

Research Article

Agricultural Engineering.,44(2) (2021)159-174  
DOI: 10.22055/AGEN.2021.30253.1499

ISSN (P): 2588-526X  
ISSN (E): 2588-5944

## Effect of bentonite clay and slope on sediment concentration and some flow hydraulic characteristics on a loess soil in Golestan province

M. Bameri<sup>1</sup>, F. Kiani<sup>2\*</sup>, F. Khormali<sup>3</sup> and H. Kheirabadi<sup>4</sup>

1. M.Sc Student, Department of Soil Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
2. Associate Professor of Soil Science, Department of Soil Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
3. Professor of Soil Science, Department of Soil Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
4. Islamic Azad University of Gorgan, Young Researchers and Elite Club, Gorgan, Iran.

Received: 10 July 2021

Accepted: 2 August 2021

### Abstract

**Introduction:** Soil is an essential part of the environment. It is important for the production of food and other crops. Soil erosion and sedimentation are complicated and least well-known environmental problems worldwide (Mahmoodabadi et al, 2014). Recently, the application of compounds that modify and improve soil quality and also reduce soil erodibility has been more thoroughly researched. These compounds are known by the common name of soil amendments with a relatively high variety such as gypsum, basanite, zeolite, chemical amendments, organic additives, a variety of chemical, biological and composite polymers, soiltac, fungi, polyvinyl acetate, vermicompost and cattle manure, biochar, straw mulching and cyanobacteria and bacteria (Behzadfar et al, 2017). The objective of this study was to investigate the influence of bentonite clay and slope gradient on runoff and sediment concentration and some hydraulic Characteristics in the Loess soil using a rainfall simulator.

**Materials and Methods** The experiments were conducted using a rainfall simulator at the Soil Erosion and Conservation Laboratory, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran. The soil used for the experiments is taken from the surface layer (0-30 cm depth) of loess lands from Golestan province (37° 55' N and 55° 29' E). The soil sample at first was air-dried, thoroughly mixed and then crushed to pass through 10 mm sieve size. Experiments were done as factorial based on the completely randomized design with three replications. The factors were the bentonite clay at four level (0, 2, 5 and 10 % weight) and slope steepness at three level (10, 20 and 30%). In all experiments, each soil sample was put in the flume, then was saturated from the bottom for 24 h. Afterward, the drainage water was removed out of the tray, and the experiment lasted for 45 min. For each rainfall event, the sediment-laden overland flow was sampled at selected time intervals and volumetrically measured. The sediment-laden overland flow was sampled at several time intervals and the sediment concentration was determined. Different hydraulic parameters including flow depth, shear stress, stream power, and unit stream power were measured.



**Results and Discussion:** The result showed that the sediment concentration decreased with increasing levels bentonite at all slopes. At 10 % slope steepness, the mean sediment concentration varied 32.48 in the control treatment to 24.67 kg m<sup>-3</sup> at level 3 bentonite treatment. At 30% slope the corresponding values were 474.52 and 224.14 kg m<sup>-3</sup>. Therefore, with increasing slope steepness the sediment concentration increased. The use of bentonite at level 10 % weight could decrease 46% of sediment concentration in comparison with control treatment. Defersha and Melesse (2012) found that rain intensity and slope gradient had significant influences on sediment concentration. The slope gradient is important as more soil particles are splashed down-slope than up-slope (Dunne et al. 2010; Grismer 2012). According to Fig. 2, the obtained flow depth was  $1.92 \times 10^{-4}$ ,  $1.92 \times 10^{-4}$ ,  $1.92 \times 10^{-4}$  and  $1.92 \times 10^{-4}$  m for 0, 2, 5, 10% clay treatment, respectively. Also, the depth flow ranged from  $3.6 \times 10^{-4}$  to  $1.96 \times 10^{-4}$  m on 10 to 30 % slopes. The depth of flow decreased with increasing slope steepness for all treatments. In fact, due to higher flow velocities at steeper slopes, shallower flow depths were achieved. Statistical analysis (Table 2) confirmed significant positive main effects of application levels of bentonite and slope on shear stress, power flow and unit power flow. The clay treatment showed significant reductions ranging from 2 to 50% compared to the control treatment for all slopes. Unit stream power varied from 0.0084 to 0.0095 ms<sup>-1</sup>, 0.0176 to 0.0241 ms<sup>-1</sup> and 0.030 to 0.057 ms<sup>-1</sup> for 10, 20 and 30 % slope, respectively. Totally, with increasing slope steepness, all the hydraulic parameters, except flow depth, increased. While with an increasing percentage of bentonite clay, shear stress and depth flow and stream power, decreased. Consequently, the maximum values were observed at the steepest slope (30 %) and control treatment (0%).

**Conclusion:** Based on the results obtained during the present study, it can be concluded that the bentonite can be considered as an effective modifier of soil physicochemical properties leading to better performance in soil and water conservation in loess lands.

**Keywords:** *Bentonite, simulator rain, slope, sediment concentration, hydraulic characteristics*

## تأثیر رس بنتونیت بر غلظت رسوب رواناب و برخی پارامترهای هیدرولیکی جریان در یک خاک لسی در استان گلستان

منصوره بامری<sup>۱</sup>، فرشاد کیانی<sup>۲\*</sup>، فرهاد خرمالی<sup>۳</sup>، حسین خیرآبادی<sup>۴</sup>

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران
- ۲- دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران
- ۳- استاد گروه علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران
- ۴- عضو باشگاه پژوهشگران جوان دانشگاه آزاد اسلامی گرگان، ایران

### تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۹

پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۰۵/۱۱

### کلمات کلیدی:

بنتونیت،

شیب‌ساز باران، شیب،

غلظت رسوب،

پارامترهای هیدرولیکی

### چکیده

پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر شیب بستر و بنتونیت بر غلظت رسوب و برخی پارامترهای هیدرولیکی جریان در یک خاک لسی در استان گلستان با استفاده از شبیه‌ساز باران صورت گرفت. آزمایش‌ها به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی از طریق ایجاد باران با شدت ثابت ۸۰ میلی‌متر در ساعت با چهار سطح بنتونیت (صفر، ۲، ۵ و ۱۰ درصد وزنی) و سه سطح شیب (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) در سه تکرار انجام شد. نتایج آنالیز آماری نشان داد که دو عامل درصد رس و شیب بستر بر غلظت رسوب و پارامترهای هیدرولیکی مورد مطالعه جریان ( $p < 0.01$ ) اثر معنی‌داری داشت. با افزایش درصد رس بنتونیت و شیب، غلظت رسوب به ترتیب کاهش و افزایش معنی‌داری ( $p < 0.05$ ) را نشان داد. غلظت رسوب در تیمارهای ۲، ۵ و ۱۰ درصد وزنی بنتونیت به طور میانگین به ترتیب ۱۸، ۱۹ و ۴۵ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش نشان داد. عمق جریان با افزایش شیب کاهش نشان داد و از  $3/06 \times 10^{-4}$  متر در شیب ۱۰ درصد به  $1/96 \times 10^{-4}$  متر در شیب ۳۰ درصد کاهش یافت. تأثیر تیمار رس بر پارامترهای تنش برشی و قدرت جریان کاهشی بود در حالی که بر پارامتر قدرت جریان واحد افزایشی بود. همچنین با افزایش شیب، پارامترهای مذکور افزایش نشان دادند. یافته‌های این پژوهش نشان داد که رس بنتونیت می‌تواند به عنوان یک اصلاح‌کننده موثر بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک در نظر گرفته شده و منجر به حفاظت بهتر در آب و خاک اراضی لسی گردد.

\* عهده دار مکاتبات

Email: kiani@gau.ac.ir

## مقدمه

در چند دهه اخیر، خاک در اثر عوامل انسانی (از قبیل جنگل زدایی، چرای بیش از حد، مدیریت ناصحیح اراضی و غیره) و همچنین عوامل طبیعی (فرسایش آبی و بادی) از بین رفته است. فرسایش خاک یکی از مشکلات اصلی تهدید کننده کشاورزی پایدار و کیفیت محیط زیست به خصوص برای مناطق خشک و نیمه خشک جهان و ایران به شمار می رود (۲۶، ۲۹). همچنین یکی از مهمترین عوامل تخریب اراضی محسوب می شود (۲۰، ۴۲). بنابراین، فرسایش خاک به عنوان یک مسئله اصلی زیست محیطی و تخریب خاک شناخته شده است که باعث کاهش باروری خاک و آلودگی منابع آب و خاک می شود. از این رو بررسی فرآیندها و فاکتورهای تاثیر گذار بر فرسایش خاک از نظر مدیریت منابع آب و خاک بسیار ضروری می باشد (۴۵).

طی فرآیند فرسایش، ذرات خاک از بستر اصلی خود جدا شده و به کمک عوامل فرساینده شامل آب یا باد به مکان دیگری انتقال می یابند. برای مقابله با این پدیده ابتدا بایستی فرآیندهای مرتبط با آن شناسایی شود (۳۵). یکی از روش های بررسی فرسایش خاک استفاده از شبیه سازهای باد و باران می باشد، که برای مطالعه فرآیندهای فرسایش آبی از شبیه سازهای باران استفاده می شود (۲۵). فناوری شبیه سازی باران یک ابزار مفید در تحقق اهداف پژوهشی می باشد که برای ایجاد بارندگی بر روی کرت ها به شیوه ای که برخی ویژگی های بارندگی طبیعی را داشته باشد به کار می رود (۱). از دهه ۱۹۳۰ میلادی و به موازات توسعه مدل های هیدرولوژیکی، بسیاری از پژوهشگران شبیه سازی بارش و ساخت انواع مختلفی از شبیه سازها را برای کمک به جمع آوری داده ها درباره فرسایش خاک، نفوذ پذیری، رواناب سطحی و انتقال رسوب را شروع کردند (۱، ۱۷، ۱۸، ۳۰). مزیت استفاده از شبیه سازهای باران جمع آوری سریع داده ها در شرایط نسبتاً یکسان و امکان مطالعه تحت

شرایط کنترل شده و قابلیت تکرار آزمایش ها در یک دوره زمانی کوتاه می باشد (۳۰). میزان جداسازی ذرات در اثر این فرسایش تابعی از ویژگی های خاک و ویژگی های هیدرولیکی جریان است (۳۹). پارامترهای اصلی مؤثر بر جداسازی و انتقال ذرات در جریان سطحی شامل شیب، سرعت و عمق جریان می باشند (۱۰، ۱۳). همچنین تنش برشی جریان نقشی اساسی در ظهور و گسترش فرسایش خاک دارد. با افزایش تنش برشی آب، قدرت آب در کندن خاک بیش تر می شود (۹). شروع حرکت ذرات در نتیجه وارد شدن تنش برشی جریان ناشی از باران به ذرات است (۱۵). بررسی تغییرات تنش برشی و سایر متغیرهای هیدرولیکی جریان جزء اصول اولیه در بررسی زیر فرآیندهای فرسایش آبی و به بیان دیگر فرسایش های ورقه ای، بین شیری و شیری است (۲۳). از سوی دیگر زمانی که قدرت جریان کمتر از مقاومت برشی توده خاک باشد فرسایش ورقه ای اتفاق می افتد. در نتیجه ذرات حساس تر از سطح خاک به صورت انتخابی جابجا می شوند (۳۹).

در سال های اخیر، استفاده از ترکیباتی که کیفیت خاک را بهبود می بخشند و همچنین باعث کاهش فرسایش پذیری خاک می شوند، بیشتر مورد بررسی و پژوهش قرار گرفته است (۳۶). این ترکیبات با نام مشترک اصلاح کننده های خاک در انواع گوناگون شناخته می شوند که از قبیل گچ (۲۴)، باسانیت<sup>۱</sup> (۱۹) زئولیت، بنتونیت (۳)، اصلاح کننده های شیمیایی (۴۴)، افزودنده های آلی، انواع مختلف پلی مرهای شیمیایی، بیولوژیکی و کامپوزیتی (۳۸)، خاکستر، قارچ، پلی وینیل استات، ورمی کمپوست و کود حیوانی، بیوجار، سیانوباکتری ها و باکتری ها (۲۱) می باشد. در این راستا، استفاده از بنتونیت و زئولیت ها به طور جدی توسط پژوهشگران به عنوان یکی از چندین گزینه برای استفاده

بررسی برخی فرآیندهای موثر بر فرسایش خاک‌های لسی و همچنین تاثیر رس بتونیت بر میزان کاهش فرسایش خاک و پارامترهای هیدرولیکی جریان صورت گرفت.

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش، از یک دستگاه شبیه‌ساز باران از نوع تحت فشار متعلق به آزمایشگاه فرسایش و حفاظت خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان استفاده شد. دستگاه شبیه‌ساز باران مذکور از اجزای اصلی زیر تشکیل شده است: نازل در ارتفاع ۲/۵ متری از سطح زمین و محفظه جمع‌آوری آب اضافی خارج شده از نازل و هدایت آن به داخل مخزن، سیستم کنترل و برنامه‌ریزی نازل، سیستم تامین آب که از یک مخزن پی وی سی ۱۰۰ لیتری تشکیل شده است، پمپ با جریان ورودی مستقیم که آب را از مخزن به نازل انتقال می‌دهد، شیر کنترل کننده میزان فشار به سمت نازل، فشار سنج برای نشان دادن میزان فشار آب خروجی نازل‌ها و لوله پلاستیکی هدایت آب از مخزن به نازل و بالعکس می‌باشد. همچنین از یک دستگاه فلوم شیب‌پذیر در ابعاد ۱×۲ متر برای قرار دادن نمونه‌های خاک به منظور بررسی فرسایش استفاده شد.

قبل از استفاده باران ساز، دستگاه واسنجی شد. به منظور واسنجی آن از ظروف پلاستیکی با حجم مشخص و مدرج استفاده شد (به گونه ای که همه سطح فلوم را پوشش داده شد). سپس دستگاه در فواصل زمانی ۱۰ دقیقه‌ای در فشارهای مختلف آب شروع به کار نمود. ضریب یکنواختی بارش دستگاه با استفاده از ضریب یکنواختی کریستین سن بیش از ۸۵ درصد به دست آمد.

### نمونه‌برداری و آنالیز خاک

یک نمونه خاک سطحی (۰-۳۰ سانتی متری) از اراضی لسی شهرستان مراوه تپه (۵۵° ۳۷' شمالی و ۲۹° ۵۵' شرقی) استان گلستان تهیه و به آزمایشگاه منتقل شد و در معرض هوا خشک گردید. سپس از الک ۱۰ میلی‌متر عبور داده شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه خاک، طبق روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد. بافت به روش

برای حفاظت از منابع آب و خاک مورد توجه قرار گرفته است. در همین زمینه پروغنی و همکاران<sup>۱</sup> (۴) بیان کردند که افزودن نانوزئولیت به خاک‌های مارنی تاثیر قابل توجهی در کاهش فرسایش خاک نداشته است، علت عدم کارآیی آن در کاهش فرسایش خاک را، مقدار کم نانوزئولیت استفاده شده و هم چنین عدم واکنش نانوزئولیت با آب و خاک بیان کردند. بهزادفر و همکاران<sup>۲</sup> (۳) استفاده از کانی‌های رسی برای کنترل فرسایش خاک در مراتع شیب‌دار و تخریب شده که خاک سطحی در معرض بارندگی و رواناب را توصیه کردند. می و همکاران<sup>۳</sup> (۳۱) بیان کردند که افزودن بتونیت به خاک باعث افزایش نگه داشت آب و خاک، رطوبت خاک و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می‌شود. بتونیت یک کانی موثر از خانواده آلومینوسیلیکات‌ها است که اصلاح و بهبود کننده خصوصیات هیدروفیزیکی خاک آن اثبات شده است. کاربرد بتونیت در انواع مختلف صنایع و کشاورزی شناخته شده است.

خاک‌های لسی از نظر آب قابل استفاده و تهویه، به دلیل داشتن سیلت فراوان و تخلخل مناسب، از شرایط مطلوبی برخوردار هستند. از مشخصه‌های لس‌ها وجود ذرات سیلت به مقدار زیاد، جورشدگی خوب، فقدان لایه‌بندی ساختار توده‌ای، و وجود مقدار زیادی کربنات کلسیم است (۶). همچنین به دلیل ماهیت ساختمانی و فراوانی ذرات سیلت، املاح شیمیایی (کربنات کلسیم) و رس کم، میزان فرسایش در لس‌ها بالاست؛ در صورت مدیریت نامناسب، حساس-ترین خاک‌ها به فرسایش می‌باشند (۵). به طوری که میزان فرسایش سالانه در برخی زیرحوضه‌های گرگانرود استان گلستان به بیش از ۲۰ تن در هکتار در سال نیز می‌رسد که بخش عمده‌ای از آن به صورت فرسایش سطحی و خندقی است. با توجه به اینکه وسعت خاک‌های لسی استان گلستان بیش از ۳۰۰۰ کیلومتر مربع می‌باشد، این مطالعه با هدف

1- Boroghani *et al.*

2- Behzadfar *et al.*

3- Mi *et al.*

شیب بر حسب متر بر متر و  $D$ ، عمق جریان بر حسب متر است (۳۳). قدرت جریان با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد.

$$\Omega = \rho g D S V \quad (3)$$

که در آن،  $\Omega$ ، قدرت جریان (وات بر مترمربع) است.  $V$  سرعت جریان بر حسب متر بر ثانیه است. همچنین، قدرت جریان واحد (متر بر ثانیه) از رابطه (۴) زیر تعیین شد (۲۸).

$$U = VS \quad (4)$$

آزمایش‌ها به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی شامل فاکتور اول رس بتونیت و فاکتور دوم درصد شیب بود. تیمارها شامل چهار سطح مختلف رس بتونیت (صفر، ۲، ۵ و ۱۰ درصد وزنی) و سه درصد شیب (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) و در شدت ثابت باران ۸۰ میلی متر در ساعت هر یک در سه تکرار انجام شد. به منظور تجزیه واریانس، داده‌های به دست آمده با استفاده از نرم افزار SPSS ۱۶ مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. همچنین، مقایسه میانگین از طریق آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. ترسیم شکل‌ها با استفاده از نرم افزار Excel انجام گردید.

### نتایج و بحث

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود میزان شوری خاک زیاد و کربن آلی آن کم است و همچنین درصد سیلت آن نسبت به شن و رس بیشتر است و بافت خاک در کلاس سیلتی لوم می‌باشد. میزان سیلت در خاک مورد مطالعه دو برابر میزان شن و رس بود. همچنین برخی خصوصیات بتونیت در جدول ۲ ارائه شده است.

نتایج حاصل از تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که سطوح مختلف رس و شیب بر غلظت رسوب و ویژگی‌های هیدرولیکی جریان (عمق و قدرت جریان، تنش برشی، قدرت جریان واحد) در سطح احتمال یک درصد اثر معنی‌داری داشت. همچنین تاثیر متقابل سطوح مختلف رس و شیب بر غلظت رسوب، تنش برشی و قدرت جریان واحد معنی‌دار شده است (جدول ۳).

هیدرومتری (۱۲)، اسیدیته خاک در گل اشباع توسط دستگاه pH متر، هدایت الکتریکی در عصاره اشباع خاک با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی (۳۴)، درصد کربن آلی به روش والکلی و بلک (۴۳) و ظرفیت تبادل کاتیونی به روش اسات آمونیوم اندازه‌گیری شد. همچنین رس بتونیت از معدن رس درین کاشان به صورت پودر تهیه شد.

### انجام آزمایش‌ها

به منظور انجام آزمایش‌ها، هر نمونه خاک به همراه تیمار رس مورد نظر به سینی متصل به فلوم منتقل و سطح آن با دقت تسطیح شد، سپس اشباع تدریجی هر نمونه از زیر انجام شده و نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در حالت اشباع نگهداری شد. پس از تخلیه زهکش، شیب مورد نظر تنظیم و در ادامه باران با شدت ثابت ۸۰ میلی متر در ساعت بر روی تیمار مورد مطالعه اعمال گردید. با توجه به زمان رسیدن به شرایط پایدار، مدت زمان برای انجام هر آزمایش ۴۵ دقیقه در نظر گرفته شد. در هر آزمایش رواناب حاوی رسوب خروجی از فلوم هر پنج دقیقه یک بار جمع‌آوری شد. پس از پایان هر آزمایش، نمونه‌های حاوی رواناب و رسوب با ترازوی دیجیتال توزین شدند و سپس درون قوطی‌های فلزی با وزن مشخص ریخته شدند. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در آون قرار داده شدند و بعد از خشک شدن دوباره توزین انجام شد. وزن رسوب و رواناب به دست آمد. برخی از پارامترهای هیدرولیکی جریان طبق معادلات ذیل محاسبه شد. سرعت جریان به روش رنگ سنجی اندازه‌گیری شد و عمق جریان طبق رابطه (۱) محاسبه شد.

$$D = q/V \quad (1)$$

که  $q$  شدت جریان واحد در واحد عرض جریان و  $V$  سرعت جریان است. تنش برشی از طریق رابطه (۲) محاسبه شد.

$$\tau = \rho g D S \quad (2)$$

که در آن،  $\tau$ ، تنش برشی (پاسکال)،  $\rho$ ، چگالی مخصوص آب،  $g$ ، شتاب گرانش (متر بر مجذور ثانیه)،  $S$ ،

جدول (۱) برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد پژوهش

Table (1) Some physical and chemical properties of the studied soil.

مقدار Value	واحد Unite	پارامتر Parameter
24.2	dS.m <sup>-1</sup>	هدایت الکتریکی (EC)
7.28	-	اسیدیته (pH)
16.54	Cmol(+)/kg	ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)
0.195	%	کربن آلی (OC)
23.48	%	شن (Sand)
50.67	%	سیلت (Silt)
25.85	%	رس (Clay)
15.25	%	کربنات کلسیم (CaCO <sub>3</sub> )
Silty loam	-	کلاس بافتی ( ) Textural class (USDA)

CEC: Cation Exchange Capacity

جدول (۲) برخی از خصوصیات بنتونیت مورد استفاده

Table(2) Some properties of the used bentonite

مقدار Value	واحد Unite	پارامتر Parameter
75	Cmol kg <sup>-1</sup>	ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)
1.05	dS m <sup>-1</sup>	هدایت الکتریکی (EC)
132	%	شاخص خمیری (PI)
35.5	%	حد خمیری (PL)
167.54	%	حد روانی (LL)

جدول (۳) نتایج تجزیه واریانس عوامل مؤثر بر پارامترهای هیدرولیکی جریان

Table(3) The results of analysis of variance of factors affecting on hydraulic parameters flow

قدرت جریان واحد Unit stream power	تنش برشی Shear stress	قدرت جریان Stream power	عمق جریان Depth flow	غلظت رسوب Sediment concentration	درجه آزادی Degree of freedom	منابع تغییرات Source of Variation
1.73×10 <sup>-4</sup> **	0.0689**	1.32×10 <sup>-4</sup> **	0.0178**	14365.7**	3	رس (A) Clay
4.21×10 <sup>-3</sup> **	0.228**	3.3×10 <sup>-3</sup> **	0.0403**	327862**	2	شیب (B) Slope
1.21×10 <sup>-4</sup> **	0.03**	4.3×10 <sup>-4</sup> ns	0.0051 <sup>ns</sup>	10687.1**	6	A*B
1.6×10 <sup>-5</sup>	0.0055	2.8×10 <sup>-5</sup>	0.00277	1206.5	24	خطا Error
15.44	16.88	10.35	21.78	20.79	-	ضریب تغییرات Coefficient Variation

\* و \*\* به ترتیب معنی دار در سطح ۵ و ۱ درصد، ns غیر معنی دار

\* and \*\* significant at 0.05 and 0.01 probability level; respectively; ns: non significant.

### غلظت رسوب رواناب

در شکل ۱ اثر متقابل درصد رس و شیب بر متوسط غلظت رسوب رواناب نشان داده شده است. در میزان رس ثابت با افزایش شیب، غلظت رسوب به طور معنی-داری در سطح ۵ درصد افزایش یافته است. به طوری که در تیمار شاهد، غلظت رسوب رواناب در شیب‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد به ترتیب برابر با ۳۲/۴۸، ۱۷۲/۴۵ و ۴۷۴/۵۲ کیلوگرم در متر مکعب و در تیمار ۱۰ درصد وزنی رس بنتونیت برای شیب‌های مذکور به ترتیب برابر با ۲۴/۶۶، ۹۲/۷۹ و ۲۲۴/۱۴ کیلوگرم در متر مکعب به دست آمد. از سوی دیگر می‌توان بیان کرد که با افزایش دو و سه برابری شیب، غلظت رسوب رواناب به طور میانگین ۵ و ۱۴ برابر افزایش می‌یابد. در همین زمینه دفرشا و ملیس<sup>۱</sup> (۷) و ارجمندسجادی و محمودآبادی (۳۹) بیان کردند که درجه شیب تاثیر قابل توجهی بر میزان غلظت رسوب دارد. اهمیت درجه شیب بسیار مهم است به طوری که ذرات خاک بیشتری از بالای شیب به سمت پایین شیب پاشمان می‌شوند (۸، ۱۴). در حقیقت، می‌توان بیان نمود که درجه شیب تاثیر قابل توجهی بر میزان هدررفت ذرات خاک به صورت پاشمان به سوی پایین شیب و در نتیجه پاشمان کل دارد.

از سوی دیگر در هر شیب ثابت، با افزایش میزان رس بنتونیت متوسط غلظت رسوب روند کاهشی نشان داد. به طوری که در شیب ۱۰ درصد، غلظت رسوب رواناب برای صفر، ۲، ۵ و ۱۰ درصد وزنی رس بنتونیت به ترتیب برابر با ۳۲/۴۸، ۱۸/۶۴، ۱۹/۰۱ و ۲۴/۶۷ کیلوگرم بر متر مکعب به دست آمد. در شیب ۳۰ درصد، غلظت رسوب در تیمارهای ۲، ۵ و ۱۰ درصد وزنی رس بنتونیت نسبت به تیمار شاهد (صفر درصد) به ترتیب برابر با ۳۱/۸۳، ۲۲/۱۷ و ۵۲/۷۶ درصد کاهش مشاهده شد. این یافته‌ها با نتایج گایلانی و همکاران<sup>۲</sup> (۱۱)

مطابقت دارد. آن‌ها بیان نمودند که با افزایش بنتونیت به خاک‌ها به ویژه خاک شنی، میزان فرسایش و در نتیجه غلظت رسوب کاهش یافت. آنها دلیل این امر را خواص بنتونیت ذکر کردند. ایوبی و همکاران<sup>۳</sup> (۲) گزارش کردند که استفاده از رس بنتونیت باعث افزایش پایداری خاکدانه‌ها و همچنین خاکدانه‌سازی می‌شود که در نتیجه باعث کاهش فرسایش خاک می‌شود. مرگان<sup>۴</sup> (۳۲) بیان داشت که پخش نمودن کانی‌های رسی با ظرفیت تبادل کاتیونی بالا برای روی سطح خاک از طریق ایجاد یک لایه نسبتاً محافظ از خاک سطحی در برابر فرسایش پاشمانی به عنوان نقطه شروع فرآیندهای فرسایش محافظت نماید و در نتیجه به طور قابل ملاحظه‌ای هدر رفت خاک را کاهش می‌دهد. بهزادفر و همکاران<sup>۳</sup> (۳) گزارش کردند که زئولیت به طور قابل توجه‌ای هدر رفت خاک را کاهش می‌دهد و می‌تواند به عنوان یک اصلاح کننده موثر در شرایطی که خاک در معرض باران و رواناب به خصوص مراتع شیب دار و تخریب شده استفاده شود.

### تاثیر رس و شیب بر برخی پارامترهای هیدرولیکی جریان

در شکل ۲ اثر درصد رس اضافه شده به خاک بر عمق جریان نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲، با افزایش سطح رس، عمق جریان به طور معنی‌داری ( $p < 0.05$ ) کاهش یافته است. به طوری که، مقدار عمق جریان در تیمار صفر، ۲، ۵ و ۱۰ درصد وزنی رس بنتونیت به ترتیب برابر  $2/19 \times 10^{-4}$ ،  $2/65 \times 10^{-4}$ ،  $2/91 \times 10^{-4}$  و  $1/92 \times 10^{-4}$  متر مشاهده شد. صادقی و همکاران<sup>۵</sup> (۳۷) بیان داشتند که افزودن اصلاح کننده بیوجار به خاک باعث کاهش قابل توجه در حجم رواناب تولیدی می‌شود. همچنین سپاسخواه و جهرمی (۴۰) در بررسی اثرات سطوح مختلف اصلاح کننده خاک در شیب‌های

3- Ayoubi *et al.*

4- Morgan

5- Sadeghi *et al.*

1- Defersha and Melesse

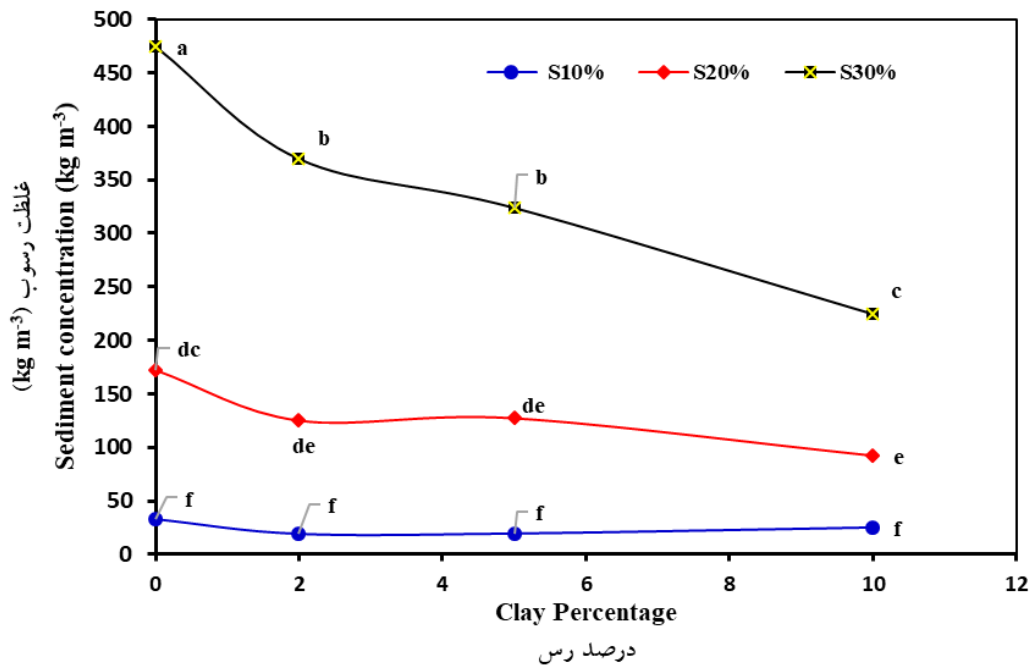
2- Gailani *et al.*



میزان عمق جریان به طور معنی داری ( $p < 0.05$ ) کاهش یافته است. مقدار عمق جریان برای شیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد به ترتیب برابر با  $۳/۰۶ \times 10^{-۴}$ ،  $۲/۲۲ \times 10^{-۴}$ ،  $۱/۹۶ \times 10^{-۴}$  متر به دست آمد. در حقیقت، به دلیل سرعت جریان بیشتر در شیب‌های بالاتر، جریان‌های با عمق کمتر بدست می‌آید.

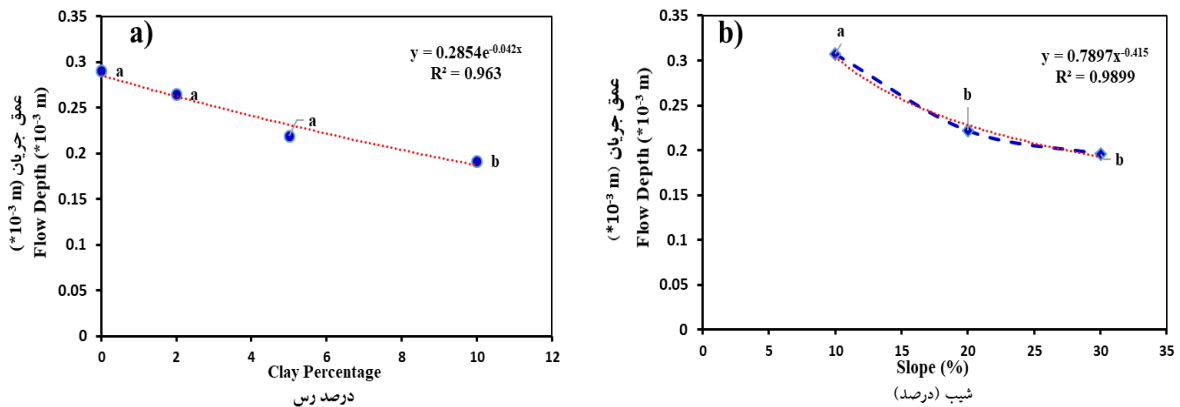
مختلف با استفاده از باران‌ساز بیان داشتند که در شیب‌های تند (۷/۵ درصد) مقدار ۶ کیلوگرم در هکتار اصلاح کننده خاک باعث کاهش قابل توجهی در میزان رواناب تولیدی می‌شود.

طبق شکل ۲، بین شیب و عمق جریان یک رابطه عکس برقرار است به طوری که با افزایش شیب فلووم



شکل (۱) تاثیر سطوح مختلف بنتونیت و شیب بر غلظت رسوب

Figure (1) Effects of various levels of bentonite and slopes on sediment concentration



شکل (۲) تاثیر سطوح مختلف رس بنتونیت (a) و شیب (b) بر عمق جریان

Figure(2) Effects of various levels bentonite clay (a) and slopes (b) on flow depth

از سوی دیگر در هر شیب ثابت، با افزایش میزان رس بنتونیت، تنش برشی جریان کاهش نشان داد. به طوری که در شیب ۱۰ درصد، تنش برشی جریان در تیمارهای ۲، ۵ و ۱۰ درصد وزنی رس بنتونیت نسبت به تیمار شاهد به ترتیب ۹، ۱۹ و ۳۵ درصد، در شیب ۲۰ درصد به ۲، ۱۵ و ۳۴ درصد و در شیب ۳۰ درصد برای تیمارهای مذکور به ترتیب ۳۴، ۳۹ و ۵۰ درصد کاهش نشان داد. این یافته ها با نتایج ژو و همکاران<sup>۲</sup> (۴۶) و لوی و همکاران<sup>۳</sup> (۲۷) مطابقت دارد. آنها بیان کردند که افزودن اصلاح کننده ها به خاک باعث افزایش نفوذپذیری خاک و کاهش عمق جریان، در نتیجه موجب کاهش تنش برشی جریان می گردد.

تاثیر مقادیر مختلف رس اضافه شده به خاک بر میزان قدرت جریان رواناب در شکل ۴ نشان داده شده است. به طور کلی با افزایش میزان رس، قدرت جریان به طور معنی دار ( $p < 0.05$ ) کاهش می یابد. به طوری که قدرت جریان رواناب برای تیمارهای شاهد، ۲، ۵ و ۱۰ درصد وزنی رس به ترتیب برابر ۰/۰۵۲، ۰/۰۵۵، ۰/۰۵۰ و ۰/۰۴۶ وات بر مترمربع بدست آمد. با توجه به شکل ۴، بین تیمارهای شاهد و ۲ و ۵ درصد وزنی رس و بین تیمارهای ۵ و ۱۰ درصد وزنی از نظر قدرت جریان تفاوت معنی داری وجود ندارد. از سوی دیگر، مطابق شکل ۴، با افزایش شیب قدرت جریان به طور معنی داری افزایش می یابد. حداقل قدرت جریان در شیب ۱۰ درصد برابر با ۰/۰۲۴۳ وات بر مترمربع و حداکثر قدرت جریان در شیب ۳۰ درصد برابر با ۰/۰۸۱۳ وات بر مترمربع بدست آمد. به طوری که با افزایش شیب از ۱۰ به ۲۰ درصد قدرت جریان حدود دو برابر می شود یعنی با دو برابر شدن شیب، قدرت

این نتایج با یافته های ارجمند ساجدی و محمودآبادی (۳۹) همخوانی داشت که بیان داشتند با افزایش شیب، به دلیل افزایش سرعت جریان، عمق به طور معنی داری کاهش می یابد. از سوی دیگر کینل<sup>۱</sup> (۲۲) دریافت که حضور یک لایه آب بر روی سطح خاک می تواند موجب هدر رفت انرژی جنبشی قطرات باران شود. در حقیقت، افزایش عمق جریان باعث کاهش میزان رسوب جابجا شده توسط جریان و در نتیجه منجر به کاهش غلظت رسوب می گردد. همچنین ارجمند ساجدی و محمودآبادی (۳۹) یک رابطه غیرخطی بین غلظت رسوب و عمق جریان را گزارش کردند.

در شکل ۳ تاثیر میزان رس افزوده شده به خاک و همچنین اثر شیب بر تنش برشی جریان ارائه شده است. با توجه به شکل، به طور کلی با افزایش شیب، تنش برشی جریان افزایش یافت. در تیمار شاهد، تنش برشی جریان در شیب های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد به ترتیب برابر با ۰/۳۶۳، ۰/۴۹۹ و ۰/۸۳۷ پاسکال و در تیمار ۱۰ درصد وزنی رس بنتونیت، تنش برشی جریان برای شیب های مذکور به ترتیب برابر با ۰/۲۱۹، ۰/۳۲۶ و ۰/۴۱۷ پاسکال بدست آمد. همچنین در تیمار ۲ درصد وزنی رس بنتونیت، با افزایش شیب از ۱۰ به ۲۰ و ۳۰ درصد به ترتیب ۵۰ و ۶۶ درصد و در تیمار ۱۰ درصد وزنی به ترتیب ۴۴ و ۷۲ درصد افزایش نشان داد. سیرجانی و محمودآبادی (۴۱) نشان داد در دو نوع خاک با بافت لوم رسی و لوم رسی شنی، با افزایش تنش برشی، شدت جدا شدن با افزایش شیب به صورت خطی و معنی دار افزایش می یابد و از آنجایی که خاک لوم رسی شنی از ذرات ریز و ناپایدارتری تشکیل شده است، شدت جدا شدن در آن بیشتر است.

2- Zhu et al.

3- Levy et al.

1- Kinnell

در پژوهشی که توسط محمودآبادی و ارجمند سجادی (۳۹) انجام شد مشخص گردید که با افزایش شیب، غلظت رسوب افزایش پیدا می‌کند و از طرفی این پژوهشگران بیان کردند رابطه مستقیم و غیرخطی بین غلظت رسوب و قدرت جریان واحد وجود دارد.

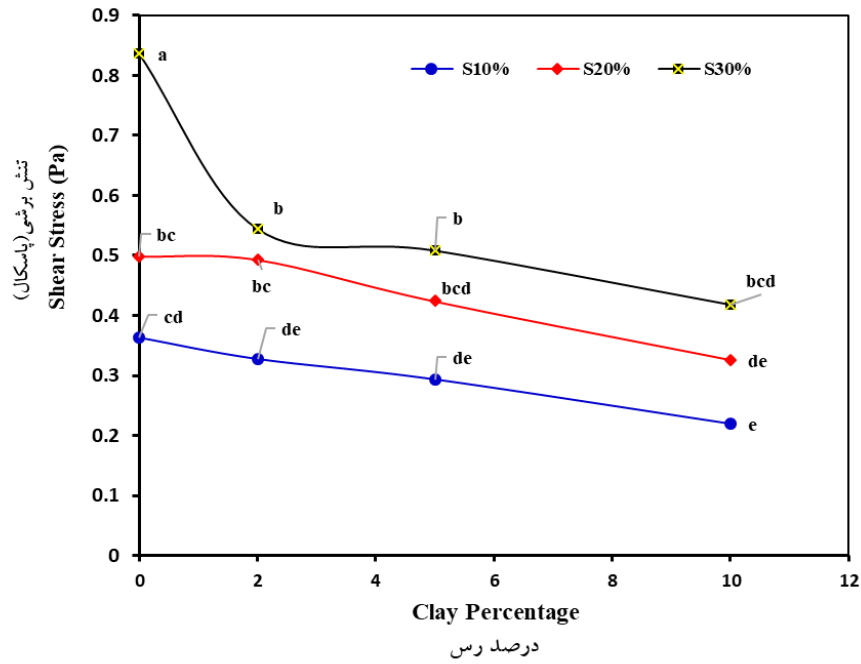
همچنین در میزان رس ثابت در شیب‌های ۱۰ و ۲۰ درصد اختلاف معنی‌داری مشاهده نمی‌شود ولی در شیب ۳۰ درصد در همه درصدهای وزنی رس اختلاف معنی‌داری مشاهده می‌شود. در شیب ۱۰ درصد، قدرت جریان واحد برای تیمارهای صفر، ۲، ۵ و ۱۰ درصد وزنی رس بنتونیت به ترتیب برابر با ۰/۰۰۸۴، ۰/۰۰۶۸، ۰/۰۰۸۸ و ۰/۰۰۹۵ متر بر ثانیه به دست آمد. همچنین در شیب ۲۰ درصد قدرت جریان واحد در تیمارهای ۲، ۵ و ۱۰ درصد وزنی رس بنتونیت نسبت به تیمار شاهد به ترتیب برابر با ۳۰/۱۱، ۲۱/۷۹ و ۳۶/۸۱ درصد افزایش و برای شیب ۳۰ درصد ترتیب برابر با ۶۲/۵۱، ۸۶/۰۷ و ۳۸/۴۲ درصد افزایش مشاهده شد. همچنین شیخ و یانگ<sup>۳</sup> (۱۶) بیان داشتند قدرت جریان واحد یک فاکتور غالب برای برآورد ظرفیت فرسایش جریان‌های سطحی در بین همه پارامترهای هیدرولیکی است.

جریان نیز دو برابر افزایش می‌یابد. همچنین با سه برابر شدن شیب یعنی افزایش شیب از ۱۰ به ۳۰ درصد، قدرت جریان نیز حدود سه برابر افزایش می‌یابد.

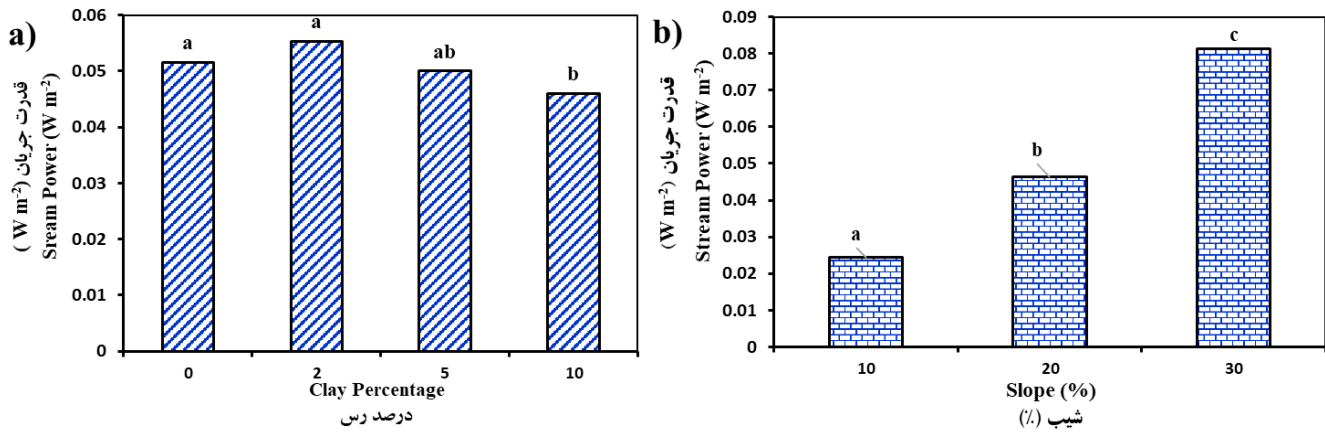
در همین زمینه سیرجانی و محمودآبادی<sup>۱</sup> (۴۱) بیان نمودند که شدت جدا شدن ذرات را می‌توان به عنوان تابعی از درصد شیب، دبی جریان و قدرت جریان توصیف نمود. همچنین با افزایش قدرت جریان که ناشی از افزایش شیب و دبی جریان می‌باشد، شدت فرسایش به طور معنی‌داری افزایش می‌یابد. در پژوهشی محمودآبادی و همکاران<sup>۲</sup> (۲۸) بیان کردند که با افزایش قدرت جریان، ظرفیت جداسازی ذرات به صورت خطی و ظرفیت حمل رسوب به صورت غیرخطی افزایش یافت. ولی نسبت ظرفیت جداسازی به حمل رسوب با افزایش قدرت جریان، کاهش می‌یابد.

شکل ۵ تأثیر متقابل تیمارهای رس بنتونیت و شیب را بر متوسط قدرت جریان واحد را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود در میزان رس ثابت با افزایش شیب، قدرت جریان واحد افزایش می‌یابد. به طوری که، برای شیب‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد قدرت جریان واحد در تیمار شاهد به ترتیب برابر با ۰/۰۸۴۶، ۰/۰۱۷۶ و ۰/۰۳۰۹ متر بر ثانیه و در تیمار ۲ درصد وزنی رس، به ترتیب برابر با ۰/۰۶۸۹، ۰/۰۲۳۰ و ۰/۰۵۰۲ متر بر ثانیه، در تیمار ۵ درصد وزنی رس بنتونیت به ترتیب ۰/۰۰۸۸، ۰/۰۲۱۵ و ۰/۰۵۷۵ متر بر ثانیه و در تیمار ۱۰ درصد وزنی رس به ترتیب برابر با ۰/۰۰۹۵، ۰/۰۲۴۱ و ۰/۰۴۲۸ متر بر ثانیه بدست آمد (شکل ۵).

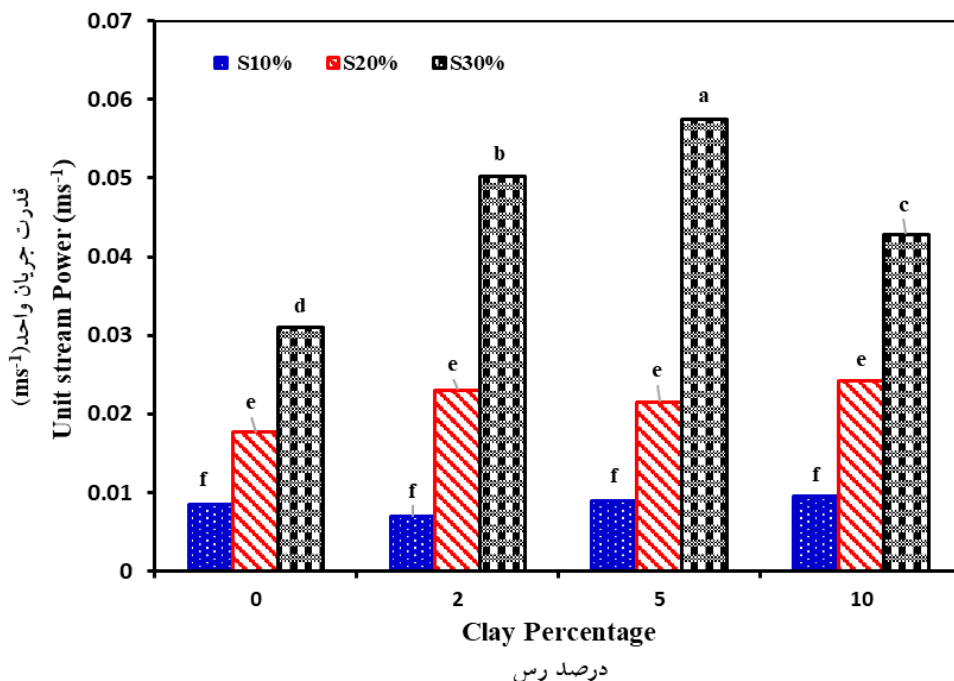
بامری و همکاران: تاثیر رس بنتونیت بر غلظت رسوب رواناب و...



شکل (۳) تاثیر سطوح مختلف رس بنتونیت و شیب بر تنش برشی  
 Figure (3) Effects of various levels bentonite clay and slopes on shear stress



شکل (۴) تاثیر سطوح مختلف رس بنتونیت و شیب بر قدرت جریان  
 Figure (4) Effects of various levels bentonite clay and slopes on stream power



شکل (۵) تاثیر سطوح مختلف رس بنتونیت و شیب بر قدرت جریان واحد

Figure (5) Effects of various levels bentonite clay and slopes on unit stream power

معنی داری افزایش نشان داد. همچنین تاثیر تیمارهای رس بنتونیت بر پارامترهای هیدرولیکی جریان نشان داد که تنش برشی جریان، قدرت جریان، قدرت جریان واحد و عمق جریان در اثر اعمال مقادیر مختلف رس بنتونیت کاهش نشان دادند. یافته‌های این پژوهش نشان دهنده این است که می‌توان از رس بنتونیت در مدیریت رواناب و کاهش فرسایش و ایجاد تصمیمات اجرایی بهره برد. هر چند جمع‌بندی نهایی منوط به انجام پژوهش‌های گسترده‌تر از نقطه نظر کاربرد شدت‌های مختلف بارش، سایر سطوح کاربرد بنتونیت و خاک‌های مختلف می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

رس بنتونیت به عنوان اصلاح‌کننده خاک با ایجاد چسبندگی، بخش فوقانی خاک را در مقابل عوامل گوناگون حفظ می‌کند و به عنوان عایقی در جلوگیری از تغییرات ناگهانی دما و حفظ رطوبت خاک موثر می‌باشد و می‌تواند فرسایش را تا حدی کنترل نمایند. رس بنتونیت به دلیل ویژگی‌های خاصی از جمله، شکل-پذیری، چسبندگی و جذب آب می‌تواند در کنترل فرسایش خاک موثر باشد. یافته‌های این پژوهش نشان داد افزودن رس بنتونیت به خاک لسی باعث کاهش قابل توجه در غلظت رسوب می‌گردد. در نتیجه باعث کاهش فرسایش خاک به خصوص در خاک‌های لسی می‌گردد. در حالی که با افزایش شیب، غلظت رسوب به طور

## References

1. Abudi, I., Carmi, G., and Berliner, P. 2012. Rainfall simulator for field runoff studies. *Journal of Hydrology*. 454: 76-81.
2. Ayoubi, S., Feizi, Z., Mosaddeghi, M.R., and Besaltpour, A.A. 2018. Investigating the application of biochar, bentonite clay and polyvinyl acetate polymer on some mechanical properties of sand deposits. *Scientific Journal Management System*. 41(2): 83-97.
3. Behzadfar, M., Sadeghi, S.H., Khanjani, M.J., and Hazbavi, Z. 2017. Effects of rates and time of zeolite application on controlling runoff generation and soil loss from a soil subjected to a freeze-thaw cycle. *International Soil and Water Conservation Research*. 5(2): 95-101.
4. Boroghani, M., Mirnia, S.K., Vahhabi, J., and Ahmadi, S.J. 2014. Investigation of nanozeolite effects on soil erosion decreasing using FEL3 rainfall simulator. *Journal of Watershed Management Research*. 5 (9): 95-106. (in Persian with English abstract)
5. Cao, L., Zhang, K., Dai, H., and Liang, Y. 2015. Modeling interrill erosion on unpaved roads in the loess plateau of China. *Land Degradation & Development*. 26(8): 825-832.
6. Catt, J. 2001. The agricultural importance of loess. *Earth-Science Reviews*. 54(1-3): 213-229.
7. Defersha, M.B. and Melesse, A.M. 2012. Effect of rainfall intensity, slope and antecedent moisture content on sediment concentration and sediment enrichment ratio. *Catena*. 90: 47-52.
8. Dunne, T., Malmon, D.V., and Mudd, S.M. 2010. A rain splash transport equation assimilating field and laboratory measurements. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 115(1): 18-28.
9. Foroumadi, M. and Vaezi, A.R. 2018. Flow Characteristics and Rill Erodibility in Relation to the Rainfall Intensity in a Marl Soil. *Iran-Watershed Management Science & Engineering*. 12: 11-22. (in Persian with English abstract).
10. Fu, S., Liu, B., Liu, H., and Xu, L. 2011. The effect of slope on interrill erosion at short slopes. *Catena*. 84(1-2): 29-34.
11. Gailani, J., Jin, L., McNeil, J., and Lick, W., 2001. Effects of Bentonite Clay on Sediment Erosion Rates. Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg MS Engineer Research.
12. Gee, G.W. and Or, D. 2002. 2.4 Particle-size analysis. *Methods of soil analysis*. Part. 4(598): 255-293.
13. Giménez, R. and Govers, G. 2002. Flow detachment by concentrated flow on smooth and irregular beds. *Soil Science Society of America Journal*. 66(5): 1475-1483.
14. Grismer, M. 2012. Standards vary in studies using rainfall simulators to evaluate erosion. *California Agriculture*. 66(3): 102-107.
15. Hubert, C., 2004. *The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction*. Elsevier Butterworth-Heinemann.
16. Hui-Ming, S. and Yang, C.T. 2009. Estimating overland flow erosion capacity using unit stream power. *International Journal of Sediment Research*. 24(1): 46-62.
17. Iserloh, T., Fister, W., Seeger, M., Willger, H., and Ries, J. 2012. A small portable rainfall simulator for reproducible experiments on soil erosion. *Soil and Tillage Research*. 124: 131-137.

18. Iserloh, T., Ries, J., Arnáez, J., Boix-Fayos, C., Butzen, V., Cerdà, A., Echeverría, M., Fernández-Gálvez, J., Fister, W., and Geißler, C. 2013. European small portable rainfall simulators: A comparison of rainfall characteristics. *Catena*. 110: 100-112.
19. Kamei, T., Ahmed, A., and Shibi, T. 2012. Effect of freeze–thaw cycles on durability and strength of very soft clay soil stabilised with recycled Bassanite. *Cold Regions Science and Technology*. 82: 124-129.
20. Kheirabadi, H., Mahmoodabadi, M., Jalali, V., and Naghavi, H. 2018. Sediment flux, wind erosion and net erosion influenced by soil bed length, wind velocity and aggregate size distribution. *Geoderma*. 323: 22-30.
21. Kheirfam, H., Sadeghi, S.H., Homaei, M., and Darki, B.Z. 2017. Quality improvement of an erosion-prone soil through microbial enrichment. *Soil and Tillage Research*. 165: 230-238.
22. Kinnell, P. 2010. Comment on" A new splash and sheet erosion equation for rangelands". *Soil Science Society of America Journal*. 74(1): 340.
23. Knapen, A., Poesen, J., Govers, G., Gyssels, G., and Nachtergaele, J. 2007. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. *Earth-Science Reviews*. 80(1-2): 75-109.
24. Kumar, A. and Saha, A. 2011. Effect of polyacrylamide and gypsum on surface runoff, sediment yield and nutrient losses from steep slopes. *Agricultural Water Management*. 98(6): 999-1004.
25. Lassu, T., Seeger, M., Peters, P., and Keesstra, S.D. 2015. The Wageningen rainfall simulator: Set-up and calibration of an indoor nozzle-type rainfall simulator for soil erosion studies. *Land Degradation & Development*. 26(6): 604-612.
26. Leh, M., Bajwa, S., and Chaubey, I. 2013. Impact of land use change on erosion risk: an integrated remote sensing, geographic information system and modeling methodology. *Land Degradation & Development*. 24(5): 409-421.
27. Levy, G., Levin, J., and Shainberg, I. 1995. Polymer effects on runoff and soil erosion from sodic soils. *Irrigation Science*. 16(1): 9-14.
28. Mahmoodabadi, M., Ghadiri, H., Rose, C., Yu, B., Rafahi, H., and Rouhipour, H. 2014. Evaluation of GUEST and WEPP with a new approach for the determination of sediment transport capacity. *Journal of Hydrology*. 513: 413-421.
29. Mandal, D. and Sharda, V. 2013. Appraisal of soil erosion risk in the Eastern Himalayan region of India for soil conservation planning. *Land Degradation & Development*. 24(5): 430-437.
30. Meyer, L., 2017. Rainfall simulators for soil erosion research, in *Soil erosion research methods*, Routledge. 83-104.
31. Mi, J., Gregorich, E.G., Xu, S., McLaughlin, N.B., Ma, B., and Liu, J. 2017. Effect of bentonite amendment on soil hydraulic parameters and millet crop performance in a semi-arid region. *Field Crops Research*. 212: 107-114.
32. Morgan, R.P.C. 2009. *Soil erosion and conservation*. John Wiley & Sons.
33. Nearing, M., Norton, L., Bulgakov, D., Larionov, G., West, L., and Dontsova, K.M. 1997. Hydraulics and erosion in eroding rills. *Water Resources Research*. 33(4): 865-876.
34. Page, A. 1965. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America. pp. 181-223.
35. Refahi, H.G. 2006. *Water erosion and conservation*. University of Tehran, Iran, 671p. (In Persian).

36. Sadeghi, S. and Hazbavi, Z. 2016. Watershed health assessment based on soil loss using reliability, resilience and vulnerability framework. in *Proceedings of 19th PSSST Annual Meeting and Scientific Conference, Legaspi City, Albay*.
37. Sadeghi, S.H., Hazbavi, Z., and Harchegani, M.K. 2016. Controllability of runoff and soil loss from small plots treated by vinasse-produced biochar. *Science of the Total Environment*. 541: 483-490.
38. Sadeghi, S.H., Hazbavi, Z., Younesi, H., and Bahramifar, N. 2016. Trade-off between runoff and sediments from treated erosion plots and polyacrylamide and acrylamide residues. *Catena*. 142: 213-220.
39. Sajjadi, S.A. and Mahmoodabadi, M. 2015. Sediment concentration and hydraulic characteristics of rain-induced overland flows in arid land soils. *Journal of Soils and Sediments*. 15(3): 710-721.
40. Sepaskhah, A. and Bazrafshan-Jahromi, A. 2006. Controlling runoff and erosion in sloping land with polyacrylamide under a rainfall simulator. *Biosystems Engineering*. 93(4): 469-474.
41. Sirjani, E. and Mahmoodabadi, M. 2012. Study on flow erosivity indicators for predicting soil detachment rate at low slopes. *International Journal of Agricultural Science, Research and Technology*. 2(2): 55-61.
42. Sirjani, E. and Mahmoodabadi, M. 2014. Effects of sheet flow rate and slope gradient on sediment load. *Arabian Journal of Geosciences*. 7(1): 203-210.
43. Walkley, A. and Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37(1): 29-38.
44. Wang, H.Q., Zhao, Q., Zeng, D.H., Hu, Y.L., and Yu, Z.Y. 2015. Remediation of a magnesium-contaminated soil by chemical amendments and leaching. *Land Degradation & Development*. 26(6): 613-619.
45. Zhang, K., Zhang, W., Tan, L., An, Z., and Zhang, H. 2015. Effects of gravel mulch on aeolian transport: a field wind tunnel simulation. *Journal of Arid Land*. 7(3): 296-303.
46. Zhu, X., Risse, L., McCutcheon, S., Tollner, E., Rasmussen, T., and West, L. 2010. Laboratory investigation of rill erosion on compost blankets under concentrated flow conditions. *Transactions of the ASABE*. 53(4): 1077-1086.