

## تأثیر سنگریزه بر نفوذ تجمعی در دو بافت مختلف خاک

### چکیده

هدف از این مطالعه، بررسی اثر مقدار و اندازه سنگریزه بر نفوذ آب، در دو خاک لوم و لوم شنی بود. به این منظور، دو سری نمونه دست‌خورده با بافت زمینه لوم و لوم شنی و دارای مقادیر جرمی ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد سنگریزه ریز (۴-۴/۷۵ میلی‌متر) و سنگریزه درشت (۷/۹-۱۵/۸ میلی‌متر) و یک تیمار فاقد سنگریزه (شاهد) به‌طور جداگانه تهیه شد. نمونه‌های خاک تهیه شده در ستون‌های با ارتفاع ۵۰ و قطر داخلی ۲۱/۵ سانتی‌متر ریخته و متراکم شد و با استفاده از سیستم ماریوت، مقدار نفوذ تجمعی هر دو سری نمونه خاک اندازه‌گیری گردید. برای هر دو سری آزمایش، ۱۰ ستون استفاده گردید. آزمایش‌های نفوذ بدون تکرار انجام شد. حضور سنگریزه در هر دو خاک لوم شنی و لوم باعث افزایش نفوذ تجمعی نسبت به تیمار شاهد شد. مقدار متوسط نفوذ آب در تیمارهای لوم مخلوط با سنگریزه ریز و درشت به ترتیب، ۲۵ و ۱۰۴ درصد بیش‌تر از تیمارهای لوم شنی مخلوط با سنگریزه ریز و درشت بود. سنگریزه ریز در خاک لوم شنی و سنگریزه درشت در خاک لوم تأثیر بیش‌تری بر افزایش نفوذ تجمعی داشتند. با این حال، در مقدار سنگریزه ۲۰ درصد، نوساناتی مشاهده شد. نتایج نشان داد که سنگریزه همیشه باعث افزایش مقدار نفوذ آب در خاک نمی‌شود. نتایج همچنین نشان داد که سنگریزه در هر دو خاک، با تأثیر بر مقدار جرم‌های مخصوص ظاهری کل و بخش نرم خاک بر مقدار نفوذ تجمعی آب تأثیر می‌گذارد.

کلیدواژه‌گان: تخلخل، جرم مخصوص ظاهری، جریان ترجیحی، منافذ درشت

دانشگاه  
پایگاه

# The effect of gravel on the cumulative infiltration in two different soil textures

## ABSTRACT

The objective of this study was to investigate the effect of content and size of gravel on water infiltration in two loam and sandy loam soils. For this, two series of repacked soil samples, with loam and sandy loam textures, and mass contents of 10, 20, 30 and 40 % fine gravel (4-4.75) and coarse gravel (7.9- 15.8) mm, and a treatment with no gravel (CK) were created separately. The prepared soil samples were compacted into 50 cm high cylinders with an inner diameter of 21.5 cm. The cumulative infiltration of both series of soil samples were measured using the Marriott system. Regarding both series of experiments, 10 cylinders were used. The experiments of infiltration were done with no replication. The presence of the gravel increased the cumulative infiltration in both sandy loam and loam soils compared to the (CK). The average amount of water infiltration in loam treatments, combined with fine and coarse gravel were respectively, 25 and 104 percent, higher than in sandy loam treatments, combined with fine and coarse gravel. Fine gravel of sandy loam and coarse gravel of loam soils, had the highest effect on the increase of cumulative infiltration. However, some fluctuations were observed under the gravel content of 20 %. The results showed that the gravel does not always increase the amount of soil water infiltration. The results also indicated, the gravel affects the amount of water infiltration in both soils by affecting the total, and the fine earth bulk densities.

**Keywords:** Bulk density, Macro pores, Preferential flow, Porosity

## مقدمه

خاک‌های سنگریزه‌دار در جهان بسیار گسترده هستند. این خاک‌ها در منطقه مدیترانه معمولاً بیش از ۶۰ درصد اراضی را اشغال می‌کنند. در آفریقای مرکزی و در غرب آفریقا، بیش‌تر خاک‌ها سنگریزه‌دار هستند (Poesen and Lavee, 1994). حضور دو بخش متفاوت از نظر کیفی یعنی بخش نرم و ذرات درشت‌تر از بخش نرم خاک در یک خاک سنگریزه‌دار باعث ایجاد ساختار ناهمگن در خاک می‌شود (Zheng et al., 2021). جهت بررسی رفتار این خاک‌های ناهمگن علاوه بر ارزیابی مشخصات هیدرولیکی و نفوذ آب در خاک، بررسی برخی ویژگی‌های فیزیکی از جمله جرم مخصوص ظاهری کل و بخش نرم خاک مورد نیاز است (Poesen and Lavee, 1994). جرم مخصوص ظاهری به عنوان یک ویژگی فیزیکی، متأثر از حضور سنگریزه بوده و بر روی نفوذ آب در خاک تأثیر می‌گذارد (Brakensiek and Rawls, 1994).

## پیشینه تحقیق

به دلیل مشکلات نمونه‌برداری از خاک‌های سنگریزه‌دار، مطالعات محدودی جهت تعیین خصوصیات مختلف این خاکها در جهان (Beckers et al., 2016) و به‌ویژه در کشور ایران صورت گرفته است. شعبانی و همکاران (۱۳۹۷) مشاهده کردند که سنگریزه‌ها اثر متفاوتی بر نفوذ آب در خاک دارند، به طوری که در خاک شنی، سنگریزه‌های درشت باعث کاهش و سنگریزه‌های ریز باعث افزایش نفوذپذیری خاک می‌شوند. نتایج پژوهش Yang et al., (2013) نشان داد که با افزایش مقدار سنگریزه تا ۴۰ درصد، نفوذ تجمعی آب در خاک کاهش یافته و پس از آن و تا مقدار ۵۰ درصد سنگریزه، نفوذ تجمعی افزایش می‌یابد. آنان بیان نمودند که با افزایش مقدار سنگریزه، دو عامل کاهش سطح مقطع جریان آب در خاک، به همراه افزایش منافذ درشت در حد فاصل ذرات خاک و سنگریزه باعث تغییرات نفوذ آب در خاک می‌شود، به طوری که ابتدا تأثیر عامل اول بیش‌تر بوده و با افزایش مقدار سنگریزه، تأثیر عامل دوم غالب می‌گردد. بررسی‌های Bennewitz and Alardo, (2017) نشان داد که با افزایش مقدار سنگریزه در سطح خاک، شدت نفوذ لحظه‌ای و شدت نفوذ نهایی در خاک افزایش می‌یابد. ایشان همچنین بیان کردند که تأثیر مقدار سنگریزه بر نفوذ آب در خاک، به عوامل دیگری

از جمله نوع بافت خاک نیز بستگی دارد. (Ilek et al., 2019) دریافتند که تاثیر اندازه سنگریزه بر نفوذ آب در خاک، به مقدار سنگریزه بستگی دارد. سنگریزه‌های ریز به قطر ۱۰ میلی‌متر در مقدار ۳۱ درصد، باعث کاهش مقاومت خاک نسبت به جریان آب و افزایش سرعت نفوذ آب در خاک شدند در حالی که سنگریزه‌های درشت ۱۸ تا ۲۰ میلی‌متری، نفوذ آب در خاک را کاهش دادند. (Li et al., 2020) تاثیر بافت خاک و مقدار سنگریزه را بر نفوذ آب در خاک‌های با مقادیر ۰ تا ۳۰ درصد سنگریزه بررسی نموده و نشان دادند که در خاک با بافت شنی، با افزایش مقدار سنگریزه تا ده درصد جرمی مقدار شدت نفوذ متوسط به جهت افزایش منافذ موثر در انتقال آب، افزایش یافته و برای مقادیر بیشتر سنگریزه، شدت نفوذ کاهش می‌یابد. در خاک‌های با بافت لوم و رسی یک روند معکوس مشاهده گردید، به طوری که با افزایش مقدار سنگریزه تا ده درصد، شدت نفوذ به دلیل افزایش منافذ غیرموثر کاهش و برای مقادیر بالاتر سنگریزه افزایش یافت. بر اساس یافته‌های (Wu et al., 2021) نفوذ تجمعی و شدت نفوذ نهایی، با افزایش مقدار سنگریزه، به دلیل کاهش تخلخل کلی خاک، کاهش می‌یابد. این پژوهش‌گران مشاهده کردند که مقدار ۳۰ درصد سنگریزه می‌تواند باعث ایجاد منافذ درشت و جریان ترجیحی و عامل افزایش شدت نفوذ در خاک لوم شنی باشد. برخلاف یافته‌های (Wu et al., 2021) Fachi et al., (2023) یک رابطه افزایشی میان مقدار جرمی سنگریزه و شدت نفوذ نهایی و نیز نفوذ تجمعی آب در خاک گزارش کردند و دریافتند که در منطقه با بیشترین مقدار سنگریزه، شدت نفوذ آب در خاک، ۱۶ برابر بیش‌تر از مناطق با سنگریزه کم بود. (Fachi et al., 2023) بیان کردند که در خاک با بیشترین مقدار سنگریزه به دلیل نبود ذرات ریز کافی، منافذ میان سنگریزه‌ها به طور کافی پر نشده و این موضوع باعث ایجاد جریان ترجیحی در خاک می‌شود، که در نهایت شدت نفوذ آب در خاک افزایش می‌یابد. همچنین ساختار اسکلتی ایجاد شده توسط سنگریزه از تحکیم خاک جلوگیری کرده و تخلخل خاک را حفظ می‌کند. (Zhao et al., 2020) با بررسی جریان ترجیحی در طول یک دامنه کوهستانی مشاهده کردند که مقدار سنگریزه در طول دامنه و در قسمت‌های بالای شیب، بیش‌تر از مناطق پایین دست بود. همچنین سهم جریان ترجیحی در نفوذ آب در خاک، در مناطق بالادست دامنه بیش‌تر از مناطق میانی و پایین دست بود. در این بررسی‌ها، نفوذ و جریان ترجیحی تحت تاثیر مقدار جرمی سنگریزه و جرم مخصوص ظاهری خاک بودند. همچنین مقدار جرمی سنگریزه به طور غیرمستقیم و با تغییر جرم مخصوص ظاهری، بر مقدار نفوذ و جریان ترجیحی آب در خاک تاثیر گذاشت.

جمع‌آوری اطلاعات در زمینه خصوصیات هیدرولیکی و نفوذ آب در خاک سنگریزه‌دار، جهت مدلسازی نفوذ و رواناب، بررسی حرکت آب و آلاینده‌ها در منطقه غیراشباع خاک، تامین آب مورد نیاز گیاه، حفاظت خاک و جلوگیری از فرسایش خاک بسیار حائز اهمیت است. با این وجود مطالعه در زمینه خصوصیات هیدرولیکی و نفوذ آب در خاک‌های سنگریزه‌دار در جهان و به‌ویژه در کشور ایران کمتر صورت گرفته است. اغلب محققین تاثیر مقدار سنگریزه بر نفوذ و خصوصیات هیدرولیکی را بدون در نظر گرفتن بافت خاک زمینه بررسی کرده و نتایج متفاوتی ارائه نموده‌اند. لذا با توجه به تناقض در نتایج پژوهشگران مختلف در زمینه تاثیر سنگریزه بر نفوذ آب در خاک، در نظر گرفتن خصوصیات بیش‌تری از سنگریزه و نوع کلاس بافتی خاک زمینه، می‌تواند اطلاعات بیش‌تری فراهم نماید. این مطالعه، با هدف تعیین اثر مقدار و اندازه سنگریزه بر مقدار نفوذ آب، در دو خاک با بافت لوم و لوم شنی در نمونه‌های همگن بزرگ آزمایشگاهی انجام شد تا بتوان تا حدی به ساز و کار تاثیر مقدار و اندازه سنگریزه بر ویژگی‌های هیدرولیکی پی برد.

## مواد و روش‌ها

### نمونه‌برداری و آنالیز نمونه‌های خاک

در این مطالعه دو نمونه خاک با بافت لوم و لوم شنی به عنوان خاک زمینه انتخاب و با مقادیر ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد جرمی سنگریزه مخلوط گردید. همچنین برای هر سری خاک لوم و لوم شنی یک تیمار خاک فاقد سنگریزه حاوی خاک زمینه به عنوان تیمار شاهد آماده گردید. خاک سنگریزه‌دار با بافت زمینه لوم شنی از ۲۵ کیلومتری شهرستان اشتهارد و از مجاورت روستای پلنگ‌آباد، در جنوب

غرب استان البرز با مختصات جغرافیایی ۵۰ درجه و ۳۸ دقیقه و ۴۴ ثانیه شرقی، و ۳۵ درجه و ۴۲ دقیقه و ۱۴ ثانیه، شمالی، و خاک با بافت لوم از مزرعه آموزشی دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران با مختصات جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه و ۵۷ ثانیه شرقی و ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه و ۳۷ ثانیه شمالی در استان البرز نمونه برداری گردید.

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی شامل قابلیت هدایت الکتریکی ( $EC_e$ ) و میزان اسیدیته (pH) عصاره اشباع خاک به ترتیب با استفاده از دستگاه‌های EC متر و pH متر، درصد ماده آلی خاک (OM) به روش اکسیداسیون تر (Walkley and Black, 1934)، نسبت جذب سدیم (SAR) با تعیین میزان کلسیم و منیزیم به روش کمپلکسومتری و غلظت سدیم با دستگاه فلیم فتومتر، و درصد ذرات اولیه خاک (PSD) به روش هیدرومتر و با قرائت کامل (Gee and Or, 2002) تعیین شد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده برای نمونه خاک‌های زمینه در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه خاک‌های لوم شنی و لومی

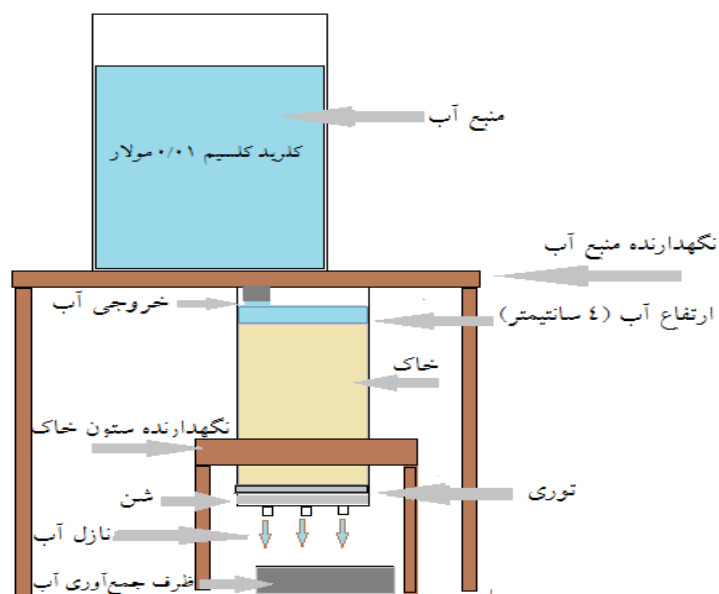
| بافت خاک   | هدایت الکتریکی<br>( $dS m^{-1}$ ) | ماده آلی<br>(%) | pH   | شن ( $2-0.053mm$ )<br>(%) | سیلت ( $0.053-0.002mm$ )<br>(%) | رس ( $<0.002mm$ )<br>(%) |
|------------|-----------------------------------|-----------------|------|---------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| لوم شنیلوم | ۰/۱۸۶                             | ۲/۰۴            | ۷/۹۳ | ۷۲/۱۴۴                    | ۱۸/۹۵۹                          | ۸/۸۹۶                    |
|            | ۱/۵۳۱                             | ۰/۸۹            | ۷/۶  | ۴۹/۸۶۰                    | ۱۵/۰۴۱                          | ۳۵/۰۹۷                   |

### طراحی سیستم ماریوت و آماده سازی تیمارها جهت اندازه‌گیری مقدار نفوذ آب در خاک

جهت تهیه تیمارهای خاک ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد سنگریزه با دو اندازه سنگریزه ریز (۴-۴/۷۵ میلی‌متر) و درشت (۱۵/۸-۷/۹ میلی‌متر)، مقادیر مشخصی از سنگریزه و خاک توزین، و پس از مخلوط کردن خاک و سنگریزه، درون استوانه‌های فلزی به ارتفاع ۵۰ و قطر ۲۱/۵ سانتی‌متر ریخته و متراکم گردید. قبل از پر کردن ستون‌ها، یک عدد فیلتر در انتهای ستون قرار داده شد و پس از آن مقداری شن در سه اندازه ۱، ۵/۵ و ۲۵/۰ میلی‌متر به ترتیب از پایین به بالا، به ارتفاع تقریبی ۴ سانتی‌متر ریخته شد. نهایتاً برای جلوگیری از بهم خوردگی سطح خاک در اثر تلاطم آب، سطح خاک با توری فلزی پوشانده شد. نمای کلی آزمایش نفوذ در شکل ۱ نشان داده شده است. قبل از انجام آزمایش‌های نفوذ، مقدار جرم مخصوص سنگریزه  $BD_{stone}$  به روش جایجایی حجم آب بر اساس قانون ارشمیدس اندازه‌گیری شد که مقدار آن ۲/۶۵ بدست آمد. همچنین مقدار رطوبت اولیه خاک به روش وزنی اندازه‌گیری شد. در این مطالعه، جرم مخصوص ظاهری کل خاک‌های سنگریزه‌دار  $BD_t$  در تیمار بدون سنگریزه، ۱/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب تثبیت شد و در سایر تیمارها بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده جرم و حجم خاک درون استوانه، محاسبه گردید. جرم مخصوص ظاهری بخش نرم خاک  $BD_{fe}$  نیز با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (Grossman and Reinsch, 2002):

$$BD_{fe} = \frac{M_t * (1 - R_m)}{V_t - \left(\frac{R_m * M_t}{BD_{stone}}\right)} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن،  $BD_{fe}$  مقدار جرم مخصوص ظاهری بخش نرم برای خاک سنگریزه‌دار ( $g cm^{-3}$ )،  $M_t$  مقدار جرمی خاک خشک سنگریزه‌دار، ( $g$ )،  $R_m$  مقدار جرمی سنگریزه ( $g g^{-1}$ )،  $BD_{stone}$  جرم مخصوص سنگریزه ( $2/65 g cm^{-3}$ )،  $V_t$  حجم کل خاک سنگریزه‌دار ( $cm^3$ ) است.



شکل ۱. نمای کلی از ستون خاک (به ارتفاع ۵۰ و قطر ۲۱ سانتیمتر) در آزمایش نفوذ آب در خاک با استفاده از سیستم ماریوت

اندازه‌گیری نفوذ آب در خاک مطابق شکل ۱، به روش بار ثابت و با استفاده از محلول ۰/۰۱ مولار کلرید کلسیم، با بار آبی ثابت حدوداً ۴ سانتی‌متر انجام شد. استفاده از محلول کلرید کلسیم این امکان را فراهم ساخت تا ساختار فیزیکی خاک حفظ شده و از بهم‌خوردگی ذرات خاک در حین انجام آزمایش نفوذ جلوگیری شود. در این مطالعه همچنین زمان خروج اولین قطره آب از زهکش، به عنوان شاخصی از زمان رسیدن جبهه رطوبتی به انتهای ستون خاک در نظر گرفته شد. زمان اندازه‌گیری برای تیمارهای خاک لوم شنی، ۱۰ تا ۱۸۰ دقیقه و برای خاک لوم، ۱۵۸ تا ۴۴۶ دقیقه به طول انجامید. خروج آب از تیمارهای فاقد سنگریزه لوم شنی و لوم به ترتیب در ۱۰ دقیقه و ۱۵۸ مشاهده گردید و این زمان‌ها به عنوان زمان اولیه، جهت مقایسه مقدار نفوذ تجمعی تیمارهای سنگریزه‌دار، نسبت به تیمار فاقد سنگریزه در نظر گرفته شد.

### محاسبات و تجزیه و تحلیل‌های آماری

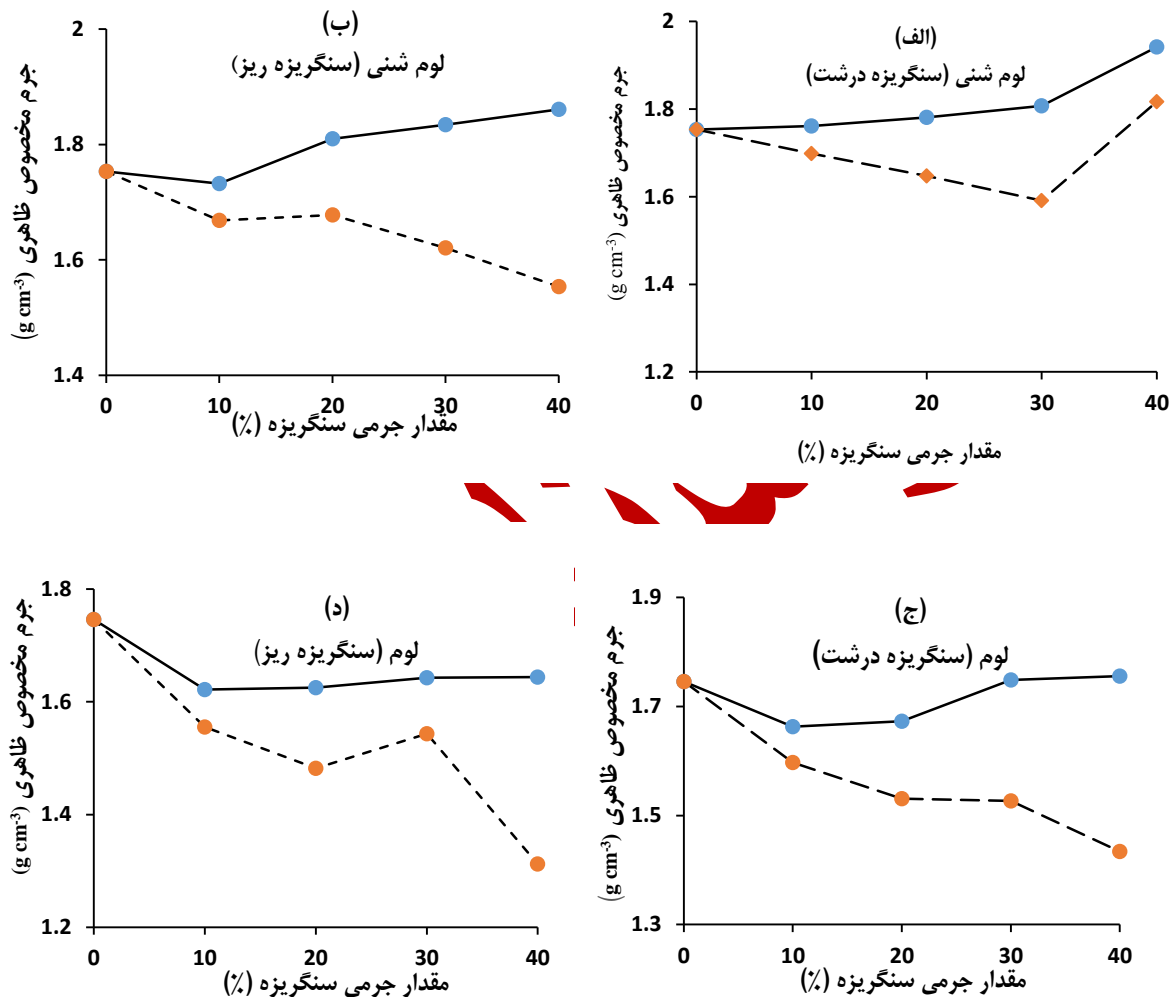
آزمون شاپیرو ویلک برای بررسی نرمال بودن داده‌ها استفاده شد. جهت تعیین همبستگی میان خصوصیات سنگریزه و متغیرهای مختلف در سطح معنی‌داری ۰/۰۵، و نیز رسم منحنی‌ها از نرم افزار Excel، نسخه ۲۰۱۳، استفاده گردید.

### نتایج

#### تأثیر سنگریزه بر مقادیر $BD_{fe}$ و $BD_t$

شکل ۲، الف و ب، نشان می‌دهد که در خاک لوم شنی با افزایش مقدار سنگریزه ریز و درشت،  $BD_t$  افزایش و  $BD_{fe}$  کاهش می‌یابد، البته در این میان، تأثیر ۴۰ درصد سنگریزه درشت بر  $BD_{fe}$ ، استثنا بوده و موجب افزایش مقدار آن شده است. در خاک لوم با سنگریزه ریز و درشت، تغییرات  $BD_{fe}$ ، با افزایش سنگریزه تا حدودی مشابه تغییرات آن در خاک لوم شنی با سنگریزه ریز است، هرچند تغییرات  $BD_t$ ، روند نامنظمی دارد و با افزایش سنگریزه تا حدود ۱۰ درصد تا حدودی کاهش و در مقادیر بیش‌تر سنگریزه، اندکی

افزایش یافته و یا تقریباً ثابت می‌ماند (شکل ۲، ج و د). به طور کلی، در هر دو خاک لوم و لوم شنی، حضور سنگریزه باعث کاهش  $BD_{fe}$  و افزایش  $BD_t$  شده است.



شکل ۲. تغییرات مقادیر  $BD_{fe}$  و  $BD_t$  به عنوان تابعی از مقدار و اندازه سنگریزه در دو خاک لوم شنی (الف و ب) و لوم (ج و د). خط پیوسته جرم مخصوص ظاهری کل خاک، خط بریده ریز، جرم مخصوص ظاهری بخش نرم خاک در تیمارهای با سنگریزه ریز و خط بریده درشت، جرم مخصوص ظاهری بخش نرم در تیمارهای با سنگریزه درشت.

همبستگی بین مقادیر  $BD_{fe}$  و  $BD_t$ ، با مقدار و اندازه سنگریزه در دو خاک با بافت لوم شنی و لوم، در جدول ۲ آمده است. ضرایب همبستگی قوی و معنی‌دار، نشان دهنده تاثیر معنی‌دار مقدار و اندازه سنگریزه بر  $BD_{fe}$  و  $BD_t$  است. برای بررسی دقیق‌تر، تغییرات این دو ویژگی فیزیکی به عنوان تابعی از مقدار و اندازه سنگریزه در دو بافت خاک لوم شنی و لوم در شکل ۲، الف تا د، نشان داده شده است.

جدول ۲. ضرایب همبستگی میان  $BD_t$ ،  $BD_{fe}$  و مقادیر (۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد) سنگریزه ریز و درشت در دو خاک لوم و لوم شنی

| بافت خاک زمینه | ویژگی اندازه گیری شده           | اندازه سنگریزه (mm) | ضریب همبستگی (r)    |
|----------------|---------------------------------|---------------------|---------------------|
| لوم            | $BD_t$ (g cm <sup>-3</sup> )    | ریز (۴-۴/۷۵)        | -۰/۵۶۳*             |
|                |                                 | درشت (۷/۹-۱۵/۸)     | ۰/۳۶۹ <sup>ns</sup> |
|                | $BD_{fe}$ (g cm <sup>-3</sup> ) | ریز (۴-۴/۷۵)        | -۰/۸۹۳*             |
|                |                                 | درشت (۷/۹-۱۵/۸)     | -۰/۹۴۸*             |
| لوم شنی        | $BD_t$ (g cm <sup>-3</sup> )    | ریز (۴-۴/۷۵)        | -۰/۹۲۸*             |
|                |                                 | درشت (۷/۹-۱۵/۸)     | -۰/۸۶۶*             |
|                | $BD_{fe}$ (g cm <sup>-3</sup> ) | ریز (۴-۴/۷۵)        | -۰/۹۶۶*             |
|                |                                 | درشت (۷/۹-۱۵/۸)     | ۰/۰۳۷ <sup>ns</sup> |

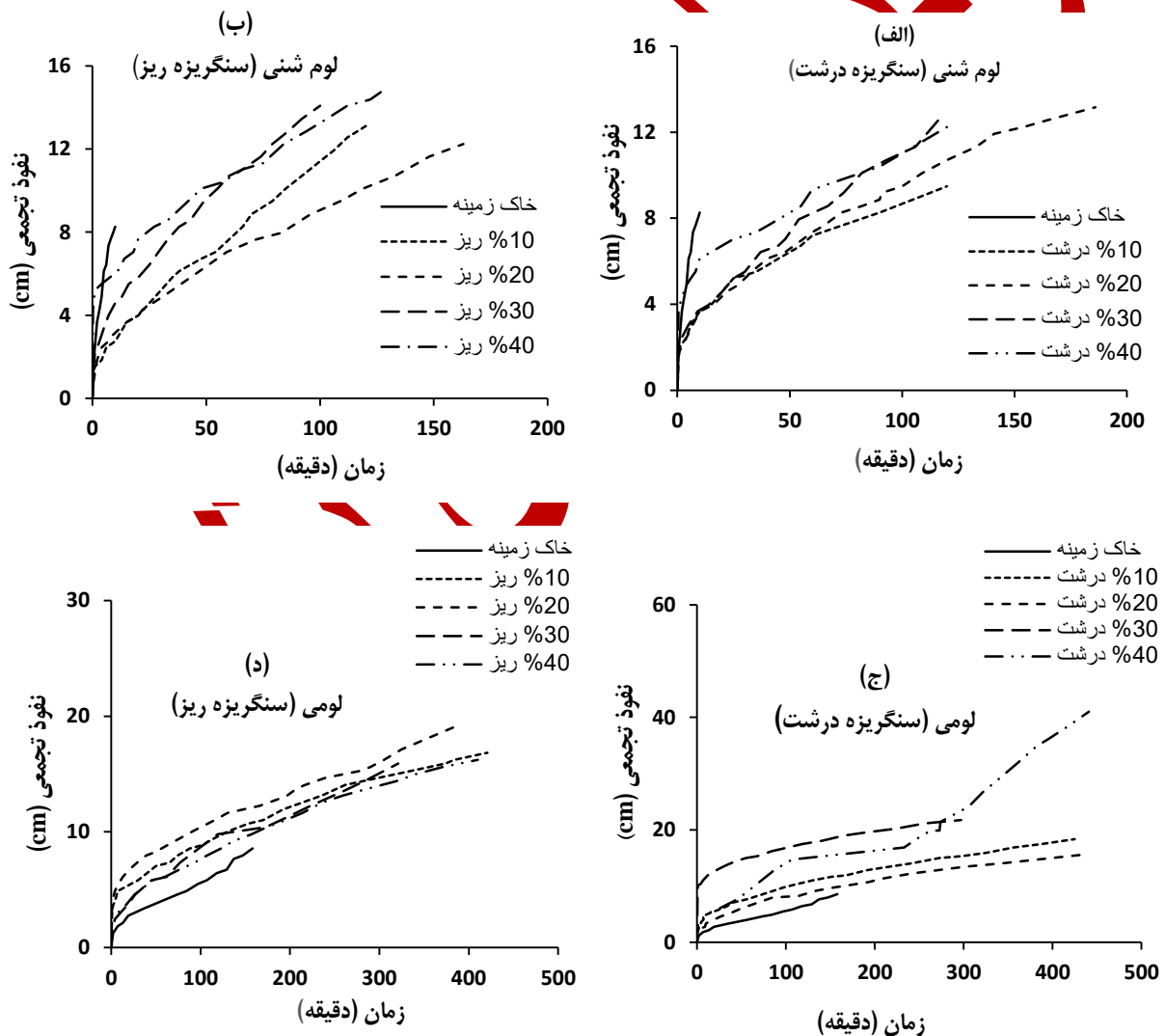
$BD_t$ ، جرم مخصوص ظاهری کل (گرم بر سانتیمتر مکعب)؛  $BD_{fe}$ ، جرم مخصوص ظاهری بخش نرم خاک (گرم بر سانتیمتر مکعب)؛ <sup>ns</sup>، غیر معنی داری؛ \* معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد می باشد.

### تأثیر سنگریزه بر نفوذ تجمعی آب و زمان ظهور آب در زهکش‌ها

منحنی نفوذ تجمعی آب اندازه‌گیری شده (I) در دو خاک لوم و لوم شنی حاوی درصد و اندازه‌های مختلف سنگریزه در شکل ۳ ترسیم شده است. بررسی کلی نشان می‌دهد که در خاک لوم شنی در زمان‌های کوتاه، نفوذپذیری خاک فاقد سنگریزه نسبت به خاک‌های حاوی مقادیر مختلف سنگریزه، بیش‌تر بود. افزایش سنگریزه ریز و درشت، نفوذ آب به خاک را در زمان‌های اولیه کاهش داد، حضور ۱۰ درصد سنگریزه ریز، بیش‌ترین تأثیر را بر کاهش نفوذپذیری خاک داشت (جدول ۳) ولی در مقادیر بیش‌تر از ۱۰ درصد، تأثیر سنگریزه بر کاهش نفوذپذیری کمتر بود (شکل ۳ الف و ب). همچنین بررسی مقادیر نفوذ تجمعی در جدول ۳ نشان می‌دهد که در سری نمونه‌های لوم شنی، مقدار نفوذ تجمعی در ۱۰ دقیقه،  $I_{10}$ ، در تیمارهای ۱۰ تا ۳۰ درصد سنگریزه درشت، به طور یکسان ۵۵ درصد، و در تیمار ۴۰ درصد سنگریزه درشت، ۲۹ درصد کمتر از مقدار نفوذ تجمعی در تیمار فاقد سنگریزه بود. در سری نمونه‌های لوم شنی با سنگریزه ریز، مقدار  $I_{10}$ ، در تیمارهای ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد به ترتیب ۶۶، ۶۲، ۴۴ و ۲۵ درصد نسبت به تیمار فاقد سنگریزه کاهش یافت (جدول ۳). نقش سنگریزه درشت در کاهش  $I_{10}$ ، نسبت به تیمار فاقد سنگریزه، در بالاترین درصد سنگریزه (۴۰ درصد)، تا حدودی بیش‌تر بود. در حالی که سنگریزه‌های ریز در درصدهای پایین (۱۰ و ۲۰ درصد)، باعث کاهش بیش‌تر  $I_{10}$  شدند (جدول ۳). در زمان پایان اندازه‌گیری نفوذ تجمعی که هم‌زمان با ظهور آب در زهکش تیمارهای سنگریزه‌دار لوم شنی بود، حضور سنگریزه درشت در تیمارهای ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد، به ترتیب باعث افزایش ۱۴، ۵۹، ۵۱ و ۴۸ درصدی، و حضور سنگریزه ریز موجب افزایش ۵۹، ۴۸، ۷۰ و ۸۱ درصدی مقدار I نسبت به تیمار فاقد سنگریزه شد. به بیان دیگر، در خاک لوم شنی در پایان آزمایش هر دو سنگریزه ریز و درشت باعث افزایش مقدار I نسبت به خاک فاقد سنگریزه شدند و این افزایش به استثنای نمونه با ۲۰ درصد سنگریزه، در تمام مقادیر سنگریزه ریز، بیش‌تر از نمونه‌های دارای سنگریزه درشت بود. همچنین مقدار متوسط I، در تیمارهای لوم شنی با سنگریزه ریز و درشت به ترتیب ۱۳/۶ و ۱۱/۸ سانتیمتر بود، که نفوذ بیش‌تر آب در تیمارهای دارای سنگریزه ریز را نشان می‌دهد (جدول ۳).

جدول ۳ همچنین نشان می‌دهد که در خاک لوم، ظهور آب در زهکش تیمار فاقد سنگریزه، در زمان ۱۵۸ دقیقه رخ داد. در این خاک، در تیمارهای ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد سنگریزه درشت، مقدار  $I_{158}$  به ترتیب ۳۵، ۱۴، ۱۲۱ و ۹۶ درصد، و در تیمارهای ۱۰، ۲۰، ۳۰

و ۴۰ درصد سنگریزه ریز،  $I_{158}$  به ترتیب ۲۵، ۴۲، ۲۱ و ۱۴ درصد نسبت به تیمار فاقد سنگریزه افزایش یافت. به این ترتیب، در خاک لوم، در دقیقه ۱۵۸، سنگریزه درشت نسبت به سنگریزه ریز تاثیر بیش تری در افزایش  $I_{158}$  نشان داد. در انتهای آزمایش نفوذ که همزمان با ظهور آب در زهکش تیمارهای سنگریزه دار بود، نیز مقدار I در خاک سنگریزه دار نسبت به خاک فاقد سنگریزه بیش تر بود. به طوری که نفوذ آب در خاک لوم در تیمارهای ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد سنگریزه درشت و ریز، به ترتیب ۱۱۴، ۸۲، ۱۵۳ و ۳۷۸ درصد، و ۹۶، ۱۲۵، ۸۵ و ۸۹ درصد بیش تر از تیمار فاقد سنگریزه بود. از سویی، در این خاک، مقدار متوسط آب نفوذ یافته در تیمارهای دارای سنگریزه درشت، ۲۴/۱ و در تیمارهای دارای سنگریزه ریز، ۱۷/۰۵ سانتی متر بود که نشان داد در این خاک، بر خلاف خاک لوم شنی، نفوذ آب در تیمارهای دارای سنگریزه درشت، (به استثنای نمونه با ۲۰ درصد سنگریزه) نسبت به تیمارهای دارای سنگریزه ریز بیش تر بوده است. این مقادیر همچنین نشان داد که مقدار نفوذ در تیمارهای سنگریزه دار ریز و درشت لوم، به ترتیب ۲۵ و ۱۰۴ درصد بیش تر از تیمارهای سنگریزه دار ریز و درشت لوم شنی بوده است (جدول ۳).



شکل ۳. تغییرات مقدار I به عنوان تابعی از زمان در خاک لوم شنی (الف و ب) و لوم (ج و د)



جدول ۳. مقادیر زمان ظهور آب در زهکش‌ها (T) و نفوذ تجمعی (I) در خاک‌های لوم شنی و لوم

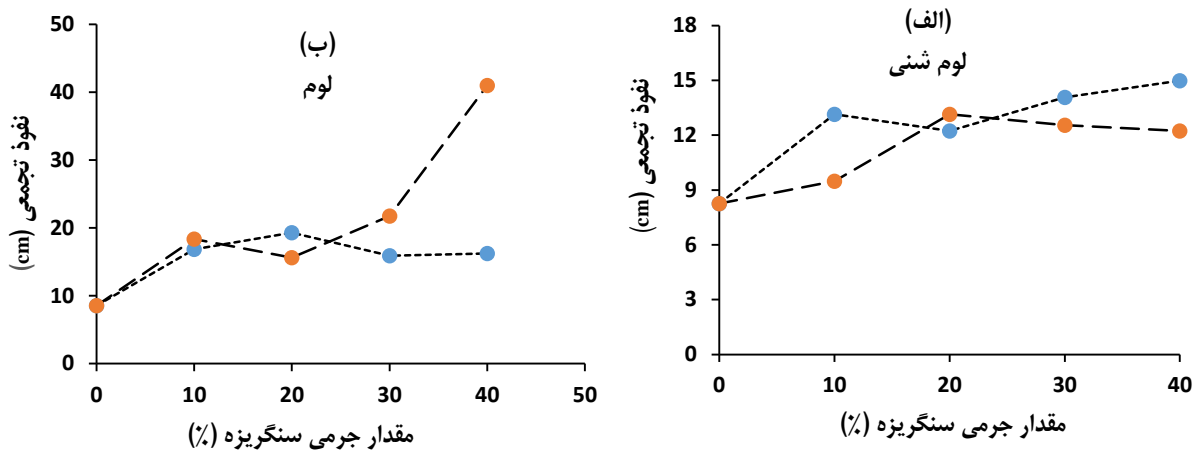
| مقدار جرمی سنگریزه (%) |        |        |        |       |    | اندازه سنگریزه (mm) | ویژگی‌ها                         | بافت خاک |
|------------------------|--------|--------|--------|-------|----|---------------------|----------------------------------|----------|
| ۴۰                     | ۳۰     | ۲۰     | ۱۰     | ۰     | ۰  |                     |                                  |          |
| ۱۴/۹۹۰                 | ۱۴/۰۷۳ | ۱۲/۲۳۷ | ۱۳/۱۵۵ | ۸/۲۶۰ | ۰  | ریز (۴-۴/۷۵)        | لوم شنی                          |          |
| ۱۲/۲۳۷                 | ۱۲/۵۴۳ | ۱۳/۱۵۵ | ۹/۴۸۴  | ۸/۲۶۰ | ۱  | درشت (۷/۹-۱۵/۸)     | نفوذ تجمعی I                     |          |
| ۱۶/۲۱۴                 | ۱۵/۹۰۸ | ۱۹/۲۷۳ | ۱۶/۸۲۶ | ۸/۵۶۶ | ۰  | ریز (۴-۴/۷۵)        | لوم                              |          |
| ۴۰/۹۹۵                 | ۲۱/۷۲۱ | ۱۵/۶۰۲ | ۱۸/۳۵۶ | ۸/۵۶۶ | ۰  | درشت (۷/۹-۱۵/۸)     | لوم                              |          |
| ۶/۱۱۸                  | ۴/۵۸۹  | ۳/۰۵۹  | ۲/۷۵۳  | ۸/۲۶۰ | ۱۰ | ریز (۴-۴/۷۵)        | لوم شنی                          |          |
| ۵/۸۱۲                  | ۳/۶۷۱  | ۳/۶۷۱  | ۳/۶۷۱  | ۸/۲۶۰ | ۱۰ | درشت (۷/۹-۱۵/۸)     | نفوذ تجمعی I <sub>10</sub>       |          |
| ۹/۷۸۹                  | ۱۰/۴۰۱ | ۱۲/۲۳۷ | ۱۰/۷۰۷ | ۸/۵۶۶ | ۰  | ریز (۴-۴/۷۵)        | لوم                              |          |
| ۱۶/۸۲۶                 | ۱۸/۹۶۸ | ۹/۷۸۹  | ۱۱/۶۲۵ | ۸/۵۶۶ | ۰  | درشت (۷/۹-۱۵/۸)     | نفوذ تجمعی I <sub>158</sub> (cm) |          |
| ۱۳۰                    | ۱۰۰    | ۱۶۳    | ۱۲۱    | ۱۰    | ۰  | ریز (۴-۴/۷۵)        | لوم شنی                          |          |
| ۱۸۰                    | ۱۱۶    | ۱۸۶    | ۱۲۰    | ۱۰    | ۰  | درشت (۷/۹-۱۵/۸)     | زمان ظهور آب                     |          |
| ۴۱۰                    | ۳۲۱    | ۳۹۰    | ۴۲۱    | ۱۵۸   | ۰  | ریز (۴-۴/۷۵)        | در زهکش‌ها T                     |          |
| ۴۴۱                    | ۲۹۷    | ۴۳۵    | ۴۲۵    | ۱۵۸   | ۰  | درشت (۷/۹-۱۵/۸)     | درشت (min)                       |          |

I<sub>10</sub>، نفوذ تجمعی آب در دقیقه ۱۰ آزمایش (سانتیمتر)؛ I<sub>158</sub>، نفوذ تجمعی آب در دقیقه ۱۵۸ آزمایش (سانتیمتر)

بر اساس جدول ۳، مقایسه تاثیر سنگریزه بر مقدار I در دو بافت خاک مختلف نشان داد که در خاک لوم، در مقادیر بالای سنگریزه (۲۰ تا ۴۰ درصد)، سنگریزه درشت، باعث افزایش و در خاک لوم شنی باعث کاهش مقدار I، شده است. به طوری که مقدار I در خاک لوم با ۴۰ درصد سنگریزه درشت، نسبت به خاک لوم شنی با ۴۰ درصد سنگریزه درشت، ۷۰ درصد بیش‌تر بود و به طور عکس، در خاک لوم شنی سنگریزه ریز در مقادیر بالای سنگریزه (۲۰ تا ۴۰ درصد) باعث افزایش و در خاک لوم باعث کاهش مقدار I شد. (جدول ۳). مقایسه منحنی تغییرات I بر اساس اندازه سنگریزه و نیز مقادیر جدول ۳، نشان می‌دهد که با افزایش اندازه سنگریزه مقدار I، در خاک لوم شنی، کاهش و در خاک لوم، افزایش یافته است (شکل ۴، الف و ب). مقدار I، در خاک لوم شنی، در تیمارهای ۱۰، ۳۰ و ۴۰ درصد سنگریزه درشت، به ترتیب ۲۷/۹، ۱۰/۸ و ۱۸/۳ درصد نسبت به تیمارهای دارای سنگریزه ریز، کاهش یافته در حالی که در خاک لوم، مقدار I، در تیمارهای ۱۰، ۳۰ و ۴۰ درصد سنگریزه درشت، به ترتیب ۹، ۳۶/۵ و ۱۵۲/۳ درصد بیشتر از تیمارهای دارای سنگریزه ریز می‌باشد (جدول ۳). با این حال در هر دو خاک، تاثیر افزایش اندازه سنگریزه بر مقدار I در ۲۰ درصد سنگریزه استثنا است، به طوری که در این مقدار سنگریزه، افزایش اندازه سنگریزه در خاک لوم شنی، باعث افزایش ۷/۵ درصدی و در خاک لوم، باعث کاهش ۱۹/۰۴ درصدی مقدار I شده است (جدول ۳).

مقادیر جدول ۳ نشان می‌دهد که حضور سنگریزه علاوه بر تاثیر بر مقدار I، در هر دو خاک لوم شنی و لوم، باعث افزایش T تیمارهای سنگریزه‌دار نسبت به تیمار فاقد سنگریزه شد (جدول ۳). در هر دو بافت خاک لوم شنی و لوم، تاثیر مقدار و اندازه سنگریزه بر T معنی‌دار بود. مقایسه T تیمارهای خاک لوم شنی و لوم نشان داد که ظهور آب در زهکش تیمارهای خاک لوم شنی در مقایسه با خاک لوم سریعتر اتفاق افتاده است. همچنین در هر دو خاک، زمان ظهور آب در زهکش تیمارهای دارای سنگریزه درشت نسبت به تیمارهای دارای سنگریزه ریز طولانی‌تر بوده که نشان می‌دهد پیشروی جبهه رطوبتی در این تیمارها با سرعت کمتری صورت گرفته است. مقایسه مقادیر T همچنین نشان داد که اختلاف زمان ظهور آب در زهکش تیمارهای سنگریزه‌دار و فاقد سنگریزه خاک لوم شنی، بیشتر از خاک لوم بوده است. به طور مثال، در خاک لوم شنی، طولانی‌ترین زمان T، در زهکش تیمارهای با ۲۰ درصد سنگریزه ریز و درشت بود. در این تیمارها، زمان T به ترتیب ۱۶/۳ و ۱۸/۶ برابر نسبت به تیمار فاقد سنگریزه افزایش یافت. در تیمارهای

سنگریزه‌دار بافت لوم نیز طولانی‌ترین زمان T، مربوط به نمونه‌های داری ۱۰ درصد سنگریزه ریز و ۴۰ درصد سنگریزه درشت بود که در آن‌ها T، به ترتیب ۲/۶ و ۲/۷ برابر زمان ظهور آب در تیمار فاقد سنگریزه لوم بود (جدول ۳).

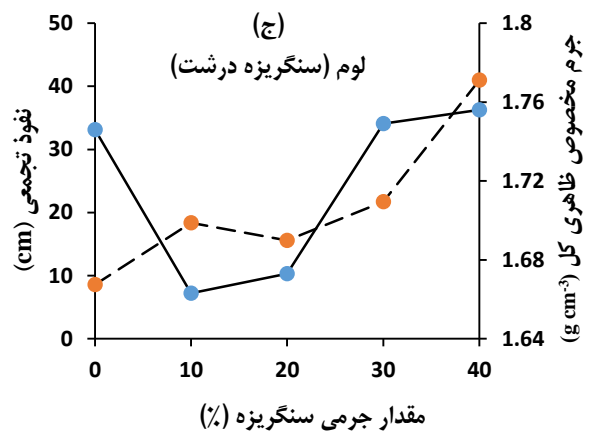
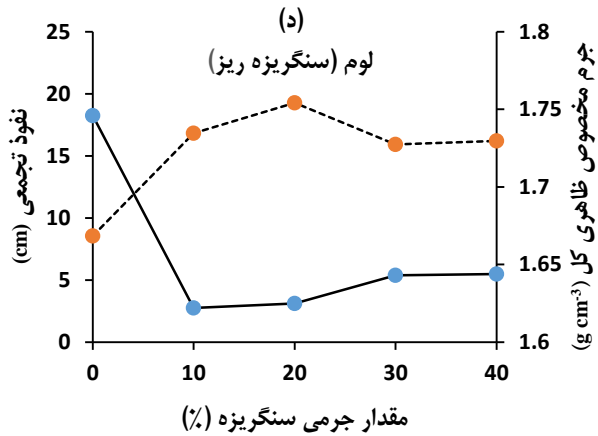
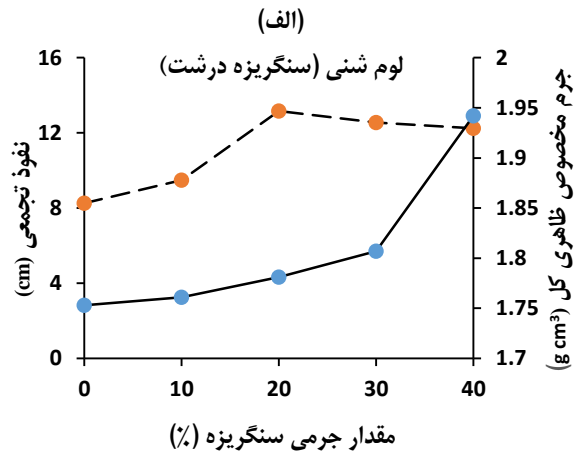
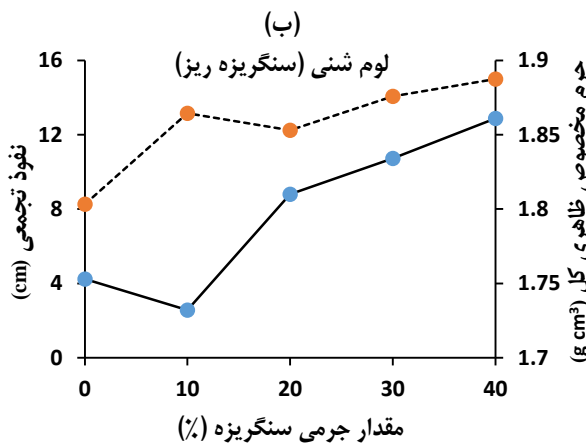


شکل ۴. تغییرات مقدار I به عنوان تابعی از مقدار و اندازه سنگریزه در خاک لوم شنی (الف) و لوم (ب). خط بریده ریز، نفوذ تجمعی تیمارهای با سنگریزه ریز؛ خط بریده درشت، نفوذ تجمعی تیمارهای با سنگریزه درشت.

#### رابطه بین مقدار نفوذ تجمعی I، و $BD_t$ ، $BD_{fe}$

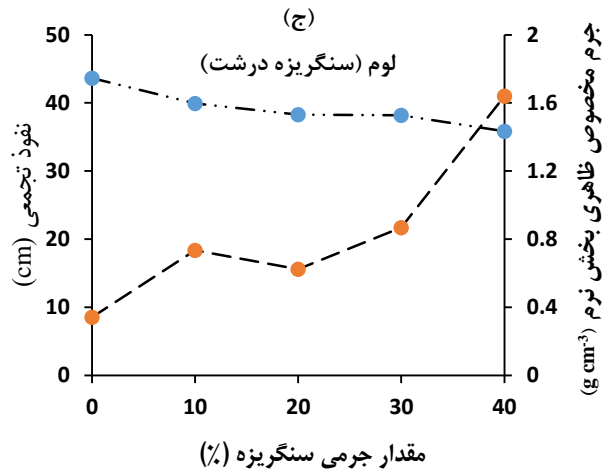
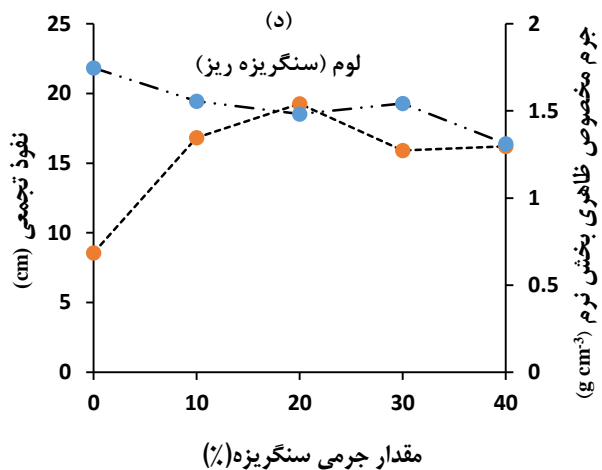
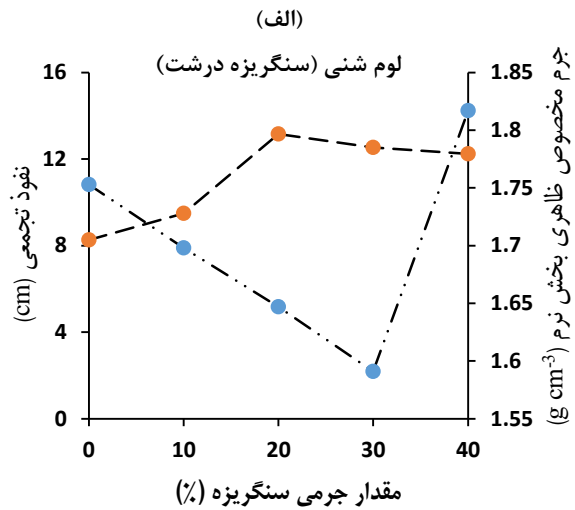
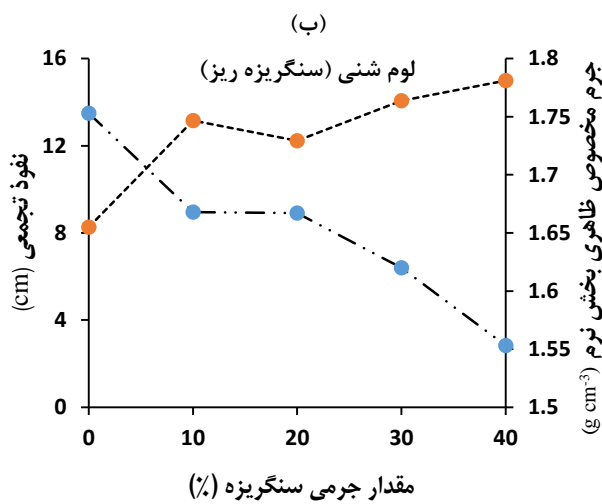
در هر دو خاک لوم شنی و لوم، همبستگی معنی‌دار بین I، و  $BD_t$  و  $BD_{fe}$  برقرار بود ( $P < 0.05$ ). در نمونه‌های لوم شنی در دامنه ۰ تا ۲۰ درصد سنگریزه درشت و ۲۰ تا ۴۰ درصد سنگریزه ریز، افزایش در مقدار  $BD_t$  و I مشاهده گردید (شکل ۵ الف تا د). در حالیکه در همین خاک و در مقادیر ۲۰ تا ۴۰ درصد سنگریزه درشت و ۰ تا ۲۰ درصد سنگریزه ریز، ارتباط معکوس میان I، و  $BD_t$  برقرار بود.

منحنی‌های تغییرات مقدار I بر اساس مقدار و اندازه سنگریزه نشان می‌دهد که در خاک لوم شنی، سنگریزه درشت در مقادیر پایین سنگریزه (۰ تا ۲۰ درصد)، و سنگریزه ریز در تمام مقادیر سنگریزه (به استثنای ۲۰ درصد سنگریزه) باعث افزایش مقدار I، شده است. (شکل ۵، الف و ب). همچنین در خاک لوم، در مقادیر ۰ تا ۲۰ درصد سنگریزه درشت و ۰ تا ۱۰، ۱۰ تا ۲۰، ۲۰ تا ۳۰ درصد سنگریزه ریز، ارتباط معکوس میان I و  $BD_t$  وجود دارد (شکل ۵، ج و د).



شکل ۵. منحنی تغییرات I و  $BD_{Fe}$  به عنوان تابعی از مقدار و اندازه سنگریزه در نمونه‌های لوم شنی (الف و ب) و لوم (ج و د). خط ممتد، جرم مخصوص ظاهری کل تیمارهای با سنگریزه ریز و درشت؛ خط پریده ریز، نفوذ تجمعی در تیمارهای با سنگریزه درشت.

در شکل ۶، الف تا د، تغییرات مقدار I و  $BD_{Fe}$ ، به عنوان تابعی از مقدار و اندازه سنگریزه ارائه شده است. در خاک لوم شنی، به ازای تمام مقادیر سنگریزه، رابطه معکوس میان I و  $BD_{Fe}$  مشاهده می‌گردد (شکل ۶ الف و ب). به طور مثال، در این خاک در مقدار ۰ تا ۳۰ درصد سنگریزه درشت،  $BD_{Fe}$  و مقدار I افزایش یافته است (شکل ۶ الف). در خاک لوم نیز در تمام مقادیر سنگریزه ریز و درشت، به استثنای نمونه با ۲۰ درصد سنگریزه درشت، ارتباط معکوس میان I و  $BD_{Fe}$  مشاهده می‌گردد (شکل ۶ ج و د).



شکل ۶. منحنی تغییرات مقدار I و BD<sub>Fe</sub> به عنوان تابعی از مقدار و اندازه سنگریزه در نمونه‌های لوم شنی (الف و ب) و لوم (ج و د). خط بریده نقطه‌چین، جرم مخصوص ظاهری بخش نرم خاک تیمارهای با سنگریزه ریز و درشت؛ خط بریده ریز، خط بریده درشت، نفوذ تجمعی تیمارهای با سنگریزه درشت

ساز و کار تاثیر مقدار و اندازه سنگریزه بر مقدار  $BD_{fe}$  و  $BD_t$ 

جدول ۲، نشان می‌دهد که حضور سنگریزه ضمن تاثیر بر مقادیر  $BD_{fe}$  و  $BD_t$ ، سطح مقطع مسیر جریان و نیز اعوجاج خطوط جریان را تحت تاثیر قرار داده و با افزایش مقدار سنگریزه،  $BD_t$  به طور معنی‌دار افزایش یافت، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که این افزایش در  $BD_t$ ، با افزایش مقدار سنگریزه به جهت جایگزینی خاک نرم با سنگریزه و بالا بودن جرم مخصوص ظاهری سنگریزه ایجاد شده است. (Poesen and Lavee., (1994؛ Naseri et al., (2019؛ Zhao et al., (2020 و بسیاری دیگر از پژوهشگران این افزایش در  $BD_t$  با افزایش مقدار سنگریزه را گزارش کرده‌اند. با این حال، (Zheng et al., (2023 در بررسی درجای خصوصیات هیدرولیکی خاک سنگریزه‌دار دریافتند که افزایش مقدار سنگریزه، موجب تشکیل منافذ درشت در خاک شده و با افزایش رشد سیستم ریشه، باعث کاهش  $BD_t$  خاک گردیده است. همچنین بر اساس مقادیر جدول ۲، با افزایش مقدار سنگریزه،  $BD_{fe}$  کاهش یافت. یکی از دلایل ویژه برای این کاهش این است که با افزایش مقدار سنگریزه به تدریج سنگریزه‌ها به یکدیگر نزدیک و با ایجاد یک ساختار اسکلتی، ذرات نرم خاک را از تراکم بیشتر حفظ کرده و به این ترتیب باعث کاهش  $BD_{fe}$  می‌شوند. (Nasri et al., 2015). کاهش در  $BD_{fe}$  با افزایش مقدار سنگریزه، در مطالعات متعددی به ویژه در کارهای صحرائی توسط برخی محققین گزارش شده است (Sauer and Logsdon., 2002؛ Fies et al., 2002). در جریان بررسی تاثیر سنگریزه در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی نیز برخی دیگر از محققین، پس از آماده‌سازی ستون‌های خاک با مقادیر مختلف سنگریزه، مشابه با نتایج این مطالعه، مقادیر کمتر  $BD_{fe}$ ، نسبت به  $BD_t$  را گزارش نموده‌اند (Naseri et al., 2019؛ Dann et al., 2009).

بررسی روند تغییرات مقدار  $I$ ،  $BD_t$  و  $BD_{fe}$  در دو بافت مختلف خاک

در این مطالعه مقدار  $I$  در هر دو خاک لوم شنی و لوم، در تیمارهای سنگریزه‌دار نسبت به تیمار فاقد سنگریزه افزایش یافت (جدول ۳)، که مغایر با یافته‌های (Yang et al., 2013) بود. همچنین در روند تغییرات مقدار  $I$  با افزایش مقدار سنگریزه نوساناتی مشاهده گردید (شکل ۴). این موضوع نشان داد که در برخی مقادیر سنگریزه، احتمالاً نقش غالب عواملی همچون محدود شدن مسیر جریان آب در اثر حضور سنگریزه و کاهش سطح مقطع جریان آب، تاثیر سنگریزه بر افزایش مقدار  $I$  را کاهش داده است.

مقدار متوسط نفوذ آب در خاک لوم شنی در تیمارهای دارای سنگریزه ریز، بیش‌تر از تیمارهای دارای سنگریزه درشت بود که با نتایج به‌دست آمده توسط (Ilek et al., 2019) مطابقت داشت. (Hou et al., 2023) گزارش کردند که در خاک‌های کارستی با توزیع بیشتر سنگریزه درشت نسبت به سنگریزه ریز، کانال‌های جریان ترجیحی و نفوذ آب در خاک بیشتر بود. (Brakensiek and Rawls, 1994) بیان کردند که سنگریزه با اندازه درشت باعث افزایش مقدار نفوذ آب در خاک می‌شود. از طرفی ذرات درشت‌تر ممکن است با حفظ تخلخل خاک (Nasri et al., 2015)، و یا با ایجاد منافذ درشت و عدم پر شدن این منافذ با ذرات ریز خاک (Fies et al., 2002) باعث افزایش نفوذ تجمعی آب در خاک شوند.

در تیمارهای خاک لوم شنی با سنگریزه درشت و لوم شنی با سنگریزه ریز، به ترتیب در مقادیر ۲۰ تا ۴۰ درصد، مقدار  $I$  و  $BD_t$  هر دو افزایش یافت (شکل ۵ الف و ب) که با یافته‌های (Zhang et al., 2011) و (Zhao et al., 2020) مطابقت دارد. دلیل افزایش هم‌سوی  $I$  و  $BD_t$  احتمالاً به جهت شکل‌گیری منافذ غیرمومین در حد فاصل سنگریزه و ذرات خاک در حین آماده‌سازی نمونه‌های سنگریزه‌دار بود. با توجه به اینکه جهت آماده‌سازی نمونه‌های دست‌خورده، مخلوط خاک و سنگریزه در سه مرحله متوالی به خاک اضافه شده و متراکم گردید، تماس سنگریزه با ذرات خاک به طور کامل صورت نگرفته و با شکل‌گیری منافذ درشت، نفوذ آب

در خاک افزایش یافت. Zhang et al., (2011) نتایج مشابهی گزارش کردند. در بررسی‌های ایشان با افزایش مقدار سنگریزه تا ۲۰ درصد جرمی،  $BD_t$  و مقدار I افزایش یافت. Zhang et al., (2011) بیان کردند که با افزایش  $BD_t$  و ایجاد تراکم بیشتر در خاک انتظار می‌رود که نفوذ آب در خاک محدود شود در حالیکه به جهت افزایش تخلخل و منافذ غیرموئین در اثر حضور سنگریزه، مقدار I افزایش یافت. همچنین در مطالعه حاضر و در خاک‌های عنوان شده، به‌طور کلی میان مقدار  $BD_{Fe}$  و مقدار I ارتباط معکوس مشاهده گردید (جدول ۶ الف تا د) که مطابق با یافته‌های Fachi et al., (2023) بود. Ma and Shao., (2008) نیز افزایش مقدار I با کاهش  $BD_{Fe}$  را گزارش نمودند. ایشان بهبود ساختار منافذ بخش نرم خاک، با افزایش مقدار سنگریزه را دلیلی برای توضیح این وضعیت دانستند. این نتایج نه تنها تأییدپذیری ساختار منافذ خاک از سنگریزه را نشان داد، بلکه بر اساس روند تغییرات مقدار I، تقابل دو عامل موثر بر مقدار نفوذ، یعنی منافذ درشت و کاهش سطح مقطع جریان مشاهده گردید به طوری که در خاک لوم شنی با سنگریزه درشت و لوم با سنگریزه ریز، با افزایش تأثیر عامل دوم یعنی کاهش سطح نفوذ آب، تأثیر منافذ درشت در افزایش مقدار I کاهش یافت.

مشاهده شد که در هر دو خاک لوم شنی و لوم، مقدار سنگریزه ۲۰ درصد به عنوان حد آستانه تأثیر سنگریزه بر مقدار I بوده و روند کلی تغییرات I در این مقدار سنگریزه تغییر کرد، به‌طور مثال در خاک لوم شنی با سنگریزه ریز و لوم با سنگریزه درشت مقدار I، با افزایش مقدار سنگریزه روند افزایشی نشان داد در حالیکه در مقدار ۲۰ درصد سنگریزه، مقدار I در هر دو خاک کاهش یافت. که نشان می‌دهد افزایش مقدار سنگریزه همیشه باعث افزایش مقدار I نمی‌گردد چرا که در برخی مقادیر، نقش سنگریزه در کاهش فضای نفوذ آب می‌تواند بیش از اثر آن بر بهبود ساختار منافذ و افزایش نفوذپذیری خاک باشد. Zhou et al., (2009) در نمونه‌های سنگریزه‌دار لوم رس سیلتی، مقدار سنگریزه ۴۰ درصد را به عنوان حد آستانه تأثیر سنگریزه بر مقدار I پیشنهاد نمودند. ایشان بیان کردند که افزایش مقدار سنگریزه تا ۴۰ درصد، باعث کاهش سطح مقطع عبور جریان شده و در مقادیر بالاتر سنگریزه، با افزایش شکل‌گیری منافذ درشت، مقدار I افزایش یافته است. در بررسی‌های Yang et al., (2013) مقدار نفوذ تا ۵۰ درصد سنگریزه کاهش و در مقادیر بالاتر سنگریزه افزایش یافت. در بررسی‌های Wu et al., (2021) در نمونه‌های سنگریزه‌دار با بافت زمینه لوم شنی، با وجود اینکه روند کلی تغییرات مقدار I با مقدار سنگریزه کاهشی بود در مقدار سنگریزه ۳۰ درصد، مقدار I افزایش یافت. این تفاوت در مقادیر آستانه گزارش شده توسط پژوهشگران مختلف را می‌توان به جهت تفاوت در روش‌های اندازه‌گیری نفوذ و خصوصیات هیدرولیکی، استفاده از سنگریزه‌های با مشخصات مختلف و تفاوت در بافت خاک‌های مورد بررسی بیان کرد.

در مطالعه حاضر بررسی تغییرات در مقدار I همچنین نشان داد که اثر اندازه سنگریزه بر مقدار I متأثر از مقدار سنگریزه است. به عنوان مثال در خاک لوم شنی در مقادیر سنگریزه ۲۰ تا ۴۰ درصد، سنگریزه ریز باعث افزایش و سنگریزه درشت باعث کاهش مقدار نفوذ آب در خاک شد. در حالیکه در خاک لوم، در مقادیر ۲۰ تا ۴۰ درصد، سنگریزه درشت باعث افزایش و سنگریزه ریز باعث کاهش مقدار I شد. با وجود این نوسانات در روند تغییرات مقدار I، تیمارهای سنگریزه‌دار نسبت به تیمارهای فاقد سنگریزه، مقدار I بیشتری داشتند که احتمالاً حضور سنگریزه با افزایش تخلخل خاک باعث افزایش مقدار I شده است. (Sauer and Logsdon., 2002). همچنین مقایسه مقادیر I در دو بافت خاک مختلف دو نتیجه‌گیری مهم را آشکار ساخت، اول اینکه در تمامی مقادیر سنگریزه ریز و درشت، در خاک لوم نسبت به خاک لوم شنی مقدار آب بیشتری نفوذ کرد. هرچند که سنگریزه در هر دو خاک با تأثیر بر مقادیر  $BD_t$  و  $BD_{Fe}$  و تغییر ساختار منافذ خاک، باعث افزایش مقدار I شد، با این حال مقادیر بیشتر I در خاک لوم را می‌توان بر اساس بافت ریزتر و توزیع اندازه منافذ گسترده‌تر این خاک نسبت به خاک لوم شنی توجیه کرد. خاک لوم با مقدار رس بیشتر نسبت به خاک لوم شنی بافت متراکم‌تری داشته و ذرات خاک دارای آرایش منسجم‌تری می‌باشند. همچنین در خاک لوم، تخلخل کل بیشتر است که این باعث افزایش نسبت منافذ موثر (منافذ با قطر ۳-۵/۰ میکرون) و افزایش ظرفیت نفوذ آب در این خاک نسبت به خاک لوم شنی می‌شود. (Li et al., 2020) نکته دوم در ارتباط با مقایسه تغییرات مقدار I در دو بافت خاک لوم شنی و لوم، در ارتباط با مشابهت رفتار سنگریزه ریز در یک خاک با رفتار سنگریزه درشت در خاک دیگر بود. به‌طور مثال سنگریزه ریز در خاک لوم شنی و سنگریزه درشت در خاک

لوم، با یک روند مشابه، باعث افزایش مقدار I شدند. احتمالاً سنگریزه ریز با افزایش نسبت منافذ ریز در خاک درشت بافت (لوم شنی) و سنگریزه درشت با افزایش نسبت منافذ درشت در خاک با بافت ریزتر (لوم) باعث افزایش تخلخل خاک شده و نفوذ آب در خاک را افزایش دادند.

## نتیجه گیری

این مطالعه جهت بررسی ساز و کار اثر مقدار و اندازه سنگریزه بر مقدار نفوذ آب، در دو بافت خاک لوم و لوم شنی، در نمونه‌های همگن بزرگ آزمایشگاهی انجام شد. نتایج نشان داد که مقدار نفوذ تجمعی آب در هر دو بافت خاک تحت تاثیر مقدار و اندازه سنگریزه قرار می‌گیرد. با افزایش مقدار سنگریزه، تغییرات مقادیر  $BD_t$  و  $BD_{fe}$ ، با تاثیر بر تخلخل خاک، مهمترین عامل در تعیین مقدار نفوذ آب در هر دو خاک لوم شنی و لوم بود. اگرچه افزایش در تخلخل خاک باعث افزایش مقدار نفوذ آب در هر دو خاک شد. بررسی زمان ظهور آب در زهکش‌های خاک لوم شنی و لوم بر اساس مقدار و اندازه سنگریزه چند نکته مهم را در ارتباط با حرکت آب در خاک لوم شنی و لوم آشکار ساخت، که به ترتیب زیر ارائه می‌گردد:

۱. سرعت پیشروی جبهه رطوبتی در خاک لوم شنی سریعتر از خاک لوم بود، این موضوع علاوه بر اثر سنگریزه در افزایش تخلخل خاک، بر اساس بافت خاک زمینه نیز توجیه‌پذیر است چرا که در مقایسه با خاک لوم، خاک لوم شنی دارای منافذ درشت‌تر بوده حجم منافذ نگهدارنده آب، تراکم و تخلخل خاک در آن کمتر است.

۲. اختلاف زمان خروج آب از تیمارهای سنگریزه‌دار و فاقد سنگریزه لوم شنی در مقایسه با خاک لوم، بیشتر بود که احتمالاً حضور سنگریزه در خاک لوم شنی تاثیر بیشتری بر افزایش اعوجاج کانال‌های حرکت آب داشته و باعث تأخیر در خروج آب از نمونه‌های سنگریزه‌دار گردید.

۳. با وجود کاهش مقدار  $BD_{fe}$ ، با افزایش مقدار سنگریزه، افزایش اعوجاج مسیر جریان آب باعث شد تا طول مسیر جریان آب بیشتر گردد که این باعث کاهش سرعت پیشروی جبهه رطوبتی با افزایش مقدار سنگریزه در هر دو خاک لوم شنی و لوم شد.

۴. زمان ظهور آب در زهکش تیمارهای دارای سنگریزه ریز کمتر بود. احتمالاً سنگریزه درشت به جهت اندازه بزرگتر، باعث کاهش سطح نفوذ و افزایش اعوجاج مسیر جریان آب در هر دو خاک شده و باعث تأخیر در پیشروی جبهه رطوبتی گردید.

بر اساس نتایج کلی میتوان گفت که حرکت و نفوذ آب در خاک سنگریزه‌دار یک فرآیند پیچیده و متأثر از مشخصات خاک و سنگریزه است. با این حال گاهی وجود روابط متقابل میان مشخصه‌های مختلف سنگریزه و نوع بافت خاک زمینه می‌تواند نتایج بررسی خصوصیات مختلف خاک سنگریزه‌دار را تحت تاثیر قرار دهد. بنابراین در مطالعات بعدی، در نظر گرفتن روابط برهمکنشی میان این خصوصیات می‌تواند نتایج مطلوب‌تری ارائه دهد. همچنین یافته‌های این مطالعه مربوط به نمونه‌های با ساختمان خاک دست‌خورده بود درحالی‌که بررسی خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی در نمونه‌های سنگریزه‌دار دست‌نخورده با حفظ ساختمان طبیعی خاک می‌تواند نتایج ارزشمند و نزدیک به آنچه که در طبیعت رخ می‌دهد، ارائه دهد.



- شعبانی، علی، جهانبازی، ایوب، احمدی، حمید، مقیمی، محمد مهدی، بهرامی، مهدی. (۱۳۹۷). بررسی نفوذپذیری خاک‌های سنگریزه‌ای در زیر و بین درختان پرتقال و زیتون. *نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)*. ۲۲ (۱)، ۱۷۵-۱۸۵.
- Beckers, E., Pichault, M., Pansak, W., Degré, A., Garré, S. (2016). Characterization of stony soils' hydraulic conductivity using laboratory and numerical experiments. *Soil Discussions*, 2(3), 421-431.
- Bennewitz, E., & Aladro, J. (2017). The effects of rainfall intensity and rock fragment cover on soil hydrological responses in Central Chile. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(3), 781-793.
- Brakensiek, D. L., & Rawls, W. J. (1994). Soil containing rock fragments: effects on infiltration. *Catena*, 23, 99-110.
- Dann, R., Close, M., Flintoft, M., Hector, R., Barlow, H., Thomas, S., Francis, G. (2009). Characterization and estimation of hydraulic properties in an alluvial gravel vadose zone. *Vadose Zone Journal*, 8(3), 651-663.
- Fachí, S. M., Gubiani, P. I., Pedron, F. A., Rauber, L. A. (2023). Rock-soil skeleton increases water infiltration. *Revista Brasileira de Ciencia de Solo*, 47:e 0230029.
- Fiès, J. C., Louvigny, N. D. E., Chanzy, A. (2002). The role of stones in soil water retention. *European Journal of Soil Science*, 53(1), 95-104.
- Gee, G.W. & Or, D. (2002) Particle Size Analysis. In: Dane, J.H. and Topp, G.C., (Eds), *Methods of Soil Analysis*, Part 4, Physical Methods, Soil Science Society of America, Book Series No. 5, Madison, 255-293.
- Grossman, R.B., & Reinsch, T.G. (2002) Bulk Density and Linear Extensibility: Core Method. In: Dane, J.H. and Topp, G.C., (Eds), *Methods of Soil Analysis*. Part 4, Physical Methods, SSSA, Incorporated, Madison, 208-228.
- Hou, F., Cheng, J., Guan, N. (2023). Influence of rock fragments on preferential flow in stony soils of karst graben basin, southwest China. *Catena*, 220, 106684.
- Ilek, A., Kucza, J., & Witek, W. (2019). Using undisturbed soil samples to study how rock fragments and soil macropores affect the hydraulic conductivity of forest stony soils: Some methodological aspects. *Journal of Hydrology*, 570, 132-140.
- Li, J., Wang, W., Guo, M., Kang, H., Wang Zh., Huang, J., Sun, B., Wang, K., Zhang G., Bai, Y. (2020). Effects of soil texture and gravel content on the infiltration and soil loss of spoil heaps under simulated rainfall. *Journal of Soils and Sediments*, 20, 3896-3908.
- Ma, D.H., & Shao, M.A. (2008). Simulating infiltration into stony soils with a dual-porosity model. *European Journal of Soil Science*, 59, 950-959.
- Naseri, M., Iden, S. C., Richter, N., & Durner, W. (2019). Influence of stone content on soil hydraulic properties: Experimental investigation and test of existing model concepts. *Vadose Zone Journal*, 18(1), 1-10.
- Nasri, B., Fouche, O., Torri, D. (2015). Coupling published pedotransfer functions for the estimation of bulk density and saturated hydraulic conductivity in stony soils. *Catena*, 131, 99-108.
- Novák, V., Kňava, K., & Šimůnek, J. (2011). Determining the influence of stones on hydraulic conductivity saturated soils using numerical method. *Geoderma*, 161, 177-181.
- Poesen, J., & Lavee, H. (1994). Rock fragments in top soils: significance and processes. *Catena*, 23, 1-28.



Robertson, B. B., Almond, P. C., Carrick, S. T., Penny, V., Eger, A., Chau, H. W., & Smith, C. M. (2021). The influence of rock fragments on field capacity water content in stony soils from hard sandstone alluvium. *Geoderma*, 389, 114912.

Sauer, T. J., & Logsdon, S. D. (2002). Hydraulic and physical properties of stony soils in a small watershed. *Soil Science Society of America Journal*, 66(6), 1947-1956.

Shabani, A., Jahanbazi, A., Ahmadi, A., Moghimi, M. M., Bahrami, M. (2017). Assessing the Infiltrability of Gravelly Soils Under and Between the Orange and Olive Trees in Fasa City. *Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)*, 22(1), 175-185. (In Persian).

Torri, D., Poesen, J., Monaci, F. and Busoni, E., 1994. Rock fragment content and fine soil bulk density. In: J. Poesen and H. Lavee (Eds), *Rock Fragments in Soil: Surface Dynamics. Catena*, 23: 65-71.

Walkley, A. & Black, I.A. (1934) An Examination of the Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method. *Soil Science*, 37, 29-38.

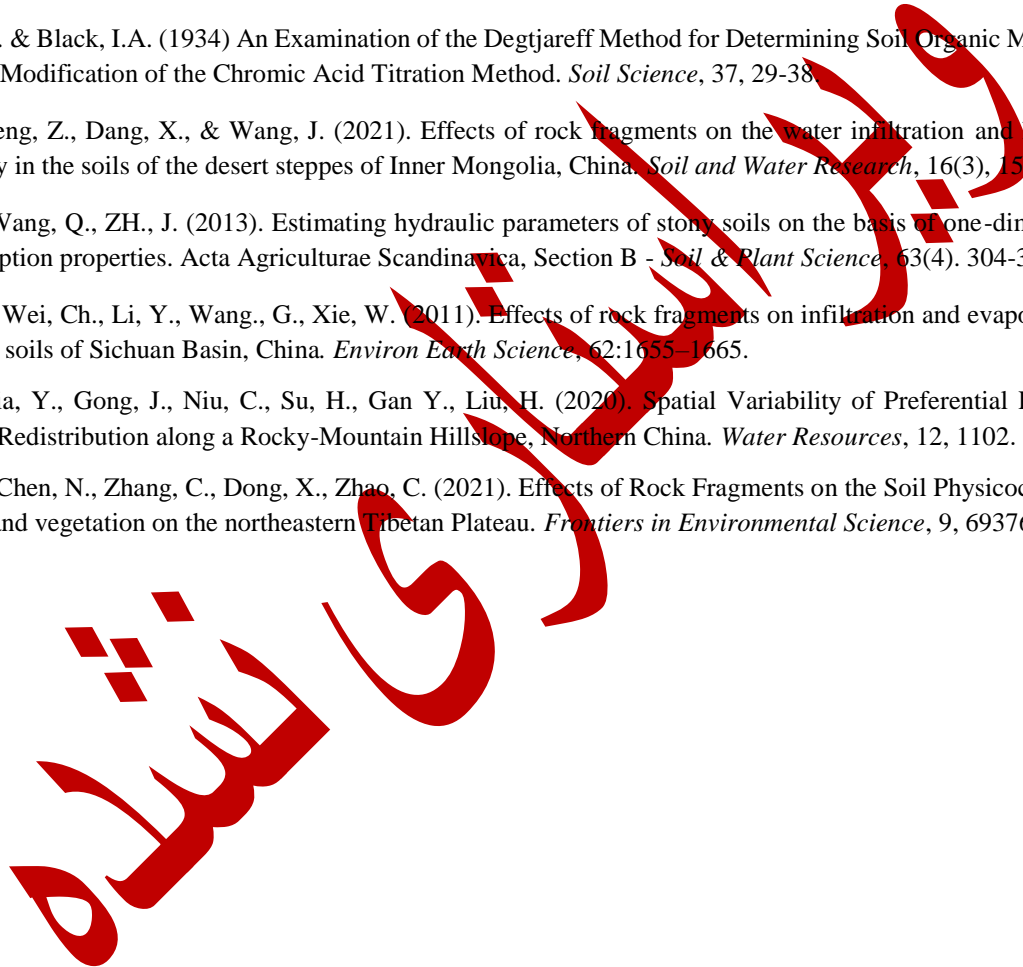
Wu, X., Meng, Z., Dang, X., & Wang, J. (2021). Effects of rock fragments on the water infiltration and hydraulic conductivity in the soils of the desert steppes of Inner Mongolia, China. *Soil and Water Research*, 16(3), 151-163.

Yang, Y., Wang, Q., ZH., J. (2013). Estimating hydraulic parameters of stony soils on the basis of one-dimensional water absorption properties. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science*, 63(4). 304-313.

Zhang, W., Wei, Ch., Li, Y., Wang., G., Xie, W. (2011). Effects of rock fragments on infiltration and evaporation in hilly purple soils of Sichuan Basin, China. *Environ Earth Science*, 62:1655-1665.

Zhao, S., Jia, Y., Gong, J., Niu, C., Su, H., Gan Y., Liu, H. (2020). Spatial Variability of Preferential Flow and Infiltration Redistribution along a Rocky-Mountain Hillslope, Northern China. *Water Resources*, 12, 1102.

Zheng, Y., Chen, N., Zhang, C., Dong, X., Zhao, C. (2021). Effects of Rock Fragments on the Soil Physicochemical Properties and vegetation on the northeastern Tibetan Plateau. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 693769.



## EXTENDED ABSTRACT

### 1. Background and purpose:

Soil water infiltration is one of the main hydrological properties which is controlled by different physical and chemical factors, including soil texture and coarse inclusions. This study was done to investigate the effect of gravel size and content on the cumulative infiltration, in loam and sandy loam soils.

### 2. Materials and methods:

The laboratory measurements were done on large repacked soil samples. Sandy loam and loam soils were combined well with fine gravel (4-4.75 mm) and coarse gravel (7.9- 15.8 mm) separately, to obtain four different weight contents (10, 20, 30, and 40 %) and no gravel treatment (0%) as a control (CK). All soil samples compacted into 50 cm high cylinders with an inner diameter of 21.5 cm. The compaction process was done in three stages. The desired total soil bulk density was fixed 1.7 (g cm<sup>-3</sup>). The flow experiments of both series of the soil samples were done by Marriott device and a constant 4 cm water head was maintained on soil surface. The experiments continued until the water infiltration reached a steady state.

### 3. Results:

The gravel decreased the fine earth bulk density and increased the total bulk density of both loam and sandy loam soils, ( $P < 0.05$ ). The average amount of water infiltration in sandy loam treatments combined with fine and coarse gravel was 13.6 and 11.8 cm, respectively. In loamy soils, the average amount of water infiltration was 24.1 cm and 17 cm respectively. In both soil series, the gravel increased the time of water outflow from stony treatments, compared to the (CK). The longest time of water outflow was reported for sandy loam treatments combined with 20 % of fine and coarse gravel. Regarding these treatments the time needed for water outflow respectively increased up to 16.3 and 18.6 fold compared to the (CK). In loam stony treatments, the longest time of water outflow was recorded for the samples combined with 10 % of fine and 40 % of coarse gravel.

### 4. Conclusion

The results of this study indicated that the gravel affects the cumulative infiltration, by changing the total and fine earth bulk densities., fine and coarse gravel respectively had the highest effect on the increase of the cumulative infiltration in both sandy loam and loam soil samples, anyway some fluctuations were observed in trend of changes under 20 % of In sandy loam and loam soil samples in both sandy loam and loam soil samples, and revealed that gravel does not always increase the cumulative infiltration. The reduction of the cumulative infiltration, under some gravel contents, indicates the negative effect of gravel on the water flow, by reducing the water cross section. The results also showed that the time needed for water outflow from stony sandy loam treatments was higher than the stony loam treatments indicating that gravel had more effect on increasing the curvature of water flow paths in sandy loam soils compared to loam soils.

**Keywords:** Bulk density, Macro pore, Preferential flow, Porosity

#### Author Contributions:

Conceptualization, Sedayee Azar.Z.; methodology, writing—original draft preparation, Sedayee Azar.Z.; software, Excel (2016) and Spss (26).; validation, Mohammadi.M. H.; Asadi.H.; resources, writing—review and editing, Sedayee Azar.Z; Mohammadi.M. H.; Asadi.H.; All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

#### Data Availability:

Data will be made available from the authors on reasonable request

#### Acknowledgements:

We would like to thank all reviewers whose valuable and constructive comments have helped to improve the manuscript