

The Effects of Sediment Size on Rill Detachment Capacity in Steep Slopes of (Saravan, Rasht)

MISAGH PARHIZKAR¹, MAHNOUD SHABANPOUR^{1*}, MOHAMMADREZA KHALEDIAN², HOSSEIN ASADI³

1. Soil Science Department, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Guilan, Iran.

2. Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Guilan, Iran.

3. Department of Soil Science, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

(Received: Nov. 17, 2020- Revised: Dec. 19, 2020- Accepted: Apr. 7, 2021)

ABSTRACT

The maximum value of soil detachment due to overland flow is the soil detachment capacity. The present study aimed to evaluate the effect of particle size classes on the rill detachment capacity (Dc) in Saravan watershed (North of Iran). For this purpose, the variations of Dc have been measured on soil samples with three particle size classes (0-1, 1-2 and 2-3 mm) under laboratory conditions through a flume experiment at five slope gradients (4.1 to 38.3%) and five flow rates (0.26 to 0.67 Lm⁻¹ s⁻¹) with five replications. The results showed that the Dc in 2-3 mm class was significantly higher than the other particle size classes ($p < 0.05$). The unit stream power was found to be very accurate predictor of the Dc in forestland of Saravan watershed. Rill erodibility, which calculated by relationship of the Dc and the water flow shear stress, had the lowest value in 0-1 mm class. Overall, this study has confirmed that the particles with size larger than 2 mm on steep slopes are more susceptible to erosion and separation by surface runoff in delicate environment ecosystems, such as the Saravan Forest Park in Northern part of Iran.

Keywords: Forest Ecosystem, Shear Stress, Soil Erosion, Unit Stream Power.

اثرات اندازه رسوب روی ظرفیت جداسازی جریان شیبی در شیب‌های تند سراوان رشت

میثاق پرهیزکار^۱، محمود شعبانپور^{۱*}، محمد رضا خالدیان^۲، حسین اسدی^۳

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران.

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران.

۳. گروه علوم و مهندسی خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۲۷ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۹/۲۹ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱/۱۸)

چکیده

حداکثر مقدار جدا شدن خاک به دلیل جریان سطحی رواناب، به عنوان ظرفیت جدا شدن خاک نامیده می‌شود. مطالعه حاضر با هدف بررسی اثر کلاس‌های اندازه ذرات بر ظرفیت جداسازی جریان شیبی (Dc) در حوزه آبخیز سراوان (شمال ایران) انجام شد. برای این منظور، تغییرات Dc در نمونه‌های خاک با سه کلاس اندازه ذرات (۱-۰، ۲-۱، و ۳-۲ میلی‌متر) تحت شرایط آزمایشگاهی از طریق یک فلوم آزمایشی در پنج درجه شیب (۴/۱ تا ۳۸/۳ درصد) و پنج دبی جریان (۰/۲۶ تا ۰/۶۷ لیتر بر متر در ثانیه) با پنج تکرار اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان داد که ظرفیت جداسازی جریان شیبی در کلاس ۲-۳ میلی‌متر در مقایسه با سایر کلاس‌های اندازه ذرات به طور معنی‌داری بالاتر است ($p < 0.05$). قدرت جریان واحد به عنوان پیش‌بینی کننده بسیار دقیق ظرفیت جداسازی جریان شیبی در زمین جنگلی حوزه آبخیز سراوان بود. فرسایش پذیری شیبی که با استفاده از رابطه Dc و تنش برشی جریان آب محاسبه شد، کم‌ترین مقدار را در کلاس ذرات ۱-۰ میلی‌متر داشت. به طور کلی، این مطالعه تأیید کرد که ذرات با اندازه بزرگتر از ۲ میلی‌متر روی شیب‌های تند بیش تر در معرض فرسایش و جدا شدن از طریق رواناب سطحی در اکوسیستم‌های محیطی حساس مانند پارک جنگلی سراوان در بخش شمالی ایران هستند.

واژه‌های کلیدی: اکوسیستم جنگلی، تنش برشی جریان، فرسایش خاک، قدرت جریان واحد.

مقدمه

جداسازی خاک به عنوان تفکیک ذرات خاک از توده خاک در یک مکان خاص بر روی سطح خاک توسط نیروهای فرساینده باران و رواناب سطحی تعریف شده است (Govers et al., 1990; Wang et al., 2019). هنگامی که جدا شدن ذرات خاک به وسیله جریان متمرکز شده رواناب باشد، این فرآیند نقش مهمی را در روند فرسایش شیبی خاک به‌ویژه در شیب‌های تند ایفا می‌کند (Wang et al., 2014). حداکثر میزان جدا شدن خاک در حالت آب بدون رسوب اتفاق می‌افتد که به عنوان ظرفیت جداسازی جریان شیبی خاک نامیده می‌شود (Nearing et al., 1991). این پارامتر یک ورودی کلیدی در بسیاری از مدل‌های فرایندی فرسایش خاک مانند مدل WEPP می‌باشد.

ظرفیت جدا شدن خاک به علت فرسایش شیبی (از این پس به عنوان ظرفیت جداسازی جریان شیبی نامیده می‌شود)، در دهه‌های گذشته تحت شرایط مختلف از نظر جریان رواناب و ویژگی‌های سطحی خاک هم در مقیاس آزمایشگاهی و هم در

مقیاس مزرعه مورد مطالعه قرار گرفته است (Wang et al., 2007; Knapen et al., 2012, 2019). مطالعات مختلفی نشان داده اند که جدا شدن ذرات خاک از طریق فرسایش شیبی به طور قابل توجهی تحت تأثیر خصوصیات مهم فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک مانند ماده آلی، جرم مخصوص ظاهری، بافت، پایداری خاکدانه‌ها و وزن ریشه است (Parhizkar et al., 2017; Zhang et al., 2008; Wang et al., 2013; Geng et al., 2020b). علاوه بر این ویژگی‌ها، خصوصیات جریان سطحی، مانند تنش برشی، قدرت جریان، قدرت جریان واحد و انرژی واحد جریان (Yang, 1972; Foster, 1982; Parhizkar et al., 2017; 2020a) می‌توانند بر تغییرپذیری ظرفیت جداسازی جریان شیبی و در نهایت بر میزان فرسایش پذیری خاک اثرگذار باشند (Li et al., 2019). بنابراین برای تخمین فرسایش پذیری خاک، بررسی همه پارامترهای موثر بر ظرفیت جدا شدن خاک امری ضروری است.

جریان متلاطم یک جزء بحرانی مهم برای جدا شدن ذرات خاک در داخل شیارها است (Nearing et al., 1991) و جدا شدن

متمرکز رواناب در کاربری‌های جنگلی کمترین میزان را در مقایسه با سایر کاربری‌های اراضی دارد. با توجه به نتایج فوق، منطقی است که فرض کنیم اندازه‌های مختلف ذرات در جریان مملو از رسوب می‌تواند بر میزان تلاطم و جداشدگی ذرات خاک در این اکوسیستم‌ها اثرگذار باشند.

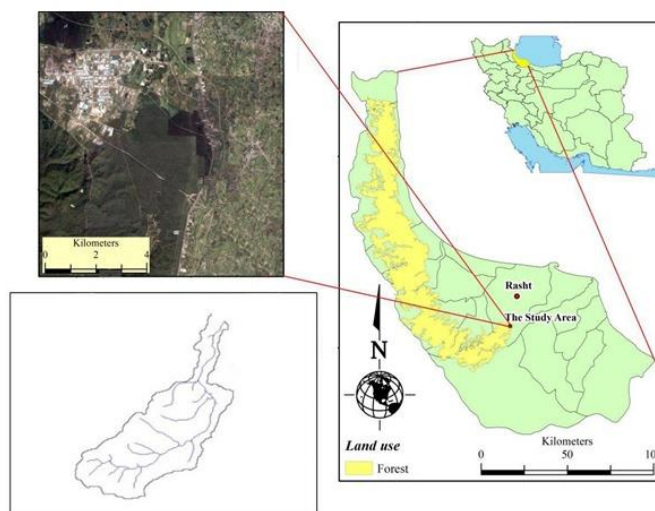
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این آزمایش در حوزه آبخیز سراوان در قسمت پارک جنگلی سراوان واقع در جنوب استان گیلان با موقعیت جغرافیایی طول ۳۷ درجه و ۵ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۳۷ دقیقه عرض شمالی و طول ۴۹ درجه و ۴ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۳۷ دقیقه طول شرقی انجام شده است (شکل ۱). مساحت این منطقه ۱۴۸۷ هکتار از حوزه جنگلداری رشت است و شامل تنوع زیادی از گونه‌های مختلف گیاهی و درختی در شیب‌ها و دامنه‌های مختلف می‌باشد (Parhizkar *et al.*, 2020b). میانگین ارتفاع از ۹۴ متر می‌باشد و متوسط دما و بارندگی سالانه منطقه به ترتیب ۱۶/۳ درجه سلسیوس و ۱۳۵۹ میلی‌متر گزارش شده است (Meteorological organization of Iran, 2009). رژیم رطوبتی و حرارتی این منطقه به ترتیب یودیک و ترمیک است (Soil and Water Research Institute, 1998; Parhizgar *et al.*, 2018). بعضی فعالیت‌های انسانی مانند جنگل زدایی، آتش‌سوزی و به ویژه تراکم زیاد جمعیت، که از عوامل مهم کاهش پوشش جنگلی در شمال کشور هستند (Bahrami *et al.*, 2010)، باعث تخریب خاک در این منطقه شده‌اند (Parhizkar *et al.*, 2020a).

بدون این جریان به ندرت رخ می‌دهد (Nearing and Parker, 1994). جدا شدن ذرات خاک تنها زمانی اتفاق می‌افتد که نیروی وارده از طریق جریان، با شدت تلاطم زیاد، بیشتر از نیروی مقاومت بین ذرات خاک باشد که در این صورت با تولید کافی نوسانات در تنش‌های روی سطح خاک، باعث جدا شدن ذرات از توده خاک می‌شود (Merten *et al.*, 2001). با این حال ثابت شده است که میزان این جداشدگی به طور زیادی با کاهش تلاطم مرتبط با افزایش رسوب در جریان محدود می‌شود (Polyakov and Nearing, 2003). نتایج اندازه‌گیری‌های متعدد نشان می‌دهد که غالباً تغییرات پرنوسانی در مقادیر جدا شدن در اندازه‌های مختلف ذرات خاک وجود دارد. به عنوان مثال Wang (1994) and Larsen, به این نتیجه رسیدند که رسوبات ریز می‌توانند از شدت تلاطم بکاهند و این شدت در جریان‌هایی که با ذرات درشت به دلیل کاهش ویسکوزیته، بیش‌تر است. با این حال، در مطالعه دیگری نشان داده شد که میزان جداشدگی در ذرات درشت‌تر به طور معنی‌داری کمتر از ذرات ریز است (Merten *et al.*, 2001). بنابراین بدیهی است که هنوز هم نیاز به درک بهتری از میزان پتانسیل اثر اندازه ذرات بر میزان جداشدگی آنها توسط جریان متمرکز شده رواناب در فرایند فرسایش شیاری، به خصوص در شیب‌های زیاد وجود دارد.

برای رسیدن به این هدف، این مطالعه با استفاده از یک فلوم آزمایشگاهی روی خاک‌های نمونه برداری شده از جنگل‌های حوزه سراوان (شمال ایران)، اثر اندازه ذرات را بر میزان ظرفیت جداسازی جریان شیاری تعیین می‌کند. در حقیقت، مطالعه حاضر، نتایج تحقیقات قبلی (Parhizkar *et al.*, 2020a,b) را توسعه می‌دهد که تحت شرایط آزمایشی مشابه، به این نتیجه رسیدند که ظرفیت جداسازی جریان شیاری توسط جریان



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و نقشه هوایی (منبع: Google Map) (حوزه آبخیز سراوان، استان گیلان، پارک جنگلی سراوان)

آنالیز و نمونه برداری خاک

و بنابراین اندازه‌های ذرات با دامنه بین ۰-۱، ۱-۲ و ۲-۳ میلی‌متر برای خاک منطقه مورد نظر بدست آمدند. پس از جداسازی اندازه ذرات، با استفاده از نمونه‌های اضافی خاک، بعضی از ویژگی‌های مهم خاک از جمله جرم مخصوص ظاهری، پایداری خاکدانه‌ها، ماده آلی و وزن خشک ریشه اندازه‌گیری شدند (Klute, 1986; Carter and Gregorich, 2006; Parhizkar et al., 2020a) که در جدول (۱) ارائه شده است.

آزمایشات در آزمایشگاه فیزیک و فرسایش خاک دانشگاه گیلان از تیر تا مرداد ۱۳۹۹ انجام شد. نمونه‌های خاک با بافت لومی رسی سیلتی به طور تصادفی از قسمت‌های جنگلی حوزه آبخیز از عمق ۰-۲۵ سانتی‌متری جمع‌آوری شدند و به صورت مخلوط معرف منطقه مورد نظر، به آزمایشگاه منتقل و هواخشک شدند. سپس خاک از الک‌هایی با اندازه‌های ۲، ۱ و ۳ میلی‌متری جدا شد

جدول ۱- ویژگی‌های خاک در منطقه مورد مطالعه

ویژگی های خاک	ماده آلی (درصد)	پایداری خاکدانه (mm)	جرم مخصوص ظاهری (kg/m ³)	وزن خشک ریشه (kg/m ³)
میانگین	۱/۷۷	۰/۵۶	۱۳۸۲	۰/۵۹

میانگین با چهار تکرار برای هر ویژگی خاک

از معادله زیر با چهار تکرار استفاده شد:

$$D_c = \frac{\Delta M}{A \cdot \Delta t} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن، D_c ظرفیت جداسازی جریان شیاری خاک (کیلوگرم بر ثانیه در متر مربع)، ΔM وزن خشک خاک فرسایش یافته بر حسب کیلوگرم، A مساحت نمونه خاک بر حسب مترمربع و Δt مدت آزمایش بر حسب ثانیه می‌باشند.

همچنین با توجه به اثر پارامترهای هیدرولیکی جریان آب بر ظرفیت جداسازی جریان شیاری خاک، از معادلات زیر برای محاسبه این پارامترها استفاده شد:

$$\tau = \rho g R S \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$\omega = \rho g R S V = \tau V \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$\phi = S V \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$E = \frac{\alpha V^2}{2g} + h \cos \theta \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در این معادلات، τ تنش برشی جریان با واحد Pa (Foster, 1982)، ω قدرت جریان با واحد kg s^{-3} (Bagnold, 1966)، ϕ قدرت جریان واحد با واحد m s^{-1} (Yang, 1972) و E انرژی واحد جریان با واحد m (Wang et al., 2016) می‌باشند. همچنین ρ چگالی آب با واحد kg m^{-3} ، g شتاب ثقل با واحد m s^{-2} ، R شعاع هیدرولیکی با واحد m ، S درجه شیب با واحد m m^{-1} ، V میانگین سرعت جریان با واحد m s^{-1} ، α اصلاح انرژی جنبشی بدون واحد با فرض مقدار یک، h عمق جریان با واحد m ، θ درجه شیب فلوام با واحد m m^{-1} بیان می‌شوند. جدول (۲) مقادیر پارامترهای هیدرولیکی محاسبه شده برای شیب‌ها و جریان‌های مختلف را گزارش می‌کند.

فرسایش پذیری شیاری (K_t , s m^{-1}) و تنش برشی بحرانی (τ_c , Pa) دو پارامتر ورودی اثرگذار برای پیش‌بینی فرسایش خاک هستند (Wang et al., 2016). این دو پارامتر مهم، به عنوان

اندازه‌گیری ظرفیت جداسازی جریان شیاری

یک فلوام هیدرولیکی با طول ۳/۵ متر و عرض ۰/۲ متر با سطح مقطع مستطیل برای اندازه‌گیری ظرفیت جداسازی جریان شیاری نمونه‌های خاک جمع‌آوری شده از پارک جنگلی سراوان رشت مورد استفاده قرار گرفت. جزئیات بیشتر درباره خصوصیات این فلوام در مطالعات قبلی ارائه شده است (Asadi et al., 2011; Raei et al., 2015; Parhizkar et al., 2020a,b). همچنین قابل ذکر است که روش آزمایشی استفاده شده در این مطالعه به طور کامل در مطالعات قبلی گزارش شده است (Parhizkar et al., 2020a,b). به طور خلاصه، برای هر آزمایش، نمونه خاک با اندازه ذرات معین، درون یک رینگ فازی (با قطر ۰/۱ متر) قرار داده شد و سپس این رینگ درون یک سوراخ نزدیک قسمت بیرونی فلوام با قطر مشابه جاگذاری شد. قبل از هر آزمایش، سطح نمونه خاک به وسیله اسپری آب مرطوب شد. سپس شیب فلوام و مقادیر جریان مطابق با مقادیر خواسته شده تنظیم شدند. برای هر نمونه خاک با اندازه ذرات معین، ظرفیت جداسازی جریان شیاری با پنج دبی جریان آب (۰/۶۷، ۰/۵۶، ۰/۴۵، ۰/۳۵، ۰/۲۶ لیتر بر متر در ثانیه)، پنج درجه شیب (۳/۳، ۲/۵، ۱/۸، ۰/۸، ۰/۴ درصد) و با پنج تکرار اندازه‌گیری شد. در مجموع ۳۷۵ نمونه خاک (۳ رنج اندازه ذرات × ۵ جریان آب × ۵ درجه شیب × ۵ تکرار) برای آزمایش مورد استفاده قرار گرفتند. ظرفیت جداسازی جریان شیاری خاک در بازه زمانی ۵ تا ۳۰ ثانیه اندازه‌گیری شد و زمانی که عمق خاک فرسایش یافته در رینگ فلزی به ۰/۱۵ متر رسید، تست آزمایشی پایان یافت (Zhang et al., 2003, 2008). همچنین مقادیر عمق و سرعت جریان با شش تکرار اندازه‌گیری شدند. پس از اتمام هر آزمایش، نمونه خاک مرطوب در حرارت ۱۰۵ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شد تا وزن خشک نهایی آن تعیین شود. برای محاسبه ظرفیت جداسازی جریان شیاری خاک

اندازه‌های مختلف ذرات خاک به عنوان فاکتورهای مستقل و ظرفیت جداسازی جریان شیلیاری خاک به عنوان فاکتور وابسته در نظر گرفته شدند. همچنین فرضیه توزیع نرمال داده‌ها با استفاده از تست QQ-plots انجام شد. سپس با استفاده از تست تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) همبستگی‌های میان ویژگی‌های خاک، ظرفیت جداسازی جریان شیلیاری خاک و پارامترهای هیدرولیکی جریان مورد بررسی قرار گرفت. تمام تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از نرم افزار XLSTAT 9.0 انجام شد.

شیب و عرض از مبدا رابطه رگرسیونی بین ظرفیت جداسازی جریان شیلیاری خاک و تنش برشی جریان با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شوند:

$$D_c = K_r(\tau - \tau_c) \quad (\text{رابطه ۶})$$

آنالیز آماری

ابتدا از آنالیز واریانس (ANOVA) و آزمون توکی (در $p < 0.05$) برای ارزیابی سطح معنی‌داری تفاوت‌های ظرفیت جداسازی جریان شیلیاری خاک در میان اندازه‌های مختلف ذرات استفاده شد.

جدول ۲- خصوصیات جریان برای اندازه‌گیری ظرفیت جداسازی جریان شیلیاری در منطقه مورد مطالعه

انرژی واحد (E, m)	قدرت جریان واحد ($\phi, m s^{-1}$)	قدرت جریان ($\omega, kg s^{-3}$)	تنش برشی (τ, Pa)	سرعت جریان (V, $m s^{-1}$)	عمق آب (h, m)	میزان جریان (Q, $L m^{-1} s^{-1}$)	شیب (S, $m m^{-1}$)	آزمایش
۰/۰۰۶	۰/۰۰۸	۰/۳۰	۱/۵۸	۰/۱۹	۰/۰۰۴	۰/۲۲		۱
۰/۰۰۹	۰/۰۱۰	۰/۵۲	۲/۰۹	۰/۲۵	۰/۰۰۶	۰/۳۳		۲
۰/۰۱۳	۰/۰۱۶	۰/۸۵	۲/۲۴	۰/۳۸	۰/۰۰۶	۰/۴۴	۰/۰۴۱	۳
۰/۰۱۸	۰/۰۱۹	۱/۲۹	۲/۸۰	۰/۴۶	۰/۰۰۸	۰/۵۶		۴
۰/۰۲۶	۰/۰۲۳	۱/۹۵	۳/۴۲	۰/۵۷	۰/۰۰۹	۰/۶۷		۵
۰/۰۰۶	۰/۰۲۱	۰/۵۴	۲/۲۷	۰/۲۴	۰/۰۰۳	۰/۲۲		۶
۰/۰۱۱	۰/۰۳۲	۱/۳۱	۳/۶۳	۰/۳۶	۰/۰۰۴	۰/۳۳		۷
۰/۰۱۷	۰/۰۴۳	۲/۰۹	۴/۲۶	۰/۴۹	۰/۰۰۵	۰/۴۴	۰/۰۸۸	۸
۰/۰۲۴	۰/۰۵۲	۳/۰۲	۵/۱۱	۰/۵۹	۰/۰۰۶	۰/۵۶		۹
۰/۰۳۰	۰/۰۵۹	۳/۹۸	۵/۹۴	۰/۶۷	۰/۰۰۷	۰/۶۷		۱۰
۰/۰۰۶	۰/۰۵۱	۱/۰۳	۳/۶۷	۰/۲۸	۰/۰۰۲	۰/۲۲		۱۱
۰/۰۱۱	۰/۰۷۱	۲/۲۹	۵/۸۶	۰/۳۹	۰/۰۰۳	۰/۳۳		۱۲
۰/۰۱۹	۰/۰۹۶	۳/۹۸	۷/۵۲	۰/۵۲	۰/۰۰۴	۰/۴۴	۰/۱۸۲	۱۳
۰/۰۲۶	۰/۱۱۵	۵/۷۶	۹/۱۴	۰/۶۳	۰/۰۰۵	۰/۵۶		۱۴
۰/۰۳۳	۰/۱۳۱	۷/۷۲	۱۰/۷۳	۰/۷۲	۰/۰۰۶	۰/۶۷		۱۵
۰/۰۰۷	۰/۰۹۱	۱/۲۳	۳/۷۲	۰/۳۳	۰/۰۰۱	۰/۲۲		۱۶
۰/۰۱۳	۰/۱۲۷	۳/۱۴	۶/۸۳	۰/۴۶	۰/۰۰۳	۰/۳۳		۱۷
۰/۰۱۹	۰/۱۵۴	۴/۹۶	۸/۸۶	۰/۵۶	۰/۰۰۳	۰/۴۴	۰/۲۷۵	۱۸
۰/۰۲۹	۰/۱۹۰	۷/۸۴	۱۱/۳۶	۰/۶۹	۰/۰۰۴	۰/۵۶		۱۹
۰/۰۳۷	۰/۲۱۷	۱۰/۹۱	۱۳/۸۱	۰/۷۹	۰/۰۰۵	۰/۶۷		۲۰
۰/۰۰۸	۰/۱۴۶	۱/۶۹	۴/۴۵	۰/۳۸	۰/۰۰۱	۰/۲۲		۲۱
۰/۰۱۴	۰/۱۸۸	۴/۱۳	۸/۴۴	۰/۴۹	۰/۰۰۲	۰/۳۳		۲۲
۰/۰۲۰	۰/۲۲۶	۵/۱۹	۸/۸۰	۰/۵۹	۰/۰۰۲	۰/۴۴	۰/۳۸۳	۲۳
۰/۰۳۲	۰/۲۸۷	۹/۲۶	۱۲/۳۴	۰/۷۵	۰/۰۰۳	۰/۵۶		۲۴
۰/۰۴۲	۰/۳۲۹	۱۳/۶۰	۱۵/۸۲	۰/۸۶	۰/۰۰۴	۰/۶۷		۲۵

نتایج و بحث

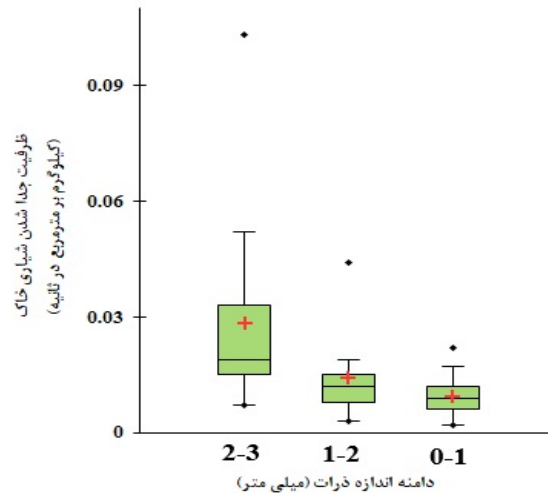
تغییرپذیری ظرفیت جداسازی جریان شیلیاری خاک در میان اندازه‌های مختلف ذرات

همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، میزان ظرفیت جداسازی جریان شیلیاری خاک به طور معنی‌داری بین اندازه‌های ۲-۳ میلی‌متری با اندازه‌های ۱-۲ و ۰-۱ متفاوت است. با این حال این تفاوت معنی‌دار بین اندازه‌های ۰-۱ و ۱-۲ مشاهده نشد.

به طور میانگین، این ویژگی خاک برای کلاس اندازه ذرات بین ۲ تا ۳ میلی‌متر بالاترین مقدار (۰/۰۲۸) کیلوگرم بر مترمربع در ثانیه، و برای کلاس اندازه ذرات بین ۰ تا ۱ میلی‌متر، کمترین مقدار (۰/۰۰۹) کیلوگرم بر مترمربع در ثانیه را نشان داد، در حالی که در کلاسی که ذرات آنها بین ۱ تا ۲ میلی‌متر بودند، این مقدار به ظرفیت جداسازی کلاس ۰ تا ۱ میلی‌متر نزدیکتر بود. مقدار ظرفیت جداسازی جریان شیلیاری خاک در کلاس ذرات ۲-۳

کوچکتر بود (با انحراف معیار ۰/۰۲۴ برای کلاس ذرات ۳-۲ میلی‌متر در برابر ۰/۰۱۰ و ۰/۰۰۵ کیلوگرم بر مترمربع در ثانیه به ترتیب برای کلاس‌های ۲-۱ و ۱-۰ میلی‌متر).

میلی‌متری، به ترتیب ۲ و ۳ برابر این مقدار در کلاس‌های ذرات ۲-۱ و ۱-۰ میلی‌متری بود. علاوه بر این، تغییرپذیری این ویژگی خاک نیز در بزرگترین کلاس اندازه ذرات استفاده شده در این مطالعه (۳-۲ میلی‌متر)، بیشتر از کلاس‌های دیگر با اندازه ذرات



شکل ۲- ظرفیت جداسازی جریان شیبی تحت سه دامنه اندازه‌های ذرات خاک در سراوان رشت ($p < 0.05$)

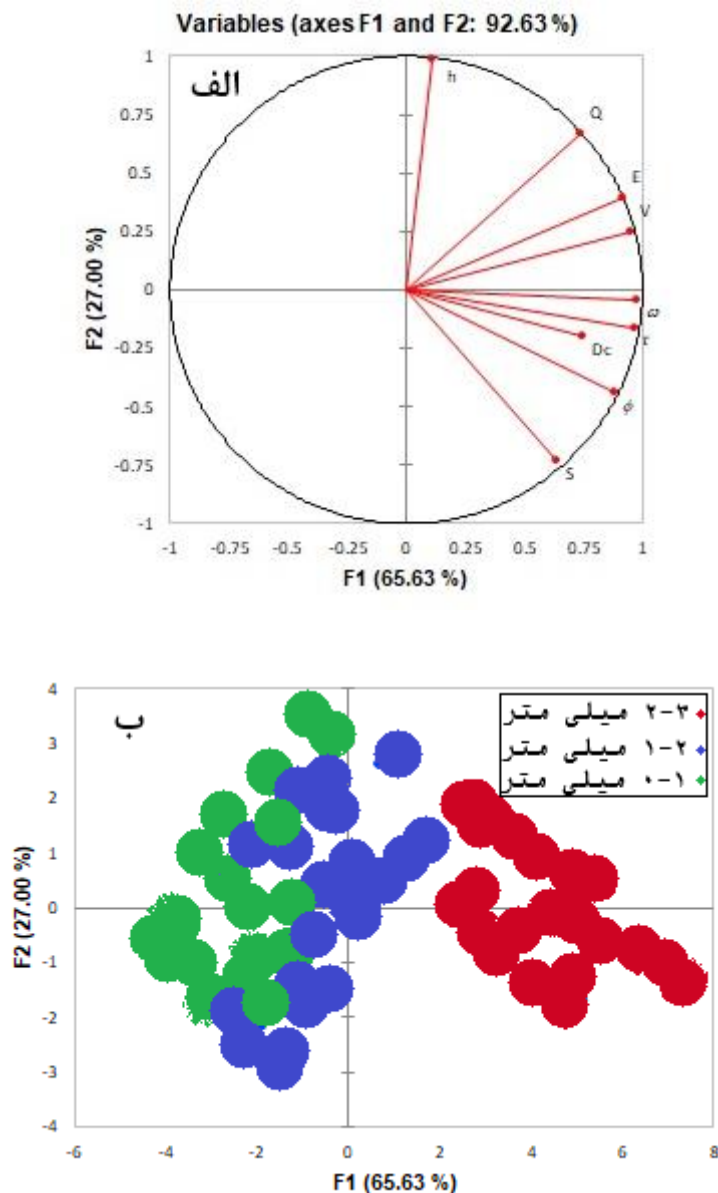
جریان، به جز عمق جریان آب در این مطالعه همبستگی مثبت معنی داری دارد ($P < 0.01$) (جدول ۳). این نتیجه در تطابق با نتایج تحقیقات Li *et al.*, 2019 می‌باشد. کاربرد آنالیز مولفه اصلی نیز این نتیجه را اثبات کرد که در این آنالیز دو مولفه اصلی تشخیص داده شدند که با یکدیگر حدود ۹۲/۶۳ درصد واریانس کل پارامترهای هیدرولیکی جریان را توضیح دادند (شکل ۳ الف). در جزئیات بیشتر، مولفه اول ۶۵/۶۳ درصد این تغییرپذیری و مولفه دوم ۲۷ درصد آن را توضیح داد. به طوری که ظرفیت جداسازی جریان شیبی خاک و همه پارامترهای هیدرولیکی جریان (به جز شیب و عمق جریان) یک اثر معنی دار را بر روی مولفه اول نشان دادند در حالی که شیب و عمق جریان این اثر را روی مولفه دوم نشان دادند (جدول ۴). همچنین با رسم مقادیر اثرات نمونه‌ها در دو مولفه ذکر شده، تفاوت آشکاری در جدا شدن ذرات خاک در بین کلاس‌های اندازه ذرات خاک پدیدار شد. به عبارت دیگر، دو گروه کاملاً تمایز یافته، یکی برای هر کلاس اندازه ذرات، با در نظر گرفتن هم‌پوشانی واضح نقاط مربوط به کلاس-های ذرات ۱-۰ و ۲-۱ ثابت شدند (شکل ۳ ب).

در این مطالعه بیش‌ترین مقادیر جدا شدن ذرات برای بزرگ‌ترین کلاس اندازه ذرات می‌تواند به دو دلیل باشد. دلیل اول این که مقدار خاک فرسایش یافته در هر واقعه شکست و جدا شدن ذرات خاک توسط رواناب، برای ذرات بزرگتر، بیشتر بود. دلیل دوم مربوط به مقاومت خاک در برابر جریان رواناب است. به عبارت دیگر، نیروی مقاومت کننده در برابر جریان آب در هر واحد سطح مقطع خاک، که از آن به عنوان مقاومت کششی نام برده می‌شود، برای ذرات درشت‌تر، مقدار کمتری بود. این نتیجه در تطابق با نتایج تحقیقات Nearing *et al.*, 1991 می‌باشد که نشان دادند بزرگترین کلاس اندازه ذرات بیشتر و سریع‌تر از کلاس کوچکتر اندازه ذرات از توده خاک جدا شدند. با این حال مطالعه دیگری نشان داد که مقادیر جدا شدن ذرات به علت کاهش جریان متلاطم مرتبط با اندازه‌های بزرگتر رسوبات، به طور زیادی کاهش یافت (Liu *et al.*, 2019). به عبارت دیگر، نتایج آنها نشان داد که با افزایش اندازه رسوبات، میانگین سرعت جریان کاهش یافت (Ali *et al.*, 2012). ضرایب همبستگی پیرسون نشان دادند که ظرفیت جداسازی جریان شیبی خاک با همه پارامترهای هیدرولیکی

جدول ۳- ضرایب همبستگی پیرسون برای ظرفیت جداسازی خاک و پارامترهای هیدرولیکی جریان آب در منطقه مورد مطالعه

پارامترهای هیدرولیکی	مقدار جریان	مقدار شیب	عمق جریان	سرعت جریان	تنش برشی	قدرت جریان	قدرت جریان واحد	انرژی واحد جریان
ظرفیت جداسازی شیبی خاک	۰/۳۹۰**	۰/۵۴۰**	-۰/۱۳۲	۰/۵۹۶**	۰/۶۸۵**	۰/۷۰۱**	۰/۶۹۶**	۰/۵۶۹**

** معنی داری در سطح ۰/۰۱ است.



شکل ۳- شکل الف: اثر مقادیر پارامترهای هیدرولیکی جریان و شکل ب: میزان همپوشانی کلاس‌های اندازه ذرات روی دو مولفه اصلی توضیح داده شده به وسیله PCA

جدول ۴ - مقدار اثرات پارامترهای هیدرولیکی جریان آب روی دو مولفه اصلی برای کلاس‌های اندازه ذرات در منطقه مورد مطالعه

پارامترهای هیدرولیکی	مولفه اول	مولفه دوم
ظرفیت جداسازی جریان شیبی	۰/۵۵۸	۰/۰۴۰
مقدار جریان	۰/۵۴۰	۰/۴۴۶
مقدار شیب	۰/۳۹۹	۰/۵۳۶
عمق جریان	۰/۰۱۱	۰/۹۶۶
سرعت جریان	۰/۹۰۵	۰/۰۶۱
تنش برشی	۰/۹۲۹	۰/۰۲۵
قدرت جریان	۰/۹۵۴	۰/۰۰۲
قدرت جریان واحد	۰/۷۷۸	۰/۱۹۵
انرژی واحد جریان	۰/۸۳۲	۰/۱۵۹

مقادیر هایلایت شده نشان دهنده موثر بودن پارامتر هیدرولیکی روی مولفه مورد نظر است.

روابط بین ظرفیت جداسازی جریان شیبی خاک و فرسایش پذیرگی شیبی و قدرت جریان واحد (Parhizkar et al., 2020a) مبتنی بر دقت بالای معادلات توانی در پیش‌بینی ظرفیت جداسازی

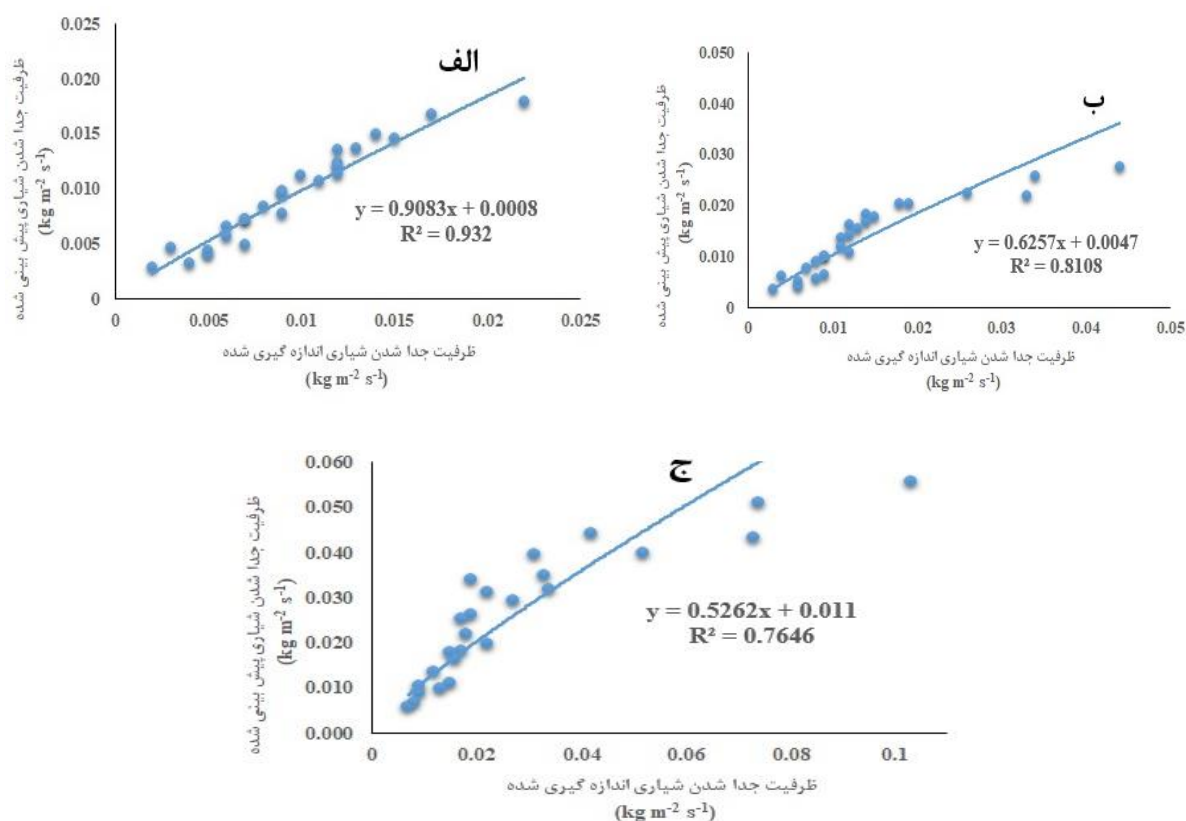
جریان شیاری خاک در منطقه پارک جنگلی سراوان رشت، و نیز انتخاب قدرت جریان واحد به عنوان بهترین پارامتر هیدرولیکی از طریق دقت زیاد شاخص‌های ارزیابی برای پیش‌بینی معادلات، از این پارامتر هیدرولیکی برای پیش‌بینی ظرفیت جداسازی جریان شیاری خاک در کلاس‌های مختلف اندازه ذرات استفاده شد. جدول (۵) معادلات توانی مرتبط با ظرفیت جداسازی جریان شیاری خاک با قدرت جریان واحد و نیز مقادیر شاخص‌های ارزیابی دقت آنها را گزارش می‌دهد. در مجموع همه معادلات توسعه یافته در کلاس‌های مختلف ذرات، با توجه به دقت بالای مقادیر شاخص‌های ارزیابی آنها برای پیش‌بینی ظرفیت جداسازی

جریان شیاری خاک مناسب بودند. نتایج نشان داد که قدرت جریان واحد می‌تواند به عنوان بهترین پیش‌بینی کننده ظرفیت جداسازی جریان شیاری خاک برای پیش‌بینی‌های جزئی‌تر مانند کلاس‌های مختلف اندازه ذرات در این مطالعه (با دقت پیش‌بینی ارائه شده در شکل (۴ الف، ب و ج)، علاوه بر پیش‌بینی‌های مناسب و با دقت بالا در بین کاربری‌های مختلف (Parhizkar *et al.*, 2020a) و اکویستم‌هایی با خصوصیات مورفولوژیکی متفاوت (Parhizkar *et al.*, 2020b) در این منطقه در مطالعات قبلی، استفاده شود.

جدول ۵- مدل‌های توانی بین ظرفیت جداسازی جریان شیاری خاک و قدرت جریان واحد به همراه شاخص‌های ارزیابی دقت

پارامتر هیدرولیکی	کلاس ذرات	معادله	R ²	RMSE	NSE
۰-۱		$D_c = 0.031\phi^{0.493}$	۰/۹۱	۰/۰۰۱	۰/۹۲
قدرت جریان واحد	۱-۲	$D_c = 0.051\phi^{0.551}$	۰/۸۵	۰/۰۰۵	۰/۷۷
	۲-۳	$D_c = 0.109\phi^{0.606}$	۰/۸۳	۰/۰۱۳	۰/۶۸

ϕ ، R²، RMSE و NSE به ترتیب قدرت جریان واحد، ضرایب تعیین، مجذور میانگین مربع خطا و ناش سانتکلیف هستند.



شکل ۴- ظرفیت جداسازی جریان شیاری اندازه گیری شده و پیش‌بینی شده برای کلاس‌های مختلف اندازه ذرات با استفاده از معادله‌های جدول (۵). شکل الف: کلاس ۰-۱، شکل ب: کلاس ۱-۲، شکل ج: کلاس ۲-۳

پارامتر اساسی بیان کننده مقاومت خاک در برابر فرسایش برای کلاس اندازه ذرات استفاده شده در این مطالعه گزارش می‌دهد. همانطور که این جدول نشان می‌دهد همه روابط بدست آمده

جدول (۶) روابط رگرسیونی بین تنش برشی جریان و ظرفیت جداسازی جریان شیاری خاک را به منظور یافتن ضریب فرسایش پذیری شیاری و تنش برشی بحرانی خاک به عنوان دو

فرسایش پذیری شیار (11/0 s m⁻¹) و بیشترین تنش برشی بحرانی خاک (2/09 Pa) را نشان داد. به عبارت دیگر مقدار ضریب فرسایش پذیری شیار برای خاک کلاس ۲-۳ میلی متر ۲/۴ و ۵ برابر این مقدار به ترتیب نسبت به کلاس‌های ۱-۲ و ۰-۱ میلی متر می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده، ثابت شد که ذرات بزرگتر از ۲ میلی متر روی شیب‌های تند، بیشتر در معرض فرسایش و جدا شدن به وسیله جریان سطحی رواناب در پارک جنگلی سراوان رشت قرار دارند.

برای همه کلاس‌های اندازه ذرات از دقت بالایی برخوردار هستند. این نتیجه در تطابق با یافته‌های Zhang *et al.*, 2008 است که در مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که می‌توان از رابطه تنش برشی جریان و ظرفیت جداسازی جریان شیار برای پیش-بینی داده‌ها به طور رضایت بخشی استفاده کرد. از میان کلاس‌های مختلف اندازه ذرات، کلاس ذرات ۲-۳ میلی متر بالاترین ضریب فرسایش پذیری شیار (56/0 s m⁻¹) را نشان داد. به طور عکس، کلاس ذرات ۰-۱ میلی متر کمترین ضریب

جدول ۶- نتایج آنالیز رگرسیون بین ظرفیت جداسازی جریان شیار خاک و تنش برشی بحرانی جریان برای کلاس‌های اندازه ذرات

کلاس اندازه ذرات	معادله رگرسیون (r)	تنش برشی بحرانی (Pa)	فرسایش پذیری شیار (s m ⁻¹)	R ²
۰-۱	D _c = 0.0011τ - 0.0023	۲/۰۹	۰/۰۱۱	۰/۸۶
۱-۲	D _c = 0.0023τ - 0.0007	۰/۳۰	۰/۰۲۳	۰/۸۰
۲-۳	D _c = 0.0056τ + 0.0085	۱/۵۱	۰/۰۵۶	۰/۸۵

τ و R² به ترتیب تنش برشی جریان و ضریب تعیین هستند.

نتیجه‌گیری

های رگرسیونی توانی پیشنهاد شده در این مطالعه، با دقت بالایی می‌توانند برای کنترل و کاهش خطرات فرسایش مورد استفاده قرار گیرند. با استفاده از این مدل‌ها، ظرفیت جداسازی جریان شیار خاک به همراه فرسایش‌پذیری شیار و تنش برشی بحرانی خاک می‌توانند در شرایط آزمایشی از قدرت جریان واحد به طور دقیقی پیش‌بینی شوند. با توجه به این روابط، فرسایش-پذیری شیار کمترین مقدار را در کلاس ذرات ۰-۱ میلی متر داشت، در حالی که این ویژگی خاک در کلاس ذرات ۲-۳ میلی-متر بالاترین مقدار بود. در کل، نتایج این مطالعه می‌تواند برای مدیران زمین در کاربرد گسترده مدل‌های پیش‌بینی فرسایش به سمت حفاظت خاک مفید باشد.

سپاس‌گزاری

نویسندگان این مقاله از دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان به دلیل حمایت و کمک‌های آزمایشگاهی نهایت تشکر را دارند.
"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

مطالعات محدودی اثر اندازه ذرات بر ظرفیت جداسازی جریان شیار خاک توسط جریان سطحی را توضیح داده‌اند. این تحقیق با هدف بررسی اثر اندازه ذرات بر میزان ظرفیت جداسازی جریان شیار خاک (D_c) در منطقه سراوان رشت انجام شد. برای این منظور، تغییرات D_c در نمونه‌های خاک با سه کلاس اندازه ذرات (۰-۱، ۱-۲ و ۲-۳ میلی‌متر) با استفاده از یک فلوم آزمایشگاهی در پنج درجه شیب (۴/۱ تا ۳۸/۳ درصد) و پنج میزان دبی جریان (۰/۲۶ تا ۰/۶۷ لیتر بر متر در ثانیه) با پنج تکرار اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که ظرفیت جداسازی جریان شیار خاک در کلاس ۲-۳ میلی‌متر در مقایسه با سایر کلاس‌های اندازه ذرات به طور معنی‌داری بالاتر است. با این حال، تفاوت معنی‌داری بین کلاس‌های اندازه ذرات ۰-۱ و ۱-۲ مشاهده نشد. ضرایب همبستگی پیرسون نشان دادند که ظرفیت جداسازی جریان شیار خاک با همه پارامترهای هیدرولیکی جریان، به جز عمق جریان آب در این مطالعه همبستگی مثبت معنی‌داری دارد. مدل

REFERENCES

- Ali, M., Sterk, G., Seeger, M. and Stroosnijder, L. (2012). Effect of flow discharge and median grain size on mean flow velocity under overland flow. *J. Hydrol*, 452-453, 150-160.
- Asadi, H., Moussavi, A., Ghadiri, H. and Rose, C. W. (2011). Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of sediment. *J. Hydrol*, 406, 73-81.
- Bagnold, R. A. (1966). An approach to the sediment transport problem for general physics. *In U.S. Geological Survey Professional Paper 422-I*; U.S. Government Printing Office: Washington, DC, USA.
- Bahrami, A., Emadodin, I., Ranjbar Atashi, M. and Bork, H. R. (2010). Land-use change and soil degradation: A case study, North of Iran. *Agric. Biol. J. N. Am*, 4, 600-605.
- Carter, M.R. and Gregorich. (2006) *Soil Sampling and Methods of Analysis* (2 th ed.). Canadian Society of Soil Science.
- Foster, G. R. (1982). Modeling the erosion process. *In Hydrologic Modeling of Small Watersheds*; Haan, C.T., Ed.; ASAE: St. Joseph, MI, USA, pp. 296-380.
- Geng, R., Zhang, G. H., Ma, Q. H. and Wang, L. J. (2017). Soil resistance to runoff on steep croplands in Eastern China. *Catena*, 152, 18-28.

- Govers, G., Everaert, W., Poesen, J., Rauws, G., De Ploey, J. and Lantier, J. P. (1990). A long flume study of the dynamic factors affecting the resistance of a loamy soil to concentrated flow erosion. *Earth Surf. Process. Landf*, 15, 313–328.
- Klute, A. (1986). *Methods of Soil Analysis*. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. Soil Science Society of America, Wisconsin, USA.
- Knapen, A., Poesen, J., Govers, G., Gyssels, G. and Nachtergaele, J. (2007). Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. *Earth Sci. Rev*, 80, 75–109.
- Li, M., Hai, X., Hong, H., Shao, Y., Peng, D., Xu, W., Yang, Y., Zheng, Y. and Xia, Z. (2019). Modelling soil detachment by overland flow for the soil in the Tibet Plateau of China. *Scientific Reports volume*, 9, 8063.
- Liu, J., Zhou, Z. and Zhang, X. J. (2019). Impacts of sediment load and size on rill detachment under low flow discharge. *Journal of Hydrology*, 570, 719–725.
- Merten, G. H., Nearing, M. A. and Borges, A. L. O. (2001). Effect of sediment load on soil detachment and deposition in rills. *Soil Sci. Soc. Am. J*, 65 (3), 861–868.
- Meteorological organization of Iran. (2009). *Climate data of synoptic station*, Retrieved December 3, 2014, from <http://www.irimo.ir/farsi/amar/map/province/gilan.asp>. (In Farsi).
- Nearing, M. A., Bradford, J. M. and Parker, S. C. (1991). Soil detachment by shallow flow at low slopes. *Soil Sci. Soc. Am. J*, 55, 339–344.
- Nearing, M. A. and Parker, S. C. (1994). Detachment of soil by flowing water under turbulent and laminar conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J*, 58, 1612–1614.
- Parhizgar, M., Asadi, H. and Moussavi, S. A. (2018). Effect of plot scale on runoff under natural rainfall (Case study; Saravan region, Rasht). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48, 1133–1144. (In Farsi)
- Parhizkar, M., Shabanpour, M., Khaledian, M., Cerdà, A., Rose, C. W., Asadi, H., Lucas-Borja, M. E. and Zema, D. A. (2020a). Assessing and modeling soil detachment capacity by overland flow in forest and woodland of Northern Iran. *Forests*, 11, 65.
- Parhizkar, M., Shabanpour, M., Zema, D. A. and Lucas-Borja, M. E. (2020b). Rill erosion and soil quality in forest and deforested ecosystems with different morphological characteristics. *Resources*, 9, 129; doi: 10.3390/resources9110129.
- Polyakov, V. O. and Nearing, M. A. (2003). Sediment transport in rill flow under deposition and detachment conditions. *Catena*, 51, 33–43.
- Raei, B., Asadi, H., Moussavi, A. and Ghadiri, H. (2015). A study of initial motion of soil aggregates in comparison with sand particles of various sizes. *Catena*, 127, 279–286.
- Soil and Water Research Institute. (1998). *moisture regimes Map of Iran soils*. Agricultural Research Service, Ministry of Agriculture Jihad, Retrieved December 3, 2014, from <http://www.swir.ir/>. (In Farsi).
- Wang, B., Zhang, G. H., Shi, Y. Y. and Zhang, X. C. (2014). Soil detachment by overland flow under different vegetation restoration models in the Loess Plateau of China. *Catena*, 116, 51–59.
- Wang, B., Zhang, G. H., Shi, Y. Y., Zhang, X. C., Ren, Z. P. and Zhu, L. J. (2013). Effect of natural restoration time of abandoned farmland on soil detachment by overland flow in the Loess Plateau of China. *Earth Surf. Process. Landf*, 38, 1725–1734.
- Wang, D. D., Wang, Z. L., Shen, N. and Chen, H. (2016). Modeling soil detachment capacity by rill flow using hydraulic parameters. *J. Hydrol*, 535, 473–479.
- Wang, J., Feng, S., Ni, S., Wen, H., Cai, C. and Guo, Z. (2019). Soil detachment by overland flow on hillslopes with permanent gullies in the Granite area of southeast China. *Catena*, 183, 104235.
- Wang, J. G., Li, Z. X., Cai, C. F., Yang, W., Ma, R. M. and Zhang, G. B. (2012). Predicting physical equations of soil detachment by simulated concentrated flow in Ultisols (subtropical China). *Earth Surf. Process. Landf*, 37, 633–641.
- Wang, Z. and Larsen, P. (1994). Turbulent structure of water and clay suspension with bed load. *J. Hydraul. Eng*, 120, 577–600.
- Xiao, H., Liu, G., Liu, P. L., Zheng, F. L., Zhang, J. Q. and Hu, F. N. (2017). Response of soil detachment rate to the hydraulic parameters of concentrated flow on steep loessial slopes on the loess plateau of China. *Hydrol. Process*, 31, 2613–2621.
- Yang, C. T. (1972). Unit stream power and sediment transport. *J. Hydrol. Div. ASCE*, 98, 1805–1826.
- Zhang, G. H., Liu, B. Y., Liu, G. B., He, X. W. and Nearing, M. A. (2003). Detachment of undisturbed soil by shallow flow. *Soil Sci. Soc. Am. J*, 67, 713–719.
- Zhang, G. H., Liu, G. B., Tang, K. M. and Zhang, X. C. (2008). Flow detachment of soils under different land uses in the Loess Plateau of China. *Trans. ASABE*, 51, 883–890.