



Original Article

Investigating the Effects of Muddy Water on Soil Hydraulic Characteristics Across Different Soil Textures

Alireza Vaezi, Mahdiyeh Asghari

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

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

Received: 2025/12/07

Accepted: 2026/07/08

Revised: 2026/07/07

Published online: 2026/07/08

* Corresponding Author's Email: vaezi.alireza@gmail.com

ARTICLE INFO

Keywords:

Muddy water,
Particle size distribution,
Initial infiltration rate,
Final infiltration rate,
Hydraulic characteristics.

ABSTRACT

Introduction

Infiltration rate is the rate at which water enters the soil. It affects the water supply required for plants and the recharge of groundwater. This soil hydraulic properties can be influenced by soil physicochemical characteristics such as particle size distribution, organic matter, soil structure, and porosity, as well as by management practices (e.g., grazing, traffic, tillage). In addition, the water infiltration rate into the soil can be affected by water characteristics such as hydraulic head and muddy water concentration. Deposition of suspended load within soil pores blocks the pathways for water movement. In various studies conducted in the flood spreading areas, researchers have found that soil hydraulic characteristics change remarkably after flood spreading. Although there is a substantial body of information on the effects of flood spreading on soil infiltration rate, little information is available regarding the effects of muddy water concentration on the water infiltration process. Therefore, this study was conducted to determine the effects of different concentrations of muddy water on soil hydraulic characteristics across different soil textures.

Materials and Methods

A field study was designed in three areas with different soil textures (sandy loam, silt loam, and clay loam) using six concentrations of muddy water consist of zero (clear water), 10, 100, 1000, 10000 and 100000 mg L⁻¹. Water infiltration rate was measured using small rings with a diameter of 32 cm at eighteen points in each area (six treatments with three replications) with 2-m intervals. In total, fifty-four field experiments were carried out using a ring infiltrometer across the three areas. Initial and final infiltration rates were calculated for each muddy water concentration based on the water head loss (cm) per unit of time during the infiltration process (hours). Soil samples were taken from the soil surface (0-30 cm depth) and various physicochemical properties including particle size distribution, bulk density, organic matter content, and structure stability were determined in the laboratory. The analysis of variance was performed to determine the independent effects of two factors (soil type and muddy water concentration) and their interactions on

How to cite: Nourani, B., Kamalinezhad, S., Salmasi, F., Ansari, M., Roumianfar, S. *Estimating the Uplift Pressure under Hydraulic Structures with Dual end Cutoff Walls with Finite Element, Regression and Intelligent Approaches*. Journal of Hydraulics and Water Science, 35 (4):45-43. <https://doi.org/10.22034/hws.2025.67753.1036>

How to cite:



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



initial and final infiltration rates using Tukey's test. The statistical significant level was set at greater than 95% ($p < 0.05$).

Results and Discussion

Based on the results, the highest initial and final infiltration rate of the soils occurred at zero muddy water concentration (clear water). The highest initial and final infiltration rates were observed in sandy loam (81.6 cm h⁻¹ and 8.2 cm h⁻¹, respectively), while the lowest values were recorded in clay loam (69.6 cm h⁻¹ and 4.1 cm h⁻¹, respectively). A large difference was observed among soils in final infiltration rate (35%) compared to initial infiltration rate (11%). The higher infiltration rate of sandy loam under muddy water concentration is associated with its higher macrospore percentage and hydraulic conductivity. Initial infiltration rate under muddy water concentration was significantly affected by soil texture ($p < 0.001$), muddy water concentration ($p < 0.001$), and their interaction ($p < 0.01$). The initial infiltration rate decreased considerably with increasing muddy water concentration in all soils. The lowest effect of muddy water concentration was observed in sandy loam, while the highest effect was found in clay loam. The decreasing trend in initial infiltration rate with increasing muddy water concentration was not uniform across the soils. This result indicates a significant interaction between soil type and muddy water concentration regarding the initial infiltration rate. A large decline in initial infiltration rate (20%) in sandy loam occurred at 1000 mg L⁻¹ muddy water concentration, whereas the loss of initial infiltration rate in clay loam occurred at 100 mg L⁻¹ (55%). Additionally, significant differences were found in final infiltration rate for soil texture ($p < 0.001$) and muddy water concentration ($p < 0.01$). However, no significant interaction between the two factors for final infiltration rate. A large decline in final infiltration rate for sandy loam and clay loam occurred at 10000 mg L⁻¹ muddy water concentration (27%) and 100 mg L⁻¹ (26%), respectively.

Conclusion

The results indicated that soil hydraulic characteristics (initial and final infiltration rate) are significantly affected by both soil texture and muddy water concentration. Soil type is an important factor determining the effect of muddy water concentration on initial infiltration rate, while the effect on final infiltration rate in all soils is relatively similar across all soils. This study revealed that the effect of muddy water concentration on the reduction of initial infiltration rate is greater than that on the final infiltration rate. The initial infiltration rate in fine textured soils (e.g., clay loam) is more susceptible to muddy water concentration compared to coarse textured soils (e.g., sandy loam). This research showed that the flood spreading for groundwater recharge in fine-textured soils is limited and is only feasible at very lower muddy water concentration.



بررسی اثرات گل آلودگی آب بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در بافت‌های مختلف خاک

علی‌رضا واعظی*، مهدیه عسگری

۱- استاد بخش مهندسی حفاظت آ و خاک- گروه علوم خاک- دانشگاه زنجان

۲- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد - گروه علوم خاک- دانشگاه زنجان

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۱۶

تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۱۲/۰۱

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۵/۰۴/۱۶

* نویسنده مسئول: vaezi.alireza@gmail.com

چکیده

ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در زمین‌های کشاورزی و عرصه‌های پخش سیلاب می‌تواند تحت تأثیر درجه گل‌آلودگی آب قرار گیرد. اگرچه اطلاعات در زمینه شدت نفوذ آب به خاک موجود است اما اطلاعاتی در زمینه نقش گل‌آلودگی آب بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک وجود ندارد. از این‌رو، این مطالعه به‌صورت مزرعه‌ای با هدف تعیین تغییرات شدت نفوذ آب تحت تأثیر گل‌آلودگی آب در خاک‌های مختلف انجام گرفت. برای این منظور، آزمایش در سه زمین با بافت خاک مختلف (سیلتی لوم، لوم رسی و لومی شنی) در شش غلظت گل‌آلودگی آب (غلظت‌های صفر، ۱۰، ۱۰۰، ۱۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. شدت نفوذ آب به خاک در ۵۴ واحد آزمایشی در بازه‌های زمانی مختلف با استفاده از استوانه دوگانه اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج، شدت نفوذ اولیه و نهایی آب در خاک‌ها تحت تأثیر معنی‌دار درجه گل‌آلودگی آب ($p < 0.01$) قرار گرفت. با این‌حال، اثرات گل‌آلودگی آب بر افت شدت نفوذ نهایی آب در خاک‌ها کمتر از تأثیر آن بر افت شدت نفوذ اولیه آب بود. اثرات گل‌آلودگی آب بر شدت نفوذ اولیه در خاک‌های مختلف بسیار متفاوت بود و بیشترین افت شدت نفوذ اولیه آب در خاک لوم رسی رخ داد. در این خاک، حتی در غلظت‌های بسیار پایین گل‌آلودگی آب (۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر)، افت شدیدی در شدت نفوذ اولیه آب (۵۵ درصد) وجود داشت. در مقابل، در خاک شنی، این کاهش در غلظت بالاتر ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به تنها ۲۱ درصد رسید.

کلمات کلیدی: آب گل‌آلود، توزیع اندازه ذرات، سرعت نفوذ اولیه، سرعت نفوذ نهایی، ویژگی‌های هیدرولیکی

۱- مقدمه

نفوذ آب به خاک عبارت از فرآیند ورود عمودی آب از سطح به درون خاک است (Hillel, 2003). این ویژگی خاک مهمترین نقش را در چرخه آب در طبیعت به‌ویژه از نظر فراهمی آب برای گیاهان (Zhang et al., 2024) به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک ایفا می‌کند (Alizadeh, 2015). مطالعات نشان داده است که نفوذ یک متغیر ثابت در مقیاس زمانی و مکانی نیست؛ چرا که نفوذپذیری وابسته به ویژگی‌های فیزیکی خاک است و این ویژگی‌ها، بین خاک‌ها تفاوت دارد و طی زمان دستخوش تغییر می‌شود (Chowdary et al., 2006; Corradini et al., 2011). تولید رواناب و وقوع سیلاب در حوزه‌های آبخیز تحت تأثیر عوامل گوناگون به ویژه نفوذپذیری خاک است. مدیریت سیلاب برای کاهش آثار زیانبار اجتماعی و اقتصادی آن ضروری است (Komasi & Kolivand, 2026). آگاهی از نفوذپذیری خاک برای انجام یک طراحی کارآمد و پرتیر در سیستم‌های آبیاری و اجرای طرح‌های پخش سیلاب برای حفاظت آب و خاک ضروری است. پخش سیلاب از جمله اقدامات حفظ منابع آب و خاک و مهار خطرات سیلاب است که به نفوذپذیری عرصه‌های پخش وابسته است (Javadi et al., 2014).

شدت نفوذ آب به خاک به نوبه خود تحت تأثیر درجه گل‌آلودگی آب قرار دارد. گل‌آلودگی آب با تغییر ویژگی‌های خاک می‌تواند موجب افت نفوذپذیری خاک شود. با نفوذ آب گل‌آلود به خاک، شرایط هیدرولیکی خاک به ویژه از نظر نفوذ دچار اختلال می‌شود. با ورود آب آبیاری گل‌آلود به زمین‌های کشاورزی یا پخش سیلاب روی دشت‌ها، ذرات معلق در منافذ خاک نفوذ یافته و آن‌ها را می‌بندند به طوری که نفوذپذیری خاک در مراحل بعدی کاهش می‌یابد. مشاهدات صحرایی نشان می‌دهد که سیلاب سطحی به دلیل وجود بار معلق منجر به پر شدن خلل و فرج خاک با ذرات ریز رس یا مواد آلی شده که سبب کاهش نفوذ آب در حین فرآیند نفوذ می‌شود. شدت افت نفوذ آب به درجه گل‌آلودگی آب و نوع خاک می‌تواند بستگی داشته باشد (Jinxin et al., 2004).

پژوهش‌ها در مورد نقش گل‌آلودگی آب در تغییرات زمانی نفوذ آب به خاک بسیار محدود است. با این حال پژوهش‌های متعددی در مورد تغییرات ویژگی‌های خاک پس از مصرف آب گل‌آلود انجام گرفته است. چنین پژوهش‌هایی عمدتاً مربوط به تغییراتی است که در ویژگی‌های خاک در اثر پخش سیلاب انجام گرفته است. در مطالعات زیادی کاهش نفوذپذیری خاک در اثر پخش سیلاب در عرصه‌های پخش گزارش شده است (Mahdian et al., 2011; Mann et al., 2013; Zhang et al., 2024).

(Zehtabiyan & Rahimzadeh, 2010) به بررسی تغییرات نفوذپذیری خاک در عرصه پخش سیلاب دشت موسیان در جنوب استان ایلام پرداختند و نتیجه گرفتند که درصد سیلت و رس در

عرصه پخش سیلاب به شدت افزایش یافته، موجب کاهش نفوذپذیری خاک شده است. (Ghazavi et al., 2010) اثرات پخش سیلاب را بر نفوذپذیری خاک در مناطق خشک بررسی کردند. نتایج نشان داد در ۲۰ سانتی‌متر بالای خاک، مقدار رس پس از گسترش سیل افزایش یافت و منجر به کاهش نفوذپذیری خاک شد. (Shamsolmaali et al., 2011) در مطالعه‌ای که به منظور ارزیابی اثر پخش سیلاب بر تغییرات نفوذپذیری خاک سطحی در حوزه آبخیز چن‌داب ورامین انجام دادند، بیان کردند که رسوبات ریزدانه (سیلت و رس) در بخش سطحی خاک تجمع یافته، نفوذپذیری خاک را از ۳۵ تا ۵۰ درصد کاهش می‌دهد. (Farzaneh & Gazanchian, 2011) اثر رسوب نهشته شده بر تغییرات نفوذپذیری خاک تحت تأثیر عملیات پخش سیلاب را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین عمق و سطح خاک از نظر نفوذپذیری وجود دارد.

(Zaremehrjerdi et al, 2013) تأثیر پخش سیلاب بر نفوذپذیری خاک در ایستگاه پخش سیلاب سرچاهان استان هرمزگان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بین نفوذپذیری نوارهای پخش با هم اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. یافته‌های (Javadi et al., 2014) در مورد تأثیر پخش سیلاب بر ویژگی‌های فیزیکی خاک در عرصه پخش سیلاب دلیجان در استان مرکزی نشان داد که پخش سیلاب به طور معنی‌داری موجب کاهش مقدار شن، چگالی ظاهری و نفوذپذیری گردید. (Fazelpour et al., 2017) به ارزیابی تأثیر پروژه‌های پخش سیلاب بر ویژگی‌های خاک در استان یزد پرداختند. نتایج بیانگر نفوذ بیشتر آب در منطقه مهریز و شستشوی عناصر خاک بوده، این در حالی است که در هرات نفوذ کمتر و در بافق از روند کاهشی بیشتری برخوردار بود.

بررسی‌های (Karimi Sangchini, 2024) در عرصه پخش سیلاب داوود رشید کوه‌دشت نشان داد که عملیات پخش سیلاب، الگوی نفوذپذیری آب در خاک (مقدار و سرعت) را در عرصه پخش تحت تأثیر قرار داده و منجر به کاهش سرعت نفوذپذیری متوسط شده است. مقدار این کاهش در عرصه‌های مختلف پخش سیلاب متفاوت بوده و پایین دست عرصه پخش سیلاب به دلیل رسوبگذاری کم‌تر سرعت نفوذ بیشتر از بخش‌های بالادست است.

در مناطق مختلف جهان به ویژه در آمریکا و استرالیا روش پخش سیلاب توسعه زیادی طی قرن حاضر یافته است و این روش یکی از راه کارهای مؤثر در بهینه‌سازی بهره‌برداری از آب است. در ایران نیز پروژه‌های متعدد پخش سیلاب در سراسر کشور به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک انجام گرفته است. از جمله محدودیت‌های مهم در اجرای پروژه‌های پخش سیلاب، کاهش تدریجی شدت نفوذ آب به خاک در عرصه‌های پخش است که عمدتاً به دلیل مسدود شدن منافذ خاک در اثر ورود ذرات ریز و معلق درون آب است که توسط سیلاب به عرصه پخش می‌شود (Javadi et al., 2014).

بودند، نمونه‌های خاک از چند نقطه برداشت و به آزمایشگاه منتقل شدند. پس از تجزیه آزمایشگاهی و تعیین بافت خاک نمونه‌ها، سه زمین که بافت خاک متفاوتی نسبت به هم داشتند و در عین حال تغییراتی از نظر خاک در سطح حدود ۱۰۰ متر مربع نداشتند برای اجرای آزمایش انتخاب شدند. آزمایش در سه زمین با بافت خاک مختلف شامل سیلتی لوم، لوم رسی و لومی شنی در شش سطح گل‌آلودگی آب به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. در هر واحد آزمایشی، آزمایش نفوذ آب به خاک با استفاده از استوانه به اجرا درآمد. قرائت‌های افت نفوذ آب در استوانه به قطر ۳۲ سانتی‌متر و به ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر انجام گرفت. استفاده از چنین حلقه‌ی نفوذ برای اندازه‌گیری نفوذ در بسیاری نقاط دنیا رایج است (Chen et al., 2014; Bassegio et al., 2018).

در پیرامون استوانه‌های نفوذ (نفوذسنج‌ها) پشته‌ای خاکی به قطر ۷۰ سانتی‌متر برای جلوگیری از نفوذ جانبی آب از استوانه‌ها ایجاد شد. در هر زمین، آزمایش در محدوده‌ای به ابعاد 6×10 متر مربع اجرا شد. در اواخر فروردین، زمین‌های مورد بررسی از پوشش گیاهی پاک شدند. سپس نفوذسنج‌ها در هر زمین تا عمق ۱۰ سانتی‌متر (برای ایجاد نفوذ عمودی آب) در خاک فرو برده شدند (شکل ۱). در هر زمین ۱۸ قطعه نفوذسنج با فاصله ۲ متر از یکدیگر (برای جلوگیری از تأثیر رطوبت خاک در هر نقطه اندازه‌گیری بر نقاط دیگر) و در مجموع به تعداد ۵۴ قطعه جاگذاری شدند. برای تأمین آب مورد نیاز برای آزمایش نفوذ از مخزن‌هایی با حجم ۲۰۰۰ لیتر در کنار زمین‌های مورد بررسی استفاده شد.

۳-۲- انتخاب غلظت‌های گل‌آلودگی آب

از شش سطح غلظت گل‌آلودگی آب شامل صفر، ۱۰، ۱۰۰، ۱۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر استفاده شد. سطح صفر گل‌آلودگی آب که همان آب زلال بود به عنوان تیمار شاهد در نظر گرفته شد. انتخاب این سطوح بر اساس غلظت بار معلق گزارش شده در برخی رودخانه‌های کشور (Sheikhalipour et al., 2015; Alijanpour Shalmani et al., 2020; Nazari Tahroudi et al., 2020) بود. رسوبات ریزدانه از جمله رس و سیلت عامل اصلی گل‌آلودگی آب رودخانه‌ها هستند. از این رو، برای ایجاد آب گل‌آلود، نمونه خاک حاوی ذرات ریزدانه از اطراف روستای قولتوق (با مختصات جغرافیایی ۳۶/۴۹ درجه شمالی و ۴۸/۰۷ درجه شرقی) تهیه شد و در آزمایشگاه با استفاده از روش هیدرومتر (Gee & Baude, 1986) مورد تجزیه مکانیکی قرار گرفت.

نتایج تجزیه مکانیکی خاک نشان داد که این نمونه خاک از ۶۲/۵ درصد رس، ۳۵ درصد سیلت و ۲/۵ درصد شن برخوردار است. ذرات

در طرح‌های پخش سیلاب، نفوذپذیری خاک عرصه پخش، عامل مهمی در موفقیت این طرح‌ها محسوب می‌گردد. مقدار بارمعلق درون رود و ویژگی‌های خاک عرصه پخش نقش مهمی در شدت نفوذ آب به هنگام ورود سیلاب به عرصه پخش دارند. مکان‌یابی مناطق مناسب برای پخش سیلاب مستلزم بررسی نقش این دو عامل است. بنابراین، بررسی روند تغییرات نفوذ آب گل‌آلود و شناخت عوامل مؤثر بر آن، امری ضروری است. تاکنون پژوهشی در زمینه تأثیر گل‌آلودگی آب بر تغییرات نفوذپذیری خاک انجام نگرفته است. بنابراین، این مطالعه با هدف تعیین تغییرات نفوذ آب به خاک تحت تأثیر سطوح مختلف بار معلق در خاک‌های با بافت مختلف به صورت صحرایی انجام گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مکان و زمان انجام پژوهش

این پژوهش به صورت آزمایش در سه قطعه زمین با خاک مختلف واقع در استان زنجان بین عرض جغرافیایی $35^{\circ}25'45''$ و $35^{\circ}24'15''$ شمالی و طول جغرافیایی بین $49^{\circ}12'12''$ و $49^{\circ}52'31''$ انجام گرفت. اراضی مورد بررسی بدون شیب قابل توجه (تا ۲ درصد) بوده و از نوع مرتع درجه سه هستند. میانگین ارتفاع آنها حدود ۱۵۰۰ متر از سطح آب‌های آزاد است. متوسط بارندگی سالیانه در منطقه ۲۵۵/۴ میلی‌متر است. میانگین درجه حرارت گرم‌ترین ماه سال ۲۰/۶ درجه سانتی‌گراد در تیر ماه و متوسط درجه حرارت سردترین ماه سال ۰/۵ درجه سانتی‌گراد در دی ماه است. اقلیم منطقه بر اساس روش اقلیمی دمارتون، نیمه‌خشک است. با توجه به منحنی آمبروترمیک ایستگاه سینوپتیک زنجان، فصل خشک حدود پنج ماه طول می‌کشد که از اوایل خرداد شروع و تا اواخر مهر ادامه دارد. در این منطقه به علت پایین بودن رطوبت خاک، فعالیت‌های کشاورزی و زراعت بدون آبیاری ممکن نیست. از نظر زمین‌شناسی، شیل‌های آهکی و شیل‌های میکادار در منطقه مشاهده می‌شوند. خاک‌های موجود در منطقه دارای افق‌های سطحی اکریک^۱ و افق‌های زیرسطحی آهکی هستند. در بسیاری از خاک‌ها، سنگریزه و قلوه سنگ در طبقات سطحی و زیرین خاک وجود دارد. خاک‌ها از لحاظ مقدار ماده آلی فقیر هستند. رژیم رطوبتی و حرارتی خاک‌ها به ترتیب زیریک^۲ و مزیک^۳ است و خاک‌ها در دو رده انتی سول^۴ و اینسپتی سول^۵ طبقه‌بندی می‌شوند (Hoseini & Vaezi, 2017).

۲-۲- طرح آزمایش

برای اجرای آزمایش از چند زمین با سطح یکنواخت (بدون شیب) در منطقه که در ارزیابی صحرایی دارای بافت خاک متفاوتی

⁴ Entisol

⁵ Inceptisol

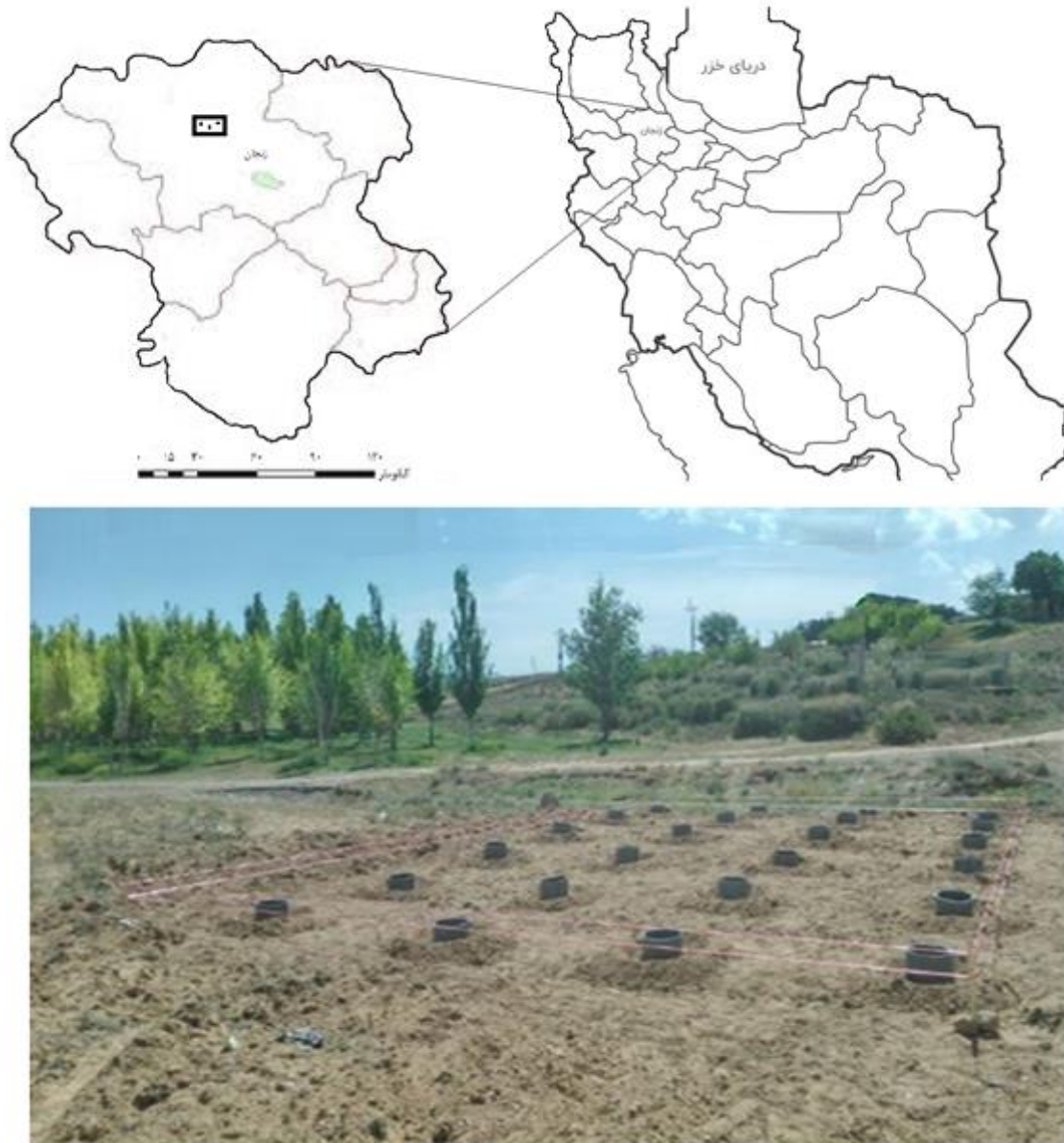
¹ Ochric horizon

² Xeric

³ Mesic

گل آلودگی آب، ۱۰۰۰ گرم از نمونه خاک (۶۲/۵ گرم رس، ۳۵ گرم سیلت و ۲/۵ گرم شن) به مخزن ۱۰ لیتری محتوی آب اضافه و مخلوط همگن تهیه شد.

شن با استفاده از الک ۰/۰۵ میلی متر از نمونه های خاک جدا شدند و از بقیه ذرات (رس و سیلت) در تهیه آب گل آلود استفاده شد. برای این منظور، از مخزن ۱۰ لیتری برای تهیه هر سطح گل آلودگی آب استفاده شد. برای مثال، در غلظت ۱۰۰۰۰۰ میلی گرم در لیتر



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی و نمایی از اجرای طرح آزمایشی برای اندازه گیری اثر گل آلودگی آب بر شدت نفوذ آب به خاک

Fig. 1- Location of study area and a view of experimental design on the study field for determining the effect of Muddy water on soil infiltration rate

ارتفاع نفوذ آب (بر حسب سانتی متر) در واحد زمان (بر حسب ساعت) برای هر یک از بازه های زمانی تعیین شد. شدت نفوذ آب در نخستین زمان تماس آب با خاک به عنوان شدت نفوذ اولیه و در زمان های پایانی که تغییرات آشکاری از نظر نفوذ وجود نداشت، به عنوان شدت نفوذ نهایی در نظر گرفته شد.

۲-۴- اندازه گیری شدت نفوذ آب به خاک

نمونه همگن آب گل آلود به درون نفوذسنج کوچک (واحد آزمایش) تا ارتفاع ۲۰ سانتی متر ریخته شد. شدت نفوذ آب برای هر یک از غلظت های آب گل آلود در هر قطعه زمین مورد اندازه گیری قرار گرفت و افت نفوذ آب در بازه های مختلف زمانی (۱، ۳، ۵، ۱۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه) تعیین شد. شدت نفوذ لحظه ای آب بر اساس

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ویژگی‌های هیدرولیکی خاک‌ها

نتایج تجزیه خاک‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. شدت نفوذ اولیه آب در خاک لوم شنی، لوم سیلتی و لوم رسی به ترتیب ۸۱/۶، ۷۳/۲ و ۶۹/۶ سانتی‌متر بر ساعت بود و شدت نفوذ نهایی نیز از ۴/۱ سانتی‌متر بر ساعت در خاک لوم رسی تا ۸/۲ سانتی‌متر بر ساعت در خاک لوم رسی تغییر می‌کند. چگالی ظاهری در خاک لوم رسی کمترین مقدار (۱/۳۴) گرم بر سانتی‌متر مکعب و در خاک لوم شنی بیشترین مقدار (۱/۵۷) گرم بر سانتی‌متر مکعب است که دلیل آن تخلخل اندک در خاک لوم شنی است. خاک‌ها از مقدار اندکی ماده آلی برخوردار هستند و مقدار آن از ۰/۸۱ درصد در خاک لوم شنی تا ۰/۹۶ درصد در خاک لوم سیلتی تغییر می‌کند. خاک‌ها از خاکدانه‌های کوچک و ناپایدار در آب تشکیل شده اند؛ به طوری که پایداری خاکدانه‌ها در خاک لوم شنی، لوم سیلتی و لوم رسی به ترتیب ۱/۰۶، ۱/۱۹ و ۱/۴۷ میلی‌متر است.

در خاک‌های منطقه نیمه‌خشک، کربنات کلسیم در کنار ماده آلی دو عامل مهم مؤثر در تشکیل خاکدانه‌ها و پایداری آنها است (Vaezi et al., 2008). کمبود این دو عامل در خاک لوم شنی، باعث محدودیت تشکیل ساختمان‌های پایدار می‌شود. بررسی تغییرات ویژگی‌های هیدرولیکی خاک با استفاده از آماره ضریب تغییرات (CV) نشان داد که تفاوت‌های اساسی میان خاک‌ها به ویژه از نظر شدت نفوذ نهایی (۳۵ درصد) وجود دارد در حالی که تفاوت‌ها در شدت نفوذ اولیه نسبتاً اندک است (۱۱ درصد). شدت نفوذ آب به خاک‌ها در هر زمان از یک سو تحت تأثیر شیب هیدرولیکی و از سوی دیگر ضریب آب‌گذری خاک (هدایت هیدرولیکی) است. در نخستین زمان نفوذ آب به خاک نقش شیب هیدرولیکی در شدت نفوذ آب به خاک بیشتر نمایان می‌شود.

وابستگی شدت نفوذ نهایی آب به خاک به شرایط نیم‌رخ خاک بسیار بارزتر است و ضریب آب‌گذری خاک که تحت تأثیر توزیع اندازه منافذ نیم‌رخ خاک است نقشی اساسی در شدت نفوذ آب به خاک در زمان‌های پلایانی دارد. به عبارت دیگر، در زمان‌های نهایی نفوذ آب به خاک، نفوذپذیری خاک مستقل از شیب هیدرولیکی میان سطح و جبهه رطوبتی است و مقدار آن نشانگر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (Ks) است (Hillel, 2003). مقدار Ks مستقیماً با توزیع اندازه منافذ خاک مرتبط است (Giménez et al., 1999; Candemi & Gülser, 2012). توزیع اندازه ذرات و ساختمان دو عامل اصلی بروز این تفاوت‌ها میان خاک‌ها است. وجود تخلخل درشت در نیم‌رخ خاک لوم شنی عامل مهم مؤثر بر بالا بودن هدایت هیدرولیکی خاک (Wang et al., 2019) و در نتیجه، شدت نفوذ نهایی آب است.

۲-۵- تعیین ویژگی‌های خاک

برای اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک هر قطعه زمین، از کنار هر کدام از نفوذسنج‌ها، نمونه‌های یک کیلوگرمی خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر سطح خاک برداشت و به آزمایشگاه منتقل شد. چگالی ظاهری با نمونه‌برداری خاک به وسیله استوانه فلزی و تعیین نسبت جرم خاک خشک به حجم نمونه به دست آمد. در نمونه‌های خاک گذرانده از الک ۲ میلی‌متر، توزیع اندازه ذرات به روش هیدرومتری (Gee & Baude, 1986) و ماده آلی به روش سوزاندن تر (Walkley & Black, 1947) اندازه‌گیری شدند. برای تعیین پایداری خاکدانه‌ها از روش الک تر (Kemper & Rosenau, 1986) استفاده شد. برای این منظور، ابتدا ۱۰۰ گرم خاکدانه با قطر ۵/۶ تا ۸ میلی‌متر از نمونه‌های خاک جدا شدند و پس از ۲۴ ساعت خیس کردن، روی سری الک‌های ۵/۶، ۴/۷، ۲، ۱/۱۸، ۰/۶، ۰/۲۵ و ۰/۱۵ میلی‌متر قرار داده شدند و درون سطل حاوی آب مقطر با سرعت ۲۰ دور در دقیقه به مدت یک دقیقه (Vaezi et al., 2014) حرکت داده شدند. در نهایت، با استفاده از رابطه (۱) پایداری خاکدانه‌ها به دست آمد:

$$MWD = \sum_{i=1}^n w_i \bar{x}_i \quad (1)$$

که در آن، MWD میانگین وزنی اندازه خاکدانه (میلی‌متر)، w_i جرم نسبی خاکدانه‌های پایدار روی الک i ام (پس از حذف ذرات شن) و $\bar{x}_i$ میانگین قطر خاکدانه‌ها (میلی‌متر) است. نفوذپذیری خاک به روش استوانه‌های مضاعف در پیرامون نقاط نمونه‌برداری خاک (Haise, 1956) اندازه‌گیری شد.

۲-۶- تجزیه و تحلیل داده‌ها

پیش از تحلیل داده‌ها، نرمال بودن توزیع آماری داده‌ها با استفاده از تحلیل چولگی و کشیدگی داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. پیش از تحلیل‌های آماری سعی شد از نرمال بودن توزیع آماری داده‌ها اطمینان حاصل شود و در صورت وجود توزیع غیرنرمال در داده‌ای از توابع ریاضی برای نرمال‌سازی استفاده شد. همچنین برای مقایسه‌های میانگین بین خاک‌ها و سطوح گل‌آلودگی آب از نظر نفوذپذیری به آب (شدت نفوذ اولیه و نهایی) از روش تجزیه واریانس با آزمون توکی^۱ استفاده شد. حداقل سطح معنی‌دار برای اثرگذاری عوامل (نوع خاک و سطح گل‌آلودگی آب) بر شدت نفوذ آب، ۹۵ درصد آماری (۰/۰۵ < p) در نظر گرفته شد. کلیه تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۲ انجام گرفت و جهت ترسیم نمودارها از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

¹Tukey's test

جدول ۱- ویژگی های فیزیکی و هیدرولیکی خاک های مورد بررسی
Table 1. Physical and hydraulic properties of the study soils

ویژگی های خاک	لوم شنی	لوم سیلتی	لوم رسی
Soil properties	Sandy loam	Silt loam	Clay loam
شن (%)	۶۷/۱۷	۳۳/۹۰	۲۶/۸۸
Sand (%)			
سیلت (%)	۲۵/۳۲	۵۳/۶۰	۳۵/۶۰
Silt (%)			
رس (%)	۷/۵۴	۱۲/۵۳	۳۷/۵۸
Clay (%)			
ماده آلی (%)	۰/۸۱	۰/۹۶	۰/۸۹
Organic matter (%)			
پایداری خاکدانه (میلیمتر)	۱/۰۶	۱/۱۹	۱/۴۷
Aggregate stability (mm)			
چگالی ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب)	۱/۵۷	۱/۴۱	۱/۳۴
Bulk density (g cm ⁻³)			
تخلخل (%)	۴۰/۷۵	۴۶/۷۹	۴۹/۴۳
Porosity (%)			
شدت نفوذ اولیه (سانتی متر بر ساعت)	۸۱/۶	۷۳/۲	۶۹/۶
Initial infiltration rate (cm h ⁻¹)			
شدت نفوذ نهایی (سانتی متر بر ساعت)	۸/۲۲	۵/۴۰	۴/۰۸
Final infiltration rate (cm h ⁻¹)			

۲-۳- اثر گل آلودگی و نوع خاک بر ویژگی های هیدرولیکی خاک

بود. این نتایج نشان می دهد که بین خاک ها تفاوت های اساسی از نظر قابلیت نفوذ آب گل آلود وجود دارد. این تفاوت به دلیل توزیع اندازه منافذ خاک است که آن نیز ناشی از توزیع اندازه ذرات معدنی (Zaffar Azizsoltani & Sheng-Gao, 2015) و ساختمان خاک می باشد (et al., 2019).

نتایج تجزیه واریانس اثرات بافت خاک و گل آلودگی آب بر ویژگی های هیدرولیکی خاک (شدت نفوذ اولیه و نهایی آب) در جدول ۲ نشان داده شده است. بر اساس نتایج، شدت نفوذ اولیه آب گل آلود (حاوی بار معلق) تحت تأثیر بافت خاک ($p < 0.001$) و غلظت آب گل آلود ($p < 0.001$) قرار گرفت. همچنین شدت نفوذ نهایی آب نیز تحت تأثیر بافت خاک ($p < 0.001$) و غلظت آب گل آلود ($p < 0.001$)

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس تغییرات شدت نفوذ آب تحت تأثیر بافت خاک و گل آلودگی آب
Table 2. Variance analysis of variation in water infiltration rate as affected by soil texture and Muddy water

میانگین مربعات	Mean squares	درجه آزادی	منابع تغییر
Freedom degree	Variation source		
شدت نفوذ نهایی	شدت نفوذ اولیه		
Final infiltration rate	Initial infiltration rate		
۷۰/۹۸۰***	۲۹۴۴/۳۲۰***	۲	بافت خاک Soil texture
۵/۹۳۸**	۲۳۸۳/۰۷۲***	۵	گل آلودگی آب Muddy water
۰/۳۱۸ ^{ns}	۱۱۶/۷۳۶**	۵	بافت خاک × گل آلودگی آب Soil texture × Muddy water
۰/۶۵۰	۳۱/۷۳۱	۱۰	خطا Error

^{ns}: عدم معنی داری، ^{**}: معنی دار در سطح احتمال ۹۵ درصد ($p < 0.01$) و ^{***}: معنی دار در سطح احتمال ۹۹ درصد ($p < 0.001$).

شدت نفوذ آب بیشتری (Yang & Zhang, 2011) دارند. همچنین، گل آلودگی آب عاملی مهم در شدت نفوذ آب به خاک است. اثرات این عامل (گل آلودگی آب) بر شدت نفوذ اولیه بیشتر از شدت نفوذ نهایی

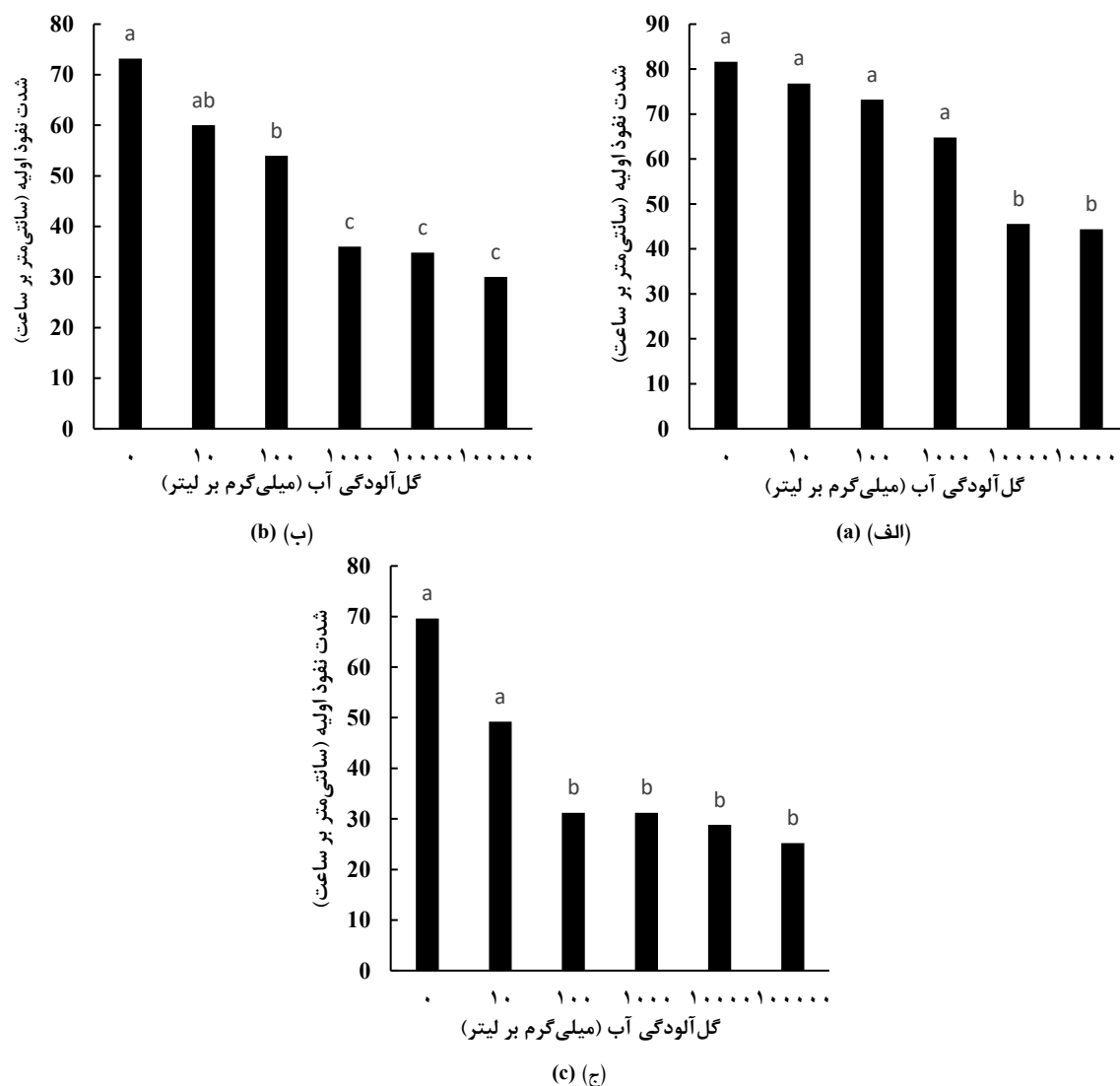
خاک هایی که از ذرات اولیه درشت و نیز ذرات ثانویه بزرگ (خاکدانه) برخوردارند، از تخلخل درشت بیشتری برخوردارند (Zieba, 2017) و در نتیجه، ضریب آبدزدی اشباع (Ren et al., 2016)

لیتر گل آلودگی آب رخ داد و در عین حال تفاوتی معنی‌دار با سطح ۱۰۰۰۰ میلی گرم بر لیتر نداشت. در این سطح از غلظت آب گل آلود، شدت نفوذ اولیه آب به اندازه ۴۶ درصد نسبت به آب زلال (تیمار شاهد) دچار کاهش شد. از سطح صفر گل آلودگی آب (تیمار شاهد) تا سطح ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر گل آلودگی آب، شدت نفوذ اولیه کاهش تدریجی داشت و در این سطح به اندازه ۲۵ درصد، افت شدت نفوذ اولیه نسبت به آب زلال رخ داد. با این وجود، این اختلاف از نظر آماری معنی‌دار نبود. در خاک لوم سیلتی، شدت نفوذ اولیه با افزایش غلظت گل آلودگی آب، کاهش شدیدی نشان داد و در بالاترین غلظت گل آلودگی آب (۱۰۰۰۰۰ میلی گرم بر لیتر) به اندازه ۵۹ درصد افت سرعت نفوذ اولیه نسبت به آب زلال دیده شد. این تیمار اختلاف معنی‌داری با غلظت‌های ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ میلی گرم بر لیتر گل آلودگی آب نداشت.

است. این نتیجه بدان دلیل است که انباشت ذرات معلق در لایه‌های سطحی خاک اثرات بیشتری را بر افت نفوذپذیری لایه سطحی خاک می‌گذارد؛ در حالی که با کاهش ورود ذرات معلق به منافذ درشت خاک در لایه‌های زیرسطحی، شدت کاهش نفوذپذیری خاک کمتر می‌شود.

۳-۳- تأثیر گل آلودگی آب بر شدت نفوذ اولیه آب در خاک‌ها

شکل ۲ اثرات غلظت گل آلودگی آب را بر شدت نفوذ اولیه آب در خاک‌های مورد بررسی نشان می‌دهد. در هر سه خاک، گل آلودگی آب اثری معنی‌دار بر شدت نفوذ اولیه آب داشت. با این وجود سطح معنی‌داری آن در خاک لوم شنی ($p < 0.05$) کمتر از خاک‌های لوم سیلتی ($p < 0.01$) و لوم رسی ($p < 0.01$) بود. در خاک لوم شنی، بیشترین افت شدت نفوذ اولیه آب در غلظت ۱۰۰۰۰۰ میلی گرم بر



شکل ۲- تغییرات شدت نفوذ اولیه آب تحت تأثیر گل آلودگی آب در خاک لوم شنی (الف)، لوم سیلتی (ب) و لوم رسی (ج).

Fig. 2- Variation in initial infiltration rate as affected by muddy water concentration in sandy loam (a), silt loam (b) and clay loam (c)

نفوذپذیری ستون ماسه به سرعت کاهش می‌یابد (Wu, 2008). تأثیر افزایش گل آلودگی آب در افت شدت نفوذ اولیه در خاک‌های ریزبافت بیشتر از سایر خاک‌ها است.

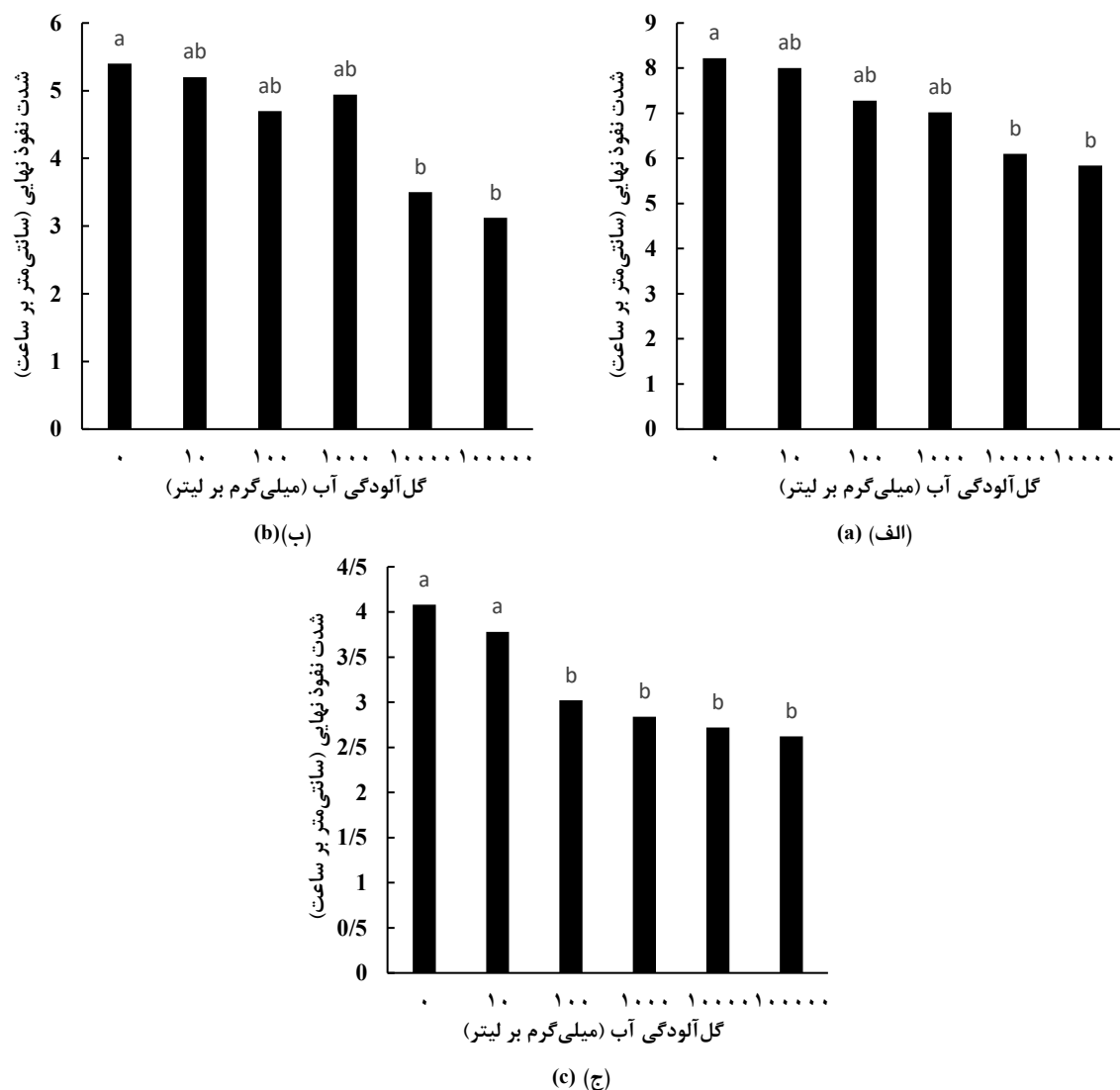
۴-۳- تأثیر گل آلودگی آب بر شدت نفوذ نهایی آب در خاک‌ها

نتایج نشان داد که گل آلودگی آب اثری معنی‌دار بر شدت نفوذ نهایی آب در خاک لوم شنی ($p < 0.05$)، لوم سیلتی ($p < 0.01$) و لوم رسی ($p < 0.001$) دارد (شکل ۳). شدت نفوذ نهایی آب در این خاک‌ها در تیمار ۱۰۰۰۰۰ میلی گرم بر لیتر گل آلودگی آب به ترتیب به اندازه ۲۹ و ۴۲ و ۳۶ درصد نسبت به آب زلال کاهش داشت. در خاک لوم شنی میزان افت شدت نفوذ نهایی آب با افزایش غلظت گل آلودگی آب با روند نسبتاً تدریجی کاهش یافت. این نتیجه نشان می‌دهد که در خاک‌های درشت‌بافت به دلیل فراوانی بیشتر منافذ درشت، کاهش بسیار زیاد در شدت نفوذ نهایی آب در غلظت‌های مختلف گل آلودگی آب رخ نمی‌دهد. در چنین خاک‌هایی، بخش عمده ذرات معلق می‌توانند همراه جریان آب به عمق‌های بیشتری راه پیدا کنند و در نتیجه اثرات منفی آنها در افت شدت نفوذ نهایی آب کمتر می‌شود.

بررسی‌های Kang et al. (2024) در مورد استفاده از آب گل آلود در ستون‌های خاک نشان داد که هدایت هیدرولیکی خاک با گذشت زمان از آغاز نفوذ کاهش می‌یابد و در خاک شنی با افزایش غلظت آب گل آلود از ۳ تا ۱۲ درصد، نفوذ آب به ترتیب به اندازه ۸۴ و ۹۲ درصد کاهش می‌یابد. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که اثرات کاهش گل آلودگی آب در شدت نفوذ نهایی آب در هر سه خاک کمتر از تأثیر آن در کاهش شدت نفوذ اولیه آب بود. توقف اغلب ذرات در منافذ لایه سطحی خاک و کاهش نسبت انباشت در عمق‌های پایین‌تر دلیل این موضوع است. این نتیجه نشان می‌دهد که ورود آب گل آلود در زمین‌های آبیاری یا عرصه‌های پخش سیلاب با خاک درشت‌بافت از یک سو در افزایش مقدار نفوذ آب به خاک کارکردی بهتری نسبت به سایر خاک‌ها دارد و از سوی دیگر کمترین تأثیر را بر افت ظرفیت نفوذ آب به خاک در عملیات‌های بعدی می‌گذارد.

در خاک لوم رسی، میزان افت شدت نفوذ اولیه با افزایش غلظت گل آلودگی آب بسیار زیاد بود و در غلظت ۱۰۰۰۰۰ میلی گرم بر لیتر گل آلودگی آب به اندازه ۶۴ درصد کاهش شدت نفوذ اولیه آب اتفاق افتاد. افت شدت نفوذ آب در این غلظت از آب گل آلود اختلاف معنی‌داری با غلظت‌های پایین‌تر (۱۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ میلی گرم بر لیتر) نداشت. در این خاک در غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر گل آلودگی آب به اندازه ۵۵ درصد افت شدت نفوذ اولیه نسبت به آب زلال وجود داشت. در حالی که، در خاک شنی در غلظت‌های بالاتر گل آلودگی آب (۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر) افت کمتری (۲۱ درصد) مشاهده شد. به طور کلی، این نتایج نشان می‌دهد که اثرات گل آلودگی آب بر شدت نفوذ اولیه در خاک‌های مختلف بسیار متفاوت است و بیشترین افت شدت نفوذ اولیه، در خاک ریزبافت (لوم رسی) رخ می‌دهد. در این خاک حتی در غلظت‌های بسیار پایین گل آلودگی آب (۱۰۰ میلی گرم بر لیتر) افت شدیدی در شدت نفوذ اولیه وجود دارد.

در خاک ریزبافت برخلاف خاک درشت‌بافت (لوم شنی) نسبت منافذ درشت بسیار کمتر از منافذ ریز است. انباشت ذرات بارمعلق به هنگام نفوذ آب به خاک در منافذ لایه سطحی آن باعث بسته شدن سریع آنها و کاهش سرعت نفوذ اولیه آب می‌شود. در خاک لوم شنی به دلیل فراوانی بیشتر منافذ درشت، افت شدت نفوذ اولیه کمتر از سایر خاک‌ها است. با افزایش غلظت مواد معلق در آب، به علت رسوب بیشتر ذرات در منافذ خاک و بسته شدن نسبی خلل و فرج خاک، شدت نفوذ آب گل آلود در خاک کاهش یافته و مدت زمان زیادی جهت نفوذ آب به اعماق خاک نیاز است (Wu & Huang et al., 2000). یافته‌ها در مورد اثرات گل آلودسازی آب در کاهش نشست آب از دیواره کانال‌های آبرسانی نشان داد که عبور آب گل آلود در بازه زمانی ۱۶ ساعت به دلیل ورود بارمعلق به منافذ خاک می‌تواند نشست آب را به درون خاک از ۶۰ تا ۶۷ درصد کاهش دهد (Nasirian et al., 2017). بررسی‌ها در ستون ماسه نیز نشان داد که در غلظت‌های بالاتر گل آلودگی، ذرات جامد سریع‌تر انباشته شده و درجه تخلخل و



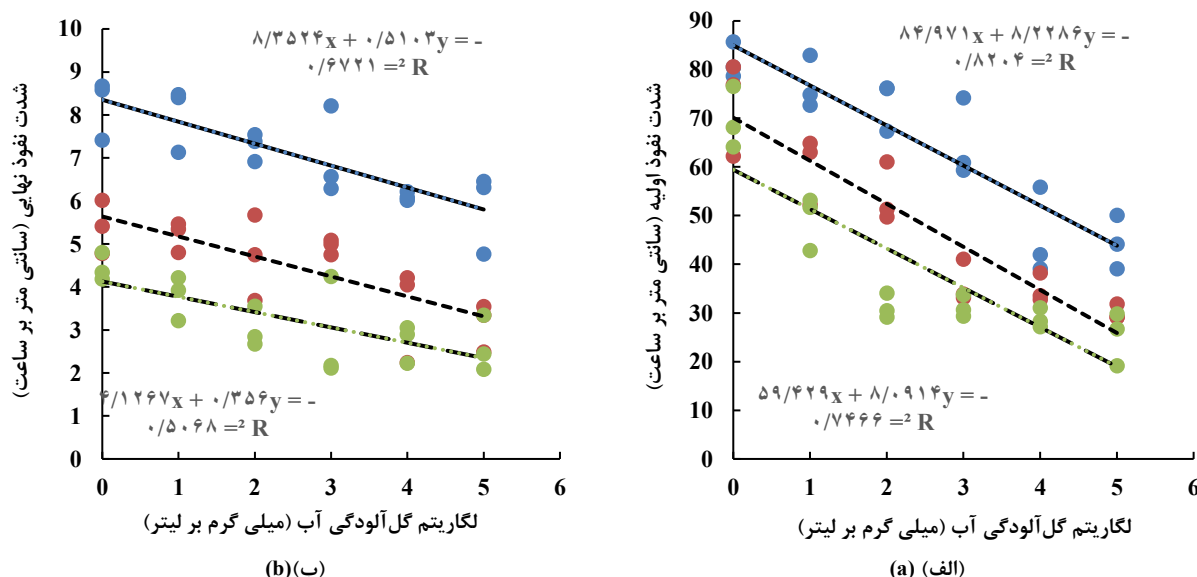
شکل ۳- تغییرات شدت نفوذ نهایی آب تحت تأثیر گل آلودگی آب در خاک لوم شنی (الف)، لوم سیلتی (ب) و لوم رسی (ج)

Fig. 3- Variation in final infiltration rate as affected by muddy water concentration in sandy loam (a), silt loam (b) and clay loam (c)

۳-۵- شدت نفوذ آب تحت برهم کنش گل آلودگی آب و بافت خاک

موجب می شود چگونگی تأثیر افزایش غلظت گل آلودگی آب بر کاهش شدت نفوذ اولیه آب میان خاک ها یکسان نباشد (شکل ۴ الف). شدت نفوذ نهایی آب بر خلاف شدت نفوذ اولیه تحت تأثیر برهم کنش بافت خاک و گل آلودگی آب قرار نگرفت. این نتیجه نشان می دهد که گل آلودگی آب به عنوان عاملی مستقل از بافت خاک است و روند تأثیر غلظت آن در افت شدت نفوذ نهایی آب در همه خاک ها تقریباً مشابه است (شکل ۴ ب). علت این موضوع آن است که شدت نفوذ نهایی بیانگر تأثیر کلی نیمرخ خاک در شدت نفوذ آب است و انباشت ذرات معلق در منافذ خاک سطحی رفتاری مشابه را در خاک ها از نظر کاهش شدت نفوذ نهایی به دنبال دارد.

بررسی برهم کنش دو عامل بافت خاک و گل آلودگی آب از نظر شدت نفوذ آب نشان داد که مقادیر شدت نفوذ اولیه تحت تأثیر برهم کنش این دو عامل قرار دارد (جدول ۲). این نتیجه نشان می دهد که ویژگی های خاک به نوبه خود نقشی اثرگذار در تغییر روند تأثیر گل آلودگی آب بر افت شدت نفوذ اولیه دارند. ویژگی های لایه نازک سطحی خاک عاملی تعیین کننده در شدت نفوذ اولیه آب گل آلود هستند. دانه بندی ذرات خاک با تأثیر بر توزیع اندازه منافذ در خاک



شکل ۴- تغییرات شدت نفوذ اولیه (الف) و شدت نفوذ نهایی آب (ب) نسبت به گل آلودگی آب در خاک لوم شنی (آبی)، لوم سیلتی (قرمز) و لوم رسی (سبز)
 Fig. 4- initial infiltration rate (a) and final infiltration rate (b) versus to water concentration in the soils: sandy loam (blue), silt loam (red) and clay loam (green)

بیشتری راه پیدا کنند و در نتیجه اثرات منفی آنها در افت شدت نفوذ نهایی آب کمتر می شود. این نتیجه نشان می دهد که پخش سیلاب در عرصه های با خاک درشت بافت از یک سو در افزایش مقدار نفوذ آب به خاک، کارکرد بهتری نسبت به سایر خاک ها دارد و از سوی دیگر کمترین تأثیر را بر افت ظرفیت نفوذ آب به خاک در عملیات های بعدی پخش سیلاب می گذارد. چنین عرصه هایی گزینه ای مناسب برای انتخاب عملیات پخش سیلاب در رخدادهای آتی هستند. عرصه های با خاک ریزبافت تنها در سیلاب های با درجه گل آلودگی پایین تر (کمتر از ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر) می توانند تحت عملیات پخش سیلاب قرار بگیرند.

سپاس گذاری

از گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه زنجان برای پشتیبانی از اجرای آزمایش های تجزیه خاک سپاس گذاری می شود.

۴- نتیجه گیری نهایی

نتایج نشان داد که گل آلودگی آب، اثراتی معنی دار بر افت ویژگی های هیدرولیکی خاک ها می گذارد. شدت افت نفوذ آب از یک سو به نوع خاک و از سوی دیگر به غلظت آب گل آلود وابسته است. اثرات گل آلودگی آب بر کاهش شدت نفوذ اولیه بیشتر از شدت نفوذ نهایی آب است. بیشترین تأثیر گل آلودگی آب بر افت شدت نفوذ اولیه، در خاک ریزبافت (لوم رسی) رخ می دهد؛ به طوری که در این خاک حتی در غلظت های بسیار پایین گل آلودگی آب (۱۰۰ میلی گرم بر لیتر) افت شدیدی در شدت نفوذ اولیه وجود دارد. در خاک لوم شنی میزان افت شدت نفوذ نهایی آب با افزایش غلظت آب گل آلود تدریجی است. در واقع، در خاک های درشتبافت به دلیل فراوانی بیشتر منافذ درشت، کاهش بسیار زیاد در شدت نفوذ نهایی آب در غلظت های مختلف آب گل آلود رخ نمی دهد. در چنین خاک هایی، بخش عمده ذرات معلق می توانند همراه جریان آب به عمق های

منابع

- Alijanpour Shalmani A, Vaezi AR, and Tabatabaei MR, 2020. Optimal combinations of hydrological variables for modeling of daily suspended sediment load in Karaj Watershed. *Watershed Engineering and Management*, 12(1), 228-243, doi.org/10.22092/ijwmse.2019.121319.1463 (In Persian with English Abstract).
- Alizadeh A, 2015. *Principles of Applied Hydrology*. The Press of University of Imama Reza, Mashhad, Iran, 735P (In Persian).
- Azizsoltani E, Honarjoo N, and Ayoubi S, 2019. How soil pore distribution could help in soil quality studies as an appropriate indicator. *Eurasian Soil Science*, 52(6), 654-660, doi.org/10.1134/S1064229319060036.
- Bassegio D, Sarto MVM, Rosolem CA, and Sarto JRW, 2018. Guar root and shoot growth as affected by soil compaction. *Pesquisa Agropecuária Tropical*,

- 48(2), 163-169, doi.org/10.1590/1983-40632018v4852189.
- Candemir F, and Gülser C, 2012. Influencing factors and prediction of hydraulic conductivity in fine-textured alkaline soils. *Arid Land Research and Management*, 26(1), 15-31, doi.org/10.1080/15324982.2011.631686.
 - Chen G, Weil RR, and Hill RL, 2014. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. *Soil and Tillage Research*, 136(1), 61-69, doi.org/10.1016/j.still.2013.09.004.
 - Chowdary V, Rao MD, and Jaiswal C, 2006. Study of infiltration process under different experimental conditions. *Agricultural Water Management*, 83(1), 69-78, doi.org/10.1016/j.agwat.2005.09.001.
 - Corradini C, Flammini A, Morbidelli R, and Govindaraju R, 2011. A conceptual model for infiltration in two-layered soils with a more permeable upper layer: From local to field scale. *Journal of Hydrology*, 410(1), 62-72, doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.09.005.
 - Farzaneh H, and Gazanchian A, 2011. Effect of Floodwater spreading on soil infiltration in Kalaleh Sadat of Sabzevar. *Iran-Watershed Management Science & Engineering*, 5(17), 1-6, doi.org/10.20089554.1390.5.17.1.3 (In Persian).
 - Fazelpour Aghdaei M, Malekinejad H, Ekhtesasi MR, Barkhordari J, and Zarea Chahooki A, 2017. Assessment of flood water spreading projects on soil characteristics in Yazd province. *Journal of Range and Watershed Management*, 69(4), 983-997, doi.org/10.22059/jrwm.2017.61202 (In Persian with Englis Abstract).
 - Gee GW, and Bauder JW, 1986. Particle-size analysis. In *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*, 5.1, Second Edition, Klute A. (Ed.), 383-411, doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15.
 - Ghazavi R, Vali A, and Eslamian, S, 2010. Impact of flood spreading on infiltration rate and soil properties in an arid environment. *Water Resources Management*, 24, 2781-2793, doi.org/10.1007/s11269-010-9579-y.
 - Giménez D, Rawls WJ, and Lauren JG, 1999. Scaling properties of saturated hydraulic conductivity in soil. *Geoderma*, 88(3-4), 205-220, [doi.org/10.1016/s0016-7061\(98\)00105-0](https://doi.org/10.1016/s0016-7061(98)00105-0).
 - Haise HR, 1956. The use of cylinder infiltrometers to determine the intake characteristics of irrigated soils. (Vol. 41, No. 7). *Agricultural Research Service and Soil Conservation Service, US Department of Agriculture*.
 - Hillel D, 2003. *Introduction to environmental soil physics*. Elsevier Science (USA). <http://www.academicpress.com>.
 - Hoseini F, and Vaezi AR, 2017. Investigating the role of slope gradient and soil properties in the variations of soil water content in rainfed lands of semi-arid regions, northwest of Iran. *Journal of Water Research in Agriculture*, 31(2), 245-257, doi.org/10.22092/jwra.2017.113168 (In Persian with Englis Abstract).
 - Javadi MR, Baghery M, Vafakhah M, and Gholami ShA, 2014. Effect of flood spreading on physical soil properties (A Case Study: Delijan Flood Spreading). *Journal of Watershed Management Research*, 5(9), 119-129, (In Persian).
 - Jinxin W, Baolong H, and Dihai W, 2004. Infiltrability of muddy water and universal model for both muddy water and tap water in planted forest site. *Acta Ecologica Sinica*, 24(12), 2841-2847.
 - Kang S, Fei L, Zhong Y, and Liu L, 2024. Effects of the sand content of muddy water content on one-dimensional vertical infiltration characteristics and dense layer formation characteristics. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 17(1), 172-179, [doi: 10.25165/j.ijabe.20241701.7919](https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20241701.7919)
 - Karimi Sangchini E, Yousefi Mobarhan E, Vayskarami I, and Vayskarami F, 2024. Investigating the effect of floodwater spreading on soil infiltration (Case Study: Davudrashid Kouhdasht floodwater spreading station). *Iran Watershed Management Science & Engineering*, 18(66), 49-58. doi.org/10.22059/jrwm.2015.53470 (In Persian with Englis Abstract).
 - Kemper WD, and Rosenau RC, 1986. Aggregate stability and size distribution. In *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, 5.1, Second Edition, Klute A (Ed.), 425-442, doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17.
 - Komasi A, and Abdoli Kolivand M, 2026. Application of MIDAS model in flood forecasting (case study: Bahramjoo basin, Lorestan province). *Journal of Hydraulics and Water Science*, 35(4), 27-43. [doi.10.22034/hws.2025.66375.1014](https://doi.org/10.22034/hws.2025.66375.1014) (In Persian).
 - Mahdian MH, Sokouti R, and Kamali K, 2011. Appraisal of the trend of soil infiltration rate changes in flood spreading station of Iran. *International Journal Natural Resources and Marine Sciences*, 1(1), 33-43 (In Persian).
 - Mann KC, Peck JA, and Peck MC, 2013. Assessing dam pool sediment for understanding past, present and future watershed dynamics: An example from the Cuyahoga River, Ohio. *Anthropocene*, 2, 76-88, doi.org/10.1016/j.ancene.2013.08.001.
 - Nasirian A, Maghrebi MF, Akbarpour A, and Mohtashami A, 2017. Investigation the effects of muddy water in decreasing seepage in the transition channels (Case study: Ferdows, South Khorasan province). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48(5), 929-940, doi.org/10.22059/ijswr.2017.211110.667497 (In Persian with Englis Abstract).
 - Nazeri Tahroudi M, Ramezani Y, De Michele C and Mirabbasi Najaf Abadi R, 2020. Estimation of the joint frequency of peak flow discharge-suspended load of Zarinehrood basin using two-dimensional

- analysis. *Journal of Water and Soil*, 34(2), 333-347, doi.org/10.22067/jsw.v34i2.81812 (In Persian with Englis Abstract).
- Ren Z, Zhu L, Wang B and Cheng S, 2016. Soil hydraulic conductivity as affected by vegetation restoration age on the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Land*, 8(4), 546-555, doi.org/10.1007/s40333-016-0010-2.
 - Shamsolmaali N, Mahdavi M, and Zehtabian Gh, 2011. Assessment of the effect of floodwater spreading on infiltration variation of soil surface in Varamin catchment. *Journal of Range and Watershed Management*, 64(3), 307-3217 doi.org/10.48308/envs.2024.1447 (In Persian).
 - Sheikhalipour Z, Hassan Pour F, and Azimi V, 2015. Comparison of artificial intelligence methods in estimation of suspended sediment load (Case Study: Sistan River). *Journal of Water and Soil Conservation*, 22(2), 41-60, dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222069.1394.22.2.3.7 (In Persian)
 - Vaezi AR, Sadeghi SHR, Bahrami HA, and Mahdian MH, 2008. Modeling the USLE K-factor for calcareous soils in northwestern Iran. *Geomorphology*, 97(3-4), 414-423, doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.08.017.
 - Vaezi AR, Akbari S, and Mohammadi MH, 2014. Study of rainfall processes in calcareous soils aggregates under laboratory conditions in NW Zanjan, Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 45(1), 87-94, doi.org/10.22059/ijswr.2014.51174 (In Persian with Englis Abstract).
 - Walkley A, and Black CA, 1947. Determination of organic matter in the soil by chromic acid digestion. *Soil Science*, 63, 251-264.
 - Wang JP, Zhuang PZ, Luan JY, Liu TH, Tan YR, and Zhang J, 2019. Estimation of unsaturated hydraulic conductivity of granular soils from particle size parameters. *Water*, 11(9), p.1826, doi.org/10.3390/w11091826.
 - Wu FC, and Huang HT, 2000. Hydraulic Resistance Induced by Deposition of Sediment in Porous Medium. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(7), 547-551, [doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2000\)126:7\(547\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2000)126:7(547)).
 - Wu J, 2008. Mechanism and process simulation for chemical clogging of the tailing dam. School of Environmental Science and Engineering Shanghai Jiao Tong University.
 - Yang JL, and Zhang GL, 2011. Water infiltration in urban soils and its effects on the quantity and quality of runoff. *Journal of Soils and Sediments*, 11(5), 751-761, doi.org/10.1007/s11368-011-0356-1.
 - Zaffar M, and Sheng-Gao LU, 2015. Pore size distribution of clayey soils and its correlation with soil organic matter. *Pedosphere*, 25(2), 240-249, [doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)60009-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60009-1).
 - Zaremehrjerdi M, Mahdian, MH, and Barkhordari J, 2013. Effect of floodwater spreading on soil infiltration in Sarchahan station of Hormozgan province. *Iran-Watershed Management Science & Engineering*, 20(7), 1-8, dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20089554.1392.7.20.1.3 (In Persian).
 - Zehtabiyan GhR, and Rahimzadeh Gh, 2010. Investigation of flood spreding effects on soil infiltration (Case study in Mousian region, province Ilam). *Natural Geography*, 3(9), 1-14 (In Persian).
 - Zhang S, Zhao G, Fan J, Yang M, Tian P, Mu X, and Geng R, 2024. Variations of soil infiltration in response to vegetation restoration and its influencing factors on the Loess Plateau. *Journal of Environmental Management*, 372, p.123356, doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123356.
 - Zieba Z, 2017. Influence of soil particle shape on saturated hydraulic conductivity. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 65(1), 80-87, doi.org/10.1515/johh-2016-0054.