



Effects of biocrusts on the hydrological components and sediment production at experimental plot scale in arid environments

Ariyan Matboo¹, Vahedberdi Sheikh^{2*}, Ali Mohammadian Behbahani³ and Arash Zare Garizi⁴

¹ MSc Student of Watershed Science and Engineering, Department of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

² Professor, Department of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

³ Assistant Professor, Department of Arid Zone Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

⁴ Assistant Professor, Department of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Received: 05 July 2023

Accepted: 14 October 2023

Extended abstract

Introduction

The hills surrounding the international wetlands of Almagol and Ajigol in the Golestan Province are exposed to severe erosion and every year a large amount of sediments from these hillslopes discharge into these wetlands. Whilst a large extent of these surrounding hills, covered with Biological Soil Crusts (BSC), has been destroyed due to lack of awareness of their values, sensitivity and ecological functions. Improving soil properties, preventing direct contact of raindrops with the soil surface, all indicate the important role of BSC in hydrological processes and soil loss control.

Materials and methods

In this study, the role of BSC in the hydrological processes of dry areas was investigated using a rain simulator. After a field survey and evaluation of the area, different treatments including biological crust with a dominant lichen cover, biological crust with a dominant moss cover, an area covered with vascular plants, an area without cover and areas covered with a combination of moss and lichen were selected to perform rain simulation and compare their effects on the hydrological processes of the selected region. Rain simulation was done in 2×1 meter plots for 30 minutes and intensity of 82 mm per hour. The start time of runoff and the volume of produced runoff at the outlet of the plot were measured and recorded. Also, at five-minute intervals from the beginning of the simulation process, 500 ml runoff samples were collected and transferred to the laboratory for testing in order to estimate the sediment concentration and mass. In addition, the depth of the wetting front caused by the infiltration of rain was measured at the beginning, middle and end sections of the plots.

Results and discussion

The results of rainfall-runoff simulations at a 2×1 m² plot scale with a rainfall intensity of 82 mm.h⁻¹ and a duration of 30 minutes plots, showed that the average mass of sediments from plots with the dominant cover of moss (104 g), lichen (91 g), lichen-moss combination (176 g) and bush (99 g) was significantly higher than bare soil (1133 grams). Therefore, in case of destruction of the existing BSC and the formation of bare lands, the sedimentation rate will increase by more than 5 times. A significant decrease in water infiltration into BSC causes a significant increase of 30-40% in runoff generation compared to the treatment covered with bushes and a significant increase of 8-18% compared to the bare soil treatment.

Conclusions

by reducing soil loss and sediment concentration, BSC cause the production and transfer of high-quality runoff to the wetlands and as a result maintain the ecological function and health of the region's wetlands. The results

* Corresponding author: sheikh@gau.ac.ir

of this research show the positive influence of BSC on the hydrological and ecological performance of arid areas in the north of Gorgan Plain and protection of Ramsar-listed wetlands in the region.

Keywords: Aji-gol Wetland, Infiltration, Runoff, Rainfall simulation, Soil loss

Cite this article: Matboo, A., Sheikh, V., Mohammadian Behbahani, A., Zare Garizi, A., 2024. Effects of biocrusts on the hydrological components and sediment production at experimental plot scale in arid environments. *Watershed Engineering and Management* 16(1), 117-134.

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



تاثیرپذیری مولفه‌های هیدرولوژیکی و تولید رسوب مناطق خشک از پوسته‌های زیستی مختلف در کرت‌های آزمایشگاهی

آرین مطبوع^۱، واحد بردی شیخ^{۲*}، علی محمدیان بهبهانی^۳ و آرش زارع گاریزی^۴
^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه آموزشی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی
گرگان، گرگان، ایران

^۲ استاد، گروه آموزشی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
^۳ استادیار، گروه آموزشی مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
^۴ استادیار، گروه آموزشی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۴

چکیده مبسوط

مقدمه

تپه‌ماهورهای پیرامون تالاب‌های بین‌المللی آلمان و آجی‌گل در استان گلستان، در معرض فرسایش شدید قرار دارد و سالانه حجم زیادی از رسوبات این دامنه‌ها به داخل این تالاب‌ها وارد می‌شود. در حالی که سطح وسیعی از تپه‌ماهورهای مشرف به این تالاب‌ها پوشیده از پوسته‌های زیستی بوده است که به علت عدم آگاهی کافی از ارزش، حساسیت و کارکرد اکولوژیکی آن‌ها، مورد غفلت و تخریب قرار گرفته‌اند. بهبود خصوصیات خاک، جلوگیری از برخورد مستقیم قطرات باران با سطح خاک، همگی حاکی از نقش مهم پوسته‌های زیستی در فرایندهای هیدرولوژیکی و کنترل هدررفت خاک هستند.

مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر، با استفاده از سامانه شبیه‌ساز باران نقش پوسته‌های زیستی در فرایندهای هیدرولوژیکی تپه‌ماهورهای مشرف به تالاب آجی‌گل، بررسی شد. پس از پیمایش میدانی و ارزیابی منطقه، تیمارهای مختلف شامل پوسته زیستی با پوشش غالب گلسنگ، پوسته زیستی با پوشش غالب خزه، عرصه دارای پوشش گیاهان آوندی (درمنه)، عرصه فاقد پوشش و عرصه‌هایی پوشیده از ترکیب خزه-گلسنگ برای اجرای شبیه‌سازی باران و مقایسه اثر آن‌ها بر فرایندهای هیدرولوژیکی منطقه انتخاب شد. شبیه‌سازی باران در کرت‌هایی به ابعاد یک در دو متر به ۳۰ دقیقه و شدت ۸۲ میلی‌متر در ساعت انجام شد. زمان آغاز رواناب و حجم رواناب تولیدی در خروجی پلات اندازه‌گیری و ثبت شد. همچنین، در فواصل زمانی پنج دقیقه‌ای از آغاز فرایند شبیه‌سازی برای برآورد غلظت و جرم رسوب، نمونه‌های رواناب به حجم ۵۰۰ میلی‌لیتر جمع‌آوری و برای انجام آزمایش‌ها به آزمایشگاه انتقال داده شد. به‌علاوه، عمق جبهه رطوبتی ناشی از نفوذ باران در ابتدا، وسط و انتهای پلات‌ها اندازه‌گیری شد.

نتایج و بحث

نتایج شبیه‌سازی بارش-رواناب (پنج تیمار مختلف از پوشش‌های غالب منطقه در کرت‌های آزمایشی دو متر مربعی و سه تکرار برای هر تیمار)، با شدت بارش ۸۲ میلی‌متر در ساعت و تداوم ۳۰ دقیقه‌ای نشان داد که متوسط میزان جرم رسوبات خروجی از کرت‌های با پوشش غالب خزه (۱۰۴ گرم)، گلسنگ (۹۱ گرم)، ترکیب گلسنگ-خزه (۱۷۶ گرم) و بوته (۹۹ گرم) به‌طور چشمگیری نسبت به خاک لخت (۱۱۳۳ گرم) کمتر است. بنابراین، در صورت تخریب پوسته‌های زیستی موجود و تشکیل مناطق فاقد پوشش، میزات رسوبدهی نسبت به تیمارهای گلسنگ، خزه و درمنه در حدود ۱۰ برابر و نسبت به کرت‌های با پوشش ترکیب گلسنگ-خزه در حدود پنج برابر افزایش پیدا خواهد کرد. کاهش معنی‌دار میزان نفوذ آب در خاک در اثر حضور پوسته‌های زیستی ($P < 0.05$)، باعث افزایش معنی‌دار ۳۰ تا ۴۰ درصد تولید رواناب نسبت به تیمار پوشیده از بوته و افزایش معنی‌دار هشت تا ۱۸ درصد نسبت به تیمار خاک لخت می‌شود ($P < 0.01$).

نتیجه‌گیری

پوسته‌های زیستی با کاهش هدررفت خاک و غلظت رسوبات، باعث تولید و انتقال رواناب سطحی باکیفیت به تالاب‌ها و در نتیجه، حفظ کارکرد اکولوژیک و سلامت بوم‌سازگان تالاب‌های منطقه می‌شود. نتایج این پژوهش، تاثیرگذاری مثبت پوسته‌های زیستی در عملکرد هیدرولوژیکی و اکولوژیکی عرصه‌های بیابانی شمال دشت گرگان و حفاظت تالاب‌های منطقه که در کنوانسیون رامسر ثبت شده‌اند را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: تالاب آبی گل، رواناب، شبیه‌ساز باران، فرسایش، نفوذ

مقدمه

مناطق محسوب می‌شود (Koutroulis et al., 2013) که باعث پراکندگی و یا عدم وجود پوشش گیاهی آوندی و چندساله در این مناطق شده است. اما سطح خاک به وسیله اجتماعی از انواع جانداران غیر آوندی مانند سیانوباکتری^۱، باکتری^۲، قارچ‌ها^۳، گلسنگ‌ها^۴ و خزه‌ها^۵ اشغال شده است که با هم به‌عنوان پوسته زیستی خاک^۶ شناخته می‌شوند (Cantón et al., 2014; Oliveira and Marciel-Silva, 2022).

پوسته‌های زیستی با ارائه خدمات اکولوژیکی مهم (Oliveira and Marciel-Silva, 2022)، تاثیر بر خصوصیات خاک (Barger et al., 2016) و جلوگیری از برخورد مستقیم قطرات باران با ذرات خاک مانع از جدا شدن و انتقال ذرات از بستر خود شده (Rodríguez-Caballero et al., 2013) و نقش مهمی در کنترل فرایند هیدرولوژیکی و حفاظت از خاک به‌ویژه در بوم‌سازگان‌های خشک و نیمه‌خشک ایفا می‌کنند (Cantón et al., 2001). به‌طور کلی، پوسته‌های زیستی با دو مکانیسم، کاهش فرسایش‌پذیری خاک و افزایش

بیش از ۳۵ درصد از خشکی‌های سطح زمین و ۷۵ درصد از وسعت ایران را بوم‌سازگان‌های خشک و نیمه‌خشک تشکیل می‌دهند (Gaur and Squires, 2018; Gholamhosseinian, 2019). در این بوم‌سازگان‌ها محدودیت‌هایی مانند عدم دسترسی به منابع کافی، مواد مغذی، کمبود آب دائمی، بیابان‌زایی و تخریب زمین وجود دارد. همچنین، فعالیت‌های انسانی و تغییرات اقلیمی چالش بزرگی برای ارائه خدمات قابل انتظار در این بوم‌سازگان‌ها به‌وجود آورده است (Daneshgar et al., 2021) که سبب حساسیت این مناطق نسبت به فرسایش خاک و از دست رفتن تنوع زیستی شده است.

یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب سرزمین‌ها فرسایش خاک محسوب شده، موجب نگرانی‌های محیط‌زیستی گسترده در سرتاسر جهان شده است (Luetzenburg et al., 2020). خصوصیات خاک، بارش کم و پراکنده، به همراه تبخیر و تعرق زیاد از ویژگی‌های شاخص این

⁴ Lichens

⁵ Moss

⁶ Biological soil crusts

¹ Cyanobacteria

² Bacteria

³ Fungi

شبییه‌ساز باران دریافتند که پوسته‌های توسعه‌یافته (غالب خزه) نسبت به پوسته‌های ابتدایی و توسعه نیافته (سیانوباکتری‌ها) عملکرد بهتر و قابل‌توجهی در ایجاد مقاومت خاک برابر فرسایش آبی داشته‌اند و افزایش تراکم پوشش خزه باعث کاهش غلظت رسوبات شده، به‌گونه‌ای که افزایش بیش از ۳۵ درصد پوشش خزه باعث کاهش لگاریتمی غلظت رسوبات شده است.

نتایج Yang et al., (2022) با استفاده از شبیه‌ساز باران در کرت‌های آزمایش $10 \times 2/1$ متری نشان داد که حجم رواناب و جرم رسوب با افزایش پوشش زیستی به ترتیب به‌صورت یک تابع لگاریتمی و یک تابع‌نمایی کاهش پیدا می‌کند. مطالعات Fick et al., (2020) نشان داده است، کاهش تراکم سطح پوسته‌های زیستی پس از چرای دام، باعث افزایش تولید رسوب می‌شود. در همین راستا، نتایج Afra (2020) و Zhang et al., (2020) بیانگر کاهش معنی‌دار غلظت رسوب، رسوب کل و همچنین، حجم رواناب در نقاط دارای پوسته زیستی نسبت به مناطق عاری از پوسته بوده است. اما در مقابل نتایج Chamizo et al. (2012) و Fischer et al. (2010) نشان می‌دهد پوسته‌های زیستی پس از جذب آب و تورم باعث مسدود شدن منافذ سطحی شده و در نتیجه، مانع از نفوذ آب و افزایش رواناب می‌شود. لازم به ذکر است، اثرات هیدرولوژیکی که در حضور پوسته‌های زیستی رخ می‌دهد به عوامل متعددی بستگی دارد. به‌عنوان مثال، تحقیقات Chamizo et al., (2012) رطوبت خاک، تحقیقات Guan and Liu (2021) و Ram and Aaron (2007)، انواع گونه‌های زیستی و مطالعات Wu et al., (2012) خصوصیات بارش را عامل تفاوت در رفتارهای هیدرولوژیکی معرفی کرده‌اند. بنابراین، در جهت دستیابی به اطلاعات مفید در رابطه با نقش پوسته‌های زیستی در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور باید آزمایش‌های بیشتر انجام شود.

گستره وسیعی از تپه‌ماهورهای پیرامون تالاب‌های آماگل، آلاگل و آجی‌گل در استان گلستان، با استقرار پوسته‌های زیستی همراه است که از معدود لایه‌های محافظتی از خاک در برابر فرسایش منطقه به‌شمار می‌رود. این تالاب‌ها در دوم تیرماه سال ۱۳۵۴ (23

پوشش سطح خاک باعث کاهش فرسایش خاک می‌شوند (Gao et al., 2020). همچنین، به‌دلیل اعمال اثر بیشتر پوشش گیاهی آوندی نسبت به پوسته‌های زیستی بر کنترل فرایندهای هیدرولوژیکی، به‌مقدار کافی به پوسته‌های زیستی در مدل‌های هیدرولوژیکی پرداخته نشده است (Gao et al., 2020). در این راستا، چالش‌های و مسایل موجود در کاوش و اندازه‌گیری فرایندهای هیدرولوژیکی در هنگام رخداد‌های بارندگی و لزوم تفکیک سهم عوامل موثر در این فرایندها، باعث شده تا استفاده از شبیه‌ساز باران^۱ به‌عنوان یک رویکرد سازگار با طبیعت، مقرون‌به‌صرفه، سریع و موثر برای به‌دست‌آوردن اطلاعات، با دقت قابل‌قبول محسوب شود (Sheikh and Najafinejad, 2013).

شبیه‌ساز باران، ابزاری است برای پژوهش، که برای اعمال بارش با ویژگی‌های بارندگی‌های طبیعی، طراحی شده است (Sheikh et al., 2017). رژیم‌های مختلف آب و هوایی، تنوع گونه‌های تشکیل‌دهنده پوسته‌های زیستی و مورفولوژی گستره وسیعی از انواع پوسته‌های زیستی با ترکیب گونه‌های مختلف را تشکیل داده که بر فرایندهای هیدرولوژیکی اثرگذار هستند (Jafarpoor et al., 2022a). نتایج Chamizo et al., (2016) که به همراه تنوع روش‌های آزمایشی باعث ارائه نتایج متمایز و در برخی موارد متضاد در رابطه با نقش پوسته‌های زیستی شده است.

به‌طور کلی، بیشتر پژوهشگران معتقدند که پوسته‌های زیستی نقش ویژه‌ای در کنترل فرایندهای هیدرولوژیکی به خصوص جلوگیری از فرسایش خاک را دارند (Yang et al., 2022؛ Gao et al., 2020؛ Belnap, 2006؛ Kakeh et al., 2010). با این حال، اطلاعاتی کاملی در مورد دخالت میکروارگانیسم‌ها در فرایندهای فرسایش خاک ارائه نشده است (Sadeghi et al., 2023b). در همین راستا، پژوهش Kakeh et al., (2020) نشان داده است که پوسته‌های زیستی به شدت در کنترل نفوذ، رواناب و حرکت آب و املاح نقش دارند. در پژوهشی Gao et al., (2020) توسعه پوسته زیستی بر میزان هدررفت خاک تحت تاثیر فرسایش آبی در منطقه فلات لس چین با استفاده از

¹ Rainfall simulator

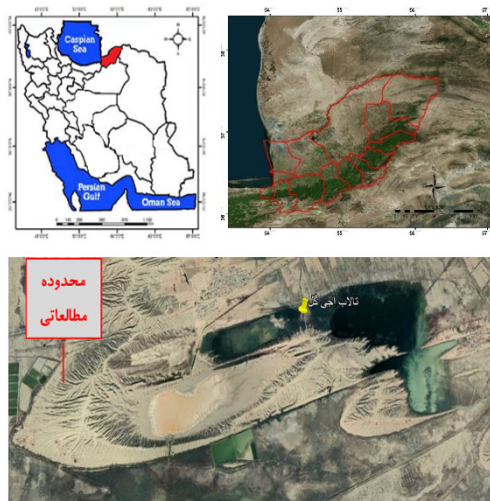
شدن پوسته‌های زیستی به‌عنوان لایه‌ای محافظ در برابر فرسایش باعث ظهور و گسترش لکه‌های متعدد خاک لخت با ابعاد گوناگون در بین این پوسته‌های شده است. لذا، در پژوهش حاضر با استفاده از سامانه شبیه‌ساز باران طراحی و توسعه یافته در گروه آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان^۲ (Sheikh and Najafinejad, 2013) برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی (بارش، رواناب و رسوب) و بررسی پیامدهای تخریب پوسته‌های زیستی در مناطق خشک استفاده شده است تا علاوه بر بررسی اهمیت و نقش پوسته‌های زیستی در کنترل فرایندهای هیدرولوژیکی، از اطلاعات موجود برای سیاست‌گذاری، برنامه‌ریزی و مدیریت پوسته‌های زیستی و فرایندهای هیدرولوژیکی منطقه و سایر مناطق مشابه در کشور استفاده شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: تالاب آجی‌گل استان گلستان در شمال دشت گرگان-آق‌قلا و حوزه استحفاظی شهرستان گنبدکاووس با وسعت ۳۲۰ هکتار، در حد فاصل طول جغرافیایی "۵۶° ۳۶' ۵۴" تا "۲۸° ۳۸' ۵۴" شرقی و عرض جغرافیایی "۱۹° ۲۳' ۳۷" تا "۲۳° ۲۴' ۳۷" شمالی قرار دارد (شکل ۱). منطقه پیرامون تالاب به صورت تپه‌ماهوری بوده و دارای شیب عمومی ملایم (Afra, 2020) و فاقد تغییرات شدید ارتفاعی است.

(June 1975) به‌عنوان چهل و نهمین تالاب‌های مهم بین‌المللی در کنوانسیون رامسر به ثبت رسیده‌اند. این تالاب‌ها از طیف وسیعی جانداران به‌ویژه پرندگان آسیب‌پذیر و در معرض خطر پشتیبانی می‌کند. این تالاب‌ها بوم‌سازگان شکننده‌ای داشته، بین سال‌های ۱۳۷۲ تا ۱۳۸۸ سابقه حضور در فهرست مونترول^۱ را داشته‌اند و بدان معنی است که در اثر سوء مدیریت در تخصیص آب یا حفاظت از محیط زیست و منابع طبیعی، در معرض نابودی و خشک شدن یا از دست دادن عملکردهای بوم‌شناختی خود قرار داشته‌اند (Rafei and Danehkar, 2021). اما طبق مشاهدات حال حاضر و گزارش (Rafei and Danehkar (2021) کاهش آگیری، استخراج آب و ورود حجم بالای رسوبات به این تالاب‌ها موجب کاهش سطح آب در این تالاب‌ها شده است.

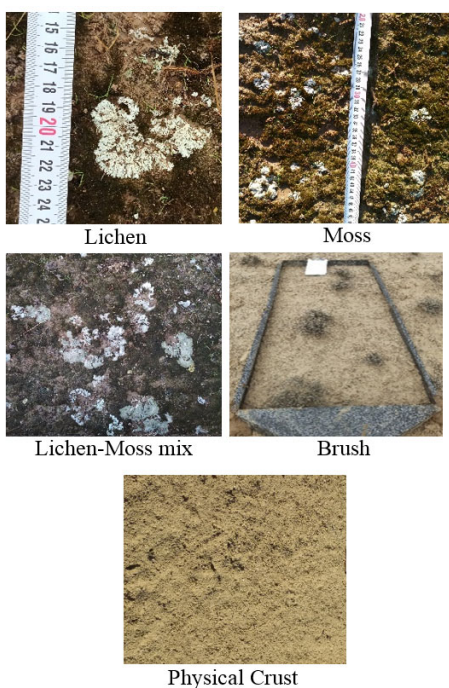
تپه‌ماهورهای مشرف به تالاب، به‌دلایلی همچون پراکندگی یا عدم وجود پوشش گیاهان آوندی چندساله، شرایط اقلیمی، خصوصیات خاک، تردد آزادانه و ایجاد تنش‌های فیزیکی به‌وسیله انسان و دام به‌شدت در معرض فرسایش روزافزون قرار گرفته‌اند. در نتیجه، سالانه حجم زیادی از رسوبات به‌دلیل فرسایش زیاد وارد بوم‌سازگان‌های آبی منطقه می‌شود (Afra, 2020). همچنین، عدم شناخت کافی از تاثیر، حساسیت، نقش، کارکرد اکولوژیکی و نادیده گرفته



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد پژوهش

Fig. 1. Location of the study area

پس از پیمایش میدانی و ارزیابی منطقه، تیمار مختلف جهت اجرای شبیه سازی باران و مقایسه اثر سناریوهای مختلف سطوح اراضی منطقه انتخاب شد. تیمارهای منتخب شامل پوسته زیستی با پوشش غالب گلاسنگ، پوسته زیستی با پوشش غالب خز، عرصه دارای پوشش گیاهان آوندی (درمنه)، عرصه فاقد پوشش و عرصه‌هایی پوشیده از ترکیب خز-گلاسنگ است (شکل ۳). پس از انتقال تجهیزات به محل استقرار کرت‌های منتخب، شبیه سازی فرایند بارش-رواناب اجرا شد.



شکل ۳- تصاویری از تیمارهای مطالعاتی در منطقه مورد مطالعه

Fig. 3. Some pictures of the study treatments across the study area

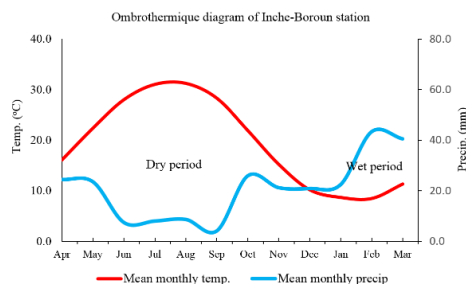
مشخصات دستگاه شبیه‌ساز باران: برای اجرا شبیه‌سازی فرایند بارش-رواناب-رسوب از دستگاه باران‌ساز تحت فشار، طراحی و توسعه داده شده به وسیله گروه آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، استفاده شده است (Sheikh and Najafinejad, 2013). این دستگاه امکان تعیین شدت و مدت دلخواه را با تنظیم ارتفاع پایه، تنظیم زاویه حرکت نازل‌ها و

پوشش منطقه: عرصه‌های وسیعی از منطقه فاقد هرگونه پوشش گیاهی چند ساله بوده، غالب پوشش گیاهی به صورت ضعیف، علفی و فصلی و در قسمت‌هایی پوشش گیاهی بوته‌ای و چند ساله از گونه‌های مختلف مانند خارشتر (*Alhagi camelorum*)، علف شور (*Salsola dendroides*)، جارو ترکمنی (*Limonium renifolius*)، درمنه (*Artemisia*) و غیره نیز یافت می‌شود. عرصه‌های وسیعی با استقرار پوسته‌های زیستی غالباً شامل انواع گلاسنگ، خز و ریزموجودات مانند باکتری‌ها و قارچ‌ها و سیانوباکتری‌ها همراه است. تردد آزادانه وسایل نقلیه، عدم وجود پوشش گیاهان آوندی، شرایط اقلیمی و چرای مفرط دام به پوشش سطح خاک آسیب رسانده و قسمت‌های وسیعی فاقد هرگونه پوشش ماکروسکوپی است. در نتیجه خاک را در معرض برخورد مستقیم قطرات باران قرار داده است.

اقلیم منطقه: باتوجه به آمار و اطلاعات روزانه دما و بارش ایستگاه همدیدی اینچه‌برون (فروردین سال ۱۳۸۹ تا اسفند ۱۴۰۰) متوسط سالانه بارندگی ۲۵۱ میلی‌متر و میانگین دما ۱۹/۴ درجه سانتی‌گراد محاسبه شده است. همچنین، در طبقه‌بندی دومارتن^۱ و با استفاده از رابطه (۱) (Alizadeh, 2008) این منطقه با ضریب خشکی ۸/۵، ناحیه خشک محسوب می‌شود.

$$I = \frac{P}{T+10} \quad (1)$$

در این رابطه، I ضریب خشکی دومارتن، T متوسط دمای سالانه ($^{\circ}\text{C}$) و P متوسط بارش سالیانه (mm) است. همچنین، طول دوره خشکی باتوجه به نمودار آمبروترمیک (شکل ۲) بیشتر از دوره مرطوب بوده و در نتیجه تأییدی بر طبقه‌بندی دومارتن و اقلیم خشک منطقه است.



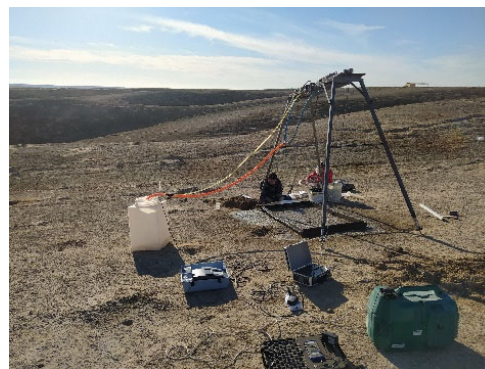
شکل ۲- نمودار آمبروترمیک ایستگاه همدیدی اینچه‌برون
Fig. 2. Ombrothermique diagram for the synoptic station of Inche-Boroun

¹ De Martonne

شبییه‌سازی شده با بارندگی طبیعی منطقه است. لذا، با استفاده از روش وزیری (Waziri, 1997) و داده‌های ایستگاه هواشناسی اینچ‌پرون شدت بارش با دوره بازگشت ۵۰ ساله محاسبه شد. این روش بر اساس سری روابط تبدیل متوسط بارندگی بیشینه روزانه (PDMAX) به بارش یک‌ساعته با دوره بازگشت ۱۰ ساله و تبدیل آن به بارش‌هایی با زمان تداوم و دوره بازگشت دلخواه ارائه شده است.

در این روش، ایران به شش محدوده مستقل تقسیم شده، برای هر محدوده روابط مخصوصی ارائه شده است. باتوجه به موقعیت مکانی منطقه مورد مطالعه از رابطه (۲) بارش یک ساعته با دور بازگشت ۱۰ ساله و از رابطه (۳) بارش با دور بازگشت ۵۰ سال و زمان تداوم نیم ساعته استفاده شد (جدول ۱). از آنجا که بیشینه شدت باران ۳۰ دقیقه‌ای بیشترین همبستگی را با میزان فرسایش دارد (Refahi, 2012)، شدت بارش با زمان تداوم نیم‌ساعت و دوره بازگشت ۵۰ سال برای منطقه محاسبه شده که ۸۲ میلی‌متر بر ساعت بوده است.

تعداد نوسان نازل‌ها با استفاده از برد الکترونیکی را برای کرتی به ابعاد دو در یک (دو متر مربع) ارائه می‌دهد. همچنین، سهولت اجرای شبیه‌سازی در عرصه و تلفات کم آب در زمان شبیه‌سازی از مزایای دستگاه مورد استفاده قلمداد می‌شود (شکل ۴).



شکل ۴- دستگاه شبیه‌ساز باران مورد استفاده در پژوهش

Fig. 4. The rainfall simulator used in the research

انتخاب شدت و مدت بارش: از ملزومات شبیه‌سازی بارش برای بررسی رفتارهای هیدرولوژیکی، تطابق بارش

جدول ۱- روابط مورد استفاده برای برآورد بارندگی با زمان تداوم و دوره بازگشت‌های مختلف براساس متوسط حداکثر بارندگی روزانه
Table 1. Relationships used to estimate rainfall with persistence time and different return periods based on average daily maximum rainfall

Equation	T (H)
$P(10Y, 1H) = (3.7348 - 0.7932 \text{ LN}(PDMAX)) PDMAX$	$PDMAX \leq 40$ (2)
$P(TR, T) = (0.2103 + 0.3487 \text{ LN}(TR - 0.3688))(-102.6 + 103.67^{(0.0024)}) P(10Y, 1H)$	$0.1 \leq T \leq 2$ (3)

در هنگام شبیه‌سازی با جمع‌آوری رواناب به‌وسیله استوانه مدرج^۱ از خروجی کیفی شکل کرت‌های آزمایشی، حجم رواناب اندازه‌گیری شد (شکل ۵). همچنین، در فواصل زمانی پنج دقیقه‌ای از آغاز فرایند شبیه‌سازی برای برآورد غلظت و جرم رسوب، نمونه‌ای در حدود ۵۰۰ میلی‌لیتر جمع‌آوری و به آزمایشگاه آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انتقال داده شد.

در جدول ۱، T مدت بارش (ساعت)، $PDMAX$ متوسط بیشینه بارندگی روزانه در دوره آماری و $P(Y10, 1H)$ بارش یک ساعته با دوره بازگشت ۱۰ سال است.

اجرای فرایند شبیه‌سازی بارش: پس استقرار دستگاه شبیه‌ساز باران در محل مد نظر (کرت‌های منتخب)، شبیه‌سازی به مدت ۳۰ دقیقه با شدت ۸۲ میلی‌متر بر ساعت اجرا شد. لازم به ذکر است، به‌طور میانگین رطوبت وزنی خاک در منطقه مورد مطالعه در روز انجام شبیه‌سازی‌ها در حدود پنج درصد و فاقد اختلاف معنی‌داری در بین تیمارهای مختلف بود.

¹ Graduated cylinder

اندازه‌گیری عمق نفوذ: برای اندازه‌گیری عمق جبهه رطوبتی و نفوذ آب به درون خاک، پس از اتمام هر شبیه‌سازی در عرض قسمت‌های ابتدایی، میانی و انتهایی هر کرت پروفیل خاک (نیم‌رخ) حفر شد (شکل ۶).



شکل ۶- اندازه‌گیری عمق جبهه رطوبتی
Fig. 6. The moisture front depth measurement

تیمارهای مطالعاتی، تعداد تکرارها، تعداد نمونه‌برداری و مشخصات شبیه‌سازی بارش انجام شده در این پژوهش، به شرح جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- خلاصه مشخصات فرایند شبیه‌سازی و نمونه‌برداری (تعداد تیمار و تکرار نمونه‌ها)

Table 2. Summary of the specifications of the simulation and sampling process (number of treatments and repetition of samples)

Treatment no.	Treatments	Number of simulations	Simulation procedure
1	Biocrust with dominant cover of Lichen	3	Simulation duration: 30 minutes
2	Biocrust with dominnat cover Moss	3	Design rainfall with 30 minutes duration and 50 years return period:41 mm
3	Bareland with no cover	3	Runoff sampling: every 5 minutes from onset of simulation
4	Land covered with vascular plants	3	Maximum number of sampling per simulation: 6 samples
5	Biocrust with mixture of Lichen and Moss	2	
Totla number of simulations: 14		Totla number of runoff samples: 84	

تشابه از نظر شیب غالب، رطوبت پیشین خاک، تراکم و سایر ویژگی‌های اثرگذار بر رفتار هیدرولوژیک باشد.



شکل ۵- نمونه‌برداری و جمع‌آوری رواناب توسط استوانه مدرج
Fig. 5. Runoff sampling and collection using a graduated cylinder

ضمناً، برای بررسی اثر نوع پوشش سطح خاک روی سرعت تشکیل رواناب لحظه شروع رواناب پس از آغاز شبیه‌سازی و توقف رواناب پس از اتمام بارش نیز یادداشت شد. همچنین، در راستای برآورد جرم و غلظت رسوب، پس از اندازه‌گیری حجم هر نمونه با استفاده از کاغذ صافی واتمن (Casermeiro et al., 2004) رسوب از رواناب جدا می‌شود و سپس، رسوب را در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت در آون قرار داده تا وزن خشک رسوبات مشخص شود (Seeger, 2007).

در جدول ۳، مشخصات کرت‌های آزمایشی ارائه شده است. تلاش شده تا نقاط انتخابی دارای بیشترین

جدول ۳- مشخصات کرت‌های آزمایشی

Table 3. Characteristics of plots treatments

Plot number	Cover type	Slope (Percent)	Plot aspect	Vegetation cover (Percent)
1	Lichen	16	South	45
2	Lichen	14	South	37
3	Lichen	16	Northeast	75
4	Moss	23	North	85
5	Moss	24	North	65
6	Moss	20	North	75
7	Brush	20	South	33
8	Brush	21	South	27
9	Brush	21	South	18
10	Bareland	20	South	2
11	Bareland	20	Northeast	2
12	Bareland	20	Northeast	3
13	Moss mix-Lichen	16	North	70
14	Moss mix-Lichen	17	Northeast	60

در مقابل پوشش متراکم پوسته‌های زیستی، انبساط پوسته‌ها به همراه اثر آبرگریزی سطحی باعث کاهش نفوذ آب در مدت زمان شبیه‌سازی شده، در نتیجه مقدار رواناب تولید شده بیشتر است.

همچنین، در آزمون ANOVA تفاوت معنی‌داری بین رواناب تولید شده در تیمارهای مختلف را نشان می‌دهد ($P < 0.01$) و در مقایسه دو به دو با استفاده از آزمون Tukey (شکل ۸) تفاوت معنی‌دار بین تمامی کرت‌هایی با پوشش غالب پوسته‌های زیستی و پوشش بوته‌ای مشاهده شده است ($P < 0.05$). نتایج این پژوهش بر خلاف مطالعات (Yang et al., 2022) و (Afra (2020) و هم راستا با مطالعات (Chamizo et al., 2012) بوده است.

به‌طور کلی، رواناب تابعی از تعامل ویژگی‌های بارش، پوشش سطح خاک و خصوصیات خاک است. بنابراین، پوسته‌های زیستی با تاثیرپذیری از شرایط محیطی مانند بارش، رطوبت خاک و همچنین، تاثیرگذاری بر خصوصیات خاک و ایجاد پوشش سطحی نقش مهمی در کنترل رواناب ایفا می‌کنند.

تجزیه و تحلیل آماری: علاوه بر مشاهدات میدانی، برای تجزیه و تحلیل داده‌های گردآوری شده حاصل شبیه‌سازی، از محیط نرم‌افزارهای R و Excel استفاده شد. بدین منظور، از آزمون آماری تحلیل واریانس^۱ و آزمون Tukey استفاده شد.

نتایج و بحث

رواناب حاصل از شبیه‌سازی بارش: نتایج مرتبط با رواناب هر دور شبیه‌سازی باران در جدول ۴، ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به‌طور میانگین افزایش حجم رواناب در تیمارهای با پوشش زیستی نسبت به سایر تیمارها قابل ملاحظه است (شکل ۷). به‌ترتیب تیمار ترکیب گلسنگ-خزه با ۴۱ درصد، خزه ۳۹ درصد، گلسنگ ۳۴ درصد و خاک لخت ۲۸ درصد بیشتر از کرت‌های دارای پوشش بوته‌ای رواناب تولید کرده‌اند، که با توجه به مشاهدات میدانی ساختمان خاک متخلخل‌تر نسبت به سایر نقاط، به همراه به دام افتادن آب در پشت بوته‌ها و چاله‌ها از عمده دلایل بیشتر بودن نفوذ آب و کاهش میزان رواناب تولید شده در درمنه‌زارها است.

¹ Analysis of Variance (ANOVA)

سطح زمین و روش‌های آزمایشی، باعث ایجاد تفاوت در نتایج مطالعات مختلف شده است.

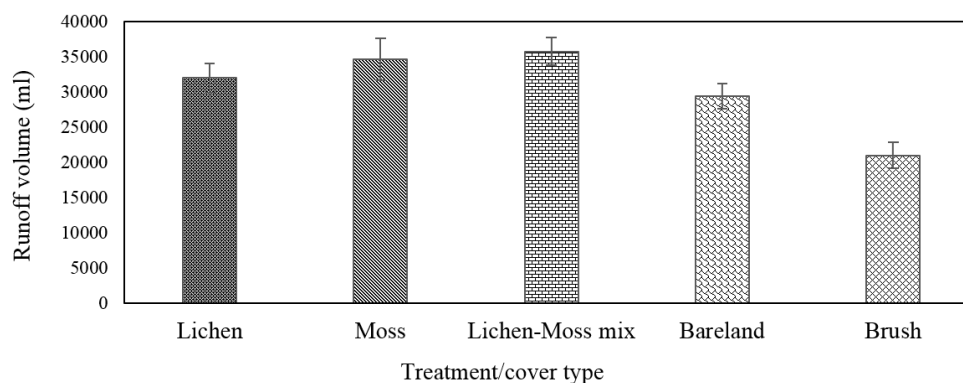
لذا، شرایط محیطی و نوع پوشش و پوسته زیستی یک عامل کلیدی در کنترل رواناب محسوب می‌شود (Guan and Liu, 2021; Sadeghi et al., 2023a). بنابراین، شرایط مختلف انجام آزمایشات، نوع پوشش

جدول ۴- نتایج مرتبط با رواناب حاصل از شبیه‌سازی بارش

Table 4. Results related to runoff from rain simulation

Plot number	Cover type	Runoff initiation time (min)	Runoff end time (min)	Runoff volume (ml)	Runoff coefficient (Percent)
1	Lichen	2.25	32.63	30811	38.51
2	Lichen	2.33	32.17	34848	43.65
3	Lichen	3	32	30185	37.73
4	Moss	3.33	31.5	33890	42.36
5	Moss	1.75	32.1	38605	48.26
6	Moss	2.5	31.5	31376	39.22
7	Bareland	4.17	30.67	28530	35.66
8	Bareland	4.33	31	27810	34.76
9	Bareland	2.27	30.83	31797	39.75
10	Brush	3.93	31	22421	28.03
11	Brush	4.33	30.58	22130	27.66
12	Brush	3.68	30.67	18391	22.99
13	Moss mix-Lichen	3.17	30.98	33757	42.20
14	Moss mix-Lichen	3.72	31.78	37647	47.06

Cumulative runoff volume from 2 m² plots

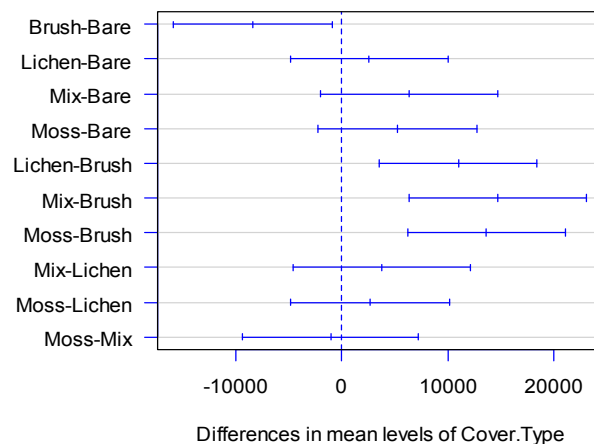


شکل ۷- میانگین حجم تجمعی رواناب در تیمارهای مختلف

Fig. 7. The mean value of cumulative runoff volume for different treatments

از خط صفر (خط عمودی نقطه چین) فاصله داشته باشد و به‌وسیله این خط قطع نشود، اختلاف معنی‌دار است.

نمودار ارائه شده از آزمون Tukey، میانگین اختلاف بین تیمارها به همراه فاصله اطمینان (در سطح ۹۵ درصد) را نشان می‌دهد. در صورتی که دامنه اطمینان



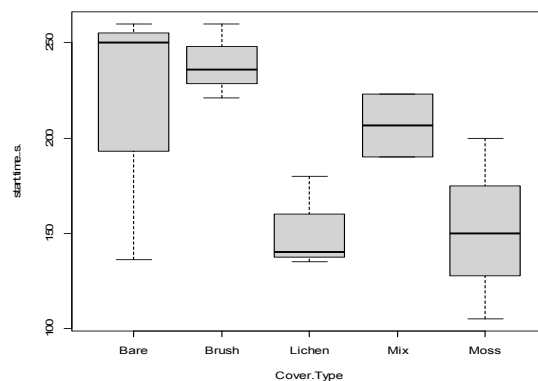
شکل ۸- نتایج آزمون Tukey برای بررسی معنی‌داری اختلاف حجم رواناب بین تیمارها

Fig. 8. The results of Tukey test for analysis of significance level of variation at runoff volume for different treatments

پوشش سطح خاک، ساختمان خاک متفاوت، تراکم پوشش سطح خاک، نوع پوشش، جذب آب به‌وسیله پوسته‌های زیستی و در نتیجه تورم پوسته‌ها به همراه آبریزی سطح پوسته‌های زیستی از جمله عواملی هستند که باعث شده تا به‌طور میانگین پوسته‌های زیستی زمان کمتری را برای تشکیل رواناب نیاز داشته باشند (شکل ۹). در صورتی نفوذ بیشتر آب به درون خاک به‌دلایل مختلف، باعث افزایش زمان مورد نیاز برای تشکیل رواناب در کرت‌های فاقد پوشش و به خصوص در با پوشش بوته‌ای شده است.

همچنین، با بررسی روند تغییرات دبی در مدت زمان شبیه‌سازی میزان دبی در کرت‌هایی با پوشش بوته‌ای از یک لیتر بر دقیقه فراتر نرفته است. این کاهش رواناب می‌تواند ناشی از ساختمان خاک متخلخل‌تر، اثر تاج پوشش و به‌دام افتادن آب در پشت بوته‌ها و داخل چاله‌ها باشد که فرصت را برای نفوذ فراهم می‌آورد. اما در کرت‌های پوشیده از پوسته‌های زیستی، از اواسط شبیه‌سازی (دقیقه ۱۵ تا ۲۰)، دبی خروجی تقریباً به اوج رسیده و در حدود ۱/۵ لیتر بر دقیقه با تغییرات اندکی ثابت می‌شود.

اثر پوشش بر زمان آغاز و توقف رواناب: تراکم



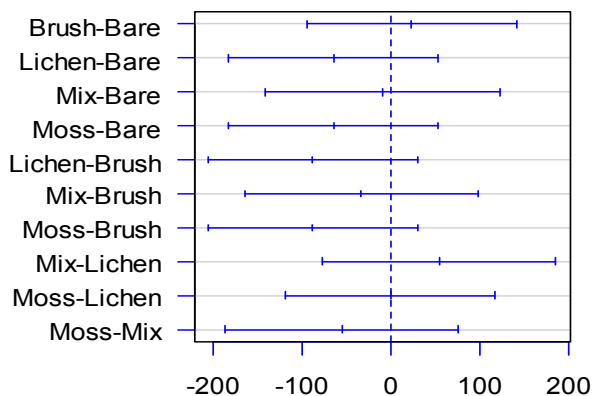
شکل ۹- زمان آغاز رواناب (ثانیه) از شروع شبیه‌سازی در تیمارهای مختلف

Fig. 9. The runoff initiation time (per seconds) from the onset of simulation at different treatments

و غیره بر زمان شروع رواناب تاثیرگذار هستند. همچنین، لازم به‌ذکر است که معنی‌داری اختلاف‌ها در آزمون‌های آماری بستگی زیادی به تعداد نمونه دارد. به دلیل محدودیت‌های موجود تعداد داده (کرت‌ها) در این

اما بر طبق نتایج آزمون‌های آماری ANOVA و Tukey (شکل ۱۰) اختلاف معنی‌داری بین زمان شروع رواناب در پوشش‌های مختلف مشاهده نشد و باید در نظر داشت عوامل دیگر مانند تراکم پوشش، بافت خاک

پژوهش نسبتاً کم بوده، موجب شده تا برخی از اختلافات معنی‌دار نشود. اما مشاهدات به خوبی نشان می‌دهد، تشکیل رواناب در پوسته‌های زیستی سریع‌تر آغاز می‌شود.



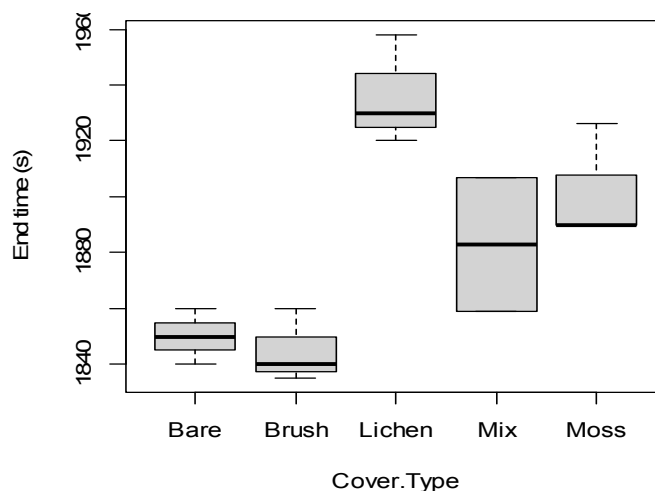
Differences in mean levels of Cover.Type

شکل ۱۰- نتایج آزمون Tukey برای بررسی معنی‌داری اختلاف زمان آغاز رواناب بین تیمارها

Fig. 10. The results of Tukey test for analysis of significance level of variation at runoff initiation times for different treatments

بارش در تیمار پوشیده از پوسته‌های زیستی نیاز هستند.

نتایج نشان می‌دهد، به‌طور میانگین (شکل ۱۱) زمان بیشتری برای توقف رواناب بعد از اتمام شبیه‌سازی

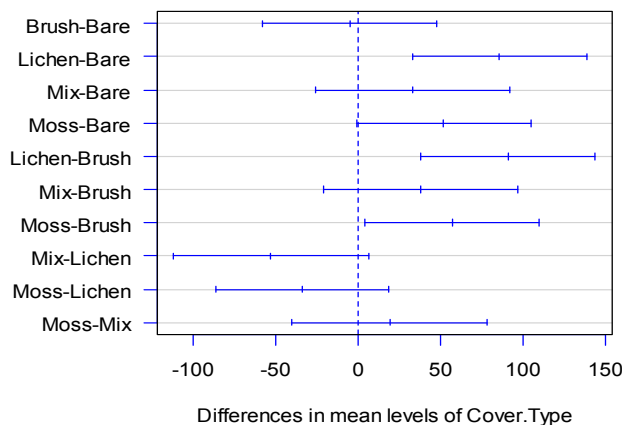


شکل ۱۱- زمان توقف رواناب در تیمارهای مختلف

Fig. 11. The runoff end time for different treatments

توقف رواناب در پوشش‌های مختلف را نشان می‌دهند. این اختلاف بین کرت‌های پوشیده از خزه و گل‌سنگ با کرت‌های پوشش از درمنه و کرت‌های عاری از پوشش (خاک لخت) مشاهده می‌شود

بر طبق نتایج، آزمون‌های آماری ANOVA در سطح اطمینان ۹۹ درصد و Tukey در سطح اطمینان ۹۵ درصد (شکل ۱۲) اختلاف معنی‌داری بین زمان



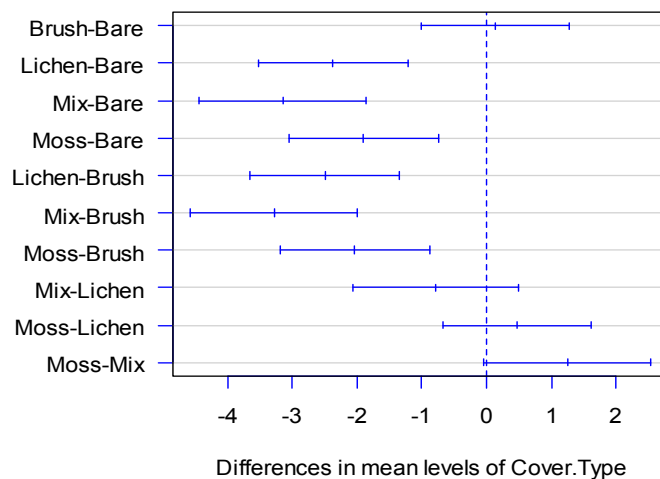
شکل ۱۲- نتایج آزمون Tukey برای بررسی معنی‌داری اختلاف زمان توقف رواناب بین تیمارها

Fig. 12. The results of Tukey test for analysis of significance level of variation at runoff end times for different treatments

پوسته‌های زیستی، آبیگریزی سطح پوسته‌ها، تراکم و پوشش سطح خاک باعث کاهش میزان نفوذ آب در کرت‌های پوشیده از پوسته زیستی شده و در مقابل عواملی مانند ساختمان خاک، میکروتوپوگرافی سطح زمین و در نتیجه به دام افتادن آب در چاله‌ها و پشت بوته‌ها باعث افزایش میزان نفوذ آب به درون خاک و کاهش حجم رواناب تشکیل شده در کرت‌های با پوشش بوته شده است. نتایج پژوهش حاضر، هم‌راستا با مطالعات Zhao and Xu (2013) در مناطق نیمه‌خشک، نشان می‌دهد که نفوذ آب در خاک با توسعه پوسته‌های زیستی با کاهش روبه‌رو شده است، اما نتایج شبیه‌سازی بارش به‌وسیله Belnap et al., (2013) در مناطق نیمه‌خشک نشان می‌دهد، نفوذ آب در خاک با توسعه پوسته‌های زیستی افزایش پیدا می‌کند.

پوسته‌های زیستی در مناطق، شرایط و فصول مختلف آزمایشی رفتار هیدرولوژیکی متفاوتی نشان می‌دهند (Belnap, 2006)، به‌عنوان مثال نتایج پژوهش Jafarpour et al., (2022a) برخلاف نتایج این پژوهش نشان داده است، سیانوباکتری‌ها با ترشح آگروپلی ساکاریدها نه تنها تولید رواناب را به تعویق انداخته‌اند، بلکه به‌طور موثری اجزای رواناب را مهار می‌کنند.

عمق جبهه نفوذ رطوبت: نتایج آزمون ANOVA تفاوت معنی‌داری را برای متوسط عمق جبهه نفوذ رطوبت بین تیمارها را نشان می‌دهد ($P < 0.01$). همچنین، مقایسه دو به دو با کمک آزمون Tukey نشان می‌دهد (شکل ۱۳) عمق خیس شده خاک در تیمارهای فاقد پوشش و دارای پوشش بوته‌ای بیشتر از پوسته‌های زیستی بوده است ($P < 0.05$)، به عبارت دیگر، مسدود شدن منافذ بر اثر تورم پس از جذب آب توسط



شکل ۱۳- نمودار Tukey برای بررسی معنی‌داری اختلاف نفوذ و جبهه رطوبتی پس از شبیه‌سازی بین تیمارها

Fig. 13. The results of Tukey test for analysis of significance level at soil moisture front depth for different treatments

جانوران (حفر زمین) غیر قابل انکار بوده، و از این‌رو میزان تولید رسوب در برخی از تکرارهای هر تیمار دارای تفاوت هستند. بنابراین، میزان جرم رسوب به تنهایی معیار مناسبی برای بررسی فرایند فرسایش و رسوب نیست. به همین دلیل، تغییرات رسوب نسبت به حجم رواناب (غلظت رسوب) در مدت شبیه‌سازی در فواصل زمانی نمونه‌برداری نیز مورد بررسی قرار گرفته است. به‌طور میانگین پوشش زیستی و گیاهی باعث کاهش جرم رسوب شده است (شکل ۱۴).

تولید رسوب: جرم رسوب بر حسب گرم در طول بازه زمانی شبیه‌سازی از زمان شروع تا زمان توقف رواناب به صورت تجمعی برای تیمارهای مختلف برآورد شده و در جدول ۵ ارائه شده است. از جمله ویژگی‌های پژوهش‌هایی که در عرصه طبیعی انجام می‌شوند، عدم توانایی کنترل تمامی شرایط محیطی و وجود تفاوت‌های اندک شرایط و متغیرهایی هستند که مقدار آن‌ها برای تیمارهای مختلف ثابت فرض می‌شود. اثر برخی از عوامل غیر قابل کنترل مانند وجود بقایای گیاهی، میکروتوپوگرافی سطح زمین و فعالیت‌های

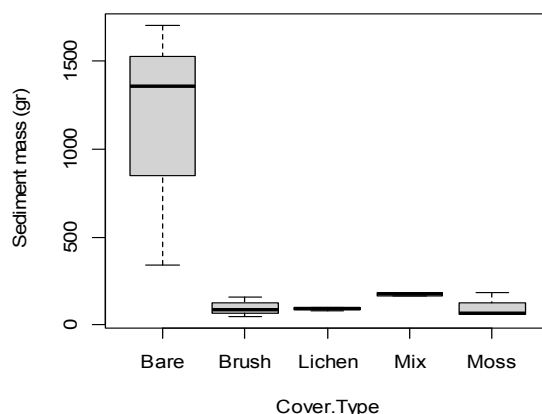
جدول ۵- نتایج اندازه‌گیری رسوب حاصل از شبیه‌سازی بارش

Table 5. Results of Rainfall measurement results from rainfall simulation

Plot number	Cover type	Total sediment load (gr)	Plot number	Cover type	Total sediment load (gr)
1	Lichen	99	8	Brush	158
2	Lichen	95	9	Brush	89
3	Lichen	79	10	Bareland	1700
4	Moss	61	11	Bareland	1355
5	Moss	186	12	Bareland	343
6	Moss	64	13	Moss mix-Lichen	163
7	Brush	51	14	Moss mix-Lichen	188

برابر و نسبت به کرت‌های با پوشش ترکیب گل‌سنگ-خزه در حدود پنج برابر افزایش پیدا خواهد کرد ($P < 0.05$).

با توجه به نتایج و در صورت تخریب پوشش‌های موجود و تشکیل مناطق فاقد پوشش، جرم رسوبات نسبت به تیمارهای گل‌سنگ، خزه و درمنه در حدود ۱۰

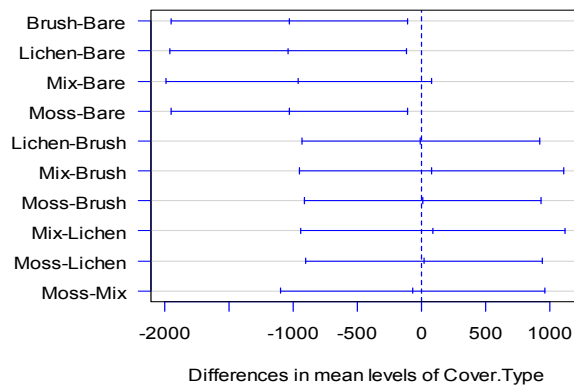


شکل ۱۴- تغییرات جرم رسوب در تیمارهای مختلف

Fig. 14. Sediment mass changes in different treatments

بین مناطق فاقد پوشش با تیمارهای دارای پوسته زیستی را نشان می‌دهد.

نتایج به‌دست آمده از آزمون ANOVA و Tukey (شکل ۱۵) تفاوت معنی‌داری با سطح اعتماد ۹۵ درصد



شکل ۱۵- نمودار Tukey برای بررسی معنی‌داری اختلاف جرم رسوب پس از شبیه‌سازی بین تیمارها
 Fig. 15. Tukey diagram to check the significance of sediment mass difference after simulation between treatments

این تالاب و تالاب‌های مشابه در منطقه همچون آماگل و آلاگل را تهدید می‌کند.

نتایج پژوهش حاکی از آن است که پوسته‌های زیستی با جذب آب، متورم شده و با مسدود کردن منافذ و همچنین آبریزی سطح پوسته‌ها باعث کاهش نفوذ آب به درون خاک می‌شود و در نهایت، سبب افزایش تولید میزان رواناب می‌شود. همچنین، پوسته‌های زیستی با پوشش سطح خاک، جلوگیری از برخورد مستقیم و جذب انرژی قطرات باران باعث کاهش شدید رسوب می‌شود. بنابراین، با کاهش غلظت رسوبات، رواناب تولید شده دارای کیفیت آب مناسب بوده که سلامت اکولوژیک تالاب را حفظ می‌کند. در صورت تخریب پوسته‌های زیستی، لکه‌های عاری از پوشش به وجود آمده، باعث افزایش فرسایش خاک و تولید رسوب شده و با گذشت زمان آبکندهایی در سطح منطقه ایجاد می‌شود.

فعالیت‌های انسانی و پدیده‌های طبیعی مانند خشکسالی و تغییرات اقلیمی در سال‌های گذشته موجب شده تا با کاهش پوشش گیاهی در منطقه، پوسته‌های زیستی به دلیل توانایی استقرار و بقا در شرایط محیطی دشوار به‌عنوان آخرین و موثرترین لایه حفاظتی طبیعی از خاک منطقه و کارکرد اکولوژیک تالاب آجی‌گل شناخته شوند. همچنین، لازم است به منظور حفظ و ایجاد شرایط تکثیر برای پوسته‌های زیستی اقداماتی از جمله آموزش عمومی به‌خصوص برای دامداران و مردمان بومی صورت گیرد.

در این راستا، آثار گسترده تردد آزادانه وسایل نقلیه همچون تراکتور، موتورسیکلت و خودروهای شخصی و

نتایج این پژوهش که هم‌راستا با پژوهش‌های Fick Gao et al., Chamizo et al., (2016) et al., (2020) (2020)، (2020) بوده و نشان می‌دهد که پوسته‌های زیستی با ایجاد پوشش سطحی و جلوگیری از برخورد مستقیم قطرات باران با سطح خاک، کاهش سرعت حرکت رواناب و افزایش پایداری خاکدانه‌های خاک به‌صورت معنی‌دار مانع از هدررفت خاک و انتقال ذرات از سطح خاک می‌شوند.

بنابراین، مطابق نتایج این پژوهش، می‌توان اظهار نمود که هنگام رویدادهای بارندگی حضور پوسته‌های زیستی در سطح منطقه می‌تواند باعث انتقال آب با کیفیت مناسب، و حفظ سلامت و کارکرد اکولوژیکی تالاب آجی‌گل شود و از ورود رسوبات، بالا آمدن بستر، کاهش عمق آب تالاب و افزایش سطح تبخیر جلوگیری کنند.

نتیجه‌گیری

تالاب آجی‌گل توسط تپه‌ماهورهایی مستعد به فرسایش احاطه شده است. پوسته‌های زیستی به‌طور گسترده بر روی این تپه‌های استقرار پیدا کرده‌اند و نقش لایه حفاظتی در برابر عوامل فرسایشی را ایفا می‌نمایند. بنابراین، در پژوهش حاضر با استفاده از سامانه شبیه‌ساز باران به بررسی اثر پوسته‌های زیستی بر مولفه‌های هیدرولوژیکی و تولید رسوب مناطق خشک پرداخته شد. تخریب این پوسته باعث ایجاد اختلال در فرایندهای هیدرولوژیکی و افزایش انتقال رسوب به داخل تالاب‌های مجاور شده و سلامت و بقای

پژوهش حاضر با حمایت مادی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان در قالب پایان نامه کارشناسی ارشد انجام شده است که بدین وسیله مراتب سپاسگزاری اعلام می‌شود.

تعارض منافع

تمامی نویسندگان این مقاله تایید می‌نمایند که تضاد منافعی وجود ندارد.

چرای سنگین دام در منطقه قابل مشاهده است که باعث تخریب پوسته‌های زیستی شده اند (Pouri et al., 2021). لذا، پیشنهاد می‌شود ضمن بررسی راهکارهای کاهش این اقدامات تخریبی، نسبت به بررسی اثر تردد و عبور وسایل نقلیه در مناطق پوشیده از پوسته زیستی بر عملکرد هیدرولوژیکی آن‌ها مورد پژوهش قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

منابع مورد استفاده

- Afra, T. 2020. Evaluation of biological crust effects on soil erodibility using rain simulator, case study: hillslopes Aji-Gol, Golestan Province. MSc Thesis, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran (in Persian).
- Alizadeh, A. 2008. Principles of applied hydrology. Imam Reza Publications. 301 pages (in Persian).
- Barger, N.N., Weber, B., Garcia-Pichel, F., Zaady, E., Belnap, J. 2016. Patterns and controls on nitrogen cycling of biological soil crusts. Springer, Cham. 257-285.
- Belnap, J. 2006. The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles. *Hydrol. Process.* 20, 159-3178.
- Belnap, J., Wilcox, B.P., Van Scoyoc, M.W., Phillips, S.L. 2013. Successional stage of biological soil crusts: an accurate indicator of ecohydrological condition. *Ecohydrol.* 6, 474-482.
- Cantón, Y., Domingo, F., Solé-Benet, A., Puigdefàbregas, J. 2001. Hydrological and erosion response of a badlands system in semiarid SE Spain. *J. Hydrol.* 252, 65-84.
- Cantón, Y., Román, J.R., Chamizo, S., Rodríguez-Caballero, E., Moro, M.J. 2014. Dynamics of organic carbon losses by water erosion after biocrust removal. *J. Hydrol. Hydromech.* 62, 258-268.
- Casermiro, M.A., Molina, J.A., De la Cruz Caravaca, M.T., Costa, J.H., Massanet, M.H., Moreno, P.S. 2004. Influence of scrubs on runoff and sediment loss in soils of Mediterranean climate. *Catena.* 57, 91-107.
- Chamizo, S., Belnap, J., Eldridge, D. J., Cantón, Y., Malam Issa, O. 2016. The role of biocrusts in arid land hydrology. *Biological soil crusts: an organizing principle in drylands.* In: Weber, B., Budel, B., Belnap, J. (Eds.), *Ecological Studies.* USGS, 321-346.
- Chamizo, S., Cantón, Y., Lázaro, R., Solé-Benet, A., Domingo, F. 2012. Crust composition and disturbance drive infiltration through biological soil crusts in semiarid ecosystems. *Ecosyst.* 15, 148-161.
- Daneshgar, H., Bagheri, M., Mardani Najafabadi, M., Alijani, F., Yavari, G. 2021. Effects of climate change on hydrological and economic conditions of Bushkan plain farmers. *J. Agri. Econom. Res.* 13, 259-280 (in Persian).
- Fick, S.E., Belnap, J., Duniway, M.C. 2020. Grazing-induced changes to biological soil crust cover mediate hillslope erosion in long-term enclosure experiment. *Rangel. Ecol. Manage.* 73, 61-72.
- Fischer, T., Veste, M., Wiehe, W., Lange, P. 2010. Water repellency and pore clogging at early successional stages of microbiotic crusts on inland dunes, Brandenburg, NE Germany. *Catena.* 80, 47-52.
- Gao, L., Bowker, M.A., Sun, H., Zhao, J., Zhao, Y. 2020. Linkages between biocrust development and water erosion and implications for erosion model implementation. *Geoderma* 357, 113973.
- Gaur, M.K., Squires, V.R. 2018. *Climate variability impacts on land use and livelihoods in drylands.* New York, NY, USA, Springer International Publishing.
- Gholamhosseinian, A. 2019. Micromorphology, pedogenesis and dust capture of bio-crust in alluvial and Aeolian surface. MSc Thesis, Ferdowsy University of Mashhad (in Persian).
- Guan, H., Liu, X. 2021. Biocrust effects on soil infiltrability in the Mu Us Desert: Soil hydraulic properties analysis and modeling. *J. Hydrol. Hydromech.* 69, 378-386.
- Jafarpoor, A., Sadeghi, S.H., Darki, B.Z., Homae, M. 2022a. Changes in morphologic, hydraulic, and hydrodynamic properties of rill erosion due to surface inoculation of endemic soil cyanobacteria. *Catena.* 208, 105782.
- Jafarpoor, A., Sadeghi, S.H., Darki, B.Z., Homae, M. 2022b. Changes in hydrologic components from a mid-sized plots induced by rill erosion due to cyanobacterization. *Intl. Soil Water Cons. Res.* 10, 143-148.

- Kakeh, J., Gorji, M., Mohammadi, M.H., Asadi, H., Khormali, F., Sohrabi, M., Cerdà, A. 2020. Biological soil crusts determine soil properties and salt dynamics under arid climatic condition in Qara Qir, Iran. *Sci. Total Environ.* 732, 139168.
- Koutroulis, A.G., Tsanis, I.K., Daliakopoulos, I.N., Jacob, D. 2013. Impact of climate change on water resources status: a case study for Crete Island, Greece. *J. Hydrol.* 479, 146-158.
- Luetzenburg, G., Bittner, M.J., Calsamiglia, A., Renschler, C.S., Estrany, J., Poepl, R. 2020. Climate and land use change effects on soil erosion in two small agricultural catchment systems Fugnitz–Austria, Can Revull–Spain. *Sci. Total Environ.* 704, 135389.
- Oliveira, M.F., Maciel-Silva, A.S. 2022. Biological soil crusts and how they might colonize other worlds: insights from these Brazilian ecosystem engineers. *J. Exp. Bot.* 73, 4362-4379.
- Pouri, H., Sheikh, V., Yeganeh, H. 2021. Effect of water tankers traffic on soil hydraulic properties in winter rangelands of Aq Qala Plain. *J. Rangel.* 15(3), 504-521.
- Rafei, A., Danehkar, A. 2021. An analysis of montreux list wetlands. *Zist Sepehr* 26-36 (in Persian).
- Ram, A., Aaron, Y. 2007. Negative and positive effects of topsoil biological crusts on water availability along a rainfall gradient in a sandy arid area. *Catena.* 70, 437-442.
- Refahi, H. 2012. Wind erosion and its control. Tehran University Publications (in Persian).
- Reynolds, W.D., Elrick, D.E. 1991. Determination of hydraulic conductivity using a tension infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, 633-639.
- Rodriguez-Caballero, E., Cantón, Y., Chamizo, S., Lázaro, R., Escudero, A. 2013. Soil loss and runoff in semiarid ecosystems: a complex interaction between biological soil crusts, micro-topography, and hydrological drivers. *Ecosyst.* 16, 529-546.
- Sadeghi, S.H., Heydari, M.A., Jafarpoor, A. 2023 A. Inhibitability of soil loss and sediment concentration during consecutive rainfalls from experimental plots treated by endemic microorganisms. *Intl. J. Sed. Res.* 38, 446-454.
- Sadeghi, S.H., Jafarpoor, A., Homaei, M., Darki, B.Z. 2023 B. Changeability of rill erosion properties due to microorganism inoculation. *Catena.* 223, 106956.
- Seeger, M. 2007. Uncertainty of factors determining runoff and erosion processes as quantified by rainfall simulations. *Catena.* 71, 56-67.
- Sheikh, V.B., Shalamzari, M.J., Farajollahi, A. 2017. Sediment-bound soil nutrient loss under simulated rainfall. *J. Fac. For. Istanbul Uni.* 67, 37-48.
- Sheikh, V.B., Najafinejad, A. 2013. Design and construction of a portable rainfall simulator. Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, Research report. 61 pages (in Persian).
- Waziri, F. 1997. Analysis and analysis of volleys in different parts of Iran. Academic Jihad of Khajeh Nasir al-Din Toosi University, Design and Research Unit, 37 pages (in Persian).
- Wu, Y., Hasi, E., Wu, X. 2012. Characteristics of surface runoff in a sandy area in southern Mu Us sandy land. *Chin. Sci. Bull.* 57, 270-275.
- Yang, K., Zhao, Y., Gao, L., Sun, H., Gu, K. 2022. Nonlinear response of hydrodynamic and soil erosive behaviors to biocrust coverage in drylands. *Geoderma* 405, 115457.
- Zhang, S.Y., Li, C., Huang, B., Liu, T., Guo, T., Yuan, Z., Li, D. 2020. Flow hydraulic responses to near-soil surface components on vegetated steep red soil colluvial deposits. *J. Hydrol.* 582, 124527.
- Zhao, Y., Xu, M. 2013. Runoff and soil loss from revegetated grasslands in the hilly Loess Plateau region, China: influence of biocrust patches and plant canopies. *J. Hydrol. Eng.* 18, 387-393.