



Investigating the Role of Soil Physical Properties on Water Infiltration Indices (Case Study: Zanjan Province)

Morteza Yavari^a, Alireza Vaezi^{a*} , and Mohammad Sadegh Askari^a

^a Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan Iran.

Article Info

Article Type

Research Article

Received

October 27, 2025

Revised

December 28, 2025

Accepted

January 10, 2026

Published online

March 16, 2026

Keywords

Bulk density,
Geometric mean diameter,
Particle size distribution,
Mean weight diameter,
Water-stable aggregates

*Corresponding author's email

vaezi.alireza@gmail.com

Extended Abstract

Background and Objectives: Infiltration is one of the most important hydraulic properties of soil, representing the entry of water into the soil, which usually occurs in a vertical direction. This soil property plays a crucial role in the natural water cycle and has significant implications for soil management. In semi-arid regions, this hydraulic property is particularly important not only for meeting the water requirements of rangeland and rainfed crops but also for reducing runoff and soil erosion. Several factors influence soil infiltration, and they can be generally categorized into three groups: (1) surface characteristics, (2) soil properties, and (3) climatic and environmental conditions. This study focused on soil physical properties, with the aim of quantifying the influence of a wide range of these properties on water infiltration and identifying the most important factors in selected soils in a semi-arid region.

Materials and Methods: To investigate the role of soil physical properties on soil water infiltration indices, 68 sites in a semi-arid climate of Zanjan province were selected. To capture sufficient variability for examining the effects of physical factors on soil water infiltration, the sites were chosen based on criteria such as land use type, vegetation cover, and soil texture, ensuring that the experiments were conducted on the predominant soils of the region. At each sampling site, 14 consecutive readings of infiltration depth were recorded at specific time intervals until the infiltration rate reached a steady state flow, for the calculation of various soil water infiltration indices. To evaluate soil water infiltration in detail, six key indices—cumulative infiltration (CI), initial infiltration (II), initial infiltration rate (IIR), final infiltration rate (FIR), mean infiltration rate (MIR), and effective infiltration depth (EID)—were determined. In addition to field infiltration measurements, disturbed and undisturbed soil samples were collected from the 0–60 cm soil depth as the active hydrological layer, and transferred to the laboratory. The following soil physical properties were determined: particle size distribution (PSD), gravel content, bulk density (BD), initial soil moisture, mean weight diameter of dry aggregates (MWD_{dry}), and mean weight diameter and geometric mean diameter of water-stable aggregates (MWD_{wet} and GMD_{wet}).

Results: Pearson correlation analysis revealed that the MWD_{wet} and GMD_{wet} of water-stable aggregates were significantly correlated with all infiltration indices ($p < 0.05$). Bulk density also exhibited significant correlations with CI, II, FIR, and MIR ($p < 0.05$). Moreover, multiple regression results indicated that physical properties including BD, initial soil moisture, gravel content, PSD, and GMD_{wet} are the main factors controlling water infiltration in these soils. According to one-way ANOVA, the soils were classified into four groups based on BD, MWD_{wet}, and GMD_{wet}. Significant differences were found among GMD_{wet} groups in CI, II, and FIR ($p < 0.05$). Differences among the groups of MWD_{wet} in CI and II were significant. Additionally, significant differences were found among the BD groups in CI. This study indicated that, along with

soil structure, the particle size distribution of soils can affect soil structure and porosity and, in turn, impact water infiltration in semi-arid soils.

Conclusion: The results showed that MWD_{wet} and GMD_{wet} of water-stable aggregates, along with BD, have the highest correlations with soil water infiltration indices. These three soil physical properties can be considered the most important determining factors in explaining soil water infiltration. It was also found that PSD indirectly influences MWD_{wet}, GMD_{wet}, and BD and, consequently, affects soil infiltration behavior. These findings emphasize the importance of PSD and soil structure in the process of soil water infiltration in semi-arid regions.

Cite this article: Yavari, M., Vaezi, A., Askari, M.S., 2026. Investigating the Role of Soil Physical Properties on Water Infiltration Indices (Case Study: Zanjan Province). Research Article, *Journal of Soil Research*, 39 (4), pp 421- 436.



DOI: [https://doi.org/ 10.22092/IJSR.2026.370662.796](https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.370662.796)
Publisher: Soil Science Society of Iran



بررسی نقش ویژگی‌های فیزیکی خاک بر شاخص‌های نفوذ آب در خاک (مطالعه موردی: استان زنجان)

مرتضی یآوری^۱، علی‌رضا واعظی^{۱*}  و محمدصادق عسکری^۱

^۱ گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۵</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۷</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۰</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۲۵</p> <p>واژه‌های کلیدی</p> <p>پایداری خاکدانه، توزیع اندازه ذرات، چگالی ظاهری، خاکدانه‌های پایدار در آب، میانگین وزنی قطر</p> <p>* ایمیل نویسنده مسئول vaezi.alireza@gmail.com</p>	<p>هدف این پژوهش بررسی نقش برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک در نفوذ آب به خاک در برخی خاک‌های منطقه نیمه‌خشک زنجان بود. بدین منظور، ۶۸ نقطه با تنوع بافت، کاربری و پوشش گیاهی، انتخاب و آزمایش‌های نفوذ با استفاده از استوانه مضاعف انجام شد. در نمونه‌های خاک (صفر تا ۶۰ سانتیمتر) ۱۲ ویژگی فیزیکی اندازه‌گیری شد. شش شاخص نفوذ شامل: نفوذ تجمعی (CI)، نفوذ اولیه (II)، شدت نفوذ اولیه (IIR)، شدت نفوذ نهایی (FIR)، شدت نفوذ متوسط (MIR) و عمق مؤثر نفوذ (EDI) تعیین شدند. نتایج همبستگی پیرسون نشان داد که میانگین وزنی نفوذ متوسط (MWD_{wet}) و هندسی (GMD_{wet}) قطر خاکدانه‌ها در حالت تر با همه شاخص‌های نفوذ رابطه معنی‌دار داشت ($p < 0.05$). چگالی ظاهری (BD) با CI، II، FIR و MIR همبستگی معنی‌دار داشت ($p < 0.05$). نتایج رگرسیونی نشان داد ویژگی‌های فیزیکی خاک شامل: چگالی ظاهری، رطوبت اولیه، سنگریزه، توزیع اندازه ذرات و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها نقش محوری در تعیین نفوذ آب در خاک داشتند. برای انجام تحلیل واریانس یک‌طرفه، خاک‌ها در چهار گروه بر مبنای BD، MWD_{wet} و GMD_{wet} تقسیم شدند. تفاوت معنی‌داری بین سطوح مختلف GMD_{wet} از نظر CI، II و FIR وجود داشت ($p < 0.05$). همچنین تفاوت بین سطوح مختلف MWD_{wet} از نظر CI و II معنی‌دار بود و در مورد سطوح مختلف BD، تفاوت‌ها تنها از نظر CI معنی‌دار بود. این پژوهش نشان داد که علاوه بر ساختمان خاک، توزیع اندازه ذرات اولیه نیز با اثرگذاری بر شاخص‌هایی مانند چگالی ظاهری، تخلخل و پایداری خاکدانه‌ها، نقش مؤثری در نفوذ آب در خاک‌های منطقه نیمه‌خشک دارد.</p>

استناد: یآوری، م.، واعظی، ع.، عسکری، م. ص.، ۱۴۰۴. بررسی نقش ویژگی‌های فیزیکی خاک بر شاخص‌های نفوذ آب در خاک (مطالعه موردی: استان

زنجان). مقاله پژوهشی، نشریه پژوهش‌های خاک، (۴) ۳۹، ص ۴۲۱-۴۳۶.

DOI: <https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.370662.796>



مقدمه

نفوذ به‌عنوان مهم‌ترین ویژگی هیدرولیکی خاک بوده و بیانگر ورود عمودی آب از سطح به درون خاک است (Feki et al., 2018). این فرآیند یکی از مهم‌ترین فرآیندهای فیزیکی خاک است که نقش مهمی در مدیریت خاک و چرخه آب در طبیعت ایفا می‌کند (Turner, 2006). این ویژگی هیدرولیکی خاک در مناطق نیمه‌خشک در کنار تأمین نیاز آبی گیاهان مرتعی و دیم، در کاهش رواناب سطحی و فرسایش خاک از اهمیت دوچندانی برخوردار است (Vaezi, 2018). عوامل مختلفی در نفوذپذیری خاک نقش داشتند که می‌توان به سه دسته کلی تقسیم کرد: ۱. ویژگی‌های مکانی و سطحی ۲. ویژگی‌های خاک ۳. ویژگی‌های اقلیمی و طبیعی (Zewide, 2021; Vaezi, 2018). در این میان ویژگی‌های فیزیکی خاک، به‌عنوان بخش جدایی‌ناپذیر از خصوصیات بنیادی خاک، نقش محوری در تعیین رفتار هیدرولوژیکی آن ایفا می‌کنند.

توانایی نفوذ آب در خاک که نشان‌دهنده سهولت حرکت عمودی آب در خاک است را با مفهوم نفوذآیی^۱ بیان می‌کنند. از میان ویژگی‌های خاک، توزیع اندازه ذرات اولیه مهم‌ترین ویژگی ذاتی خاک است که در نفوذآیی خاک نقش دارد (Zewide, 2021). در مخلوط‌های شن و سنگریزه، افزایش سنگریزه سبب کاهش حجم منافذ درشت می‌شود؛ درحالی‌که در مخلوط‌های سیلت و سنگریزه با افزایش مقدار سنگریزه حجم منافذ درشت افزایش می‌یابد (Beck-Broichsitter et al., 2023). ساختمان خاک شامل پایداری خاک‌دانه‌ها و توزیع منافذ تأثیر بسیار معنی‌داری بر شدت نفوذ آب دارد (Basset et al., 2023). ماده آلی، آهن، اکسیدهای آهن و آلومینیوم و بخش رس خاک از مهم‌ترین مواد سیمان‌کننده ذرات اولیه و تشکیل‌دهنده ذرات ثانویه (خاک‌دانه‌ها) است (Yavari et al., 2020). مدیریت خاک نیز نقشی تعیین‌کننده در نفوذ آب ایفا می‌کند. همچنین با کاهش چگالی ظاهری ناشی از عملیات خاک‌ورزی، نفوذپذیری خاک افزایش می‌یابد. تکرار بی‌رویه عملیات شخم منجر به افزایش چگالی ظاهری، کاهش خلل و فرج و فشردگی خاک و در نتیجه کاهش میزان نفوذپذیری خاک می‌شود (Gómez et al., 1999). تراکم و مقاومت مکانیکی خاک نیز یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده نفوذآیی در سیستم‌های کشاورزی مدرن محسوب می‌شود (Lipiec, et al., 2003). رطوبت خاک نیز در شدت نفوذ آب به خاک مؤثر است. هرچه رطوبت اولیه خاک بیشتر باشد شدت نفوذ اولیه خاک کمتر خواهد بود که این موضوع به علت شیب کمتر پتانسیل ماتریک بین سطح و عمق پایین خاک است (Hillel, 2003). از طرفی در خاک‌های شنی، تغییرات

رطوبت اولیه تأثیر کمی بر شدت نفوذ نهایی دارد، درحالی‌که در خاک‌های رسی این تأثیر می‌تواند بیشتر باشد (Assouline, 2013). نیمرخ خاک نیز عامل تعیین‌کننده دیگر در فرآیند نفوذ آب است. در خاک‌های با لایه دارای نفوذپذیری کم، نفوذ عمودی آب در خاک کم می‌شود و این عامل می‌تواند موجب بروز جریان جانبی آب در خاک شود (Beven and Germann, 1982).

پژوهش‌های فراوانی در خصوص عوامل مؤثر بر نفوذ آب به خاک در سراسر دنیا انجام شده است. Lado و همکاران (۲۰۰۴) ابراز داشتند که نفوذپذیری خاک با افزایش میزان رس، کاهش می‌یابد و از سوی دیگر حضور ذرات درشت‌تر مانند شن باعث افزایش شدت نفوذ می‌شود. (Assouline, 2006) اظهار داشت که افزایش هر چند اندک در چگالی ظاهری خاک، از طریق مسدود شدن منافذ خاک باعث کاهش قابل توجهی در نفوذپذیری می‌شود. Gómez و همکاران (۱۹۹۹) دریافتند که با کاهش چگالی ظاهری ناشی از عملیات خاک‌ورزی مناسب، نفوذپذیری افزایش می‌یابد. بسیاری از پژوهش‌ها از جمله Zeng و همکاران (۲۰۱۷) و Wu و Lv (۲۰۰۸) نشان داده‌اند که شدت نفوذ آب به خاک، مقدار نفوذ تجمعی و موقعیت جبهه رطوبتی، همگی با افزایش چگالی ظاهری خاک کاهش می‌یابند و تأثیر چگالی ظاهری خاک بر شدت نفوذ به تدریج با افزایش زمان تضعیف می‌شود. پژوهش‌های Li Zhuo و همکاران (۲۰۰۹) نشان داد که رابطه بین چگالی ظاهری خاک و تعداد منافذ درشت و حجم نفوذ تجمعی بسیار قوی است که نشان می‌دهد تأثیر چگالی ظاهری خاک بر ویژگی‌های نفوذ اساساً با تغییر تعداد منافذ درشت محقق می‌شود. نتایج پژوهش sedayeeazar و همکاران (۲۰۲۵) نشان داد بخش سنگریزه خاک می‌تواند با تأثیر بر مقدار چگالی ظاهری کل و بخش نرم خاک برای خاک‌های سنگریزه‌دار بر مقدار نفوذ تجمعی آب اثرگذار باشد. پژوهش Yang و همکاران (۲۰۲۴) نشان داد، ارتباط مثبت و معنی‌دار بین شدت نفوذ و سهم خاک‌دانه‌های درشت (بزرگتر از ۲ میلی‌متر) و نسبت عکس با خاک‌دانه‌های ریز (کوچکتر از ۰/۲۵ میلی‌متر) وجود دارد. Vaezi و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی تغییرات زمانی نفوذ آب باران به خاک تحت تأثیر محتوای رطوبت اولیه خاک پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که تخلخل‌های درشت خاک نقش اساسی در تعیین شدت نفوذ خاک داشتند. Abu-Hamdeh و همکاران (۲۰۰۶) بیان کردند با افزایش پوشش گیاهی و در نتیجه محتوای ماده آلی خاک، شاخص‌هایی مانند میانگین هندسی و وزنی قطر خاک‌دانه‌ها و پایداری ساختمان خاک افزایش می‌یابند و سبب افزایش نفوذپذیری خاک می‌شوند. بررسی‌های Liu و همکاران (۲۰۱۱) مشخص کرد که نفوذآیی خاک با افزایش مقدار رطوبت

¹ Infiltrability

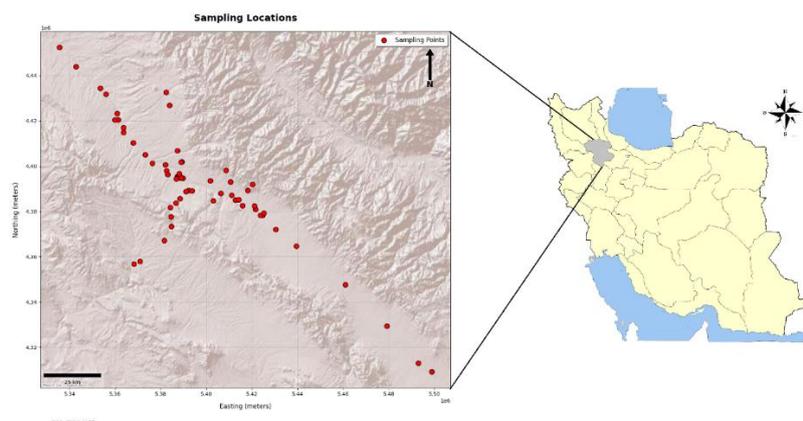
مواد و روش‌ها

منطقه مورد بررسی

به منظور بررسی نقش ویژگی‌های فیزیکی خاک بر شاخص‌های نفوذ آب به خاک، مناطقی از اقلیم نیمه‌خشک استان زنجان به‌عنوان محدوده مورد مطالعه انتخاب شد (شکل ۱). استان زنجان در شمال غرب ایران و در عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۱۵ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۴۵ درجه و ۲۵ دقیقه شرقی از نصف‌النهار گرینویچ واقع شده و مساحتی حدود ۲۱۸۴۱ کیلومتر مربع را به خود اختصاص داده است. بر اساس آمار بلندمدت سازمان هواشناسی کشور، میانگین بارش سالانه منطقه بین ۲۵۰ میلی‌متر در نواحی پست و تا حدود ۵۰۰ میلی‌متر در ارتفاعات متغیر است. همچنین میانگین دمای سالانه بین ۱۰ تا ۱۲ درجه سلسیوس بوده و حداقل مطلق دما در فصل زمستان حدود ۲۰- درجه سلسیوس و حداکثر مطلق دما در تابستان حدود ۳۵ درجه سلسیوس گزارش شده است (سازمان هواشناسی کشور، ۱۴۰۱).

اولیه خاک کاهش می‌یابد که ناشی از کاهش شیب هیدرولیکی در جبهه رطوبتی است.

با توجه به شرایط اقلیمی نیمه‌خشک ایران و چالش‌های جدی در زمینه محدودیت منابع آب، شناخت دقیق فرآیندهای مرتبط با نفوذ آب در خاک از اهمیت زیادی برخوردار است. نفوذ آب به خاک یکی از فرآیندهای کلیدی در چرخه هیدرولوژی و مدیریت بهینه منابع آب و خاک است که تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل فیزیکی و شیمیایی خاک قرار دارد. با وجود پژوهش‌های متعدد، هنوز بررسی جامعی که نقش کمی هر یک از این عوامل و همچنین برهمکنش و نقش ترکیبی آنها را مورد بررسی قرار داده و متغیرهای مؤثر را اولویت‌بندی کند، صورت نگرفته است. از این رو، این پژوهش با تمرکز بر ویژگی‌های فیزیکی خاک و با هدف تعیین نقش کمی طیف وسیعی از ویژگی‌های فیزیکی خاک در نفوذ آب و شناسایی ویژگی‌های مهم تعیین‌کننده آن در برخی خاک‌های منطقه نیمه‌خشک زنجان انجام شد. نتایج این پژوهش می‌تواند به درک بهتر برهمکنش بین ویژگی‌های خاک و فرآیند نفوذ آب به خاک کمک کرده و مبنایی برای مدیریت مؤثرتر منابع آب در این مناطق فراهم آورد.



شکل ۱- موقعیت نقاط نمونه‌برداری در منطقه مورد مطالعه (استان زنجان، ۱۴۰۳)
Figure 1. Location of sampling sites in the study area (Zanjan Province, 2024)

طی فصل تابستان در شرایطی که رطوبت اولیه خاک کمترین بود، انجام گرفت. طی انجام آزمایش‌ها، رطوبت اولیه خاک در هر نقطه به‌طور هم‌زمان اندازه‌گیری شد. همچنین، در صورت وقوع بارش، عملیات اندازه‌گیری نفوذ حداقل تا دو روز پس از پایان بارش به تعویق افتاد تا رطوبت خاک به شرایط پایدار نزدیک شود. در این پژوهش، برای تعیین میزان نفوذ آب به خاک در نقاط مورد نظر، از حلقه‌های دوگانه استفاده شد. دو حلقه هم‌مرکز با قطر حلقه داخلی ۳۰ سانتی‌متر و قطر حلقه خارجی ۶۰ سانتی‌متر تا عمق ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر در خاک فرو رانده شدند تا از نشست جانبی

آزمایش‌های صحرائی و نمونه‌برداری خاک

به منظور دستیابی به تنوع لازم برای بررسی عوامل فیزیکی مؤثر بر نفوذ آب به خاک، ۶۸ نقطه با در نظر گرفتن معیارهایی مانند نوع کاربری اراضی، پوشش گیاهی، بافت و ساختمان خاک و اطلاعات موجود از نقشه‌های خاک‌شناسی مد نظر قرار گرفت؛ به طوری که انجام آزمایش در خاک‌های غالب منطقه صورت گیرد (شکل ۱). بر این اساس مجموعاً ۴۵ نقطه در کاربری مرتع، ۱۳ نقطه در کاربری زراعی، ۸ نقطه در کاربری باغی و ۲ نقطه در کاربری جنگلی انتخاب شد. آزمایش‌ها عمدتاً

مختلف از نظر نفوذپذیری مفید است. عمق مؤثر نفوذ (EID) نیز بر اساس قانون بقای جرم آب در خاک با استفاده از رابطه Hillel, (1982) تخمین زده شد (رابطه ۱). عمق مؤثر نفوذ برای برآورد تقریبی پیشروی رطوبت در خاک‌های مختلف تعیین شد:

$$EID = \frac{I}{\theta_{FC} - \theta_i} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن EID: عمق مؤثر نفوذ (cm)، I: نفوذ تجمعی خاک (cm)، θ_{FC} : رطوبت حجمی در ظرفیت زراعی ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)، و θ_i : رطوبت حجمی اولیه خاک ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) است. به این ترتیب شش شاخص نفوذ به‌عنوان مبنایی برای تحلیل نفوذ آب به خاک مورد استفاده قرار گرفتند.

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی خاک

به‌منظور بررسی ارتباط ویژگی‌های فیزیکی خاک با شاخص‌های نفوذ آب، مجموعه‌ای از آزمایش‌های میدانی و آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های خاک منطقه مورد مطالعه انجام گرفت. بدین‌منظور توزیع اندازه ذرات اولیه خاک با استفاده از دو روش ترکیبی، (۱) هیدرومتری (Yavari et al., 2021) برای تعیین بخش رس و سیلت و (۲) الک برای جداسازی پنج جزء شن (۰/۰۵ - ۱، ۱-۲، ۰/۰۱ - ۰/۰۵، ۰/۲۵ - ۰/۰۱، ۰/۲۵ - ۰/۰۵ - ۰/۰۱ - ۰/۰۵ میلی‌متر) انجام شد. به‌منظور بررسی ویژگی‌های سنگریزه‌ای و تخلخل کل از دستورالعمل‌های استاندارد ارائه‌شده توسط Dane و Topp (۲۰۲۰) استفاده شد. بخش سنگی (ذرات معدنی بزرگتر از ۲ میلی‌متر) با روش دستی و با استفاده از سری الک در بازه‌های ۶۴-۲۵۶ (قلوه‌سنگ) و ۶۴-۲ میلی‌متر (سنگریزه) انجام شد (WRB, 2014). ذرات درشت‌تر از ۲۵۶ میلی‌متر (سنگ درشت) در نمونه‌های خاک رؤیت نشد. چگالی حقیقی خاک‌ها طبق روش Blake و Hartge (۱۹۸۶) و چگالی ظاهری با استفاده از سیلندر فلزی با ابعاد ۵ در ۵ سانتی‌متر برای عمق صفر الی ۲۰ سانتی‌متری به روش Jones, (2018) اندازه‌گیری گردید. متوسط اندازه خاک‌دانه‌ها با روش الک خشک و پایداری خاک‌دانه‌ها با روش الک تر بر اساس روش Le Bissonnais, (2016) تعیین شد. بدین‌منظور در الک خشک خاک‌دانه‌ها با استفاده از سری الک با قطر چشمه در بازه‌های ۸-۵/۶، ۵/۶-۴/۷۵، ۴/۷۵-۳/۷۵، ۳/۷۵-۲، ۲-۱، ۱-۰/۵ و ۰/۵-۰/۲۵ میلی‌متر به روش دستی تقسیم شدند. پایداری خاک‌دانه نیز در روش الک تر برای خاک‌دانه‌های کوچکتر از ۸ میلی‌متر در همان بازه‌های اندازه‌ای تعیین شد. در روش الک تر، پس از خیساندن آرام، تدریجی و از سمت پایین خاک‌دانه‌ها بر روی کاغذ صافی (به مدت ۱۰ دقیقه)، از دستگاه الک نوسانی با

جولوگیری شود (Dane and Topp, 2020; Bouwer, 1986). سعی شد ارتفاع آب داخل حلقه داخلی و خارجی با تزریق آب به داخل حلقه‌ها در طول آزمایش بین ۵ الی ۱۰ سانتی‌متر ثابت نگه داشته شود. برای انجام آزمایش‌ها از آب معمولی با کیفیت مناسب (آب شهری) استفاده شد که شوری آن در حد مجاز آب کشاورزی بوده و اثر قابل‌توجهی بر فرآیند نفوذ نداشته باشد. در هر نقطه، چهارده قرائت متوالی از عمق نفوذ آب در فواصل زمانی مشخص (۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۸۰ و ۹۰ دقیقه) تا رسیدن شدت نفوذ به حالت پایدار، برای محاسبه شاخص‌های مختلف نفوذ آب به خاک ثبت گردید. علاوه بر انجام آزمایش‌های صحرائی نفوذ آب، برای بررسی مجموعه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی، نمونه‌هایی از عمق صفر تا ۶۰ سانتیمتری به‌عنوان لایه فعال هیدرولوژیکی خاک (Brady and Weil, 2017) به‌صورت دست‌خورده و دست‌نخورده تهیه و به آزمایشگاه انتقال داده شد.

تعیین شاخص‌های نفوذ آب به خاک

به‌منظور بررسی دقیق نفوذ آب در خاک، شش شاخص کلیدی شامل: (۱) نفوذ تجمعی (CI)^۲، (۲) نفوذ اولیه (II)^۳، (۳) شدت نفوذ اولیه (IIR)^۴، (۴) شدت نفوذ نهایی (FIR)^۵، (۵) شدت نفوذ متوسط (MIR)^۶ و (۶) عمق مؤثر نفوذ (EID)^۷ از داده‌های صحرائی نفوذ آب استخراج شد و مورد ارزیابی قرار گرفتند. داده‌های لازم برای محاسبه این شاخص‌ها با آزمایش نفوذ با حلقه‌های دوگانه در شرایط میدانی ثبت شدند. نفوذ تجمعی (CI) بیانگر مجموع عمق آب نفوذ یافته به خاک در طول مدت آزمایش بوده و بر حسب سانتی‌متر گزارش می‌شود و معیاری از ظرفیت کلی خاک در جذب آب طی زمان است. نفوذ اولیه (II) به‌صورت عمق آب نفوذ یافته در نخستین بازه زمانی (۳۰ ثانیه ابتدایی) تعریف می‌شود (ASTM, 2009) و نشان‌دهنده جذب اولیه خاک در حالت خشک یا نیمه‌خشک سطحی است. شدت نفوذ اولیه (IIR) از تقسیم مقدار نفوذ اولیه بر مدت زمان متناظر (۳۰ ثانیه ابتدایی) آن محاسبه شد (Horton, 1940). شدت نفوذ نهایی (FIR)، نشان‌دهنده شدت نفوذ ماندگار در دقایق پایانی آزمایش است. این شاخص، زمانی قابل محاسبه است که تغییرات شدت نفوذ بین چند بازه زمانی متوالی بسیار اندک باشد (کمتر از ۱۰ درصد). به‌طوری‌که منحنی نفوذ تقریباً به حالت پایدار برسد. شدت نفوذ متوسط (MIR)، از تقسیم نفوذ تجمعی بر کل زمان آزمایش به‌دست می‌آید و میانگین شدت نفوذ در طول کل دوره نفوذ را ارائه می‌دهد. این شاخص برای مقایسه کلی عملکرد خاک‌های

⁵ Final Infiltration Rate

⁶ Mean Infiltration Rate

⁷ Effective Infiltration Depth

² Cumulative Infiltration

³ Initial Infiltration

⁴ Initial Infiltration Rate

گرفت. در انتخاب مدل نهایی، علاوه بر معنی‌داری ضرایب، معیارهایی مانند ضریب تعیین و ضریب تبیین اصلاح‌شده، آزمون چندخطی بودن متغیرها با استفاده از شاخص Variance (VIF) Inflation Factor مورد توجه قرار گرفت (کمتر از ۱۰). ضریب تعیین به‌عنوان شاخص اصلی توان تبیین مدل است. همچنین ضریب تبیین اصلاح‌شده بیانگر میزان واقعی توان مدل در توضیح تغییرات متغیر وابسته، با در نظر گرفتن تعداد متغیرهای مستقل است. این ضریب با همبستگی پیرسون که صرفاً شدت رابطه خطی بین دو متغیر منفرد را نشان می‌دهد، تفاوت مفهومی دارد. تحلیل داده، ترسیم نمودار و مقایسه میانگین، با استفاده از نرم‌افزارهای (2016) Excel، زبان برنامه‌نویسی Python (x.3)، SPSS (2022)، R در محیط Posit Cloud انجام شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مورد بررسی

مقادیر اندازه‌گیری‌شده ویژگی‌های فیزیکی خاک در (جدول ۱) نشان داده شده است. نتایج نشان داد مقادیر چگالی ظاهری از ۰/۸۳ در خاک‌های سست تا ۱/۵۲ g cm⁻³ متغیر بود (میانگین ۱/۰۹ g cm⁻³) که بیانگر اختلاف در وضعیت تراکم خاک‌هاست. تخلخل کل به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی تعیین‌کننده ظرفیت ذخیره و انتقال آب در خاک، در بازه‌ای بین ۳۶/۶۵ تا ۶۶/۶۸ درصد (میانگین ۵۵/۹ درصد) اندازه‌گیری شد. میانگین هندسی و وزنی قطر خاک‌دانه‌ها بین ۰/۰۱ تا ۲/۹۰ میلی‌متر نوسان داشت. میانگین درصد رس، سیلت و شن به ترتیب ۲۴/۹۸، ۳۱/۸۷ و ۴۳/۱۴ درصد محاسبه شد. پراکندگی داده‌ها با انحراف معیارهای نسبتاً زیاد (رس ۸/۴۱ درصد و سیلت ۹/۲۱ درصد) نشان از ناهمگونی بافت در خاک‌های مورد بررسی داشت. پراکندگی زیاد ویژگی‌های خاک نشان می‌دهد که خاک‌های منطقه می‌تواند از نظر نفوذپذیری، ظرفیت نگهداری آب و تخلخل دارای تنوع زیادی باشد. رطوبت اولیه خاک بین ۳/۶۶ تا ۲۵/۱۵ درصد (در موارد استثنایی) متغیر بود. میانگین رطوبت اولیه برابر با ۱۰/۷۳ محاسبه شد. مقدار ضریب تغییرات (۴۰/۷۵ درصد) این ویژگی بیانگر تغییرپذیری آن در بین نمونه‌ها است. شاخص CI با میانگین ۳۶/۰۶ سانتی‌متر، انحراف معیار ۲۵/۳۲ و دامنه تغییرات ۷/۹۵ تا ۱۳۰/۴۰ سانتی‌متر در دسته شاخص‌هایی با مقادیر میانی قرار گرفت. شدت نفوذ متوسط (MIR) نیز با میانگین ۲۴/۰۸ سانتی‌متر بر ساعت و انحراف معیار ۱۶/۸۷ دامنه قابل‌توجهی داشت (از ۵/۳۰ تا ۸۶/۹۳ سانتی‌متر بر ساعت). شاخص IIR نیز دارای میانگین زیاد (۹۹/۳۵ سانتی‌متر بر ساعت) با انحراف معیار ۸۷/۴۶ و دامنه‌ای از ۱۲/۰۰ تا ۴۸۰/۰۰ سانتی‌متر بر ساعت بود. در مورد FIR، میانگین ۱۷/۳۶ سانتی‌متر بر ساعت، انحراف معیار

فرکانس نیم دور در ثانیه استفاده شد. سپس میانگین وزنی (MWD_{wet and dry}) و میانگین هندسی (GMD_{wet and dry}) قطر خاک‌دانه‌ها در دو حالت تر (wet) و خشک (dry) محاسبه شدند. میانگین وزنی (MWD_{wet and dry}) از روابط ۲ و ۳ و میانگین هندسی (GMD_{wet and dry}) قطر خاک‌دانه‌ها از روابط ۲ و ۴ بدست آمد:

$$W_i = \frac{W_i(a+s) - W_i(s)}{\sum_{i=1}^n W_i(a+s) - \sum_{i=1}^n W_i(s)} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$MWD_{wet \text{ and } dry} = \sum_{i=1}^n W_i \times \bar{X}_i \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$GMD_{wet \text{ and } dry} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \log \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad \text{رابطه (۴)}$$

در این روابط، W_i : جرم خاک‌دانه‌های باقیمانده روی هر الک بر حسب گرم به جرم کل خاک‌دانه‌ها بر حسب گرم، $W_i(a+s)$: جرم خاک باقیمانده روی هر الک بر حسب گرم، $W_i(s)$: جرم شن روی هر الک بر حسب گرم و \bar{X}_i : میانگین قطر خاک‌دانه‌ها روی هر الک بر حسب میلی‌متر است.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای تحلیل داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های میدانی و آزمایشگاهی، ترکیبی از آمار توصیفی و استنباطی مورد استفاده قرار گرفت: (۱) آمار توصیفی در ابتدا، برای کلیه متغیرها مانند میانگین، انحراف معیار، حداقل و حداکثر ویژگی محاسبه شد. آزمون نرمال بودن برای بررسی توزیع داده‌ها و تعیین مناسب بودن استفاده از روش‌های پارامتری، آزمون کولموگروف - اسمیرنوف انجام شد. (۲) به‌منظور بررسی رابطه بین شاخص‌های نفوذ آب با ویژگی‌های فیزیکی خاک، ضریب همبستگی پیرسون محاسبه گردید. (۳) در گام بعد، برای بررسی اثر طبقه‌بندی‌شده‌ی ویژگی‌های فیزیکی خاک از آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه استفاده شد. به‌طوری‌که ۶۸ نمونه مورد بررسی بر اساس ویژگی‌های مختلف فیزیکی خاک و با توجه به میانگین مقادیر این ویژگی‌ها، در قالب گروه‌های مقایسه‌ای طبقه‌بندی شده و سپس با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفتند. گروه‌های مقایسه‌ای به‌منظور کاهش پراکندگی داده‌ها، افزایش قدرت تفکیک آماری و امکان مقایسه معنی‌داری اثر ویژگی‌های فیزیکی خاک بر شاخص‌های نفوذ آب به خاک انجام شد. (۴) برای ارزیابی تأثیر هم‌زمان چند متغیر فیزیکی بر شاخص‌های نفوذ، مدل‌های رگرسیون چندگانه خطی با استانداردسازی داده‌ها توسعه یافت. این مدل‌ها پیش‌بینی محور نبوده و صرفاً برای بررسی نظری ارتباط ویژگی‌های فیزیکی با شاخص‌های نفوذ مورد بررسی قرار

حداقل ۲۶/۷۸ سانتی‌متر و حداکثر ۸۷۱/۸۷ سانتی‌متر دامنه تغییرات بسیار وسیعی را نشان داد. به‌طور کلی، شاخص‌های نفوذ آب در این پژوهش دارای تغییرپذیری زیادی بودند.

۱۱/۰۴ سانتی‌متر بر ساعت و دامنه ۳/۰۰ تا ۴۴/۴۰ سانتی‌متر بر ساعت ثبت شد. شاخص II با میانگین ۰/۸۳ سانتی‌متر و انحراف معیار ۰/۷۳ سانتی‌متر در محدوده ۰/۱۰ تا ۴/۰۰ سانتی‌متر تغییر کرد. در نهایت، شاخص EID با میانگین ۱۹۰/۰۷ سانتی‌متر،

جدول ۱- آماره‌های توصیفی ویژگی‌های فیزیکی خاک

Table 1. Descriptive statistics of physical soil properties

CV	SD	Mean	Max	Min	Variable
35.04	15.12	43.15	82.75	5.90	Sand (%)
28.91	9.21	31.87	51.28	6.44	Silt (%)
33.69	8.42	24.98	45.14	6.43	Clay (%)
40.49	11.47	28.33	61.29	5.09	TRF (%)
39.13	10.56	26.98	61.29	5.09	G (%)
11.08	0.12	1.09	1.52	0.83	BD (g cm ⁻³)
10.01	5.60	55.95	66.68	36.65	n (%)
40.75	4.37	10.73	25.15	3.66	Θ _i (%)
15.84	0.15	0.94	1.25	0.67	GMD _{dry} (mm)
26.87	0.48	1.79	2.90	0.67	MWD _{dry} (mm)
18.27	0.13	0.71	1.09	0.41	GMD _{wet} (mm)
46.48	0.38	0.82	1.98	0.09	MWD _{wet} (mm)
70.21	25.32	36.06	130.40	7.95	CI (cm)
88.03	0.73	0.83	4.00	0.10	II (cm)
88.03	87.46	99.35	480.00	12.00	IIR (cm h ⁻¹)
63.57	11.04	17.36	44.40	3.00	FIR (cm h ⁻¹)
70.06	16.87	24.08	86.93	5.30	MIR (cm h ⁻¹)
73.10	138.95	190.07	871.87	26.78	EID (cm)

TRF: Total Rock Fragments, G: Gravel, BD: Bulke Density, n: Total Porosity, Θ_i: Initial Moisture, GMD_{dry}: Geometric Mean Diameter Dry, MWD_{dry}: Mean Weight Diameter Dry, GMD_{wet}: Geometric Mean Diameter Wet, MWD_{wet}: Mean Weight Diameter Wet, CI: Cumulative Infiltration, II: Initial Infiltration, IIR: Initial Infiltration Rate, FIR: Final Infiltration Rate, MIR: Mean Infiltration Rate, EID: Effective Infiltration Depth.

ارتباط شاخص‌های نفوذ با ویژگی‌های فیزیکی خاک

نتایج تحلیل همبستگی پیرسون برای روابط بین ویژگی‌های فیزیکی خاک و شاخص‌های نفوذ آب، نشان داد که از میان ۱۲ ویژگی فیزیکی اندازه‌گیری شده، بیشترین همبستگی مربوط به MWD_{wet} و GMD_{wet} و BD بود (جدول ۲). بین MWD_{wet} و GMD_{wet} با هر دو شاخص CI و MIR همبستگی معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد وجود داشت (p < 0.01). همچنین این دو ویژگی با تمامی شاخص‌های نفوذ آب به خاک رابطه معنی‌دار داشتند. مرور پژوهش‌های پیشین نیز مؤید این یافته است؛ به‌طوری‌که Lal و Bronick (۲۰۰۵) افزایش پایداری

خاک‌دانه‌ها را سبب حفظ منافذ درشت خاک و افزایش نفوذ در سیستم‌های مدیریتی پایدار بیان کردند. همچنین نتایج پژوهش Blanco-Canqui و Ruis (۲۰۱۸) نیز حاکی از اثر معنی‌دار افزایش پایداری خاک‌دانه‌ها بر شدت‌های نفوذ متوسط و نهایی آب به خاک است. در ادامه، این پژوهش‌گران ابراز داشتند فروپاشی خاک‌دانه‌ها در تماس با آب و تشکیل سله، از مهم‌ترین عوامل کاهش نفوذ در خاک‌های زراعی است.

جدول ۲- همبستگی بین شاخص‌های نفوذ و برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک

Table 2. Correlation between infiltration indices and selected soil physical properties

MWD _{dry}	GMD _{dry}	G	TRF	Sand	Clay	Silt	n	BD	Variables
								1.00	BD
							1.00	-0.83**	n
						1.00	0.44**	-0.51**	Silt
					1.00	0.47**	0.45**	-0.32**	Clay
				1.00	-0.84**	-0.87**	-0.52**	0.49**	Sand
			1.00	0.24*	-0.25*	-0.16	-0.12	0.12	TRF
		1.00	0.93**	0.31**	-0.29*	-0.24*	-0.17	0.17	G
	1.00	-0.02	-0.04	-0.44**	0.45**	0.31**	0.31**	-0.39**	GMD _{dry}
1.00	0.73**	-0.49**	-0.48**	-0.52**	0.48**	0.42**	0.40**	-0.44**	MWD _{dry}
0.45**	0.63**	-0.07	-0.06	-0.36**	0.31**	0.31**	0.34**	-0.53**	Θ _i
0.08	0.52**	0.43**	0.35**	-0.03	0.03	0.03	0.22	-0.39**	GMD _{wet}
0.25*	0.58**	0.18	0.16	-0.24*	0.19	0.23	0.41**	-0.57**	MWD _{wet}
0.10	0.20	0.16	0.19	0.03	-0.05	0.00	0.25*	-0.47**	CI
0.16	0.26*	0.15	0.18	-0.11	0.08	0.11	0.25*	-0.38**	II
0.16	0.26*	0.15	0.18	-0.11	0.08	0.11	0.25*	-0.38**	IIR
0.10	0.10	0.07	0.12	-0.01	-0.03	0.04	0.26*	-0.42**	FIR
0.10	0.20	0.16	0.19	0.03	-0.05	0.00	0.25*	-0.47**	MIR
0.03	0.03	0.17	0.18	0.32**	-0.22	-0.33**	-0.13	-0.01	EID
EID (cm)	MIR (cm/h)	FIR (cm/h)	IIR (cm/h)	II (cm)	CI (cm)	MWD _{wet} (mm)	GMD _{wet} (mm)	Θ _i (%)	Variables
								1.00	Θ _i
							1.00	0.35**	GMD _{wet}
						1.00	0.86**	0.40**	MWD _{wet}
				1.00	0.79**	0.39**	0.39**	0.11	CI
				1.00	0.79**	0.39**	0.39**	0.10	II
			1.00	1.00	0.79**	0.39**	0.39**	0.10	IIR
		1.00	0.60**	0.60**	0.87**	0.36**	0.37**	0.07	FIR
	1.00	0.87**	0.79**	0.79**	1.00**	0.47**	0.49**	0.11	MIR
1.00	0.74**	0.67**	0.51**	0.51**	0.74**	0.23*	0.31**	0.05	EID

BD: Bulke Density, n: Total Porosity, TRF: Total Rock Fragments, G: Gravel, Θ_i: Initial Moisture, GMD_{dry}: Geometric Mean Diameter Dry, MWD_{dry}: Mean Weight Diameter Dry, GMD_{wet}: Geometric Mean Diameter Wet, MWD_{wet}: Mean Weight Diameter Wet, CI: Cumulative Infiltration, II: Initial Infiltration, IIR: Initial Infiltration Rate, FIR: Final Infiltration Rate, MIR: Mean Infiltration Rate, EID: Effective Infiltration Depth.

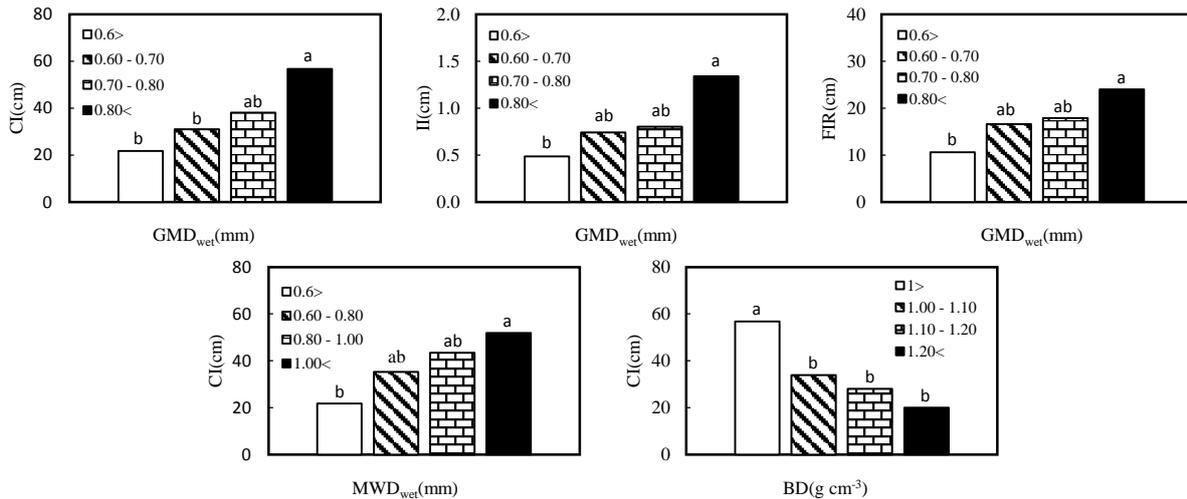
همبستگی معنی‌دار بین توزیع اندازه ذرات با ویژگی مختلف فیزیکی وجود داشت. این یافته مبین این است که توزیع اندازه ذرات علاوه بر اثر مستقیم، بیشترین اثر را به صورت غیرمستقیم و در ارتباط با سایر ویژگی‌های فیزیکی بر شاخص‌های نفوذ می‌گذارند. توزیع اندازه ذرات از راه اثرگذاری بر شاخص‌هایی مانند چگالی ظاهری، تخلخل و پایداری خاک‌دانه‌ها تأثیر قابل توجهی بر فرآیند نفوذ داشت. این امر اهمیت ویژگی توزیع اندازه ذرات را بیشتر نمایان می‌کند؛ بنابراین، این یافته اهمیت بنیادی ویژگی‌های بافتی و کانی‌شناسی خاک را در تحلیل فرآیندهای هیدرولوژیکی برجسته می‌سازد. نفوذ آب به خاک فرآیند بسیار پیچیده‌ای است و ویژگی‌های مختلف خاک به صورت مستقیم و غیرمستقیم بر آن اثرگذار هستند. آنچه که حائز اهمیت است برآیند اثر این ویژگی‌ها بر فرآیند نفوذ است.

نتایج نشان داد، BD با شاخص‌های مختلف نفوذ رابطه منفی معنی‌داری نشان داد. مقادیر ضریب همبستگی بین BD با نفوذ تجمعی، نفوذ اولیه، شدت نفوذ نهایی و شدت نفوذ متوسط به ترتیب برابر ۰/۴۷- (p < 0.01)، ۰/۳۸- (p < 0.05)، ۰/۴۲- (p < 0.05) و 0.05 < و ۰/۴۷- (p < 0.01) بود. در این راستا، Talat و همکاران (۲۰۲۵) نیز بیان کردند، افزایش چگالی ظاهری خاک (از ۱ به ۱/۴۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب) می‌تواند منجر به کاهش محسوس شدت نفوذ شود. از طرف دیگر، چگالی ظاهری و درصد شن و سیلت به ترتیب با ضریب تبیین ۰/۴۹ و ۰/۵۱- در سطح احتمال ۵ درصد همبستگی معنی‌دار داشت. تخلخل کل خاک نیز با میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها در حالت مرطوب در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود (p < 0.05). در بخش سنگی، بین TRF و G با GMD_{wet} ضرایب همبستگی ۰/۳۵ و ۰/۴۳- مشاهده شد که از نظر آماری معنی‌دار بودند. با بررسی‌های بیشتر مشخص شد

همبستگی بین شاخص‌های نفوذ و ویژگی‌های فیزیکی خاک

بیش از ۱ میلی‌متر بیشترین افزایش نفوذ اولیه را نشان داد، به طوری که در این سطح نسبت به بازه ۱ تا ۰/۸ میلی‌متر، نفوذ اولیه ۳۹/۴۶ درصد افزایش داشت. این موضوع بیانگر آن است که پایداری خاک‌دانه‌ها نقش مهمی در تسهیل یا محدودسازی نفوذ دارد و می‌تواند با ایجاد منافذ پیوسته‌تر و پایداری بیشتر در برابر تخریب ناشی از آب، موجب افزایش نفوذپذیری شوند (Bronick, Le Bissonnais, 1996; and Lal, 2005). تأثیر ساختمان خاک که عمدتاً توسط پایداری خاک‌دانه‌ها تعیین می‌شود، نقش کلیدی در نفوذپذیری دارد. یافته‌های این پژوهش با پژوهش‌های متعددی هم‌خوانی دارد. Kay و Angers (۱۹۹۹) نشان دادند که خاک‌دانه‌های پایدار با ایجاد منافذ درشت (قطر بزرگتر از ۳۰ میکرون) مسیری درشت‌تری در پیکره خاک برای نفوذ آب ایجاد می‌کنند. این پژوهشگران گزارش کردند که در خاک‌های با پایداری خاک‌دانه‌ای بالا، شدت نفوذ نهایی می‌تواند تا ۵ برابر بیشتر از خاک‌های با ساختمان تخریب شده باشد.

بر اساس نتایج تحلیل همبستگی پیرسون، سه ویژگی فیزیکی شامل GMD_{wet} ، BD و MWD_{wet} ، بیشترین همبستگی را با شاخص‌های نفوذ آب در خاک نشان دادند. نمودارهای میله‌ای با سطوح مختلف میانگین GMD_{wet} ، BD و MWD_{wet} در ارتباط با CI ، II و FIR در (شکل ۲) نمایش داده شده است. نتایج حاصل از تحلیل واریانس نشان داد که تفاوت میانگین نفوذ تجمعی در بین سطوح مختلف چگالی ظاهری از نظر آماری معنی‌دار است ($p < 0.01$). این یافته با پژوهش‌های پیشین (Hillel, 1998; Yilmaz et al., 2019) هم‌خوانی دارد و نشان می‌دهد که افزایش چگالی ظاهری می‌تواند با کاهش تخلخل مؤثر، حرکت عمقی آب را محدود سازد. GMD_{wet} نیز رابطه‌ی معنی‌داری با نفوذ تجمعی نشان داد ($p < 0.01$). همچنین، این ویژگی با نفوذ اولیه و شدت نفوذ نهایی در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌دار آماری داشت ($p < 0.05$). تفاوت بین سطوح MWD_{wet} ، برای نفوذ تجمعی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود ($p < 0.01$). این ویژگی همچنین با نفوذ اولیه تفاوت معنی‌دار نشان داد ($p < 0.05$)، اما تفاوت معنی‌داری در رابطه با شدت نفوذ نهایی مشاهده نشد. نتایج نشان داد که در BD کمتر از ۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب، نفوذ تجمعی نسبت به بازه ۱ تا ۱/۱۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب، معادل ۳۴/۶۷ درصد افزایش داشت. این مقدار در مقایسه با BD بیش از ۱/۲۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب، به طور چشمگیری بیشتر بوده و افزایشی نزدیک به دو برابر (۱۸۴/۱۷ درصد) را نشان داد. این نتایج با یافته‌های Assouline (2013) هم‌خوانی دارد؛ به طوری که آن‌ها گزارش کردند با افزایش چگالی ظاهری، هدایت هیدرولیکی اشباع و نفوذ کاهش می‌یابد. همچنین GMD_{wet} با افزایش از ۰/۶ میلی‌متر به بیش از ۰/۸ میلی‌متر، با افزایش ۶۱/۶۰ درصدی در نفوذ تجمعی همراه است. افزون بر این، با افزایش MWD_{wet} از کمتر از ۰/۶ به بیش از ۱ میلی‌متر، نفوذ تجمعی ۵۷/۹۲ درصد افزایش نشان داد. در بررسی سطوح مختلف GMD_{wet} ، سطح بیش از ۰/۸ میلی‌متر بیشترین تغییرات افزایشی در نفوذ اولیه را به خود اختصاص داد، به گونه‌ای که در این سطح نسبت به بازه قبلی (۰/۸-۰/۷ میلی‌متر) میزان نفوذ اولیه ۴۰ درصد و نسبت به سطح کمتر از ۰/۶ میلی‌متر، ۶۳/۶۶ درصد افزایش داشت. همچنین در بین سطوح مختلف MWD_{wet} ، سطح



شکل ۲- تغییرات نفوذ تجمعی (CI)، نفوذ اولیه (II) و شدت نفوذ نهایی (FIR) با ویژگی‌های چگالی ظاهری (BD)، میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها در حالت مرطوب (GMD_{wet}) و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در حالت مرطوب (MWD_{wet}). تحلیل واریانس یک‌طرفه در سطوح معنی‌داری ۵ و ۱ درصد است. حروف متفاوت بالای ستون‌ها بیانگر اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها است.

Figure 2. Variations in cumulative infiltration (CI), initial infiltration rate (FIR) in relation to bulk density (BD), geometric mean diameter of soil aggregates under wet conditions (GMD_{wet}), and mean weight diameter of soil aggregates under wet conditions (MWD_{wet}). One-way analysis of variance (ANOVA) was performed at the 5% and 1% significance levels. Different letters above the bars indicate significant differences among means.

منجر به کاهش نفوذ آب به خاک می‌شود. همچنین رطوبت اولیه خاک نیز اثر منفی معنی‌دار بر شاخص‌های CI و II ($p < 0.05$) داشت. در این راستا Hino و همکاران (۲۰۲۵) نشان داده‌اند که افزایش رطوبت اولیه باعث کاهش اختلاف پتانسیل بین سطح و عمق خاک می‌شود؛ این موضوع به‌نوبه خود گرا دیان مکشی را کاهش داده و نفوذ را کاهش می‌دهد. در واقع، وقتی خاک خشک‌تر باشد، مکش ماتریک بیشتر است و آب سریع‌تر وارد خاک می‌شود، درحالی‌که در خاک مرطوب‌تر، آب سخت‌تر نفوذ می‌کند و بخشی از آن تبدیل به رواناب سطحی می‌شود. از میان سایر ویژگی‌های فیزیکی، TRF و GMD_{wet} نیز اثر مثبت و معنی‌داری بر FIR داشتند ($p < 0.05$). پژوهش (Cerdà, 2001) نیز این یافته‌ها را تأیید می‌کند؛ به‌طوری‌که ابراز داشتند، سنگریزه‌های خاک می‌توانند با افزایش تخلخل مؤثر و توسعه مسیرهای ترجیحی جریان، به بهبود نفوذ آب به خاک کمک کنند و این اثر به مقدار، اندازه و چگونگی توزیع سنگریزه‌ها نیز وابسته است؛ هرچند ممکن است در برخی از خاک‌ها بخش سنگریزه اثر منفی بر نفوذ داشته باشد. همچنین پژوهش‌های میدانی Zhang و همکاران (۲۰۲۰) در خاک‌های کشاورزی نشان داد که پایداری خاک‌دانه‌ها می‌تواند شدت نفوذ متوسط را تا ۴۰ درصد افزایش دهد. پژوهش‌های اخیر نیز نشان می‌دهند که روش‌های کشاورزی حفاظتی مانند شیار متقاطع، شخم همراه با زیرشکن یا کشت بدون شخم، می‌توانند پایداری خاک‌دانه‌ها را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهند و به دنبال آن نفوذ آب به خاک را بهبود بخشند (Xu ; Yang et al., 2024)

تحلیل رگرسیون رابطه شاخص‌های نفوذ و ویژگی‌های فیزیکی خاک

سه مدل رگرسیون چندگانه با هدف بررسی نظری ارتباط ویژگی‌های فیزیکی با شاخص‌های CI، II و FIR توسعه یافتند (روابط ۵، ۶ و ۷). با توجه به مقادیر ضریب هم‌خطی از میان ۱۲ ویژگی استاندارد شده ۱۱ ویژگی در مدل قرار گرفتند و بخش شن توزیع اندازه ذرات اولیه به علت هم‌خطی بیشتر از ۱۰ از مدل حذف شد. تحلیل رگرسیون چندگانه بین متغیرهای مستقل (ویژگی‌های فیزیکی خاک) و متغیر وابسته (شاخص‌های نفوذ) نشان داد ضریب همبستگی اصلاح‌شده ($R_{Adjusted}$) این مدل‌ها به ترتیب ۰/۴۲، ۰/۱۸ و ۰/۲۶ بود که بیانگر میزان همبستگی معنی‌دار (به ترتیب $p < 0.01$ ، $p < 0.05$ و $p < 0.01$) بین متغیرهای مستقل و وابسته بود. مقادیر R^2 مدل‌ها نیز به ترتیب ۰/۵۱، ۰/۳۱ و ۰/۳۹ تعیین شد که نشان می‌دهد مدل CI بیشترین و مدل II کمترین توان تعیین تغییرات شاخص‌ها را داشت. نتایج مدل رگرسیونی استاندارد شده نشان داد BD بیشترین اثر منفی را در نفوذ آب به خاک داشت و افزایش آن موجب کاهش مقادیر همه شاخص‌های نفوذ شد ($p < 0.05$ و $p < 0.01$). به‌طوری‌که ضرایب استانداردشده آن از -۰/۶۹، -۰/۵۱، -۱/۰۵ در CI و -۰/۷۴ در FIR متغیر بود. این یافته با نتایج پژوهش Talat و همکاران (۲۰۲۵) هم‌خوانی دارد. این پژوهش‌گران نشان داد که افزایش چگالی ظاهری با افزایش تراکم خاک سبب کاهش منافذ مؤثر و هدایت هیدرولیکی شده و

نیز با دشواری‌های زیادی روبه‌رو است. روش‌ها و شاخص‌های مختلف، ممکن است جنبه‌های متفاوت آن را نشان دهند، بنابراین مدل‌های رگرسیونی تنها بخشی از واریانس تغییرات نفوذ را تبیین می‌کنند و تحلیل ترکیبی و مقایسه چند شاخص برای درک کامل‌تر فرآیند ضروری است؛ و نفوذ آب را نمی‌توان به سادگی با یک مدل خطی و تک‌بعدی به طور کامل توضیح داد. در برخی پژوهش‌های مروری نیز بیان شده است که مدل‌های مختلف نفوذ هر یک با فرض‌های خاص در مورد خاک و شرایط مرزی ارائه شده‌اند و مدل‌سازی دقیق رفتار واقعی نفوذ آب در خاک‌های ناهمگن با ویژگی‌های متفاوت، هنوز یکی از چالش‌های تحقیقاتی مهم در هیدرولوژی و علوم خاک باقی‌مانده است (Morbidelli et al., 2018).

(et al., 2024). تخلخل کل به‌عنوان یک ویژگی ساختمانی و بخش سیلت توزیع اندازه ذرات اولیه به‌عنوان ویژگی ذاتی خاک، اثر منفی معنی‌داری بر شاخص CI داشتند ($p < 0.05$). به‌طور کلی ویژگی‌های فیزیکی و ساختمان خاک، شامل چگالی ظاهری، رطوبت اولیه، مقدار سنگریزه کل، توزیع اندازه ذرات اولیه و میانگین هندسی قطر خاک‌دانه‌ها محور اصلی کنترل نفوذ آب به خاک در روش رگرسیونی ترکیبی بودند. با این حال، باید توجه داشت که نفوذ آب به خاک یک فرآیند پیچیده و چندعاملی است که تحت تأثیر برهمکنش‌های غیرخطی بین ذرات خاک قرار دارد (Morbidelli et al., 2018). مدل‌های توسعه‌یافته اثرات ترکیبی متغیرهای فیزیکی خاک را بر نفوذ آب نشان می‌دهند. مدل‌سازی فرآیند نفوذ آب به خاک صرفاً بر اساس ویژگی‌های فیزیکی خاک

$$CI = 2.28e^{-16} + 0.37 GMD_{wet} + 0.02 GMD_{dry} + 0.15 MWD_{dry} - 0.49 n^* - 0.29 Gravel + 0.43 TRF - 0.11 MWD_{wet} - 1.05 BD^{**} - 0.28 Silt^* + 0.04 Clay - 0.37 \Theta_i^* \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$R_{Adjusted} = 0.42 \quad R^2 = 0.51 \quad p < 0.01$$

$$II = 7.48e^{-19} + 0.29 GMD_{wet} + 0.13 GMD_{dry} + 0.14 MWD_{dry} - 0.30 n - 0.23 Gravel + 0.42 TRF - 0.11 MWD_{wet} - 0.69 BD^* - 0.11 Silt + 0.09 Clay - 0.36 \Theta_i^* \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$R_{Adjusted} = 0.18 \quad R^2 = 0.31 \quad p < 0.05$$

$$FIR = 1.21e^{-16} + 0.53 GMD_{wet}^* - 0.27 GMD_{dry} + 0.32 MWD_{dry} - 0.29 n - 0.51 Gravel + 0.61 TRF^* - 0.18 MWD_{wet} - 0.74 BD^{**} - 0.19 Silt + 0.04 Clay - 0.27 \Theta_i \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$R_{Adjusted} = 0.26 \quad R^2 = 0.39 \quad p < 0.01$$

نفوذ آب به خاک در مناطق نیمه‌خشک تأکید داشتند. نتایج رگرسیونی چندگانه نیز نشان داد ویژگی‌های فیزیکی خاک شامل چگالی ظاهری، رطوبت اولیه، سنگریزه، توزیع اندازه ذرات اولیه و میانگین هندسی قطر خاک‌دانه‌ها عوامل اصلی تعیین‌کننده نفوذ آب به خاک هستند. بر اساس یافته‌های این پژوهش، چند مسیر مطالعاتی برای توسعه و تکمیل پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌شود: (۱) نتایج این پژوهش حاکی از آن است که توزیع اندازه ذرات ممکن است با اثرگذاری بر ویژگی‌هایی مانند چگالی ظاهری، پایداری ساختمان خاک و تشکیل خاک‌دانه‌ها، نقشی غیرمستقیم و کلیدی در فرآیند نفوذ ایفا کند. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده با استفاده از مدل‌های علی مانند تحلیل مسیر یا مدل‌سازی ساختاری بررسی‌های دقیق‌تری صورت گیرد. (۲) بررسی اثر افق‌های مختلف در نفوذ آب به خاک می‌تواند در شناخت فرآیند نفوذ بسیار مؤثر باشد. (۳) استفاده از مدل‌های غیرخطی، روش‌های چندمتغیره پیشرفته و الگوریتم‌های یادگیری ماشین به همراه بررسی ترکیبی سایر ویژگی‌های خاک (شیمیایی

نتیجه‌گیری کلی

این پژوهش با هدف بررسی نقش برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک در شاخص‌های نفوذ آب به خاک برای برخی خاک‌های منطقه نیمه‌خشک زنجان انجام شد. نتایج نشان داد که میانگین وزنی و میانگین هندسی قطر خاک‌دانه‌ها در حالت مرطوب (پایداری خاک‌دانه) و چگالی ظاهری، بیشترین همبستگی را با شاخص‌های نفوذ آب به خاک داشتند. تحلیل همبستگی پیرسون و رگرسیون چندگانه نیز نشان داد که این سه ویژگی از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در تبیین نفوذ آب به خاک محسوب می‌شوند. پایداری خاک‌دانه‌ها که با شاخص‌های میانگین وزنی و میانگین هندسی قطر خاک‌دانه‌ها در حالت مرطوب نیز سنجیده می‌شود، تأثیر مثبت و معنی‌دار بر نفوذ آب به خاک داشت، درحالی‌که چگالی ظاهری اثر منفی و قابل‌توجهی نشان داد. همچنین مشخص شد که توزیع اندازه ذرات خاک علاوه بر اثر مستقیم، نقش خود را بیشتر به‌صورت غیرمستقیم و با تغییر در ساختمان خاک مانند پایداری خاک‌دانه و تخلخل ایفا می‌کند. این یافته‌ها بر اهمیت توزیع اندازه ذرات و ساختمان خاک در فرآیند

و بیولوژیکی) می‌تواند روابط پیچیده‌تری را بین نفوذ و متغیرهای خاک آشکار سازد.

تشکر و قدردانی

نگارندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از همکاری تجهیزاتی گروه علوم و مهندسی خاک و پشتیبانی مالی دانشگاه زنجان و همچنین از داوران محترم این مقاله که با نظرات و پیشنهادهای خود در ارتقای علمی آن تلاش می‌کنند، صمیمانه قدردانی نمایند.

References

1. Abu-Hamdeh, N.H., Abo-Qudais, S.A. and Othman, A.M. 2006. Effect of soil aggregate size on infiltration and erosion characteristics. *European Journal of Soil Science*, 57(5), 609-616. doi: 10.1111/j.1365-2389.2005.00743.x
2. Assouline, S. 2013. Infiltration into soils: Conceptual approaches and solutions. *Water Resources Research*, 49(4), 1755-1772. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20155>
3. Assouline, S. 2006. Modeling the relationship between soil bulk density and the hydraulic conductivity function. *Vadose Zone Journal*, 5(2), 697-705. <https://doi.org/10.2136/vzj2005.0084>
4. ASTM. 2009. Standard test method for infiltration rate of soils in field using double-ring infiltrometer. D3385-09, ASTM International, West Conshohocken, PA.
5. Basset, C., Abou Najm, M., Ghezzehei, T., Hao, X. and Daccache, A. 2023. How does soil structure affect water infiltration? A meta-data systematic review. *Soil and Tillage Research*, 226, p.105577. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105577>
6. Beck-Broichsitter, S., Rizvi, Z.H., Horn, R. and Wuttke, F. 2023. Effect of gravel content on soil water retention characteristics and thermal capacity of sandy and silty soils. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 71(1), 1-10. <https://doi.org/10.2478/johh-2023-0001>
7. Beven, K. and Germann, P. 1982. Macropores and water flow in soils. *Water resources research*, 18(5). <https://doi.org/10.1029/1311-1325>. 0043-1397/82/002 W- 1025 \$05.00
8. Blake, G.R. and Hartge, K.H. 1986. Bulk density. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, 5, 363-375.
9. Blanco-Canqui, H. and Ruis, S.J. 2018. No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*, 326, 164-200. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.011>
10. Bouwer, H. 1986. Intake rate: cylinder infiltrometer. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, 5, 825-844.
11. Brady, N.C., and Weil, R.R. 2017. *The Nature and Properties of Soils*, 15th Edn (eBook).
12. Bronick, C.J., and Lal, R. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124(1-2), 3-22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>
13. Cerdà, A. 2001. Effects of rock fragment cover on soil infiltration, interrill runoff and erosion. *European Journal of Soil Science*, 52(1), 59-68. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2001.00354.x>Digital Object Identifier (DOI)
14. Dane, J.H., and Topp, C.G. (Eds.). 2020. *Methods of soil analysis, Part 4: Physical methods*. John Wiley and Sons.
15. Feki, M., Ravazzani, G., Ceppi, A., Milleo, G. and Mancini, M. 2018. Impact of infiltration process modeling on soil water content simulations for irrigation management. *Water*, 10(7), p.850. DOI:10.3390/w10070850
16. Gómez, J.A., Giráldez, J.V., Pastor, M. and Fereres, E. 1999. Effects of tillage method on soil physical properties, infiltration and yield in an olive orchard. *Soil and Tillage Research*, 52(3-4), 167-175. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00078-1)
17. Hillel, D. 1998. *Environmental Soil Physics* Academic Press. *San Diego, CA*.
18. Hillel, D. 2003. *Introduction to environmental soil physics*. Elsevier.
19. Hino, M., Odaka, Y., Nadaoka, K., and Sato, A. 1988. Effect of initial soil moisture content on the vertical infiltration process- A guide to the problem of runoff-ratio and loss. *Journal of Hydrology*, 102(1-4), 267-284. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(88\)90102-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(88)90102-3)
20. Lipiec, J., Medvedev, V.V., Birkas, M., Dumitru, E., Lyndina, T.E., Rousseva, S. and Fulajtar, E. 2003. Effect of soil compaction on root growth and crop yield in Central and Eastern Europe. *International agrophysics*, 17(2), 61-69.
21. Horton, R.E. 1940. An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. In *Soil science Society of America proceedings* Vol. 5, No. 399-417, p. 24. doi:10.2136/sssaj1941.036159950005000C0075X
22. IUSS Working Group. 2014. *World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. (No Title).

23. Jones, J. 2018. Soil analysis handbook of reference methods. CRC press.
24. Kay, B.P. and Angers, D.A. 1999. Soil structure. In 'Handbook of soil science'.(Ed. ME Sumner). A-229-A-276.(CRC Press: Boca Raton, USA.).
25. Lado, M., Paz, A. and Ben-Hur, M. 2004. Organic matter and aggregate size interactions in infiltration, seal formation, and soil loss. *Soil Science Society of America Journal*, 68(3), 935-942.
26. Le Bissonnais, Y. 2016. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 67(1), 11-21. doi:10.1111/ejss.4_12311
27. Le Bissonnais, Y.L. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 47(4), 425-437. doi:10.1111/j.1365-2389.1996.tb01843.x
28. Li Zhuo, L.Z., Wu Pute, W.P., Feng Hao, F.H., Zhao XiNing, Z.X., Huang Jun, H.J. and Zhuang WenHua, Z.W. 2009. Simulated experiment on effect of soil bulk density on soil infiltration capacity. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 25(6), 40-45.
29. Liu, H.L.T.W., Lei, T.W., Zhao, J., Yuan, C.P., Fan, Y.T. and Qu, L.Q. 2011. Effects of rainfall intensity and antecedent soil water content on soil infiltrability under rainfall conditions using the run off-on-out method. *Journal of Hydrology*, 396(1-2), 24-32. 10.1016/j.jhydrol.2010.10.028
30. Lv, G. and Wu, X.Y. 2008. Review on influential factors of soil infiltration characteristics. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 24, 494-499. doi:10.11924/j.issn.1000-6850.20080196
31. Morbidelli, R., Corradini, C., Saltalippi, C., Flammini, A., Dari, J., and Govindaraju, R.S. 2018. Rainfall infiltration modeling: A review. *Water*, 10(12), 1873. doi:10.3390/w10121873.
32. Sedayeeazar, Z., Mohammadi, M. H., Asadi, H. 2025. The effect of gravel on the cumulative infiltration in two different soil textures. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(12), 2483-2498. doi: 10.22059/ijswr.2024.379854.669763. (in Persian)
33. Talat, A.E., Feng, R., Liu, G., Xie, J., Cai, Z. and Wang, J. 2025. Simulated experimental effect of bulk density on infiltration rate of China's loess plateau. *Egyptian Journal of Soil Science*, 65(1). doi:10.21608/ejss.2024.328370.1886.
34. Turner, E. 2006. Comparison of infiltration equations and their field validation by rainfall simulation. University of Maryland, College Park.
35. Vaezi, A.R., Behtari, M., and Foroumadi, M. 2019. Time variations of rainfall infiltration into the soil under the influence of soil initial moisture. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 13(3), 575-587. (in Persian)
36. Vaezi, A.R. 2018. *Water Erosion: Processes and Models*. 4th ed. University of Zanjan Press, Zanjan, Iran, 513. (in Persian)
37. Xu, C., Liu, W., Li, J., Wu, J., Zhou, Y. and Kader, R. 2024. Dynamic change of soil aggregate stability and infiltration properties during crop growth under four tillage measures in Mollisols region of northeast China. *Frontiers in Earth Science*, 12, p.1357467. doi:10.3389/feart.2024.1357467
38. Yang, T., Zhang, Z., Yu, P., Yin, Z., Li, A., Zhou, X., Qi, Z. and Wang, B. 2024. Soil aggregates and water infiltration performance of different water and soil conservation measures on phaeozems sloping farmland in northeast China. *Agronomy*, 14(10), p.2410. doi:10.3390/agronomy14102410.
39. Yavari, M., Mohammadi, M. H., Shahbazi, K. 2021. Comparison of some methods for measuring primary soil particle size distribution and introducing appropriate times for the four-reading method for determining soil texture. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(12), 2999-3015. doi: 10.22059/ijswr.2020.310061.668738. (in Persian)
40. Yavari, M., Mohammadi, M., Shahbazi, K. 2020. The effect of cement removal in measuring the texture of Iran soils. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(8), 1947-1958. doi: 10.22059/ijswr.2020.280297.668188. (in Persian)
41. Yılmaz, E., Çanakçı, M., Topakçı, M., Sönmez, S., Ağsaran, B., Alagöz, Z., Çıtak, S. and Uras, D.S. 2019. Effect of vineyard pruning residue application on soil aggregate formation, aggregate stability and carbon content in different aggregate sizes. *Catena*, 183, p.104219. doi:10.1016/j.catena.2019.104219
42. Zeng, J., Fei, L.J. and Pei, Q.B. 2017. Influence of soil bulk density on soil water infiltration characteristics in water vertical

- movement. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 12(35), 1081-1087.
doi:10.3969/j.issn.1674-8530.16.0294
43. Zewide, I. 2021. Review paper on effect of natural condition on soil infiltration. Chemistry, 7(1), 34-41p. doi: 10.37628/IJGC
44. Zhang, H., Niu, L.A., Hu, K., Hao, J., Li, F., Gao, Z. and Wang, X. 2020. Influence of tillage, straw-returning and mineral fertilization on the stability and associated organic content of soil aggregates in the North China Plain. Agronomy, 10(7), p.951. doi: 10.3390/agronomy10070951