

Effects of Surface Roughness on Sediment Heterogeneity under Different Slopes and Rainfall Intensities Using a Rainfall Simulator

Akbar Norouzi^{1*}, Mahdi Pajouhesh², Khodayar Abdollahi²

Expert of Water Resources Planning and Allocation, Regional Water Company of Ardabil, Ardabil, Iran

Associate Professor, Faculty of Natural Resources and Earth Science, Department of Nature Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

Extended Abstract

Introduction

The efficient management of vital soil and water resources requires a deep and precise understanding of the complex mechanisms of sedimentation and runoff formation in various ecosystems. This understanding must encompass the variable conditions of topography, land slope, and surface cover, as effective erosion control, especially on steep slopes prone to degradation, is considered the cornerstone of sustainable development in environmental and agricultural sectors. The intensity of soil erosion is a function of the complex interaction of numerous factors such as regional climate, inherent soil characteristics, topographic features, land use type; These factors collectively determine the final fate of eroded sediments, which may lead to their drainage from the system or storage in lower points of the watershed. Meanwhile, surface runoff acts as the primary driver for soil particle detachment. Key hydrological processes, including runoff generation, water infiltration, and ultimately sediment transport, are strongly influenced by the physical characteristics of the soil surface. Specifically, surface roughness, or microtopography, which involves small elevation changes (on the scale of 2 to 25 cm)—plays a pivotal role. This roughness, influenced by agricultural activities and vegetation type, directly affects the intensity of erosion process and the overall sediment transport rate by creating resistance to or guiding the flow.

Materials and Methods

This study investigated the effect of surface roughness on sediment heterogeneity using an artificial rainfall simulator. This system, operating at a height of 2.5 meters with a droplet spray mechanism, was installed over a plot measuring approximately 0.9 m×0.5 m to replicate natural rainfall conditions at a small scale. The experimental variables included several key components for system operation and control: an electric motor to supply the necessary power, a computerized control unit for precise nozzle management, a water reservoir, a pump, and a pressure gauge for regulating water flow and pressure. Rainfall intensities (45,60, and 70 mm/h and slopes 10%, 20%, and 30%), selected based on the erosivity limits of the study area. Experiments were conducted on both bare and vegetated soil conditions. Each treatment was replicated three times, with each test run lasted for 60 minutes and was divided into six 10-minute intervals. to allow for the collection and measurement of runoff and sediment yield. The influence of surface roughness on sediment heterogeneity was assessed using indices for intra-cluster and inter-cluster heterogeneity. Total heterogeneity was defined as the algebraic sum of these two components: intra-cluster heterogeneity indicating internal variation within blocks of a cluster, and inter-cluster heterogeneity representing the differences between neighboring clusters (based on rainfall intensity). Furthermore, a two-way Analysis of Variance (ANOVA) was employed to evaluate the main and interactive effects of rainfall intensity and slope on the resulting sediment yield.

Results and Discussion

The highest sedimentation without roughness at an intensity of 45 mm/h was related to a 30% slope, which increased with increasing slope due to increased shear energy and runoff. At an intensity of 60 mm/h, the highest sedimentation without roughness was related to a 20% slope, which indicates the complex effect of slope angle on surface layer protection and the strong role of runoff volume in this rainfall intensity. At an intensity of 70 mm/h, the highest sedimentation without roughness was observed at a 20% slope and the lowest at a 30% slope. In all

intensities, the presence of surface roughness generally affected the sedimentation rate. The results also showed that surface roughness is an effective and acceptable factor for adjusting the volume of surface runoff and weakens the effect of runoff washing on different slopes. In general, surface roughness plays an effective role in reducing sedimentation and increases water and soil protection. Vegetation acts as a barrier to runoff, increases infiltration time, and reduces the kinetic energy of raindrops before they directly hit the soil surface. According to two-way analysis of variance, rainfall intensity and slope are factors affecting sediment production.

Conclusion

This study investigated the effect of surface roughness heterogeneity on sediment yield under different slope gradients and rainfall intensities using a rainfall simulator. The results indicated that at a rainfall intensity of 45 mm h^{-1} , surface roughness significantly reduced sediment yield across all slopes. On smooth surfaces, the highest sediment yield occurred at a 30% slope, while on rough surfaces it appeared at 20%. Roughness reduced flow velocity and enhanced infiltration, thereby limiting sediment transport and controlling erosion. At 60 mm h^{-1} , the maximum sediment yield was recorded on a 20% slope (smooth surface) and the minimum on a 10% slope, which may be attributed to thinner surface soil layers and changes in infiltration capacity. Under a rainfall intensity of 70 mm h^{-1} , the lowest sediment yield occurred on the steepest slope (30%), likely due to increased infiltration resulting from exposure of subsurface pores after the surface layer was eroded by raindrop impact. Two-way ANOVA confirmed that both rainfall intensity and slope gradient had significant effects on sediment yield, with the highest variability observed at 60 mm h^{-1} and on steep slopes. Overall, findings highlight the critical role of surface roughness in reducing runoff and mitigating soil erosion.

Keywords: Microtopography, Erosion, Variability, Field studies, Rainfall Simulator

Article Type: Research Article

Acknowledgement

We would like to express our sincere gratitude to the University of Shahrekord for the financial and logistical support who significantly contributed during the research project.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement:

The datasets are available at a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Akbar Norouzi: Writing - original draft preparation, Software; **Mahdi Pajouhesh:** Resources, Manuscript editing; **Khodayar Abdolahi:** Formal analysis and investigation

*Corresponding Author, E-mail: norouzishokrlu65@gmail.com

Citation: Norouzi, A., Pajouhesh, M., & Abdolahi, K. (2026). The effect of surface roughness on the amount of sediment heterogeneity under different slopes and rainfall intensities using a rainfall simulator. *Water and Soil Management and Modeling*, 6(3), 131-147.

doi: 10.22098/mmws.2026.18835.1736

Received: 24 November 2025, Received in revised form: 19 February 2026, Accepted: 03 March 2026, Published online: 27 August 2026.

Water and Soil Management and Modeling, Year 2026, Vol. 6, No. 3, pp. 131-147.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





تأثیر زبری سطحی بر میزان ناهمگنی رسوب در شیب و شدت‌های بارندگی مختلف با استفاده از شبیه ساز باران

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

^{۱*} کارشناس برنامه‌ریزی و تخصیص آب، شرکت آب منطقه‌ای اردبیل، اردبیل، ایران
^۲ دانشیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

چکیده

زبری سطحی خاک یا میکروتوپوگرافی، یکی از عوامل کلیدی مؤثر بر فرسایش و رواناب است که با تغییرات کوچک ارتفاع سطح زمین مشخص می‌شود و تحت تأثیر ویژگی‌های خاک، پوشش گیاهی و فعالیت‌های کشاورزی قرار دارد. این ویژگی با کنترل مسیر و همگرایی جریان آب، در شدت فرسایش و میزان رسوب نقش مؤثری ایفا می‌کند. هدف این پژوهش، بررسی تأثیر زبری سطح خاک بر میزان ناهمگنی تولید رسوب در شرایط بارندگی‌های با شدت ۴۵، ۶۰ و ۷۰ میلی‌متر بر ساعت و در شیب‌های مختلف ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد با بهره‌گیری از شبیه‌ساز باران است. در این روش برای اندازه‌گیری رسوب معلق، نمونه آب و رسوب به مدت ۴۸ ساعت در بشر به حالت سکون نگه داشته شد. سپس آب روی رسوبات به آرامی تخلیه و حجم رواناب اندازه‌گیری گردید. رسوبات باقی‌مانده شسته شده و در فویل‌های آلومینیومی وزن شده قرار گرفتند و در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک و مقدار رسوب معلق محاسبه شد. به منظور ارزیابی میزان تأثیر زبری سطحی بر ناهمگنی رسوب از عددناهمگنی بین خوشه‌ای و درون خوشه‌ای بهره گرفته شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که زبری سطحی به طور کلی موجب کاهش محسوس رسوب در تمام شیب‌ها بالاخص در شدت ۴۵ میلی‌متر بر ساعت (۱۴/۸۳ گرم بر مترمربع) شد. در شدت‌های بالاتر، نتایج پیچیده‌تر بود و مشاهده شد که شیب ۲۰ درصد در برخی موارد بیشترین رسوب را داشت (۸۷/۰۷ گرم بر مترمربع)، که این امر به تأثیر عواملی مانند توزیع انرژی برخورد قطرات و ویژگی‌های نفوذ خاک نسبت داده شد. در نهایت، نتایج آنالیز واریانس دوطرفه نشان داد که شدت بارندگی و شیب هر دو از عوامل اصلی تولید رسوب هستند. همچنین با توجه به ارتباط مستقیم ضریب تغییرات با میزان تغییرپذیری، نتایج حاکی از آن است که ضریب تغییرات در شدت بارندگی ۶۰ و ۴۵ میلی‌متر بر ساعت در منطقه مورد مطالعه به ترتیب بیشترین و کمترین میزان رسوب را به خود اختصاص داده است. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، پارامتر زبری سطح به عنوان یک متغیر مستقل حیاتی در مدل‌سازی درصد پوشش گیاهی، زمان اوج و زمان تأخیر رواناب در نظر گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: میکروتوپوگرافی، فرسایش، تغییرپذیری، مطالعات میدانی، بارانساز

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: norouzishokrlu65@gmail.com

استناد: نوروزی شکرلو، اکبر، پژوهش، مهدی و عبدالهی، خدایار (۱۴۰۵). تأثیر زبری سطحی بر میزان ناهمگنی رسوب در شیب و شدت‌های بارندگی مختلف با استفاده از شبیه ساز باران. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۶(۳)، ۱۳۱-۱۴۷.

doi: 10.22098/mmws.2026.18835.1736

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۳ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۱۶ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۰۵

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۵، دوره ۶، شماره ۳، صفحه ۱۳۱ تا ۱۴۷.

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱-مقدمه

یکی از چالش های اصلی در مدیریت منابع خاک و آب، درک دقیق فرآیندهای رسوب زایی و تشکیل رواناب در شرایط مختلف توپوگرافی و پوشش سطحی است. فرسایش خاک به عوامل متعددی، از جمله اقلیم، خاک، توپوگرافی و کاربری اراضی وابسته هستند. این عوامل باعث می شود رسوبات فرسایش یافته یا سریعاً از حوزه آبخیز خارج شوند و یا برای مدت طولانی آنجا ذخیره شوند و باقی بمانند (Bracken et al., 2013). از آنجایی که فرسایش یک امر طبیعی است، تشدید آن در اثر کاربری های غیراصولی می تواند موجب تلفات خاک و افزایش تولید رسوب شود. بنابراین ضرورت دارد با داشتن دانش و شناخت از شرایط فعلی و خصوصیات حوزه آبخیز به توزیع مکانی فرسایش و رسوب پرداخته شود. ناهمگنی مکانی به توزیع نابرابر صفات یا خصیصه ها، رخدادها و ارتباط آن ها در یک منطقه و یا تغییرپذیری مکانی خصوصیات اشاره می کند (Anselin, 2010; Dutilleul, 2011). درک و دانش از فرایندهای ناهمگنی یک مؤلفه مهم در حوزه فرسایش آب و خاک و هیدرولوژی می باشد. زیرا می تواند در کمی کردن الگوی مکانی، سطح زبری در فرایند توسعه و فرسایش شیب تأثیرگذار باشد. هم چنین این چنین دانشی در جهت اقدامات حفاظتی، مدیریت پایدار و تعدیل اثرات زیست محیطی می تواند بسیار موثر باشد. با توجه به موارد بالا این چنین می توان استنباط کرد که ناهمگنی مکانی فرسایش خاک می تواند به عنوان یک بخش مهمی در حوزه آبخیز که دربرگیرنده شناسایی مناطق کلیدی برای کنترل فرسایش و به عنوان اساس و پایه های حفاظت آب و خاک به منظور آنالیز خصوصیات مکانی فرسایش و رسوب خاک باشد، بهره جست. فرایندهای فرسایش و رواناب به طور عمده تحت تأثیر ویژگی های سطح خاک مانند زبری سطحی خاک، چسبندگی و ترکیب بافت خاک قرار می گیرند (Norouzi-Shokrlu et al., 2020). در میان این ویژگی ها، زبری سطحی نسبی زمین یا میکرو توپوگرافی یک پارامتر کلیدی است که پیکربندی سطح آن را توصیف می کند و تغییرات کمتری در ارتفاع نسبی (معمولاً بیش از ۵-۲۵ سانتی متر نمی باشد) در یک منطقه نسبتاً کوچک دارد (Zhang et al., 2014a). زبری سطحی نسبی (وجود پوشش گیاهی) به شدت تحت تأثیر فعالیت های کشاورزی همراه با خصوصیات خاک و آب و هوا قرار می گیرد (Zheng et al., 2014). در واقع به عنوان یک شاخصی نشانگر درجه فرسایش و تغییرات ارتفاع سطحی نسبی می باشد. زبری سطحی می تواند روی وقوع رواناب سطحی و مسیر جریان آب تأثیر بگذارد. به طوری که می تواند همگرایی جریان را به وسیله تغییرات در ارتفاع نسبی نقاط فضایی از طریق فرسایش آب تغییر دهد. در نتیجه باعث اثرگذاری بر تکامل فرسایش و حجم رسوب

گردد (Govers et al., 2000). مطالعات اخیر نشان می دهد که چگونه زبری سطح، فرآیندهای هیدرولوژیکی مانند تولید رواناب، نفوذ و دینامیک انتقال رسوب را تعدیل می کند. به طور مثال کاویانپور و همکاران در سال ۱۳۹۴ به بررسی اثر پوشش گیاهی بر کاهش رواناب و هدررفت خاک با استفاده از شبیه سازی باران در مراتع نشو استان مازندران پرداختند و به این نتیجه رسیدند که پوشش های مختلف گیاهی (حداقل، متوسط و حداکثر)، تأثیر معنی داری بر مولفه های رواناب و رسوب در منطقه مورد مطالعه داشتند و پوشش گیاهی حداکثر بیشترین سهم را در کاهش رواناب و رسوب در منطقه داشته است. لذا با توجه به اثرات مثبت پوشش گیاهی، لزوم توجه ویژه به پوشش گیاهی مرتعی به منظور کاهش رواناب، فرسایش خاک احساس می شود. خالدی درویشان و همکاران در سال ۱۳۹۵ با بررسی طراحی، ساخت و واسنجی شبیه ساز باران قابل حمل برای مطالعات صحرایی روان آب و فرسایش خاک به این نتیجه رسیدند که در شدت های مختلف ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی متر در ساعت میانه قطر قطرات به ترتیب ۱/۰۷، ۱/۰۰ و ۰/۹۸ میلی متر، میانگین قطر قطرات به ترتیب ۱/۱۴، ۱/۰۵ و ۱/۰۲ میلی متر، سرعت متوسط قطرات به ترتیب ۴/۵۳، ۴/۰۸ و ۴/۰۰ متر در ثانیه، انرژی جنبشی باران به ترتیب ۱۰/۲۶، ۸/۳۲ و ۸/۰۰ ژول بر متر مربع در هر میلی متر از باران و ضریب یکنواختی به ترتیب ۹۰، ۸۷ و ۹۱ درصد اندازه گیری شد. عسگری و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی تغییرات مکانی رواناب، رسوب و آستانه شروع رواناب در حوزه آبخیز قره شیران اردبیل با استفاده از شبیه ساز باران در سازندهای مختلف زمین شناسی پرداختند و نتایج نشان داد که در آستانه های پایین اثر تولید رواناب بر تولید رسوب در حوزه بیشتر است و در آستانه های بالا اثر تولید رواناب کاهش می یابد. (Chen et al., 2018) به بررسی اثرات پوشش گیاهی و انواع بارندگی بر رواناب سطحی و فرسایش خاک در دامنه های شیب دار فلات لس در چین پرداختند و نتایج نشان داد که علفزارها و بوته زارها با پوشش زمینی بالا در مقایسه با جنگلهای تنک و با پوشش زمینی کم سبب کاهش ۵۰ درصدی عمق رواناب و ۹۰ درصدی فرسایش خاک در سال می گردند. همچنین در این پژوهش احیا و ایجاد پوشش گیاهی به عنوان راهکاری موثر و ارزان به منظور کاهش فرسایش در دامنه های با شیب زیاد توصیه شده است. علی دوست و همکاران در سال ۱۴۰۳ با بررسی تأثیر شیب دامنه و شدتهای مختلف بارندگی با شبیه ساز باران بر رواناب و هدررفت خاک پس از آتش سوزی جنگل به این نتیجه رسیدند که شیب و شدت بارندگی از عوامل مؤثر در چرخه هیدرولوژی و فرسایش در منطقه جنگلی در دامنه زمانی یک سال پس از آتش سوزی است. He et al. (2025) به تحلیل مکانیسم اثرات شدت بارندگی، پوشش علفی

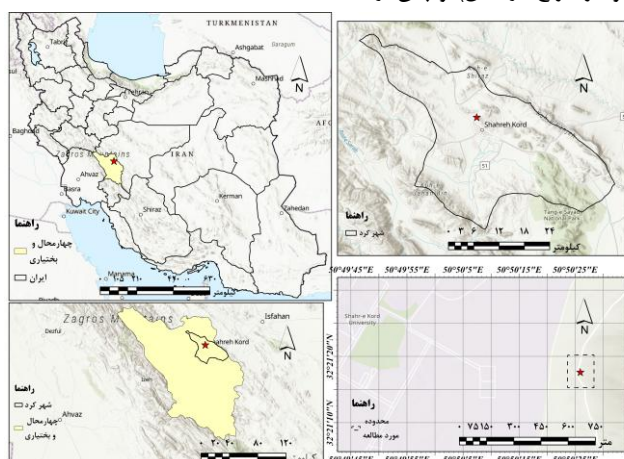
آن زمین‌های کشاورزی ($286/13$ تن بر کیلومتر مربع در سال) قرار دارند، در حالی که زمین‌های با پوشش گیاهی ($56/04$ - $11/05$ تن بر کیلومتر مربع در سال) محدود شده است. این تحقیق با هدف بررسی ناهمگنی زبری سطحی بر تولید رسوب در شدت بارندگی‌های 45 ، 60 و 70 میلی متر بر ساعت و در شیب‌های مختلف 10 ، 20 و 30 درصد با استفاده از شبیه‌ساز باران صورت گرفت. با وجود انجام پژوهش‌های متعدد پیرامون تأثیر میزان الگوی رواناب بر رسوب، تاکنون در منطقه یاد شده مطالعه‌ای که به صورت کمی، رابطه‌ی میان زبری سطح و فرآیندهای رسوب‌زایی را تحلیل کند خیلی کمتر به آن پرداخته شده است. اجرای این تحقیق می‌تواند موجب ارتقای درک علمی نسبت به نقش زبری سطح خاک به‌عنوان عامل بازدارنده در فرسایش و تولید رسوب گردد و زمینه‌ساز شناخت بهتر سازوکارهای کنترل رواناب و مدیریت پایدار خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه‌ی مورد مطالعه واقع در دامنه قلات شهر شهرکرد به وسعت 1717 متر مربع و با مختصات جغرافیایی $29^{\circ} 50' 50''$ تا $50^{\circ} 50' 50''$ طول شرقی و $31^{\circ} 17' 17''$ تا $31^{\circ} 21' 21''$ عرض شمالی می‌باشد که 2186 متر ارتفاع از سطح دریا واقع شده است (شکل ۱). میانگین دمای سالانه از $8/5$ تا $12/45$ درجه سلسیوس متغیر است. میزان بارندگی سالانه $320/9$ میلی‌متر می‌باشد. متوسط رطوبت نسبی در این منطقه 44 درصد می‌باشد. بافت خاک منطقه مورد مطالعه لومی تا لوم-رسی-شنی می‌باشد (اداره کل هواشناسی استان چهارمحال بختیاری، 1397).

و شیب بر فرآیندهای فرسایش دامنه‌ای پرداختند و نتایج نشان داد که برای پوشش گیاهی صفر تا 30 درصد رواناب عمدتاً توسط شدت بارندگی و شیب کنترل می‌شد، در حالی که برای پوشش گیاهی 40 و 50 درصد، رواناب عمدتاً تحت تأثیر شدت بارندگی بود. همچنین برای پوشش گیاهی صفر، 30 و 40 درصد، تولید رسوب عمدتاً توسط شدت بارندگی و شیب کنترل می‌شد، در حالی که برای پوشش گیاهی 50 درصد، تولید رسوب تحت تأثیر شدت بارندگی، شیب و تعامل شدت بارندگی-شیب بود. Li et al. (2025) به بررسی تأثیر زبری سطح بر فرسایش خاک مبتنی بر مرتبه‌بندی جریان در فلات لس، شمال غرب چین پرداختند و نتایج نشان داد که تأثیرات زبری سطح بر عملکرد رسوب و حجم تخلیه شباهت‌هایی با فرسایش شیاری نشان داد، افزایش شدت بارندگی و شیب، تأثیر بازدارندگی را تقویت کرد. از روابط بین مقادیر حفاظت آب و خاک و فرسایش شیاری در تمام مراتب، مشخص شد که فرسایش شیاری مرتبه دوم بهینه‌ترین شاخص فرسایش شیاری برای توصیف عملکرد رسوب و رواناب است. Hamizak et al. (2025) به بررسی تجربی رواناب، رسوب و پارامترهای هیدرولیکی شیب در زیر سطوح مختلف زیرین پرداختند و نتایج نشان داد که خاک لخت حداکثر غلظت رسوب و رواناب سطحی را تولید می‌کند که پس از آن علف، شن و برگ قرار می‌گیرند. بنابراین پوشش گیاهی در مقابل باران می‌تواند به عنوان یک استراتژی کم‌هزینه برای کاهش فرسایش خاک در سایت‌های شیبدار استفاده شود. Zhang and Zhang (2025) با ارزیابی تأثیر بارندگی شدید و شرایط سطح شیب بر رواناب و فرسایش به این نتیجه رسیدند که بیشترین میزان فرسایش در زمین‌های بایر ($1733/93$ تن بر کیلومتر مربع در سال) و پس از



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز و پلات‌های اندازه‌گیری در دامنه قلات دانشگاه شهرکرد، استان چهارمحال بختیاری و کشور

Figure 1- Location of the watershed and measurement plots on the Qalat slopes, Shahrekord University, Chaharmahal Bakhtiari Province and Iran

۲-۲- روش تحقیق

پژوهش حاضر به صورت میدانی با استفاده از سامانه شبیه ساز باران برای شناخت فرسایش خاک و فرایندهای مربوط به آن مورد استفاده قرار گرفت. این سامانه با ارتفاع ۲/۵ متر از نوع سیستم پاشش قطره ای در پلاتی به اندازه ۰/۹ متر در طول و ۰/۵ متر در عرض عمل می کرد تا شرایط بارش طبیعی در مقیاس کوچک را بازتولید کند (شکل ۲). سه شیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد در شدت ۴۵، ۶۰ و ۷۰ میلی متر بر ساعت با توجه به محدوده شدت فرسایندهای طی بازه زمانی ۶۰ دقیقه ای در منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. نحوه عملکرد این باران ساز بر اساس نوع و اندازه ی قطرات تولیدی و تنظیمات مربوط به شدت و توزیع بارندگی طراحی شده است؛ بدین ترتیب، تغییر در شدت بارش و روش اندازه گیری آن می تواند در اندازه ی نهایی قطرات نقش مؤثری داشته باشد (Marques et al., 2007). این دستگاه از اجزای متعددی تشکیل شده است؛ از جمله موتور برق برای تأمین توان مورد نیاز، واحد کنترل کامپیوتری جهت مدیریت دقیق نازل ها، مخزن ذخیره ی آب، پمپ و فشارسنج به منظور تنظیم جریان و فشار آب، و سازه ی فلزی با پایه های قابل تنظیم ارتفاع تا ۲/۴ متر که نقش پشتیبان و نگهدارنده کل سامانه را دارد. مجموعه ی سیستم پاشش شامل نازل هایی است که قطرات را با اندازه و پراکندگی مشخص تولید می کنند. آب مورد استفاده ابتدا وارد مخزن شده و از طریق شیلنگ های ارتباطی به سر نازل ها منتقل می گردد. در قسمت بالای مخزن شیری تنظیم کننده تعبیه شده که امکان کنترل سرعت جریان و در نتیجه شدت بارندگی را فراهم می سازد (حسینی و همکاران، ۱۴۰۲؛ همتی دایو و همکاران، ۱۴۰۲). سه شیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد در شدت های ۴۵، ۶۰ و ۷۰ میلی متر بر ساعت با توجه به محدوده شدت فرسایندهای در منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. به دلیل محدودیت دستگاه شبیه ساز باران در شدت های پایین به شدت های فوق الذکر پرداخته شد. از طرف دیگر با توجه به اینکه تقریباً ۷۰ درصد مساحت حوزه دارای شیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد است، لذا عملیات شبیه سازی

در سه شیب مذکور صورت گرفت. دستگاه شبیه ساز باران بر روی خاک طبیعی در منطقه مورد مطالعه تعبیه شده است. در این تحقیق آزمایش ها بر روی خاک مرتعی بدون پوشش گیاهی و با پوشش گیاهیگون از عمق ۰-۳۰ سانتی سطح خاک جهت تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک نمونه برداری در منطقه صورت گرفت. هر تست در ۳ تکرار مختلف (جهت اطمینان از کاهش خطا) بر روی شیب ها و شدت های 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 که زمان بارش باید مساوی یا بیشتر از زمان تمرکز باشد تا رواناب حاصل از بارندگی در همه سطح خروجی مشارکت داشته باشد. بازه زمانی ۶۰ دقیقه ای به ۶ قسمت ۱۰ دقیقه ای تقسیم شد و در آخر میزان رواناب و رسوب از سطح پلات جمع آوری و در آزمایشگاه اندازه گیری شد. پس از پایان نمونه برداری در صحرا، ظروف حاوی آب و رسوب به آزمایشگاه خاکشناسی منتقل شدند. برای اندازه گیری میزان رسوب معلق از روش تخلیه آب استفاده شد (Walling et al, 2001). در این روش ابتدا نمونه آب و رسوب را درون بشر ریخته، سپس آن را به مدت ۴۸ ساعت به حالت سکون نگه داشته و پس از آن به آرامی با کج کردن بشر اقدام به تخلیه آب بالای رسوبات گردید. پس از خالی کردن آب اضافی در ظروف استوانه ای مدرج میزان رواناب محاسبه شد. سپس رسوبات موجود در کف ظروف را شسته و درون فویل های آلومینیومی از قبل تهیه و توزین شده ریخته و در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک گردید (Putjaroon and Pongewwn, 1987). در آخر با کسر نمودن وزن فویل های اولیه، مقدار رسوب معلق محاسبه گردید. بعد از اندازه گیری های آزمایشگاهی ناشی از حجم رواناب و میزان رسوب، داده های مورد نظر به اکسل انتقال داده شد. به منظور کمتر کردن اختلاف میان آزمایش ها از سه تکرار میانگین گرفته شد.



شکل ۲-نمایی از دستگاه شبیه ساز باران و پلات در دامنه قلات و نمونه های رسوب در آزمایشگاه

Figure 2- View of the rain simulator and plot in the study area

در معادله σ ، μ و CV نمایانگر انحراف معیار، میانگین و ضریب تغییرات حسابی مقادیر شدت بارندگی عضو مجموعه هستند. برای آنکه ناهمگنی بین هر جفت خوشه تنها یک‌بار محاسبه شود نیازمند ضریب یک دوم است. شایان ذکر است که در معادله‌ی ۳ برخی جملات ضریب تغییرات که شرط همسایگی برای دو خوشه‌ی مورد بحث آن صادق نیست عملاً صفر خواهد بود. عدد ناهمگنی کل (H_t) در واقع مجموع جبری دو مقدار ناهمگنی بین خوشه‌ای و درون خوشه‌ای است:

$$H_t = H_{ec} + H_{ac} \quad (3)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تاثیر وجود و عدم وجود زبری سطحی بر میزان

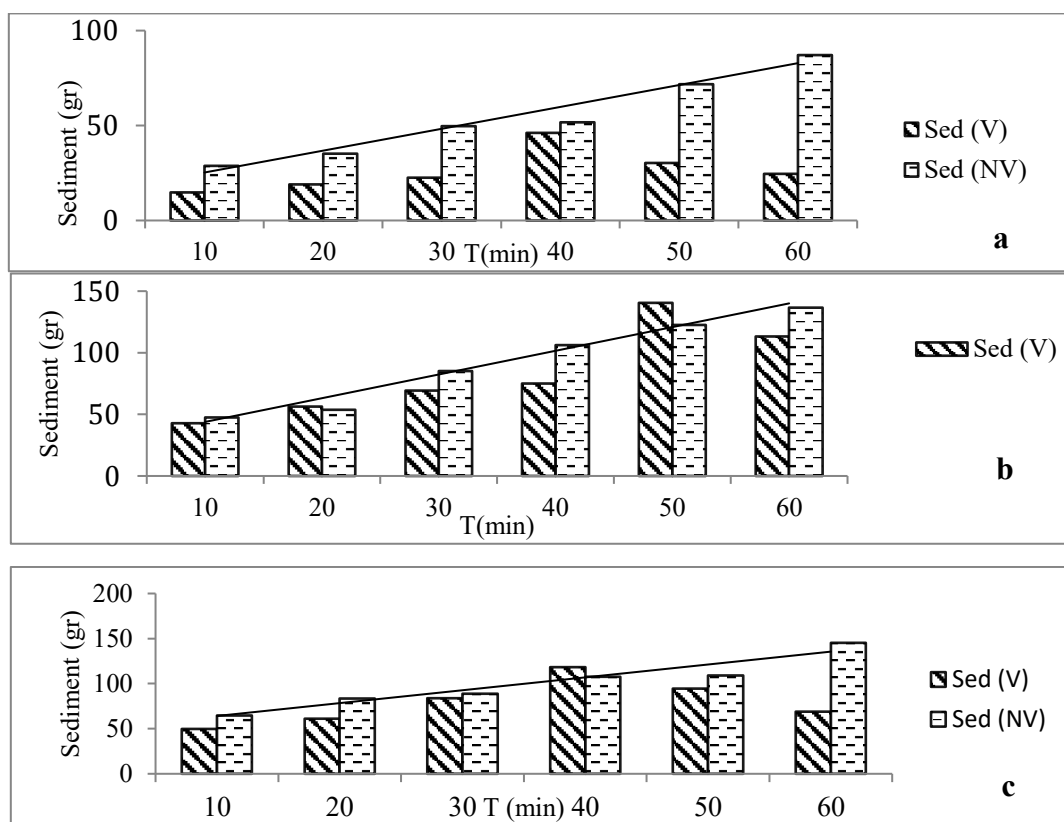
تولید رسوب در شدت ۴۵ میلی‌متر بر ساعت

شکل ۳ میزان رسوب را با وجود زبری سطحی (Sed (V) و عدم وجود زبری سطحی (Sed (NV) در شدت ۴۵ میلی‌متر بر ساعت در شیب‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد نشان می‌دهد.

به منظور ارزیابی میزان تاثیر زبری سطحی بر ناهمگنی رسوب از عددناهمگنی بین خوشه‌ای و درون خوشه‌ای بهره گرفته شد. همچنین میزان رسوب ناشی از شدت بارندگی و شیب و اثر متقابل آن‌ها از آزمون آماری تجزیه واریانس دو طرفه استفاده گردید. این تحقیق، ناهمگنی را به دو مؤلفه درون خوشه‌ای (H_{ac}) و بین خوشه‌ای (H_{ec}) تقسیم می‌کند. ناهمگنی درون خوشه‌ای با میانگین‌گیری ضریب تغییرات (نسبت انحراف معیار به میانگین) تمام بلوک‌های یک خوشه (با مساحت کل تقسیم می‌شود) تعریف می‌گردد و نشان‌دهنده تفاوت داخلی خوشه‌ها است (گنجه قزوینی، ۱۳۹۵). ناهمگنی بین خوشه‌ای، با استفاده از ضریب تغییرات بین خوشه‌های همسایه (بر اساس شدت بارندگی) محاسبه می‌شود. به منظور درک ساده موضوع ناهمگنی بین خوشه‌ای، مقایسه بین شدت بارندگی از طریق اجتماع‌گیری ضریب تغییرات بین دو خوشه همسایه مربوط می‌شود. در واقع بلوک‌های هدف در این مولفه، از نوع شیب و شدت‌های مختلف است. در نهایت، ناهمگنی کل مجموع جبری این دو مولفه است.

$$H_{ac} = \frac{\sum ci(\frac{\sigma}{\mu})}{syn.area} \quad (1)$$

$$H_{ec} = \frac{\sum Cj \sum ci CV(Ci,Cj)}{2*syn.area} \quad (2)$$



شکل ۳- رسوب در شدت ۴۵ (mm.hr^{-1}) با وجود و عدم وجود زبری سطحی در شیب‌های الف) ۱۰ درصد ب) ۲۰ درصد و ج) ۳۰ درصد

Figure 3-Sediment at intensity of 45 mm/h with presence and no presence of surface roughness on slopes of a) 10, b) 20, and c) 30 percent

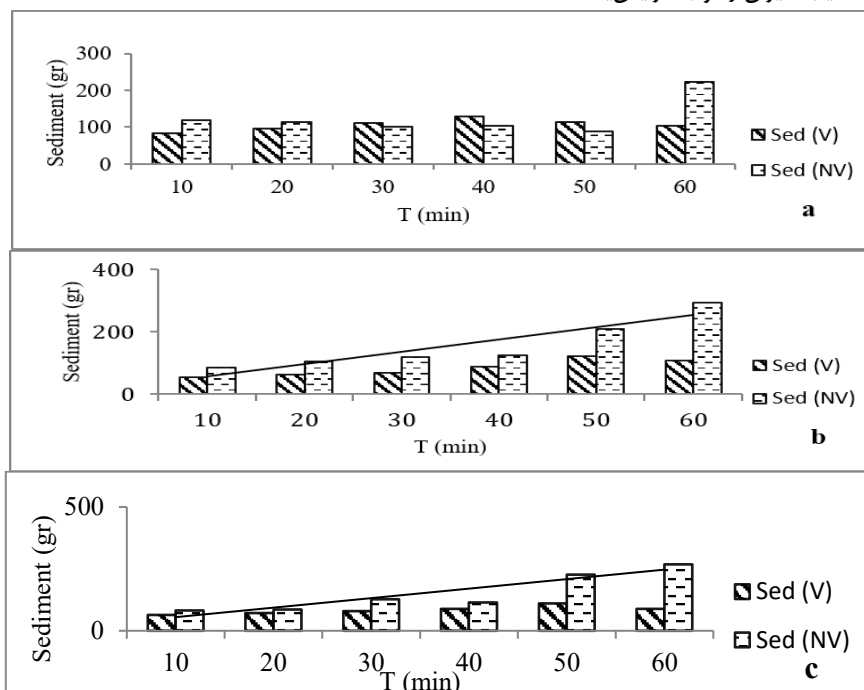
دلیل این امر ناشی از این است انرژی برشی که از طرف قطرات باران بر روی خاک ریخته می شود باعث تولید رواناب شده و شسته شدن خاک از بالادست به طرف پایین دست می شود. به طوری که هر چه شیب تندتر می شود طبیعتاً میزان حجم رواناب هم زیاد می شود. از طرف دیگر در شیب های کم به دلیل سرعت کمتر میزان رواناب، میزان رسوب کم می شود. این امر با تحقیق Sharma et al., 1983 مطابقت دارد. در شرایط خاک لخت و یا بدون پوشش، نبودن هیچ گونه حفاظی در سطح خاک این امکان را می دهد که قدرت فرساینده گی باران زیاد شده و باعث ایجاد رسوب بیشتری شود. این امر با تحقیقات Schick et al., 2017 مطابقت دارد. همچنین دلیل این امر را می توان 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.

۳-۲- تاثیر وجود و عدم وجود زبری سطحی بر

میزان تولید رسوب در شدت ۶۰ میلی متر بر ساعت

شکل ۴ میزان رسوب را با وجود زبری سطحی (Sed (V) و عدم وجود زبری سطحی (Sed (NV) در شدت ۶۰ میلی متر بر ساعت در شیب های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد نشان می دهد.

همان طور که در شکل بالا نشان داده می شود بیشترین و کمترین میزان رسوب در بخش بدون زبری سطحی در شیب های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد به ترتیب ۸۷/۱۱ و ۲۸/۸۰، ۱۳۶/۵۹ و ۴۷/۵۱ و ۱۴۵/۴۳ و ۶۴/۵۸ گرم بر مترمربع بوده است. با توجه به این موارد، بیشترین و کمترین میزان رسوب در بخش بدون زبری سطحی مربوط به شیب های ۳۰ و ۱۰ درصد به ترتیب ۱۴۵/۴۳ و ۲۸/۸۰ گرم بر مترمربع بوده است. این امر ناشی از کمتر بودن حجم رواناب در شیب ۱۰ درصد نسبت به حجم رواناب بقیه شیب ها است، که باعث شده رسوب کمتری در این شیب رخ دهد. بیشترین میزان رسوب مربوط به شیب ۳۰ درصد می باشد که نشانگر بالا بودن حجم رواناب در شدت ۴۵ میلی متر بر ساعت است. بیشترین و کمترین میزان رسوب در بخش زبری سطحی در شیب های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ به ترتیب ۴۶/۱۳ و ۱۴/۸۳ و ۱۴۵/۵۱ و ۴۲/۶۹ و ۱۱۸/۳۰ و ۴۹/۸۶ گرم بر مترمربع بوده است. با توجه به این موارد، بیشترین و کمترین میزان رسوب در بخش زبری سطحی مربوط به شیب های ۲۰ و ۱۰ درصد به ترتیب ۱۴۰/۵۱ و ۱۴/۸۳ گرم بر مترمربع بوده است. با مقایسه بین میزان رسوب خروجی در بخش عدم وجود زبری سطحی و وجود زبری سطحی در شیب های مختلف می توان نتیجه گرفت که وجود زبری سطحی در شدت ۴۵ میلی متر بر ساعت تاثیر قابل توجهی بر روی میزان رسوب داشته است. به توجه به موارد بالا نتایج مشاهده شده را بدین صورت می توان تحلیل کرد که در شدت ۴۵ میلی متر بر ساعت با افزایش درجه شیب، میزان رسوب افزایش یافته است که



شکل ۳- رسوب در شدت ۶۰ (mm.hr^{-1}) با وجود و عدم وجود زبری سطحی در شیب های الف) ۱۰ درصد ب) ۲۰ درصد و ج) ۳۰ درصد

Figure 4-Sediment at intensity of 60 mm/h with presence and no presence of surface roughness on slopes of a) 10, b) 20, and c) 30 percent

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.

۳-۳- تأثیر وجود و عدم وجود زبری سطحی بر میزان تولید رسوب در شدت ۷۰ میلی‌متر بر ساعت

شکل ۵ میزان رسوب را با وجود زبری سطحی ((Sed (V) و عدم وجود زبری سطحی ((Sed (NV) در شدت ۷۰ میلی‌متر بر ساعت در شیب‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد نشان می‌دهد.

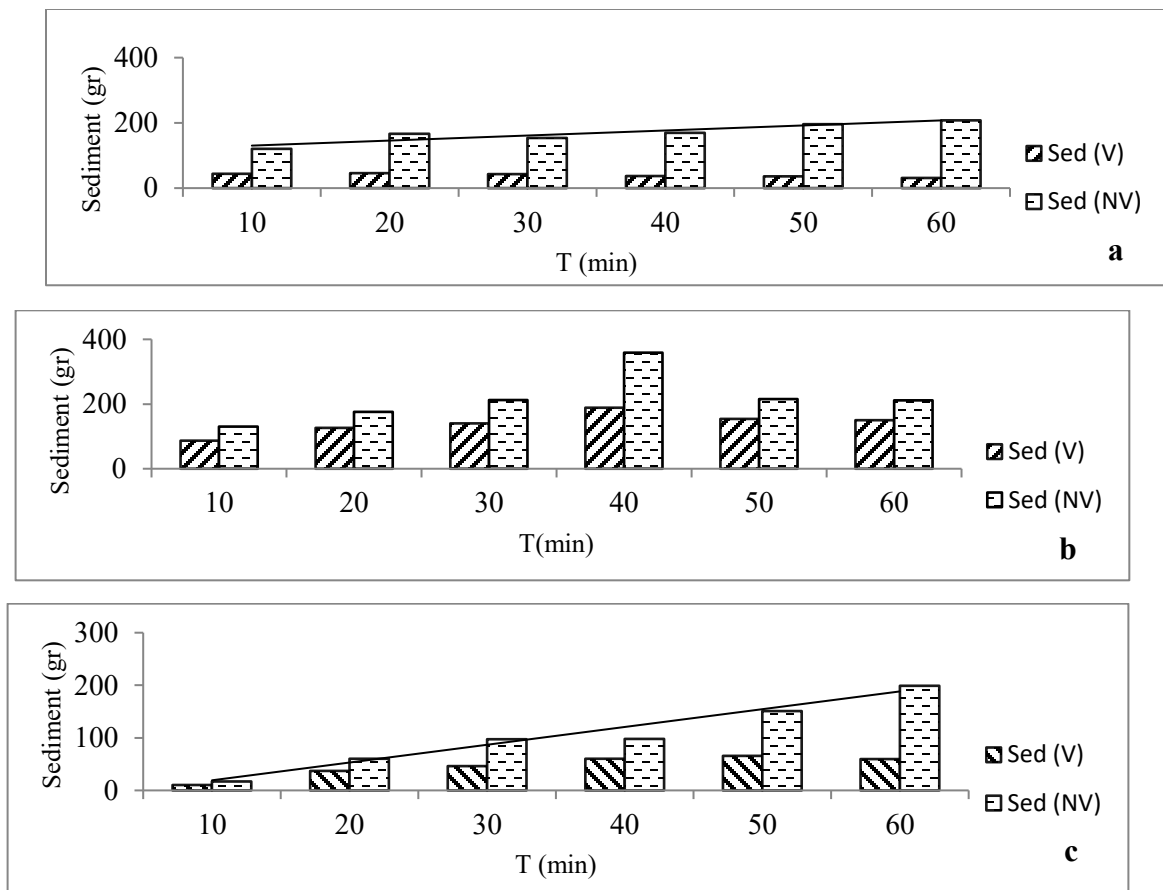
همان طور که در شکل بالا نشان داده می‌شود بیشترین و کمترین میزان رسوب در بخش بدون زبری سطحی در شیب‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ به ترتیب ۲۰۷/۹۴ و ۱۲۰/۳۸، ۳۵۹/۱۴ و ۱۳۰/۴۷ و ۱۹۸/۸۵ و ۲۶/۴ گرم بر مترمربع بوده است. با توجه به این موارد، بیشترین و کمترین میزان رسوب در سه شیب مورد نظر در بخش بدون زبری سطحی مربوط به شیب‌های ۲۰ و ۳۰ درصد به ترتیب ۳۵۹/۱۴ و ۲۶/۴ گرم بر مترمربع بوده است. این امر می‌تواند ناشی از بیشتر بودن حجم خاک سطحی در این بخش از پلات باشد. به طوری که چون بارندگی با شدت زیادی به خاک برخورد می‌کند باعث می‌شود انرژی جنبشی قطرات باران خاکدانه‌های خاک را راحت از جا کنده و به خروجی پلات برساند. در واقع هنگامی که قطرات باران با سرعت نهایی خود که تابعی از اندازه قطره است، به سطح خاک برخورد می‌کنند، انرژی جنبشی عظیمی آزاد می‌شود. این انرژی به قدری قوی است که توانایی غلبه بر نیروهای چسبندگی و برهم‌کنش بین دانه‌های خاک را دارد؛ در نتیجه، خاکدانه‌های خاک از بستر اصلی کنده شده و به صورت معلق در لایه رواناب قرار می‌گیرند. از آنجا که این فرآیند در شرایط بدون زبری رخ داده، هیچ مانعی برای تداوم حرکت رواناب یا گیر افتادن رسوبات در بالادست وجود نداشته است. در نتیجه، این ذرات معلق به راحتی توسط نیروی گرادیان شیب، به سمت خروجی پلات هدایت شده و به حداکثر میزان رسوب‌دهی در این شیب منجر شده‌اند. نتایج این تحقیق با تحقیق Nadal-Romero et al., 2018 مطابقت دارد.

بیشترین و کمترین میزان رسوب در بخش زبری سطحی در شیب‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ به ترتیب ۴۵/۷۸ و ۳۱/۵۴ و ۱۸۸/۶۲ و ۸۷/۰۷ و ۱۳۴/۵ گرم بر مترمربع بوده است. با توجه به این موارد، بیشترین و کمترین میزان رسوب در بخش زبری سطحی مربوط به شیب‌های ۲۰ و ۳۰ درصد به ترتیب ۱۸۸/۶۲ و ۱۶/۹۸ گرم بر مترمربع بوده است.

همان طور که در شکل بالا نشان داده می‌شود بیشترین و کمترین میزان رسوب در بخش بدون زبری سطحی در شیب‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ به ترتیب ۲۲۲/۰۳ و ۸۲/۱۳ و ۲۹۳/۰۴ و ۸۵/۰۸ و ۲۶۸/۸۶ و ۸۷/۲۹ گرم بر مترمربع بوده است. با توجه به این موارد، بیشترین و کمترین میزان رسوب در سه شیب مورد نظر در بخش بدون زبری سطحی مربوط به شیب‌های ۲۰ و ۱۰ درصد به ترتیب ۲۹۳/۰۴ و ۸۲/۱۳ گرم بر مترمربع بوده است. این امر ناشی از کمتر بودن حجم رواناب در شیب ۱۰ درصد نسبت به حجم رواناب بقیه شیب‌ها است، که باعث شده رسوب کمتری در این شیب رخ دهد. از آنجایی که انتظار می‌رود با افزایش شیب، میزان رسوب هم زیاد شود ولی در این قسمت بیشترین میزان رسوب مربوط به شیب ۲۰ درصد می‌باشد. این امر ناشی از فاکتورهای مربوط به زاویه شیب باشد که باعث افزایش و یا کاهش اثر محافظتی لایه سطحی شده است. نتایج این تحقیق هم‌راستا با تحقیق Zhao et al., (2015) می‌باشد.

بیشترین و کمترین میزان رسوب در بخش زبری سطحی در شیب‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ به ترتیب ۱۲۹/۶۷ و ۸۳/۲۶ و ۱۲۳/۱۰ و ۵۶/۲۲ و ۱۰۹/۹ و ۶۴/۰۳ گرم بر مترمربع بوده است. با توجه به این موارد، بیشترین و کمترین میزان رسوب در بخش زبری سطحی مربوط به شیب‌های ۱۰ و ۲۰ درصد به ترتیب ۱۲۹/۶۷ و ۵۶/۲۲ گرم بر مترمربع بوده است. این امر نشانگر آن است که زبری سطحی در شدت ۶۰ میلی‌متر بر ساعت تأثیر قابل‌توجهی بر روی میزان رسوب داشته است.

در شدت ۶۰ میلی‌متر بر ساعت بیشترین میزان رسوب مربوط به شیب ۲۰ درصد و کمترین میزان رسوب 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. 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 یک‌طرف قطر قطرات باران بیشتر شده و از طرف دیگر تعداد قطرات برخورد یافته به سطح خاک افزایش می‌یابد. بنابراین در شدت بارندگی بالا به دلیل افزایش انرژی جنبشی بارندگی به تبع آن فرساینده‌گری بالایی را در برمی‌گیرد. نتایج این امر با پژوهش Foley and Silburn (2002) هم‌راستا است. از طرف دیگر با توجه به شکل‌های موجود، 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 طریق



شکل ۵- میزان تولید رسوب در شدت ۷۰ میلی‌متر بر ساعت با وجود و عدم وجود زبری سطحی در شیب‌های الف) ۱۰ درصد ب) ۲۰ درصد و ج) ۳۰ درصد

Figure 5-Sediment production rate at an intensity of 70 mm/h with presence and no presence of surface roughness on slopes of a) 10 percent, b) 20, and c) 30 percent

انرژی جنبشی زیاد باعث می‌شود خاکدانه‌های سطح خاک را با قدرت بیشتری از جا 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 ناشی از منفذهای بزرگ در مجاورت قطعه سنگ باشد که باعث جذب بیشتر رواناب شده و بدین طریق تولید رواناب را جبران کند.

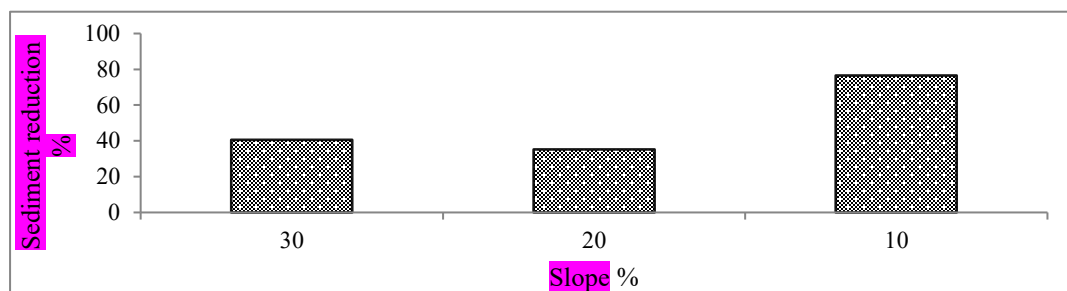
با توجه به شکل بالا، کمترین میزان رسوب در شدت ۷۰ میلی‌متر بر ساعت با توجه به نتایج در شیب تند رخ داده است. یافته‌های ما در شدت ۷۰ میلی‌متر بر ساعت متناقض با یافته‌های Sharma et al., (1983) ، Nassif and Wilson (1975) می‌باشد. جهت تحلیل این تناقض باید اشاره کرد که رواناب در حالت کلی رابطه معکوسی با نفوذ 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 Stones (2006) مطابقت دارد. ناهمگنی مکانی موجود در خصوصیات خاک می‌تواند مربوط به سطح رطوبت خاک (Easton and Petrovic, 2004)، تخلخل‌پذیری بالا (Shipitalo et al., 2004) و رسوب مواد آلی باشد. از آنجایی که طی شدت بالا اثر

۳-۴- درصد کاهش رسوب عامل وجود زبری

سطحی

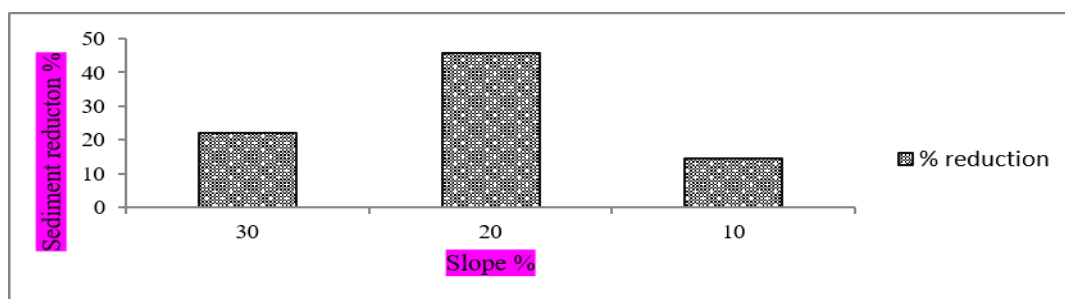
به منظور اثر کیفی پوشش گیاهی بر روی میزان رسوب، درصد کاهش میزان رسوب در بین شدت‌های مختلف و شیب‌های متفاوت بررسی گردید. نتایج میزان رسوب طی شیب‌ها و شدت‌های مختلف

نشان داد که پوشش گیاهی یک سنجش موثر و قابل قبول برای حجم رواناب است، بنابراین اثر شستشوی رواناب سطحی بر روی شیب‌های مختلف را تسکین می‌دهد. شکل‌های ۶-۸ میزان درصد کاهش رسوب را از طریق عامل زبری سطحی در شدت‌های ۴۵، ۶۰ و ۷۰ میلی‌متر بر ساعت نشان می‌دهد.



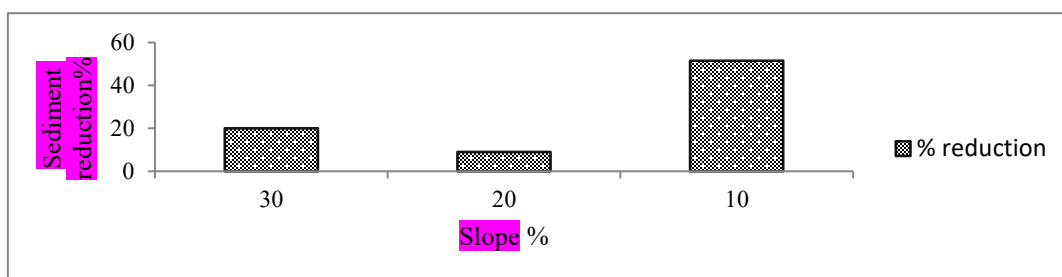
شکل ۶- درصد کاهش رسوب ناشی از زبری سطحی در شدت ۴۵ میلی‌متر بر ساعت

Figure 6- Sediment reduction percentage due to surface roughness at an intensity 45 mm/h



شکل ۷- درصد کاهش رسوب ناشی از زبری سطحی در شدت ۶۰ میلی‌متر بر ساعت

Figure 7- Sediment reduction percentage due to surface roughness at an intensity 60 mm/h



شکل ۸- درصد کاهش رسوب ناشی از زبری سطحی در شدت ۷۰ میلی‌متر بر ساعت
due to surface roughness at an intensity of 70 mm/h

در این تحقیق نشان داد که زبری سطحی نقش موثری در کاهش میزان رسوب دارد و به طور فزاینده‌ای باعث می‌شود حفاظت آب و خاک افزایش یابد. در این تحقیق پوشش گیاهی به طور تأثیرگذاری میزان رسوب را در تمامی تیمارهای بارندگی کاهش داد، به طوری که نتایج این تحقیق با نتایج تحقیق Donjadee and Chinnarasri (2012) و Lin et al, (2018) مطابقت دارد. با

همان طور که در شکل‌های ۶-۸ نشان داده می‌شود، درصد کاهش رسوب از طریق زبری سطحی در شدت ۴۵، ۶۰ و ۷۰ میلی‌متر بر ساعت به ترتیب از ۳۵ تا ۷۶ درصد، ۱۴/۶ تا ۴۵/۷ درصد و ۹/۰۵ تا ۵۱/۴۴ در بین شیب‌های موجود متغیر است. با توجه به مطالب ذکرشده، درجه کاهش میزان رسوب در شیب‌ها و شدت‌های مختلف متفاوت است. مقایسه اثر کاهش رواناب و رسوب

توجه به موارد اشاره شده میزان تولید رسوب یک فرایند پیچیده بوده و به طور جامعی تحت تاثیر شدت بارندگی، خصوصیات خاک، درجه شیب، نوع پوشش گیاهی و دیگر فاکتورها می‌باشد (Wang et al., 2016; Wu et al., 2018). نوع زبری سطحی (پوشش گیاهی) به عنوان یک فاکتور موثر بازی کرده و بر روی رواناب و میزان رسوب تاثیر می‌گذارد. پوشش گیاهی بر روی سطح خاک زبری سطحی خاک را افزایش داده و به عنوان مانع عمل می‌کند به طوری که مانع رواناب سطحی شده و زمان نفوذ را افزایش می‌دهد (Huang et al., 2012; Lin et al., 2018; Hajizade et al., 2024). بنابراین پوشش سطح زمین، میزان رسوب را از طریق گیرش گیاهی موثر بارندگی-رواناب کاهش داده، زبری سطحی خاک را افزایش داده و میزان نفوذ بارندگی را افزایش می‌دهد. به طوری که Yu و همکاران در طی تحقیقی نتیجه گرفتند که وقتی پوشش گیاهی در روی سطح زمین نسبتاً بیشتر باشد، قطرات باران به طور مستقیم به دلیل تاثیر گیرش پوشش گیاهی نمی‌تواند به طور مستقیم بر روی سطح زمین اصابت کند به طوری که باعث می‌شود که انرژی جنبشی قطرات باران کاهش یابد (Yu et al., 2010).

۳-۵- نتایج حاصل از آنالیز واریانس دوطرفه میزان رسوب ناشی از شدت بارندگی و شیب

جدول ۴-۱۰ نتایج آنالیز واریانس دوطرفه میزان رسوب ناشی از شدت بارندگی و شیب و اثر متقابل آن‌ها بر روی میزان رسوب با وجود زبری سطحی نشان می‌دهد. بر این اساس، متغیرهای شدت بارندگی و شیب بر روی رسوب تفاوت معنی‌داری در سطح یک درصد داشتند. همچنین اثر متقابل و برهمکنش بین شدت بارندگی و شیب بر روی میزان رسوب، در سطح یک درصد معنی‌دار بود.

جدول ۱ نتایج حاصل از آنالیز واریانس دوطرفه میزان رسوب ناشی از شدت بارندگی و شیب را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج جدول یاد شده شدت بارندگی و شیب از مواردی هستند که در این تحقیق جزو عوامل تأثیرگذار در تولید رسوب هستند. با زیاد شدن شدت جریان، جدا شدن ذرات به وسیله جریان سطحی بیشتر می‌شود. همچنین با افزایش شدت باران و انرژی جنبشی، تخریب خاکدانه‌ها افزایش می‌یابد در نتیجه ذرات خاک حساس به حمل می‌شوند (Zhang et al., 2011). از طرف دیگر شیب هم تاثیر قابل توجهی بر روی فرسایش خاک به روش‌های مختلف از جمله تغییر در نرخ نفوذ، شرایط هیدرولیکی رواناب و زبری سطح دارد (Fang et al., 2015). اگرچه پژوهش‌های متعددی نتایج متفاوتی

را درباره تأثیر شیب زمین بر شدت و الگوی برداشت پاشمانی گزارش کرده‌اند (Fang et al., 2015; Fox et al., 1997)، اما این تفاوت‌ها را می‌توان ناشی از ماهیت چندعاملی و پیچیده فرآیند فرسایش آبی دانست. در واقع، عملکرد پدیده‌هایی همچون پاشمان، رواناب و فرسایش سطحی به صورت هم‌زمان تحت تأثیر ترکیب عوامل هندسی، اقلیمی و فیزیکی محیط قرار دارند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که علاوه بر زاویه شیب، پارامترهایی مانند طول شیب، شدت و الگوی زمانی بارش، نوع پوشش گیاهی، بافت و ساختمان خاک، و پایداری دانه‌بندی سطحی تأثیر چشمگیری بر میزان انرژی برخورد قطرات باران و در نتیجه بر نرخ جدایش و انتقال ذرات خاک دارند. به همین دلیل، برداشت پاشمانی و اثر شیب نمی‌تواند به صورت یک متغیر تحلیل شود، بلکه نیازمند رویکردی تلفیقی است که در آن تعامل میان ویژگی‌های فیزیکی محیط و ویژگی‌های دینامیکی بارندگی به طور هم‌زمان مدل‌سازی شوند. شواهد جدید از مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی‌های عددی نیز نشان می‌دهند که افزایش شیب همواره منجر به افزایش پاشمان نمی‌شود؛ بلکه بسته به طول مسیر رواناب و شدت بارش، ممکن است کاهش نیز در میزان برداشت ذرات مشاهده شود (Zhang et al., 2025; Majewski et al., 2023).

جدول ۲ نتایج حاصل از تاثیر زبری سطحی بر ناهمگنی رسوب در شدت‌های بارندگی ۷۰، ۶۰ و ۴۵ میلی‌متر بر ساعت و شیب‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد را نشان می‌دهد. با توجه به ارتباط مستقیم ضریب تغییرات با میزان تغییرپذیری، نتایج حاکی از آن است که ضریب تغییرات در شدت بارندگی ۶۰ و ۴۵ میلی‌متر بر ساعت در منطقه مورد مطالعه به ترتیب بیشترین و کمترین میزان را به خود اختصاص داده است. در نتیجه شدت بارندگی ۶۰ میلی‌متر بر ساعت با اعداد ناهمگنی درون خوشه‌ای و بین خوشه‌ای به ترتیب ۰/۶۹ و بیشترین ناهمگنی رسوب را دارا هست. از طرف دیگر شدت بارندگی ۴۵ میلی‌متر بر ساعت با اعداد ناهمگنی درون خوشه‌ای و بین خوشه‌ای به ترتیب ۲/۲۵ و ۰/۵۱ کمترین ناهمگنی رسوب را دارا هست. همچنین از آنجایی که شیب‌های تند و ملایم به ترتیب بیشترین و کمترین ضریب تغییرات را دارا هستند در نتیجه شیب‌های مذکور به ترتیب بیشترین و کمترین تغییرپذیری و یا ناهمگنی را برخوردار هستند. این امر ناشی از آن است که در اکثر اوقات فرسایش خاک در شیب‌های کم تقریباً نسبت به بقیه شیب‌ها توزیع بهتری داشته است و در نتیجه از ناهمگنی کمتری برخوردار است. نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج تحقیق Chu et al., 2020 همسو است.

جدول ۱- نتایج حاصل از آنالیز واریانس دوطرفه میزان رسوب ناشی از شدت بارندگی و شیب

Table 1- Two-way analysis results of sedimentation rate variance due to rainfall intensity and slope

Effect	DFn ²	DFd ¹	F- value	Pr<0.05
Rainfall Intensity	2	45	6.889	0.002 **
Slope	2	45	18.239	0.000001 **
RI:S	4	45	14.992	0.000007**

** سطح معنی‌داری ۱ درصد

جدول ۲- تأثیر زبری سطحی بر روی ناهمگنی رسوب در شدت‌های بارندگی ۷۰، ۶۰ و ۴۵ میلی‌متر بر ساعت و شیب ۲۰، ۱۰ و ۳۰ درصد

Table 2- Effect of surface roughness on sediment heterogeneity at rainfall intensities 70, 60, and 45 mm/h and slopes 10, 20, and 30 percent

Rainfall Intensity (mm/h)	Slope (%)	% CV	Ht=Hac+Hec	H _{ac}	Hec
70	30	67	3.45	2.82	0.63
	20	40			
	10	19			
60	30	64	4.69	4	0.69
	20	58			
	10	57.5			
45	30	40	2.76	2.25	0.51
	20	35			
	10	25			

نقش مؤثری در کنترل فرسایش و کاهش بار رسوبی در شدت ۴۵ میلی‌متر در ساعت دارد.

نتایج آزمایش‌ها نشان داد که میزان رسوب در شدت ۶۰ میلی‌متر بر ساعت در سطوح بدون زبری، بیشترین مقدار رسوب در شیب ۲۰ درصد و کمترین مقدار در شیب ۱۰ درصد ثبت شد. این اختلاف بیانگر آن است که کاهش حجم رواناب در شیب‌های پایین‌تر باعث کاهش انتقال رسوب می‌شود. هرچند انتظار می‌رفت با افزایش شیب، رسوب نیز افزایش یابد، اما در این حالت بالا بودن رسوب در شیب ۲۰ درصد می‌تواند ناشی از ضخامت کمتر خاک و کاهش اثر حفاظتی لایه سطحی باشد. در سطوح دارای زبری سطحی، بیشترین و کمترین مقدار رسوب به ترتیب در شیب‌های ۱۰ و ۲۰ درصد مشاهده شد. در این شدت، بیشترین رسوب در شیب ۲۰ درصد و کمترین در شیب ۱۰ درصد رخ داد؛ زیرا در شیب‌های

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر ناهمگنی زبری سطحی بر تولید رسوب در شیب و شدت‌های بارندگی مختلف با استفاده از شبیه‌ساز باران مورد بررسی گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که میزان رسوب در شدت ۴۵ میلی‌متر بر ساعت در شرایط مختلف شیب و زبری سطحی تفاوت قابل‌توجهی دارد. در سطوح بدون زبری، بیشترین مقدار رسوب در شیب ۳۰ درصد و کمترین در شیب ۱۰ درصد مشاهده شد. در مقابل، در سطوح دارای زبری سطحی، بیشترین رسوب در شیب ۲۰ درصد و کمترین مقدار در شیب ۱۰ درصد به دست آمد. مقایسه‌ی دو وضعیت نشان می‌دهد که وجود زبری سطحی موجب کاهش محسوس مقدار رسوب خروجی در تمامی شیب‌ها گردیده است؛ زیرا زبری با کاهش سرعت جریان و افزایش نفوذ آب، توان حمل ذرات را کم می‌کند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که زبری سطحی

¹. Degree of Freedom Denominator

². Degree of Freedom Numerator

پایین، حجم رواناب کمتر بوده و نفوذ آب بیشتر است، در نتیجه فرسایش کاهش می یابد.

در بخش بدون زبری سطحی با شدت ۷۰ میلی متر بر ساعت، بیشترین میزان رسوب در شیب ۲۰ درصد و کمترین میزان در شیب ۳۰ درصد ثبت گردید. این امر نشان می دهد که افزایش شیب تا ۳۰ درصد لزوماً منجر به افزایش مطلق رسوب نمی شود و عواملی نظیر توزیع انرژی جنبشی برخورد قطرات و ویژگی های خاک سطحی (که ممکن است با شسته شدن اولیه، موجب آشکار شدن مقاومت لایه های زیرین شود) در این عدم تناسب دخیل بوده اند. در بخش دارای زبری سطحی بیشترین رسوب متعلق به شیب ۲۰ درصد و کمترین آن در شیب ۳۰ درصد بود.

نکته ای قابل تأمل، ثبت کمترین میزان کلی رسوب در شیب تند (۳۰ درصد) در این شدت بارندگی بود، که این تناقض احتمالی را می توان به واسطه ی تأثیر ناهمگنی مکانی در خصوصیات نفوذ خاک سطحی نسبت داد؛ عواملی چون رطوبت اولیه، تخلخل پذیری بالا یا تأثیر موقعیت سنگریزه ها در لایه های زیرین، بر پاسخ رواناب تأثیر گذاشته اند. در حالت کلی، انرژی جنبشی بالای بارندگی شدید، خاکدانه ها را جابجا کرده و پس از شسته شدن لایه سطحی، تخلخل نزدیک سنگ ها می تواند جذب رواناب را افزایش داده و تولید رواناب و رسوب نهایی را در آن بخش تعدیل کند.

نتایج تحلیل واریانس دوطرفه نشان داد که شدت بارندگی و شیب هر دو عوامل اصلی و تأثیرگذار بر تولید رسوب هستند؛ افزایش شدت بارندگی باعث افزایش تخریب خاکدانه ها و حمل ذرات می شود، در حالی که شیب نیز نرخ نفوذ و شرایط هیدرولیکی رواناب را تغییر می دهد. در بررسی ناهمگنی رسوب، بیشترین تغییرپذیری در شدت بارندگی ۶۰ میلی متر بر ساعت و کمترین آن در ۴۵ میلی متر بر ساعت مشاهده شد. همچنین، شیب های تند بیشترین ناهمگنی رسوب را ایجاد کرده و شیب های ملایم کمترین پراکندگی را داشتند، زیرا فرسایش در شیب های کم توزیع یکنواخت تری دارد.

از جمله محدودیت های این تحقیق می توان به تنظیم دقیق سامانه ی باران ساز، تأثیر سرعت باد در شرایط آزمایش، و دشواری جابه جایی و استقرار تجهیزات در شیب های متفاوت اشاره کرد. این عوامل تا حدی بر نتایج و دقت اندازه گیری ها تأثیرگذار بوده اند. با وجود این محدودیت ها، انتظار می رود که پژوهش حاضر بتواند شناخت قابل توجهی از نحوه ی برهم کنش میان شدت بارندگی، شیب دامنه، حجم رواناب، میزان رسوب و وجود و عدم وجود زبری سطح زمین فراهم آورد.

از آن جا که این مطالعه به صورت رخدادی و با تمرکز بر رفتار رواناب و انتقال رسوب در شیب های مختلف انجام گرفته است، پیشنهاد می شود در مطالعات آینده پارامتر تأثیر زبری سطحی در قالب کمی سازی درصدهای فضای اشغال شده توسط پوشش گیاهی به عنوان یک متغیر مستقل حیاتی بر زمان اوج و زمان تاخیر رواناب در پژوهش های دیگر لحاظ شود.

سپاسگزاری

نویسندگان برخورد لازم می دانند که مراتب سپاس عمیق خود را به مجموعه ی محترم گروه تأسیسات و همچنین مدیریت محترم امور حمل و نقل دانشگاه شهرکرد ابراز نمایند. از مساعدت و همکاری بی دریغ این دو واحد، به ویژه در خصوص تأمین و بهره برداری از دستگاه تراکتور جهت جابه جایی ایمن و کارآمد دستگاه شبیه ساز باران در محل اجرای پروژه که نقش اساسی در تسهیل و موفقیت اجرای این پژوهش ایفا نموده است، صمیمانه قدردانی مینماید.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می دارند که هیچ گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

اکبر نوروزی: مفهوم سازی، انجام تحلیل های آماری، نگارش نسخه اولیه مقاله؛ **مهدی پژوهش:** راهنمایی، بازبینی مقاله و کنترل نتایج؛ **خدایار عبدالمهدی:** مفهوم سازی، مشاوره، بازبینی متن مقاله.

منابع:

- حاجی زاده، زینب، امیدوار، ابراهیم و قاسمیه، هدی (۱۴۰۳). تأثیر پوشش گیاه یونجه بر رواناب تولیدی در مقیاس کرت های فرسایشی با استفاده از شبیه ساز باران. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۹۹-۱۱۰. doi: 10.22098/mmws.2023.12800.1278
- حسینی، سید احمد، شریفی، فروود و غریب رضا، محمدرضا (۱۴۰۲). اثر خاک پوش های زیستی بر مقاومت برشی کانال های خاکی تحت شبیه سازی باران و فرسایش خاک. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۹۸-۱۱۴. doi: 10.22098/mmws.2022.11144.1101
- خالدی درویشان، عبدالواحد، همایون فر، وفا و صادقی، سیدحمیدرضا (۱۳۹۵). طراحی، ساخت و واسنجی شبیه ساز باران قابل حمل

رواناب در حوزه آبخیز قره‌شیران اردبیل. فیزیک زمین و فضا،
doi: ۶۹۷-۷۱۳، (۳)۴۴
10.22059/jesphys.2018.253440.1006980
علی دوست، مسعود، نقدی، رامین، نیکوی، مهرداد و پیروان، حمیدرضا
(۱۴۰۳). تأثیر شیب دامنه و شدت‌های مختلف بارندگی با شبیه‌ساز
باران بر رواناب و هدررفت خاک یک سال پس از آتش‌سوزی
جنگل (جنگل شنود گیلان). جنگل / ایران، ۱۶ (۲)، ۲۵۷-۲۷۱.
doi: 10.22034/ijf.2024.414296.1943
همتی دایو، علیرضا، زارع گاریزی، آرش، شیخ، واحدبردی و محمدیان
بهبهانی، علی (۱۴۰۲). ارزیابی اثر پوسته‌های زیستی خاک بر
کیفیت رواناب. مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۳ (۴)، ۹۳-
106.

References

- Anselin, L. (2010). Thirty years of spatial econometrics. *Papers in Regional Science*, 89(1), 3-25. doi: 10.1111/j.1435-5957.2010.00279.x
- Bagarello, V., C.Di Stefano, V. Ferro, P.I. Kinnell, V. Pampalano, 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. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.01.029
- Bracken, L. J., Wainwright, J., Ali, G. A., Tetzlaff, D., Smith, M. W., Reaney, S. M., & Roy, A. G. (2013). Concepts of hydrological connectivity: Research approaches, pathways and future agendas. *Earth-Science Reviews*, 119, 17-34. doi:10.1016/j.earscirev.2013.02.001
- Chen, H., Zhang, X., Abila, M., Lü, D., Yan, R., Ren, Q., ... & Yang, X. (2018). Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China. *Catena*, 170, 141-149. doi:10.1016/j.catena.2018.06.006
- Chu, L., Sun, T., Wang, T., Li, Z., & Cai, C. (2020). Temporal and Spatial Heterogeneity of Soil Erosion and a Quantitative Analysis of its Determinants in the Three Gorges Reservoir Area, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(22), 8486. doi:10.3390/ijerph17228486
- Donjatee, S., & Chinnarasri, C. (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. doi: 10.1016/S1001-6279(12)60025-0

- برای مطالعات صحرایی روان آب و فرسایش خاک. علوم و مهندسی آبخیزداری / ایران، ۱۰ (۳۴)، ۱۰۵-۱۱۲. doi: 20.1001.1.20089554.1395.10.34.3.4
- کاویان پور، امیر حسین، جعفریان، زینب، اسمعیلی، اباذر و کاویان، عطاالله (۱۳۹۴). اثر پوشش گیاهی بر کاهش رواناب و هدر رفت خاک با استفاده از شبیه‌سازی باران در مراتع نشو استان مازندران. *جغرافیا و برنامه ریزی محیطی*، ۲ (۲۶)، ۱۹۰-۱۹۹. doi: 20.1001.1.20085362.1394.26.2.12.3.۱۷۹
- گنجه قزوینی، مصطفی (۱۳۹۵). کاربرد تحلیل خوشه‌های برای تعریف عدد ناهمگنی در مدل‌های زمین‌شناسی. *اکتشاف و تولید نفت و گاز*، ۱۴۰ : ۵۴-۴۹.
- عسگری، ابراهیم، اسمعیلی عوری، اباذر، مصطفی‌زاده، رئوف و احمدزاده، غلامرضا (۱۳۹۷). تغییرات مکانی رواناب، رسوب و آستانه شروع
doi: 10.22098/mmws.2022.11617.1151

- Dutilleul, P. (2011). Spatio-temporal heterogeneity: Concepts and analyses. *Cambridge University Press*. 393 p.
- Easton, Z.M & Petrovic, A. M. (2004). Fertilizer source effect on ground and surface water quality in drainage from turfgrass. *Journal of Environmental Quality*, 33(2): 645-655. doi: 10.2134/jeq2004.6450
- Fang, H., Sun, L., & Tang, Z. (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. doi:10.1002/hyp.10392
- 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. doi:10.1071/SR01112
- Fox, D. M., Bryan, R. B., & Price, A. G. (1997). The influence of slope angle on final infiltration rate for interrill conditions. *Geoderma*, 80(1-2), 181-194. doi:10.1016/S0016-7061(97)00075-X
- Govers, G., Takken, I., & Helming, K. (2000). Soil roughness and overland flow. *Agronomie*, 20(2), 131-146. doi: 10.1051/agro:2000114
- Hamizak, S. N., Suif, Z., Jelani, J., Ahmad, N., & Akhtar, M. I. (2025). Experimental investigation on slope runoff, sediment, and hydraulic parameters under different underlying surface. *Sinergi*, doi:10.22441/sinergi.2025.1.023
- He, Z., Yuan, G., Hao, S., Tong, H., & Zhang, R. (2025). Mechanism Analysis of the Effects of Rainfall Intensity, Grass Coverage, and Slope on

- Slope Erosion Processes. *Water*, 17(8), 1194. doi:10.3390/w17081194
- Huang, R., Huang, L., He, B., Zhou, L., & Wang, F. (2012). Effects of slope forest and grass vegetation on reducing rainfall-runoff erosivity in three gorges reservoir region. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 28(9), 70-76. doi:10.3969/j.issn.1002-6819.2012.09.012
- Li, T., Li, T., Yang, Y., Chen, Y., Liu, Q., Huang, Y., Ding, X., & Wu, F. (2025). Study on the effect of surface roughness on stream ordering-based soil erosion: a case study of the Loess plateau, northwest China. *Hydrology Research*, 56(1), 094. doi:10.2166/nh.2025.094.
- Lin, J., Zhu, G., Wei, J., Jiang, F., Wang, M. K., & Huang, Y. (2018). Mulching effects on erosion from steep slopes and sediment particle size distributions of gully colluvial deposits. *Catena*, 160, 57-67. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.09.003>
- Majewski, M., Czuchaj, A., & Marciniak, M. (2023). Impact of rainfall intensity on soil erosion based on experimental research. *Landform Analysis*, 42, 25-36. doi:10.12657/landfana-042-002
- Marques, M. J., Bienes, R., Jiménez, L., & Pérez-Rodríguez, R. (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. doi:10.1016/j.scitotenv.2007.01.043
- Montgomery, D.R and W.E. Dietrich. 2002. Runoff generation in a steep, soil-mantled landscape. *Water Resources Research*, 38(9):7-1. doi:10.1029/2001WR000822
- Nadal-Romero, E., Peña-Angulo, D., & Regüés, D. (2018). Rainfall, run-off, and sediment transport dynamics in a humid mountain badland area: Long-term results from a small catchment. *Hydrological Processes*, 32(11), 1588-1606. doi:10.1002/hyp.11495
- Nassif, S. H., & Wilson, E. M. (1975). The influence of slope and rain intensity on runoff and infiltration, *Hydrological Sciences Journal*, 20(4), 539-553. doi:10.1080/02626667509491586
- Norouzi-Shokrlu, A., Pajouhesh, M., & Abdollahi, K. (2020). Relating sediment yield estimations to the wet front term using rainfall simulator field experiments. *Water Resources Management*, 34(13), 4181-4196. doi:10.1007/s11269-020-02664-8
- Parsons, A.J & Stone, P. M. (2006). Effects of intra-storm variations in rainfall intensity on interrill runoff and erosion. *Catena*, 67(1):68-78. doi:10.1016/j.catena.2006.03.002
- Putjaroon W., & Pongewn, K. (1987). Amount of runoff and soil loss from various land use sampling plots in Sakonakorn Province, Thailand.167-198. In: *Proceeding of Forest Hydrology and Watershed Management*, August, IAHS-AISH, Publication
- Sharma, K, H. Singh and O. Pareek.1983. Rainwater infiltration into a bare loamy sand. *Hydrological Sciences Journal*, 28: 417-424. doi:10.1080/02626668309491980.
- Schick, J., I. Bertol, F.T Barbosa, D.J. Miquelluti & Cogo N.P. (2017). Water Erosion in a Long-Term Soil Management Experiment with a Humic Cambisol. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 41. doi:10.1590/18069657rbcs20160383
- Shipitalo, M.J., V. Nuutinen & Butt, K. R. (2004). Interaction of earthworm burrows and cracks in a clayey, subsurface-drained, soil. *Applied Soil Ecology*, 26(3): 209-217. doi:10.1016/j.apsoil.2004.01.004
- Walling, D, E. Collins A, L. Sickingabula H, A. & Leeks G. J. L. (2001). Integrated assessment of catchment suspended sediment budgets: A Zambian Example. *Land Degradation and Development* 12:387-415. doi:10.1002/ldr.461
- Wang, Q., Zhao, G., Liu, Y., Zhang, P., & Chai, J. (2016). Effects of vegetation types on yield of surface runoff and sediment, loss of nitrogen and phosphorus along loess slope land. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 32(14), 195-201. doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.14.026
- Wu, L., Peng, M., Qiao, S., & Ma, X. Y. (2018). Effects of rainfall intensity and slope gradient on runoff and sediment yield characteristics of bare loess soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(4), 3480-3487. doi:10.1007/s11356-017-0713-8
- Yu, G. Q., Li, Z. B., Li, P., Zhang, X., Chen, L., & Jia, L. L. (2010). Effects of vegetation types on hillslope runoff-erosion and sediment yield. *Advances in Water Science*, 21(5), 593-599. doi:10.1007/s11269-014-0603-5
- Zhang, L., Zhang, Q. F., Zhao, L. S., Wang, J., & Wu, F. Q. (2014). Spatial heterogeneity of loess tilled

- slope surface roughness. *Sci Agric Sin*, 47, 2363-74. doi:10.17221/130/2017-SWR
- Zhang, N., Xia, Z., Li, P., Chen, Q., Ke, G., Yue, F., ... & Wang, T. (2025). The impact of rainfall and slope on hillslope runoff and erosion depending on machine learning. *Frontiers in Environmental Science*, 13, 1580149. doi: 10.3389/fenvs.2025.1580149
- Zhang, S., & Zhang, K. (2025). Assessing the impact of extreme rainfall and slope surface conditions on runoff and erosion based on a big database in Southwest China's karst region. *Journal of Hydrology*, 659, 133273. doi:10.1016/j.jhydrol.2025.133273
- 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. doi:10.1007/s00477-014-0896-1
- Zheng, Z. C., He, S. Q., & Wu, F. Q. (2014). Changes of soil surface roughness under water erosion process. *Hydrological Processes*, 28(12), 3919-3929. doi:10.1002/hyp.9