



Determination of Factors Influencing Flow Velocity in Cultivated Furrows of Rainfed Lands

Alireza Vaezi¹, Zahra Haghani²

1- Professor, Soil Science Department, University of Zanjan, Zanjan-Iran.

2- Former M.Sc. student, Soil Science Department, University of Zanjan, Zanjan-Iran.

Received:2026-02-04

Accepted:2026-10-13

Revised:2026-10-12

Published online:2026-09-21

* Corresponding author: vaezi.alireza@gmail.com

ARTICLE INFO

Keywords:

Rock fragment,
Surface roughness,
infiltration rate,
Hydraulic gradient,
Soil properties.

ABSTRACT

Introduction

Flow velocity is one of the important hydraulic characteristics of flow that affects many other hydraulic characteristics such as flow discharge and shear stress. This flow characteristic plays an important role in soil loss in slope lands and in consequence is directly connected to sediment transport-deposition processes. The flow velocity in a channel or waterway is affected by various factors including slope gradient, cross-sectional shape, and surface characteristics. The role of these three factors in flow velocity is well presented in some empirical equations especially Manning's equation. In nature, waterways are important paths for concentrated water flow. Crop cultivation strips that are constructed in the form of ridges and furrows up to down slope can also play the role of a waterway in sloping rainfed lands. The flow velocity in the strips can be affected by various factors such as slope gradient, cross-sectional shape, and soil type. Studying the factors affecting the flow velocity in the rainfed lands can be useful in identifying the lands susceptible to water and soil loss. Therefore, this study was conducted to determine the flow velocity in cultivation strips and find the factors affecting it in rainfed lands.

Materials and Methods

The experiment was conducted in five wheat rainfed lands using a completely randomized design at three replications. For this purpose, rainfed lands with different slope gradients (6.1, 10.6, 14.8, 20.7 and 27.1%) and having different soil types were considered in a semi-arid region in Zanjan province. For the installation of furrows, an area with uniform slope was considered in each land. Firstly, the rainfed lands were plowed up to down slope. The cultivated strips were installed by a grain row-cultivator without wheat seeds. In this way, strips with 6 m long and 5 cm deep were created along the slope with a distance of 25 cm from each other. To eliminate the effect of soil moisture on the water flow velocity in the strips, the experiment was conducted under soil moisture condition of field capacity. Flow velocity in the cultivated strips was measured using a constant flow rate of two liters per minute as simulated flow based on the runoff produced under the erosive rainfalls in the rainfed lands in early spring. Flow velocity was measured using the color method on the basis of the time of color movement per unit of furrow length. Various physicochemical properties of the rainfed soils were determined in surface samples taken from 0-30cm depth. The analysis

How to cite:

Vaezi, A., Haghani, Z. (2026). *Determination of Factors Influencing Flow Velocity in Cultivated Furrows of Rainfed Lands*. Journal of Hydraulics and Water Science, 36 (2):31-43. <https://doi.org/10.22034/hws.2026.71640.1042>



This is an open-access article under the CC BY NC license
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



of variance was applied using the Tukey's test to determine the statistical differences in the flow velocity among the rainfed lands. The linear regression analysis was used to quantify the relationship between flow velocity and land slope. The Pearson's correlation matrix method was used to determine the role of soil properties in the flow velocity.

Results and Discussion

The rainfed lands had coarse-textured soils (sandy loam, mostly) and have lower content of organic matter and higher content of rock fragments ($d > 2$ mm). The flow velocity of each rainfed land had higher fluctuations among the replicates. The lowest coefficient of variation, CV (2.53%) was in the rainfed land with 6.1% slope gradient and the highest value was in the rainfed land with 27.1% slope gradient (CV= 15.86%). The average water flow velocities in the rainfed lands with slope gradient of 6.1, 10.6, 14.8, 20.7 and 27.1% were 15.80, 14.53, 13.10, 10.80 and 16.20 cm h⁻¹, respectively. Significant difference was found in the water flow velocity among the different rainfed lands ($p < 0.01$). In general, there was no uniform pattern in the flow velocity with increasing slope gradient. This result indicates that the slope gradient was not the only major factor controlling the flow velocity in the strips, whereas soil properties are also important factors determining the flow velocity in the rainfed lands. Except for slope gradient of 27.1%, there was a significant linear decrease in flow velocity with increasing slope gradient in the rainfed lands ranging from 6.1% to 20.7% slope gradient ($R^2 = 0.82$, $p < 0.01$). In this range of slope gradient, the decrease in flow velocity with increasing slope gradient can reflect the role of soil type in controlling flow velocity in cultivated strips. As a consequence, a slope gradient of 20.7% can be considered as a threshold for the effect of slope gradient on flow velocity in rainfed lands. The soils having higher rock fragments appeared lower flow velocity. Lower flow velocity in the higher amount of rock fragments is associated with increasing surface roughness in the cultivated strips.

Conclusions

This study showed that the flow velocity in the cultivated strips in rainfed lands with coarse-textured soils is affected by two factors: land slope and soil type. A slope gradient of 20.7% is the threshold for the effect of the slope factor on increasing flow velocity. At lower slope gradients, soil properties play a key role in controlling the effect of slope on flow velocity. Rock fragment is the most important factor in reducing flow velocity in this range of slope gradient. The findings of this study can be used to estimate the flow velocity and predict soil and water loss in the rainfed lands.

Keywords: Hydraulic gradient, Infiltration rate, Rock fragment, Soil properties, Surface roughness



تعیین عوامل مؤثر بر سرعت جریان در نوارهای کشت در کشتزارهای گندم دیم

علیرضا واعظی^۱، زهرا حقانی^{۲*}

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۵

تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۵/۰۶/۳۰

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۵/۰۷/۲۰

۱- استاد بخش مهندسی حفاظت آب و خاک، گروه علوم خاک دانشگاه زنجان، زنجان- ایران.

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد، بخش حفاظت آب و خاک گروه علوم خاک دانشگاه زنجان، زنجان- ایران.

*نویسنده مسئول: vaezi.alireza@gmail.com

چکیده

نوارهای کشت ایجادشده در امتداد شیب در زمین‌های دیم، عملاً نقش آبراهه‌های سطحی را ایفا می‌کنند و سرعت جریان آب در آن‌ها، عامل کلیدی در تشدید فرسایش خاک محسوب می‌شود. پژوهش حاضر با هدف تعیین سرعت جریان سطحی در نوارهای کشت گندم دیم و شناسایی عوامل مؤثر بر آن انجام گرفت. آزمایش در پنج کشتزار گندم دیم با شیب‌های ۶/۱، ۱۰/۶، ۱۴/۸، ۲۰/۷ و ۲۷/۱ درصد، در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در استان زنجان اجرا گردید. زمین‌ها در جهت شیب شخم زده شد و با استفاده از ردیف‌کار غلات، نوارهایی به طول شش متر، عمق پنج سانتی‌متر و فاصله ۲۵ سانتی‌متر از یکدیگر ایجاد شدند. سرعت جریان با روش ردیاب رنگی اندازه‌گیری و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک سطحی (صفر تا ۳۰ سانتی‌متر) نیز تعیین شدند. نتایج نشان داد که سرعت جریان در دامنه‌ای از ۱۰/۸ سانتی‌متر بر ساعت (در شیب ۲۰/۷ درصد) تا ۱۶/۲ سانتی‌متر بر ساعت (در شیب ۲۷/۱ درصد) متغیر بود و تفاوت میان کشتزارها از این نظر معنی‌دار بود ($p < 0.01$). در محدوده شیب ۶/۱ تا ۲۰/۷ درصد، با افزایش شیب، سرعت جریان به‌صورت خطی کاهش یافت ($p < 0.001$ و $R^2 = 0.81$)؛ اما در شیب ۲۷/۱ درصد، نقش مستقیم و افزایش‌دهنده درجه شیب بر سرعت جریان آشکار گردید. در شیب‌های ملایم‌تر، همبستگی منفی معنی‌داری میان سرعت جریان و درصد سنگریزه (ذرات درشت‌تر از ۲ میلی‌متر)، چگالی ظاهری و تخلخل مشاهده شد. به‌طور کلی، یافته‌ها حاکی از برهمکنش میان شیب زمین و ویژگی‌های خاک در تعیین سرعت جریان در نوارهای کشت گندم دیم است. همچنین، شیب ۲۰/۷ درصد را می‌توان آستانه تأثیرگذاری غالب عامل شیب زمین بر سرعت جریان در نوارهای کشت در این سامانه‌های کشت در نظر گرفت.

کلمات کلیدی: بخش سنگی، زبری سطح، شدت نفوذ، شیب هیدرولیکی، ویژگی‌های خاک

۱- مقدمه

مدت زمانی که آب سپری می‌کند تا مسافتی معین را درون کانال یا آبراهه طی کند، سرعت جریان نامیده می‌شود. جریان آب در آبراهه‌ها در طبیعت غالباً ماهیتی غیریکنواخت دارد. دلیل وقوع جریان غیریکنواخت، تغییر شرایط مسیر جریان است. کنده شدن و انتقال ذرات از هر نقطه از مقطع جریان یا رسوبگذاری در طول آبراهه می‌تواند باعث تغییر سرعت جریان در آن نقطه شود (Ban, 2023). همچنین مقدار بار منتقله توسط جریان نیز عاملی دیگر در تغییر سرعت جریان است. فرآیندهای فرسایش و رسوبگذاری در طول مسیر جریان باعث تغییر مقدار بار منتقله جریان و در نتیجه سرعت جریان در آبراهه می‌شود. آگاهی از سرعت جریان در آبراهه‌های طبیعی برای مهار فرسایندهای آن حائز اهمیت است (Huang et al., 2018). سرعت جریان عاملی مهم در بروز فرسایش شیلی در زمین‌های کشاورزی است (Mancilla et al., 2005). این ویژگی جریان یکی از ویژگی‌های مهم هیدرولیکی جریان است که بسیاری از ویژگی‌های هیدرولیکی دیگر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. دبی جریان که بیانگر حجم آب انتقال یافته از یک نقطه از مقطع جریان در واحد زمان هست، مستقیماً تحت تأثیر سرعت جریان است. همچنین عدد رینولدز که معیاری برای تعیین الگوی جریان (آرام یا آشفتگی) است به سرعت جریان وابسته است و عدد فرود که بیانگر نسبت انرژی جنبشی جریان به نیروهای گرانشی است نیز مستقیماً وابسته به سرعت جریان است (Di Stefano et al., 2018).

سرعت جریان آب در تعیین کمیت هیدرودینامیک جریان آب سطحی از دیدگاه نفوذ باران، انرژی رواناب و فرسایش خاک از اهمیت زیادی برخوردار است (Xiaofeng et al., 2019). فرسایندهای جریان که توانایی جریان را در از جا کردن و جابه‌جایی ذرات نشان می‌دهد نیز به نوبه خود به سرعت جریان بستگی دارد (Vaezi, 2026). این ویژگی نشان می‌دهد که مقدار فرسایش خاک در آبراهه تحت تأثیر هم‌زمان سرعت جریان و تنش برشی جریان است. از این رو سرعت جریان را به عنوان یکی از مهمترین مشخصه‌های هیدرولیکی جریان دانست که بر فرآیندهای انتقال و جاگذاری رسوب را مستقیماً تحت تأثیر قرار می‌دهد (Sun et al., 2020). بررسی‌ها نشان داد که تغییرات سرعت جریان در مقع عرضی کلنال باعث تغییرات تنش برشی بستر می‌شود. مقدار تنش برشی بستر در جریان‌های کم‌عمق بیشتر از جریان‌های با عمق زیاد است. با افزایش زبری و عرض نسبی، روند افزایش تنش برشی سیلاب‌دشت با شیب بیشتر رخ می‌دهد (Mohammadi & Ghahramanzadeh, 2021). اندازه‌گیری سرعت جریان در آبراهه‌ها و شیلی‌ها برای مهار فرسایش خاک ضروری است (Ban, 2023).

سرعت جریان در یک کانال یا آبراهه تحت تأثیر عوامل مختلفی است. شیب، ناهمواری سطح، شکل مقطع و ویژگی سطح آبراهه (کف

و دیواره‌ها) در کنار نرخ جریان عواملی هستند که سرعت جریان را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Lei et al., 2010). در معادلات مختلف مانند (Chezy (1769)، Bazin (1897)، Elliot (1976) و Manning (1891)، سرعت جریان با استفاده از این عوامل سه‌گانه کمی شده است. شیب مسیر که خود عامل محرک است یکی از عوامل مهم مؤثر بر سرعت جریان است. در همه معادلات برآورد سرعت جریان، تأثیری مشابه از شیب بر سرعت جریان مورد توجه قرار گرفته است. نقش شکل مقطع جریان بر سرعت جریان با معیار شعاع هیدرولیکی جریان بیان شده است که از نسبت سطح مقطع خیس شده بر محیط خیس شده به دست می‌آید. افزایش این عامل که کاهش تأثیر اصطکاک شکل مقطع (کف و دیواره‌ها) را بر سرعت جریان نمایان می‌کند موجب افزایش سرعت جریان می‌شود. ویژگی‌های سطح کف و دیواره‌ها که به عامل زبری سطح بیان می‌شود نیز عاملی هست که مقاومت سطح را در برابر جریان نشان می‌دهد (Ban, 2023). در سطوح صاف برخلاف سطوح دارای پستی و بلندی، سرعت جریان به دلیل پایین بودن اصطکاک ورقه‌های جریان با سطح بیشتر است. این ویژگی سطح را با ضریب زبری بیان می‌کنند که متوسط ارتفاع پستی و بلندی‌های سطح را نشان می‌دهد (Vaezi and Asghari, 2026).

دانشمندان روش‌های مختلفی را برای کمی‌سازی تأثیر این عامل بر سرعت جریان بیان کرده‌اند. Manning (1891) از جمله کسانی بود که با پژوهش‌های فراوان بر روی سرعت جریان در آبراهه‌های روباز مقدار این شاخص را در آبراهه‌های مختلف (خاکبرداری شده و طبیعی) کمی کرد. از دیدگاه او مقدار این شاخص از ۰/۰۳ تا ۰/۱۵ تغییر می‌کند. مقدار این شاخص در آبراهه‌های شنی، سنگلاخی و یا پوشیده از گیاه کمتر از آبراهه‌های با خاک نرم، غیرسنگی و یا عاری از گیاه است (Vaezi, 2026). بررسی‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مواد بستر به طور چشمگیری ویژگی‌های هیدرولیکی جریان مانند سرعت، دبی، عمق، شعاع هیدرولیکی و عدد رینولدز و نیز دینامیک انتقال رسوب را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Osama et al., 2025). یافته‌ها نشان می‌دهد که پوشش گیاهی در مسیر رودخانه به دلیل افزایش زبری باعث افت سرعت جریان و افزایش عمق جریان می‌شود (Esfandiyari Darabad et al., 2023). بررسی‌ها در مقیاس آزمایشگاهی و درون فلوم نیز نشان می‌دهد که تراکم پوشش گیاهی عاملی مهم در تغییرات سرعت جریان در طول مسیر است (Rezaei & Mohammadpoor, 2022). در جریان‌های روزمینی پوشش گیاهی باعث تغییر تدریجی جریان از حالت آرام به انتقالی می‌شود (Cen et al., 2023).

نوارهای کشت محصول که به صورت جوی و پشته‌هایی با اندازه‌های مختلف احداث می‌شوند می‌توانند نقش آبراهه را در زمین‌های شیبدار ایفا کنند. عملیات خاکورزی در راستی شیب در اراضی شیبدار باعث ظهور چنین نوارهایی روی زمین می‌شود

در مختصات جغرافیایی بین $36^{\circ} 41' 09''$ تا $36^{\circ} 41' 27''$ عرض شمالی و $48^{\circ} 23' 41''$ تا $48^{\circ} 23' 49''$ طول شرقی در اراضی دیم در شمال غرب استان زنجان قرار داشتند. بر مبنای داده‌های ایستگاه سینوپتیک زنجان متوسط بارش سالانه حدود ۲۷۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۱ درجه سانتی‌گراد است و بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، منطقه دارای اقلیم سرد و خشک است (Zarrinabadi & Vaezi, 2016). برای اجرای آزمایش، در هر کشتزار گندم، بخش‌هایی که از شیب یکنواخت برخوردار بودند انتخاب شدند. تلاش شد کشتزارهایی که از شیب متفاوتی برخوردار بوده و در عین حال دارای تفاوت‌هایی از نظر نوع خاک هستند مد نظر قرار گیرند. بر این اساس کشتزارهای انتخاب شده دارای شیب $1/6$ ، $1/8$ ، $1/4$ ، $1/2$ و $1/1$ درصد بودند (شکل ۱). این شیب‌ها در محدوده شیب‌های رایج کشتزارهای دیم منطقه هستند.

۲-۲- ایجاد نوارهای کشت

شخم با گاواهن برگردان‌دار و دیسک‌زنی دو عملیات رایج خاکورزی در کشتزارهای دیم منطقه هستند. بر این اساس، ابتدا زمین به‌وسیله گاواهن برگردان‌دار در راستای شیب، شخم و در ادامه دیسک زده شد. برای ایجاد نوارهای کشت از دستگاه ردیف‌کار غلات بدون استفاده از بذر استفاده شد تا نقش پوشش گیاهی بر سرعت جریان حذف شود و تنها تأثیر شیب و ویژگی‌های خاک مورد بررسی قرار گیرد. وجود پوشش گیاهی در آبراهه‌ها عاملی در بروز پیچیدگی بررسی سرعت جریان است (Cen et al., 2023). به این ترتیب نوارهایی با شکل مقطع عرضی سهمی، به عمق ۵ سانتی‌متر و با فاصله ۲۵ سانتی‌متر از یکدیگر در راستای شیب ایجاد شدند. نوع حرکت دستگاه ردیف‌کار عاملی بود که باعث شد ایجاد نوارهای کشت طولی در راستای خط مستقیم فراهم نشود. از این رو، ناگزیر طولی از شیب که نوارهای روی خط مستقیم قرار داشتند مدنظر قرار گرفتند. به این ترتیب، طول ۶ متر برای آزمایش‌های سرعت جریان در هر زمین انتخاب شد.

(Vaezi, 2026). این نوارها در زمان آبیاری ثقلی یا در اراضی شیبدار به هنگام بارندگی شدید، رفتاری شبیه آبراهه دارند. سرعت جریان در این نوارها نیز مشابه آبراهه‌ها می‌تواند برخاسته از شیب زمین، شکل مقطع و نوع خاک باشد. در شخم با گاواهن برگردان‌دار عمق این نوارها بسیار زیاد است و در ادامه دیسک زدن و کشت با ردیف‌کار باعث کوچک شدن عمق نوارها می‌شود. این نوارها مشابه شیارها بر روی دامنه عمل می‌کنند؛ به طوری که در بارندگی‌های شدید گذرگاه‌های مهم انتقال آب هست. به هر حال در شرایط دیم، حفظ آب در خاک و جلوگیری از تشکیل رواناب در این نوارها برای تأمین آب مورد نیاز گیاه و حفظ باروری خاک و در نتیجه دستیابی به عملکرد مناسب ضروری است (Vaezi & Sahandi, 2024). مناطق نیمه‌خشک که از بارندگی مناسب به ویژه در زمستان برخوردارند از مناطق مناسب کشت دیم گندم هستند. خشکسالی عامل طبیعی کمبود رطوبت و کاهش عملکرد در کشتزارهای دیم منطقه نیمه‌خشک است (Khaledi-Alamdari et al., 2024). در کنار این عامل طبیعی، شخم و کشت گندم به موازات شیب یکی از چالش‌های مهم حفظ آب و خاک در این مناطق است. بررسی عوامل مؤثر بر سرعت جریان در نوارهای کشت در اراضی شیبدار می‌تواند در کمی‌سازی فرسایش و نیز شناسایی اراضی حساس به هدررفت آب و خاک سودمند باشد. بر این مبنا می‌توان با ارائه راهکارهای حفاظت آب و خاک، از بروز فرسایش خاک در اراضی شیبدار جلوگیری کرد. معادلات برآورد سرعت جریان، غالباً در شرایط کانال‌های آزمایشگاهی ارائه شده‌اند و استفاده از آنها برای برآورد سرعت جریان در نوارهای کشت در اراضی شیبدار ممکن است با خطای زیادی همراه باشد. از این رو این پژوهش برای نخستین بار به بررسی برهمکنش میان شیب و ویژگی‌های فیزیکی خاک از نظر سرعت جریان در نوارهای کشت دیم پرداخته است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- انتخاب کشتزارهای گندم

آزمایش در پنج کشتزار گندم دیم در سه تکرار در قالب طرح کاملاً تصادفی در دانشگاه زنجان به اجرا درآمد. کشتزارهای گندم دیم



(ب) (ب)



(الف) (ا)

شکل ۱- نمایی از منطقه مطالعاتی در استان زنجان (الف) و اشباع سازی خاک پیش از آغاز آزمایش تعیین سرعت جریان (ب).
Fig. 1. View of the study area in north west of Zanzan province (a) and wetting of the soil before to the measurement of water flow velocity (b)

۲-۴- اندازه گیری ویژگی های خاک

ویژگی های مختلف فیزیکی و شیمیایی خاکها شامل توزیع اندازه ذرات معدنی، درصد بخش سنگی، محتوای ماده آلی، چگالی حقیقی، چگالی ظاهری، تخلخل، پایداری خاکدانه ها و نفوذپذیری تعیین شدند. برای تعیین چگالی ظاهری خاک، نمونه هایی از خاک به وسیله سیلندر فلزی به قطر ۵/۸ و ارتفاع ۸ سانتی متر برداشت شد و مقدار آن از نسبت جرم خشک خاک به حجم استوانه به دست آمد (Black, 1986). برای تعیین پایداری خاکدانه ها از روش الک تر استفاده شد (Kemper & Rosenau, 1986). برای این کار، ۱۰۰ گرم خاکدانه با قطر ۵/۶ و ۸ میلی متر برداشته شد و با استفاده از سری الک ها با قطر ۵/۶، ۴، ۲، ۱/۱۸، ۰/۶ و ۰/۲۵ میلی متر درون آب مقطر به مدت یک دقیقه به بالا و پایین حرکت داده شد و در ادامه پس از کسر بخش شن (بزرگتر از ۰/۰۵ میلی متر) میانگین وزنی قطر خاکدانه های پایدار (MWD) حساب شد (Vaezi et al., 2013). نفوذپذیری خاک با استفاده از روش درجایی تک حلقه نفوذ به طول ۳۰ سانتی متر و قطر ۱۶ سانتی متر (Brady & Weil, 1999) تعیین شد. اندازه گیری شدت نفوذ آب به خاک تا رسیدن مقدار آن به حد تقریباً ثابت (نفوذ نهایی) ادامه یافت. بلافاصله پس از اشباع سازی نوارها، نمونه های خاک برای تعیین رطوبت اشباع برداشته شد. همچنین پس از دو روز از اشباع سازی، نمونه هایی برای تعیین رطوبت ظرفیت مزرعه برداشته شد. با خشک کردن نمونه ها، مقدار رطوبت جرمی اشباع و ظرفیت مزرعه به دست آمد. برای اندازه گیری سایر ویژگی های خاکها، نمونه های خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی متر از سه نقطه از طول هر بخش از منطقه تحت آزمایش برداشت شد و توزیع اندازه ذرات معدنی، چگالی حقیقی، تخلخل، درصد بخش سنگی و محتوای ماده آلی در نمونه های خاک گذرانده از الک ۲ میلی متر اندازه گیری شدند. توزیع اندازه ذرات اولیه خاک (درصد شن،

۲-۳- اندازه گیری سرعت جریان

رطوبت خاک یکی از عواملی هست که بر شدت نفوذ آب و سرعت جریان اثر می گذارد (Huang et al., 2018). برای حذف تأثیر رطوبت خاک بر سرعت جریان آب در نوارها، آزمایش در شرایط رطوبت ظرفیت مزرعه انجام گرفت. برای این منظور، گونی های نخی بر روی سطح خاک پهن شد و موانعی در طول نوارها قرار داده شدند. سپس آبیاری ثقلی بر روی نوارها انجام گرفت. بدین ترتیب نوارها از آب پر شده و بر اثر نفوذ آب به خاک، نوارها به حالت اشباع درآمدند. روی سطح کرت ها با پلاستیک سیاه پوشانده شد و پس از دو روز و اطمینان از رسیدن رطوبت خاک به حد ظرفیت مزرعه، آزمایش های سرعت جریان انجام گرفت. برای این منظور، از جریانی با دبی ثابت دو لیتر بر دقیقه استفاده شد. برای این کار از تانکر آب در بالادست هر زمین استفاده شد و آب از طریق شیلنگ به درون نوارها هدایت شد (شکل ۱). پیش از آزمایش با استفاده از جریان های با دبی پایین تر نشان داد که جدا شدن ذرات و انتقال آنها رخ نمی دهد. چنین جریانی اگرچه در غالب باران های منطقه رخ نمی دهد اما به هنگام بارندگی های شدید (۸۰ میلی متر بر ساعت) در اوایل بهار که پوشش گیاهی مناسبی فراهم نشده است، می تواند موجب جدا شدن و انتقال ذرات خاک از نوارهای کشت شود (Besharat & Vaezi, 2015). برای تعیین سرعت جریان از ماده رنگی متیلن بلو استفاده شد و برای این منظور ماده رنگی در حجم کمی آب مخلوط شد تا ماده غلیظ رنگی به دست آمد. جریان با دبی ثابت دو لیتر بر دقیقه از یک متر بالاتر از بخش اصلی نوار به درون نوار وارد شد و بر اساس مدت زمان سپری شدن ماده رنگی در طول نوار شش متری، سرعت جریان به دست آمد.

داده‌های حاصل از انجام آزمایش از نرم افزار Excel نسخه ۲۰۱۳ و جهت تحلیل داده‌ها از نرم افزار SPSS نسخه ۲۲ استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- سرعت جریان در نوارهای کشت گندم

سرعت جریان آب در نوارهای کشت گندم در کشتزارهای دیم با شیب ۶/۱، ۱۰/۶، ۱۴/۸، ۲۰/۷ و ۲۷/۱ درصد به ترتیب از ۱۵/۴۰ تا ۱۶/۲۰، ۱۲/۸۰ تا ۱۳/۱۶، ۱۳/۳۰ تا ۱۴/۵۳ و ۱۶/۲۰ تا ۱۸/۲۱ سانتی‌متر بر ساعت تغییر کرد و میانگین آن در کشتزارها به ترتیب ۱۵/۸۰، ۱۴/۵۳، ۱۳/۱۰ و ۱۰/۸۰ و ۱۶/۲۰ سانتی‌متر بر ساعت بود. در هر یک از کشتزارها، تغییرات زیادی در سرعت جریان میان تکرارها وجود داشت. تغییرات سرعت جریان به‌نوبه خود تحت تأثیر شیب کشتزار بود؛ به طوری که میان کشتزارهای مورد بررسی، کمترین ضریب تغییرات سرعت جریان (۲/۵۳ درصد) در کشتزار با شیب ۶/۱ درصد و بیشترین مقدار آن (۱۵/۸۶ درصد) در کشتزار با شیب ۲۷/۱ درصد بود. داده‌های سرعت جریان در کشتزارهای گندم بر مبنای آزمون شاگرو-ویلک از توزیع نرمال پیروی کرد (جدول ۱).

جدول ۱- توصیف آماری سرعت جریان آب در نوارهای کشت در کشتزارهای دیم گندم

Table 1. Statistical description of water flow velocity in the furrows of wheat rainfed lands

شیب (%) Slope (%)	کمین Min	بیشینه Max	میانگین Mean	ضریب تغییرات (%) CV (%)	آزمون شاپیرو-ویلک Shapiro-Wilk test
۶/۱	۱۵/۴۰	۱۶/۲۰	۱۵/۸۰	۲/۵۳	۰/۹۸۹
۱۰/۶	۱۲/۸۰	۱۶/۲۰	۱۴/۵۳	۱۱/۶۹	۰/۹۳۵
۱۴/۸	۱۳/۰۰	۱۳/۳۰	۱۳/۱۱	۱/۲۹	۰/۶۳۷
۲۰/۷	۹/۷۰	۱۲/۰۱	۱۰/۸۰	۱۰/۶۵	۰/۸۵۶
۲۷/۱	۱۳/۳۰	۱۸/۲۱	۱۶/۲۰	۱۵/۸۶	۰/۴۱۲
میانگین	۹/۷۰	۱۸/۲۰	۱۴/۰۹	۱۶/۹۷	۰/۸۹۲

وجود ندارند اما تفاوتی اساسی با کشتزار با شیب ۲۰/۷ درصد دارند. به طور کلی الگوی یکسان در سرعت جریان با افزایش شیب کشتزار وجود نداشت (شکل ۲ الف). این نتیجه نشان می‌دهد که تنها شیب کشتزار مؤلفه اصلی تغییرات سرعت جریان در نوارهای کشت نیست. بلکه ویژگی‌های خاک نیز عاملی مهم در تغییرات سرعت جریان میان کشتزارها هستند. گزارش‌ها نشان می‌دهد که ویژگی‌های خاک با تأثیر بر ظرفیت نفوذ خاک، مقاومت برشی خاک و قابلیت برداشت ذرات بر سرعت جریان اثر می‌گذارند (Guo et al., 2013).

سیلت و رس) به روش هیدرومتری تعیین شد (Gee et al., 1986). چگالی حقیقی با استفاده از روش پیکنومتر تعیین شد. مقدار تخلخل بر اساس چگالی ظاهری و چگالی حقیقی خاک محاسبه شد. درصد ماده آلی خاک با روش اکسایش تر اندازه‌گیری شد (Nelson & Sommers, 1982).

۵-۲- تجزیه و تحلیل داده‌ها

پیش از تحلیل آماری، نرمال بودن توزیع آماری داده‌ها با استفاده از تحلیل چولگی داده‌ها و آزمون شاپیرو-ویلک (Shapiro & Wilk, 1965) بررسی شد. از روش آمار توصیفی برای بیان آماره‌های سرعت جریان استفاده شد. برای تعیین عوامل مؤثر بر سرعت جریان در نوارهای محصول از روش‌های زیر استفاده شد:

(۱) از روش تجزیه واریانس بر مبنای آزمون توکی برای بررسی تفاوت سرعت جریان میان کشتزارهای با شیب متفاوت استفاده شد.

(۲) از روش رگرسیونی برای کمی‌سازی رابطه میان سرعت جریان و شیب زمین استفاده شد.

(۳) از روش ملتریس همبستگی (پیرسون) برای تعیین نقش ویژگی‌های خاک در سرعت جریان استفاده شد. برای رسم نمودار

۲-۳- تفاوت سرعت جریان در نوارهای کشت دیم

مقایسه آماری سرعت جریان آب در نوارهای کشت بین کشتزارهای مختلف نشان داد که تفاوتی معنی‌دار میان سرعت جریان آب میان کشتزارهای مختلف مورد بررسی وجود دارد ($p < 0.01$) (جدول ۲). نتایج مقایسه‌های میانگین نشان داد که کشتزارهای با شیب ۶/۱ و ۲۷/۱ درصد در یک گروه آماری قرار دارند، با این حال تفاوتی معنی‌دار میان آنها و کشتزارهای با شیب ۱۰/۶ و ۱۴/۸ درصد

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس تفاوت سرعت جریان آب در نوارهای کشت بین کشتزارهای دیم گندم

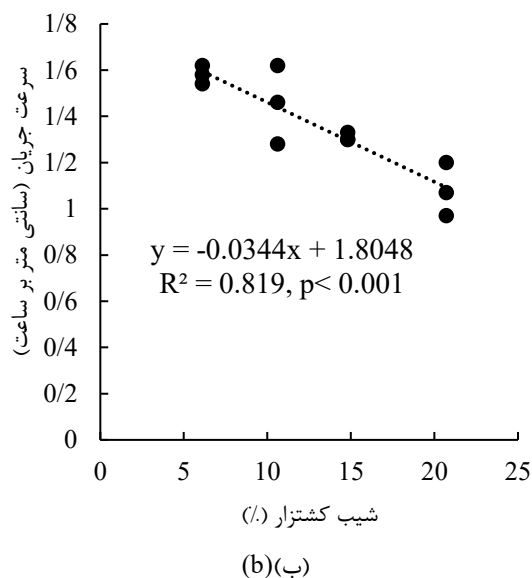
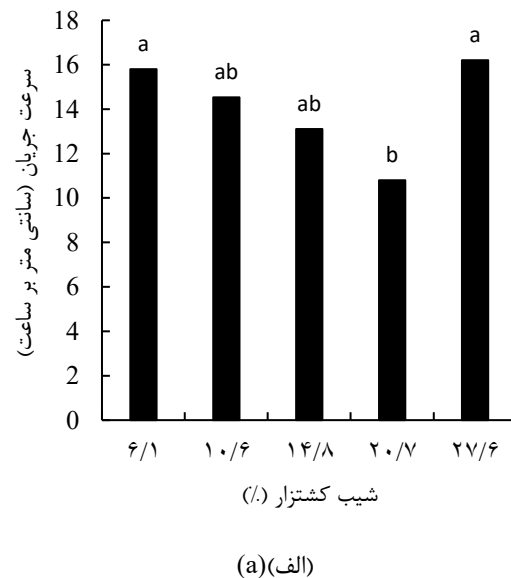
Table 2. Results of the variance analysis for water flow velocity of furrows among wheat rainfed lands

معنی داری	F	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	متغیر
Significance		MS	FD	SS	Variable
۰/۰۰۷	۶/۵۷۹	۰/۰۰۱	۴	۰/۰۰۶	سرعت جریان در نوار کشت

با پوشش گیاهی طبیعی و اراضی کشاورزی شیبدار (Vaezi et al., 2017; Zhang et al., 2018) به اثبات رسیده است. همچنین یافته‌های آزمایشگاهی در ابعاد فلوم تحت جریان‌های شبیه‌سازی شده با نرخ ۴، ۲ و ۸ لیتر بر دقیقه نشان داد که سرعت جریان سطحی به شدت تحت تأثیر نرخ جریان و شیب سطح است (Rahma et al., 2013). آزمایش‌ها در ابعاد فلوم تحت جریان‌های با نرخ ۴، ۲ و ۱۰ لیتر بر دقیقه نیز نشان داد که سرعت جریان در کنار نرخ جریان به شدت تحت تأثیر شیب و وضعیت رطوبتی خاک است (Huang et al., 2018).

۳-۳- رابطه میان سرعت جریان و شیب کشتزار دیم

به طوری کلی بجز در مورد شیب ۲۷/۱ درصد، روندی کاهشی در سرعت جریان با افزایش شیب کشتزار وجود داشت (شکل ۲ الف). چنین نتیجه‌ای برخلاف بسیاری از پژوهش‌های پیشین هست که در آن نشان داده‌اند با افزایش شیب زمین، سرعت جریان افزایش پیدا می‌کند (Steinbrich et al., 2016; Ma et al., 2020; Fu and Ma, 2025). هم‌چنین در بسیاری از مطالعات، نقش عامل درجه شیب در کاهش ماندگاری آب روی خاک و افزایش تولید رواناب در دامنه‌های



شکل ۲- مقایسه‌های میانگین سرعت جریان در نوارهای کشت در کشتزارهای با شیب مختلف (الف) و رابطه میان سرعت جریان و شیب کشتزار دیم (ب).

Fig. 2. Means comparison for water flow velocity in the furrows of rainfed lands with different slopes (a) and the relationship between water flow velocity and slope gradient in rainfed lands with slope gradient ranging from 6.1% to 20.7% (b)

می‌شود اما در این محدوده از شیب، کاهش سرعت جریان با افزایش شیب هیدرولیکی می‌تواند نقش نوع خاک را در تغییر سرعت جریان در نوارهای کشت نمایان کند. به عبارت دیگر سرعت جریان در نوارها تا محدوده‌ای از شیب (۲۰/۷ درصد) تحت تأثیر نوع خاک است و از آن پس نقش درجه شیب بر سرعت جریان بر نقش نوع خاک چیره می‌شود. به این ترتیب می‌توان شیب ۲۰/۷ درصد را آستانه تأثیر شیب هیدرولیکی بر سرعت جریان در نوارهای کشت دیم دانست. نوع خاک را می‌توان عامل مهم مهار کننده سرعت جریان در نوارهای کشت در شیب‌های پایین‌تر دانست. در برخی پژوهش‌ها نیز نشان

در شیب ۲۷/۶ درصد افزایش قابل توجهی نسبت به شیب‌های دیگر در سرعت جریان وجود داشت و این موجب شد الگوی یکسانی در تغییر سرعت جریان با افزایش شیب کشتزار مشاهده نشود. با این وجود در محدوده شیب ۶/۱ درصد تا شیب ۲۰/۷ درصد، رابطه خطی میان سرعت جریان و شیب زمین وجود دارد ($p < 0.01$) و $R^2 = 0.82$ ؛ به طوری که با افزایش شیب زمین، سرعت جریان به شدت کاهش پیدا می‌کند (شکل ۲ ب). اگرچه بر اساس اصول هیدرولیک با افزایش شیب زمین، شیب هیدرولیکی مستقیماً تحت تأثیر قرار می‌گیرد و موجب افزایش سرعت جریان آب در نوارهای کشت

دادند که سرعت جریان می‌تواند مستقل از شیب باشد، زیرا در سطوح ناهموار، عامل زبری می‌تواند اثر افزایش شیب سطح را بر سرعت جریان در شیارها خنثی کند (Nearing et al., 1999). بررسی‌ها در شیارهای واقع در مراتع منطقه نیمه‌خشک نشان داد که شیب و مواد خاک، چه به طور مستقیم و چه غیرمستقیم از طریق زبری بستر، بر سرعت جریان اثر می‌گذارند (Abrahams & Parsons, 1996). گزارش‌ها نشان می‌دهد که سرعت جریان گاهی به دلیل تغییر ریخت‌شناسی شیار مستقل از شیب سطح می‌شود (Govers, 1992). بررسی‌های Torri et al. (2012) نیز نشان می‌دهد که اثر شیب بر سرعت جریان در شیارها واقع در شیب‌های تند به دلیل افزایش فرسایش و زبری بستر ناچیز می‌شود.

۳-۴- ویژگی‌های خاک کشتزارهای دیم گندم

نتایج تجزیه خاک کشتزارها نشان داد که بافت خاک کشتزارهای با شیب ۶/۱، ۱۰/۶، ۱۴/۸ و ۲۰/۷ از نوع لوم شنی و بافت خاک کشتزار با شیب ۲۷/۱ درصد از نوع شن لومی است. خاک‌ها همه از

نوع سنگریزه‌دار هستند و مقدار بخش سنگی در آنها از ۱۸/۴۸ تا ۵۹/۳۶ درصد تغییر می‌کند. مقدار ماده آلی در خاک‌ها بسیار اندک است و از ۰/۵۳ تا ۱/۵۵ درصد تغییر می‌کند. درصد پایین ذرات رس و کمبود ماده آلی دو عامل تضعیف تشکیل خاکدانه‌های پایدار در خاک‌ها هستند؛ به طوری که میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار (MWD) از ۰/۱۱ تا ۰/۴۱ میلی‌متر تغییر می‌کند. این ویژگی خاک بیشترین تغییرات را میان کشتزارهای مورد بررسی گندم داشت (با ۳۵/۵۲ درصد ضریب تغییرات). همچنین خاک‌های از ظرفیت نگهداری آب (ظرفیت مزرعه) کمتر (بین ۷/۲۱ و ۱۱/۹۶ درصد) و از رطوبت اشباع پایین‌تری (بین ۱۴/۴۶ و ۲۴/۵۴ درصد) برخوردارند. چگالی ظاهری خاک از ۱/۲۰ تا ۱/۶۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب تغییر می‌کند و مقدار تخلخل کل پایین است (بین ۳۰/۱۳ و ۴۹/۲۲ درصد). خاک‌ها از نفوذپذیری بالایی برخوردارند؛ به طوری که مقدار شدت نفوذ نهایی از ۶/۰۱ تا ۱۹/۲۰ سانتی‌متر بر ساعت تغییر می‌کند (جدول ۳). فراوانی بیشتر ذرات درشت‌دانه مانند شن و وجود مقدار زیاد بخش سنگی عوامل مهم در بالابودن نفوذپذیری خاک‌ها هستند.

جدول ۳- نتایج تجزیه ویژگی‌های خاک کشتزارهای دیم گندم

Table 3. Results of the analysis of soil properties of wheat rainfed lands

ویژگی‌های خاک کشتزار Soil properties	کمینه Min.	بیشینه Max.	میانگین Mean	ضریب تغییرات (%) CV (%)
شن (%) Sand (%)	۵۵/۳۰	۷۶/۱۲	۶۰/۸۹	۱۲/۵۱
سیلت (%) Silt (%)	۱۶/۳۷	۳۱/۳۵	۲۵/۶۰	۱۷/۸۹
رس (%) Clay (%)	۷/۵۰	۱۷/۵۰	۱۳/۵۰	۲۶/۶۷
بخش سنگی (%) Rock fragment (%)	۱۸/۴۸	۵۹/۳۶	۴۲/۶۸	۳۱/۶۷
ماده آلی (%) Organic matter (%)	۰/۵۳	۱/۵۵	۱/۰۲	۳۲/۳۵
پایداری خاکدانه (میلی‌متر) MWD of aggregates (mm)	۰/۱۱	۰/۴۱	۰/۲۶	۳۵/۵۲
چگالی ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب) BD (g/cm ³)	۱/۲۰	۱/۶۲	۱/۴۱	۸/۵۱
تخلخل (%) Porosity (%)	۳۰/۱۳	۴۹/۲۲	۴۰/۴۵	۱۳/۶۵
ظرفیت مزرعه (گرم بر گرم) Field capacity (g/g)	۷/۲۱	۱۱/۹۶	۹/۱۹	۱۸/۰۶
رطوبت اشباع (گرم بر گرم) Saturate point (g/g)	۱۴/۴۶	۲۴/۵۴	۱۹/۷۶	۲۱/۰۱
شدت نفوذ (سانتی‌متر بر ساعت) Infiltration rate (cm/h)	۶/۰۱	۱۹/۲۰	۱۰/۳۶	۳۳/۲۰

$r = -0.79$ و تخلخل درشت ($p < 0.01$) و $r = -0.83$ ، دارد در حالی که همبستگی آن با تخلخل خاک مثبت است ($p < 0.01$) و $r = 0.78$. میان چگالی ظاهری و درصد بخش سنگی همبستگی مثبتی ($p < 0.05$) و $r = 0.69$ و تخلخل خاک همبستگی منفی ($p < 0.01$) و $r = -0.95$ وجود دارد که نشان می‌دهد افزایش بخش سنگی در خاک‌ها موجب افزایش چگالی ظاهری و در نتیجه کاهش تخلخل

۳-۵- تأثیر ویژگی‌های خاک بر سرعت جریان

تحلیل همبستگی پیرسون برای بررسی تأثیر ویژگی‌های خاک بر سرعت جریان در محدوده شیب ۶/۱ تا ۲۰/۷ درصد نشان داد که سرعت جریان آب در نوارهای کشت همبستگی منفی با درصد بخش سنگی خاک ($p < 0.01$) و $r = -0.76$ ، چگالی ظاهری ($p < 0.01$) و

خاک می‌شود (جدول ۴). فراوانی زیاد ذرات درشت در خاک عاملی مهم در افزایش زبری سطح خاک و در نتیجه مقاومت در برابر جریان آب است. بسیاری از پژوهش‌ها نشان می‌دهند که بخش سنگی از یک سو، ویژگی‌های خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد (van Wesemael et al., 1996) و از سوی دیگر، نقشی اساسی در خصوصیات هیدرولیکی جریان و فرسایش خاک ایفاء می‌کند (Poesen & Ingelmo-Sanchez, 1992). پژوهشگران دریافته‌اند که بخش سنگی با افزایش زبری و اصطکاک هیدرولیکی موجب کاهش سرعت جریان روزمینی و فرسایش خاک می‌شود. آنها این عامل را یکی از اجزای مهم مدل پروژه پیش‌بینی فرسایش خاک^۱ (WEPP) معرفی کردند (Nearing et al., 1989). یافته‌های پژوهشگران نشان داد که اثر پوشش سنگی بر تولید رواناب سطحی می‌تواند مثبت یا منفی باشد. نقش منفی زمانی است که قطعات سنگی موجب افزایش تخلخل درشت خاک شود و نقش مثبت زمانی است که قطعات سنگی مخلوط با ذرات ریزدانه شوند (Poesen & Ingelmo-Sanchez, 1992). بررسی‌ها در مقیاس فلوم آزمایشگاهی نشان داد که بخش سنگی باعث افزایش فرورفتگی‌های سطح و نگهداشت آب شده موجب کاهش سرعت جریان آب در شیارها می‌شود (Govers et al., 2000). در مطالعه Li et al. (2017) اثر سنگریزه بر خصوصیات هیدرولیکی جریان و فرسایش خاک در شرایط افزودن مقادیر مختلف

سنگریزه به خاک (از ۲۵ تا ۵۵ درصد) در دو شیب مختلف بررسی شد و دریافته‌اند که اندازه ذرات سنگ به دلیل تأثیر بر حجم منافذ و تغییر شکل سطح مقطع عبور جریان بر سرعت جریان اثر می‌گذارد با افزایش محتوای سنگریزه میانگین سرعت جریان و عدد رینولدز کاهش یافت. بررسی‌های آزمایشگاهی با استفاده از جریان‌های شبیه‌سازی شده نشان داد که با افزودن پوشش سنگریزه روی سطح، سرعت جریان رواناب و تلفات خاک کاهش یافت. با این وجود افزایش قطر سنگریزه‌ها سبب افزایش سرعت جریان رواناب و در نتیجه افزایش تلفات خاک نشد (Asadzadeh et al., 2017). بررسی‌ها در خاک‌های سنگی یخ‌زده در عرض‌های شمالی تحت جریان‌های با نرخ ۱ تا ۸ لیتر بر دقیقه و شیب‌های مختلف نشان داد که با افزایش شیب سطح، تأثیر پوشش سنگ روی سطح خاک بر کاهش سرعت جریان افزایش می‌یابد (Ban et al., 2017). بررسی‌های درون فلوم آزمایشگاهی نشان داد که انواع مختلف مواد بستر مانند پوشش گیاهی، سنگریزه و شن، بر مشخصه‌های هیدرولیکی جریان مانند سرعت، دبی، عمق آب، شعاع هیدرولیکی و عدد رینولدز اثر می‌گذارند. شن به دلیل سطوح صاف‌تر و ضرایب زبری کمتر، سرعت جریان را افزایش اما سنگریزه و پوشش گیاهی به دلیل اثر واماندگی، مقاومت جریان و آشفتگی آن را افزایش می‌دهد (Osama et al., 2025).

جدول ۴- همبستگی پیرسون بین سرعت جریان آب در نوارهای کشت گندم دیم و ویژگی‌های خاک آنها در کشتزارهای دیم با شیب ۶/۱ تا ۲۰/۷ درصد (n=۱۲)

Table 4. Pearson's correlation between water flow velocity of rainfed furrows and soil properties in rainfed lands with 6.1% to 20.7% slope steepness (n=12)

Variable	Sand	Silt	Clay	Rock	MWD	BD	Porosity	MP	Infiltration	Velocity
Sand	۱									
Silt	-۰/۲۲	۱								
Clay	-۰/۶۴*	-۰/۶۱*	۱							
Rock	-۰/۰۳	-۰/۶۲*	۰/۴۶	۱						
MWD	-۰/۵۶*	۰/۵۴	-۰/۰۳	-۰/۴۱	۱					
BD	۰/۲۱	-۰/۴۱	۰/۱۵	۰/۶۹*	-۰/۴۵	۱				
Porosity	-۰/۲۸	۰/۴۱	-۰/۰۸	-۰/۶۲*	۰/۶۴*	-۰/۹۵**	۱			
MP	-۰/۳۱	۰/۵۲	-۰/۳۱	-۰/۷۱**	۰/۴۵	-۰/۸۴**	۰/۷۵**	۱		
Infiltration	۰/۵۳	-۰/۴۷	۰/۰۷	۰/۲۱	-۰/۶۰*	۰/۴۴	-۰/۴۷	-۰/۴۵	۱	
Velocity	-۰/۳۲	۰/۵۱	-۰/۱۴	-۰/۷۶**	۰/۵۱	-۰/۷۹**	۰/۷۸**	۰/۴۳	-۰/۲۳	۱

MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب، BD: چگالی ظاهری و MP: تخلخل درشت خاک.

*: معنی‌داری در سطح احتمال ۹۵ درصد و **: معنی‌داری در سطح احتمال ۹۹ درصد.

۴- نتیجه گیری نهایی

نقشی در افزایش نفوذپذیری خاک ندارد؛ بلکه عمدتاً با افزایش زبری سطح خاک، مقاومت در برابر جریان را بالا برده و در نتیجه سرعت آن را کاهش می‌دهد. در مجموع، می‌توان چنین استنباط کرد که در کشتزارهای دیم با خاک‌های درشت‌دانه، شیب ۲۰/۷ درصد به‌عنوان آستانه غلبه عامل شیب بر ویژگی‌های خاک عمل می‌کند؛ به‌گونه‌ای که در شیب‌های کمتر از این حد، خصوصیات خاک بر سرعت جریان چیره است و در شیب‌های بیشتر، نقش افزایشی شیب هیدرولیکی بروز می‌یابد. این یافته می‌تواند در طراحی سامانه‌های کشت و مدیریت رواناب در اراضی دیم‌کار راهگشا باشد. در پژوهش‌های آتی نقش شکل هندسی مقطع نوار نیز می‌تواند در کنار عوامل شیب و خاک روی سرعت جریان مورد بررسی قرار گیرد.

سپاس‌گزاری

بدینوسیله از پشتیبانی دانشگاه زنجان برای انجام این پژوهش تشکر می‌گردد و از گروه علوم و مهندسی خاک برای انجام تجزیه‌های آزمایشگاهی و آزمایش‌های صحرایی سپاس‌گزاری می‌شود.

بررسی سرعت جریان سطحی در نوارهای کشت محصول در اراضی دیم، از آن رو حائز اهمیت است که نقش مستقیمی در شدت فرسایش آبی دارد. در پژوهش حاضر، سرعت جریان در پنج کشتزار گندم دیم با شیب‌های ۶/۱، ۱۰/۶، ۱۴/۸، ۲۰/۷ و ۲۷/۱ درصد، همگی با بافت درشت‌دانه و ساختمان ضعیف، مورد سنجش قرار گرفت. یافته‌ها نشان داد که برخلاف انتظار رایج، در دامنه شیب ۶/۱ تا ۲۰/۷ درصد، سرعت جریان آب به‌طور خطی و معنی‌دار کاهش یافت ($R^2=0.81$ و $p<0.01$). اما در شیب ۲۷/۱ درصد، این روند معکوس شده و افزایش چشمگیری در سرعت جریان مشاهده شد. این نتایج بیانگر آن است که شیب زمین، به‌تنهایی عامل تعیین‌کننده سرعت جریان در این کشتزارها نیست؛ بلکه در محدوده شیب‌های یادشده، ویژگی‌های خاک نقش بازدارنده‌ای در برابر تأثیر افزایشی شیب هیدرولیکی ایفا می‌کنند. در شیب‌های پایین‌تر، سرعت جریان به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر عواملی چون درصد سنگریزه (ذرات درشت‌تر از ۲ میلی‌متر)، چگالی ظاهری و تخلخل خاک قرار می‌گیرد. هرچند افزایش بخش سنگی بر چگالی و تخلخل مؤثر است، اما خود

منابع

- Abrahams AD, Li G, and Parsons AJ, 1996. Rill hydraulics on a semiarid hillslope, southern Arizona. *Earth surface processes and landforms*, 21(1), 35-47.
- Asadzadeh, F, Hasan Agha MF, and Khodavardiloo H. 2017. Application of the central composite design for predicting the effects of surface rock fragments on soil loss and surface flow velocity. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48(1), 165-176 (In Persian with English Abstract). DOI.10.22059/ijswr.2017.61350
- Ban Y, 2023. Measurements and estimation of flow velocity in mobile bed rills. *International Journal of Sediment Research*, 38(1), 97-104. DOI.org/10.1016/j.ijsrc.2022.07.003
- Ban Y, Lei T, Feng R, and Qian D, 2017. Effect of stone content on water flow velocity over Loess slope: Frozen soil. *Journal of Hydrology*, 554, 792-799. DOI.10.1016/j.jhydrol.2017.03.069
- Besharat F, and Vaezi AR, 2015. Effect of rainfall distribution pattern during events on runoff and soil loss under simulated rainfalls. *Iran-Watershed Management Science & Engineering*, 9(29), 1-18 (In Persian with English Abstract).
- Black AL, 1986. Bulk density. In: Editor Methods of soil analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Method. Agronomy Monograph, 2nd Ed., 374- 380.
- Brady NC, and Weil RR, 1999. The nature and properties of soils (12th ed.) Prentice Hall Inc. P. 117-168.
- Cen Y, Zhang K, Peng Y, Rubinato M, Zhang H, Shang H, and Li P, 2023. Quantification of the effects on the flow velocity caused by gramineous plants in the loess plateau in North-Western China. *Geoderma*, 429, p.116264. DOI.org/10.1016/j.geoderma.2022.116264
- Di Stefano C, Ferro V, Palmeri V, and Pampalone V, 2018. Testing slope effect on flow resistance equation for mobile bed rills. *Hydrological Processes*, 32(5), 664-671. DOI.org/10.1002/hyp.11448
- Esfandiari Darabad F, Mostafazadeh R, Abyat A, and Naseri A, 2023. Evaluation of the relationship between factors affecting Manning roughness coefficient and estimated water flow velocity in Gharasoo river, Ardabil. *Quantitative Geomorphological Research*, 12(1), 59-72 (In Persian with English Abstract). DOI.10.22034/gmpj.2022.197570.1081
- Fu S, and Ma H, 2025. Hydraulic characteristics of snowmelt runoff in cultivated furrows. *Hydrological Processes*, 39(6), p.e70172.
- Gee GW, and Bauder JW, and Klute A, 1986. Particle-size analysis. Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. 383-411.
- Govers G, 1992. Relationship between discharge, velocity and flow area for rills eroding loose, non-layered materials. *Earth Surface Processes and Landforms*, 17(5), 515-528.
- Govers G, Takken I, and Helming K, 2000. Soil roughness and overland flow. *Agronomie*, 20(2),

- 131-146.
- Guo T, Wang Q, Li D, Zhuang J, and Wu L, 2013. Flow hydraulic characteristic effect on sediment and solute transport on slope erosion. *Catena*, 107, 145-153. DOI:10.1016/J.CATENA.2013.03.001
- Huang Y, Chen X, Li F, Zhang J, Lei T, Li J, Chen P, and Wang X, 2018. Velocity of water flow along saturated loess slopes under erosion effects. *Journal of Hydrology*, 561, 304-311. DOI.org/10.1016/j.jhydrol.2018.03.070
- Kemper WD, and Rosenau RC, 1986. Aggregate stability and size distribution. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, PP. 425-442.
- Khaledi-Alamdari M, Majnooni-Heris A, and Fakheri Fard A, 2024. Probabilistic analysis of drought effects on rainfed wheat yield using copula functions (case study: Tabriz plain). *Journal of Hydraulics and Water Science*, 34(1) 55-69. (In Persian with English Abstract). DOI.10.22034/ws.2023.54324.2506
- Lei T, Chuo R, Zhao J, Shi X, and Liu L, 2010. An improved method for shallow water flow velocity measurement with practical electrolyte inputs. *Journal of Hydrology*, 390(1-2), 45-56. DOI.10.1016/j.jhydrol.2010.06.029
- Li T, He B, Chen Z, Zhang Y, and Liang C, 2017. Effects of gravel on concentrated flow hydraulics and erosion in simulated landslide deposits. *Catena*, 156, 197-204. DOI.10.1016/j.catena.2017.04.015
- Mohammadi MA, and Ghahramanzadeh A, , 2021. Numerical investigation of flow velocity and shear stress in a rough rectangular compound channel with single floodplain. *Journal of Modeling in Engineering*, 19(64), 41-51 (In Persian with English Abstract). DOI. 10.22075/jme.2020.19942.1870
- Osama I, Al Hatmai M, Alghufali N, Al-Balushi F, and Rahim A, 2025. Investigation of flow velocity distribution in open channels according to specific characteristics (under the effect of bed materials: sand, gravel, and concrete. *Sohar University Journal of Engineering and Information Technology Innovations*, 1, No. 2. DOI. org/10.69983/SUJEITI/1219
- Ma Q, Zhang K, Cao Z, Wei M, and Yang Z, 2020. Soil detachment by overland flow on steep cropland in the subtropical region of China. *Hydrological Processes*, 34(8), 1810-1820. DOI.org/10.1002/hyp.13694
- Mancilla GA, Chen S, and McCool DK, 2005. Rill density prediction and flow velocity distributions on agricultural areas in the Pacific Northwest. *Soil and Tillage Research*, 84(1), 54-66.
- Nearing MA, Foster GR, Lane LJ, and Finkner SC, 1989. A process-based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 32(5), 1587-1593,
- Nearing MA, Simanton JR, Norton LD, Bulygin SJ, and Stone J. 1999. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hillslope. *Earth Surface Processes and Landforms. The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 24(8), 677-686.
- Nelson DW, and Sommers, L, 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. Pp. 539 -579. In: *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, WI. USA.
- Poesen J, and Ingelmo-Sanchez F, 1992. Runoff and sediment yield from topsoils with different porosity as affected by rock fragment cover and position. *Catena*, 19(5), 451-474.
- Rahma AE, Lei T, Shi X, Dong Y, Zhou S, and Zhao J, 2013. Measuring flow velocity under straw mulch using the improved electrolyte tracer method. *Journal of Hydrology*, 495, 121-125. DOI. 10.1016/j.jhydrol.2013.04.049
- Rezaei MJ, and Mohammadpoor R, 2022. Analysis of flow velocity distribution in vegetation channels with different densities. *Journal of Management and Engineering Watershed*, 14(3), 3878-399 (In Persian with English Abstract). DOI.doi.org/10.22092/ijwmse.2021.352853.1866
- Shapiro SS, and Wilk MB, 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3-4), 591-611.
- Steinbrich A, Leistert H, and Weiler M, 2016. Model-based quantification of runoff generation processes at high spatial and temporal resolution. *Environmental Earth Sciences*, 75(21), p.1423.
- Sun L, Zhou JL, and Cai Q, 2020. Impacts of soil properties on flow velocity under rainfall events: Evidence from soils across the Loess Plateau. *Catena*, 194, p.104704. DOI.org/10.1016/j.catena.2020.104704
- Torri D, Poesen J, Borselli L, Bryan R, and Rossi M, 2012. Spatial variation of bed roughness in eroding rills and gullies. *Catena*, 90, 76-86. DOI.org/10.1016/j.catena.2011.10.004
- Vaezi AR, 2026. *Water Erosion; Processes, Models and Controlling Methods*. University of Zanjan Press. Pp. 513. (In Persian)
- Vaezi AR, Hasanzadeh H, and Mohammadi MH, 2013. Runoff variations in the soil textures samples in the plot scale under the same rainfall events. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 44(3), 243-

253. (In Persian with English Abstract)
DOI.org/10.22059/ijswr.2013.50214
- Vaezi AR, and Sahandi K, 2024. Introducing dryland furrow soil erosion; a new form of water erosion and investigating the dependency on soil properties in the semi-arid regions, NW Iran. *Catena*, 243, p.108154. (In Persian with English Abstract) DOI.org/10.1016/j.catena.2024.108154
- Vaezi AR, Zarrinabadi E, and Auerswald K, 2017. Interaction of land use, slope gradient and rain sequence on runoff and soil loss from weakly aggregated semi-arid soils. *Soil and Tillage Research*, 172, 22-31. DOI.org/10.1016/j.still.2017.05.001
- Vaezi AR, Asghari M, 2026. Investigating the Effects of Muddy Water on Soil Hydraulic Characteristics Across Different Soil Textures, *Journal of Hydraulics and Water Science*, 35(4) 60-72. (In Persian with English Abstract). DOI: 10.22034/hws.2025.67753.1036
- Alireza Vaezi, Mahdijeh Asgharivan Wesemael B, Poesen J, Kosmas CS, Danalatos NG, and Nachtergaele J, 1996. Evaporation from cultivated soils containing rock fragments. *Journal of Hydrology*, 182(1-4), 65-82.
- Xiaofeng G, Li F, Chen C, Ban Y, and Gao Y, 2019. Effects of thawed depth on the sediment transport capacity by melt water on partially thawed black soil slope. *Land Degradation & Development*, 30(1), 84-93. DOI.org/10.1002/ldr.3213
- Zarrinabadi E, and Vaezi AR, 2016. Runoff and soil loss as affected by land use change and plough direction in poor vegetation cover pastures. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 47(1), 87-98 (In Persian with English Abstract). DOI.org/10.22059/ijswr.2016.57981
- Zhang X, Hu M, Guo X, Yang H. Zhang Z, and Zhang K, 2018. Effects of topographic factors on runoff and soil loss in southwest China. *Catena*, 160, 394-402. DOI.org/10.1016/j.catena.2017.10.013