Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

Effect of biological mulches on the shear resistance of soil channels under soil erosion and rainfall simulation

Seyed Ahmad Hosseini [1*], Foroud Sharifi [2], Mohammadreza Gharibreza[3]

[1] Assistant Professor, Department of River & Coastal Engineering, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Tehran, Iran

[2] Professor, Department of River & Coastal Engineering, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Tehran, Iran

[3] Associate Professor, Department of River & Coastal Engineering, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Tehran, Iran

Abstract

Introduction

Mechanical properties of most soils alter upon the increase of moisture and saturation. In some soils, certain phenomena appear due to increased moisture. Some of these phenomena lead to major damage in development projects. These soils are called Sensitive soils to water". The most significant types of these soils are swelled soils, dispersive soils, and collapsible soils. Dispersive soils refer to clay soils that are easily washed up in waters with a low concentration of salt. Dispersion is a progressive phenomenon that starts from one point and is gradually extended. The start point of the dispersive phenomenon may refer to cracks resulting from shrinkage, soil deposition, or cracks made due to the roots of plants. This phenomenon is of great importance in such plans as soil dams and water supply channels where there is a water concentration inside the soil too. One of the essential reasons for soil erosion and sediment production in irrigation and drainage networks is the instability of canal soil, so it is necessary to use erosion control methods in parts of the canal route, especially at the intersection with other structures. To this end, the solution investigated and tested in this article is the use of biological mulches to reduce the erosion of the side slopes of earthen channels.

Materials and Methods

This research has been conducted on soil with a Loam sandy texture of irrigation and drainage channels network of the Arayez Plain of Khuzestan that lies on the west side of the Karkheh River. Using a simulated system, two-nozzle rainfall of the K18 feature was performed. To determine the effect of mulches on parameters of side wall erosive resistance of the soil structure, after the soil of the region passes through a sieve of 4.76 mm was put in the basin designed for 1 x 0.33 x 0.1 m for about 25 kg. After filtration, leveling, and pressing the soil to the edge of the Flume basin proportionate to the physical special weight of the soil, the stabilizing materials, and different bio mulches were sprayed in their different concentrations. Then, the basins inside the Flume with a side slope of 80% were put into a depth of 10 cm. In this research, with the objectives of determining the type and most appropriate level of biological mulches and their effect on the soil erosion resistance parameters of the lateral wall of the drainage channels of the Araiz plain of Khuzestan, the necessary experiments were conducted in the rain simulator laboratory of the Soil Conservation and Watershed Research Institute. So that using four types of water-based biological mulch, which were named with numbers 1 to 4 and at three levels of minimum (C1), medium (C2), and maximum (C3), experiments were conducted on the soil sample of the researched area. Each of the experimental treatments on a flume with a side slope of 1 to 1.25, similar to the side slope of canals in nature, was repeated and simulated three times in two rainfall intensities of 30 and 80 mm h-1. In each experiment, primary and secondary soil moisture, runoff volume, sediment weight, the intensity of water penetration in the treatments, and the shear strength of the treatments were measured. The experiments were conducted in a randomized complete block design in the form of split plots and the data were analyzed using SAS software and the averages were compared using the Student–Newman–Keuls (SNK) multi-domain test. Finally, by using mathematical models with optimization and minimization of sediment amounts and economic costs, the most suitable treatment for stabilizing the lateral walls of drains was determined. SPSS software was

Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

used for the statistical analysis of data and ANOVA and the Duncan test were used for the statistical comparison of data. Considering the tables obtained from data variance analysis and considering the statistic F and significance level, it can be said that all treatments are different in a significance level of 5% concerning the extent of sediment and there is a significant difference in the sediment amount.

Results and Discussion

The tests conducted on the soil of drainage channels of Arayez plain with a loamy – sand texture indicated that the presence of mulch coverage results in reduced sediment arising from rainfall in the manner that by the increase of density in any of the mulches, sedimentation reduces accordingly. The results obtained from the statistical analysis of this research confirmed that there is a significant difference in a level of 5% between sediment amounts of test control and mulch treatments for the sample of the soil under study. Therefore, bio mulches have an effective role in erosion control and the decrease of sediment from the walls of soil channels. The results indicated that only two types of biological mulches used in this study had a positive effect on shear resistance. General Linear Model (GLM) results showed that the interaction of two parameters of rainfall intensity with the type of treatment on shear strength is significant, so the interaction of rainfall intensity parameters with the level of materials used was not significant at the 5% level. In addition, the interaction of the type of treatment with the level of the materials used was also significant. According to the results of the analysis of variance in investigating the role of rainfall intensity on biological mulch treatments, it was found that rainfall intensity affected shear strength.

Conclusion

According to the above photos, all mulches compared to the control treatment have had a remarkable effect on the decrease of sediment. Moreover, it was found that the increase in the density of mulches used in all densities has had a remarkable effect on the decrease of outlet sediment. Furthermore, it was realized that the rainfall factor affects the increase of sediment. Thus, this effect in mulch 2 is the least effective in such a manner that upon increased rainfall in mulch 2m we see the minimum increase in the amount of sediment. The results after conducting system engineering and analyses related to the optimization of sediment amounts and economic costs indicated that mulch 2 at the C3 level has the best efficiency in increasing shear resistance. This conclusion could help the decision makers to allocate their soil conservation budget for the best performance activities.

Keywords: Biological mulch, Erosion, Optimization, Precipitation simulation, Sediment, Channel, Shear resistance

Article Type: Research Article

*Corresponding Author, E-mail: sahosseini@yahoo.com

Citation: Hosseini, S.A., Sharifi, F., & Gharibreza, M. (2023). Effect of biological mulches on the shear resistance of soil channels under soil erosion and rainfall simulation. *Water and Soil Management and Modeling*, 3(1), 98-114.
DOI: 10.22098/mmws.2022.11144.1101
DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.1.6.8

Received: 12 July 2022, Received in revised form: 14 August 2022, Accepted: 16 August 2022, Published Online: 16 August 2022
Water and Soil Management and Modeling, Year 2023, Vol. 3, No. 1, pp. 98-114
Publisher: University of Mohaghegh Ardabili © Author(s)

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک

شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۲۵٤٦

اثر خاک‌پوش‌های زیستی بر مقاومت برشی کانال‌های خاکی تحت شبیه‌سازی باران و فرسایش خاک

سید احمد حسینی[۱*]، فرود شریفی[۲]، محمدرضا غریب‌رضا[۳]

[۱] استادیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران
[۲] استاد، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران
[۳] دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

چکیده

پژوهش حاضر با هدف تعیین نوع و مناسب‌ترین سطح از خاک‌پوش‌های زیستی و اثر آن‌ها بر متغیرهای مقاومت فرسایشی خاک دیوارهٔ جانبی کانال‌های زهکش دشت اراضی خوزستان در آزمایشگاه شبیه‌ساز بارندگی پژوهشکدهٔ حفاظت خاک و آبخیزداری انجام شد. به‌طوری‌که با استفاده از چهار نوع خاک‌پوش زیستی پایهٔ آب، در سه سطح حداقل (C1)، متوسط (C2) و حداکثر (C3) آزمایش‌هایی روی نمونهٔ خاک منطقهٔ مورد پژوهش انجام شد. هر یک از تیمارهای آزمایشی روی فلومی با شیب جانبی ۱ به ۱/۲۵ مشابه شیب جانبی کانال‌ها در طبیعت، در دو شدت بارندگی ۳۰ و ۸۰ میلی‌متر بر ساعت، در سه نوبت تکرار و شبیه‌سازی شدند. در هر آزمایش مقاومت برشی تیمارها اندازه‌گیری شد. آزمایش‌ها در طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی در قالب کرت‌های خرد شده اجرا و داده‌ها با به‌کارگیری نرم‌افزار SAS تجزیه و میانگین‌ها با استفاده از آزمون چنددامنهٔ SNK مقایسه شدند. در نهایت با استفاده از مدل‌های ریاضی با بهینه‌سازی و کمینه‌سازی مقادیر رسوب و هزینه‌های اقتصادی، مناسب‌ترین تیمار تثبیت‌کننده جدارهٔ جانبی زهکش‌ها تعیین شد. نتایج مشخص نمود که تنها خاک‌پوش‌های زیستی ۲ و ۴ بر مقاومت برشی تأثیر مثبت داشته‌اند. هم‌چنین، بر هم‌کنش دو متغیر شدت بارندگی با نوع تیمار بر میزان مقاومت برشی معنی‌دار و بر هم‌کنش متغیرهای شدت بارندگی با سطح خاک‌پوشش غیرمعنادار در سطح ۵ درصد ارزیابی شد. ضمناً بر هم‌کنش نوع تیمار با سطح مواد نیز معنادار شد. پس از تحلیل مهندسی سیستم و بهینه‌سازی مقادیر رسوب و هزینه‌های اقتصادی مشخص شد که خاک‌پوش ۲ در سطح C3 بهترین کارایی در افزایش مقاومت برشی را دارد. لذا برهم‌کنش پارامترهای شدت بارش با سطح خاک‌پوش مورد استفاده در سطح ۵ درصد معنادار نبود. ضمناً برهم‌کنش نوع تیمار با سطح مواد مورد استفاده نیز معنادار شد. با توجه به نتایج تجزیهٔ واریانس در بررسی نقش شدت بارش بر تیمارهای خاک‌پوش زیستی، مشخص شد که شدت بارش بر میزان مقاومت برشی اثر داشته است. نتایج پس از انجام مهندسی سیستم و تحلیل‌های مربوط به بهینه‌سازی مقادیر رسوب و هزینه‌های اقتصادی مشخص نمود که خاک‌پوش ۲ در سطح C3 بهترین کارایی در افزایش مقاومت برشی را دارد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، شبیه‌سازی بارندگی، فرسایش، کانال خاکی، خاک‌پوش زیستی، مقاومت برشی

نوع مقاله: پژوهشی

[*]مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: sahosseini@yahoo.com

استناد: حسینی، س.ا.، شریفی، ف.، و غریب‌رضا، م. (۱۴۰۲). اثر خاک‌پوش‌های زیستی بر مقاومت برشی کانال‌های خاکی تحت شبیه‌سازی باران و فرسایش خاک. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۱)، ۹۸-۱۱۴.
DOI: 10.22098/mmws.2022.11144.1101
DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.1.6.8

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۲۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۵، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۵/۲۵
مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۲، دوره ۳، شماره ۱، صفحه ۹۸ تا ۱۱۴
ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

© نویسندگان

۱- مقدمه

ویژگی‌های مکانیکی اغلب خاک‌ها با افزایش رطوبت و اشباع شدن تغییر می‌کند. در برخی از خاک‌ها بر اثر افزایش رطوبت پدیده‌های خاصی بروز می‌کنند که بعضاً به خسارت‌های عمده‌ای در طرح‌های عمرانی منجر می‌شوند. این خاک‌ها «خاک‌های حساس در مقابل آب» نامیده می‌شوند و از مهم‌ترین اقسام آن‌ها می‌توان به خاک‌های متورم‌شونده[1] و خاک‌های واگرا[2] اشاره نمود. خاک‌های واگرا خاک‌های رسی هستند که در آب‌های با غلظت پایین نمک به‌راحتی شسته می‌شوند (Ross et al., 1998). این رس‌ها معمولاً دارای مقادیر بالای یون سدیم در کاتیون‌های جذبی خود هستند. بهبود کیفیت و اصلاح خاک‌های واگرا معمولاً با استفاده از مواد افزودنی نظیر گچ و آهک به خاک امکان‌پذیر است. استفاده از محصولات پوششی نیز از مناسب‌ترین اقدامات مدیریتی تثبیت موقت خاک است که برای حفاظت شیب تپه‌ها به کار برده می‌شوند (Gyasi-Agyei and Willgoose, 1999). در پژوهش ایشان نقش محصولات پوششی در کاهش فرسایش دیوارهٔ بزرگ‌راه‌ها، جاده‌های جنگلی و خاک‌ریزهای خطوط راه‌آهن مورد تأکید قرار گرفته است.

رواناب حاصل از بارندگی برخوردی به دیوارهٔ کانال‌های حاوی خاک شور و قلیا، موجب بروز فرسایش سطحی و ایجاد شیار عمیق و به‌دنبال آن ریزش و تخریب دیواره‌ها و ته‌نشینی رسوبات در کانال می‌شود، که در نهایت تحمیل هزینه‌های لایروبی و احداث مجدد کانال‌ها را در پی خواهد داشت. افزایش رواناب در شیب‌های متوسط تا تند، تنش برشی را افزایش داده و موجب تخریب شیروانی کانال، کنش کف بستر، تولید رسوب و انسداد کانال می‌شود. یکی از راه‌های مهار فرسایش در اراضی شیب‌دار، استفاده از سازه‌های مختلف مکانیکی است که معمولاً در پروژه‌های مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد که با هزینه‌های گزافی همراه است. روش دیگر استفاده از منابع ارزشمند نفتی به‌صورت خام و فرآوری نشده، به نام خاک‌پوش نفتی است که متأسفانه این محصول نیز دارای مشکلات محیط زیستی از جمله ورود ذرات سرب به خاک است. سال‌های متمادی است که پژوهش‌گران به‌دنبال جایگزین مناسب و مؤثری برای خاک‌پوش‌های نفتی هستند که علاوه بر پایداری و دوام، دارای اثرات محیط زیستی مخرب نیز نباشد. امروزه استفاده از روش‌های زیست‌مهندسی[3] برای کاهش فرسایش و پایداری خاک شیب‌های واقع در حاشیهٔ بزرگراه‌ها این انگیزه را در بسیاری از پژوهش‌گران به وجود آورده تا سیستم‌هایی را که در برابر فرسایش دارای کاربرد ساده‌تر و مقاومت بیش‌تری هستند توسعه دهند.

سهولت تهیهٔ خاک‌پوش‌ها در حجم‌های زیاد و هم‌چنین هزینهٔ پائین آن در کشور از مهم‌ترین دلایل استفاده از روش‌های زیست‌مهندسی در تثبیت خاک کانال‌های خاکی است. از طرفی خاک‌پوش‌ها و تثبیت‌کننده‌ها دارای ماندگاری کافی، سادگی عملیات اجرا و فرمولاسیون انعطاف‌پذیر برای استفاده در مصارف و شرایط گوناگون هستند. Nouruzi and Crouch (1989) برای اراضی لخت با چسبندگی ضعیف و مقادیر متفاوت ذرات سیلت، تنش برشی را معادل ۶ تا ۴۴ دین بر سانتی مترمربع به‌دست آوردند. در این خصوص، Poesen and Lavee (1991) اثر اندازه و اتصال خاک‌پوش‌ها را در دو خاک لخت و خاک دارای خاک‌پوش، برای جویچه‌های رواناب با شدت‌های زیاد شبیه‌سازی نمودند. نتایج نشان داد که در سطوح پوشش داده شده، تأثیر اندازهٔ خاک‌پوش در کاهش رواناب و فرسایش خاک، به‌طور معکوس متناسب با اندازهٔ جداگانه خاک‌پوش‌هاست. Rickson (1995) مشخص نمود کاربرد خاک‌پوش برای حفاظت سطح خاک، شکسته شدن خاکدانه‌ها و به‌دنبال آن تشکیل سلهٔ سطحی را به تأخیر انداخته، و در نتیجه باعث افزایش نفوذپذیری آب در خاک، افزایش ذخیرهٔ رطوبتی و کاهش رواناب خواهد شد. هم‌چنین این مواد با نقشی که در افزایش زبری سطح خاک ایجاد می‌کنند، سرعت رواناب سطحی و تنش برشی اعمال‌شده به‌وسیله رواناب را در دامنه‌ها کاهش می‌دهند.

در خصوص روش‌های افزایش مقاومت برشی و فشاری خاک، در آزمایش‌هایی که توسط Govers et al. (2006) در یک فلوم ۲۰ متری برای ارزیابی تغییرات مقاومت به فرسایش ناشی از رواناب در یک خاک لومی انجام شد، مشخص شد که فرسایش تابعی از رطوبت اولیه و فشردگی خاک است. نتایج هفت سری آزمایش ایشان نشان داد که مقاومت در برابر فرسایش ناشی از رواناب در خاک لومی، به تغییرات در رطوبت اولیه خاک بسیار حساس است. به‌طوری‌که در شروع آزمایش‌ها مقاومت به فرسایش بسیار کم، ناشی از خشک بودن خاک است که با تغییرات ساختاری که در طی زمان می‌گیرد باعث کاهش قابل‌توجهی از مقاومت برشی خاک و در نتیجه مقاومت در برابر فرسایش ناشی از رواناب می‌شود. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که در طی یک واقعهٔ بارندگی بر یک خاک خشک با رطوبت اولیهٔ ناچیز، فرسایش بسیار بیش‌تر از یک خاک با رطوبت اولیهٔ بالا است. هم‌چنین، Gholami et al. (2012) تأثیر خاک‌پوش کاه بر فرآیندهای تولید رواناب و رسوب ناشی از برخورد قطره‌های بارندگی بر سطح خاک را در شرایط آزمایشگاهی بررسی

[1] Swelling soils
[2] Divergent soils
[3] Bio Engineering

نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که خاک‌پوش کاه، اثر قابل‌توجهی در تغییر رواناب و ویژگی‌های فرسایش خاک در سطح اطمینان ۹۹ درصد دارد. در پژوهش آزمایشگاهی دیگر که در یک فلوم به ابعاد ۰/۶ در ۳/۷۵ متر صورت گرفت (Romkens et al., 2001)، میزان رواناب در شرایط مختلف اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که فشار آب خاک زیرسطحی، تحت تأثیر غلظت رسوبات است. Adekalu et al. (2007) نیز تأثیر خاک‌پوش حاصل از بقایای گیاهی به نام علف پیل[1] که به‌میزان فراوان در مناطق حارهٔ آفریقا یافت می‌شود را در کاهش رواناب و رسوب بررسی کردند. نتایج نشان داد که رواناب سطحی، نفوذ آب در خاک و میزان تلفات خاک دارای بیش‌ترین همبستگی (به‌ترتیب ۰/۹، ۰/۸۹ و ۰/۸۶) با شیب و درصد خاک‌پوش بوده است. هم‌چنین در این بررسی مشخص شد که میزان رواناب سطحی با مقدار شن همبستگی منفی دارد، درحالی‌که میانگین هدررفت خاک با مقدار کلوئیدها (رس و مادهٔ آلی) دارای همبستگی مثبت بود. به‌طور کلی با افزایش سطح پوشیده شده توسط خاک‌پوش، نفوذ آب در خاک افزایش و هدررفت خاک کاهش پیدا کرده است. Rouhipour et al. (2010) تعداد ۷۲ آزمایش بر خاک یکی از شیب‌های ناپایدار تپه‌های مارنی روستای سرچم زنجان را انجام دادند. برای همه آزمایش‌ها، تقریباً ۱۰۰ کیلوگرم نمونهٔ خاک در داخل تشتک فلوم قرار داده و به‌صورت دستی مسطح شد. تیمارهای حفاظتی شامل پنج خاک‌پوش مصنوعی با روزنه‌های منظم مربع شکل بود. برای هر آزمایش مقدار رواناب، میزان آبگذری خاک، رسوب تولیدی، مقاومت برشی و پاشمان هوایی ذرات خاک اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که خاک‌پوش‌های با روزنهٔ ۱/۵ و ۰/۵ سانتی‌متر به‌ترتیب در مهار رواناب و رسوب بیش‌ترین تأثیر را داشته‌اند و خاک‌پوش ۵/۵ سانتی‌متر کم‌ترین کارایی را نشان داد.

در زمینهٔ روش‌های مهار فرسایش یا تثبیت خاک Sadeghi et al. (2010) خاک‌پوش‌های آلی و معدنی مختلف را برای مقاصد حفاظت خاک استفاده نمودند. آزمایش‌ها با استفاده از خاک‌پوش کاه، کود کشاورزی و پلی‌آکریل‌آمید روی خاک شنی لومی در شرایط آزمایشگاهی در شیب ۳۰ درصد و چهار شدت بارندگی ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت انجام شد. نتایج نشان داد که خاک‌پوش کاه میزان فرسایش خاک را در مقایسه با شاهد به‌میزان ۴۵/۶ درصد کاهش، کود کشاورزی ۸/۹۸ درصد و پلی‌آکریل‌آمید ۴/۷۴ درصد کاهش داد. نتایج ایشان نیز نشان داد که حداکثر کاهش در غلظت رسوب و هدررفت خاک برای تمامی مواد اصلاح‌کننده در شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر بر ساعت، به‌میزان ۵۸/۶۹ و ۶۳/۲۴ درصد برای خاک‌پوش کاه، ۱۴/۶۵ و ۱۳/۱۴ درصد برای کود و ۲۰/۱۵ و ۲۳/۴۴ درصد برای پلی‌آکریل‌آمید TA200 رخ داده است. Defersha et al. (2011) اثر شیب‌های تند و میزان رطوبت اولیهٔ خاک را در ایجاد فرسایش شیاری، رواناب و توزیع اندازهٔ رسوبات، به‌صورت آزمایشگاهی بررسی نمودند. در این آزمایش‌ها شدت بارندگی، شیب و میزان رطوبت اولیهٔ خاک، متغیر در نظر گرفته شد. به‌طوری‌که سه نوع بافت خاک، شش نوع شدت بارندگی و سه نوع شیب در نظر گرفته شد. نتایج مشخص نمود که مقدار رسوبات با میزان رواناب همبستگی دارد، اما با فرسایش همبستگی نشان نداد. Kurien et al. (2014) با شبیه‌سازی بارندگی‌های مختلف، در شیب‌ها و رواناب‌های مختلف، میزان فرسایش خاک را برآورد نمودند. نتایج نشان داد که در شیب‌های مختلف مورد آزمایش، میزان فرسایش و رواناب، با افزایش شدت بارندگی، بیش‌تر می‌شود. هم‌چنین، Abdul (2014) تأثیر استفاده از کاه ساقهٔ برنج را در مهار فرسایش به‌صورت آزمایشگاهی بررسی نمود. آزمایش‌ها برای سه شدت مختلف بارندگی (معادل ۵۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ میلی‌متر در ساعت) با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز باران انجام شد. ابعاد مدل فیزیکی ۱×۱×۰/۵ متر بود. نتایج نشان داد که تأثیر شدت بارندگی و گرادیان شیب، نسبی است. به‌طوری‌که با افزایش شدت بارندگی و بیش‌تر شدن شیب، فرسایش نیز افزایش می‌یابد. در پژوهش Abdul et al. (2014) تأثیر شدت بارندگی در کاهش میزان فرسایش، در سطح خاک و شیب‌های مختلف، بر خاک با بافت شنی–لومی تحلیل شد. آزمایش‌ها در سه شدت بارندگی مختلف ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر در ساعت انجام شد. نتایج نشان داد که در بارندگی‌های با شدت زیاد و در شیب‌های تند، میزان فرسایش خاک بیش‌تر می‌شود.

مرور منابع موجود حاکی از آن است که به‌غیر از عملیات سازه‌ای و مهندسی که برای پایدار ساختن شیب‌ها و ناهمواری‌های سنگریزه‌ای و صخره‌ای در مناطق حساس به زمین‌لغزش و یا برای تثبیت شیب‌های اطراف جاده‌ها و دیوارهٔ جانبی تونل‌ها مورد استفاده قرارگرفته، پژوهش‌ها و مطالعات محدودی در ایران برای پایداری شیب‌های تند با بستر خاکی در زمینهٔ کاربرد روش‌های زیست‌مهندسی و خاک‌پوش‌ها به‌منظور کاهش فرسایش و رسوب صورت گرفته است، که در این پژوهش بدان پرداخته شد. بسیاری از خاک‌های ایران و به‌ویژه خاک کانال‌های خاکی منطقهٔ مورد پژوهش، شور و قلیا بوده و حاوی درصد قابل‌توجهی آهک غیرفعال، که قابلیت انعقاد خاک ندارند، است و به‌واسطهٔ بالا بودن سدیم قابلیت واگرایی

[1] Elephant grass

نیز دارند. این پژوهش با هدف شناسایی و ارائهٔ بهترین راه‌کار در تعیین نوع و سطح مناسب از خاک‌پوش‌های مختلف، به‌منظور تثبیت دیواره و پایداری این قبیل کانال‌ها برنامه‌ریزی شد. به‌طوری‌که با استفاده از انواع مختلف خاک‌پوش‌های زیستی شیمیایی پایهٔ آب تولید کشور و به‌کارگیری احجام و درصدهای مختلف از هر یک از آن‌ها، با انجام آزمایش‌های مختلف آزمایشگاهی، بررسی‌های لازم در خصوص میزان تأثیر آن‌ها در تثبیت دیوارهٔ کانال‌ها به‌ویژه زهکش‌ها تهیه شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقهٔ مورد پژوهش

محل پژوهش مربوط به ویژگی‌های خاک کانال‌های زهکش در دشت ارایض خوزستان است که بزرگ‌ترین طرح توسعهٔ آب و خاک بخش کشاورزی تاریخ کشور موسوم به پروژهٔ ۵۵۰ هزار هکتاری ولایت، در آن اجرا شده است. این منطقه در جنوب غربی ایران در استان خوزستان و در غرب رودخانهٔ کرخه بین عرض جغرافیایی ´۴۵ °۳۱ تا ´۲۵ °۳۲ شمالی و طول جغرافیایی ´۵۰ °۴۷ تا ´۳۰ °۴۸ شرقی قرار دارد (شکل ۱).

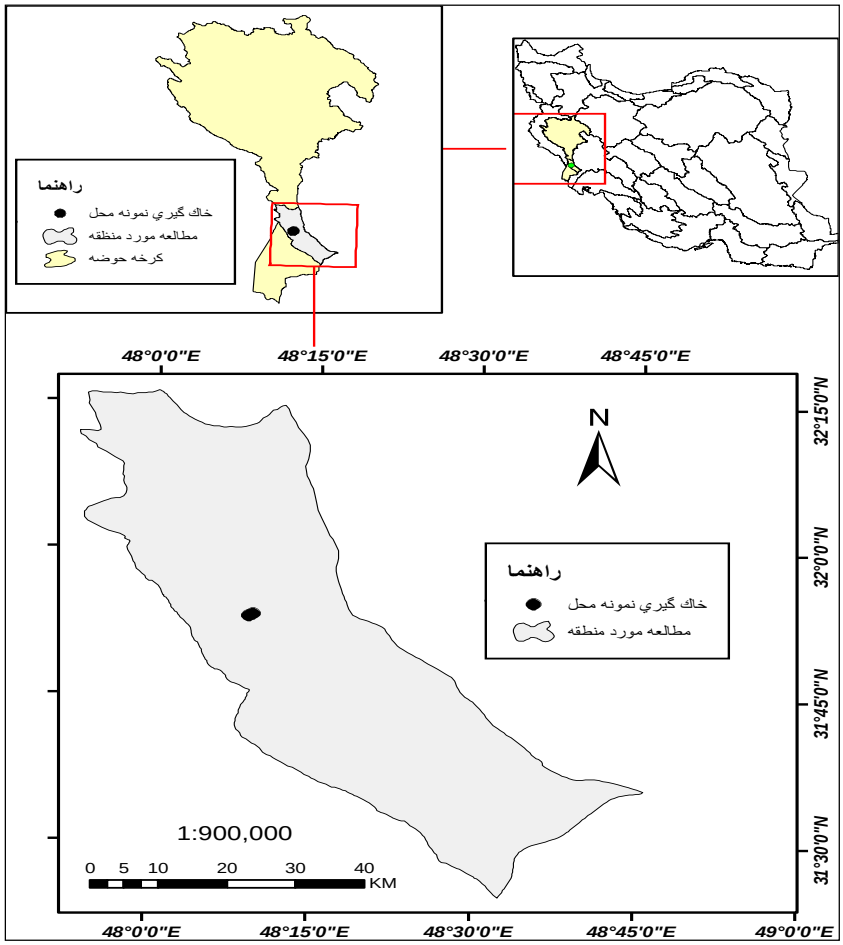
به‌طورکلی منطقه دارای اقلیم گرم و خشک بوده و در مواقعی از سال وزش طوفان با ماسهٔ بادی اتفاق می‌افتد. بیشینه و کمینهٔ دمای منطقه به‌ترتیب ۵۳ و ۷ درجهٔ سانتی‌گراد است. میانگین بارندگی سالانه در ایستگاه پای پل در دورهٔ آماری ۱۷ ساله (۱۳۹۶-۱۳۷۹)، ۲۵۶/۸ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. از آن‌جایی‌که اطلاعات ثبت‌شده‌ای از بارندگی در منطقهٔ مورد پژوهش وجود ندارد، با توجه به منحنی شدت-مدت-فراوانی بارندگی در ایستگاه اهواز، و با مقداری ضریب اطمینان، دو شدت بارندگی معادل با ۳۰ و ۸۰ میلی‌متر در ساعت به‌منظور انجام آزمایشات مورد استفاده قرار گرفت. به‌طوری‌که این مقادیر شدت بارندگی به‌ترتیب معادل با دورهٔ برگشت ۵۰ و ۲۰۰ ساله در منطقه است.

بررسی میدانی کانال‌های زهکش دشت اراضی حاکی از وجود انواع فرسایش در کانال‌ها و ریزش دیوارهٔ کلکتورهای روباز است. بازدیدهای به‌عمل‌آمده حاکی از آن است که تخریب‌های ایجاد شده، بلافاصله پس از یک بارندگی و ایجاد رواناب سطحی صورت گرفته است. شکل ۲ انواع فرسایش در کانال‌های زهکش و تخریب شیروانی زهکش‌های روباز تحت پدیدهٔ واگرایی به‌واسطهٔ وجود املاح محلول در خاک را نشان می‌دهد.

۲-۲- نحوهٔ آماده‌سازی تجهیزات و انتخاب معیارهای فنی مورد نیاز

در این پژوهش از خاک کانال‌های زهکش حساس به فرسایش، در شبکهٔ آبیاری و زهکشی دشت اراضی خوزستان به‌منظور بررسی و تعیین نقش خاک‌پوش‌ها در کاهش رواناب، رسوب و افزایش مقاومت برشی ناشی از فرسایش بارانی استفاده شد. این پژوهش در چهار مرحلهٔ کلی پیگیری و اجرا شد. بدین‌ترتیب که در مرحلهٔ نخست نسبت به بررسی مقدماتی و شناسایی اولیهٔ کانال‌های مسئله‌دار اقدام شد. سپس، در مرحلهٔ دوم با آماده‌سازی تجهیزات و فلوم آزمایشگاهی مورد نیاز، به‌منظور پیاده‌سازی و شبیه‌سازی ویژگی‌های فیزیکی و هندسی کانال‌های زهکش در آن اقدام شد. به‌طوری‌که خاک منطقه درون تشتک‌های فلزی طراحی‌شده به ابعاد ۱×۰/۳۳×۰/۱ متر ریخته شد. در ادامه نسبت به آماده‌سازی و واسنجی یکنواختی بارندگی در سامانهٔ شبیه‌ساز باران اقدام شد. در همین راستا، عملیات شبیه‌سازی باران در دو شدت ۳۰ و ۸۰ میلی‌متر بر ساعت طی مدت زمان ۳۰ دقیقه بر تیمارها که منطبق با شیب جانبی زهکش‌ها قرار داشتند انجام شد. با توجه به انجام سه نوبت آزمایش‌های متناوب روی تیمار شاهد در فواصل زمانی یک دقیقه‌ای در ابتدای آزمایش و پنج دقیقه‌ای در اواسط آزمایش، و ۱۰ دقیقه‌ای در اواخر آزمایش، مقادیر غلظت رسوب در مدت زمان یک ساعت در شدت بارندگی‌های مختلف اندازه‌گیری شد. در ادامه با ترسیم منحنی مقادیر غلظت رسوب در مقابل زمان، ملاحظه شد که پس از حدود ۳۰ دقیقه، روند تغییرات غلظت رسوب با زمان تقریباً ثابت یا به حالت ماندگار می‌رسد. بر این اساس، زمان ۳۰ دقیقه به‌عنوان مبنای زمانی مناسب برای انجام شبیه‌سازی بارندگی روی تیمارها در نظر گرفته شد.

در مرحلهٔ سوم، نسبت به اعمال و یا اسپری مواد تثبیت‌کننده و خاک‌پوش‌های زیستی بر نمونه‌های تهیه‌شده از خاک زهکش‌ها اقدام شد. در این خصوص با به‌کارگیری چهار نوع خاک‌پوش زیستی شیمیایی پایهٔ آب (با اسامی M1 تا M4) و سه سطح از هر یک از آن‌ها مشتمل بر سطح حداقل (C1)، سطح متوسط (C2) و سطح حداکثر (C3) در قالب تیمارهای جداگانه، آزمایش‌های مورد نیاز در آزمایشگاه پژوهشکدهٔ حفاظت خاک و آبخیزداری انجام شد. نام تیمارها و مشخصات میزان مصرفی هر یک از آن‌ها در سه سطح حداقل، متوسط و حداکثر در جدول ۱ نشان داده شده است. در پایان هر شبیه‌سازی مقاومت برشی تیمارها با دستگاه Torvane اندازه‌گیری شد (شکل‌های ۳ و ۴).



شکل ۱- نمایی از موقعیت حوضهٔ کرخه و محدودهٔ مورد پژوهش

Figure 1-A view of the location of Karkheh and study area

شکل ۲- فرسایش شیاری و پنجه‌ای به وجود آمده در دیوارهٔ کلکتور روباز

Figure 2- Erosion of the groove created in the wall of the earthen channel

جدول ۱- تیمارهای خاک‌پوش زیستی و مشخصات سطح مصرف آن‌ها

Table 1- Biological mulch treatments and characteristics of their consumption level

نام مواد (تیمار)	نام تجاری	سطح (گرم بر مترمربع)	ویژگی ظاهری خاک‌پوش‌ها و میزان اختلاط با آب
خاک‌پوش 1- سطح حداقل	دکترجلال جلیلیان	500	به‌صورت محلول و عدم نیاز به اختلاط با آب
خاک‌پوش 1- سطح متوسط		750	
خاک‌پوش 1- سطح حداکثر		1000	
خاک‌پوش 2- سطح حداقل	دکتر علی درویشی	50	به‌صورت مایع غلیظ بوده و با نسبت ۱ به ۲۰ با آب حل شد.
خاک‌پوش 2- سطح متوسط		75	
خاک‌پوش 2- سطح حداکثر		100	
خاک‌پوش 3- سطح حداقل	دکترکاویان (محل تولید اصفهان)	50	به‌صورت ژله‌ای بوده و با نسبت ۱ به ۱۰ با آب حل شد.
خاک‌پوش 3- سطح متوسط		100	
خاک‌پوش 3- سطح حداکثر		150	
خاک‌پوش 4- سطح حداقل	لوکو سویل (شرکت آلمانی)	50	به‌صورت مایع غلیظ بوده و با نسبت ۱ به ۱۰ با آب حل شد.
خاک‌پوش 4- سطح متوسط		75	
خاک‌پوش 4- سطح حداکثر		100	

شکل ۳- اندازه‌گیری مقاومت برشی تیمارها (سمت راست) با استفاده از دستگاه Torvane (سمت چپ)

Figure 3- Measurement of shear strength of treatments (right side) using Torvane device (left side)

شکل ۴- چیدمان فلوم و تیمارها طی مدت شبیه‌سازی

Figure 4- Flume arrangement and treatments during the simulation period

۲-۳- تجزیه و تحلیل آماری

در مرحلهٔ پایانی به‌منظور ارائهٔ مناسب‌تر نتایج، نسبت به تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها به‌صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی در قالب کرت‌های خرد شده (Split Plot) اقدام و داده‌ها با به‌کارگیری نرم‌افزار SAS و میانگین‌ها با استفاده از آزمون چنددامنهٔ Student-Newman-Keuls (SNK) مقایسه شدند. هم‌چنین، نتایج مربوط به آزمون SNK در بررسی مقادیر مقاومت برشی در تیمارهای مورد استفاده، با تغییرات شدت بارندگی، نوع مواد و سطح مواد تثبیت‌کننده ارائه شد. در تمامی نتایج مستخرج از مدل آماری تعریف متغیرها به شرح جدول ۲ است.

جدول ۲- راهنمای تعریف متغیرهای آماری
Table 2- Guide to defining statistical variables

کد	متغیر
A	شدت بارندگی
B	نام خاک‌پوش (تیمار)
C	سطح خاک‌پوش
R	تکرار (بلوک)
A×B	بر هم‌کنش شدت بارندگی با هر تیمار
A×C	بر هم‌کنش شدت بارندگی با سطح خاک‌پوش
B×C	بر هم‌کنش نام تیمار با سطح خاک‌پوش
R(A×B)	بر هم‌کنش تکرار شدت بارندگی با هر تیمار
A×B×C	بر هم‌کنش شدت بارندگی با نوع تیمار و سطح خاک‌پوش

در ادامه، با استفاده از مدل‌های ریاضی با بهینه‌سازی و کمینه‌سازی مقادیر رسوب و هزینه‌های اقتصادی، سطح بهینهٔ هر یک از خاک‌پوش‌ها در مقایسه با اثر نوع آن‌ها در تثبیت جدارهٔ جانبی زهکش‌ها تعیین شد. موضوع بهینه‌سازی دارای مفهوم ریاضی است که ساده‌ترین حالت آن تابع سود خالص در یک سیستم تک‌محصولی است. در این تابع ساده توابع تولید و سود خالص در هم ادغام‌شده، و حالتی از اجرای پروژه جستجو می‌شود که محصول تولید شده حداکثر سود خالص را تضمین نماید و این پژوهش به تعبیر جبری دنبال حداکثر کردن تابع ضمنی با در نظر گرفتن شرایط محدودکننده بوده است. به‌منظور بهینه‌سازی و کمینه‌سازی مقادیر رسوب و هزینه‌های اقتصادی تیمارهای تثبیت‌کننده ابتدا مقادیر کاهش میزان رسوب هر تیمار نسبت به شاهد محاسبه و به‌عنوان تابع سود در نظر گرفته شد. گفتنی است که مقادیر مذکور از اختلاف میزان رسوب در هر سطح از تیمارها با شاهد، حاصل شد. در ادامه مقدار هزینهٔ انجام‌شده نسبت به شاهد محاسبه و به‌عنوان تابع هزینه در نظر گرفته شد. مقادیر مذکور برابر با هزینهٔ تثبیت خاک توسط هر یک از تیمارها، در یک مترمربع است (۲).

پس از آن مقدار نسبی هزینه در واحد وزنی کاهش رسوب محاسبه شد. مقدار مذکور برابر با نسبت هزینهٔ انجام‌شده به کاهش رسوب است. در ادامه رابطهٔ بین تابع هزینه (C)، نسبت هزینه به کاهش رسوب که به‌عنوان درآمد محسوب می‌شود (C/B)، ترسیم و تابعی با مناسب‌ترین ضریب تبیین (R^2) روی آن برازش داده شد. به‌طوری‌که یک معادلهٔ خطی به‌صورت y=mx+n تعیین و استفاده شد. ضرایب m و n معادلهٔ مذکور به‌صورت رابطهٔ ۱ استخراج شد.

$$y = mx + n \frac{C}{B} = mC + n \Rightarrow C = B(mC + n)B = \frac{C}{mC + n} \quad (۱)$$

حل عددی معادلهٔ تابع سود (B) (با فرض ارزش هر کیلوگرم خاک حفاظت‌شده یا رسوب کاهش‌یافته به میزان ۱۰۰۰۰ ریال) با استفاده از معادلهٔ رگرسیونی به‌دست‌آمده، انجام شد. به‌طوری‌که این معادله تابعی از نسبت (C/B) و مقدار (C) است. گفتنی است از آن‌جایی‌که هدف نهایی حداکثر نمودن میزان سود (یا maxB) است، حداکثر سود نیز از اختلاف درآمد و سرمایه‌گذاری به‌دست آمد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج شبیه‌سازی بارندگی در تیمار شاهد (خاک لخت و بدون پوشش)

میانگین نتایج مربوط به مقادیر مقاومت برشی طی دو باران شبیه‌سازی‌شده به شدت‌های ۳۰ و ۸۰ میلی‌متر در ساعت روی تیمار شاهد در شیب جانبی ۸۰ درصد در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج نشان داد که با افزایش ۲/۷ برابری شدت بارندگی، میزان رسوب خروجی از تیمار شاهد حدود ۳ برابر می‌شود. در ادامه، نتایج مربوط به بر هم‌کنش متغیرهای مختلف از جمله بر هم‌کنش نوع تیمارها با سطح مواد مورد استفاده و هم‌چنین بر هم‌کنش متغیرهای

شدت بارندگی با نوع تیمارها و سطح مواد مورد استفاده روی مقادیر مقاومت برشی تیمارها، بررسی و ارائه شد.

جدول ۳- متغیرهای مختلف اندازه‌گیری شده در شدت‌های مختلف بارندگی روی تیمار شاهد

Table 3- Different variables measured in different intensities of rainfall on the control treatment

شدت بارندگی (ساعت/میلی‌متر)	میانگین رسوب (مترمربع/کیلوگرم)	میانگین مقاومت برشی (سانتی‌مترمربع/کیلوگرم)
30	0.074	0.514
80	0.222	0.476

۳-۲- بررسی نتایج آماری مقادیر مقاومت برشی در تیمارهای خاک‌پوش زیستی

نتایج مربوط به تجزیهٔ واریانس مقادیر میانگین مقاومت برشی، در تیمارهای خاک‌پوش زیستی در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌گونه که از جدول تجزیهٔ واریانس مشاهده می‌شود مقادیر مقاومت برشی در برخی از تیمارهای خاک‌پوش زیستی، در سطح ۵ درصد معنادار بوده است. بدین‌مفهوم که تنها خاک‌پوش‌های زیستی ۲ و ۴ مورد استفاده در این پژوهش روی مقاومت برشی نسبت به شاهد تأثیر مثبت داشته‌اند. نتایج مقایسهٔ آماری داده‌ها با استفاده از روش تجزیهٔ واریانس GLM نشان داد که بر هم‌کنش دو متغیر شدت بارندگی با نوع تیمار بر میزان مقاومت برشی معنادار است. لذا بر هم‌کنش متغیرهای شدت بارندگی با سطح مواد مورد استفاده در سطح ۵ درصد معنادار نیست. ضمناً برهم‌کنش نوع تیمار با سطح مواد مورد استفاده نیز معنادار است. لذا مشخص شد که بر هم‌کنش اثر تکرار شدت بارندگی با نوع تیمار در سطح ۵ درصد معنادار نیست. هم‌چنین برهم‌کنش سه متغیر شدت بارندگی با نوع تیمار و سطح مواد مورد استفاده در سطح ۵ درصد معنادار است.

جدول ۴- نتایج تجزیهٔ واریانس مقاومت برشی در تیمارهای شاهد و خاک‌پوش زیستی

Table 4- Results of variance analysis of shear strength in control and biological soil cover treatments

منابع تغییرات	درجهٔ آزادی	میانگین مربعات	آمارهٔ F	سطح معناداری
A	1	1.054	948.07	0.0001<
B	3	0.109	98.26	0.0001<
C	2	0.045	40.83	0.0001<
R	2	0.001	0.48	0.6257
A×B	3	0.212	190.37	0.0001<
A×C	2	0.002	1.72	0.1956
B×C	6	0.029	25.79	0.0001<
R(A×B)	18	0.00	0.37	0.9852
A×B×C	6	0.017	15.66	0.0001<
ضریب تبیین (R^2)	ضریب تغییرات	ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)		میانگین مقاومت برشی (سانتی‌مترمربع/کیلوگرم)
0.98	8.39	0.033		0.398

۳-۲-۱- بررسی نتایج تجزیهٔ واریانس با اعمال تغییرات در شدت بارندگی، نوع تیمارها و سطح خاک‌پوش مورد استفاده در بررسی مقادیر مقاومت برشی

با توجه به نتایج تجزیهٔ واریانس در بررسی نقش شدت بارندگی روی تیمارهای خاک‌پوش زیستی، مشخص شد این تیمارها در سطح ۵ درصد دارای اختلاف معنادار هستند. بدین‌مفهوم که شدت بارندگی بر میزان مقاومت برشی اثر داشته است (شکل ۵).

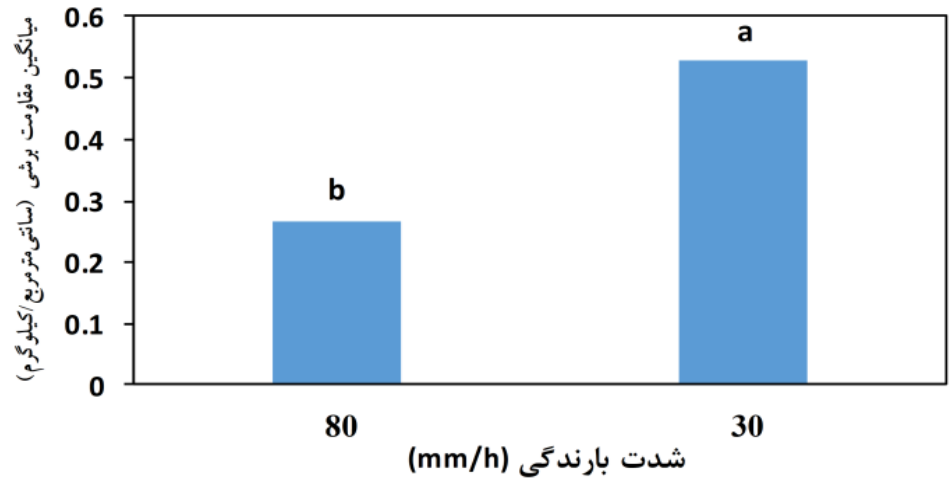
با توجه به نتایج تجزیهٔ واریانس در بررسی تغییرات انواع خاک‌پوش‌های زیستی مورد استفاده، مشخص شد به‌واسطهٔ قرارگیری حروف یکسان در ستون‌های مربوط به خاک‌پوش‌های ۲ و ۴، تفاوت معنادار در سطح ۵ درصد در مقادیر مقاومت برشی این دو خاک‌پوش وجود ندارد. هم‌چنین وجود حروف یکسان در ستون‌های مربوط به خاک‌پوش ۴ و تیمار شاهد، مشخص‌کنندهٔ عدم تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد در مقادیر مقاومت برشی این دو است. سایر خاک‌پوش‌ها دارای اختلاف معنی‌دار در مقادیر مقاومت برشی هستند (شکل ۶).

نتایج تجزیهٔ واریانس در بررسی تغییرات سطح مواد مورد استفاده، بیان‌گر نبود تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد در مقادیر مقاومت برشی این دو است. هم‌چنین قرارگیری حروف یکسان در

سطح C1 و C2 از مواد مورد استفاده، بیان‌گر نبود تفاوت معنادار در سطح ۵ درصد در مقادیر مقاومت برشی این دو است (شکل ۷).

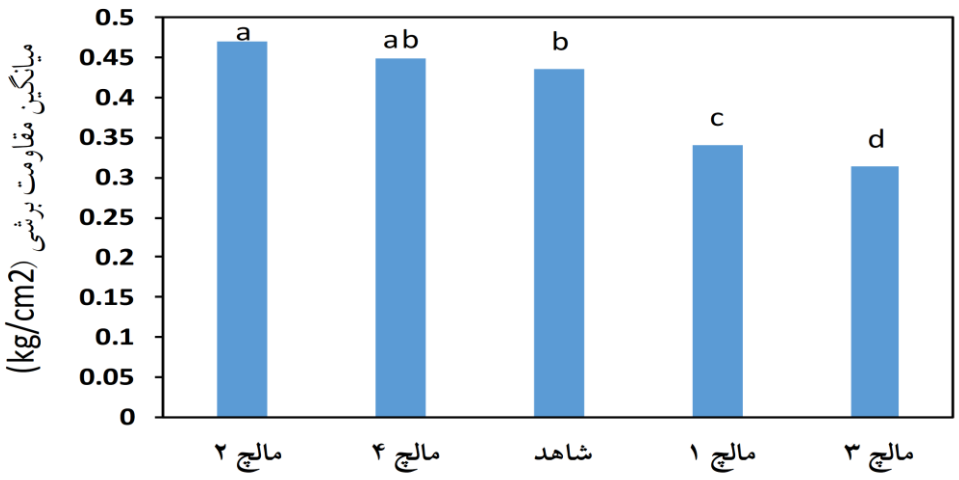
۳-۲-۲- بررسی بر هم‌کنش تیمارهای خاک‌پوش زیستی با سطح مواد مورد استفاده بر میانگین مقاومت برشی

نتایج آماری تأثیر بر هم‌کنش تیمارهای خاک‌پوش زیستی (B) با سطح مواد مورد استفاده (C) بر میانگین مقاومت برشی در جدول ۵ ارائه‌شده است. نتایج این بررسی نشان داد که مقادیر میانگین مقاومت برشی در ۴ گروه طبقه‌بندی شده‌اند. از آن‌جایی‌که بهترین تیمار، تیماری است که بیش‌ترین مقدار مقاومت برشی را ایجاد کرده باشد، بر این اساس تیمار خاک‌پوش ۲ در سطح C3، بهترین کارایی را خواهد داشت.



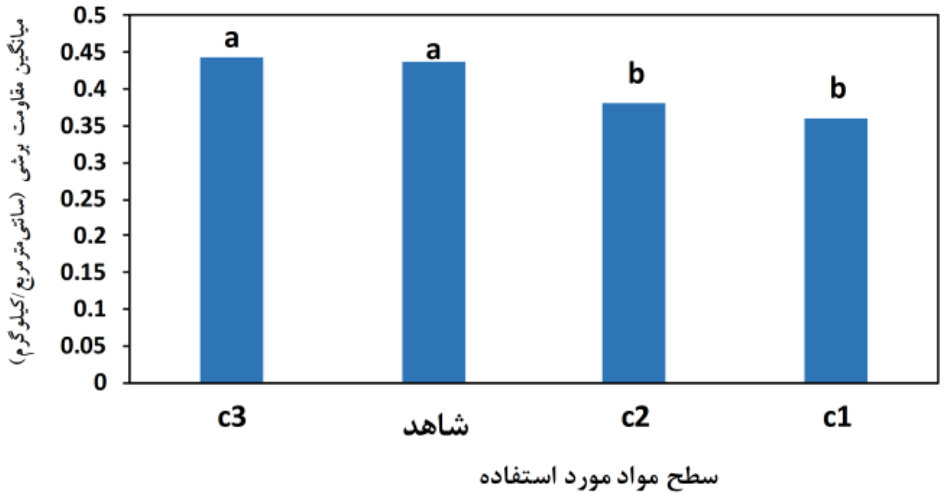
شکل ۵- مقایسهٔ میانگین مقاومت برشی در تیمارهای خاک‌پوش زیستی در دو شدت بارندگی

Figure 5- Comparison of average shear strength in biological soil cover treatments in two rainfall intensities



شکل ۶- مقایسهٔ میانگین مقاومت برشی در تیمارهای خاک‌پوش زیستی و شاهد

Figure 6- Comparison of average shear strength in biological and control soil cover treatments



شکل ۷- مقایسهٔ میانگین مقاومت برشی در شاهد و تیمارهای خاک‌پوش زیستی در سه سطح مورد استفاده

Figure 7- Comparison of the average shear strength in the control and biological soil cover treatments in the three levels used

جدول ۵- بررسی تأثیر برهم‌کنش تیمارهای خاک‌پوش زیستی با سطح مواد مورد استفاده بر میانگین مقاومت برشی

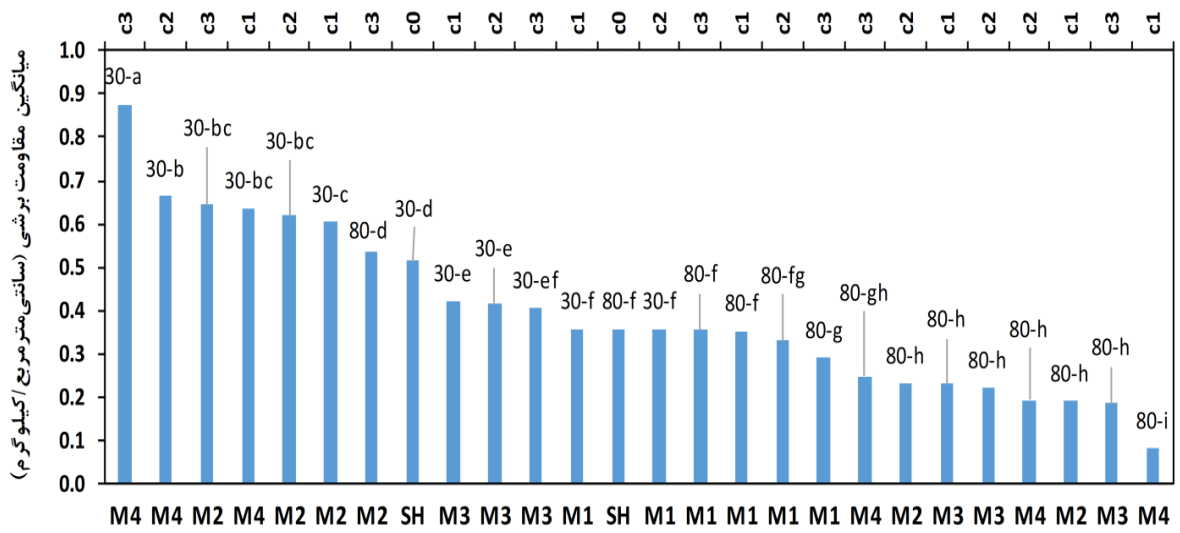
Table 5- Investigating the effect of the interaction of biological soil cover treatments with the surface of the used materials on the average shear strength

نام تیمار	سطح خاک‌پوش	میانگین مقاومت برشی* (سانتی‌مترمربع/کیلوگرم)
خاک‌پوش 1	c1	cd 0.36
خاک‌پوش 1	c2	cd 0.35
خاک‌پوش 1	c3	cd 0.32
خاک‌پوش 2	c1	bc 0.39
خاک‌پوش 2	c2	b 0.43
خاک‌پوش 2	c3	a 0.59
خاک‌پوش 3	c1	cd 0.33
خاک‌پوش 3	c2	d 0.32
خاک‌پوش 3	c3	d 0.29
خاک‌پوش 4	c1	c 0.36
خاک‌پوش 4	c2	b 0.43
خاک‌پوش 4	c3	a 0.56
شاهد	c0	b 0.44

* میانگین‌هایی که دارای حرف مشترک هستند در سطح ۵ درصد باهم تفاوت معناداری ندارند.

۳-۳- بررسی روند کلی تغییرات مقاومت برشی در تیمارها

همان‌گونه که از جدول تجزیهٔ واریانس مقاومت برشی مشاهده شد مقادیر مقاومت برشی در برخی از تیمارهای خاک‌پوش زیستی، در سطح ۵ درصد معنادار بودند. بدین‌مفهوم که تنها خاک‌پوش‌های زیستی ۲ و ۴ مورد استفاده در این پژوهش بر مقاومت برشی نسبت به شاهد تأثیر مثبت داشته‌اند. نتایج مدل SAS با در نظر گرفتن اثر دو شدت بارندگی و سه سطح حداقل (C1)، متوسط (C2) و حداکثر (C3)، از خاک‌پوش‌های مورد استفاده، تغییرات مقادیر میانگین مقاومت برشی را به‌صورت جدول ۶ نشان داد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود تیمار خاک‌پوش ۲، بیش‌ترین میزان مقاومت برشی را حاصل نموده و تیمار خاک‌پوش ۳، کم‌ترین میزان مقاومت برشی را طی شبیه‌سازی ایجاد نموده است.



شکل ۸- بررسی بر هم‌کنش A×B×C بر میانگین مقاومت برشی تیمارهای خاک‌پوش زیستی (A= شدت بارندگی، B = نوع تیمارهای خاک‌پوش زیستی و C = سطح مواد مورد استفاده)

Figure 8- Investigating the interaction of A×B×C on the average shear strength of biological soil cover treatments (A= intensity of rainfall, B = type of biological soil cover treatments and C = level of materials used)

جدول ۶- تغییرات مقاومت برشی در تیمارهای مورد بررسی مستخرج از مدل SAS

Table 6- Changes in shear strength in the studied treatments extracted from the SAS model

نام تیمار	میانگین مقاومت برشی (سانتی‌مترمربع/کیلوگرم)
شاهد	0.44
خاک‌پوش 1	0.34
خاک‌پوش 2	0.47
خاک‌پوش 3	0.31
خاک‌پوش 4	0.45

تجزیه و تحلیل آماری نتایج تائید نمود که بین مقادیر رسوب تیمار شاهد و تیمار خاک‌پوش‌ها در سطح پنج درصد تفاوت معنادار وجود دارد، بنابر این خاک‌پوش‌های زیستی نقش موثری در مهار فرسایش و کاهش رسوب از جداره جانبی کانال‌های خاکی داشتند. نتایج این تحقیق با پژوهش Shekofteh (2002) که تأثیر پلی‌آکریل‌آمید بر فرسایش و پایداری خاکدانه‌ها را در سه خاک شن لومی، لومی و لوم رسی، تحت دو بارندگی ۳۹ و ۷۹ میلی‌متر بر ساعت به‌صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار داد، هم‌خوانی دارد. به‌طوری‌که نتایج ایشان نشان داد که کلیهٔ سطوح پلی‌آکریل‌آمید، نسبت به شاهد (خاک لخت) اختلاف معناداری در کاهش مقدار رواناب و رسوب داشته و خاک لوم رسی در شدت بارندگی ۷۹ میلی‌متر بر ساعت بیش‌ترین میزان فرسایش و رسوب و خاک لوم با تیمار ۲۰ کیلوگرم در هکتار پلی‌آکریل‌آمید و شدت بارندگی ۳۹ میلی‌متر بر ساعت کم‌ترین مقدار فرسایش و رسوب را داشته است. Gholami et al. (2012) نیز نشان داد که با افزایش پوشش ایجاد شده توسط خاک‌پوش سطحی؛ انتقال ذرات در اثر دو فرآیند پاشمان و جریان بین شیاری به‌طور خطی کاهش پیدا می‌کند، که این روند کاهشی در نتایج این پژوهش نیز ملاحظه شد.

۳-۴- انتخاب بهترین گزینهٔ فنی و اقتصادی با استفاده از بهینه‌سازی و کمینه‌سازی دو هدفه

با بهینه‌سازی و کمینه‌سازی دو هدفهٔ مقادیر رسوب و هزینه‌های اقتصادی تیمارهای تثبیت‌کننده جدارهٔ جانبی زهکش‌ها، مناسب‌ترین تیمار شناسایی شد. بدین‌منظور ابتدا هزینهٔ تهیهٔ خاک‌پوش‌ها در سال ۱۳۹۶ به‌منظور تثبیت در واحد سطح جدارهٔ جانبی کانال‌های خاکی، بدون در نظرگیری هزینه‌های اجرایی مربوط به پاشش آن‌ها برآورد شد (جدول ۷).

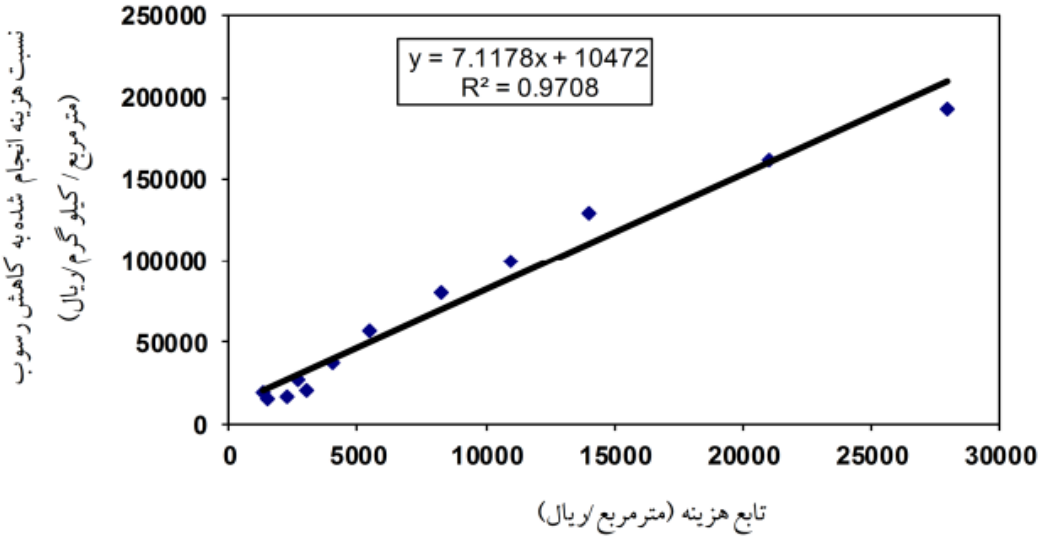
جدول ۷- هزینهٔ تهیهٔ خاک پوش‌ها بمنظور تثبیت جداره جانبی کانال‌های خاکی در واحد مترمربع

Table 7- The cost of preparing soil coverings in order to stabilize the side walls of earthen channels per square meter

نام تیمار	هزینه تثبیت یک مترمربع (ریال)	نام تیمار	هزینه تثبیت یک مترمربع (ریال)
شاهد	0		
خاک‌پوش 1- سطح حداقل	14000	خاک‌پوش 3- سطح حداقل	1350
خاک‌پوش 1- سطح متوسط	21000	خاک‌پوش 3- سطح متوسط	2700
خاک‌پوش 1- سطح حداکثر	28000	خاک‌پوش 3- سطح حداکثر	4050
خاک‌پوش 2- سطح حداقل	1500	خاک‌پوش 4- سطح حداقل	5500
خاک‌پوش 2- سطح متوسط	2250	خاک‌پوش 4- سطح متوسط	8250
خاک‌پوش 2- سطح حداکثر	3000	خاک‌پوش 4- سطح حداکثر	11000

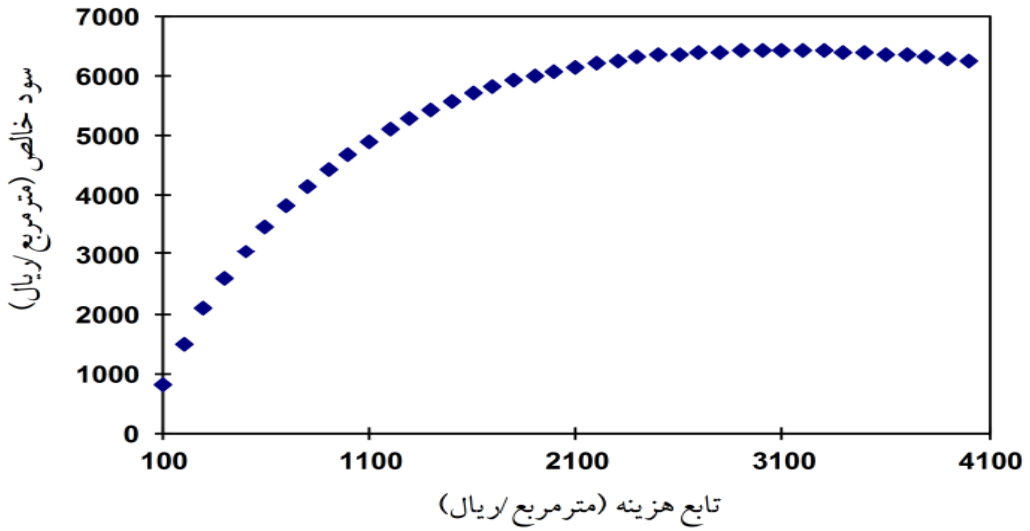
با تعیین و ترسیم رابطهٔ خطی عدم ضرر که در واقع تابع درآمد برابر با سرمایه‌گذاری است، نسبت سود خالص که از اختلاف درآمد (B) و سرمایه‌گذاری (C) حاصل می‌شود، محاسبه و مقدار حداکثر آن به‌عنوان تابع هدف بهینه‌سازی تعیین شد. در پایان حداکثر مقدار در اختلاف درآمد و سرمایه‌گذاری شناسایی و به‌عنوان مقدار بهینهٔ مصرف معرفی شد. بر این اساس رابطهٔ تابع هزینه و نسبت هزینه به کاهش رسوب در تیمارهای خاک‌پوش زیستی، مشتمل بر معادلهٔ خطی حاصله و مقدار ضریب تبیین (R^2) آن در شکل ۹ نشان داده شده است.

از آن‌جایی‌که پژوهش حاضر، به دنبال حداکثر نمودن میزان سود بوده است، بر این اساس مطابق با شکل ۱۰ با توجه به رقومی که بیش‌ترین اختلاف در تابع سود و هزینه آن حاصل شده، و مراجعه به جدول مربوط به هزینه‌های تثبیت هر تیمار (جدول ۷)، خاک‌پوش ۲ در سطح حداکثر، به‌عنوان بهینه‌ترین تیمار از لحاظ فنی و اقتصادی معرفی شد.



شکل ۹- تابع میزان افزایش سود نسبی برحسب هزینهٔ انجام‌شده در خاک‌پوش‌های زیستی

Figure 9- The function of the relative profit increase in terms of the cost incurred in biological soil covers



شکل ۱۰- منحنی تغییرات سود و هزینه در خاک‌پوش‌های زیستی مختلف

Figure 10- The curve of profit and cost changes in different biological soil covers

بسیاری از خاک‌های ایران و به‌ویژه خاک‌های واقع در جدارهٔ جانبی کانال‌های خاکی منطقهٔ مورد پژوهش، شور و قلیا بوده و حاوی درصد قابل‌توجهی آهک غیرفعال، که قابلیت انعقاد خاک را نداشته، و نیز توسط برخورد قطره‌های باران، خاکدانه‌ها تخریب و ذرات خاک از هم جداسازی می‌شود. بر همین اساس، می‌توان با فراهم کردن یک پوشش سطحی، حساسیت به فرسایش و آسیب ناشی از برخورد قطره‌های بارندگی را به حداقل رساند. نتایج پژوهش به عمل آمده نشان داد که خاک‌پوش‌ها و برخی از مواد اصلاح‌کنندهٔ خاک با جذب انرژی قطره‌های بارندگی سبب کاهش اثر ناشی از برخورد قطره‌ها شده، بنابراین از جدا شدن ذرات خاک جلوگیری می‌کنند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش نشان داده شد که اگر سطح خاک کانال با خاک‌پوش‌ها پوشانده شود از میزان فرسایش خاک کاسته شده و انتقال رسوب آن توسط بارندگی، به کم‌ترین مقدار خود می‌رسد که نتیجه آن کم‌تر شدن فرسایش خاک کانال است. نتایج نشان داد که همهٔ تیمارهای چهارگانهٔ خاک‌پوش، در مقایسه با تیمار شاهد (خاک لخت)، در شدت‌های مختلف بارندگی، در سطح ۵ درصد دارای اختلاف معناداری در کاهش رسوب هستند. هم‌چنین مشخص شد که افزایش سطح در تمامی خاک‌پوش‌های مورد استفاده، در کاهش میزان رسوب خروجی تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای داشته است. نتایج نشان داد که خاک‌پوش ۱ حدود هفت برابر نسبت به تیمار شاهد، سبب کاهش رسوب از جدارهٔ کانال‌ها می‌شود. لذا از آن‌جایی‌که خاک‌پوش‌های ۱، ۲ و ۴ از لحاظ آماری در یک گروه قرارگرفته‌اند و تفاوت معناداری در سطح ۵ درصد باهم ندارند، پس از تحلیل‌های اقتصادی و نتایج حاصل از بهینه‌سازی و کمینه‌سازی مقادیر رسوب و هزینه‌های اقتصادی در گروه خاک‌پوش‌های زیستی، خاک‌پوش ۲ در سطح حداکثر به‌عنوان بهترین تیمار در تثبیت جدارهٔ جانبی زهکش‌ها معرفی شد. هم‌چنین مشخص شد که افزایش سطح یا غلظت خاک‌پوش‌های مورد استفاده، به‌طور متوسط تا حدود ۳۸ درصد سبب کاهش میزان رسوب می‌شود. نتایج حاصل از این پژوهش نشان‌گر این واقعیت است که خاک‌پوش در ویژگی‌های فیزیکی خاک و هیدرولوژیکی بستر خاک تأثیر عمده‌ای دارد. نتایج حاصل از این بررسی گرچه در خاک به‌هم‌خورده و با استفاده از شبیه‌سازی باران صورت گرفته است ولی می‌تواند راهنمای خوبی برای تثبیت کانال‌های خاکی باشد. توصیه می‌شود به‌منظور انتخاب بهترین گزینه با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه، با به‌کارگیری روش‌های برنامه‌ریزی خطی و یا غیرخطی، مقادیر فرسایش، رسوب و هزینه‌ها، کمینه‌سازی و مقدار مقاومت برشی خاک بیشینه‌سازی شود.

منابع

اسـدی، ح. (۱۳۸۴). بررسـی فراینـدها و تئوری‌هـای پایـه‌ای مـدل‌های فرآیندی فرسایش خاک. پایان‌نامه دکتری، دانشگاه تهران.

اسکونژاد، م.م. (۱۳۹۴). اقتصاد مهندسی، ارزیابی اقتصادی پروژه‌های صنعتی. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

روحی‌پور، ح.، رهبر، ا.، خاکساریان، ف.، و کریمی، ا. (۱۳۸۸). بررسی تأثیر مواد اصلاحی و خاک‌پوش‌ها (Geogrid) در کاهش رواناب و رسوب در شیب‌های تند با استفاده از شبیه‌سازی باران. گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور. سازمان ترویج، آموزش و تحقیقات کشاورزی. وزارت جهاد کشاورزی.

شکفته، ح. (۱۳۸۰). بررسی ماده شیمیایی پلی‌اکریل‌آمید (PAM) بر فرسایش و پایداری خاکدانه‌ها در حالت خشک و مرطوب. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

شهبازی، ع. (۱۳۸۰). بررسی تأثیر پلی‌اکریل‌آمید بر فرسایش و رواناب خاک‌های شور و سدیمی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

صادقی، س.ح.ر. (۱۳۸۹). مطالعه و اندازه‌گیری فرسایش آبی. انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، ۲۰۰ صفحه.

References

Asadi, H. (2005). Investigating basic processes and theories of soil erosion process models. Ph.D. Thesis, University of Tehran, Tehran, Iran (in Persian).

Sadeghi, S.H.R. (2010). *Study and measurement of water erosion*. Tarbiat Modares University Publications, 200 pages (in Persian).

Adekalu, K.O., Olorunfemi, I.A., & Osunbitan, J.A. (2007). Grass mulching effect on infiltration, surface runoff and soil loss of three agricultural soils in Nigeria. *Bioresource Technology*, 98, 912-917.

Crouch, R.J., & Nouruzi, T. (1989). Threshold condition for rill initiation on a vertisol, Gunedah, N.S.W. Australia. *Catena*, 16, 101-110.

Defersha, M.B., Quraishi, S., & Melesse, A. (2011). The effect of slope steepness and antecedent moisture content on interrill erosion, runoff and sediment size distribution in the highlands of Ethiopia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 2367–2375.

Gholami, L., Sadeghi, S.H.R., & Homaee, M. (2012). Straw mulching effect on splash erosion, runoff, and sediment yield from eroded plots. *Soil Science Society of America Journal*, 77(1), 268-278.

Govers, G., Everaert, W., Poesen, J., Rauws, G., De Ploey, J., & Lautridou, J.P. (2006). A long flume study of the dynamic factors affecting the resistance of a loamy soil to concentrated flow erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 15(4), 313–328.

Gyasi-Agyei, Y., & Willgoose, G.R. (1999). Generalization of a hybrid model for point rainfall. *Journal of Hydrology*, 219 (3-4), 218-224.

Kurien, E.K., Praveena, K.K., Rehna, M., & Shijila, E. (2014). Soil erosion studies on micro plots. *International Journal of Engineering Research and Development*, 9(7), 15-19.

Ouskonejad, M.M. (2014). *Engineering economics, economic evaluation of industrial projects*. Publications of Amirkabir University of Technology (in Persian).

Poesen, J.W.A., & Lavee, H. (1991). Effects of size and incorporation of synthetic mulch on runoff and sediment yield from interrills in a laboratory study with simulated rainfall. *Soil & Tillage Research*, 21(3-4), 209-223.

Rickson, R.J. (1995). Simulated vegetation and geotextiles. Pp. 95-131, In: R.P.C. Morgan and R.J. Rickson (eds.) *Slope Stabilization and Erosion Control: A Bioengineering Approach*, E & FN Spon, London

Romkens, M.J.M., Helming K., & Prasad, S.N. (2001). Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes. *Catena*, 46, 103–123.

Rouhipour, H., Rahbar, A., Khaksarian, F., & Karimi, A. (2010). Investigating the effect of remedial materials and earth covers (Geogrid) on reducing runoff and sediment on steep slopes using rain simulation. The final report of the research project of the Research Institute of Forests and Pastures of the country. Agricultural promotion, education and research organization, Ministry of Agriculture (in Persian).

Ross, A., Sutherland, A., Ziegler, D., & Thomas, W. (1998). Partitioning total erosion on unpaved roads into splash and hydraulic components: The roles of interstorm surface preparation and dynamic erodibility. *Water Resources Research*, 36(9), 2787–2791.

Shahbazi, A. (2001). Investigating the effect of polyacrylamide on the erosion and runoff of saline and sodium soils. M.Sc. Thesis, University of Tehran, Tehran, Iran (in Persian).

Shekofteh, H. (2002). Investigating the chemical substance polyacrylamide (PAM) on the erosion and stability of soil grains in dry and wet conditions. M.Sc. Thesis, University of Tehran, Tehran, Iran (in Persian).

Abdul, R.S. (2014). Experimental study on slope erosion control with technology of straw fiber

closing layer. S*SRG International Journal of Civil Engineering*, 1(4), 25-32.

Abdul, R.S., Pallu, M.S., Patanduk, J., & Harianto, T. (2014). Experimental study of rainfall intensity effects on the slope erosion rate for silty sand soil with different slope gradient. *International Journal of Engineering and Technology*, 4(1), 58-63.