

## بررسی اثر بار رسوب و بافت خاک بر خصوصیات هیدرولیکی جریان در فرسایش شیاری شبیه‌سازی

شده

نسرین صادقیان\*<sup>۱</sup>، علیرضا واعظی<sup>۲</sup>، ابوالفضل مجنونی هریس<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۷/۰۱

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۹/۲۵

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم خاک دانشگاه زنجان، زنجان

۲- استاد گروه علوم خاک دانشگاه زنجان، زنجان

۳- دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز، تبریز

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیک: sadeghiannasrin@yahoo.com

### چکیده

شیارها به‌عنوان منبع و محل تولید و انتقال رواناب و رسوب روی دامنه‌ها می‌باشند. خصوصیات جریان در شیارها می‌تواند تحت تأثیر نوع و میزان مواد همراه باشد. آگاهی از فرآیند توسعه شیارها مستلزم شناخت خصوصیات هیدرولیکی جریان در شیارها می‌باشد. این پژوهش به منظور بررسی اثرات بار رسوب بر خصوصیات هیدرولیکی جریان در شیارها انجام گرفت. آزمایش در فلومی به ابعاد  $3/0 \times 4/0 \times 4 \times 0/4$  متر در شیب ۱۰ درصد در خاک‌های با بافت لوم، شن لومی و لوم رس شنی تحت بارش با شدت ۹۰ میلی‌متر بر ساعت در چهار تکرار انجام شد. عدد رینولدز، عدد فرود، ضریب اصطکاک دارسی-ویسباخ، عمق جریان، تنش برشی و قدرت جریان طی فرآیند فرسایش شیاری مشخص شدند. نتایج نشان داد که ضریب اصطکاک دارسی-ویسباخ با افزایش بار رسوب افزایش یافت. عدد فرود با افزایش بار رسوب به دلیل کاهش چشمگیر سرعت جریان کاهش یافت. تنش و قدرت برشی و عمق جریان نیز با افزایش بار رسوب افزایش داشتند. عمق جریان با افزایش بار رسوب بیشتر شد و در خاک لوم از  $0/41$  تا  $1$  میلی‌متر و در خاک شن لومی از  $0/07$  تا  $1/3$  میلی‌متر و در خاک لوم رس شنی از  $0/06$  تا  $0/7$  میلی‌متر بود. ضریب تبیین بین بار رسوب و تمام خصوصیات هیدرولیکی برای دو خاک لوم و شن لومی بالاتر از ۹۰ درصد ارزیابی شد ولی برای خاک لوم رس شنی حدود ۶۰ درصد بود. به طور کلی این پژوهش نشان داد که برهم‌کنشی معنی‌دار بین بار رسوب و خصوصیات هیدرولیکی جریان در شیارها برقرار است.

واژه‌های کلیدی: بار رسوب، فرسایش شیاری، هیدرولیک جریان شیاری، رواناب.

## Investigating Effect of Sediment Load and Soil Texture on Flow Hydraulic characteristics of a Simulated Rill Erosion

N Sadeghian<sup>1\*</sup>, AR vaezi<sup>2</sup>, A Majnooni heris<sup>3</sup>

Received: August 23, 2017 Accepted: December 16, 2018

<sup>1</sup>P.h.D. Student in Soil Science Dept. of Soil Science, Univ. of Zanjan, Iran

<sup>2</sup>Prof, Dept. of Soil Science, Univ. of Zanjan, Iran

<sup>3</sup>Assoc. Prof, Dept. of Water Engineering, Univ. of Tabriz, Iran

\*Corresponding Author, E - mail Address: sadeghiannasrin@yahoo.com

### Abstract

Rills are often the major area and source of runoff and sediment in hillslopes. The hydraulic characteristics of flow in the rills can be affected by type and amount of sediment. Knowledge on the flow hydraulic characteristics is essential to find the major mechanism of rill development. The objective of this study was to evaluate the effects of type and amount of sediment on the rill hydraulic characteristics. Laboratory experiments were carried out in a flume with 4m×0.4 m×0.3m dimensions located at 9% slope steepness under 90 mm h<sup>-1</sup> rainfall intensity which was applied on three soil textures of loam, loamy sand and sandy clay loam with four replications. Reynolds number, Froude number, flow depth, Darcy-Weisbach friction coefficient, shear stress and stream power were determined during the rill erosion process. The results showed that Reynolds number and Darcy-Weisbach friction coefficient increased as the sediment load increased in the rills. Froude number decreased as sediment load increased which was attributed with decreasing flow velocity. Shear stress and stream power and flow depth increased with increasing the eroded sediment. Flow depth increased with increase of sediment load, varying from 0.041 to 1mm in loam soil, 0.07 to 1.3 mm in loamy sand soil and 0.06 to 0.7 mm in sandy clay loam soil. Coefficient of determination between sediment load and all hydraulic characteristics were higher than 90% for loam and loamy sand and higher than 60% for sandy clay loam. This study revealed that significant interaction was between sediment load and hydraulic characteristics of flow in the rills.

**Keywords:** Sediment load, Soil erosion; Hydraulic of rill flow; Run off

### مقدمه

در خاکهای فرسایش‌پذیر دارای شیب نسبتاً تند، بیشتر مشهود است (پرینس و همکاران ۱۹۹۲). فرسایش شیاری یک فرآیند مهم در تولید رسوب و هدررفت خاک بوده که اغلب در زمین‌های تحت کشت صورت می‌گیرد. این فرسایش، نخستین شکل فرسایش آبی ناشی از جریان متمرکز<sup>۱</sup> است. زمانی که آب از بالادست به پایین دست شیب حرکت می‌کند، به تدریج در فرورفتگی‌های سطح زمین جمع می‌شود. پس از پر شدن فرورفتگی‌ها، آب از لبه پایین آن با حجم زیاد جریان پیدا کرده، آبراهه‌هایی در سطح زمین به وجود می‌آید. به این آبراهه‌ها که در اثر شخم به‌آسانی از بین

فرسایش خاک به‌عنوان فرایند برداشت و انتقال ذرات خاک توسط عامل فرساینده تعریف می‌شود. این پدیده یکی از عوامل اصلی تخریب اراضی بوده و باعث کاهش تولیدات کشاورزی می‌شود. گزارش‌ها نشان می‌دهد سالانه در جهان ۱۰ میلیون هکتار از زمین‌های زیر کشت به دلیل فرسایش خاک غیرقابل استفاده می‌شوند (آزوت و همکاران ۱۹۹۳). این مسئله می‌تواند تهدیدی جدی برای امنیت غذایی و زیست محیطی پیش روی بشر محسوب شود (اورسوالد و همکاران ۲۰۰۹). یکی از بارزترین اشکال فرسایش آبی در کشت‌زارهای دیم، فرسایش شیاری است. این نوع فرسایش به‌ویژه

<sup>1</sup> Concentrated flow

می‌روند، فرسایش شیاری گفته می‌شود (نیرینگ و همکاران ۱۹۹۷). هدررفت خاک سطحی و عناصر غذایی به وسیله فرسایش شیاری علاوه بر کاهش حاصلخیزی خاک، موجب پر شدن مخازن سدها و کاهش کیفیت آب می‌شود (ویینگ و همکاران ۲۰۱۵). فرسایش خاک در بارش شدید، از حالت پاشمانی یا سطحی سریعاً به فرسایش شیاری تبدیل می‌شود (وود وارد ۱۹۹۹، دی استفانو و همکاران ۲۰۱۳). با توجه به اینکه ظرفیت انتقال ذرات خاک در جریان متمرکز بسیار بیشتر از قطرات باران است، شیارهای حاصل از شخم در زمین-های شیب‌دار می‌تواند موجب تجمع جریان و افزایش تولید رسوب در این نواحی شود (گیلی و همکاران ۱۹۹۰). مشخصات فرسایش در شیارها کاملاً متفاوت از سطوح بین شیاری می‌باشد (ویرتز و همکاران ۲۰۱۲).

تمایز بین فرآیند فرسایش بین‌شیاری که ناشی از کنده شدن ذرات توسط انرژی قطرات باران است و فرآیند فرسایش شیاری که ناشی از انرژی رواناب است، حائز اهمیت است (برایان ۲۰۰۱). انرژی رواناب به دبی و ویژگی‌های هیدرولیکی جریان وابسته است و این ویژگی‌ها، به نوبه خود به خصوصیات سطح خاک، میکروتوپوگرافی و پوشش گیاهی بستگی دارد. خصوصیات هیدرولیکی جریان و عوامل مؤثر بر آن به منظور مدل‌سازی فرسایش شیاری حائز اهمیت است. دبی جریان و شیب معمولاً در محاسبه‌ی شدت برداشت و ظرفیت انتقال ذرات خاک به کار می‌روند (ژانگ و همکاران ۲۰۰۹). شدت برداشت خاک و انتقال خاک تحت تأثیر سرعت و دبی جریان است. ژانگ و همکاران (۲۰۰۲) در آزمایش خود به این نتیجه رسیدند که همبستگی بین شدت برداشت خاک و سرعت جریان بیشتر از همبستگی بین برداشت خاک با دبی جریان بود. قدرت جریان، تنش برشی و عمق جریان متغیرهای هیدرولیکی رایج برای محاسبه شدت برداشت و انتقال خاک هستند (ژانگ و همکاران ۲۰۰۳). بار رسوب و خصوصیات جریان ممکن است تحت تأثیر یکدیگر قرار

بگیرند. اثر بار رسوب بر عدد رینولدز و عدد فرود کاملاً متفاوت است، عدد فرود به بار رسوب حساس‌تر می‌باشد (شی و یانگ ۲۰۰۹). برخی مطالعات نشان داده‌اند که بار رسوب اثر ناچیزی بر سرعت جریان دارد (بیوس لینک و همکاران ۱۹۹۹). مقاومت جریان در شیارها تابعی از رژیم جریان است، به طوری که در جریان آرام و خطی تابع عدد رینولدز و در جریان انتقالی تابعی از عدد رینولدز و زبری بستر و در جریان متلاطم فقط تابع زبری بستر است (اسمیت و همکاران ۲۰۰۷). روشان و همکاران (۱۳۹۷) در آزمایش خود به این نتیجه رسیدند که برداشت شن و ماسه از بستر رودخانه در بازه مورد نظر موجب ایجاد فرسایش بستر، برهم ریختگی لایه‌های رسوبی و تغییر در بیلان رسوبی می‌شود. میرازی و همکاران (۲۰۱۷) در بررسی ضرایب دارسی-ویسباخ و مانینگ در یک خاک لسی در پوشش‌های مختلف سنگریزه در شرایط آزمایشگاهی به-این نتیجه رسیدند که با افزایش پوشش سنگریزه سطحی ضریب دارسی-ویسباخ به‌طور نمایی و ضریب مانینگ به‌طور خطی افزایش یافت.

مطالعات هیدرولیکی جریان‌های سطحی در آبراهه عمیق نشان می‌دهد که انرژی قطرات باران تأثیری ناچیز بر عمق جریان آب دارد ولی به شدت با تأثیر بر حجم و آشفتگی جریان، هیدرولیک جریان‌های کم عمق را تحت تأثیر قرار می‌دهد (ویینگ و همکاران ۲۰۱۵). ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در طول مسیر جریان به دلیل تغییرات عمق جریان یا شرایط بستر جریان به شدت تغییر می‌کند که هر دو این عوامل در اثر فرایندهای فروپاشی خاکدانه‌ها و انتقال انتخابی آنها توسط جریان (انتقال ترجیحی خاکدانه‌های ریز نسبت به خاکدانه‌های درشت)، تورم کانی‌های رس، تشکیل سله و شکاف در خاک تحت تأثیر قرار می‌گیرند (برایان ۲۰۰۱). عمق جریان در شیارها معمولاً کمتر بوده و در حد چندین سانتی‌متر می‌باشد. این شرایط باعث می‌شوند که شیارها شرایط هیدرولیکی متفاوت از آنچه که

بر کانال‌های جریان و رودخانه‌ها حاکم است، داشته باشند. شیارها معمولاً به‌طور فعال در حال فرسایش هستند و شکل ظاهری آنها در مقیاس زمانی کوتاه تغییر می‌کند. شکل ظاهری شیار در یک زمان مشخص وابسته به زبری، عرض و عمق شیار می‌باشند که اینها نیز تابع مواد فرساینده، شدت رواناب و ساختمان پیشین شیار هستند (نیرینگ و همکاران ۱۹۹۷).

نیرینگ و همکاران (۱۹۹۷) در آزمایشی که بر روی دو نوع خاک (لوم سیلتی و لوم شنی) و شن همگن در شرایط آزمایشگاهی و مزرعه‌ای انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که قدرت جریان شاخص مناسبی برای بار رسوب واحد است. اثر بار رسوب بر خصوصیات هیدرولیکی جریان سطحی پیچیده و وابسته به مشخصات جریان و رسوب و شرایط سطح بستر می‌باشد. برخی مطالعات نشان دادند که نیمرخ سرعت جریان حامل رسوب با افزایش بار رسوب تغییر می‌کند (گوی و همکاران ۲۰۰۹). در آزمایش ژانگ و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند که که عدد رینولدز و عدد فرود هر دو با افزایش بار رسوب کاهش می‌یابد در حالی که تأثیر خصوصیات هیدرولیکی جریان بر آن در نقاط مختلف دنیا انجام گرفته است. در برخی مطالعات، جریان آب عامل ظهور شیار و فرسایش شیار بوده است و در مطالعات بسیاری از شیارهای دست‌ساز برای بررسی خصوصیات جریان بر هدررفت خاک از شیار استفاده شده است (پنگ و همکاران، ۲۰۱۵، اسدی و همکاران، ۲۰۱۵، نییرینگ و همکاران، ۱۹۹۷). نوارهای کشت دیم رفتاری شبیه شیارهای دست‌ساز دارند و خصوصیات جریان و هدررفت خاک از آنها متفاوت با کانل‌های آب می‌باشد به هر حال اطلاعات محدودی در مورد اثر بار رسوب و بافت خاک بر خصوصیات هیدرولیکی جریان در شیارهای کشت موجود است. از سوی دیگر تاکنون چنین مطالعاتی در خاک‌های منطقه‌ی نیمه خشک که غالباً توسعه ساختمانی ضعیف دارند، انجام نگرفته است. هم‌چنین

عمق جریان و ضریب اصطکاک داریسی- ویسباخ با افزایش بار رسوب افزایش پیدا می‌کند، که نشان دهنده- ی افزایش مصرف انرژی با افزایش بار رسوب می‌باشد.

کشتزارهای دیم واقع در اراضی شیبدار از جمله مکان‌های وقوع فرسایش شیار می‌باشند. متأسفانه به دلیل محدود شدن عرض زمین‌های زراعی و آسانی عملیات خاکورزی، شخم در بسیاری از کشتزارهای دیم به موازات شیب انجام می‌شود. با شخم موازی شیب، شیارهای مصنوعی در امتداد شیب ایجاد می‌شود که به هنگام بارندگی محل تمرکز جریان‌های آب است. تولید جریان متمرکز و وقوع فرسایش خاک در شیارها به عوامل متعددی از جمله شیب زمین، شدت بارندگی و ویژگی‌های خاک وابسته است. خصوصیات هیدرولیکی جریان نیز به نوبه خود متأثر از بار رسوب منتقله می‌باشد. شناخت برهمکنش بین خصوصیات هیدرولیکی جریان و بار رسوب پیش‌زمینه‌ای برای مدل‌سازی هدررفت خاک از شیارها در اثر جریان متمرکز است. تاکنون مطالعات متعددی در مورد فرسایش شیار و ارتباط بین توزیع اندازه ذرات منتقله در فرسایش شیار و بار رسوب در مطالعات پیشین مورد بررسی دقیق قرار نگرفته است با آگاهی از نوع ذرات منتقله در فرسایش شیار و ارتباط آن با بار رسوب و نقش خصوصیات جریان در بار رسوب می‌توان به پیش‌بینی دقیق‌تری از فرسایش شیار دست یافت. این پژوهش با هدف بررسی بافت خاک، بار رسوب و بر خصوصیات هیدرولیکی جریان در خاک‌های با بافت مختلف در منطقه نیمه‌خشک انجام گرفت.

#### مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و اندازه‌گیری خصوصیات خاک برای انجام این آزمایش سه نوع خاک با بافت‌های متفاوت از سه منطقه مختلف استان زنجان با مختصات جغرافیایی ۱۵° ۴۸' ۳۹" طول شرقی و ۵۷° ۶۸' ۳۶" عرض شمالی برای خاک شن لومی، ۱۹° ۳۹' ۴۸" طول

هدف از ایجاد چنین شیارهایی شبیه‌سازی شرایط آزمایش با شرایط خاکورزی جهت شیب در اراضی دیم بود. شدت باران برابر با ۹۰ میلی‌متر در ساعت بود. چنین بارانی جزء رگبارهای شدید در منطقه می‌باشد که فراوانی وقوع اندکی دارد. با این وجود این باران‌ها نقشی اساسی در هدررفت زیاد آب و خاک طی سال در دامنه‌های تحت فرسایش شیاری دارند (رستمی ۱۳۹۱). در هر رخداد باران شبیه‌سازی شده، مقدار رواناب و رسوب خارج شده از فلوم به‌طور پیوسته در فواصل زمانی مختلف تا دستیابی به جریان ماندگار اندازه‌گیری شد (رومرو و همکاران ۲۰۰۷)، رسوبات موجود در نمونه‌های رواناب جمع آوری شده بعد از چهار ساعت ته‌نشین شدند. پس از ته‌نشینی کامل، آب زلال رویی بیرون ریخته شد و رسوبات خیس در دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد در آون خشک شد و در نهایت میزان هدررفت خاک، دبی رواناب و شدت رواناب برای زمان‌های مختلف محاسبه شد. سرعت جریان نیز با استفاده از پرمنگنات پتاسیم در فاصله یک متری در طول فلوم اندازه‌گیری شد (آن و همکاران ۲۰۱۲).

تعیین خصوصیات هیدرولیکی جریان

خصوصیات هیدرولیکی اندازه‌گیری شده در جدول ۱ آورده شده است.

شرقی و ۵۸° ۳۶'۶۸" عرض شمالی برای خاک لوم و ۶۷° ۴۸'۳۸" طول شرقی و ۶۱° ۳۶'۶۸" عرض شمالی برای خاک لوم رس شنی تهیه شدند. نمونه خاک‌ها از مراتع تغییر کاربری یافته از عمق ۲۰ سانتی‌متری جمع-آوری شده و از الک ۱۰ میلی متری عبور داده شدند تا خاک به شرایط طبیعی شبیه‌تر باشد (ژانگ و همکاران ۲۰۰۵، ژانگ و همکاران ۲۰۱۴). خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها در آزمایشگاه اندازه‌گیری شدند. در این راستا بافت خاک به روش هیدرومتری (بیوکوس ۱۹۶۲)، سنگریزه به روش کلوت (۱۹۸۶)، جرم مخصوص حقیقی به روش پیکنومتر (جاکوب و کلارک ۲۰۰۲)، جرم مخصوص ظاهری به روش سیلندر فلزی (بلک و هارتگ ۱۹۸۶) و درصد پراکندگی رس (کراچ و همکاران ۲۰۰۷) اندازه‌گیری شدند.

شبیه‌سازی بارش، تعیین رواناب و بار رسوب

آزمایش با استفاده از فلومی به ابعاد  $۰/۴ \times ۰/۳ \times ۰/۴$  متر با شیب ۱۰ درصد و با دستگاه شبیه‌ساز باران نازل‌های اسپری جت مطابق شکل ۱ انجام شد. مقدار خاک لازم برای هر فلوم بر مبنای چگالی ظاهری نمونه طبیعی خاک و حجم فلوم محاسبه شد. شیارهایی دست‌ساز با ایجاد جوی و پشته متوالی با عرض حدود ۰/۱ و عمق ۰/۰۵ متر مطابق با تحقیقات پیشین (رومرو و همکاران ۲۰۰۷، ریچرت ۲۰۱۳، هانگ و همکاران ۲۰۱۵) به تعداد چهار قطعه به طول چهار متر ایجاد شد.



شکل ۱-نمایی از فلوم و شبیه‌ساز باران مورد استفاده در آزمایش.

## جدول ۱- خصوصیات هیدرولیکی جریان.

$H = \frac{Q}{VB}$	H میانگین عمق جریان رواناب (m)، V میانگین سرعت جریان ( $m^{-1}$ )، Q دبی جریان رواناب ( $m^3s^{-1}$ )، B عرض فوم (m) (آن و همکاران ۲۰۱۲).
$Re = \frac{vH}{\nu}$	عدد رینولدز (Re)، $\nu$ لزجت دینامیکی ( $cm^2s^{-1}$ ) و H عمق جریان (cm) (آن و همکاران ۲۰۱۲).
$Fr = \frac{v}{\sqrt{gH}}$	عدد فرود (Fr)، g شتاب ثقلی ( $ms^{-2}$ ) (برایان ۱۹۹۰).
$f = \frac{8gRS}{v^2}$	ضریب اصطکاک داریسی-ویسباخ (f)، R شعاع هیدرولیکی (m)، S گرادیان شیب ( $mm^{-1}$ ) (برایان ۱۹۹۰).
$\tau = \rho_f gRS$	تنش برشی (Pa) ( $\tau$ )، $\rho_f$ چگالی سیال ( $Kgm^{-3}$ ) (نیرینگ و همکاران ۱۹۹۷).
$\omega = \tau V$	قدرت جریان ( $Kgm^{-3}$ ) ( $\omega$ ) (نیرینگ و همکاران ۱۹۹۷).

## تجزیه و تحلیل داده‌ها

آزمایشات مربوط به تفاوت بین خاک‌ها از نظر خصوصیات هیدرولیکی جریان و بار رسوب در قالب طرح کاملاً تصادفی در چهار تکرار انجام شد. توزیع نرمال داده‌ها، پیش شرط انجام مقایسه‌های میانگین و تحلیل‌های رگرسیونی است. از این رو برای بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون شاپیرو ویلک (۱۹۶۵) استفاده شد. برای بررسی تفاوت‌های خصوصیات جریان در خاک‌های با بافت مختلف و انجام مقایسه میانگین از آزمون دانکن استفاده شد. برای پاسخگویی به بررسی اثرات بین خصوصیات جریان و بار رسوب و روابط بین آنها با استفاه از توابع ریاضی (خطی، نمایی ...) مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی نوع ذرات منتقله توسط فرسایش شیاری نیاز به مقایسه هم‌زمان منحنی توزیع اندازه ذرات رسوب و خاک اصلی

بود. از این رو منحنی‌های توزیع اندازه ذرات رسوب و خاک اصلی یک جا رسم و مورد تحلیل قرار گرفتند. برای انجام تحلیل‌های آماری از نرم افزار SPSS نسخه ۲۱ و برای رسم نمودارها از نرم افزار Excel استفاده شد.

## نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک‌های مورد بررسی

مطابق جدول ۲ خاک‌های مورد بررسی دارای بافت لوم، شن لومی و لوم رس شنی می‌باشد. خاکدانه‌ها در کلاس پایداری اندک قرار دارند (کراچ و همکاران ۲۰۰۷)، در خاک لوم و لوم رس شنی میزان سنگریزه زیاد می‌باشد.

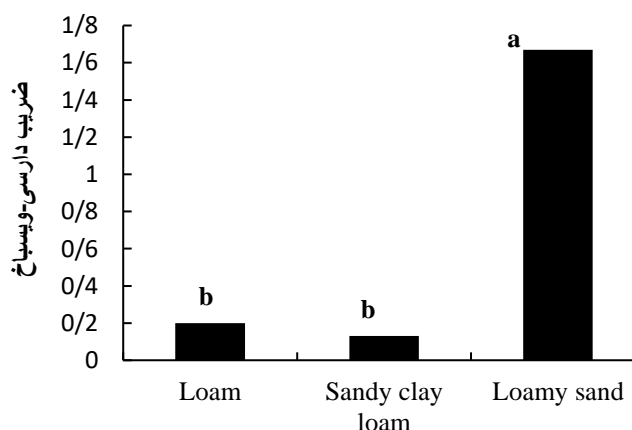
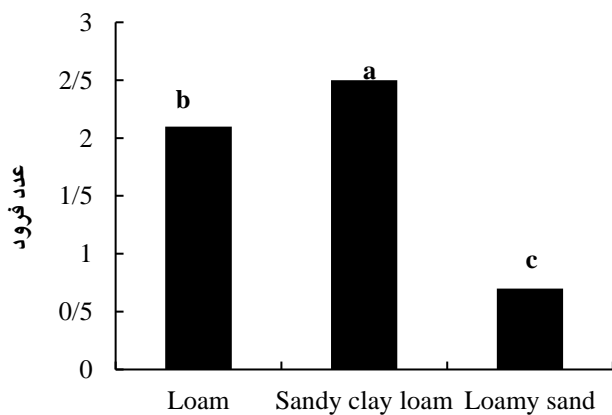
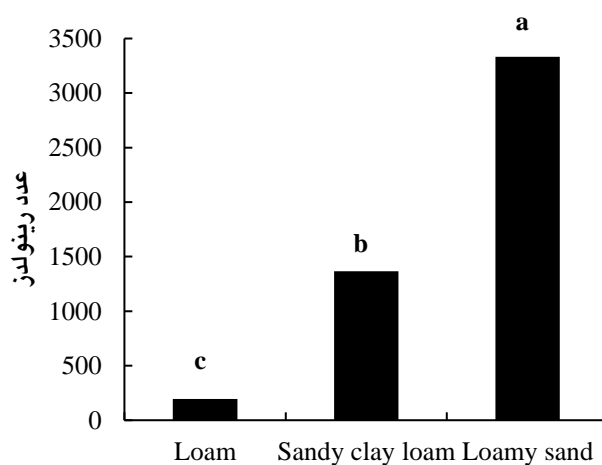
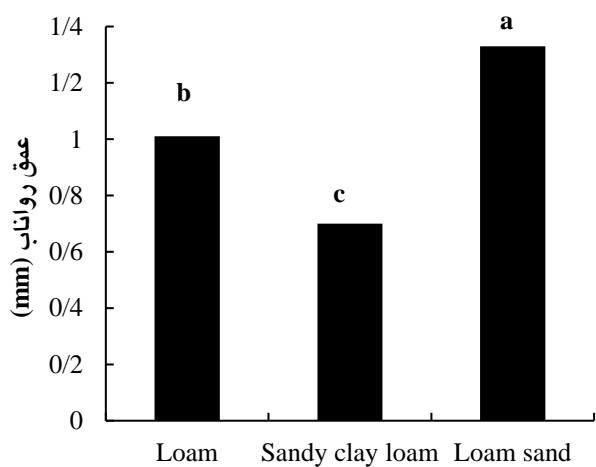
جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه.

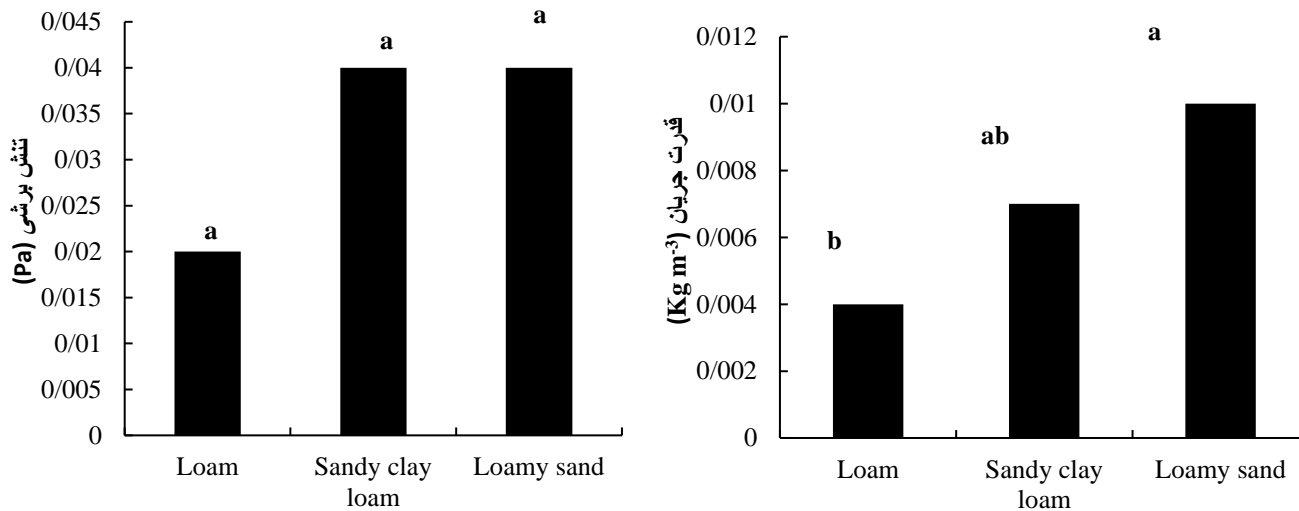
گروه خاک	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	سنگریزه (%)	میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (mm)	جرم مخصوص ظاهری (gcm <sup>-3</sup> )	جرم مخصوص حقیقی (gcm <sup>-3</sup> )	مواد آلی (%)	درصد پراکنندگی (%)
لوم	۴۵/۸۰	۳۶/۸۰	۱۷/۴۰	۱۵/۶۰	۱/۴۵	۱/۲۰	۲/۴۴	۰/۹۹	۱۴
شن لوم	۷۴/۵۴	۱۷/۹۳	۷/۵۳	۲/۰۰	۱/۵۰	۱/۲۹	۲/۵۱	۱/۳۴	۳۳
رس	۵۵/۰۰	۲۲/۵۰	۲۲/۵۰	۲۱/۱۸	۲/۰۰	۱/۴۰	۲/۵۳	۰/۵۸	۱۱

بیشترین عمق رواناب، ضریب دارسی و سیب‌خ و قدرت برشی جریان را دارد. فراوانی اندک ذرات سنگریزه از یک سو (۲ درصد) و وجود رس پراکنش پذیر زیاد (۳۳ درصد) و در نتیجه ناپایداری ساختمان خاک از عوامل مهم کاهش نفوذپذیری خاک هنگام بارندگی و تسریع تولید رواناب بودند.

### تغییرات خصوصیات هیدرولیکی و بار رسوب بین خاک‌ها

شکل ۲ تغییرات خصوصیات هیدرولیکی در خاک‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که بیشترین عدد رینولدز در خاک شن لومی است که





شکل ۲- تغییرات خصوصیات هیدرولیکی در سه خاک مورد آزمایش.  
حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵٪ ( $p < 0.05$ ).

از لزجت غالب شده و عدد رینولدز را بر خلاف انتظار افزایش می‌دهد. در این مطالعه نیز بر اساس شکل ۴ به علت بزرگ بودن قطر ذرات بستر و فرآیند غالب غلتیدن، در طول انتقال ذرات و نیز بالا بودن جرم ذرات انتقال یافته، نیروهای اینرسی به نیروهای لزجت غالب شده است.

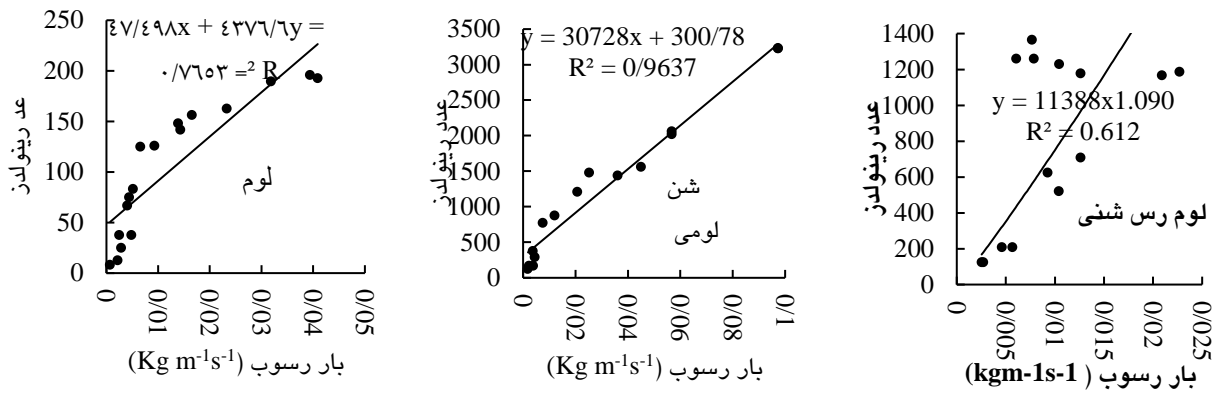
توزیع اندازه ذرات برای خاک های مورد بررسی و رسوب حاصل از فرسایش آنها در شکل ۴ ارائه شده است. بررسی قطر میانه ذرات ( $D_{50}$ ) در خاک اصلی و رسوب با استفاده از منحنی دانه بندی ذرات نشان داد که  $D_{50}$  در خاک لوم، به ترتیب برابر با ۰/۱ و ۰/۰۵ میلی متر در خاک لوم رس شنی برابر با ۰/۱۷ و ۰/۱۵ میلی-متر و در خاک لوم شنی برای هر دو حالت برابر با ۰/۱۵ میلی-متر بود.

عدد فرود به‌عنوان تابعی از بار رسوب در شکل ۵ آورده شده است. همان‌طوریکه مشاهده می‌شود عدد فرود با افزایش بار رسوب کاهش می‌یابد.

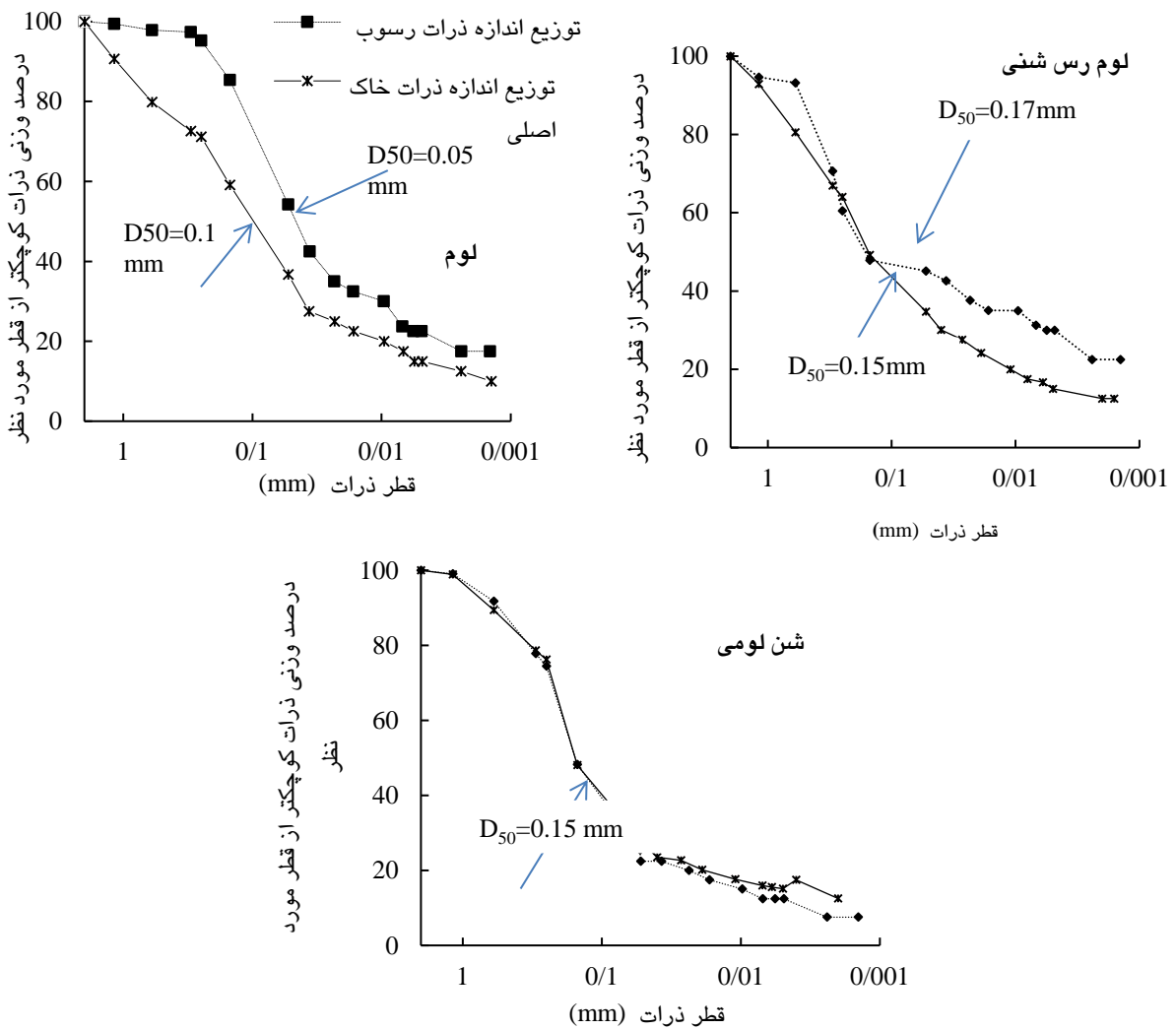
#### رابطه بین خصوصیات هیدرولیکی و بار رسوب

تغییرات عدد رینولدز نسبت به بار رسوب برای خاک‌های مورد مطالعه در شکل ۳ نشان داده شده است. مطابق این شکل، عدد رینولدز به شدت از مقدار بار رسوب متأثر شده و با افزایش بار رسوب افزایش یافته است، دلیل این مسئله این است که با افزایش عمق جریان، مقدار جریان افزایش و در نتیجه مقدار عدد رینولدز نیز افزایش می‌یابد. در این پژوهش به دلیل ماهیت بستر که عمدتاً از بافت های سبک استفاده شده است، قدرت کنش ذرات با عمق جریان همخوانی نداشته و با وجود افزایش نسبی بار رسوب، عدد رینولدز به علت افزایش عمق و سرعت بالا رفته است. در واقع تأثیر عمق جریان و سرعت جریان در افزایش دادن عدد رینولدز به تأثیر افزایش بار رسوب در کاهش دادن عدد رینولدز غالب شده است. نییرینگ و همکاران (۱۹۹۹) گزارش کردند که در بسترهای دارای بافت سبک با افزایش بار رسوب، نیروهای اینرسی به نیروهای ناشی





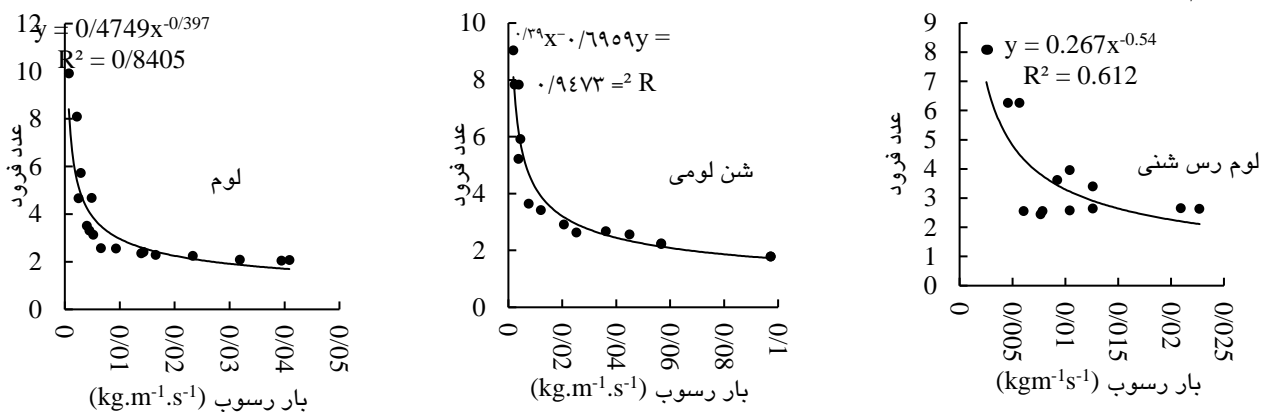
شکل ۳- عدد رینولدز تابعی از بار رسوب در سه خاک مورد آزمایش.



شکل ۴- توزیع اندازه ذرات برای خاک اصلی و رسوب در سه خاک مورد آزمایش.

تنش برشی بالا بیشتر از جریان‌های با تنش برشی پایین است. از این رو با افزایش تنش برشی جریان، ذرات درشت قابلیت انتقال بیشتری پیدا می‌کنند. چنین نتیجه‌ای را می‌توان در منحنی توزیع اندازه ذرات در خاک لوم و رسوب آن مشاهده کرد (شکل ۴).

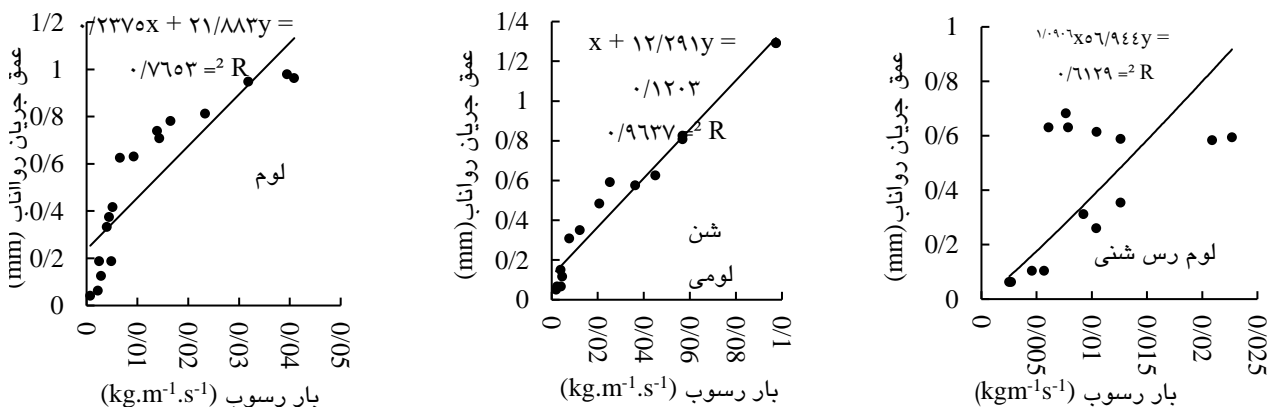
دلیل آن می‌تواند به علت افزایش بار رسوب، مقاومت کل جریان وزبری بستر و در نتیجه کاهش میانگین سرعت جریان باشد. دلیل دیگر اینست که با افزایش تنش برشی جریان میزان انتقال تمام انواع ذرات خاک افزایش یافته و در نتیجه بار رسوب بیشتر می‌شود. با این وجود سهم انتقال ذرات درشت‌دانه در جریان‌های با



شکل ۵- عدد فرود تابعی از بار رسوب در سه خاک مورد آزمایش.

خاک لوم رسی شنی از ۰/۰۶ تا ۰/۷ میلی‌متر تغییر یافت. از سوی دیگر جریان‌های با بار رسوب زیاد، سرعت اندک، حجم زیاد و در نتیجه عمق بیشتری دارند. در پژوهش‌های پیشین نیز به رابطه بین عمق جریان و بار رسوب در جریان‌های سطحی (ژانگ و همکاران ۲۰۱۰) و جریان‌های متمرکز (گاوری ۱۹۹۰، نییرینگ و همکاران ۱۹۹۹) تأکید شده است.

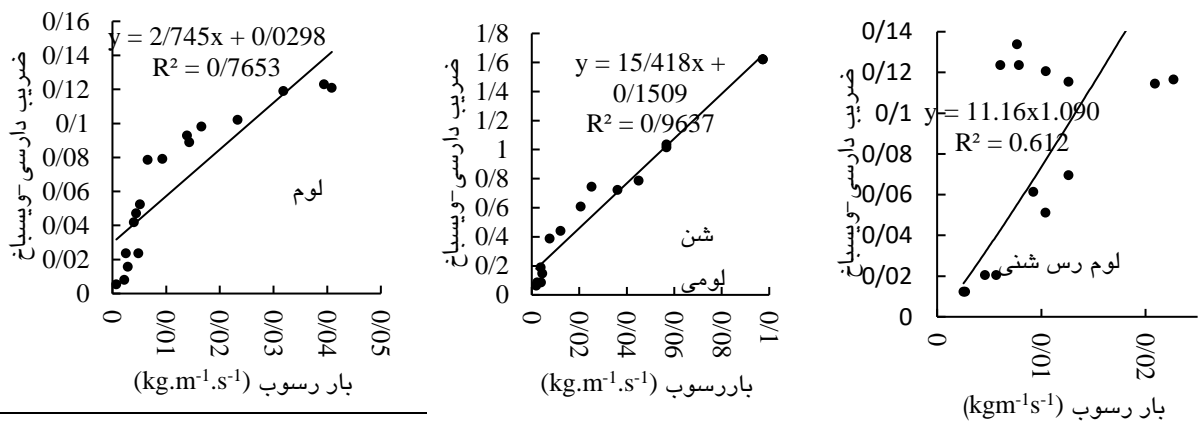
تغییرات عمق جریان و بار رسوب در شکل ۶ برای سه نوع خاک نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بین عمق جریان و بار رسوب رابطه خطی مستقیم وجود دارد. در واقع با افزایش عمق جریان به دلیل افزایش ظرفیت انتقال آب، بار رسوب نیز افزایش پیدا می‌کند. عمق جریان در خاک لوم از ۰/۰۴۱ تا ۱ میلی‌متر و در خاک شن لومی از ۰/۰۷ تا ۱/۳ میلی‌متر و در



شکل ۶- عمق جریان تابعی از بار رسوب در سه خاک مورد آزمایش.

حاوی رسوب مقاومت بیشتری نسبت به یک لایه آب بدون رسوب خواهد داشت. از آنجا که ، مقداری از انرژی جنبشی آب جاری برای انتقال رسوب و برای حفظ حرکت لحظه‌ای رسوب مصرف می‌شود. انرژی آب جاری با افزایش بار رسوب کاهش می‌یابد و اثر زبری دانه‌های درشت رسوب بر سرعت جریان افزایش می‌یابد و در نتیجه ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد.

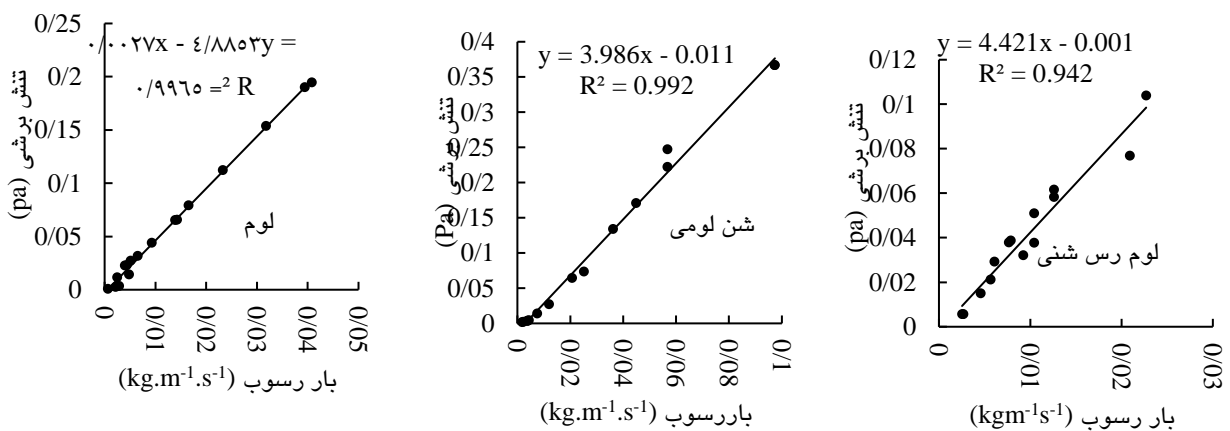
در شکل ۷ نیز ضریب اصطکاک داری-ویسباخ به‌عنوان تابعی از بار رسوب بررسی شد. مقاومت فرم که بیانگر نقش فرم بستر در برابر جریان می‌باشد (ابراهام ۱۹۹۸)، توسط خاکدانه‌های پایدار بزرگ، همچنین قلوه سنگ‌ها و زبری‌های حاصله از میکروتوپوگرافی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در واقع بیشتر ذرات حمل شده به‌صورت بار رسوب، درشت هستند که توسط فرآیند غلتیدن منتقل می‌شوند. یک لایه



شکل ۷- ضریب اصطکاک داری-ویسباخ تابعی از بار رسوب در سه خاک مورد آزمایش.

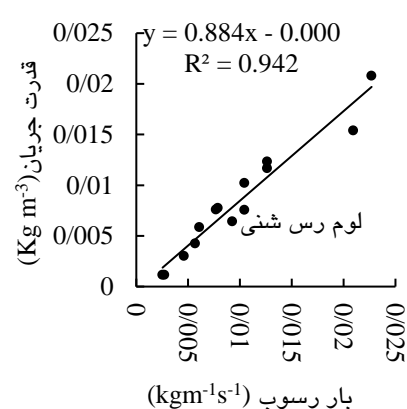
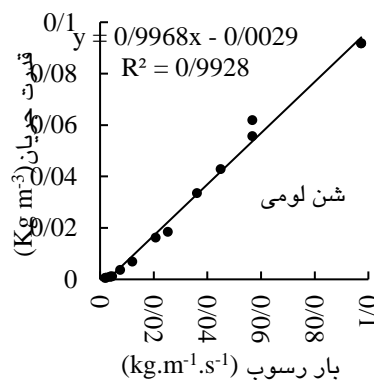
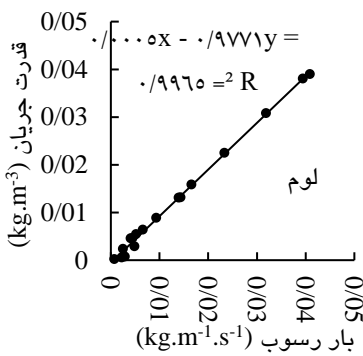
جریان تابعی از سرعت جریان و شعاع هیدرولیکی است که این ویژگی‌ها به نوبه خود تحت تأثیر بار رسوب بوده و منجر به افزایش تنش برشی جریان می‌شوند.

بررسی رابطه بین تنش برشی و بار رسوب در شکل ۸ نشان داد که در هر سه خاک مورد بررسی تنش برشی جریان و بار رسوب به یکدیگر وابسته بوده و بین آن دو رابطه مستقیم وجود دارد. تنش برشی



شکل ۸- تنش برشی تابعی از بار رسوب در سه خاک مورد آزمایش.

اصطکاک بستر افزایش و در نتیجه اتلاف انرژی زیاد می‌شود، این بدین معنی است که وقتی بار رسوب افزایش می‌یابد انرژی بیشتری برای غلبه بر افزایش مقاومت کل لازم است تا جریان ماندگار باقی بماند، این دلایل توسط رابطه بین بار رسوب و ضریب اصطکاک دارسی-ویسباخ تأیید می‌شود (شکل ۷).



شکل ۹- قدرت جریان تابعی از بار رسوب در سه خاک مورد آزمایش.

نیروهای اینرسی به نیروهای لزجت غالب باشند. عدد فرود با افزایش بار رسوب کاهش یافت و عمق جریان با افزایش بار رسوب افزایش یافت، دلیل آن می‌تواند به علت افزایش بار رسوب، مقاومت کل جریان و زبری بستر و در نتیجه کاهش میانگین سرعت جریان باشد. همچنین با قدرت جریان میزان انتقال تمام انواع ذرات خاک افزایش یافته و در نتیجه بار رسوب بیشتر شد. با این وجود سهم انتقال ذرات درشت‌دانه در جریان‌های قدرت جریان بالا بیشتر از جریان‌های با قدرت جریان پایین بود. قدرت جریان و تنش برشی با افزایش بار رسوب افزایش می‌یابند. برهمکنش بین بار رسوب و خصوصیات هیدرولیکی جریان در شیار دارای ضریب تبیین بالایی هستند. این موضوع می‌تواند در مدل‌های

قدرت جریان برابر با حاصل‌ضرب تنش برشی و میانگین سرعت جریان رواناب است. تنش برشی جریان با افزایش بار رسوب افزایش یافته، و منجر به افزایش قدرت جریان می‌شود (شکل ۹). قدرت جریان در واقع اتلاف انرژی در برابر مقاومت کل جریان به جریان شیاری تعریف می‌شود و تقریباً به ضریب افت جریان (ضریب اصطکاک دارسی-ویسباخ) مربوط است (ژانگ و همکاران ۲۰۱۰). وقتی بار رسوب افزایش می‌یابد،

### نتیجه‌گیری کلی

این آزمایش برای کمی‌سازی تأثیر پتانسیل بار رسوب بر عدد رینولدز، عدد فرود، عمق جریان، تنش برشی و قدرت جریان در سه خاک با توزیع اندازه ذرات متفاوت انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که بین خاک‌های با بافت مختلف، تفاوتی اساسی از نظر خصوصیات هیدرولیکی جریان و بار رسوب در فرسایش شیاری وجود دارد. خاک شن لومی حساس‌ترین خاک به فرسایش شیاری بود که بیش‌ترین قدرت جریان و عدد رینولدز را نشان داد. عدد رینولدز و ضریب اصطکاک دارسی-ویسباخ با افزایش بار رسوب افزایش یافت که دلیل آن بزرگ بودن قطر ذرات بستر و فرآیند غالب غلتیدن در طول انتقال ذرات و نیز بالا بودن جرم ذرات انتقال یافته می‌باشد که باعث می‌شوند

پیش‌بینی فرسایش برای بهبود دقت پیش‌بینی شدت جدا شدن ذرات و انتقال آن‌ها در شیارها به‌کار گرفته شود.

### منابع مورد استفاده

- Asadi H, Golicalrod, MA and Gorgi M, 2015. Dynamic variation of sediment concentration in erosion in field experiments. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources* 4: 125-139.
- Abrahams AD, Parson AJ and Luk SH, 1990. Field experiments on the resistance to overland flow on desert hillslopes. IAHS Publication 189: 1–18.
- An J, Zheng F, Lu J and Li G, 2012. Investigating the role of raindrop impact on hydrodynamic mechanism of soil erosion under simulated rainfall conditions. *Soil Science* 177: 517-526.
- Auerswald K, Fiener P and Dikau R, 2009. Rates of sheet and rill erosion in Germany-A meta-analysis. *Geomorphology* 111: 182-193.
- Auzet AV, Boiffin J, Papy F, Ludwig B and Maucorps J, 1993. Rill erosion as a function of the characteristics of cultivated catchments in the north of France. *Catena* 20: 41-62.
- Beuselinck L, Govers G, Steegen A and Quine TA, 1999. Sediment transport by overland flow over an area of net deposition. *Hydrological Processes* 13: 2769–2782.
- Blake GR and Hartge KH, 1986. Bulk density, Pp. 363-375. In: Klute I, (ed). *Methods of Soil Analysis. Part 1 - Physical and Mineralogical Methods Second Edition*. American Society of Agronomy, Madison WI.
- Bouyoucos GJ, 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. *Agronomy journal* 54(5):464-5.
- Bryan RB, 1990. Knickpoint evolution in rillwash. *Catena* 17: 111-132.
- Bryan RB, 2001. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology* 32: 385–415.
- Crouch RJ, Reynolds KC, Hicks RW and Greentree DA, 2007. Soils and their use for earthworks. Pp. 367-393. In: Charman PEV and Murphy BW (eds). *In Soils- Their Properties and Management*. 3<sup>rd</sup>. Oxford University Press: Melbourne.
- Di Stefano C, Ferro V, Pampalone V and Sanzone F, 2013. Field investigation of rill and ephemeral gully erosion in the Sparacia experimental area, South Italy. *Catena* 101: 226–234.
- Emmett WW, 1970. *The Hydraulics of Overland Flow on Hillslopes*. US Government Printing Office, Washington.
- Gilley JE, Kottwitz, E and Simanton J, 1990. Hydraulic characteristics of rills. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 1899-1906.
- Govers G, 1990. Empirical relationships for the transport formulae of overland flow. IAHS Publication 189: 45–63.
- Guy BT, Rudra RP, Dickenson WT and Sohrabi TM, 2009. Empirical model for calculating sediment-transport capacity in shallow overland flows: model development. *Biosystems Engineering* 103: 105–115.
- Hung Y, Chen X, Luo B, Ding L and Gong, C, 2015. An experimental study of rill sediment delivery in purple soil, using the volume-replacement method. *Peer Journal* 3: 1220-1221.
- Jacob H, Clarke G, 2002. Particle density, Pp. 1692. In: Klute I, (ed). *Methods of Soil Analysis. Part 4- Physical Method*. American Society of Agronomy, Madison WI.
- Kemper WD and Rosenau RC, 1986. Aggregate stability and size distribution. No. 9. Pp. 425-442. In *Methods of Soil Analysis, Part I. Physical and Mineralogical Methods (2nd Edition)*. Agronomy Monography.
- Klute, A. 1986. Gravel, pp. 1188. In: Klute, A. (Ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 1- physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy, Madison WI.
- Mirzaee S, Asadzadeh F and Nazarnejad H, 2016. Predicting manning and Darcy-Weisbach roughness coefficients in a loess soil surface under different rock fragment covers. *Journal of Watershed Management Research* 8 ( 15) :73-81
- Nearing MA, Norton LD, Bulgakov DA, Larionov LT and Dontsova KM, 1997. Hydraulics and erosion in eroding rills. *Water Resources Research* 33: 865-876.
- Peng, W, Zhang, Z and Zhang K, 2015. Hydrodynamic characteristics of rill flow on steep slopes. *Hydrological Processes* 29: 3677–3686.

- Prins D, Gomer D and Blez S, 1992. Studies of the causes of solid erosion on marl soils in northern Algeria . The Role of Traditional Soil Tillage. *Land Degradation and Development* 5(4): 271-280.
- Reichert JM and Norton LD, 2013. Rill and interrill erodibility and sediment characteristics of clayey Australian Vertosols and a Ferrosol. *Soil Research* 51: 1-9.
- Romero CC, Stroosnijder L and Baigorria GA, 2007. Interrill and rill erodibility in the northern Andean Highlands. *Catena* 70: 105-113.
- Rostami y, 1391. Relationship between intensity of rainfall, duration and kinetic energy of rainfall using rainfall simulated in Zanjan province. Master's Thesis, Zanjan university, Iran (Farsi).
- Roshun SH, Vahabzadeh Kebria G, Solaimani K and Khaledi Darvishan A. 1397. The impact of sand and gravel mining on river bedload amount and gradation (Case study: Zaremrood river, Mazandaran province). *Journal of Water and Soil Science university of Tabriz*, 28(2): 83-95.(Farsi)
- Shapiro SS and Wilk MB, 1965. An for normality (complete samples). *Biometrika* 52 (3-4): 591-611.
- Shih HM and Yang CT, 2009. Estimating overland flow erosion capacity using unit stream power. *International Journal of Sediment Research* 24: 46-62.
- Smith MW, Cox NJ and Bracken LJ, 2007. Applying flow resistance equations to overland flow. *Progress in Physical Geography* 31(4): 363-387.
- Takken I and Govers G, 2000. Hydraulics of interrill overland flow on rough, bare soil surfaces. *Earth Surface Processes and Landforms* 25: 1387-1402.
- Wenying P, Zhuodong ZH and Keli ZH, 2015. Hydrodynamic characteristics of rill flow on steep slopes. *Hydrological Processes* 29: 3677-3686.
- Wirtz S, Seeger M, Ries JB, 2012. Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes. *Catena* 91: 21-34.
- Woodward DE, 1999. Method to predict cropland ephemeral gully erosion. *Catena*: 37 (3-4): 393-399.
- Zhang GH, Liu BY, Nearing MA, Huang CH and Zhang KL, 2002. Soil detachment by shallow flow. *American Society of Agricultural Engineers* 45(2): 351-357.
- Zhang GH, Liu BY, Liu GB, He XW and Nearing MA, 2003. Detachment of undisturbed soil by shallow flow. *Soil Science Society of America Journal* 67: 713-719.
- Zhang GH, Liu GB, Tang MK and Zhang XC, 2008. Flow detachment of soils under different land uses in the Loess Plateau of China. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 51(3): 883-890.
- Zhang GH, Liu YM, Han YF and Zhang XC, 2009. Sediment transport and soil detachment on steep slopes: I. Transport capacity estimation. *Soil Science Society of America Journal* 73(4): 1291-1297.
- Zhang GH, Shen RI, Chang LO, RongTG, Cao YG and Zhang XC, 2010. Effects of sediment load on hydraulics of overland flow on steep slopes. *Earth Surface Processes and Landforms Journal* 35: 1811-1819.
- Zhang XC, Li ZB and Ding WF, 2005. Validation of WEPP sediment feedback relationships using spatially distributed rill erosion data. *Soil Science Society of America Journal* 69: 1440 - 1447.
- Zhang QW, Dong YQ, Li F, Zhang AP and Lei TW, 2014. Quantifying detachment rate of eroding rill or ephemeral gully for WEPP with flume experiments. *Journal of Hydrology* 519:2012-2019.