲۶ و ۶/۲۹ سانتی متر می باشد. کمترین و بیشترین میزان رسوب به ترتیب مربوط به شیب ۱۰ و ۲۰ با میزان ۰/۷۴۲ و ۰/۹۳۷ کیلوگرم می باشد. از انجایی که شیب ۳۰ درصد جزو شیب های تند طبقه بندی می شود، میزان نفوذ یا عمق خیسی در این قسمت خیلی کم بوده است و قاعدتا باید میزان رسوب بالایی را به خود اختصاص بدهد، اما به دلیل عدم تولید خاک کافی در این قسمت میزان رسوب کمتری را در برمی گیرد. از طرف دیگر حجم تجمع رسوب در شیب متوسط (۲۰ درصد) نسبت به بقیه شیب ها بیشتر بوده و این امر باعث شده که مقدار رسوب بالایی را به خود اختصاص دهد.

رابطه بین حجم رواناب تجمعی، رسوب تجمعی و عمق خیسی تجمعی در شدت ۶۰ میلی متر بر ساعت
همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده است حجم رواناب تجمعی با شدت بارندگی ۶۰ میلی متر بر ساعت در شیب های مختلف ارائه شد. براساس شکل ۶ حجم تجمعی رواناب در شیب متوسط (۲۰ درصد) بالاتر از شیب های کم (۱۰ درصد) و تند (۳۰ درصد) بوده است. شکل ۷ میزان رسوب تجمعی را به عنوان تابعی از شدت بارندگی ۶۰ میلی متر بر ساعت در شیب های متفاوت نشان می دهد. با توجه به نتایج زیر روند صعودی میزان رسوب در شیب متوسط بیشتر از بقیه شیب ها بوده است و شیب های کم و تند نسبت به آن کمتر بوده است. در واقع می توان گفت رابطه بین میزان رواناب تجمعی و میزان رسوب تجمعی در شیب متوسط رابطه مشابهی داشته است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که بیشترین میزان تولید رسوب با شدت ۶۰ میلی متر بر ساعت در منطقه مورد مطالعه در شیب های متوسط تولید می شود و کمترین میزان رسوب تجمعی در شیب های کم تولید می شود. این امر می تواند ناشی از فاکتورهای مربوط به زاویه شیب باشد



شکل (۶): ارتباط بین حجم تجمع رواناب در شیب های مختلف





شکل (۷): ارتباط بین رسوب تجمعی در شیب‌های مختلف

شکل (۸): ارتباط عمق خیزی تجمعی و رسوب تجمعی در شدت ۶۰ میلی‌متر بر ساعت

بخش از پلات باشد. چون بارندگی با شدت زیادی به خاک برخورد می‌کند و باعث می‌شود انرژی جنبشی قطرات باران خاکدانه‌های خاک را راحت از جا کنده و به خروجی پلات برساند.

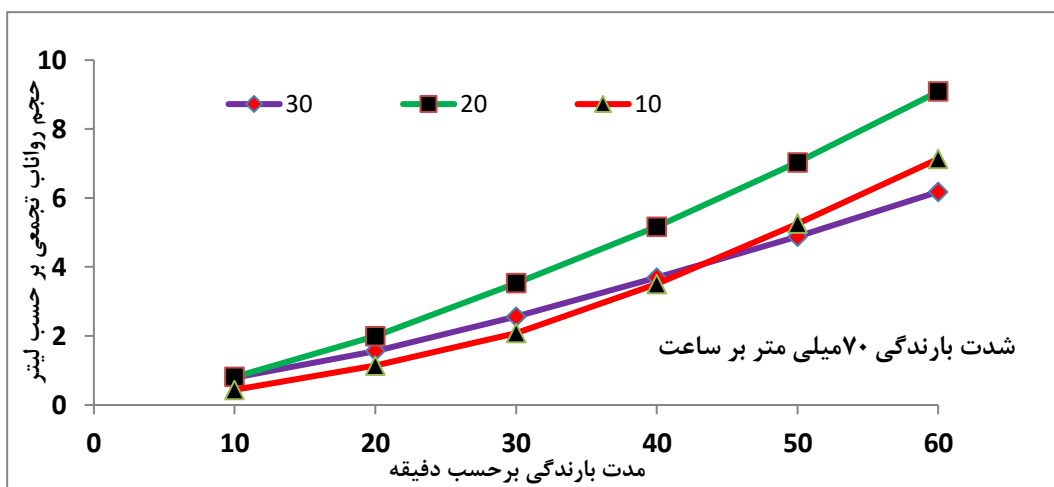
شکل ۱۱ ارتباط میزان رسوب تجمعی را در شیب‌های متفاوت در ارتباط با عمق خیزی تجمعی با شدت ۷۰ میلی‌متر بر ساعت نشان می‌دهد. کمترین و بیشترین میزان عمق خیزی تجمعی به ترتیب مربوط به شیب ۲۰ و ۳۰ درصد و به میزان ۵/۶۳ و ۶/۱ سانتی‌متر می‌باشد. کمترین و بیشترین میزان رسوب به ترتیب ۰/۳۷۲ و ۱/۳ کیلوگرم مربوط به شیب ۳۰ و ۲۰ درصد می‌باشد. در این بخش بیشترین میزان عمق خیزی تجمعی در شیب تند (۳۰ درصد) اتفاق افتاده و میزان رسوب در این شیب کمتر از شیب‌های دیگر است.

رابطه بین حجم رواناب تجمعی، رسوب تجمعی و

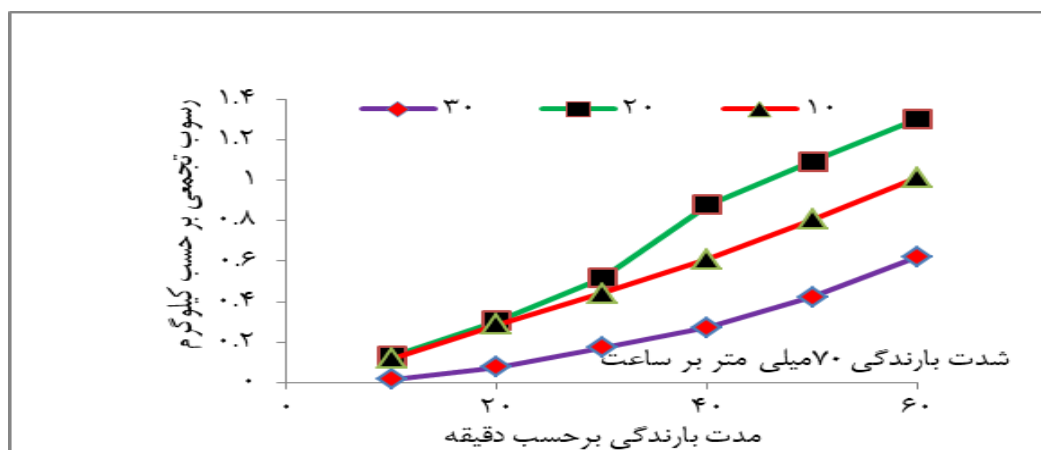
عمق خیزی تجمعی در شدت ۷۰ میلی‌متر بر ساعت

شکل ۹ حجم رواناب تجمعی با شدت بارندگی ۷۰ میلی‌متر بر ساعت در شیب‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ را نمایش می‌دهد. بر اساس منحنی حجم تجمعی، رواناب رخ داده در شیب ۲۰ درصد با میزان ۹/۰۸ لیتر دارای بیشترین میزان رواناب نسبت به شیب‌های کم و تند را داراست.

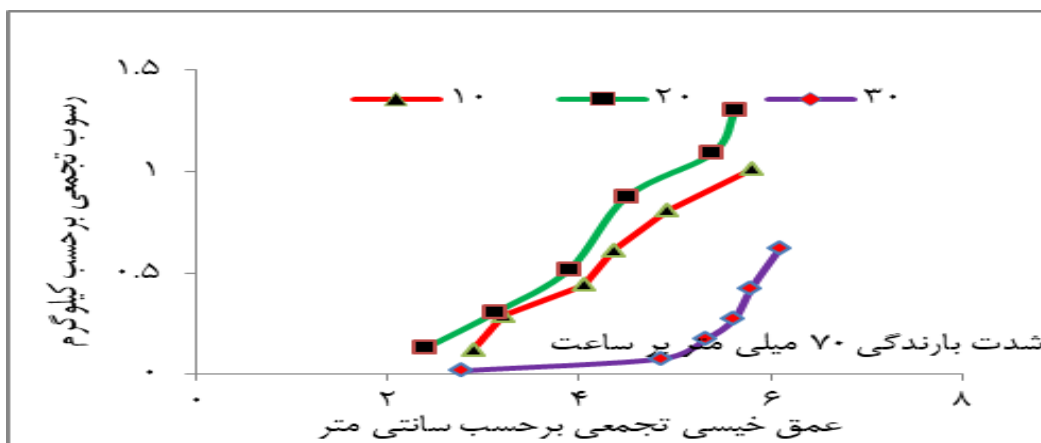
شکل ۱۰ میزان رسوب تجمعی را به عنوان تابعی از شدت بارندگی ۷۰ میلی‌متر بر ساعت در شیب‌های متفاوت نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مذکور نشان می‌دهد میزان رسوب تجمعی در شیب متوسط بالاتر از بقیه شیب‌ها است. با افزایش شدت بارندگی، میزان تولید رسوب در شیب متوسط بیشترین میزان رسوب را دارد گرچه این امر در شیب‌های کم و تند کمتر است. این امر می‌تواند ناشی از بیشتر بودن حجم خاک سطحی در این



شکل (۹): ارتباط بین حجم تجمعی رواناب در شیب‌های مختلف



شکل (۱۰): ارتباط بین رسوب تجمعی در شیب‌های مختلف



شکل (۱۱): ارتباط بین رسوب تجمعی با عمق خیزی تجمعی در شیب‌های مختلف

جدول ۱ تا ۳ به ترتیب نتایج آنالیز واریانس دو طرفه میزان رسوب بر شدت بارندگی و عمق خیزی تجمعی؛ شیب و شدت بارندگی و شیب و عمق خیزی تجمعی و اثر متقابل میزان رسوب بر روی آنها را نشان می‌دهد.

بررسی مقدار رسوب در شیب، شدت بارندگی و عمق خیزی تجمعی در منطقه مورد مطالعه

جدول (۱): نتایج حاصل از آنالیز واریانس دو طرفه میزان رسوب ناشی از شدت بارندگی و عمق خیزی تجمعی

	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F- value	Pr(>F)
شدت بارندگی	۱	۰/۶۳۷۶	۰/۶۳۷۵۷	۹/۵۶۰۷	۰/۰۰۳۲**
عمق خیزی تجمعی	۱	۰/۷۵۵۷	۰/۷۵۵۶۹	۱۱/۳۳۱۹	۰/۰۰۱۴**
شدت بارندگی: عمق خیزی تجمعی	۱	۰/۱۲۰۱	۰/۱۲۰۱۴	۱/۸۰۱۶	۰/۱۸۵۵
مقدار باقی مانده	۵۰	۳/۳۳۴۳	۰/۰۶۶۶۹		

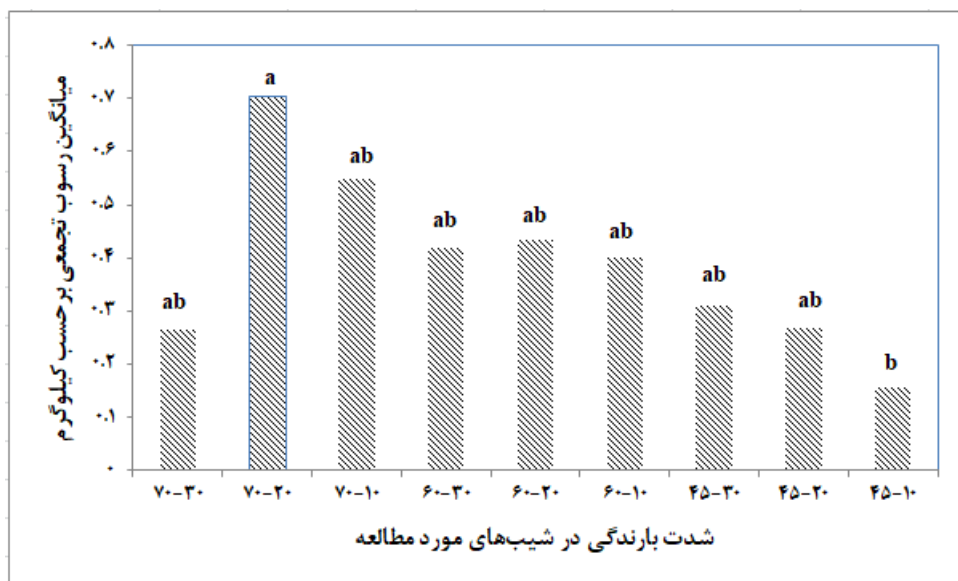
جدول (۲): نتایج حاصل از آنالیز واریانس دو طرفه میزان رسوب ناشی از شیب و شدت بارندگی

	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F- value	Pr(>F)
شیب	۱	۰/۰۱۲۸	۰/۰۱۲۷۸	۰/۱۶۲۴	۰/۶۸۶۳۰
شدت بارندگی	۱	۰/۶۳۷۶	۰/۶۳۷۵۷	۸/۱۰۵۱	۰/۰۰۶۳۸۷**
شیب: شدت بارندگی	۱	۰/۲۶۴۲	۰/۲۶۴۲۲	۳/۳۵۸۹	۰/۰۷۲۸۰۱
مقدار باقی مانده	۵۰	۳/۹۳۳۲	۰/۰۷۸۶۶		

جدول (۳): نتایج حاصل از آنالیز واریانس دو طرفه میزان رسوب ناشی از عمق خیزی تجمعی

	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F- value	Pr(>F)
شیب	۱	۰/۰۱۲۸	۰/۰۱۲۷۸	۰/۱۶۷۸	۰/۶۸۳۸۶۸
عمق خیزی تجمعی	۱	۰/۷۹۶۰	۰/۷۹۵۹۷	۱۰/۴۴۸۹	۰/۰۰۲۱۷۵**
شیب: عمق خیزی تجمعی	۱	۰/۲۳۰۱	۰/۲۳۰۱۱	۳/۰۲۰۷	۰/۰۸۸۳۶۵*
مقدار باقی مانده	۵۰	۳/۸۰۸۹	۰/۰۷۶۱۸		

** سطح معنی‌داری ۰/۰۱، * سطح معنی‌داری ۰/۱



شکل (۱۲): مقایسه میانگین رسوب تجمعی در شدت‌های بارندگی و شیب‌های مورد مطالعه

می‌دهد که مقدار رسوب در شدت‌های بارندگی ۷۰ و ۴۵ میلی‌متر بر ساعت و شیب ۲۰ و ۱۰ درصد اختلاف معنی‌داری داشتند. اما در بقیه موارد اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد.

با توجه به موارد بالا شدت بارندگی از مهمترین فاکتورهای تاثیرگذار بر روی فرایند فرسایش و رسوب است (Mu et al., 2015). شدت باران مهمترین خصوصیت باران از نظر تولید رواناب است. اگرچه بارانهای مناطق خشک و نیمه خشک مشابه بسیاری از باران‌ها در چنین مناطقی از کشور، دارای شدتی بسیار کمتر از باران‌های نواحی نیمه‌مرطوب و مرطوب می‌باشند، اما تولید رواناب سطحی از مشکلات اساسی تخریب خاک و فرسایش آبی در این مناطق به شمار می‌رود. محدود بودن نفوذپذیری خاک از یک‌سو و ضعف پوشش گیاهی از سوی دیگر، از عوامل مهم افزایش ضریب رواناب در دامنه‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند. در این مناطق، دامنه‌های دارای خاک با بافت ریز محدودیت زیادی از نظر نفوذ آب باران دارند. گزارش‌ها نشان می‌دهد که تشکیل ساختمان خاک و پایداری ساختمان در چنین مناطقی در کنار

جدول ۱ نتایج آنالیز واریانس مربوط به مقدار رسوب را در دو متغیر شدت بارندگی و عمق خیزی تجمعی در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که بر این اساس، بین متغیرهای موجود از نظر مقدار رسوب تولید شده تفاوت معنی‌دار در سطح یک درصد وجود دارد. همچنین اثر متقابل شدت بارندگی و عمق خیزی تجمعی از نظر مقدار رسوب، اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. جدول ۲ نتایج آنالیز واریانس مربوط به مقدار رسوب را در دو متغیر شیب و شدت بارندگی نشان می‌دهد که از نظر مقدار رسوب تولید شده تفاوت معنی‌دار در سطح یک درصد وجود دارد. همچنین اثر متقابل شیب و شدت بارندگی از نظر مقدار رسوب، اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد مشاهده شد. جدول ۳ نتایج آنالیز واریانس مربوط به مقدار رسوب را در دو متغیر شیب و عمق خیزی تجمعی نشان می‌دهد که تفاوت معنی‌دار در سطح یک درصد وجود دارد. همچنین اثر متقابل شیب و عمق خیزی تجمعی از نظر مقدار رسوب، اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد مشاهده شد.

شکل ۱۲ مقایسه میانگین رسوب تجمعی در شدت‌های بارندگی و شیب‌های مورد مطالعه نشان



در شدت ۶۰ میلی‌متر بر ساعت بیشترین حجم رواناب و میزان رسوب مربوط به شیب ۲۰ درصد و بیشترین میزان عمق خیزی مربوط به شیب ۱۰ درصد می‌باشد. از آنجایی که در شیب‌های کم میزان رواناب کم هست این امر باعث شده که خاک فرصت نفوذ کافی را داشته باشد و به تدریج باعث خیس شدن عمقی از لایه‌های سطحی خاک شود. افزایش ناگهانی عمق خیزی تجمعی از ۴/۵۴ سانتی‌متر به بعد در شیب ۱۰ درصد می‌تواند ناشی از این امر باشد که عمق خیزی در مراحل اولیه نفوذ کم بوده و خاک زیر لایه آن خشک بوده است، به همین دلیل انتظار می‌رود توزیع مجدد بعد از آن سریع‌تر رخ دهد. نتایج این پژوهش با تحقیق Pan et al., 2018 مطابقت دارد. یافته‌های آنها نشان داد که نفوذ آب به داخل خاک خشک در شروع فصول بارندگی به بیشترین مقدار خود می‌رسد و بعد از مدتی نفوذ کاهش پیدا می‌کند تا اینکه به یک مقدار ثابتی برسد. دلیل بالا بودن میزان رسوب در شیب ۲۰ درصد می‌تواند ناشی از افزایش انرژی جنبشی قطرات باران و عمق آب به دلیل افزایش شدت بارندگی از ۴۵ به ۶۰ میلی‌متر بر ساعت باشد. به طوری که با افزایش شدت بارندگی از یک سو قطر قطرات باران بیشتر شده و از سوی دیگر ضربه ناشی از تعداد قطرات باران برخورد یافته به سطح خاک افزایش می‌یابد و موجب تخریب و پراکنده شدن ذرات خاک و انتقال ذرات توسط رواناب می‌شود. از این رو باران‌های با شدت بالا دارای انرژی جنبشی و فرساینده‌گی بالایی می‌باشند. نتایج این امر با پژوهش Mineo et al., 2019 هم‌راستا است. آنها نتیجه گرفتند با افزایش شدت بارندگی، قطر قطرات باران و انرژی جنبشی افزایش یافته و باعث فرساینده‌گی بیشتری از سطح خاک می‌شوند از طرف دیگر با توجه به شکل ۷، می‌توان گفت که میزان رسوب در این بخش وابستگی شدیدی به رواناب رخدادی دارد به طوری که با افزایش حجم رواناب میزان رسوب هم زیاد می‌شود که این امر می‌تواند از

محتوای ماده آلی خاک به میزان آهک خاک نیز وابسته است. در خاک‌های واقع در این مناطق وجود شن درشت به علت افزایش نفوذپذیری خاک و ماده آلی و آهک به دلیل کمک در تشکیل و پایداری خاکدانه‌ها تأثیر چشمگیری در کاهش رواناب دارد (واعظی و همکاران، ۲۰۱۳).

در شدت ۴۵ میلی‌متر بر ساعت با افزایش درجه شیب، میزان رسوب و رواناب تجمعی افزایش و میزان نفوذ کاهش یافته است که دلیل این امر ناشی از این است انرژی برشی که از طرف قطرات باران بر روی خاک ریخته می‌شود باعث تولید رواناب شده و شسته شدن خاک از بالادست به طرف پایین دست می‌شود. به طوری که هر چه شیب تندتر می‌شود طبیعتاً میزان حجم رواناب هم زیاد می‌شود. از آنجایی که خاک در شیب‌های بالا حالت پایداری خود را نداشته و مقاومت خاک سطحی در شیب‌های تند کمتر است، رواناب ایجاد شده منجر به شروع فرسایش و در نتیجه تولید رسوب می‌شود. شیب‌های تندتر به دلیل اینکه رواناب زیادی تولید می‌کنند به همین دلیل نفوذ و در نهایت عمق خیزی کمتری دارند. از طرف دیگر در شیب‌های کم به دلیل سرعت کمتر میزان رواناب، میزان رسوب کم و در نتیجه میزان عمق خیزی زیاد است. این امر با تحقیق Sharma et al., 1983 مطابقت دارد. هم‌چنین در شرایط خاک لخت و یا بدون پوشش، نبودن هیچ‌گونه حفاظی در سطح خاک این امکان را می‌دهد که قدرت فرساینده‌گی باران زیاد شده و باعث ایجاد رسوب بیشتری شود. این امر با تحقیقات Schick et al., 2017 مطابقت دارد. هم‌چنین دلیل این امر را می‌توان ریشه در وابستگی شیب دانست به طوری که در این مکانیسم مناطقی با توپوگرافی بالا ارتباط بالایی با رطوبت پیشین خاک هم‌چنین به دلیل تعامل با جریان نفوذ تمایل بیشتری در تولید رواناب دارد. نتایج این قسمت از تحقیق با نتایج Montgomery and Dietrich (2002) مطابقت دارد.

کنده و به خروجی انتقال دهد. بعد از مدتی خاک سطحی شسته شده و به سنگریزه‌هایی که در زیر سطح خاک وجود دارد برخورد می‌کند که این امر بعضی وقت‌ها باعث تخلخل‌پذیری بالا در این قسمت از شیب شود. بنابراین تخلخل موجود در خاک در نزدیکی قطعات سنگی هم نوع رابطه و هم میزان تأثیر موقعیت قطعات سنگ بر این رابطه را تعیین می‌کند به طوری که در حالت طبیعی این مانع باعث افزایش رواناب و رسوب می‌شوند. اما موقعیت اجزای سنگ در لایه سطحی خاک نقش بسیار مهمی در تعیین پاسخ رواناب دارد به طوری که به دلیل وجود تخلخل ساختاری ناشی از خاک‌های شنی در بخش‌های پایین‌تر، تأثیر کمتری در پاسخ رواناب داشته باشد. همچنین می‌تواند ناشی از منفذهای بزرگ در مجاورت قطعه سنگ باشد که باعث جذب بیشتر رواناب شده و بدین طریق تولید رواناب را جبران کند. علاوه بر شدت بارندگی، درجه شیب و میزان عمق خیزی که ناشی از میزان نفوذی است که اطراف لایه های پایین خاک را مرطوب می‌نماید از موارد دیگری است که جزو عوامل تأثیرگذار در تولید رسوب است. با توجه به آنالیز آماری صورت گرفته به نظر می‌رسد درصد شیب اثر معنی داری بر مقدار رسوب در منطقه مورد مطالعه نداشته است. اگرچه نتایج متناقضی به طور مثال اثرات مثبت و منفی درجه شیب بر روی برداشت پاشمانی و میزان نفوذ گزارش شده است (Fang et al., 2014; Fox and Bryan, 1997). این نتایج متناقض می‌تواند ناشی از پیچیدگی فرایند فرسایش باشد که تحت تأثیر سایر عواملی همچون طول شیب، خصوصیات بارندگی و خصوصیات خاک باشد. در جریان‌های تحت تأثیر باران، فرایند برداشت و حمل خاک به طور شدیدی وابسته به اتلاف انرژی جنبشی می‌باشد و بیشتر انرژی جنبشی قطرات باران در لایه آب با افزایش عمق جریان افزایش پیدا می‌کند که منجر به کاهش غلظت رسوب در شیب‌های پایین می‌شود. علاوه بر این رطوبت خاک پیشین می‌تواند

طریق طول پلات بر روی شیب متوسط تأثیر گذاشته باشد. به عبارت دیگر می‌توان گفت حجم رواناب تأثیر کملاً قوی بر روی میزان رسوب به دلیل خصوصیات ریزتر بودن بافت خاک در شیب ۲۰ درصد داشته است. این امر با تحقیق Bagarello et al., 2011 همسو هست. همچنین میزان رسوب در بازه های زمانی ۴۰ دقیقه به بعد در شیب ۲۰ درصد روند صعودی چشمگیری داشته است. دلیل این امر را می‌توان این‌چنین مطرح کرد که با افزایش توالی رخداد، به دلیل افزایش محتوای رطوبتی خاک و در معرض قرار گرفتن ذرات حساس بیشتر، هدررفت خاک افزایش قابل توجهی پیدا کرد، به طوری که بیشترین مقدار هدررفت خاک مربوط به رخداد رگبار متوالی پایانی بود. این امر با یافته‌های واعظی و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد.

عمق خیزی در شدت ۷۰ میلی‌متر بر ساعت با توجه به نتایج در شیب تند رخ داده است، اگرچه میزان رسوب هم در این شیب کمترین میزان خود را دارد. یافته های ما در شدت ۷۰ میلی‌متر بر ساعت متناقض با یافته های ویلسون (۱۹۷۵)، شارما و همکاران (۱۹۸۳) می‌باشد. جهت تحلیل این تناقض باید اشاره کرد که رواناب در حالت کلی رابطه معکوسی با نفوذ دارد و تأثیر شدت بارندگی بر روی رواناب را می‌توان از طریق تأثیر آن بر روی نفوذ درک کرد. این تأثیر همیشه مستقیم نبوده و بعضی مواقع رابطه نفوذ با شدت بارندگی به دلیل ناهمگنی مکانی موجود در خصوصیات نفوذ خاک سطحی به صورت مستقیم می‌باشد. این امر با نتایج Parsons and Stone (2006) مطابقت دارد. ناهمگنی مکانی موجود در خصوصیات خاک می‌تواند مربوط به سطح رطوبت خاک (Easton and Petrovic, 2004)، تخلخل پذیری بالا (Shipitalo et al., 2004) و رسوب مواد آلی باشد (Lado et al., 2004). از آنجایی که طی شدت بالا اثر انرژی جنبشی زیاد است باعث می‌شود خاکدانه‌های سطح خاک را با قدرت بیشتری از جا



همچنین بیشترین عمق خیس تجمعی در شیب تند صورت گرفته است، دلیل کمتر بودن رسوب تجمعی در شیب ۳۰ درصد و بالا بودن میزان عمق خیسی تجمعی نسبت به بقیه شیب ها می تواند ناشی از کمتر بودن میزان برداشت خاک سطحی نسبت به ظرفیت انتقال جریان و بالا بودن نفوذپذیری به دلیل وجود خاک های شنی در زیر سطح خاک فرسایش یافته باشد. گرچه با افزایش شدت بارندگی میزان رسوب در شیب تند کاهش یافته است اما شیب متوسط بیشترین میزان تولید رسوب را به خود اختصاص داده است.

از محدودیت های این پژوهش می توان به تنظیم سامانه باران ساز، سرعت باد و حمل و نقل این سامانه در شیب های مختلف اشاره کرد. با توجه به محدودیت های اشاره شده در بالا، انتظار می رود که دانش کافی در مورد برهم کنش شدت بارندگی، حجم رواناب تجمعی، میزان رسوب و عمق خیسی تجمعی حاصل شود. از آنجایی که این پژوهش بر روی رواناب رسوب در شیب های مختلف به صورت رخدادی بررسی شده است پیشنهاد می گردد، ارتباط بین عمق خیسی و رسوب در داخل مدل های فرسایش و رسوب خاک لحاظ گردد.

یکی از فاکتورهای مهم کنترل کننده فرایندهای هیدرولوژیکی و فرسایندهای باشد که بر میزان نفوذ و رواناب تاثیر گذارد و بنابراین فرسایش خاک را تشدید کند.

نتیجه گیری

در این پژوهش تاثیر عمق خیسی تجمعی بر رسوب در شیب و شدت های بارندگی مختلف با استفاده از شبیه ساز باران مورد بررسی گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که:

بیشترین میزان تولید رسوب در شدت ۴۵ میلی متر بر ساعت در شیب های تند صورت گرفته است و کمترین میزان تولید رسوب تجمعی در شیب کم صورت گرفته است. همچنین بیشترین عمق خیسی تجمعی در شیب کم صورت گرفته است.

بیشترین میزان تولید رسوب تجمعی در شدت ۶۰ میلی متر بر ساعت در شیب های متوسط صورت گرفته است همچنین بیشترین عمق خیسی تجمعی در شیب کم صورت گرفته است. به نظرمی رسد دلیل این امر می تواند ناشی از افزایش انرژی جنبشی قطرات باران و عمق آب همچنین حساس بودن ذرات در این قسمت از شیب باشد.

بیشترین میزان تولید رسوب تجمعی در شدت ۷۰ میلی متر بر ساعت در شیب متوسط صورت گرفته است

تقدیر و تشکر

نویسندگان بر خود لازم می دانند از گروه تاسیسات و همچنین از امور حمل و نقل دانشگاه شهرکرد به خاطر در اختیار گذاشتن دستگاه تراکتور جهت حمل و نقل دستگاه شبیه ساز باران تقدیر و تشکر نمایند.

منابع

- پرهی، ک.، غ. صیاد، ا. لندی و ح. پیروان. ۱۳۹۷. بررسی تاثیر کاربری اراضی، شیب دامنه و خصوصیات خاک بر مقدار رسوب تولیدی با استفاده از باران ساز مصنوعی در بخشی از حوزه ی آبخیز کرخه (استان لرستان). پژوهش های فرسایش محیطی، ۲۹، ص ۱-۲۲.
- حسن زاده، ح.، ع. واعظی، و م.ح. محمدی. ۱۳۹۲. تغییرات رواناب در ابعاد کرت در نمونه های با بافت مختلف تحت رخدادهای یکسان باران شبیه سازی شده. تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۴۴، شماره ۳، صص ۲۵۳-۲۴۳.

زندى، ج.، ك. سلیمانی، م. حبیب‌نژادروشن و ع. كاویان. ۱۳۹۹. ارزیابی کارایی خاک‌پوش‌های کاه و کلش گندم و تراشه‌های چوب در کاهش رواناب و رسوب حوزه‌های آبخیز تک منبع. نشریه علمی و پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، دوره ۱۰، شماره ۳، ص ۶۷-۵۲.

محسنی، ب و ه. رزاقیان. ۱۳۹۲. برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب در حوضه معرف کسلیان با استفاده از روش ژئومورفولوژی مبتنی بر مدل MPSIAC در GIS. نشریه علمی و پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، دوره ۴، شماره ۲، ص ۵۷-۴۹.

میرزایی، ش و ر. مصطفی زاده. ۱۳۹۷. تغییر پاسخ هیدروگراف واحد آبخیز در اثر احداث سازه‌های کوتاه تأخیری. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، دوره ۹، شماره ۲، ص ۴۹-۳۷.

Bagarello, V., C.Di Stefano, V. Ferro, P.I. Kinnell, V. Pampalone, Porto, P and F. Todisco. 2011. Predicting soil loss on moderate slopes using an empirical model for sediment concentration. *Journal of hydrology*, 400(1-2):267-273.

Boulangé, J., F. Malhat, P. Jaikaew, K. Nanko and H. Watanabe. 2019. Portable rainfall simulator for plot-scale investigation of rainfall-runoff, and transport of sediment and pollutants. *International journal of sediment research*, 34(1):38-47.

Donjadee, S and C. Chinnarasri. 2012. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the application of vetiver grass mulch in soil and water conservation. *International Journal of Sediment Research*, 27(2):168-177.

Easton, Z.M and A.M. Petrovic. 2004. Fertilizer source effect on ground and surface water quality in drainage from turfgrass. *Journal of environmental quality*, 33(2): 645-655.

Fang, H., L. Sun and Z. Tang, 2015. Effects of rainfall and slope on runoff, soil erosion and rill development: an experimental study using two loess soils. *Hydrological processes*, 29(11):2649-2658.

Foley, J.L and D.M. Silburn. 2002. Hydraulic properties of rain impact surface seals on three clay soils—influence of raindrop impact frequency and rainfall intensity during steady state. *Soil Research*, 40(7):1069-1083.

Fox, D.M. R.B. Bryan and A.G. Price. 1997. The influence of slope angle on final infiltration rate for interrill conditions. *Geoderma*, 80:181-194.

Huang, J., P. Wu and X. Zhao. 2013. Effects of rainfall intensity, underlying surface and slope gradient on soil infiltration under simulated rainfall experiments. *Catena*, 104:93-102.

Kogo, B.K., L. Kumar and R. Koech. 2019. Forest cover dynamics and underlying driving forces affecting ecosystem services in western Kenya. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 14:75-83.

Marques, M.J., R. Bienes, L. Jiménez and R. Pérez-Rodríguez. 2007. Effect of vegetal cover on runoff and soil erosion under light intensity events. *Rainfall simulation over USLE plots. Science of the total environment*, 378(1-2):161-165.

Mineo, C., E. Ridolfi, B. Moccia, F. Russo and F. Napolitano. 2019. Assessment of rainfall kinetic-energy intensity relationships. *Water*, 11(10): 1994.

Montgomery, D.R and W.E. Dietrich. 2002. Runoff generation in a steep, soil-mantled landscape. *Water Resources Research*, 38(9):7-1.

Mu, W., F. Yu, C. Li, Y. Xie, J. Tian, J. Liu and N. Zhao. 2015. Effects of rainfall intensity and slope gradient on runoff and soil moisture content on different growing stages of spring maize. *Water*, 7(6):2990-3008.

Nassif, S and E. Wilson. 1975. The influence of slope and rain intensity on overland flow and infiltration. *Hydrological Sciences Journal*, 20:539-553.



Nelson, J.D., D.D. Overton and D.B. Durkee. 2001. Depth of wetting and the active zone. In Expansive clay soils and vegetative influence on shallow foundations, American Society of Civil Engineers: 95-109.

Norouzi-Shokrlu, A., M. Pajouhesh and K. Abdollahi. 2020. Relating Sediment Yield Estimations to the Wet Front Term Using Rainfall Simulator Field Experiments. *Water Resources Management*, 34(13):4181-4196.

Pan, R., A. da Silva Martinez, T.S. Brito and E.P. Seidel. 2018. Processes of Soil Infiltration and Water Retention and Strategies to Increase Their Capacity. *Journal of Experimental Agriculture International*:1-14.

Parsons, A.J and P.M. Stone. 2006. Effects of intra-storm variations in rainfall intensity on interrill runoff and erosion. *Catena*, 67(1):68-78.

Ran, Q., D. Su, P. Li and Z. He. 2012. Experimental study of the impact of rainfall characteristics on runoff generation and soil erosion. *Journal of Hydrology*, 424:99-111.

Schick, J., I. Bertol, F.T. Barbosa, D.J. Miquelluti and N.P. Cogo. 2017. Water Erosion in a Long-Term Soil Management Experiment with a Humic Cambisol. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 41.

Sharma, K., H. Singh and O. Pareek. 1983. Rainwater infiltration into a bare loamy sand. *Hydrological Sciences Journal*, 28: 417-424.

Shipitalo, M.J., V. Nuutinen and K.R. Butt. 2004. Interaction of earthworm burrows and cracks in a clayey, subsurface-drained, soil. *Applied Soil Ecology*, 26(3):209-217.

Sirjani, E and M. Mahmoodabadi. 2014. Effects of sheet flow rate and slope gradient on sediment load. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(1):203-210.

Vaezi, A.L., H. Hasanzadeh and M.H. Mohammadi. 2013. Runoff variations in the soil textures samples in the plot scale under the same rainfall events. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 44(3): 243-253. (In Persian)

Vaezi, A.R., H. Hasanzadeh and A. Cerda. 2016. Developing an erodibility triangle for soil textures in semi-arid regions, NW Iran. *Catena*, 142:221-232.

Van de Giesen, N.C., T.J. Stomph and N. De Ridder. 2000. Scale effects of Hortonian overland flow and rainfall-runoff dynamics in a West African catena landscape. *Hydrological Processes*, 14(1):165-175.

Wells, R.R., M.J.M. Römkens, J.Y. Parlange, D.A. DiCarlo, T.S. Steenhuis and S.N. Prasad. 2007. A simple technique for measuring wetting front depths for selected soils. *Soil Science Society of America Journal*, 71(3):669-673.

Zhao, X., P. Wu, X. Chen, M.J. Helmers and X. Zhou. 2013. Runoff and sediment yield under simulated rainfall on hillslopes in the Loess Plateau of China. *Soil Research*, 51(1):50-58.

Zhao, N., F. Yu, C. Li, H. Wang, J. Liu and W. Mu. 2014. Investigation of rainfall-runoff processes and soil moisture dynamics in grassland plots under simulated rainfall conditions. *Water*, 6(9):2671-2689.

Zhao, Q., D. Li, M. Zhuo, T. Guo, Y. Liao and Z. Xie. 2015. Effects of rainfall intensity and slope gradient on erosion characteristics of the red soil slope. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 29(2):609-621.

Ziadat, F.M and A.Y. Taimeh. 2013. Effect of rainfall intensity, slope, land use and antecedent soil moisture on soil erosion in an arid environment. *Land Degradation and Development*, 24(6):582-590.