

## Laboratory Study of the Motion Threshold and Temporal Variation of Sediment Concentration in Flow-induced Erosion

MOHAMADREZA VALI<sup>1</sup>, FARZIN NASIRI-SALEH<sup>1</sup>, HOSSEIN ASADI<sup>2\*</sup>

1. Department of Water Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2. Department of Soil Science, College of Agricultural and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

### ABSTRACT

Accelerated soil erosion is the most important degradation factor of soil and water resources. Typically, soil erosion involves the detachment and transport of soil particles by rainfall, shallow surface flow or the interaction of these two factors. Therefore, understanding the motion threshold of sediment particles and temporal variation of sediment concentration in flow-induced can provide a detailed cognition of the processes inducing soil erosion and sediment transport and their eventual interactions. It is also important for increasing the accuracy of soil erosion models. In this study, the particle motion threshold and temporal variation of sediment were studied for a sandy sample at three slopes; 3.1, 5.9, 8.9% and under three flow discharges of 4.78, 7.12 and 9.05 ( $\times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ). This study was carried out in the laboratory conditions using a flume with 240 cm long by 40 cm width. The results showed that the Shields curve is not suitable for this study to determine the motion threshold. The threshold stream power of particle motion was determined  $0.035 \text{ W m}^{-2}$ . Also, with increasing slope and consequently increasing stream power up to  $0.05 \text{ W m}^{-2}$ , the erosion intensity increased and soil erosion changed from sheet erosion to rill erosion. The results indicate that the formation and development of rill erosion would be the main factor for soil loss and sediment production in hillslopes. Therefore, prevention of rill formation by strip cropping, terracing and terrace farming is an effective strategy for soil conservation.

**Keywords:** Soil Erosion, Steady Flow, Shear Stress, Sediment Size Distribution, Shields Parameter.

## بررسی آزمایشگاهی آستانه حرکت ذرات و تغییرات زمانی غلظت رسوب در فرسایش ناشی از جریان رواناب

محمد رضا والی<sup>۱</sup>، فرزین نصیری صالح<sup>۱</sup>، حسین اسدی<sup>۲\*</sup>

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲. گروه علوم و مهندسی خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱/۱ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۲/۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۲/۱۶)

### چکیده

فرسایش خاک تشدید می‌شود به‌عنوان مهم‌ترین عامل تخریب منابع خاک و آب محسوب می‌شود. به‌طور معمول، فرآیند فرسایش خاک شامل جدا شدن و انتقال ذرات خاک توسط قطرات بارندگی، جریان کم‌عمق سطحی و یا برهمکنش این دو عامل است. بر این اساس، آگاهی از آستانه حرکت ذرات رسوب و تغییرات غلظت رسوب نسبت به زمان در فرسایش ناشی از جریان می‌تواند باعث شناخت دقیق فرآیندهای حاکم بر فرسایش خاک و انتقال رسوب و برهمکنش احتمالی آن‌ها و همچنین زمینه‌ای برای افزایش دقت مدل‌های فرسایش خاک باشد. در تحقیق حاضر، آستانه حرکت ذرات و تغییرات زمانی غلظت رسوب در نمونه‌ای ماسه‌ای در شرایط آزمایشگاهی در سه شیب ۳/۱، ۵/۹، ۸/۹ درصد و با سه دبی در واحد عرض ۴/۷۸، ۷/۱۲، ۹/۰۵ ( $\times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) در فلوومی به ابعاد ۲/۴۰ متر طول و ۰/۴۰ متر عرض بررسی شد. نتایج نشان داد، منحنی شیلدز برای تعیین آستانه حرکت برای این تحقیق مناسب نبود. قدرت جریان آستانه حرکت ذرات، ۰/۳۵ وات بر مترمربع تعیین شد. همچنین با افزایش شیب و به تبع آن افزایش قدرت جریان تا ۰/۰۵ وات بر مترمربع، شدت فرسایش افزایش یافت و فرسایش خاک از حالت ورقه‌ای به شیاری تبدیل شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که عامل اصلی تلفات خاک و تولید رسوب در دامنه‌ها، تشکیل و توسعه فرسایش شیاری است. بنابراین یکی از راه‌هایی که می‌تواند به‌طور موثر میزان فرسایش خاک را کنترل کند، جلوگیری از تشکیل شیار با روش‌هایی همچون کشت نوری، تراس‌بندی و بانکت‌بندی است.

**واژه‌های کلیدی:** جریان ماندگار، تنش برشی، دانه‌بندی رسوب، پارامتر شیلدز.

### مقدمه

فرسایش خاک یک مشکل جدی محیط‌زیستی و همچنین تهدیدی برای توسعه کشاورزی و جامعه است. از گذشته اثرات نامطلوب فرسایش خاک بر سلامت خاک، محصولات کشاورزی، کیفیت آب و سلامت بوم‌سازگان به‌عنوان توسعه پایدار بشری شناخته شده است (Lal, 1998). فرسایش خاک نه تنها بر روی کاهش کیفیت اراضی، بلکه بر روی آلودگی و کیفیت آب هم تأثیرگذار است (Lei et al., 2008). از پیامدهای مخرب فرسایش بر خاک، کاهش حاصل‌خیزی، هدررفت مواد مغذی و کاهش باروری خاک می‌باشد. همچنین فرسایش خاک باعث کاهش رطوبت مؤثر خاک شده و پیامد خشکسالی را در بر دارد (Morgan, 2005). از سایر پیامدهای مخرب فرسایش خاک در خارج از محل، می‌توان به کاهش ظرفیت رودخانه‌ها، نهرها و زهکش‌ها، افزایش خطر جاری شدن سیل و کاهش طول عمر مفید مخازن و کانال‌های آبیاری و همچنین پیامدهای مخرب

وقوع ریزگردها در فواصل مکانی دورتر از محل وقوع فرسایش خاک اشاره کرد (Morgan, 2005).

فرسایش خاک فرآیندی است که طی آن ذرات و اجزا خاک توسط یک عامل یا نیروی فرساینده از بستر اصلی خود جدا شده و به مکان دیگری منتقل می‌شوند. در فرسایش آبی عوامل فرساینده خاک بارندگی و رواناب می‌باشند. در فرآیند فرسایش خاک سه مرحله مشخص و مجزا، یعنی (۱) جدا شدن ذرات خاک، (۲) انتقال ذرات خاک، و (۳) رسوب‌گذاری ذرات خاک حمل شده، وجود دارد (Asadi, 2005). فرآیند اصلی در فرسایش بین شیاری جهش و تعلیق ذرات ریز است. در حالی که بعد از ایجاد شیار، از میزان فعالیت این فرآیند کاسته می‌شود و انتقال با فرآیند چرخش که فرآیند غالب در انتقال ذرات بزرگ‌تر است، غالب می‌شود (Asadi et al., 2007, 2011; Shi et al., 2012; Daneshyar et al., 2014).

تنش برشی بحرانی<sup>۱</sup> از متغیرهای مهم خاک است که

\* نویسنده مسئول: ho.asadi@ut.ac.ir

تنش برشی است که در لحظه اول جدا شدن ذرات مشاهده می-شود (Leonard and Richard, 2004).

Bravo et al. (2014) با استفاده از مدل سازی عددی، تحقیقی را در زمینه آستانه حرکت ذرات بر مبنای تنش برشی بحرانی انجام دادند. نتایج نشان داد که علاوه بر پارامترهایی که در نمودار شیلدز به آن‌ها اشاره شده است، شکل، فشردگی و جهت گیری ذرات نیز بر آستانه حرکت آن‌ها مؤثر بوده و یکی از دلایل مبهم بودن و متفاوت بودن آستانه حرکت رسوبات از دیدگاه محققین مختلف نیز همین نکته است. Raei et al. (2015) به بررسی آزمایشگاهی آستانه حرکت ذرات با اندازه‌های مختلف در دو نمونه رسوب رودخانه‌ای و خاک جنگلی پرداختند. آن‌ها از دو روش افزایش تدریجی دبی در شیب ثابت و افزایش تدریجی شیب در دبی ثابت، برای تعیین آستانه حرکت ذرات استفاده نمودند. نتایج نشان داد تنش برشی بحرانی برای ذرات رسوب رودخانه‌ای به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از خاکدانه‌های خاک جنگلی است. این تحقیق نشان داد که میزان وابستگی تنش برشی بحرانی به اندازه ذرات به شدت تحت تأثیر چگالی و زاویه استقرار ذرات قرار می-گیرد. Xing et al. (2018) فرسایش پذیری و تنش برشی بحرانی دو نوع خاک زراعی را بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی فرسایش شیری را با محاسبه حداکثر شدت جدا شدن برآورد و مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که این روش می‌تواند به خوبی دو پارامتر مورد بررسی را برآورد نماید. Wu et al. (2018) نیز تنش برشی بحرانی مخلوط گل و شن را به صورت نظری مورد بررسی قرار داده و به عنوان تابعی از مقادیر تنش برشی بحرانی هر کدام به‌طور خالص، میزان گل و قطر شن بیان نمودند. نتایج نشان داد که دانسیته گل خشک اثر مستقیمی بر فرسایش مخلوط شن و گل دارد.

با وجود تحقیقات و فرمول‌های فراوان نظری در زمینه آستانه کنده شدن ذرات، هنوز ابهام‌ها و عدم قطعیت‌هایی به‌ویژه در شرایط جریان‌های سطحی و شیری کم عمق و با دبی کم که در فرسایش سطحی خاک در دامنه‌ها حاکم است، وجود دارد، چرا که اغلب مطالعاتی مرسوم در این زمینه برای جریان‌های کانالی و رودخانه‌ای و با ذرات نسبتاً درشت در مقایسه با خاک صورت گرفته‌اند. در تحقیق حاضر، آستانه حرکت ذرات رسوب و تغییرات زمانی غلظت رسوب در فرسایش ناشی از جریان کم عمق برای یک نمونه ماسه‌ای با توزیع اندازه تقریباً یکنواخت مشابه ذرات خاک در شرایط آزمایشگاهی، مورد بررسی قرار گرفته است. در آزمایش با ذرات خاک به دلیل وجود خاکدانه و شکستن احتمالی

آستانه جداسازی ذرات توسط رواناب را تعیین می‌کند و این متغیر در بسیاری از مدل‌های فرسایشی دیده می‌شود (Leonard and Richard, 2004). قدرت جریان آستانه‌ای<sup>۱</sup> نیز متغیر معادلی است که در برخی مدل‌های دیگر به کار می‌رود (Asadi et al., 2017). در حقیقت، آگاهی از تنش برشی بحرانی یا قدرت جریان آستانه و تعیین عوامل مؤثر بر آن برای برآورد فرسایش خاک با مدل‌های فرایندی ضروری است (Moody et al., 2005). حرکت اولیه، حرکت چند ذره، حرکت ضعیف و حرکت بحرانی، برخی از واژه‌های به کار رفته توسط محققین مختلف به عنوان تعریف شرایط آستانه حرکت می‌باشند. تنش برشی بحرانی زمانی رخ می‌دهد که نیروی برشی وارده باعث جدا شدن ذرات بستر ساکن شود. شیلدز اولین شخصی بود که در زمینه روش تعیین تنش برشی بحرانی مطالعات بنیادی انجام داده و نموداری در این زمینه ارائه داد (Allen, 1994). وی بر این باور بود که بیان تحلیلی نیروهای وارد بر یک ذره رسوبی خیلی مشکل است. ایرادهای اساسی به نمودار شیلدز وارد است، از جمله اینکه متغیرهای وابسته هم در محور طول‌ها و هم در محور عرض‌ها ظاهر می‌شوند. بر اساس طبیعت مسئله، متغیر وابسته می‌تواند تنش برشی بحرانی یا اندازه ذرات باشد. این نمودار بعدها توسط گاورز<sup>۲</sup> اصلاح گردید (Yang, 1996). نیروهای اعمال شده به بستر توسط جریان معمولاً کافی هستند تا ذرات ساکن یا خاکدانه‌ها را از بستر جدا نموده (کنده) و منتقل نمایند. ترکیب خصوصیات سیال (چگالی و ویسکوزیته)، جریان (سرعت و عمق) و ذره (اندازه، شکل و چگالی) تعیین کننده آستانه کنده شدن، مکانیسم و شدت انتقال رسوب هستند (Allen, 1994). تنش برشی بحرانی می‌تواند به وزن و زاویه استقرار ذره مربوط باشد، که خود به شکل و اندازه ذره وابسته هستند (Ileleji and Zhou, 2008).

متغیرهای فرسایش پذیری خاک و تنش برشی بحرانی به طور گسترده‌ای و به روش‌های گوناگون مزرعه‌ای و آزمایشگاهی (Gilley et al., 1993; Ravens and Gschwend, 1999; Moody et al., 2005; De Oliveira et al., 2009; Raei et al., 2015; Zhang et al., 2016; Xing et al., 2018; Wu et al., 2018) مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. تنش برشی بحرانی معمولاً با برقراری روابط رگرسیونی بین تنش برشی و مقدار انتقال، یا در آزمایش‌های فلوم با افزایش تدریجی شیب فلوم یا افزایش تدریجی دبی جریان تا زمان مشاهده حرکت اولیه ذرات به دست می‌آید (James et al., 1990). در این دو روش، تنش برشی بحرانی برابر تنش برشی محل تقاطع رابطه بین تنش برشی و شدت جداسازی خاک (شدت انتقال) است و یا این که تنش برشی بحرانی برابر مقدار

جریان و حوضچه آرامش برای آرام کردن جریان استفاده شده است (شکل ۱). نمونه در ۷۰ سانتی‌متر انتهای فلوم ریخته شده و در انتها یک ناودان گالوانیزه‌ای برای نمونه‌برداری رسوب تعبیه شده است. همچنین فلوم آزمایشگاهی قابلیت شیب‌پذیر بودن تا شیب ۱۱٪ را دارا می‌باشد. فلوم مورد استفاده غیر قابل نفوذ بود. به‌منظور پایدارشدن جریان قبل از رسیدن به بستر خاک، ۱۴۰ سانتی‌متر ابتدایی فلوم، ابتدا با یک یولونیت یکپارچه به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر پر شده و روی آن برای ایجاد زبری تقریباً مشابه خاک، موکت پرزدار چسبانده شد. از این روش در برخی از تحقیقات قبلی (Hussein et al., 2007) استفاده شده است. برای تولید جریان در بالادست فلوم از یک مخزن با هد ثابت استفاده شد تا جریان در طول آزمایش ثابت باشد، چرا که استفاده از پمپ به علت تلورانس و نوسانات، دبی ثابتی را در طول آزمایش تولید نمی‌کند و خطای آزمایش را بالا می‌برد.

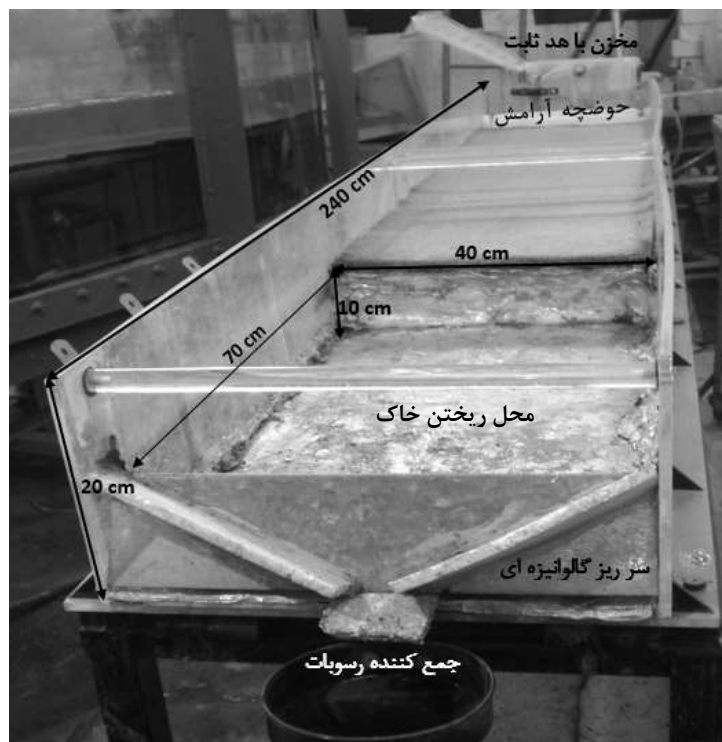
آن در طی آزمایش، توزیع اندازه ذرات خاک تغییر کرده و موجب عدم قطعیت می‌شود، لذا در این تحقیق از ذرات شن (ماسه) در دامنه قطری ذرات خاک استفاده شد.

### مواد و روش‌ها

این تحقیق با هدف بررسی آستانه حرکت ذرات و تغییرات غلظت رسوب با زمان در یک نمونه ماسه‌ای تحت شرایط جریان کم‌عمق ورقه‌ای و شیاری انجام شد.

### فلوم آزمایشگاهی

این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است. فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده دارای طول ۲۴۰ سانتی‌متر، عرض ۴۰ سانتی‌متر و عمق ۲۰ سانتی‌متر بود که در ابتدای آن از صفحات توری مشبک برای مستهلک کردن انرژی



شکل ۱- تصویر فلوم مورد استفاده (بالا) و شماتیک فلوم (پایین)

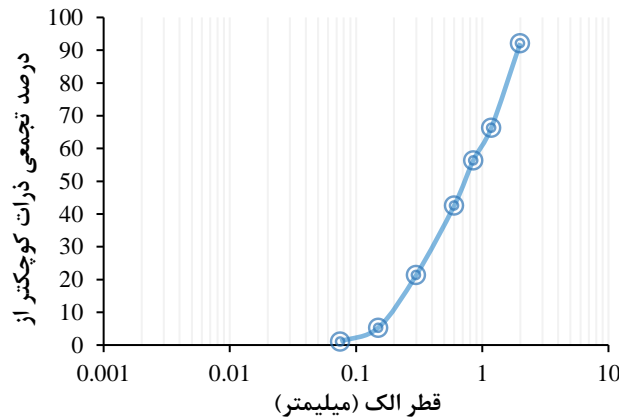
یکنواختی ۵/۳۸ و ضریب منحنی ۰/۹۵ می‌باشد. برای دانه‌بندی ابتدا خاک را در هوای آزاد کاملاً خشک کرده و سپس بر روی هفت جزء توزیع وزن شد، همچنین کل نمونه خاک از الک شماره ۸ عبور داده شد. قطر میانه ذرات ۰/۷ میلی‌متر بود. در آزمایش با

### آماده‌سازی نمونه‌ها و اندازه‌گیری‌ها

در این پژوهش برای تعیین آستانه حرکت و تغییرات زمانی غلظت رسوب از نمونه ماسه‌ای با دانه‌بندی ارائه شده در شکل (۲) استفاده شد. با توجه به منحنی دانه‌بندی، نمونه دارای ضریب

(ماسه) در دامنه قطری ذرات خاک استفاده شود.

ذرات خاک به دلیل وجود خاکدانه و شکستن احتمالی آن در طی آزمایش، توزیع اندازه ذرات خاک تغییر کرده و موجب عدم قطعیت می‌شود، لذا در این تحقیق تصمیم بر آن شد که از ذرات شن



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی نمونه مورد مطالعه

که در آن؛  $f$  ضریب اصطکاک داری ویسباخ و  $U$  میانگین سرعت جریان ( $m s^{-1}$ ) است. این معادله برای ارزیابی تنش برشی که بر سطح خاک اعمال می‌شود، به کار می‌رود. در برخی موارد، متغیرهای دیگری به غیر از تنش برشی نیز استفاده می‌شود. به عنوان مثال در برخی از معادلات فرسایش، سرعت برشی جریان به کار می‌رود و مقادیر سرعت برشی بحرانی ارزیابی می‌شود. تنش برشی و سرعت برشی به طور مستقیم به هم وابسته‌اند (Leonard and Richard, 2004). مقادیر سرعت برشی بحرانی به سادگی می‌تواند به مقادیر تنش برشی بحرانی تبدیل شود. جداسازی همچنین به قدرت جریان  $\Omega$  ( $W m^{-2}$ ) نیز وابسته است که در مطالعات مختلف آزمایشگاهی (Merz and Bryan, 1993) و به علاوه در مدل‌سازی به کار گرفته می‌شود (Rose et al., 1983; Hairsine and Rose, 1992; Zhang, 2019). قدرت جریان نتیجه‌ی حاصل ضرب تنش برشی در میانگین سرعت است:

$$\Omega = \rho g h U S = \rho g S q \quad (\text{رابطه ۳})$$

بنابراین تبدیل داده‌های قدرت جریان به داده‌های تنش برشی زمانی ممکن است که سرعت متوسط مشخص باشد. همچنین با داشتن دبی در واحد عرض ( $q, m^2 s^{-1}$ ) یا سرعت و عمق جریان می‌توان قدرت جریان را محاسبه نمود.

### آزمایش‌ها

برای به دست آوردن آستانه حرکت ذرات رسوب، در ابتدا با اعمال سه دبی جریان در دامنه جریان‌های ورقه‌ای و شیارهای کوچک (دبی واحد عرض در دامنه ۰/۵ تا ۱ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر در ثانیه) و سه شیب در دامنه شیب اراضی زراعی (حدود ۳ تا ۹٪) و همچنین با استفاده از نمودار شیلدز آزمایش‌های مختلف انجام گرفت و سپس به بررسی اثر قدرت جریان بر غلظت رسوب

برای آماده‌سازی بستر آزمایش، نمونه در لایه‌های ۳ سانتی‌متر در فلوم ریخته و متراکم گردید، قبل از قرار دادن لایه بعدی، لایه زیرین خراش داده شد و در نهایت یک سانتی‌متر رویی بدون تراکم (مشابه خاک شخم خورده)، تراز گردید. کلیه آزمایش‌ها در شرایط اشباع انجام شد. برای اطمینان از اشباع بودن در شرایط شیب نزدیک به صفر با دبی خیلی کم به مدت ۱۲ ساعت بر روی نمونه جریان را رها کرده تا به حالت اشباع رسیده شود. زمان هر آزمایش با توجه به تحقیقات قبلی (Asadi et al., 2007, 2017; Misra and Rose, 1995) برای رسیدن فرسایش به حالت تقریباً پایدار، ۳۵ دقیقه تعیین شد. نمونه‌برداری از رواناب و رسوب خروجی در ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵، ۶۰، ۶۵، ۷۰، ۷۵، ۸۰، ۸۵، ۹۰، ۹۵، ۱۰۰ دقیقه تعیین شد و سپس بعد از خشک کردن در آن به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس، وزن رسوبات نیز تعیین گردید.

### محاسبات هیدرولیکی

در مورد جریان‌های با سطح آزاد و در حالت ماندگار، تنش برشی ( $\tau, N m^{-2}$ ) با رابطه زیر به سادگی برآورد می‌شود:

$$\tau = \rho g h S \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن؛  $\rho$  چگالی آب ( $kg m^{-3}$ )،  $g$  شتاب ثقل ( $m s^{-2}$ )،  $h$  عمق آب ( $m$ ) و  $S$  شیب ( $m m^{-1}$ ) می‌باشد (Chow et al., 1988). در طول آزمایش‌ها، تنش برشی عمدتاً با افزایش سرعت جریان افزایش می‌یابد، اگر چه افزایش در تنش برشی ممکن است، با افزایش شیب نیز حاصل شود. با استفاده از معادله داری ویسباخ، (رابطه ۱) به صورت زیر نیز بیان می‌شود:

$$\tau = \frac{1}{8} \rho f u^2 \quad (\text{رابطه ۲})$$

در جدول (۱) مشخصات و پارامترهای اندازه‌گیری یا محاسبه شده در آزمایش‌های مختلف آمده است. بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده، در سه سری از آزمایش‌ها (آزمایش‌های شماره ۱، ۲ و ۴) برداشت رسوبی انجام نپذیرفت. برای چهار سری از آزمایش‌ها (آزمایش‌های شماره ۳، ۵، ۷ و ۸) فرسایش به صورت ورقه‌ای و برای دو سری از آزمایش‌ها (آزمایش‌های شماره ۶ و ۹) در طول انجام آزمایش، شیار ایجاد شد. تغییرات غلظت رسوب نسبت به زمان در آزمایش‌های مختلف ترسیم و مورد بررسی قرار گرفت. همچنین رابطه بین شاخص‌های مختلف غلظت رسوب شامل میانگین غلظت رسوب، غلظت رسوب حداکثر، و میانگین غلظت رسوب ۵ دقیقه اول و ۲۵ دقیقه آخر با قدرت جریان بررسی شد.

پرداخته شد. انتخاب دبی جریان‌ها و درصد شیب به گونه‌ای انجام شد که دامنه‌ای از قدرت جریان و تنش برشی ایجاد شود که بالاتر و پایین‌تر از آستانه احتمالی کنده شدن ذرات (Jayawardena and Bhuiyan, 1999; Asadi et al., 2011; Mahmoodabadi and Cerda, 2013; Raei et al., 2015) باشد.

تغییرات غلظت رسوب نسبت به زمان در آزمایش‌های مختلف ترسیم و مورد بررسی قرار گرفت. همچنین رابطه بین شاخص‌های مختلف غلظت رسوب شامل میانگین غلظت رسوب، غلظت رسوب حداکثر، و میانگین غلظت رسوب ۵ دقیقه اول و ۲۵ دقیقه آخر با قدرت جریان بررسی شد.

## نتایج و بحث

جدول ۱- پارامترهای هیدرولیکی جریان در آزمایش‌های مختلف

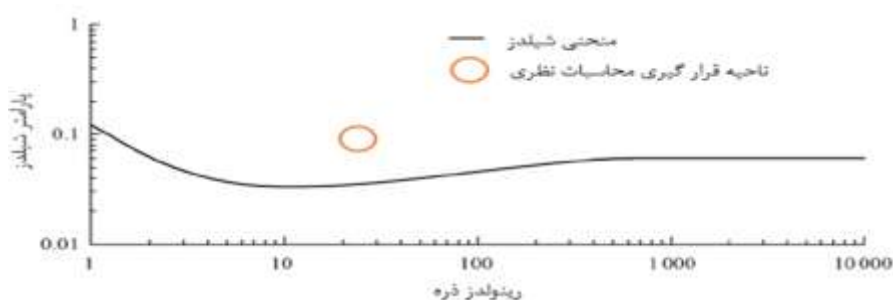
شماره آزمایش	دبی واحد عرض ( $10^{-5} m^2 s^{-1}$ )	شیب (%)	عمق جریان (cm)	عدد فرود	عدد رینولدز جریان	عدد رینولدز ذره	پارامتر شیلدز	قدرت جریان ( $W m^{-2}$ )	متوسط غلظت رسوب ( $kg m^{-3}$ )	کل هدر رفت خاک (g)
۱	۳/۱	۰/۳۵	۰/۷۳	۴۸	۲۴	۰/۰۹	۰/۰۱۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۲	۴/۷۸	۵/۹	۰/۹۲	۴۸	۳۰	۰/۱۵	۰/۰۲۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۳	۸/۹	۰/۲۵	۰/۱۲۲	۴۸	۳۴	۰/۱۹	۰/۰۴۲	۰/۰۸	۳/۳۳	۳/۳۳
۴	۳/۱	۰/۴	۰/۸۹	۷۱	۲۶	۰/۱۱	۰/۰۲۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۵	۷/۱۲	۵/۹	۰/۱۰۹	۷۱	۳۳	۰/۱۸	۰/۰۴۱	۰/۰۶	۳/۶۸	۳/۶۸
*۶	۸/۹	۰/۳	۰/۱۳۸	۷۱	۳۷	۰/۲۳	۰/۰۶۲	۲۴/۶۱	۱۴۷۲	۱۴۷۲
۷	۳/۱	۰/۴۵	۰/۹۵	۹۱	۲۷	۰/۱۲	۰/۰۲۷	۰/۰۵	۳/۴۴	۳/۴۴
۸	۹/۰۵	۵/۹	۰/۱۱۴	۹۱	۳۵	۰/۲۰	۰/۰۵۲	۰/۰۸	۵/۸۱	۵/۸۱
*۹	۸/۹	۰/۳۵	۰/۱۳۹	۹۱	۴۰	۰/۲۷	۰/۰۷۹	۳۰/۰۸	۲۲۸۶	۲۲۸۶

<sup>+</sup> عمق جریان، عدد فرود، عدد رینولدز جریان، عدد رینولدز ذره و پارامتر شیلدز در شرایط جریان ورقه‌ای اندازه‌گیری یا محاسبه شده‌اند، \* در مورد این آزمایش‌ها، بعد از متمرکز شدن جریان و تشکیل شیار قطعا مقادیر متفاوت است، اما قابل محاسبه نبود.

پارامترهای بی‌بعد نمودار شیلدز حکایت داشت، اما در حین انجام آزمایش‌های شماره ۱، ۲ و ۴ از بستر مورد آزمایش، رسوبی برداشت نشد. در شکل (۳)، محدوده قرار گرفتن شرایط آزمایش‌های ۱، ۲ و ۴ در نمودار شیلدز مشخص شده است که حاکی از به حرکت در آمدن ذرات بستر می‌باشد. بر همین اساس تصمیم به تعیین قدرت جریان پایه برای تعیین آستانه حرکت ذرات رسوب گرفته شد.

## بررسی منحنی شیلدز

در ابتدا پس از انجام آزمایش شماره یک با توجه به عدم برداشت رسوب برای تعیین آستانه حرکت ذرات تصمیم به بررسی با استفاده منحنی شیلدز گرفته شد. با توجه به منحنی دانه بندی، d<sub>50</sub> نمونه مورد آزمایش به دست آمد و همچنین با استفاده از عمق جریان، شیب و دبی در واحد عرض به بررسی آستانه حرکت با استفاده از نمودار شیلدز (Das et al., 2013) پرداخته شد. نتایج به صورت نظری از به حرکت در آمدن ذرات بستر با توجه به



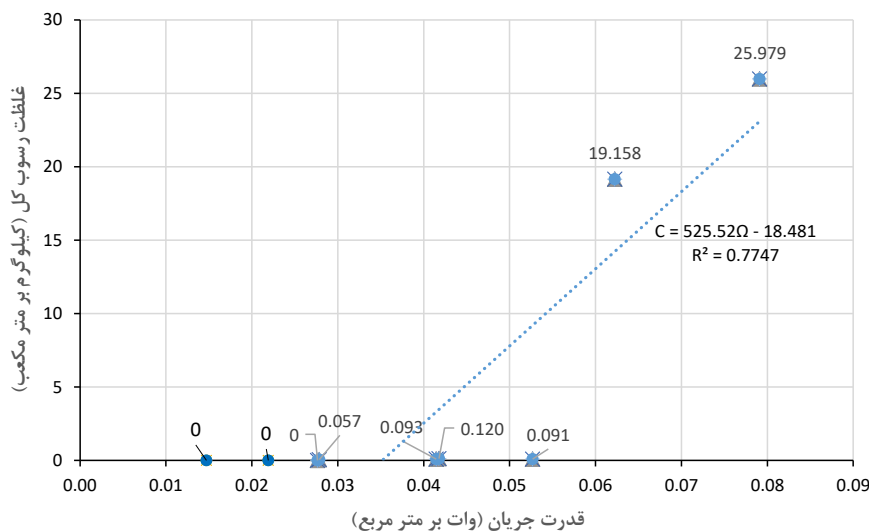
شکل ۳- بررسی آستانه حرکت با توجه به نمودار شیلدز (نمودار اقتباس از Das et al., 2013)

خاک حائز اهمیت می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، از قدرت جریان ۰/۰۵۵ وات بر مترمربع به بالا غلظت رسوب به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا کرده که ناشی از ایجاد شیار در بستر خاک بوده و طبق مشاهدات و اندازه‌گیری‌های انجام شده، برای برقراری شرایط ورقه‌ای در این پلات (۴۰×۷۰ سانتی‌متر) قدرت جریان‌های ۰/۰۳ تا ۰/۰۴۵ وات بر مترمربع مناسب بود. اما پارامتر شیب را هم باید مدنظر گرفت، چرا که به عنوان نمونه، قدرت جریان ۰/۰۴۵ وات بر مترمربع در شیب‌های بالاتر امکان ایجاد شیار را فراهم می‌کند، به علت اینکه نیروی لازم برای به حرکت در آمدن ذرات با توجه به افزایش شیب کمتر می‌شود. همین‌طور بر عکس با کاهش شیب با توجه به افزایش قدرت جریان از ایجاد شیار در بستر خاک جلوگیری شده است. در این مورد Yang *et al.* (2018) مشاهده کردند که غلظت رسوب حساسیت بیشتر نسبت به شیب در مقایسه با دبی جریان دارد. Raei *et al.* (2015) نشان دادند چنانچه برای تعیین آستانه حرکت ذرات از روش افزایش تدریجی شیب یا افزایش تدریجی دبی استفاده شود، نتیجه متفاوت خواهد بود.

با توجه به شکل ۳، به‌صورت نظری می‌بایست ذرات بستر به حرکت دربیایند، ولی در عمل برای شرایط آزمایش در این فلوم، حین انجام آزمایش چنین اتفاقی رخ نداد و برای نمونه‌های مورد استفاده در این آزمایش تطبیق وجود نداشت. اما در پژوهشی که توسط Raei *et al.*, (2015) انجام شد برای نمونه‌های با اندازه یکنواخت برآوردهای نظری تطابق خوبی با اندازه‌گیری‌ها داشته است. نمودار شیلدز بر مبنای تحلیل نیروهای وارد بر یک‌ذره در یک بستر یکنواخت است، اما تحلیل نیروهای وارد بر ذرات در یک بستر مخلوط به‌ویژه در جریان‌های سطحی کم‌عمق که فرسایش خاک اتفاق می‌افتد، بسیار مشکل است.

### بررسی قدرت جریان آستانه

نتایج مربوط به آستانه حرکت برای به حرکت در آوردن ذرات، قدرت جریان پایه را در حدود ۰/۰۳۵ (وات بر مترمربع) در شکل (۴) نشان داد که در اکثر پژوهش‌ها بین ۰/۰۳ تا ۰/۰۶ وات بر مترمربع می‌باشد ( Jayawardena and Bhuiyan, 1999; Asadi *et al.*, 2011; Mahmoodabadi and Cerda, 2013; Raei *et al.*, 2015). البته برای تعیین آستانه حرکت، نوع خاک و مقدار ریزدانه



شکل ۴- نمودار تعیین قدرت جریان آستانه

آزمایش‌های شماره ۵، ۷ و ۸ (شکل ۵-الف و شکل‌های ۶-الف و ۶-ب)، جریان در طول آزمایش در حالت ورقه‌ای باقی ماند و فرسایش به شکل بین‌شیاری بود. در این شرایط، غلظت رسوب در ابتدای رخداد (حدود ۵ دقیقه اول) ناپایدار و بیش‌تر بود و با گذشت زمان کاهش یافته و به یک مقدار تقریباً پایدار رسید. البته به دلیل تفاوت در قدرت جریان (دبی و شیب)، مقادیر اولیه و

### تغییرات زمانی شدت فرسایش ورقه‌ای و شیاری

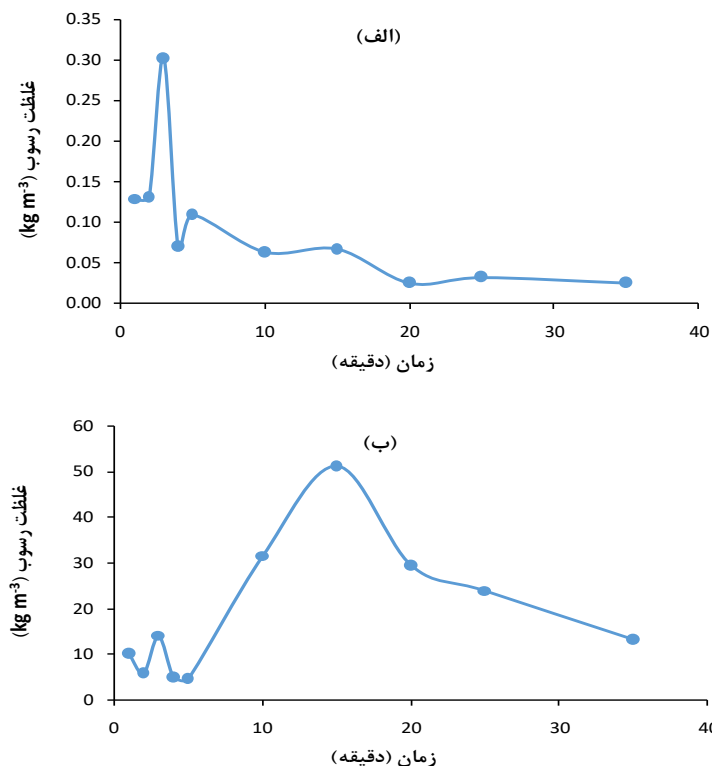
در شکل (۵) تغییرات غلظت رسوب با زمان در دو شیب ۵/۹ و ۸/۹ درصد تحت دبی جریان ۱/۷۰۹ لیتر در دقیقه ( $10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) (۷/۱۲) نشان داده شده است. در شکل (۶) نیز تغییرات غلظت رسوب با زمان در سه شیب ۳/۱، ۵/۹ و ۸/۹ درصد تحت دبی ۲/۱۷۲ لیتر در دقیقه ( $9/05 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) آمده است. در

طی وضعیت ناپایدار اولیه و کاهش از زمان ۳ تا ۵ دقیقه، ناگهان به شدت افزایش یافت و در زمان ۱۵ دقیقه بعد از شروع آزمایش، به اوج به ترتیب حدود ۵۰ و ۵۵ گرم در لیتر (کیلوگرم در مترمکعب) رسید. در این دو آزمایش، تا حدود ۵ دقیقه بعد از شروع آزمایش، جریان تقریباً ورقه‌ای و فرسایش بین‌شیاری بود. از این زمان به بعد، به‌طور مشخص با متمرکز شدن جریان، تشکیل و توسعه فرسایش شیاری اتفاق افتاد که موجب افزایش شدید غلظت رسوب شد. این وضعیت تا حدود ۱۵ دقیقه ادامه یافت اما به دلیل کوتاه‌بودن طول بستر و عدم امکان گسترش طولی بیش‌تر شیاری، غلظت رسوب دوباره کاهش یافت اما به حالت تعادل نرسید. در دبی بالاتر (شکل ۶-ج)، گسترش عرضی و جابجایی شیاری مانع از کاهش شدید غلظت رسوب گردید. در دو آزمایش شماره ۶ و ۹، مقدار کل تلفات خاک به ترتیب به حدود ۵/۲۶ و ۶/۴۳ کیلوگرم در مترمربع در ۳۰ دقیقه رسید. افزایش شدید غلظت رسوب به دلیل تشکیل شیاری توسط Asadi et al. (2007) نیز گزارش شده است. Sun et al. (2019) مشاهده کردند که حداکثر غلظت و بار رسوب در مرحله گسترش فرسایش شیاری است. آن‌ها همچنین گزارش کرده‌اند که فرسایش شیاری منشأ اصلی تولید رسوب بوده و بین ۵۴ تا ۹۶ درصد در تلفات خاک مشارکت دارد و نقش آن با افزایش شیب افزایش می‌یابد. Jiang et al. (2020) معتقدند که فرسایش شیاری سهم عمده‌ای در کل تلفات خاک دامنه‌ای در فلات‌های لسی چین را دارد.

نهایی متفاوت هستند. در کل، شدت فرسایش بین‌شیاری که در شرایط جریان ورقه‌ای رخ می‌دهد و در نتیجه مقدار کل تلفات خاک ناشی از آن، کم‌تر بود. مقدار کل تلفات خاک در مدت ۳۰ دقیقه آزمایش با تعیین سطح زیرمنحنی تغییر غلظت رسوب با زمان و ضرب آن در دبی برآورد شد. مقدار تلفات خاک برای آزمایش‌های شماره ۵، ۷ و ۸ به ترتیب ۱۳/۱۵، ۹/۶۷ و ۱۶/۳۲ گرم بر متر مربع در ۳۵ دقیقه بود.

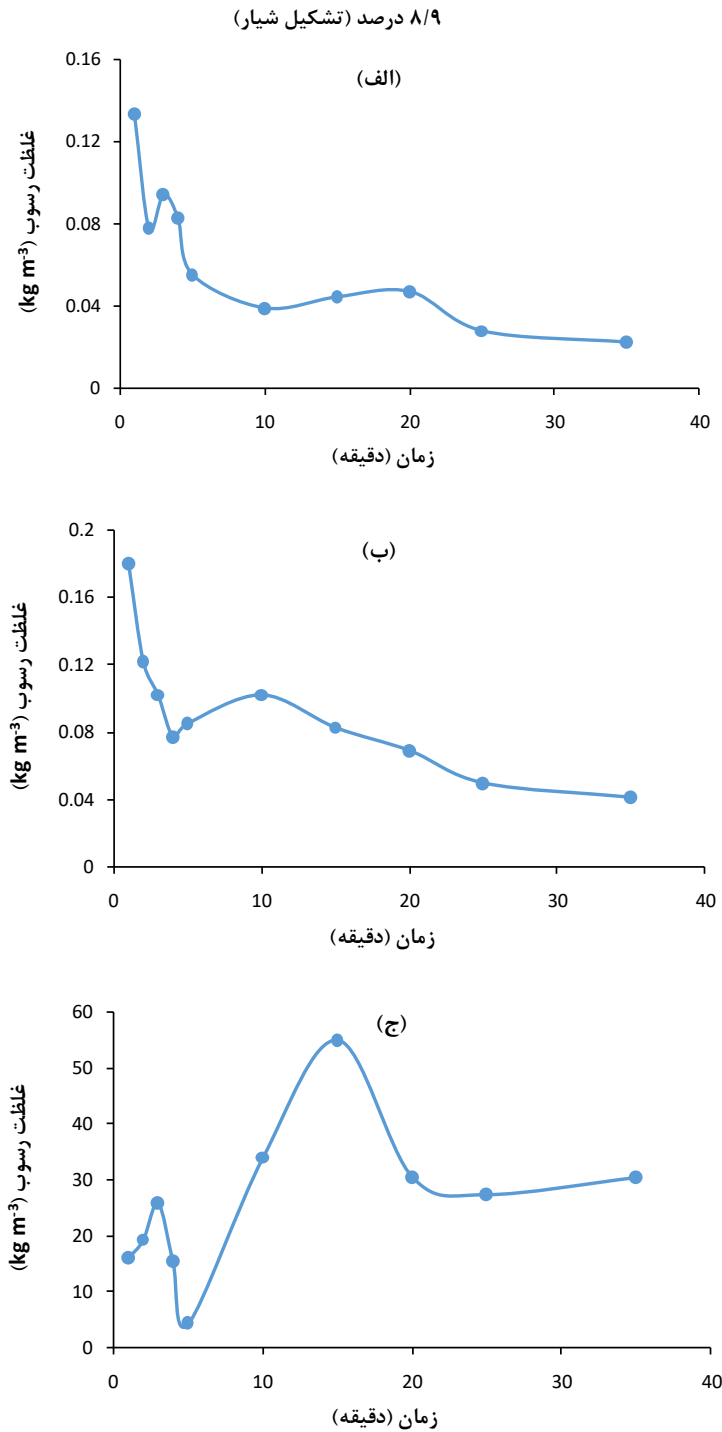
در تحقیقات بسیاری مثل (Asadi et al. (2007, 2017)، Proffitt et al., Misra and Rose (1995)، Fox and Bryan (1999) و (Proffitt and Rose (1991) این روند تغییرات غلظت رسوب گزارش شده است. Asadi et al. (2017) دلیل بالاتر بودن غلظت رسوب در ابتدای رخداد را به قرار داشتن جریان در حالت حداکثر ظرفیت انتقال مربوط می‌دانند و بیان می‌کنند در ابتدا به دلیل عواملی همچون آماده‌سازی نمونه و فروکشی ناشی از مرطوب شدن ناگهانی خاک، محدودیتی از نظر جدایش ذرات وجود ندارد و جریان قادر است با حداکثر توان خود انتقال رسوب نماید. اما با گذشت زمان و کاسته شدن از ذرات از قبل جداشده، شرایط جریان به حالت جدایش محدود تغییر وضعیت می‌دهد که با توجه به قدرت جریان کم در آزمایش‌های ۵، ۷ و ۸ (جدول ۱)، شدت فرسایش در حالت پایدار بسیار کم است.

در شیب ۸/۹ درصد تحت هر دو دبی جریان ۷/۱۲ و ۹/۰۵ ( $\times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) (شکل ۵-ب و شکل ۶-ج)، غلظت رسوب بعد از



شکل ۵- تغییرات غلظت رسوب با زمان در دبی ۱/۷۰۹ لیتر در دقیقه (دبی واحد عرض  $7/12 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) در دو شیب (الف) ۵/۹ درصد (فرسایش ورقه‌ای)، (ب)





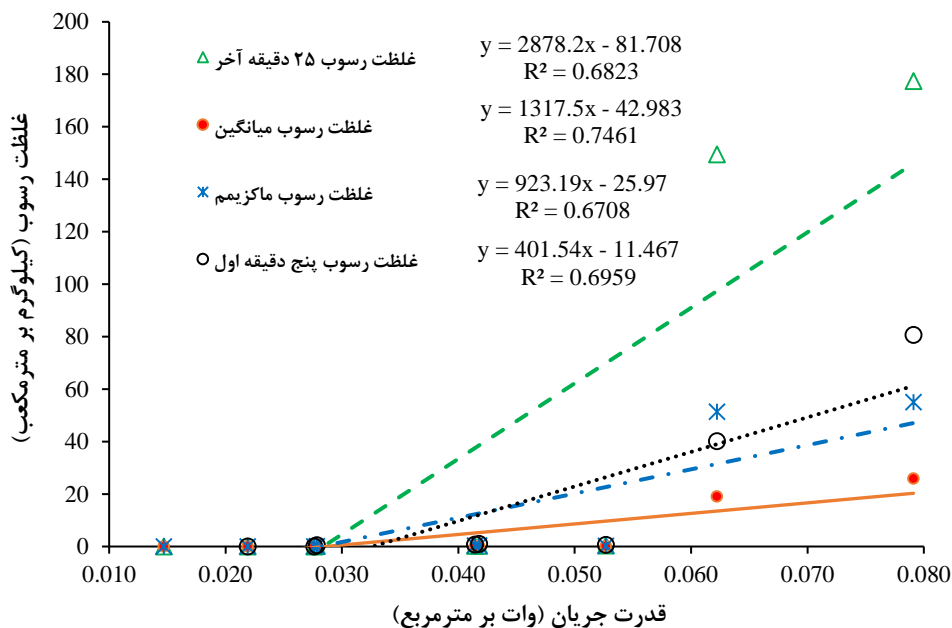
شکل ۶- تغییرات غلظت رسوب با زمان در دبی ۲/۱۷۲ لیتر در دقیقه (دبی واحد عرض  $9/05 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) در سه شیب (الف) ۳/۱ درصد، (ب) ۵/۹ درصد و (ج) ۸/۹ درصد

افزایش شیب و دبی جریان بوده است. به علت تعداد کم داده و مهم تر تفاوت نوع فرسایش، این روابط، عدم قطعیت بالایی دارند، ارائه آن‌ها تنها برای نشان دادن یک دید کلی از موضوع است. عدم قطعیت اصلی روابط ارائه شده در شکل (۷)، عمدتاً مربوط به محاسبه قدرت جریان است که با فرض ورقه‌ای بودن جریان انجام شده است، حال آنکه حداقل در دو آزمایش به طور مشخص جریان متمرکز بوده است. چنانچه، داده‌های مربوط به چهار

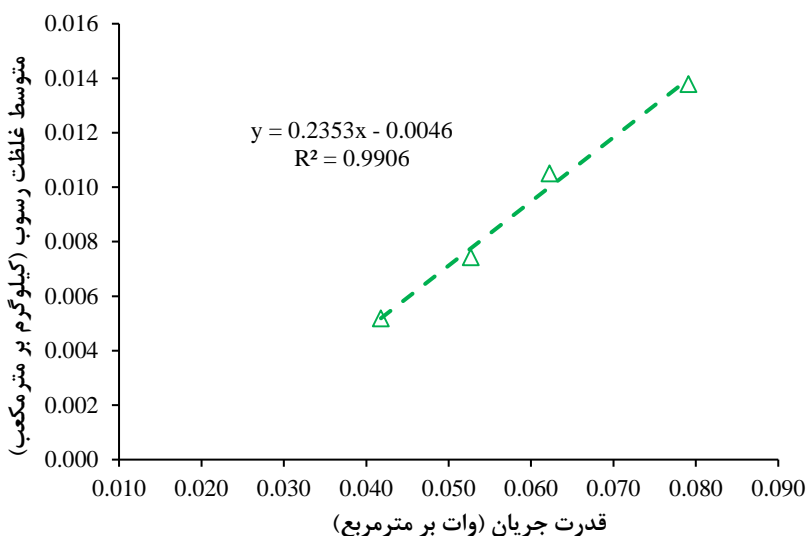
#### رابطه شدت فرسایش با قدرت جریان نسبت

در شکل (۷) رابطه خطی بین شاخص‌های مختلف غلظت رسوب شامل، غلظت رسوب میانگین و حداکثر، و متوسط غلظت رسوب ۵ دقیقه اول و ۲۵ دقیقه آخر با قدرت جریان آمده است. بالاترین همبستگی مربوط به میانگین غلظت رسوب است، اما ضریب تبیین برای سه مشخصه دیگر تفاوت چندانی با هم ندارند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش قدرت جریان غلظت رسوب افزایش پیدا کرده که این افزایش قدرت جریان ناشی از دو عامل

آزمایش با فرسایش ورقه‌ای (بین‌شیاری) به‌طور مجزا مورد بررسی قرار گیرند، همبستگی بسیار بالایی بین متوسط غلظت رسوب در ۵ دقیقه نخست با قدرت جریان برقرار است (شکل ۸).



شکل ۷- تغییرات شاخص‌های مختلف غلظت رسوب نسبت به قدرت جریان



شکل ۸- رابطه بین قدرت جریان و متوسط غلظت رسوب پنج دقیقه نخست در آزمایش‌های با فرسایش ورقه‌ای

### نتیجه‌گیری

شیاری علاوه بر مقدار کمیت‌های هیدرولیکی نظیر تنش برشی و قدرت جریان، تابع یک اثر مجزای شیب نیز می‌باشد. به بیان دیگر، اینکه تنش برشی (قدرت جریان) اعمال شده با چه ترکیبی از شدت جریان و شیب حاصل شده است، بر آستانه‌کننده شدن و حرکت ذرات اثرگذار است. به این معنی که در کمیت‌های مساوی از تنش برشی/قدرت جریان، در شیب‌های تندتر، آستانه‌کننده شدن ذرات پایین‌تر، شدت فرسایش بالاتر و امکان تمرکز جریان بیش‌تر است. برای تعیین میزان اثرپذیری فرسایش از

این تحقیق با هدف بررسی آستانه حرکت ذرات و تغییرات غلظت رسوب با زمان در یک نمونه ماسه‌ای تحت شرایط جریان کم‌عمق ورقه‌ای و شیاری انجام شد. آستانه‌کننده شدن ذرات به‌صورت نظری محاسبه و با مقادیر برآوردی از اندازه‌گیری مقایسه شد. مقادیر نظری برآوردی از نمودار شیلدز مناسب شرایط انجام آزمایش نبودند. در حقیقت آستانه حرکت ذرات و متعاقب آن وقوع فرسایش ورقه‌ای و حتی تمرکز جریان و رخداد فرسایش

مختلف نیز مورد تایید قرار گرفته است، از نظر حفاظت خاک اهمیت زیادی دارد. به بیان دیگر، در دامنه‌ها تا قبل از تشکیل شیار میزان فرسایش و انتقال رسوب ناچیز است و بنابراین یکی از راه‌هایی که می‌تواند به‌طور موثر میزان فرسایش خاک را کنترل کند، جلوگیری از تشکیل شیار با روش‌هایی همچون کشت نواری، تراس‌بندی و بانکت‌بندی است.

شیب و دبی جریان به‌طور مجزا در قدرت جریان‌های یکسان، نیاز به تحقیقات بیش‌تری می‌باشد.

در دو آزمایشی که در آن جریان متمرکز شده و فرسایش شیاری رخ داد (در شیب ۸/۹ درصد)، مقدار کل تلفات خاک به حدود ۴۰۰ برابر فرسایش ورقه‌ای (در شیب ۵/۹ درصد با دبی مشابه) رسید. این موضوع که نقش و اهمیت فرسایش شیاری در انتقال رسوب و تخریب خاک را نشان می‌دهد و توسط محققین

## REFERENCES

- Allen, J.R.L. (1994). Fundamental properties of fluids and their relation to sediment transport processes. In: Pye, K. (Ed.), *Sediment Transport and Depositional Processes*. Blackwell Scientific Publications, pp. 25–60.
- Asadi, H. (2005). Investigation of Soil Erosion Processes and Some Basic Concepts of Process-based Soil Erosion Models. PhD Thesis, Soil Science Department, University of Tehran.
- Asadi, H., Aligoli, M. and Gorji, M. (2017). Dynamic changes of sediment concentration in rill erosion at field experiments. *Journal of Water and Soil Science*, 20(78), 125-139.
- Asadi, H., Ghadiri, H., Rose, C.W., Yu, B. and Hussein J. (2007). An Investigation of flow-driven soil erosion at low streampowers. *Journal of Hydrology*, 342, 134–142.
- Asadi, H., Moussavi, A., Ghadiri, H. and Rose, C.W. (2011). Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of sediment. *Journal of Hydrology*, 406, 73-81.
- Bravo, R., Ortiz, P. and Perez-Aparicio, J.L. (2014). Incipient sediment transport for non-cohesive landforms by the discrete element method (dem). *Applied Mathematical Modelling*, 38(4), 1326–1337.
- Chow, V., Maidment, D. and Mays, L. (1988). *Applied Hydrology, Water Resources and Environmental Engineering*. McGraw-Hill, New York.
- Daneshyar, S.K., Asadi, H. and Moussavi, A. (2014). The effect of soil type and streampower on relative importance of flow-driven soil erosion processes. *Iranian Journal of Water and Soil Research*, 44(4): 273-382.
- Das, S., Das, R. and Mazumdar, A. (2013). Circulation characteristics of horseshoe vortex in scour region around circular piers. *Water Science and Engineering*, 6(1), 59–77.
- De Oliveira, J.F., Griebeler, N.P., Correchel, V. and da Silva, V.C. (2009). Erodibility and critical shear stress on unpaved road soils. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental – Agriambi* 13, 955–960.
- Fox, D.M. and Bryan, R.B. (1999). The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient. *Catena*, 38, 211–222.
- Gilley, J.E., Elliot, W.J., Laflen, J.M. and Simanton, J.R. (1993). Critical shear stress and critical flow rates for initiation of rilling. *Journal of Hydrology*, 142(1–4), 251–271.
- Hairsine, P.B., and Rose, C.W. (1992). Modeling water erosion due to overland flow using physical principles, II- Rill flow. *Water Resource Research*, 28(1): 245-250.
- Hussein, J., Yu, B., Ghadiri, H. and Rose, C. (2007). Prediction of surface flow hydrology and sediment retention upslope of a vetiver buffer strip *Journal of Hydrology*, 338(3–4), 261–272. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.02.038.
- Ileleji, K.E., Zhou, B., 2008. The angle of repose of bulk corn stover particles. *Powder Technol.* 187, 110–118.
- James, W.K., William, E.D., Fujiko, I. and Hiroshi, I. (1990). The variability of critical shear stress, friction angle and grain protrusion in waterworked sediments. *Sedimentology* 37, 647–672.
- Jayawardena, A.W. and Bhuiyan, R.R. (1999). Evaluation of an interrill soil erosion model using laboratory catchment data. *Hydrolic Processes*, 13, 89-100.
- Jiang, Y., Shi, H., Wen, Z., Guo, M., Zhao, J., Cao, X., Fan, Y. and Zheng, C. (2020). The dynamic process of slope rill erosion analyzed with a digital close range photogrammetry observation system under laboratory conditions. *Geomorphology*, 350. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106893.
- Lal, R. (1998). Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality. *Critical Reviv in Plant Science*, 4, 319–464.
- Lei, T.W., Zhang, Q.W., Yan, L.J., Zhao, J. and Pan, Y.H. (2008). A rational method for estimating erodibility and critical shear stress of an eroding rill. *Geoderma*, 144, 628–633.
- Leonard, J. and Richard, G. (2004). Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength. *Catena*, 57, 233–249.
- Mahmoodabadi, M. and Cerda, A. (2013). WEPP calibration for improved prediction of interrill erosion in semi-arid to arid environments. *Geoderma*, 204-205, 75-83
- Merz, W. and Bryan, R.B. (1993). Critical conditions for rill initiation on sandy loam Brunisols: Laboratory and field experiments in southern Ontario, Canada. *Geoderma*, 57, 357-385.
- Misra, R.K. and Rose, C.W. (1995). An examination of the relationship between erodibility parameter and soil strength. *Australian Journal of Soil Research* 32, 1-12.

- 33, 715–332.
- Moody, J.A., Smith, J.D. and Ragan, B.W. (2005). Critical shear stress for erosion of cohesive soils subjected to temperatures typical of wildfires. *Journal of Geophysics Research*, 110, F01004.
- Morgan, R. P. C. (2005). Soil Erosion and Conservation. Third edition published 2005 by Blackwell Publishing Ltd.
- Proffitt, A.P.B. and Rose, C.W. (1991). Soil erosion processes: II. Settling velocity characteristics of eroded sediment. *Australian Journal of Soil Research*, 29, 685–695.
- Proffitt, A.P.B., Rose, C.W. and Hairsine, P.B. (1991). Rainfall detachment and deposition: experiments with low slopes and significant water depths. *Soil Science Society of America Journal*, 55, 325–332.
- 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.
- Ravens, T.M. and Gschwend, P.M. (1999). Flume measurements of sediment erodibility in Boston harbor. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125 (10), 998–1005.
- Rose, C.W., Williams, J. R., Sander, G.C., and Barry, D.A. (1983). A mathematical model of soil erosion and deposition processes: I. Theory for a plane land element. *Soil Science Society of America Journal*, 47, 991–995.
- Shi, Z.H., Fang, N. F., Wu, F. Z., Wang, L., Yue, B. J. and Wu, G. L. (2012). Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes. *Journal of Hydrology*, 454–455, 123–130.
- Sun, L., Fang, H., Cai, Q., Yang, X., He, J., Zhou, J.L. and Wang, X. (2019). Sediment load change with erosion processes under simulated rainfall events. *Journal of Geographical Science*, 29, 1001–1020. <https://doi.org/10.1007/s11442-019-1641-y>.
- Wu, W., Perera, C., Smith, J. and Sanches, A. (2018). Critical shear stress for erosion of sand and mud mixtures. *Journal of Hydraulic Research*, 56(1), 96–110. [doi.org/10.1080/00221686.2017.1300195](https://doi.org/10.1080/00221686.2017.1300195).
- Xing, H., Huang, Y. han, Chen, X. yan, Luo, B. lin, and Mi, H. xing. (2018). Comparative study of soil erodibility and critical shear stress between loess and purple soils. *Journal of Hydrology*, 558, 625–631. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.060>.
- Yang, C.T. (1996) Sediment Transport: Theory and Practice. *McGraw-Hill, New York, NY*
- Yang, D., Gao, P., Zhao, Y., Zhang, Y., Liu, X., Zhang, Q. (2018). Modeling sediment concentration of rill flow. *Journal of Hydrology*, 561, 286–294, [doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.009](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.009).
- Zhang, Q., Lei, T. and Huang, X. (2016). Quantifying the sediment transport capacity in eroding rills using a REE tracing method. *Land Degradation and Development*, 28(2), 591–601.
- Zhang, X. C. (2019). Determining and modeling dominant processes of interrill soil erosion. *Water Resource Research*, 55, 4–20. <https://doi.org/10.1029/2018WR023217>.