



Rill erosion scaling in a sandy loam soil under field simulation

Ahad D. Milan¹, Samaneh Aghaei², Hossein Asadi³

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: milan@ut.ac.ir

2. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: sa.aghaei.94@gmail.com

3. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: ho.asadi@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Sep. 23, 2024

Revised: Nov. 2, 2024

Accepted: Nov. 16, 2024

Published online: March. 2025

Keywords:

*Particle detachment rate,
Power law equation,
Rill length,
Sediment concentration*

ABSTRACT

One of the most important problems in the soil erosion research is the dependency of measurements and estimates on the scale. Recently, studies in the field of soil erosion scaling have resulted in development of some different models. This research aimed to investigate the scaling of rill erosion in field conditions. Artificial rills with length of 1 to 8 meters and width of 5 cm were created in a plot with a slope of 5% in an agricultural soil with sandy loam texture and weak aggregate stability. The experiments were carried out under two target flow rates of 0.11 and 0.24 liters per second. Sediment concentration was measured during the event for 30 minutes, and its time changes were investigated along different rills. To scale rill erosion, the changes with rill length of the mean sediment concentration and particle detachment rate, both at three initial unsteady, final steady and total event conditions, were evaluated and modeled. The temporal changes of sediment concentration exhibited an exponentially decreasing trends almost in all cases. The average sediment concentration increased linearly with rill length (spatial changes) at lower flow rates, and exponentially (reaching a certain limit) under the higher flow rates in all three conditions. Also, the particle detachment rate decreased exponentially with rill length under both flow rates in all three cases of unsteady, steady and total event averages. The results generally confirmed the models and theories of the exponential decrease in the particle detachment rate with increasing rill length.

Cite this article: D.Milan,A., Aghaei, S., Asadi,. H. (2025) Rill erosion scaling in a sandy loam soil under field simulation, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (1),91-104. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.382458.669795>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.382458.669795>





EXTENDED ABSTRACT

Aim:

One of the most important problems in the field of soil erosion research is the dependency of measurements and estimates on the scale. In recent years, several studies have been conducted in the field of soil erosion scaling, which resulted in development of some different models. This research was conducted to investigate the changes in sediment concentration and detachment rate in rills with different lengths under various flow rates in the field conditions.

Methodology:

The research was carried out at the Educational and Research Farm of the University of Tehran located in Karaj (35°48' N latitude and 50°57' E longitude). The average annual temperature and precipitation of the area are 14.2°C and 256 mm, respectively. The soil was a calcareous sandy loam with weak aggregate stability. The rills of 1 to 8 meters lengths and 5 cm width were artificially created in a plot with an area of 140 square meters and a slope of 5 percent after plowing and leveling. The experiments were conducted under two flow rates of 0.12 and 0.25 liters per second. Sediment concentration and flow rate were measured periodically for 30 minutes. The changes with time in sediment concentration were evaluated for different rills and under both flow rate. To scale rill erosion, the changes with rill length of the mean sediment concentration and particle detachment rate, both at three initial unsteady, final steady and total event conditions, were evaluated and modeled.

Results:

The sediment concentration was generally decreased exponentially with time from an initial relatively high level reached to an almost steady level. The initial flashing out of fine and pre-detached particles, and development of a deposited layer are the eventual reasons for decreasing sediment concentration. The changes with time in sediment concentration affected by both flow rate and rill length. The average sediment concentration increased linearly with rill length (spatial changes) at lower flow rate, and exponentially (reaching a certain limit) under the higher flow rate in all three conditions of initial unsteady, final steady and whole event. On the other hand, the particle detachment rate decreased exponentially with rill length under both flow rates in all three cases of unsteady, steady and total event averages. The particle detachment rate induced by flow decreases with increasing sediment concentration, mainly due to consumption of flow energy for transportation. The scaling equation developed by Ban and Lei (2002) was reasonably fitted to the data.

Conclusion:

Soil erosion processes in rills are complex and dynamic affected by several factors such as soil type, flow rate and slope steepness, and as well by rill length. In general, the results of the current study confirmed the models and theories in which particle detachment rate in rills decreases exponentially with length.

Author Contributions

Conceptualization, H.A., S.A. and A.D.M.; methodology, H.A. and S.A.; software, A.D.M.; validation, A.D.M and H.A.; formal analysis, A.D.M., S.A. and H.A.; investigation, S.A.; resources, H. A.; data curation, S.A.; writing—original draft preparation, S.A. and A.D.M.; writing—review and editing, H.A. and A.D.M.; visualization, A.D.M.; supervision, H.A.; project administration, H.A.; funding acquisition, H.A.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

Acknowledgments

The authors would like to thank University of Tehran for providing all the needed facilities.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

مقیاس پذیری فرسایش شیاری در یک خاک لومی شنی در شرایط شبیه‌سازی مزرعه‌ای

احد دودکانلوی میلان^۱، سمانه آقایی^۲، حسین اسدی^{۳*}^۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: milan@ut.ac.ir^۲. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:sa.aghaci.94@gmail.com^۳. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:ho.asadi@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۷/۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۸/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۸/۲۶

تاریخ انتشار: فروردین ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:

شدت جداشدن ذرات،

طول شیاری،

غلظت رسوب،

رابطه نمایی.

یکی از مهم‌ترین مشکلات در زمینه تحقیقات فرسایش خاک وابستگی نتایج اندازه‌گیری و برآوردها به مقیاس است. در سال‌های اخیر مطالعات متعددی در زمینه مقیاس‌پذیری فرسایش خاک صورت گرفته است که حاصل آن ایجاد مدل‌های مختلف است. در این تحقیق که با هدف بررسی مقیاس‌پذیری فرسایش شیاری در شرایط مزرعه صورت پذیرفت، شیارهایی با طول ۱ تا ۸ متر و عرض ۵ سانتی‌متر در قطعه زمینی با شیب ۵ درصد در یک خاک زراعی با بافت لوم شنی و ساختمان ضعیف ایجاد شد. آزمایش‌ها با دو دبی جریان هدف ۰/۱۱ و ۰/۲۴ لیتر در ثانیه انجام شد. غلظت رسوب در طی فرایند آزمایش به مدت ۳۰ دقیقه اندازه‌گیری و تغییرات زمانی آن در طول شیارهای مختلف بررسی شد. برای مطالعه مقیاس‌پذیری، تغییرات میانگین غلظت رسوب و شدت جداشدن ذرات در سه حالت ناپایدار اولیه، پایدار نهایی و کل رخداد با طول شیاری بررسی و مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد که تغییرات زمانی غلظت رسوب به‌صورت نمایی کاهش است. میانگین غلظت رسوب با طول شیاری (تغییرات مکانی) در هر سه حالت در دبی جریان کم‌تر به‌صورت خطی و با دبی بیش‌تر به‌صورت نمایی (رسیدن به یک حد مشخص) افزایش یافت. همچنین، تغییرات شدت جداشدن با طول شیاری در هر سه حالت ناپایدار، پایدار و میانگین رخداد تحت هر دو دبی جریان، به‌صورت نمایی کاهش یافت. نتایج به‌طور کلی تایید کننده مدل‌ها و نظریه‌های کاهش تصاعدی شدت جداشدن ذرات با افزایش طول بود.

استناد: دودکانلوی میلان، احد؛ آقایی، سمانه؛ و اسدی، حسین، (۱۴۰۴) مقیاس‌پذیری فرسایش شیاری در یک خاک لومی شنی در شرایط شبیه‌سازی مزرعه‌ای، مجله

تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶(۱)، ۹۱-۱۰۴. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.382458.669795>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.382458.669795>

مقدمه

توزیع مکانی فرسایش شیاری و بین‌شیاری برای درک اصول فرسایش خاک و توسعه مدل‌ها و ارائه راهکارهای حفاظت از خاک و آب ضروری است (He et al., 2022; Li et al., 2024). شیارها اغلب به‌عنوان آبراهه‌هایی شیب‌دار با عرض و عمق ۲-۲۰ سانتی‌متر شناخته می‌شوند که به دلیل فرسایش ناشی از جریان سطحی ایجاد می‌شوند (Liu et al., 2018; Ou et al., 2021). تشکیل شیار به‌عنوان یکی از فرایندهای مهم فرسایش باعث تخریب خاک و از بین‌رفتن خاک حاصلخیز و به دنبال آن آلودگی محیط‌زیست می‌شود که در مقیاس کوچک اما در سطح جهانی رخ می‌دهد (Tian et al., 2022; Ou et al., 2021). اهمیت مطالعات فرسایش شیاری به دلیل سهم قابل‌توجه آن در فرسایش خاک است (Li et al., 2008; He et al., 2023; Qian et al., 2024). فرسایش شیاری یکی از عوامل مهم هدررفت خاک در دامنه‌ها (اراضی شیب‌دار) و مزارع است، به همین دلیل مطالعات زیادی در مورد این نوع از فرسایش و مکانیسم‌های دخیل در آن صورت پذیرفته است (Chao et al., 2016, He et al., 2023).

بسیاری از مدل‌های برآورد فرسایش خاک دارای کاستی‌هایی هستند (Parsons et al., 2004) که از جمله دلایل این کاستی‌ها را می‌توان: (۱) روش‌های اندازه‌گیری، (۲) وابستگی فرایندها به مقیاس، و (۳) تنوع فرایندهای فرسایش خاک و قرارگرفتن آن در معرض تغییرات مکانی و زمانی دانست (Garcia-Ruiz et al., 2015; Wirtz et al., 2013). برای ارائه یک مدل موفق در مدل‌سازی فرسایش شیاری، شناخت تغییرات مکانی و زمانی هر یک از فرایندهای فرسایش شیاری ضروری است (Ou et al., 2021). اثرات مقیاس مکانی بر فرسایش خاک بسیار پیچیده است که تحت تاثیر درجه‌شیب، نوع خاک و سرعت جریان قرار می‌گیرد (Hussein et al., 2023). مقیاس‌پذیری در فرسایش خاک به توانایی پیش‌بینی و ارزیابی فرایندهای فرسایش در مقیاس‌های مکانی و زمانی مختلف، از کرت‌های تجربی کوچک تا حوزه‌های آبخیز بزرگ‌تر اشاره دارد. این شامل درک چگونگی تعامل عواملی مانند نوع خاک، کاربری زمین و پایداری خاکدانه‌ها برای تأثیرگذاری بر نرخ فرسایش در مقیاس‌های مختلف است (García-Ruiz, 2015).

بیش‌تر مطالعات صورت پذیرفته برای بررسی تغییرات مکانی و زمانی فرسایش شیاری در شرایط آزمایشگاهی انجام‌گرفته است (Chen et al., 2016; Hussein et al., 2023; Feng et al., 2023) حال آنکه مدلی می‌تواند اعتبار کافی داشته باشد که بتواند در شرایط واقعی‌تر هم نتایج و برآوردهای موفقی را ارائه دهد. بر این اساس، هدف از این مطالعه: (۱) بررسی تغییرات غلظت رسوب ناشی از فرسایش شیاری در طول شیارهای مختلف، (۲) ارزیابی مدل ذکر شده برای مقیاس‌پذیری فرسایش شیاری و (۳) بررسی تغییرات جداسدن ذرات با افزایش طول شیار (مقیاس مکانی) در شرایط شبیه‌سازی مزرعه‌ای بود.

پیشینه پژوهش

تغییرات غلظت رسوب تحت شرایط مختلف از نظر درجه شیب و شدت جریان‌های مختلف در طول شیارهای مختلف در شرایط آزمایشگاهی شناسایی شده است (Hussein et al., 2023; Asadi et al., 2011; Chen et al., 2017). این تغییرات یکی از پارامترهای بسیار مهم در بررسی تغییرات فرسایش در طول‌های مختلف است (Hussein et al., 2023).

برای بررسی تغییرات غلظت رسوب (تغییرات مکانی غلظت رسوب) در طول شیار، چندین مدل (Chen et al., 2014; Lei et al., 2002) پیشنهاد شده است که اساس این مدل‌ها بر مبنای نظریه هرساین و رز (۱۹۹۲) و فاستر و مایر (۱۹۷۲) است. در هر دو نظریه، با شرط اینکه شدت جریان و شیب در طول رویداد ثابت بماند، شدت جداسدن رسوب به طور تصاعدی کاهش می‌یابد، درحالی‌که توضیح مکانیسم موثر بر این روند، یعنی مفهوم ظرفیت انتقال رسوب (نظریه فاستر) در مقابل مفهوم تشکیل لایه ترسیب‌یافته (نظریه رز)، کاملاً متفاوت است (Govers et al., 2007).

رابطه ۱ یکی از مدل‌هایی است که برای بررسی تغییرات غلظت رسوب در طول شیار در شرایط جریان پایدار و یکنواخت، ارائه شده است (Lei et al., 2002; Chen et al., 2014):

$$C = C_{max} \left(1 - e^{-\frac{D_c}{T_c} x} \right) \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن، C غلظت رسوب $A = C_{max}$ که نشان دهنده حداکثر پتانسیل تولید رسوب (kg m^{-3}) و $B = \frac{D_c}{T_c}$ یک ضریب میرایی

(m^{-1}) است که هر دو از طریق آنالیز رگرسیون به دست می‌آیند (Ban and Lei, 2022). با جاگذاری مقادیر A و B فرمول ۲ به دست می‌آید:

$$C = A(1 - e^{-Bx}) \quad \text{رابطه ۲}$$

لی و همکاران (۲۰۰۲) در مطالعه‌ای تغییرات غلظت رسوب و اثر آن را بر شدت جداسازی ذرات (D_r) بررسی کرد و نشان داد که شدت جداسازی به صورت خطی با غلظت رسوب و به صورت نمایی با طول شیار کاهش می‌یابد. آن‌ها در نتیجه این تحقیق معادله (۳) را برای محاسبه‌ی شدت جداسازی ارائه دادند:

$$D_r = \frac{C \cdot q}{L} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن، C غلظت رسوب ($kg\ m^{-3}$)، q دبی واحد عرض ($m^2\ s^{-1}$) و L طول شیار (m) است. گاورز و همکاران (۲۰۰۷) در مطالعه‌ای با بررسی تغییرات شدت جداسازی (D_r) در مطالعات قبلی به اختلافات موجود در مطالعات در رابطه با روند جداسازی از جمله عدم کاهش سیستماتیک، کاهش خطی و وابستگی فرایند به شدت جریان و شیب طولی اشاره کردند. تغییرات جداسازی با دبی جریان و شیب در برخی از مطالعات (Zhou et al., 2022; Shen et al., 2017) بررسی شده است و در اغلب موارد محققان نتیجه گرفته‌اند که شدت جداسازی ذرات با شیب و دبی جریان رابطه مستقیم و با بار (غلظت) رسوب رابطه معکوس دارد. از سویی، وانگ و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعه‌ای به این مفهوم مهم اشاره کردند که فرایندهای فرسایش شیاری (شدت جداسازی، انتقال، رسوب) و هیدرولیک جریان در شیب‌های ملایم با شدت جریان‌های پایین، نسبت به شیب‌های زیاد و شدت جریان‌های بالا، متفاوت عمل می‌کند. این نشان می‌دهد که مطالعات در این حوزه هنوز به نقطه عطف مشترکی نرسیده است و ضرورت ادامه مطالعات هنوز دیده می‌شود.

روش‌شناسی پژوهش

محل اجرای تحقیق و ویژگی‌های خاک

تحقیق حاضر در مزرعه آموزشی و پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران واقع در محمد شهر کرج اجرا شد. این منطقه واقع در عرض $35^{\circ}48'$ شمالی و طول $57^{\circ}50'$ شرقی، میانگین دمای $14/2$ درجه سلسیوس و بارش سالیانه با میانگین بلند مدت 256 میلی‌متر می‌باشد. برای انجام تحقیق، قطعه زمینی با کاربری زراعی به مساحت حدود 140 متر مربع و شیب 5 درصد انتخاب شد. برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نمونه‌برداری دست‌خورده از خاک به صورت مرکب (تعداد پنج نمونه از چهار گوشه و مرکز قطعه مورد نظر) انجام شد. همچنین برای تعیین جرم مخصوص ظاهری و هدایت هیدرولیکی اشباع از نمونه‌های دست‌خورده با سیلندر به قطر و ارتفاع 5 سانتی‌متر با چهار تکرار استفاده شد. نمونه‌های دست‌خورده پس از نمونه‌برداری و انتقال به آزمایشگاه، هوا خشک شدند و سپس از الک 2 میلی‌متری عبور داده شد. بافت به روش هیدرومتری (Klute, 1986)، جرم مخصوص ظاهری خاک (ρ_b) با روش سیلندر، ماده آلی با روش والکی- بلک (Nelson and Sommers, 1996)، کربنات کلسیم معادل به روش کلسیمتری، و قابلیت هدایت الکتریکی (EC) و pH در عصاره اشباع اندازه‌گیری شد. برای تعیین توزیع اندازه و پایداری خاکدانه‌ها به روش الک تر، از نمونه الک شده با الک 4 میلی‌متر استفاده شد. هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K_s) نیز با روش بار ثابت اندازه‌گیری شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول ۱ آمده است. خاک مورد آزمایش دارای بافت لوم شنی، شوری و سطح ماده آلی پایین، پایداری خاکدانه‌های متوسط و pH کمی قلیایی بود.

جدول ۱. ویژگی‌های خاک منطقه مورد مطالعه

سیلت (%)	شن (%)	رس (%)	پایداری خاکدانه (%)	MWD (mm)	ρ_b ($g\ cm^{-3}$)	pH	EC ($\mu S\ cm^{-1}$)	OC (%)	K_s ($cm\ h^{-1}$)	CaCO ₃ (%)
۲۹/۳	۵۴/۶	۱۶/۱	۵۷/۸۹	۰/۲۱	۱/۲۳	۷/۴	۲/۶۴	۰/۳	۱/۱۵	۶/۸۶

آماده‌سازی بستر آزمایش و شبیه‌سازی جریان

بستر آزمایش پس از حذف پوشش گیاهی، شخم و دیسک زده شد و بعد از آن با استفاده از تسطیح کن مکانیکی صاف شد. برای ایجاد شیار با استفاده از دستگاه شیارزن، شیارهایی با عرض 5 و عمق 10 سانتی‌متر ایجاد شد (شکل ۱) و سنگ‌های درشت از روی سطح

جمع‌آوری شد. برای جمع‌آوری نمونه‌های رواناب و رسوب در انتهای هر شیار، گودالی به عمق ۰/۵ متر حفر شد. دبی جریان ورودی قبل از هر آزمایش به روش حجمی تنظیم شد.

قبل از انجام هر آزمایش، خاک با یک جریان آرام غیر فرساینده به مدت یک شب (حداقل ۱۲ ساعت) خیس شد. از خروجی تانکر آب، سه انشعاب گرفته شد که دو انشعاب از آن به شیارهای جانبی وارد شد. دو شیار جانبی به‌عنوان حامی در نظر گرفته شد تا در هنگام عبور جریان از شیار وسط، از حرکت جانبی آب نفوذ یافته به طرفین جلوگیری نماید (اسدی و همکاران، ۱۳۹۵). یک انشعاب باقیمانده به مخزن سرریز دار (برای ایجاد بار ثابت) منتقل می‌شد. خروجی این مخزن، جریان ورودی به شیار اصلی را تأمین می‌کرد. خروجی پایین دارای شیر قابل تنظیم برای اعمال دبی موردنظر بود. در این شیارها جریان با دبی ثابت ایجاد شد.



شکل ۱. نمایی از دستگاه شیار زن اتوبی و شیارهای ایجاد شده

آزمایش‌ها تحت دو دبی^۱ جریان ۰/۱۱ و ۰/۲۴ لیتر بر ثانیه و برای شیارهای با طول‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۶ و ۸ متر با ۲ تکرار انجام شدند. مبنای زمانی اندازه‌گیری رواناب و رسوب، پس از رسیدن جبهه آب به انتهای شیار در نظر گرفته شد. به‌منظور جلوگیری از حرکت ذرات خاک در ابتدای شیار به دلیل تلاطم ناشی از ورود جریان، حوضچه‌ای با پوشش پلاستیکی ایجاد شد تا ورود جریان به شیارها آرام و ثابت صورت پذیرد. نمونه‌های رواناب برای تعیین غلظت رسوب در مدت زمان ۳۰ دقیقه در فواصل زمانی مشخص (۱-۳-۵-۷-۱۰-۱۵-۳۰-۲۰ دقیقه) برداشت شد. حجم نمونه‌ها بین ۴۰۰-۸۰۰ میلی‌لیتر بود. نمونه‌های رواناب و رسوب حاصل از هر شیار در ظرفی معین جمع‌آوری و به آزمایشگاه انتقال داده شد. جرم نمونه‌ها بعد از انتقال به آزمایشگاه قبل و بعد از قراردادن در آون با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس تعیین، و غلظت رسوب محاسبه شد. در هنگام آزمایش، عمق جریان با خط‌کش در انتهای شیار به‌دقت اندازه‌گیری شد. برای تعیین سرعت رواناب در طول هر شیار، از ردیاب رنگی پرمگنت سدیم (Stefano et al., 2020) استفاده شد. به این ترتیب که مدت زمان لازم برای مسافت طی شده ماده رنگی در طول مشخصی از شیار (در شیارهای کوتاه به اجبار فاصله کوتاه‌تر و در شیارهای بلند فاصله طولانی‌تر در نظر گرفته شد) با استفاده از کرنومتر اندازه‌گیری شد. سرعت متوسط جریان با ضرب مقدار اندازه‌گیری شده در ضریب اصلاحی (Stefano et al., 2020) محاسبه شد. اندازه‌گیری سرعت جریان با سه تکرار انجام شد. دبی خروجی از هر شیار با سه تکرار در فواصل زمانی بین اندازه‌گیری غلظت رسوب و در انتهای آزمایش، اندازه‌گیری شد.

محاسبات و تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای تعیین رژیم جریان از عدد رینولدز (Re) استفاده شد:

$$Re = \frac{VR}{\nu} \quad \text{(رابطه ۴)}$$

که در آن، V میانگین سرعت جریان ($m s^{-1}$)، R شعاع هیدرولیکی (m) است و ν ویسکوزیته سینماتیکی آب است که با توجه به دمای محیط در حین آزمایش برابر با $0.000001 m^2 s^{-1}$ در نظر گرفته شد.

برای محاسبه تنش برشی و قدرت جریان نیز به ترتیب از رابطه‌های ۵ و ۶ استفاده شد:

$$\tau = \rho gRS \quad \text{(رابطه ۵)}$$

$$\omega = \tau V = \rho g R S V = \rho g q S \quad \text{رابطه ۶}$$

که در آن، R شعاع هیدرولیکی (m)، S شیب طولی ($m m^{-1}$)، V سرعت متوسط جریان ($m s^{-1}$)، و q شدت جریان در واحد عرض ($m^2 s^{-1}$) است. شدت جریان در واحد عرض با تقسیم دبی خروجی بر عرض شیار محاسبه شد.

با استفاده از داده‌های غلظت رسوب و ترسیم نمودار آن با زمان، ضمن بررسی و تحلیل تغییرات زمانی غلظت رسوب در شیارهای با طول مختلف و تحت دو دبی جریان مورد آزمایش، غلظت رسوب در سه حالت ناپایدار (۵ تا ۱۰ دقیقه اول)، پایدار (۱۵ تا ۲۰ دقیقه انتهایی) و میانگین وزنی رخداد در هر شیار-دبی جریان محاسبه شد. برای بررسی مقیاس‌پذیری، رابطه ۲ به داده‌های غلظت رسوب در شرایط پایدار، ناپایدار و میانگین ۳۰ دقیقه‌ای برازش و پارامترهای A و B تعیین شد. برای بررسی نکویی برازش، از آماره مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، و نمودار پراکنش داده‌های بهترین برازش در مقابل داده‌های اندازه‌گیری شده و مقایسه آن با خط ۱:۱ استفاده شد. همچنین شدت جدا شدن ذرات در شرایط ناپایدار، پایدار و به صورت میانگین ۳۰ دقیقه‌ای در هر شیار-دبی جریان با رابطه ۳ محاسبه و تغییرات آن در این سه حالت با طول شیار بررسی شد.

نتایج و بحث

خصوصیات هیدرولیکی جریان

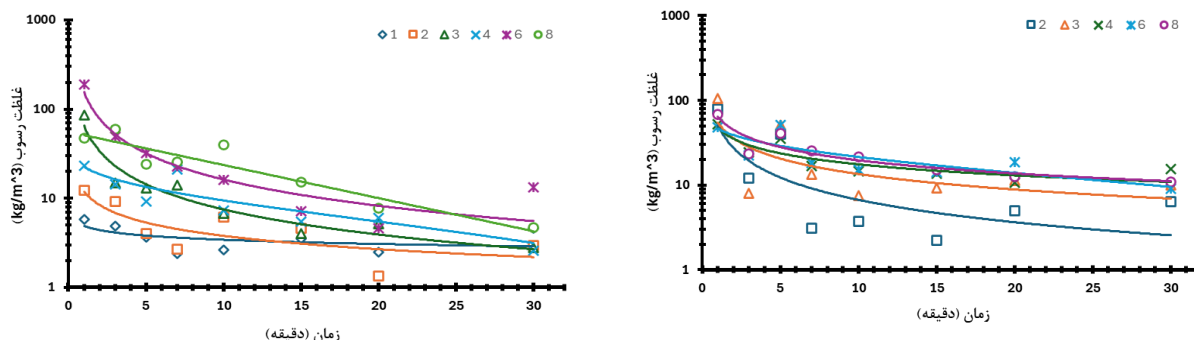
خصوصیات هیدرولیکی جریان برای دو دبی جریان ۰/۱۲ و ۰/۲۵ لیتر در ثانیه در جدول ۲ آمده است. این خصوصیات بر مبنای دبی خروجی محاسبه شدند. با توجه به جدول، نسبت پارامترهای دبی ۰/۲۵ به ۰/۱۲ از جمله تنش برشی، مقاومت جریان، عمق جریان، سرعت جریان و دبی واحد عرض به ترتیب ۱/۳۵، ۲/۱۳، ۱/۳۵، ۱/۵۳ و ۲/۱۶ برابر بود. مقدار عدد رینولدز برای شدت جریان شدیدتر ۲۸۷۶ (متلاطم) و برای جریان دیگر ۱۲۳۳ (انتقالی) بود.

جدول ۲. پارامترهای هیدرولیکی جریان (میانگین پارامترها و انحراف استاندارد)

دبی ورودی ($L s^{-1}$)	دبی خروجی ($L s^{-1}$)	دبی واحد عرض ($m^2 s^{-1}$)	عدد رینولدز	عمق (m)	تنش برشی (Pa)	قدرت جریان ($W m^{-2}$)	سرعت ($m s^{-1}$)
۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۰۰۱۸	۱۲۳۲/۶	۰/۰۰۷	۳/۴۴	۰/۹۰	۰/۲۶
۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۰۰۲	۱۹۷/۱	۰/۰۰۱	۰/۵۰	۰/۱۶	۰/۰۱
۰/۳۴	۰/۲۰	۰/۰۰۳۹	۲۸۷۵/۸	۰/۰۰۹۵	۴/۶۷	۱/۹۲	۰/۴۰
۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۰۰۶	۵۴۲/۸	۰/۰۰۰۸	۰/۴۳	۰/۳۰	۰/۰۳

تغییرات زمانی غلظت رسوب

تغییرات غلظت رسوب با زمان تحت دو دبی مورد بررسی در شیارهای با طول‌های مختلف در شکل ۲ آمده است. با توجه به نمودارهای ارائه شده در شکل ۲، اختلاف بین طول شیارها در دبی کمتر، ملموس‌تر از دبی بیش‌تر است. احتمالاً این به دلیل شسته شدن سریع‌تر ذرات تحت دبی بالاتر است. غلظت رسوب در هر دو دبی در دقایق ابتدایی آزمایش (شرایط ناپایدار)، زیاد و بعد از آن با گذشت زمان کم شده و به مقدار تقریباً ثابتی می‌رسد. این روند تغییرات غلظت رسوب در مطالعات زیادی (اسدی و همکاران، ۱۳۹۵؛ Hussein et al., 2015; Huang et al., 2023) گزارش شده است. این موضوع احتمالاً به دلیل حضور ذرات فرسایش‌پذیر در سطح شیار در ابتدای آزمایش می‌باشد که به راحتی شسته می‌شوند و غلظت رسوب بالاتری را ایجاد می‌کنند (Asadi et al., 2007). از سویی، با گذشت زمان و ترسیب ذرات در طول شیار، لایه‌ای متشکل از ذرات ترسیب یافته تشکیل می‌شود که از جدا شدن ذرات بیش‌تر جلوگیری می‌کند. در واقع ذرات ریز (با فرسایش‌پذیری بالا) در طول زمان بر اثر جریان انتقال پیدا می‌کنند و ذرات درشت در سطح باقی می‌مانند و مانع از جدا شدن بیش‌تر ذرات فرسایش‌پذیر می‌شوند (Hairsine and Rose, 1992). می‌توان نتیجه‌گیری کرد که عامل پایداری بستر شیار، تشکیل همین لایه‌ی متشکل از ذرات نسبتاً درشت در سطح خاک است.



شکل ۲. تغییرات زمانی غلظت رسوب تحت دو دبی (الف) ۰/۱۲ و (ب) ۰/۲۵ لیتر در ثانیه در طول شیب‌های مختلف

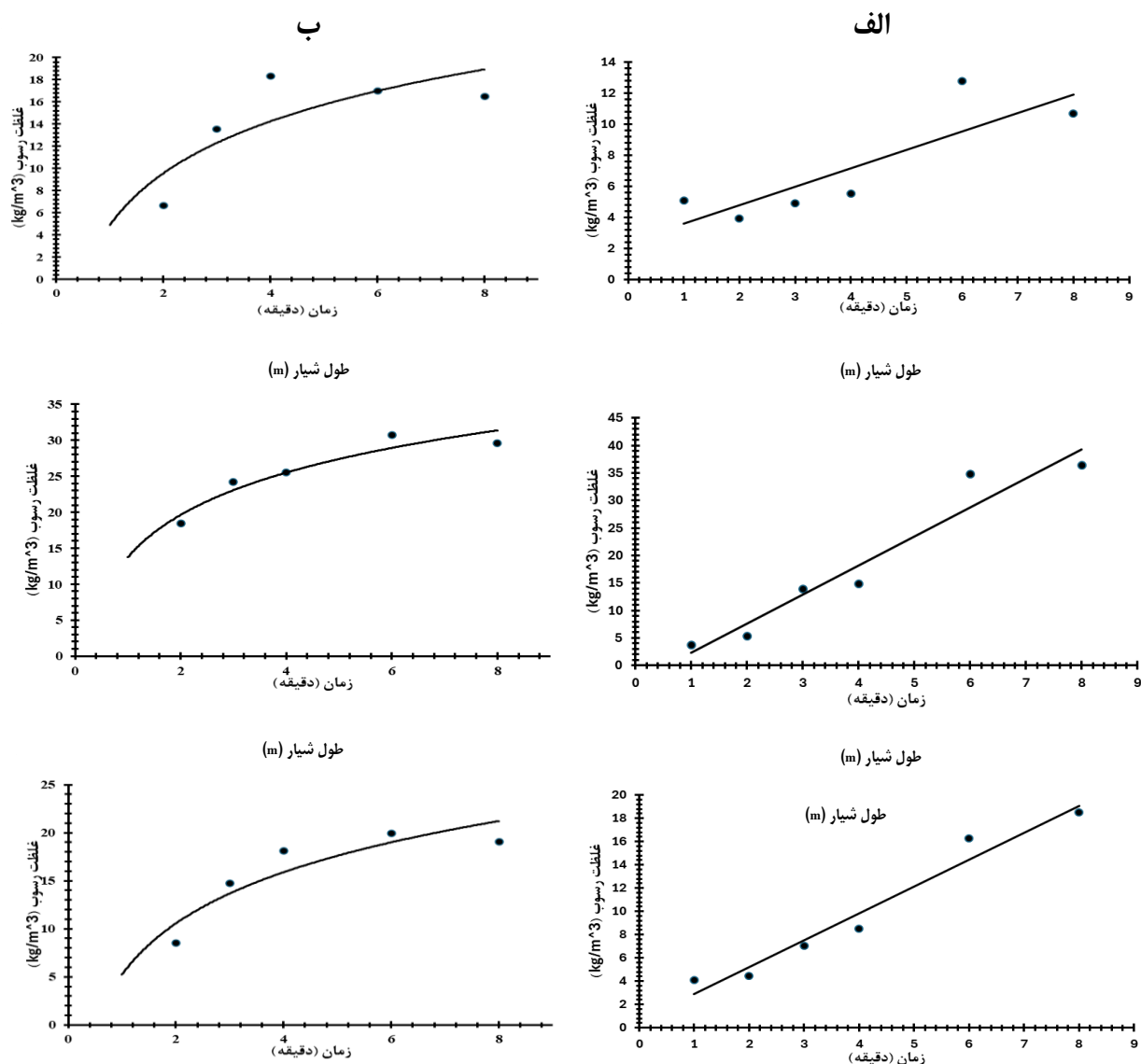
تغییرات غلظت رسوب با طول شیار

برای مطالعه اثر مقیاس، تغییرات غلظت رسوب در سه حالت پایدار نهایی، ناپایدار اولیه و میانگین ۳۰ دقیقه، با طول شیار بررسی شد. با افزایش دبی جریان در تمامی حالت‌ها، دبی بیشتر، غلظت رسوب بیشتری را ایجاد کرد، مگر در شرایط ناپایدار تحت دبی ۰/۱۲ لیتر در ثانیه که غلظت رسوب در شیارهای طولانی‌تر، بیشتر از دبی ۰/۲۵ لیتر بر ثانیه بود. با توجه به شکل ۳، غلظت رسوب با افزایش طول شیار در دبی ۰/۱۲ لیتر در ثانیه در هر سه حالت، روند خطی و در دبی ۰/۲۵ لیتر در ثانیه، روند لگاریتمی داشت. در توجیه این اختلاف می‌توان گفت که اگر در بستر هر شیار مقدار مشخصی از ذرات قابل فرسایش وجود داشته باشد، دبی بالاتر، سریع‌تر این مقدار مشخص را خارج می‌کند و به حالت نسبتاً پایداری می‌رسد. اما برای دبی کمتر، احتمالاً به زمان بیشتری نیاز باشد و همین موضوع می‌تواند در دبی‌های پایین‌تر نسبت به دبی‌های بالاتر که به حد ثابتی رسیده‌است، در یک طول شیار معین غلظت رسوب بیشتری ایجاد کند. فنک و همکاران (۲۰۲۳) طی یک مطالعه‌ای به این نتیجه رسیدند که در شیب‌های بالاتر از ۱۰ درجه، غلظت رسوب به علت قدرت جریان بالاتر، سریع‌تر به حداکثر غلظت رسوب در شیارهای کوتاه‌تر می‌رسند و همچنین شدت جدا شدن ذرات بیشتر در شیارهای کوتاه‌تر هم تأییدی بر این موضوع است. در یک سرعت جریان معین که از یک شیار عبور می‌کند، جریان با قدرت بیشتر می‌تواند ذرات رسوب بیشتری را به دام بیاورد و در نتیجه غلظت رسوب بالاتری را ایجاد کند. در مقایسه با مطالعه‌ی حسین‌آو همکاران (۲۰۲۳) که تغییرات غلظت رسوب را در دو شدت جریان متفاوت بررسی کرد، هرچند که با افزایش دبی جریان مانند شیب، غلظت رسوب افزایش می‌یابد، اما با توجه به روند تغییرات با افزایش درجه شیب، غلظت رسوب سریع‌تر به حد ثابتی می‌رسد. گلکاریان و همکاران (۱۳۹۰) در یک بررسی آزمایشگاهی به این نتیجه رسیدند که غلظت رسوب در طول شیار تا ۵۰ متر افزایش یافت و سپس غلظت رسوب به ظرفیت حمل رسوب نزدیک و تغییرات آن کم شد. مقدار حداکثر غلظت رسوب (ظرفیت حمل)، علاوه بر ویژگی‌های هیدرولیکی جریان (که در پارامتری همچون قدرت جریان منعکس می‌شود)، تابع توزیع اندازه ذرات خاک نیز می‌باشد (Zhu et al., 2024).

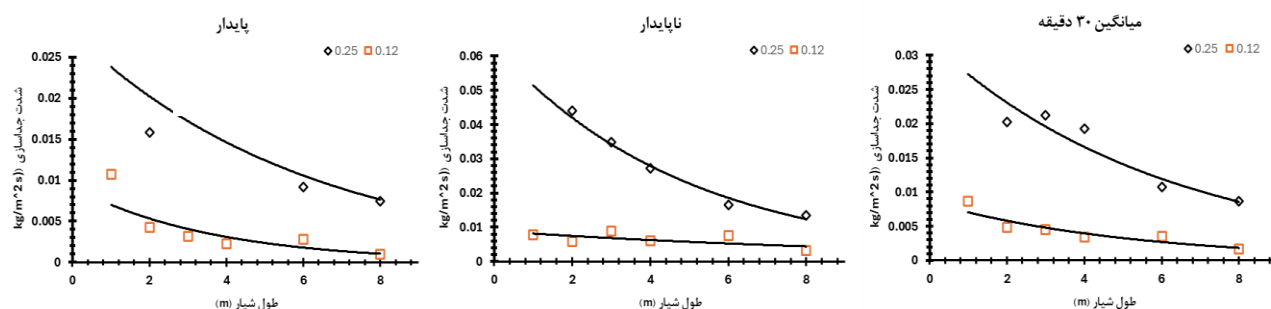
تغییرات جدا شدن ذرات با طول شیار

تغییرات شدت جدا شدن ذرات با طول شیار برای دو دبی ۰/۱۲ و ۰/۲۵ لیتر در ثانیه در شکل ۴ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شدت جدا شدن ذرات در شیارهای کوتاه‌تر زیاد و با افزایش طول شیار کاهش می‌یابد و شدت کاهش جداسازی با افزایش دبی جریان روند شدیدتری گرفته است. افزایش بار رسوب شدت جدایش را کاهش می‌دهد که این نشان‌دهنده‌ی تعامل پیچیده‌ی بین دینامیک جریان و ویژگی‌های خاک است (Shen et al., 2023). در حقیقت در شیارهای کوتاه که بیانگر وضعیت در ابتدای یک شیار طولانی هستند، شروع فرایند فرسایش است و غلظت رسوب کم‌ترین مقدار (صفر در نقطه ابتدای شیار) است، بنابراین سهم بیشتری از قدرت جریان صرف جداسازی ذرات شده و شدت جدا شدن ذرات بیش‌ترین مقدار است. در واقع با افزایش غلظت رسوب (افزایش طول)، سهم بیشتری از توان جریان صرف انتقال ذرات می‌شود (Foster and Meyer, 1972; Govers et al., 2007). در مطالعات پیشین (Zhou et al., 2022; Shen et al., 2017) نیز رابطه معکوس شدت جدا شدن ذرات با بار (غلظت) رسوب گزارش شده است. در دبی جریان بالاتر که باعث تولید

قدرت و سرعت جریان بیش تری می شود، خارج شدن ذرات و رسیدن بستر به سطحی از پایداری که اجازه ی جداسازی بیش تر را نمی دهد (Hairsine-Rose., 1992)، نیز می تواند توجیه کننده ی این تغییر باشد. با افزایش طول شیار سرعت جریان آب به دلیل افزایش اصطکاک جریان آب با دیواره های شیار کاهش می یابد (واعظی و ورزقانی، ۱۴۰۲) و با کاهش سرعت جریان آب در شیارها توان جریان برای حمل ذرات خاک کم می شود (واعظی و فرومندی، ۱۳۹۷).



شکل ۳. تغییرات غلظت رسوب در طول شیار برای هر سه حالت (A ناپایدار، B پایدار و C میانگین طول شیار (m) ستون الف) دبی ۰/۱۲ و ستون ب) دبی ۰/۲۵ لیتر در ثانیه



شکل ۴. شدت جداسازی ذرات در طول شیار تحت دو دبی ۰/۱۲ و ۰/۲۵ لیتر در ثانیه (A ناپایدار B پایدار C میانگین ۳۰ دقیقه ای

باتوجه به اختلاف موجود بین شدت جداسازی در دو دبی مختلف مشاهده می‌شود که شدت جداسازی در دبی بالاتر بیش‌تر از دبی پایین‌تر است. این اختلاف از پارامترهای هیدرولیکی جریان ناشی می‌شود که در جدول ۲ نشان داده‌شد. با توجه به نسبت‌های ارائه شده در بخش ۱-۳ برای پارامترهای هیدرولیکی از جمله: تنش برشی و قدرت جریان و سرعت جریان، زیاد بودن شدت جداسازی در دبی بالاتر دور از انتظار نیست که این نتایج توسط محققان مختلف (Zhang et al., 2002) نیز برای جریان کم عمق در منابع گزارش شده است. این نتایج با مشاهدات حسین و همکاران (۲۰۲۳) که مطالعه‌ای تحت دو دبی ۰/۰۴۵ و ۰/۰۲۵ لیتر در ثانیه انجام داده بودند همخوانی دارد.

نتایج ارزیابی مدل مقیاس‌پذیری

مقادیر پارامترهای مدل مقیاس‌پذیری (معادله ۲) و مجذور میانگین مربعات خطای برازش در جدول ۳ آمده‌است. باتوجه به مقادیر ارائه شده در جدول ۳، بیش‌ترین مقدار خطا برای شرایط ناپایدار در دبی ۰/۱۲ لیتر در ثانیه (۳/۶۵) بود. حداکثر مقدار پارامتر B (ضریب میرایی) برای دبی ۰/۱۲ لیتر در ثانیه در شرایط پایدار (۰/۱۴) و حداقل مقدار آن در شرایط ناپایدار (۰/۰۰۵) بود. در حالی که مقادیر حداکثر و حداقل این پارامتر برای دبی ۰/۲۵ لیتر در ثانیه به ترتیب در شرایط ناپایدار (۰/۴۶) و برای میانگین ۳۰ دقیقه (۰/۳۴) بود. گویا با افزایش شدت جریان، ضریب میرایی هم افزایش یافته است، که با مطالعه چن و همکاران (۲۰۱۶) همخوانی دارد. هرچند که در مطالعات دیگر (Hussein et al., 2023)، مقدار این پارامتر با افزایش شدت جریان در شرایط پایدار و ناپایدار کاهش یافت.

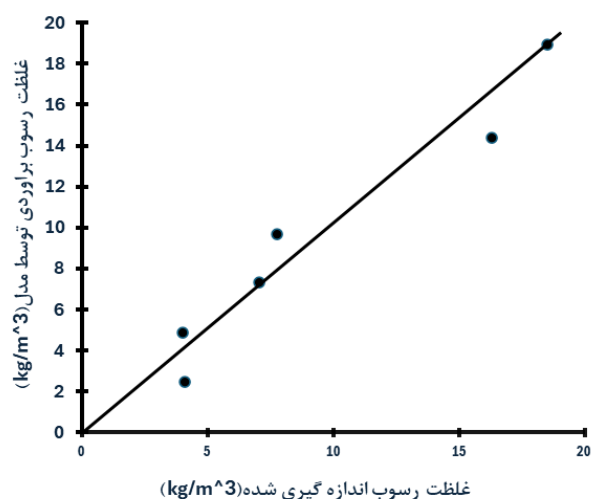
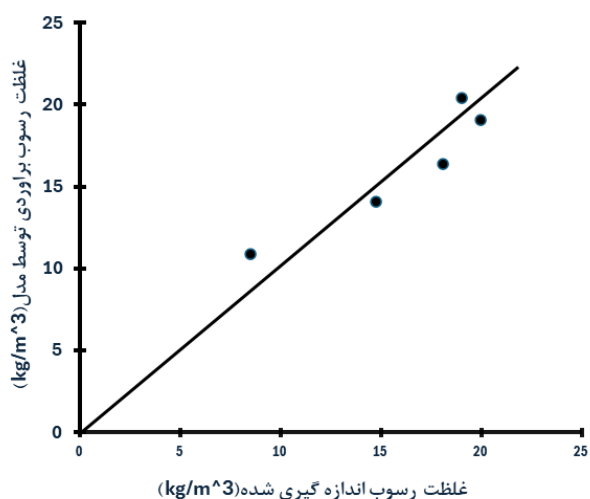
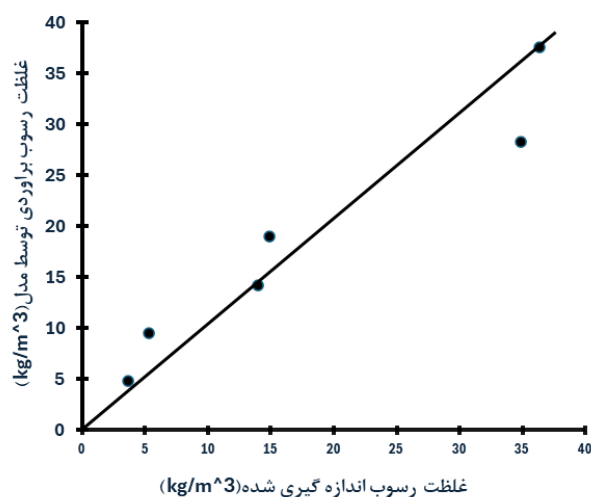
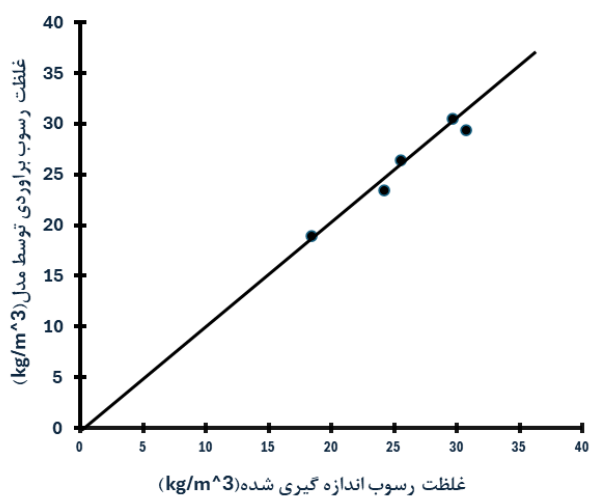
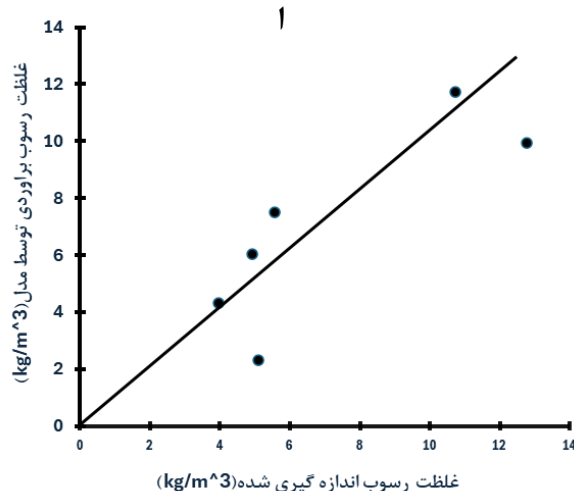
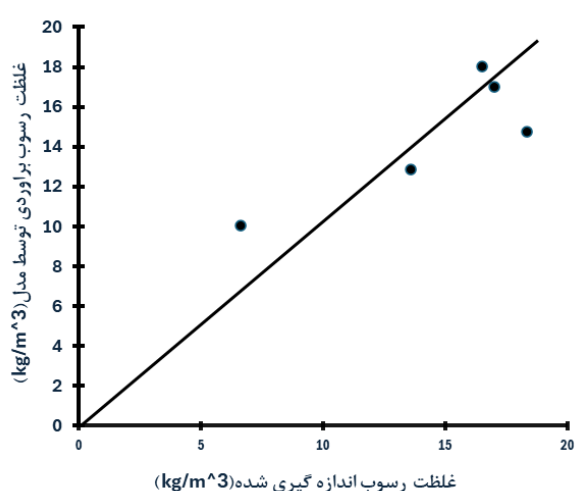
جدول ۳. پارامترهای مدل مقیاس‌پذیری و میزان خطای برازش در سه حالت مختلف و تحت دو دبی مورد مطالعه

شدت جریان (L/s)			ناپایدار			پایدار			میانگین ۳۰ دقیقه
RMSE	B	A	RMSE	B	A	RMSE	B	A	
۱/۳۶	۰/۰۱	۲۲۳/۵	۳/۶۵	۰/۰۰۵	۹۳۹	۱/۹۱	۰/۱۴	۱۷/۱	۰/۱۲
۱/۵۴	۰/۳۴	۲۱/۷	۰/۹	۰/۴۶	۳۱/۲	۲/۳۲	۰/۳۷	۱۸/۹	۰/۲۵

A و B پارامترهای معادله ۲ (مدل مقیاس‌پذیری) و به ترتیب به عنوان حداکثر غلظت رسوب و ضریب میرایی، و RMSE، مجذور میانگین مربعات خطا

نکته قابل توجهی که وجود دارد مقادیر پارامتر A است که به عنوان حداکثر پتانسیل غلظت رسوب در نظر گرفته می‌شود (Huang et al., 2015; Chen et al., 2016; Ban and Lei, 2022). در چهار مورد از شش مورد ارزیابی، مقدار A نزدیک به مقدار واقعی اندازه‌گیری شده بود، اما در دو مورد مقادیر بسیار بالایی برای A برآورد شد که قابل قبول نبود. یعنی در دبی ۰/۱۲ لیتر در ثانیه، حداکثر غلظت رسوب تولید شده در شرایط ناپایدار، ۳۶/۳ و برای میانگین ۳۰ دقیقه ۱۸/۵ کیلوگرم بر مترمکعب بود، حال آن‌که این مقادیر توسط مدل به ترتیب ۹۳۹ و ۲۲۳/۵ برآورد شد. این نتایج با نتایج مطالعه حسین و همکاران (۲۰۲۳) اختلاف دارد. طبق نتایج به‌دست آمده در این مطالعه، غلظت رسوب در دبی پایین‌تر نتوانست به حداکثر مقدار برآورد شده توسط مدل در شرایط ناپایدار و میانگین ۳۰ دقیقه برسد. هرچند که در شرایط پایدار این مقدار قابل قبول بود. طی مطالعه‌ای که هوانگ و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از فلوم آزمایشگاهی تحت دبی و درجات شیب مختلف انجام دادند، مقدار پارامتر A و B با افزایش شدت جریان و درجه شیب، افزایش پیدا کرد. نتایج مشابه در تحقیقات دیگری (Ban and Lei, 2022; Chen et al., 2014) هم گزارش شده است.

نمودار یک‌به‌یک غلظت رسوب برازش شده توسط مدل در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده در سه حالت پایدار، ناپایدار و میانگین ۳۰ دقیقه‌ای و به ترتیب تحت دبی ۰/۱۲ و ۰/۲۵ لیتر بر ثانیه در شکل ۵ آمده است. در همه موارد، پراکنش داده‌ها حول خط یک به یک است. این نشان می‌دهد که هر چند مدل ارائه شده دارای کاستی‌های در برآورد حداکثر پتانسیل غلظت رسوب (A) می‌باشد، اما کارایی قابل قبول دارد. البته تنوع مکانی موجود در شرایط مزرعه هم می‌تواند به عنوان خطای کار در نظر گرفته شود، هرچند که محققان این مطالعه حداکثر تلاش را برای به حداقل رساندن خطاها در هنگام اندازه‌گیری کرده بودند.



شکل ۵. نمودار خط یک به یک مقادیر برآورد شده با اندازه‌گیری شده برای هر سه حالت (A پایدار، B ناپایدار و C میانگین ۳۰ دقیقه‌ای (ستون الف) دبی ۰/۱۲ و ستون ب) دبی ۰/۲۵ لیتر در ثانیه

نتیجه‌گیری

مقیاس‌پذیری فرسایش خاک یکی از چالش‌های مهم در مطالعات فرسایش خاک است که در نتیجه تحقیقات، مدل‌های مختلفی ارائه شده است. مدل‌های مختلف در بیش‌تر موارد در شرایط آزمایشگاهی عملکرد بهتری دارند، اما این نکته که این مدل‌ها برای برآورد مقدار

فرسایش خاک در شرایط واقعی تولید می‌شوند، غیرقابل انکار است. این مطالعه با هدف بررسی تغییرات جداشدن ذرات خاک و مقیاس‌پذیری فرسایش شیاری در شرایط مزرعه انجام شد. یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های خاک، پویایی آن است که می‌تواند در شرایط واقعی بسیار بیش‌تر باشد و همین مسئله پیچیدگی‌های ناشی از مقیاس‌پذیری را تشدید می‌کند. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش دبی جریان، شدت جداسازی ذرات خاک تحت تاثیر پارامترهای هیدرولیکی جریان (قدرت جریان، تنش برشی، سرعت جریان) قرار می‌گیرد. با افزایش طول شیار، شدت جداسازی ذرات تحت هر دو دبی کاهش پیدا کرد و غلظت رسوب با افزایش طول شیار، افزایش یافت. هرچند که روند تغییرات تحت دبی پایین، خطی و تحت دبی بالاتر بعد از افزایش به حد تقریباً ثابتی رسید. تغییرات زمانی غلظت رسوب تحت تاثیر تغییرات خصوصیات بستر شیار و جریان قرار گرفت و با گذشت زمان، غلظت رسوب کاهش پیدا کرد. نتایج ارزیابی مدل مقیاس‌پذیری نشان‌دهنده‌ی تمایل ضریب میرایی (پارامتر B) به افزایش با بیش‌تر شدن شدت جریان بود، اما پارامتر A (حداکثر غلظت رسوب برآوردی) در دبی پایین‌تر تحت شرایط ناپایدار و میانگین ۳۰ دقیقه غیر قابل قبول بود. به طور کلی، نتایج حاصل، بیانگر کارایی قابل قبول مدل مقیاس‌پذیری بن و لی (۲۰۰۲) بود. نتایج این مطالعه می‌تواند به درک بهتر مقیاس‌پذیری فرسایش شیاری و همچنین توسعه مدل‌ها کمک نماید. برای ادامه‌ی تحقیقات در این زمینه پیشنهاد می‌شود که تحقیقات مشابه در خاک‌های مختلف (از نظر بافت، ساختمان و سایر خصوصیات)، با طول شیارهای طولانی‌تر، شب‌های مختلف و دبی جریان‌های بالاتر انجام شود.

منابع

- اسدی، حسین، علی‌گلی، محمد و گرجی، منوچهر. (۱۳۹۵). تغییرات دینامیک غلظت رسوب در فرسایش شیاری در آزمایش‌های مزرعه‌ای. *مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک*، ۲۰(۷۸)، ۱۲۵-۱۳۹.
- گلکاریان، علی، احمدی، حسن، سلاجقه، علی، جعفری، محمد، و شهبازی، علی. (۱۳۹۳). بررسی روند تغییرات مکانی غلظت رسوب در طول دامنه. *نشریه علمی پژوهشی مرتع و آبخیزداری*، ۶۷(۴)، ۵۸۷-۶۰۱.
- واعظی، علیرضا، و فرومدی، مجید. (۱۳۹۷). تغییرات شاخص‌های جریان و فرسایش‌پذیری شیاری تحت‌تأثیر شدت باران در خاک ماری. *مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، ۱۲(۴۰)، ۱۱-۲۲.
- واعظی، علیرضا، ورقائی، لیلا. (۱۴۰۲). بررسی تأثیر طول نوارهای کشت بر فرسایش شیاری و دانه‌بندی ذرات فرسایشی در کشتزار دیم. *تحقیقات کاربردی خاک*، ۱۱(۲)، ۵۹-۷۰.

REFERENCES

- Asadi, H., Aligoli, M., & Gorji, M., (2017). Dynamic changes of sediment concentration in rill erosion at field experiments. *Journal of Water and Soil Science*. 20(78), 125-139. (in Persian)
- Asadi, H., Ghadiri, H., Rose, C. W., Yu, B., & Hussein, J., (2007). An investigation of flow-driven soil erosion processes at low streampowers. *Journal Hydrology* 342, 134-142.
- Asadi, H., Moussavi, A., Ghadiri, H., & Rose, C.W., (2011). Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of sediment. *Journal of Hydrology* 406, 73-81.
- Ban, Y. Y., & Lei, T. W. (2022). Mathematical method for physics-based rill erosion process using detachment and transport capacities. *Scientific Reports*, 12(1), 4812.
- Chao, Q., Hongyan, W., & Fenli, Z., (2016). Temporal and spatial variation characteristics of rill erosion and hydrodynamic parameters on loessial hillslope. *Trans. Chinese Soc. Agric. Mach.* 47 (8), 146-154.
- Chen, X., Huang, Y., Zhao, Y., Mo, B., Mi, H., & Huang, C., (2017). Analytical method for determining rill detachment rate of purple soil as compared with that of loess soil. *Journal of Hydrology*, 549, 236-243.
- Chen, X.Y., Zhao, Y., Mo, B., & Mi, H.X., (2016). Estimating rill erosion process from eroded morphology in flume experiments by volume replacement method. *Catena* 136, 135-140.
- Chen, X.-Y., Zhao, Y., Mo, B., & Mi, H.X., (2014). An improved experimental method for simulating erosion processes by concentrated channel flow. *PloS One* 9(6), e99660.
- Feng, R., Chen, J., Xie, Z., Li, D., & Yuan, Z., (2023). Experimental determination of sediment transport capacity of rill flow over sandified loess slope. *International Soil and Water Conservation Research*. 11, 301-310.
- Foster, G.R., & Meyer, L.D., (1972). Transport of soil particles by shallow flow. *Transactions of the ASAE* 15, 99-102.
- García-Ruiz, J. M., Beguería, S., Nadal-Romero, E., González-Hidalgo, J. C., Lana-Renault, N., & Sanjuán, Y. (2015). A meta-analysis of soil erosion rates across the world. *Geomorphology*, 239, 160-173

- Golkarian, A., Ahmadi, H., Salageghe, A., Jafari, M., & Shahbazi, A., (2015). Effect of slope length on spatially variation of concentration. *Journal of Range and Watershed Managment*, 67(4), 587-601. (in Persian)
- Govers, G., Gimenez, R., & Van Oost, K., (2007). Rill erosion: Exploring the relationship between experiments, modelling and field observations. *Earth-Science Reviews*, 84(3-4), 87-102.
- Hairsine, P.B., & Rose, C.W., (1992). Modeling water erosion due to overland flow using physical principles: 2. rill flow. *Water Resource Research* 28(1), 245 -250.
- He, J. jun, Sun, L. ying, Duan, G. yao, & Cai, Q. guo. (2023). Slope gradient impacts on rill morphological characteristics: Using indoor simulation experiment on loamy clay under certain rainfall intensity. *Catena*, 222. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106895>
- He, T., Yang, Y., Shi, Y., Liang, X., Fu, S., Xie, G., Liu, B., & Liu, Y., (2022). Quantifying spatial distribution of interrill and rill erosion in a loess at different slopes using structure from motion (SfM) photogrammetry. *International Soil and Water Conservation Research*. 10(3), 393-406.
- Huang, Y., Chen, X., Luo, B., Ding, L., & Gong, C. (2015). An experimental study of rill sediment delivery in purple soil, using the volume-replacement method. *PeerJ*, 3, e1220.
- Hussein, M., Asadi, H., Kouchakzadeh, S., & Mohammadi, M., (2023). Flow-driven soil erosion processes in a calcareous semiarid soil: Rill length and flow rate impacts. *Catena*, 221, 106765. ISSN 0341-8162.
- Klute, A. (1986). *Water retention: Laboratory methods*. Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods. 5. 635-662.
- Lei, T. W., Zhang, Q. W., Zhao, J., Xia, W. S., & Pan, Y. H. (2002). Soil detachment rates for sediment loaded flow in rills. *Transactions of the ASAE*. 45(6), 1897.
- Li, D., Chen, X., Tan, W., Tao, T., Ma, L., Kong, L., & Zhu, P. (2024). Response of erosion rate to hydrodynamic parameters in sheet and rill erosion process on saturated soil slopes. *Soil and Tillage Research*, 237. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105996>
- Li, Z.B., Zhu, B.B., & Li, P. (2008). Advancement in study on soil erosion and water conservation. *Acta Pedologica Sinica* 45(5), 802-809.
- Liu, B.Y., Yang, Y., & Lu, S.J., (2018). Discriminations on common soil erosion terms and their implications for soil and water conservation. *Sci. Soil Water Conserv.* 16, 9-16. <http://doi.org/10.16843/j.sswc.2018.01.002>. (In Chinese).
- Nelson D.W., & Sommers L.E., (1996). *Total carbon, organic carbon, and organic matter*. Methods of Soil Analysis, Part 3- Chemical Methods, 961-1010.
- Ou, X., Hu, Y., Li, X., Guo, S., & Liu, B., (2021). Advancements and challenges in rill formation, morphology, measurement and modeling. *Catena*, 196, 104932.
- Parsons, A.J., Wainwright, J., Mark Powell, D., Kaduk, J., & Brazier, R.E., (2004). A conceptual model for determining soil erosion by water. *Earth Surf. Process. Landf.* 29 (10), 1293-1302.
- Qian, X., Zhao, L., Fang, Q., Fan, C., Zi, R., & Fang, F. (2024). Rill formation and evolution caused by upslope inflow and sediment deposition on freshly tilled loose surfaces. *Soil and Tillage Research*, 235. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105868>
- Shen, H., Zheng, F., Wen, L., L., & Jiang, Y. (2015). An experimental study of rill erosion and morphology. *Geomorphology*, 231, 193-201.
- Shen, N., Wang, Z., Zhang, F., & Zhou, C. (2023). Response of soil detachment rate to sediment load and model examination: A key process simulation of rill erosion on steep loessial hillslopes. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 20, 2839.
- Shen, N., Wang, Z., Zhang, Q., Wu, B., Wang, D., Zhang, Q., & Liu, J. (2017). Quantifying the contribution of sediment load to soil detachment rate by sediment-laden rill flow. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 81 (6), 1526-1536.
- Stefano, C. D., Nicosia, A., Palmeri, V., Pampalone, V., & Ferro, V. (2020). Dye-tracer technique for rill flows by velocity profile measurements. *Catena*, 185, 104313. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104313>.
- Tian, P., Gong, Y., Hao, F., Chen, L., Yang, Y., Guo, W., Wu, H., & Zhang, W. (2022). Comparing erosion and rill development processes by simulated upslope inflow in two red soils from subtropical China. *Catena*, 213, 106139.
- Vaezi, A. R., & Foroumadi, M. (2018). Flow characteristics and rill erodibility in relation to the rainfall intensity in a marl soil. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 12(40), 11-22. (in Persian)
- Vaezi, A. R., & Varghaei, L. (2023). Investigating the effect of cultivated furrow length on rill erosion and



- eroded grain size in a rainfed field. *Applied Soil Research*, 11(2), 59-70. (in Persian)
- Wang, D., Wang, Z., Shen, N., & Chen, H., (2016). Modeling soil detachment capacity by rill flow using hydraulic parameters. *J. Hydrol.* 535, 473–479.
- Wirtz, S., Seeger, M., Remke, A., Wengel, R., Wagner, J.-F., & Ries, J.B., (2013). Do deterministic sediment detachment and transport equations adequately represent the process-interactions in eroding rills? An experimental field study. *Catena*, 101, 61-78, 10.1016/j.catena.2012.10.003
- Zhang, G.H., Liu, B.Y., Nearing, M., Huang, C.H., & Zhang, K.L., (2002). Soil detachment by shallow flow. *Trans. ASABE*. 45(2), 351-357.
- Zhang, Q., Wang, J., Zhao, L., Wu, F., Zhang, Z., & Torbert, A.H., (2015). Spatial heterogeneity of surface roughness during different erosive stages of tilled loess slopes under a rainfall intensity of 1.5 mm min⁻¹. *Soil Tillage Res.* 153, 95–103.
- Zhou, C., Shen, N., Zhang, F., & Delang, C. O., (2022). Soil detachment by sediment-laden rill flow interpreted using three experimental design methods. *Catena*, 215, 106332.
- Zhu, Q., Liu, J., Qi, X., Cheng, X., & Zhou, Z. (2024). Estimating sediment transport capacity on sloping farmland on the Loess Plateau considering soil particle size characteristics. *Geoderma*, 446. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116906>.