



Assessment of the Effect of Particle Size Distribution and Rock Fragment on Water Infiltration Variables in Some Soils of a Semi-Arid Region

Ali Reza Vaezi¹ | Mortaza Yavari^{2✉} | Mohammad Sadegh Askari³

1. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: vaezi.alireza@gmail.com ; vaezi.alireza@znu.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: mortazayavari90@gmail.com
3. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: askari@znu.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Oct. 14, 2025

Revised: Dec. 22, 2025

Accepted: Apr. 6, 2026

Published online: April. 2026

Keywords:

Bulk Density,
Gravel,
Infiltration modeling,
Soil Infiltration,
Soil properties.

Water infiltration into soil is one of the most important physical properties for effective water and soil resource management, and it can be influenced by soil particle size distribution. This study was conducted to investigate the role of particle size distribution and gravel content on water infiltration indices in selected soils of a semi-arid region in Zanjan Province, Iran. Water infiltration was measured at 68 locations using the double-ring infiltrometer using the double-ring infiltrometer method. The measured infiltration indices included cumulative infiltration, effective infiltration depth, initial infiltration rate, final infiltration rate and mean infiltration rate, along with particle size distribution and several other physical properties. The results of the correlation analysis indicated that effective infiltration depth exhibited a significant negative correlation with silt content ($p < 0.01$), whereas initial infiltration and initial infiltration rate were positively and significantly correlated with silt content ($p < 0.05$). Bulk density also showed significant correlations with the different fractions of primary soil particles ($p < 0.05$). In contrast, bulk density was negatively and significantly correlated with all infiltration indices ($p < 0.05$). These findings suggest that particle size distribution plays a crucial role in the infiltration process not only through direct effects, but also indirectly by influencing bulk density. Furthermore, analysis of different gravel content classes (0–20, 20–40, and > 40%) demonstrated that increasing gravel content led to an improvement in infiltration indices, such that cumulative infiltration and mean infiltration rate were significantly correlated with total gravel content ($p < 0.05$). Overall, the physical structure of soil acts as a key determinant of the water infiltration pattern, and understanding the complex interrelationships among soil properties requires integrated approaches and advanced statistical analyses.

Cite this article: Vaezi, A.R., Yavari, M., Sadegh Askari, M., (2026) Assessment of the Effect of Particle Size Distribution and Rock Fragment on Water Infiltration Variables in Some Soils of a Semi-Arid Region, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (2), 513-529. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.402155.670029>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.402155.670029>





EXTENDED ABSTRACT

Background and purpose:

Soil water infiltration is one of the fundamental components of the hydrological cycle and plays a critical role in regulating surface runoff, groundwater recharge, soil moisture retention and the functioning of terrestrial ecosystems (Zhang et al., 2016; Hillel, 1998). Infiltration is defined as the movement of water from the soil surface into a porous medium under the combined influence of gravitational forces and matric suction and it is considered a key indicator for describing soil hydraulic behavior (Zewide, 2021). Despite extensive research, significant knowledge gaps remain regarding the precise mechanisms through which primary particle size distribution and the coarse fragment fraction influence soil water infiltration across different regions of Iran. The present study was therefore conducted to investigate the effects of particle size distribution on soil water infiltration in Zanjan Province, where a substantial proportion of agricultural lands are characterized by light to medium soil textures and variable gravel contents. The specific objective of this study was to evaluate the effects of particle size distribution, as well as gravel content and size, on selected soil water infiltration indices under the climatic conditions of Zanjan.

Materials and methods:

For this study, the sampling sites were selected based on criteria including land use type, vegetation cover, soil texture and available information from soil survey maps. Soil water infiltration was measured at 68 selected locations across Zanjan Province using the double-ring infiltrometer method. Cumulative water infiltration was recorded at time intervals of 0, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 80, and 90 minutes and measurements were continued until the infiltration rate reached a steady state. Infiltration indices, including cumulative infiltration (CI), effective infiltration depth (EID), initial infiltration rate (IIR), final infiltration rate (FIR), and mean infiltration rate (MIR), were derived from the measured infiltration data. Soil samples required for the determination of physical and chemical properties were collected as disturbed samples from the 0–60 cm soil depth and as undisturbed samples from the 0 – 20 cm soil depth. Primary soil particle size distribution was determined using the hydrometer method (Yavari et al., 2021), and five sand size fractions were separated using the sieve method. In addition, the properties of soil particles larger than 2 mm were analyzed following standard procedures described in Methods of Soil Analysis (Klute, 1986). Particles larger than 2 mm were classified into four categories: (1) gravel (2–64 mm), (2) cobbles (64–256 mm), (3) stones (> 256 mm) and (4) total coarse fragments (> 2 mm). Bulk density was determined using the metal cylinder (core) method (Culley, 1993). Equivalent calcium carbonate content (Page et al., 1982) and soil organic matter (Walkley and Black, 1934) were also measured to assess their influence as aggregating agents on soil primary particles. Effective infiltration depth (EID) was estimated based on the principle of mass conservation as described by Hillel (1982). A set of descriptive statistics, including minimum, maximum, mean, median and standard deviation, was calculated for EID, MIR, IIR, FIR, II and CI. The normality of data distributions was evaluated using the Kolmogorov–Smirnov test. To analyze the effects of independent variables on soil water infiltration characteristics: (1) Mean comparison analyses were conducted using one-way analysis of variance (One-Way ANOVA) and error indices to examine statistically significant differences among different soil particle size distribution classes and gravel content categories in relation to soil water infiltration indices. (2) Pearson and Spearman correlation analyses were applied to evaluate the strength and direction of relationships between quantitative variables with different data distributions. Data analysis, graphical representation, and mean comparisons were performed using Excel (2016), Python programming language (v3.x), SPSS (2022) and R within the Posit Cloud environment.

Results:

The results of the correlation analysis indicated that effective infiltration depth exhibited a significant negative correlation with silt content ($p < 0.01$), whereas initial infiltration and initial infiltration rate were positively and significantly correlated with silt content ($p < 0.05$). Bulk density also showed significant correlations with the different fractions of primary soil particles ($p < 0.05$). In contrast, bulk density was negatively and significantly correlated with all infiltration indices ($p < 0.05$). These findings suggest that particle size distribution plays a crucial role in the infiltration process not only through direct effects, but also indirectly by influencing bulk density. Furthermore, analysis of different gravel content classes (0–20, 20–40, and > 40%) demonstrated that increasing gravel content led to an improvement in infiltration indices, such that cumulative infiltration and mean infiltration rate were significantly correlated with total gravel content ($p < 0.05$). The results showed that soil organic matter, as a cementing agent of primary soil particles, is a highly effective factor in the infiltration process. Accordingly, all soil infiltrability indices exhibited positive and highly significant correlations with soil organic matter ($p < 0.01$). In addition, the results of one-way analysis of variance (ANOVA) indicated that all organic matter levels (<1, 1–2, 2–3, and >3%) had a highly significant effect on cumulative infiltration ($p < 0.01$). In contrast, calcium carbonate did not show a significant effect on soil water infiltration.

Conclusion:

Overall, the results of this study indicate that soil water infiltration is a process strongly dependent on soil physical structure. The findings demonstrate that soil textural components exert significant effects on infiltration indices; in this regard, coarser particles predominantly enhance soil infiltrability by improving soil porosity and pore connectivity. The results further emphasize that the influence of particle size distribution on water infiltration is not solely direct, but may also be exerted indirectly through alterations in soil structure, bulk density, and consequently the soil pore system. An

increase in gravel content resulted in improvements across all infiltration indices, highlighting the importance of coarse fragments in regulating soil hydraulic behavior. Among the soil properties examined, soil organic matter was identified as a key factor promoting water infiltration, whereas the effect of calcium carbonate under the studied conditions was negligible. Overall, given that the relationships between soil physical properties and water infiltration indices are often nonlinear and multifactorial, the application of multivariate analytical methods and machine learning algorithms appears essential for a more accurate characterization and interpretation of these complex interactions.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

This study was supported by the University of Zanjan and is acknowledged. The authors thank the Soil Science Department of the University of Zanjan for different soil physicochemical analysis.

ethical considerations

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

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

ارزیابی اثر توزیع اندازه ذرات و بخش سنگی بر شاخص‌های نفوذ آب به خاک در برخی خاک‌های منطقه نیمه‌خشک

علی‌رضا واعظی^۱ | مرتضی یآوری^۲ | محمدصادق عسکری^۳

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: vaezi.alireza@znu.ac.ir

۲. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: mortazayavari90@gmail.com

۳. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: askari@znu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۱/۱۷

تاریخ انتشار: اردیبهشت ۱۴۰۵

واژه‌های کلیدی:

سنگریزه،

چگالی ظاهری،

مدل سازی نفوذ،

نفوذپذیری خاک،

ویژگی‌های خاک

نفوذ آب به خاک یکی از ویژگی‌های مهم فیزیکی خاک برای مدیریت منابع آب و خاک است که می‌تواند تحت تأثیر دانه‌بندی ذرات قرار گیرد. این پژوهش با هدف بررسی نقش توزیع اندازه ذرات و سنگریزه بر شاخص‌های نفوذ آب به خاک در برخی خاک‌های منطقه نیمه‌خشک استان زنجان انجام شد. نفوذ آب به خاک در ۶۸ نقطه به روش حلقه دوگانه اندازه‌گیری شد. شاخص‌های نفوذ شامل نفوذ تجمعی و عمق مؤثر نفوذ، شدت نفوذ اولیه، نهایی و متوسط به همراه توزیع اندازه ذرات و برخی ویژگی‌های فیزیکی دیگر اندازه‌گیری شدند. نتایج تحلیل همبستگی نشان داد که عمق مؤثر نفوذ و درصد سیلت همبستگی منفی و معنی‌دار ($p < 0/01$) و درمقابل نفوذ اولیه و شدت نفوذ اولیه با سیلت همبستگی مثبت و معنی‌دار داشت ($p < 0/05$). چگالی ظاهری نیز با اجزای مختلف ذرات اولیه خاک همبستگی معنی‌داری داشت ($p < 0/05$). از طرف دیگر، این ویژگی با تمام شاخص‌های نفوذ همبستگی منفی و معنی‌دار نشان داد ($p < 0/05$). یافته‌ها نشان داد که توزیع اندازه ذرات علاوه بر اثر مستقیم به صورت غیرمستقیم از طریق اثرگذاری بر چگالی ظاهری نقش مهمی در فرآیند نفوذ ایفا می‌کند. بررسی گروه‌های مختلف سنگریزه (۰-۲۰، ۲۰-۴۰ و بیش از ۴۰ درصد) نیز نشان داد که افزایش سنگریزه سبب بهبود شاخص‌های نفوذ می‌شود؛ به طوری که همبستگی نفوذ تجمعی و شدت نفوذ متوسط با سنگریزه کل معنی‌دار بود ($p < 0/05$). ساختار فیزیکی خاک به عنوان عاملی کلیدی در تعیین الگوی نفوذ آب مطرح بوده و درک روابط پیچیده میان ویژگی‌های خاک نیازمند رویکردهای ترکیبی و پیشرفته آماری است.

استناد: واعظی، علی‌رضا، یآوری، مرتضی، عسکری، محمدصادق، (۱۴۰۵) ارزیابی اثر توزیع اندازه ذرات و بخش سنگی بر شاخص‌های نفوذ آب به خاک در برخی خاک‌های منطقه نیمه‌خشک. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۷ (۲)، ۵۲۹-۵۱۳.



<https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.402155.670029>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.402155.670029>

مقدم

نفوذ آب به خاک یکی از مؤلفه‌های اساسی چرخه هیدرولوژیکی بوده و نقش تعیین‌کننده‌ای در تنظیم رواناب سطحی، تغذیه آب‌های زیرزمینی، حفظ رطوبت خاک و کارکرد اکوسیستم‌های خشکی دارد (Zhang et al., 2016; Hillel, 1998). نفوذ به‌صورت جریان آب از سطح خاک به‌درون یک محیط متخلخل تحت اثر گرادیان جاذبه و مکش ماتریک تعریف و شاخصی کلیدی برای توصیف رفتار هیدرولیکی خاک محسوب می‌شود (Zewide, 2021). این ویژگی ظرفیت خاک را برای انتقال و ذخیره آب در نیمرخ تعیین کرده و تداوم حیات گیاهان، فعالیت زیستی خاک و کارایی مدیریت منابع آب را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (Feki et al., 2018; USDA, 2019). اهمیت نفوذ زمانی برجسته‌تر می‌شود که تغییرات آن می‌تواند الگوی توزیع رطوبت، فرسایش‌پذیری، بهره‌وری تیمارهای مدیریتی و فرآیندهای سطحی مانند رواناب و آبشویی مواد غذایی را تحت تأثیر قرار دهد (Turner, 2006; Assouline, 2013). این فرآیند تحت تأثیر مجموعه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی و ساختاری خاک قرار دارد که از میان آن‌ها توزیع اندازه ذرات خاک، بخش سنگی (سنگریزه و قطعات درشت‌دانه)، کربنات کلسیم، مواد آلی و ساختمان خاک از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده محسوب می‌شوند (Poesen and Lavee, 1994; Ajwa and Trout, 2006; Brakensiek et al., 1986). در مناطق خشک و نیمه‌خشک که رطوبت خاک محدود و بارندگی عمدتاً کوتاه‌مدت و با شدت بالا است، نقش ویژگی‌های فیزیکی خاک، به‌ویژه توزیع اندازه ذرات اولیه و وجود بخش سنگی در تعیین ظرفیت نفوذ، برجسته‌تر می‌شود (Li et al., 2020).

توزیع اندازه ذرات اولیه مهم‌ترین ویژگی ذاتی خاک است که در نفوذ آب به خاک نقش دارد (Zewide, 2021). آب در منافذ بزرگ خاک شنی سریع‌تر از منافذ کوچک خاک رسی حرکت می‌کند، به‌خصوص اگر خاک رس متراکم باشد و ساختمان ضعیفی داشته باشد یا بدون ساختمان باشد (Hillel, 1998). در خاک رسی، شدت نفوذ کند آب به‌دلیل ساختار متراکم خاک، تخلخل بیشتر، چگالی ظاهری کمتر، درصد رس زیاد، هدایت آبی کم، رطوبت اولیه و ظرفیت نگهداری رطوبت بیشتر است (Azadegan, 2025). البته یکی از استثناها زمانی است که خاک رس در شرایط خشک قرار بگیرد که در این حالت، در خاک ترک‌های بزرگی ایجاد می‌شود که منجر به ظرفیت نفوذ بیشتر می‌شود (USDA, 2019). از طرفی هم‌اوری ذرات اولیه خاک توسط مواد آلی و کربنات کلسیم، منجر به ایجاد ذرات ثانویه و تشکیل ساختمان خاک می‌شود (Barthès et al., 2008). ماده آلی با عمل کردن به‌عنوان یک سیمان آلی طبیعی، ذرات خاک را به یکدیگر متصل کرده و منجر به تشکیل خاک‌دانه‌های پایدار می‌شود (Six et al., 2004). این خاک‌دانه‌ها با ایجاد شبکه‌ای از منافذ درشت، مسیرهای مناسب‌تری برای نفوذ آب ایجاد می‌کنند و در نتیجه تمامی شاخص‌های نفوذ را بهبود می‌بخشند (Kutílek and Nielsen, 1994). پژوهش‌گران مختلفی نشان داده‌اند که کربنات کلسیم خاک می‌تواند اثر دوگانه‌ای در هم‌اوری ذرات اولیه داشته باشد. یون کلسیم در خاک با جابجا کردن یون سدیم تبادلی سبب هم‌اوری رس‌ها شده و به تشکیل ذرات ثانویه کمک می‌کند (Duiker et al., 2001; Orts et al., 2000). این ماده همچنین با تأثیر بر روی فرآیندهای تشکیل و پایداری ساختمان خاک، به‌طور غیرمستقیم توزیع اندازه منافذ و ظرفیت نفوذپذیری خاک را تعدیل می‌کند (Bronick and Lal, 2005). درمقابل کربنات کلسیم می‌تواند با افزایش pH سبب افزایش بار سطحی رس‌ها شده و نیروی دفعی بین ذرات را افزایش دهد و از این‌رو باعث ایجاد کاهش پایداری رس‌ها شود (Castro and Logan, 1991). باین‌وجود در بیشتر مطالعات، از کربنات کلسیم به‌عنوان عامل هم‌اوری‌کننده ذرات اولیه خاک نام برده شده است (Shukla et al., 2004). بیشتر خاک‌های کشور و خصوصاً استان زنجان، میزان کربنات کلسیم بالایی دارند که بیشتر به‌صورت ذرات اولیه در خاک وجود دارد و کمتر به‌عنوان عامل سیمانی مشاهده می‌شود، به‌طوری‌که Yavari et al., (2020) برای اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرات اولیه نیز حذف آهک در خاک‌هایی که میزان آهک آنها بیش از ۱۰ درصد است را توصیه نکردند.

بسیاری از خاک‌ها حاوی سنگریزه‌اند و در مناطقی مانند نواحی مدیترانه‌ای و کوهستانی، سنگریزه نقش مهمی در نفوذ آب به خاک دارند (Poesen and Lavee, 1994). سنگریزه‌ها می‌توانند ویژگی‌های فیزیکی خاک را از جمله تخلخل، ظرفیت نگهداری آب و اتصال منافذ تغییر دهند (Zheng et al., 2021). به‌کارگیری عامل توزیع اندازه ذرات بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر می‌تواند برآورد بهتری از پارامترهای هیدرولیکی ارائه دهد (Mohammadi and Refahi, 2005). در خاک‌های رسی یا لومی، سنگریزه‌ها می‌توانند فضای خالی مؤثری برای نفوذ ایجاد کنند؛ درحالی‌که در خاک‌های شنی ممکن است باعث عبور سریع آب و کاهش ظرفیت نگهداری شوند (Hillel, 1998; Beck-Broichsitter et al., 2023). سنگریزه‌های درشت مانند مانع عمل کرده و باعث کاهش نفوذپذیری می‌شوند، ولی برعکس سنگریزه‌های ریز نفوذپذیری را افزایش می‌دهند (Shabani et al., 2018). در برخی موارد، ایجاد جریان ترجیحی ناشی از ترکیب توزیع اندازه ذرات اولیه و بخش سنگی، موجب افزایش نفوذ و در موارد دیگر کاهش آن گزارش شده است (Zhao et al., 2020; Cousin et al., 2003).

مطالعه تأثیر توزیع اندازه ذرات اولیه و بخش سنگی بر نفوذ آب به خاک موضوعی است که در چند دهه اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. Lado et al., (2004) گزارش کردند که نفوذپذیری خاک با افزایش میزان رس کاهش و با افزایش ذرات درشت‌دانه مانند شن افزایش می‌یابد. Shabani et al., (2018) نشان دادند که برخلاف ذرات شن، سنگریزه‌های درشت موجب کاهش نفوذ و سنگریزه‌های ریز باعث افزایش نفوذ می‌شوند. Ilek et al., (2019) نیز دریافتند که سنگریزه‌های کوچک (۱۰ میلی‌متر) در مقدار مشخص باعث افزایش نفوذ و سنگریزه‌های درشت‌تر باعث کاهش آن می‌شوند. Li et al., (2020) بیان داشتند در آزمایش بارندگی ثابت در خاک شنی، افزایش سنگریزه تا ۱۰ درصد باعث افزایش نفوذ و بالاتر از آن باعث کاهش آن می‌شود. Sedayeeazar et al., (2024) گزارش کردند که چگالی ظاهری کل و بخش نرم برای خاک سنگریزه‌دار، از عوامل مؤثر در تعیین نفوذ در خاک‌های سنگریزه‌دار هستند. Brakensiek and Rawls (1994) نیز چگالی ظاهری را تحت تأثیر سنگریزه دانسته‌اند. Ma et al. (2016) دریافتند که در خاک‌های منطقه نیمه‌خشک شدت نفوذ و نفوذ تجمعی در خاک شنی بیش از لومی است. Wang et al. (2023) بیان کردند که خاک‌های ریشه‌دار نسبت به خاک‌های بدون پوشش گیاهی نفوذ بیشتری دارند و بافت خاک سهم بیشتری در این فرآیند دارد. Azadegan et al., (2025) نشان داد که در خاک رسی به دلیل ساختار متراکم و ظرفیت نگهداری بالا، نفوذ کندتر و در خاک شنی لومی نفوذ اولیه بالا ولی کاهش تدریجی تا رسیدن به مقدار نهایی مشاهده می‌شود.

با وجود پژوهش‌های انجام شده، همچنان شکاف‌های علمی در مورد مکانیزم دقیق تأثیر توزیع اندازه ذرات اولیه و بخش سنگی بر نفوذ آب در خاک‌های مناطق مختلف ایران، وجود دارد. مطالعه حاضر با هدف بررسی نحوه تأثیر توزیع اندازه ذرات بر نفوذ آب در استان زنجان که بخش قابل توجهی از اراضی کشاورزی آن دارای بافت سبک تا متوسط با مقادیر متغیر سنگریزه هستند، انجام شد. هدف از این مطالعه ارزیابی تأثیر توزیع اندازه ذرات، درصد و اندازه سنگریزه بر برخی شاخص‌های نفوذ آب به خاک در شرایط اقلیمی زنجان است. این پژوهش با ترکیب آزمایش‌های میدانی و آزمایشگاهی، به دنبال ارائه داده‌های کاربردی برای بهینه‌سازی سیستم‌های آبیاری و جلوگیری از هدررفت آب در منطقه است. یافته‌های این تحقیق می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای مطالعات آینده در زمینه مدیریت پایدار خاک و آب در مناطق مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

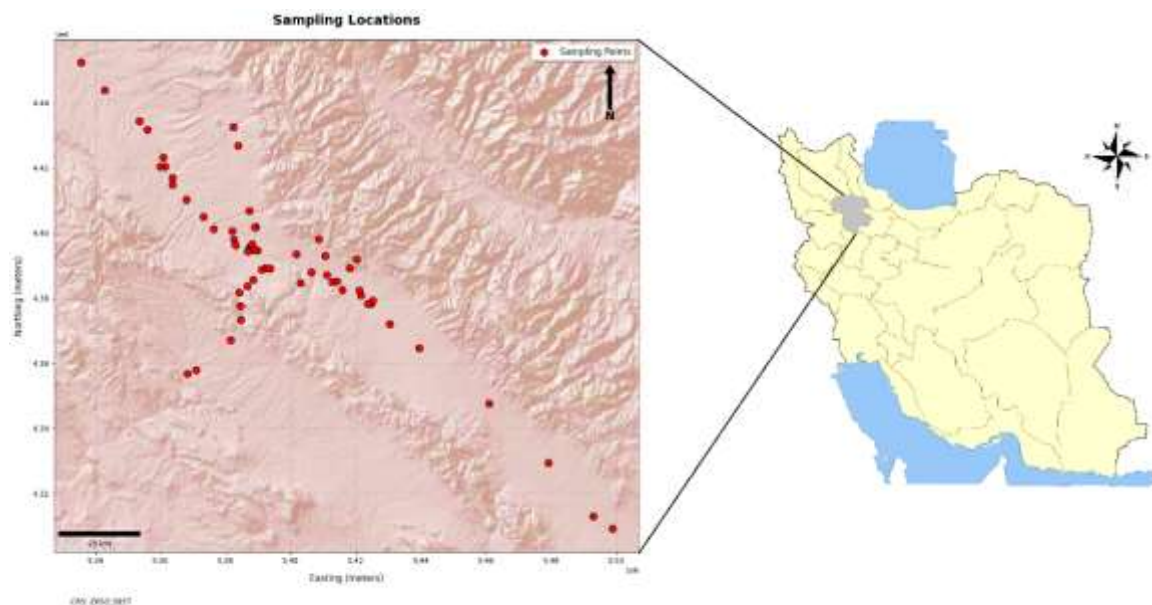
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

موقعیت جغرافیایی استان زنجان 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 نصف النهار گرینویچ قرار گرفته است. بر اساس سیستم طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، استان زنجان دارای اقلیم نیمه‌خشک سرد تا مدیترانه‌ای کوهستانی است. این منطقه دارای توپوگرافی متنوعی شامل ارتفاعات کوهستانی (مانند رشته‌کوه‌های طارم و سلطانیه با ارتفاع بیش از ۳۰۰۰ متر از سطح دریا)، دشت‌های آبرفتی (نظیر دشت زنجان و ابهر) و مناطق کوه‌پایه‌ای با شیب‌های ملایم تا تند است. رژیم رطوبتی در مناطق کم ارتفاع Xeric ارتفاعات میانی Ustic و در ارتفاعات بالا Udic با بارش‌های بیشتر است. رژیم حرارتی در دشت‌ها Mesic، در ارتفاعات بالا Frigid است (Soil Survey Staff, 2014). بر اساس سامانه رده‌بندی خاک‌های آمریکا (USDA)، خاک‌های منطقه شامل آلفی سول (در ارتفاعات جنگلی)، اینسپتی سول (در دشت‌ها)، اریدی سول (در مناطق خشک‌تر) است (Soil Survey Staff, 2014).

آزمایش‌های صحرائی

نقاط مورد مطالعه با در نظر گرفتن معیارهایی همچون نوع کاربری زمین، پوشش گیاهی، بافت خاک و اطلاعات موجود از نقشه‌های خاک‌شناسی انتخاب (شکل ۱) و جهت اندازه‌گیری نفوذ آب به خاک در ۶۸ نقطه انتخابی در سطح استان زنجان، از روش حلقه دوگانه استفاده شد. در این روش، از دو حلقه هم‌محور با ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر بهره گرفته شد که قطر استوانه بیرونی ۶۰ سانتی‌متر و قطر استوانه داخلی ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد. اندازه‌گیری میزان نفوذ تجمعی آب در خاک در بازه‌های زمانی صفر، ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۸۰ و ۹۰ دقیقه انجام گرفت و قرائت‌ها تا زمانی ادامه یافت که شدت نفوذ به حالت پایدار برسد (شکل ۲).



شکل ۱: موقعیت نقاط نمونه برداری در منطقه مورد مطالعه



شکل ۲: اندازه گیری نفوذ آب به خاک در مناطق مورد مطالعه

تعیین ویژگی های نفوذ آب به خاک

اندازه گیری ویژگی های خاک

نمونه های خاک مورد نیاز برای اندازه گیری ویژگی های فیزیکی مانند توزیع اندازه ذرات اولیه، بخش سنگی و چگالی ظاهری به صورت دست خورده (عمق صفر الی ۶۰ سانتیمتری) و دست نخورده (عمق صفر الی ۲۰ سانتیمتری) برداشته شد. توزیع اندازه ذرات اولیه خاک با روش هیدرومتری (Yavari et al., 2021) و جداسازی پنج جزء شن با استفاده از روش الک انجام شد. همچنین برای بررسی ویژگی های بخش درشت تر از دو میلی متر از روش های استاندارد ارائه شده در Klute, (1986), Methods of Soil Analysis استفاده شد. ذرات بزرگتر از دو میلی متر در چهار بخش: (۱) سنگریزه^۱ (ذرات ۲ تا ۶۴ میلی متر)، (۲) قلوه سنگ^۲ (۶۴ میلی متر تا ۲۵۶ میلی متر)، (۳) بخش سنگی^۳ (بزرگتر از ۲۵۶ میلی متر) و (۴) مجموع درصد ذرات درشت تر از دو میلی متر بررسی شدند. چگالی ظاهری با روش سیلندر فلزی (Culley,

1. Gravel
2. Cobbles
3. Boulders/Stones

(1993)، بدست آمد. ویژگی‌های کربنات کلسیم معادل (Page et al., 1982) و ماده آلی (Walkley and Black, 1934)، نیز برای بررسی اثر عوامل هماورکننده ذرات اولیه خاک اندازه‌گیری شدند. عمق مؤثر نفوذ نیز (Hillel, 1982) از رابطه ۱ که بر اساس قانون بقای جرم است، تخمین زده شد:

$$EDI = \frac{I}{\theta_{FC} - \theta_i} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن EDI : عمق مؤثر نفوذ (cm)، I : نفوذ تجمعی خاک (cm)، θ_{FC} : رطوبت حجمی در ظرفیت زراعی (cm^3/cm^3)، و θ_i : رطوبت حجمی اولیه خاک (cm^3/cm^3) است.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

به‌منظور بررسی تأثیر توزیع اندازه ذرات معدنی (بافت خاک و درصد سنگریزه) بر شاخص‌های نفوذ آب به خاک، مجموعه‌ای از آماره‌های توصیفی شامل حداقل، حداکثر، میانگین، میانه و انحراف معیار برای شاخص‌های عمق مؤثر نفوذ (EID)، شدت نفوذ متوسط (MIR)، شدت نفوذ اولیه (IIR)، شدت نفوذ نهایی (IIR)، نفوذ اولیه آب (II) و نفوذ تجمعی (CI) محاسبه و همچنین نرمال بودن توزیع داده‌ها نیز به روش کولموگروف-اسمیرنوف بررسی شد. برای تحلیل اثرات متغیرهای مستقل بر ویژگی‌های نفوذ آب: (۱) مقایسه میانگین‌ها برای بررسی تفاوت‌های معنی‌دار آماری بین گروه‌های مختلف توزیع اندازه ذرات خاک و درصد‌های متفاوت سنگریزه با شاخص‌های نفوذ آب به خاک از مقایسه میانگین One-Way ANOVA و شاخص‌های تعیین خطا استفاده شد. (۲) همبستگی پیرسون و اسپیرمن به‌منظور ارزیابی شدت و جهت رابطه بین متغیرهای کمی با توزیع‌های مختلف مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفت. تحلیل داده، ترسیم نمودار و مقایسه میانگین با استفاده از نرم‌افزارهای (Excel, 2016)، زبان برنامه‌نویسی Python(x.3)، SPSS(2022) و R در محیط Posit Cloud انجام شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه

بررسی آماره‌های توصیفی ۶۸ نمونه خاک نشان داد که توزیع اندازه ذرات دامنه وسیعی از شن، سیلت و رس را در بر می‌گیرد (جدول ۱). آزمون کولموگروف-اسمیرنوف توزیع نرمالی را برای همه ویژگی‌ها ($p < 0.05$)، به‌جز، قلوه‌سنگ (Co) تایید کرد. درصد شن بین ۵/۹ تا ۸۲/۷۵ درصد با میانگین ۴۳/۱۵ درصد و انحراف معیار ۱۵/۱۲ درصد متغیر بود. سیلت و رس نیز به‌ترتیب با میانگین ۳۱/۸۷ درصد و ۲۴/۹۸ درصد پراکندگی قابل توجهی نشان دادند. در میان اجزای شن، شن بسیار ریز (VFS) بیشترین سهم (۱۳/۱۳ درصد) را داشت، که می‌تواند ظرفیت نگهداری آب را نسبت به شن درشت افزایش دهد (Weil and Brady, 2016). سنگریزه (G) از ۵/۰۹ تا ۶۱/۲۹ درصد متغیر بود و با میانگین ۲۶/۹۸، بیانگر حضور قابل توجه این اجزا در بسیاری از نمونه‌هاست. درحالی‌که قلوه‌سنگ‌ها (Co) میانگین پایین‌تری داشتند (۱/۳۵ درصد). مجموع ذرات درشت‌تر از ۲ میلی‌متر (TRF) میانگین ۲۸/۳۳ درصد با انحراف معیار ۱۱/۴۷ درصد نشان داد. مقدار کربنات کلسیم (CaCO_3) در نمونه‌های مورد بررسی دامنه‌ای بین ۰ تا ۴۷/۵۰ درصد داشته و مقدار میانگین و میانه آن به‌ترتیب ۱۷/۶۵ و ۱۹/۱۲ درصد است؛ که طبق طبقه‌بندی (2014)، WRB جزو خاک‌های شدیداً آهکی محسوب می‌شوند. همچنین انحراف معیار ۹/۲۷ نشان‌دهنده تغییرپذیری کربنات کلسیم (CaCO_3) در بین نمونه‌هاست. برای ماده آلی خاک (OM)، مقادیر حداقل و حداکثر به‌ترتیب ۰/۰۱ و ۴/۳۲ درصد اندازه‌گیری شد. میانگین ماده آلی خاک (OM) برابر ۱/۲۷ درصد و میانه آن ۰/۹۶ درصد است که همراه با انحراف معیار ۱/۱۰ درصد نشان‌دهنده پراکنش قابل توجه مواد آلی در نمونه‌های مورد مطالعه است. چگالی ظاهری با میانگین ۱/۰۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب نشان‌دهنده شرایط مناسب برای تهویه و حرکت آب در خاک است (Hillel, 1998). این مقدار کمتر از آستانه ۱/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب است که معمولاً به‌عنوان حد بحرانی برای محدود شدن نفوذپذیری و رشد ریشه‌ها در نظر گرفته می‌شود (Reynolds et al., 2009). وجود درصد بالای سنگریزه در برخی نمونه‌ها می‌تواند موجب افزایش نفوذ اولیه آب به‌دلیل ایجاد مسیرهای ترجیحی شود، اما درعین حال با کاهش ظرفیت نگهداری آب همراه است (Poesen and Lavee, 1994). همچنین توزیع ناهمگن ذرات درشت‌تر از ۲ میلی‌متر برخی نمونه‌ها نشان‌دهنده تفاوت‌های مکانی در شرایط تشکیل خاک و نوع سنگ مادر است که می‌تواند بر انتقال آب و توزیع رطوبت تأثیرگذار باشد (Poesen and Lavee, 1994).

جدول ۱. آماره‌های توصیفی برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک

Maximum	Minimum	Median	Mean	Standard deviation	P _{value} (Kolmogorov - Smirnov)	Variable
۶۱/۲۹	۵/۰۹	۲۷/۶۳	۲۸/۳۳	۱۱/۴۷	۰/۳۱	TRF (%)
۲۲/۲۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۳۵	۴/۲۶	۰/۰۰۰۰۱	Co (%)
۶۱/۲۹	۵/۰۹	۲۵/۹۶	۲۶/۹۸	۱۰/۵۶	۰/۶۷	G (%)
۱۷/۰۷	۰/۰۸	۵/۶۷	۵/۶۶	۳/۴۵	۰/۸۳	VCS (%)
۲۲/۳۸	۰/۴۰	۶/۷۴	۶/۹۴	۴/۲۷	۰/۳۹	CS (%)
۱۹/۰۱	۰/۷۷	۶/۷۴	۷/۳۹	۳/۸۰	۰/۶۴	MS (%)
۱۸/۶۵	۱/۴۷	۱۰/۲۷	۱۰/۰۳	۳/۶۶	۰/۹۵	FS (%)
۲۵/۴۸	۱/۹۸	۱۲/۹۲	۱۳/۱۳	۴/۱۹	۰/۳۳	VFS (%)
۸۲/۷۵	۵/۹۰	۴۲/۷۶	۴۳/۱۵	۱۵/۱۲	۰/۴۷	Sand (%)
۵۱/۲۸	۶/۴۴	۳۱/۹۱	۳۱/۸۷	۹/۲۱	۰/۳۱	Silt (%)
۴۵/۱۴	۶/۴۳	۲۴/۵۴	۲۴/۹۸	۸/۴۲	۰/۹۳	Clay (%)
۴۷/۵۰	۰/۰۰	۱۹/۱۲	۱۷/۶۵	۹/۲۷	۰/۳۵	CaCO ₃ (%)
۴/۳۲	۰/۰۱	۰/۹۶	۱/۳۷	۱/۰۱	۰/۱۸	OM (%)
۱/۵۲	۰/۸۳	۱/۰۸	۱/۰۹	۰/۱۲	۰/۶۴	BD (g/cm ³)

TRF: Total Rock Fragments, Co: Cobble, G: Gravel, VCS: Very Coarse Sand, CS: Coarse Sand, MS: Medium Sand, FS: Fine Sand, VFS: Very Fine Sand, OM: Organic Matter, BD: Bulk Density.

شاخص‌های نفوذ آب به خاک

عمق مؤثر نفوذ (EID) در دامنه‌ای بین ۲۶/۷۸ تا ۸۷۱/۸۷ سانتی‌متر تغییر کرده و میانگین آن برابر با ۱۹۰/۰۷ سانتی‌متر با انحراف معیار ۱۳۸/۹۵ سانتی‌متر بوده است (جدول ۲). این مقدار نشان‌دهنده تنوع بالای عمق نفوذ در خاک‌های مورد مطالعه است (ضریب تغییرات حدود ۷۳ درصد). شدت نفوذ متوسط (MIR) نیز با میانگین ۲۴/۰۸ سانتی‌متر بر ساعت و انحراف معیار ۱۶/۸۷ دامنه قابل توجهی داشت (از ۵/۳۰ تا ۸۶/۹۳ سانتی‌متر بر ساعت) و نشان‌دهنده تفاوت قابل توجه بین نمونه‌های خاک در توانایی جذب و انتقال آب است (Hillel, 1998). بیشترین دامنه تغییرات مربوط به شدت نفوذ اولیه (IIR) می‌باشد که از ۱۲ تا ۴۸۰ سانتی‌متر بر ساعت متغیر بوده و میانگین آن ۹۹/۳۵ و انحراف معیار آن ۸۷/۴۶ سانتی‌متر بر ساعت است. این اختلاف زیاد می‌تواند به تفاوت در بافت خاک، میزان رطوبت اولیه، پوشش سطحی و وجود سنگریزه مربوط باشد (Reynolds et al., 2009). شدت نفوذ نهایی که پایداری سیستم نفوذ در زمان‌های طولانی‌تر را نمایش می‌دهد، بین ۳ تا ۴۴/۴ سانتی‌متر بر ساعت قرار داشته و میانگین آن ۱۷/۳۶ و انحراف معیار آن ۱۱/۰۴ سانتی‌متر بر ساعت است. مقدار نفوذ تجمعی آب نیز از ۷/۹۵ تا ۱۳۰/۴ سانتی‌متر تغییر کرده و میانگین آن برابر با ۳۶/۲۱ سانتی‌متر گزارش شده است که نشان‌دهنده عملکرد کلی خاک در جذب آب در طول زمان آزمایش است. در نهایت، نفوذ اولیه نیز از ۰/۱ تا ۴/۰ سانتی‌متر متغیر بود و دارای میانگین ۰/۷۳ سانتی‌متر می‌باشد که نمایانگر تفاوت در شرایط سطحی و ساختار خاک در لحظه شروع آزمایش است.

جدول ۲. آماره‌های توصیفی شاخص‌های نفوذ آب به خاک

(cm) EID	(cm/h) MIR	(cm/h) FIR	(cm/h) IIR	II(cm)	CI (cm)	Variable
۸۷۱/۸۷	۸۶/۹۳	۴۴/۴۰	۴۸۰/۰۰	۴/۰۰	۱۳۰/۴۰	Maximum
۲۶/۷۸	۵/۳۰	۳/۰۰	۱۲/۰۰	۰/۱۰	۷/۹۵	Minimum
۱۵۶/۳۸	۱۹/۴۲	۱۵/۰۰	۷۸/۰۰	۰/۶۵	۲۹/۱۲	Median
۱۹۰/۰۷	۲۴/۰۸	۱۷/۳۶	۹۹/۳۵	۰/۸۳	۳۶/۲۱	Mean
۱۳۸/۹۵	۱۶/۸۷	۱۱/۰۴	۸۷/۴۶	۰/۷۳	۲۵/۲۹	Standard deviation (n-1)

CI: Cumulative Infiltration, II: Initial Infiltration, IIR: Initial Infiltration Rate, FIR: Final Infiltration Rate, Mean Infiltration Rate, Effective Infiltration Depth.

همبستگی دانه‌بندی ذرات با شاخص‌های نفوذ آب به خاک

بررسی ضرایب همبستگی پیرسون و اسپیرمن نشان داد که برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک رابطه‌ی معنی‌داری با شاخص‌های نفوذ آب دارند. نتایج آزمون همبستگی پیرسون با بررسی روابط خطی ویژگی‌ها نشان داد که بین عمق مؤثر نفوذ و درصد سیلت همبستگی منفی و معنی‌دار ($p < 0.01$) وجود دارد. این نتیجه بیان‌گر آن است که با افزایش میزان سیلت در خاک، عمق مؤثر نفوذ کاهش می‌یابد که می‌تواند ناشی از انسداد منافذ و کاهش هدایت هیدرولیکی در خاک‌های با سیلت بالا باشد (Ravina and Magier, 1984). از سوی دیگر تحلیل همبستگی اسپیرمن نیز نشان داد، سیلت با نفوذ اولیه (II) و شدت نفوذ اولیه (IIR) دارای همبستگی مثبت و معنی‌دار ($p < 0.05$)

بود که نشان از اثر بخش سیلت در مراحل ابتدایی فرآیند نفوذ آب به خاک دارد. درمقابل، عمق مؤثر نفوذ با شن کل دارای همبستگی (اسپیرمن) مثبت و معنی‌دار بود ($p < 0.05$). این یافته نشان می‌دهد که درصد بالای شن می‌تواند موجب افزایش نفوذ آب به خاک شود که احتمالاً ناشی از بزرگ‌تر بودن منافذ و افزایش تخلخل درشت در خاک‌های شنی است (Hillel, 2003). در تحلیل اسپیرمن عمق مؤثر نفوذ (EID) با شن کل و اجزای درشت آن شامل شن بسیار درشت (VCS)، شن درشت (CS)، و شن متوسط (MS) دارای همبستگی مثبت و معنی‌دار ($p < 0.05$) بودند (جدول ۳). این یافته‌ها بیان‌گر نقش مثبت ذرات درشت در افزایش حجم خلل و فرج و تسهیل نفوذ آب در نیمرخ خاک است (Hillel, 2003; Rawls et al, 1982). افزایش سهم ذرات درشت‌تر در ترکیب خاک به‌طور معنی‌داری می‌تواند باعث افزایش عمق مؤثر نفوذ آب در خاک شود (Rawls et al, 1982). ذرات درشت‌تر خاک (به‌ویژه شن درشت و شن متوسط) به‌دلیل ایجاد ساختار بازتر و کاهش مقاومت در برابر جریان آب تأثیر مهم و مثبت بر افزایش عمق مؤثر نفوذ دارند (Tisdall and Oades, 1982). تحلیل اسپیرمن برای شاخص‌های نفوذ اولیه (IIR) و شدت نفوذ اولیه (IIR) با سنگریزه کل (TRF) دارای همبستگی مثبت و معنی‌دار ($p < 0.05$) بود. این ارتباط حاکی از نقش احتمالی ذرات سنگریزه‌ای در ایجاد مسیرهای نفوذ سریع‌تر و جریان ترجیحی برای آب در خاک‌های دارای سنگریزه به‌ویژه در مراحل ابتدایی نفوذ است (Ahuja et al., 1984; Tisdall and Oades, 1982; Katuwal et al., 2021). نیز بیان داشتند بخش سنگی می‌تواند با ایجاد مسیرهای نفوذ مداوم ترجیحی همراه با عدم پیر شدن کامل خلل و فرج بین سنگریزه‌ها با مواد خاکی؛ جلوگیری از فشردگی خاک در اطراف آن‌ها؛ ایجاد ترک‌ها و منافذ درشت در مرز بین سنگریزه و خاک ناشی از واکنش‌های انقباض-انبساط یا یخ‌زدگی و ذوب شدن، شرایط لازم را برای نفوذ سریع آب فراهم کند. این یافته‌ها این پژوهش بر اهمیت ویژه‌ی توزیع اندازه ذرات خاک و سنگریزه در تعیین الگوی نفوذ آب تأکید دارد و بیان‌گر اثر توزیع اندازه ذرات به‌عنوان یک عامل تعیین‌کننده در فرآیند نفوذ آب است (Jury and Horton, 2004).

جدول ۳: همبستگی اسپیرمن بین شاخص‌های نفوذ و توزیع اندازه ذرات و سنگریزه

TRF (%)	VFS (%)	FS (%)	MS (%)	CS (%)	VCS (%)	Sand (%)	Clay (%)	Silt (%)	Variables
								۱/۰۰	Silt (%)
							۱/۰۰	**./۳۹	Clay (%)
						۱/۰۰	**./۸۳-	**./۸۱-	Sand (%)
					۱/۰۰	**./۸۲	**./۶۹-	**./۶۷-	VCS (%)
				۱/۰۰	**./۹۳	**./۸۹	**./۷۲-	**./۷۳-	CS (%)
			۱/۰۰	**./۹۳	**./۸۳	**./۹۳	**./۷۶-	**./۷۸-	MS (%)
		۱/۰۰	**./۷۳	**./۵۷	**./۴۴	**./۷۶	**./۶۰-	**./۷۰-	FS (%)
	۱/۰۰	**./۳۸	*./۲۶	*./۱۳	*./۱۲	**./۴۷	**./۴۴-	**./۳۲-	VFS (%)
۱/۰۰	*./۰۶-	*./۱۱	*./۲۸	*./۳۱	**./۳۶	*./۲۳	*./۲۳-	*./۱۵-	TRF (%)
**./۹۲	*./۰۲-	*./۱۶	*./۲۹	*./۳۱	**./۳۳	*./۲۱	*./۲۲-	*./۱۶-	G (%)
**./۳۸	*./۰۸-	*./۱۵-	*./۰۱	*./۰۳	*./۱۲	*./۰۳	*./۰۷-	*./۰۸	Co (%)
*./۱۵	*./۱۰-	*./۰۴-	*./۰۸	*./۱۶	*./۱۱	*./۰۶	*./۰۳-	*./۰۵	CI (cm)
*./۲۴	*./۱۵-	*./۱۹-	*./۱۲-	*./۰۶-	*./۱۳-	*./۱۴-	*./۱۱	*./۲۵	II (cm)
*./۲۴	*./۱۵-	*./۱۹-	*./۱۲-	*./۰۶-	*./۱۳-	*./۱۴-	*./۱۱	*./۲۵	IIR (cm/h)
*./۰۹	*./۱۳-	*./۰۶-	*./۰۶	*./۱۶	*./۱۲	*./۰۴	*./۰۳-	*./۰۶	FIR (cm/h)
*./۱۵	*./۱۰-	*./۰۴-	*./۰۸	*./۱۶	*./۱۱	*./۰۶	*./۰۳-	*./۰۵	MIR (cm/h)
*./۲۱	*./۰۶-	*./۱۶	*./۲۷	*./۳۲	*./۲۷	*./۲۵	*./۲۱-	*./۱۳-	EID (cm)
	EID (cm)	MIR (cm/h)	FIR (cm/h)	IIR (cm/h)	II (cm)	CI (cm)	Co (%)	G (%)	Variables
								۱/۰۰	G (%)
							۱/۰۰	*./۰۶	Co (%)
						۱/۰۰	*./۱۶	*./۱۰	CI (cm)
				۱/۰۰	**./۷۹	*./۱۵	*./۲۰	*./۲۰	II (cm)
			۱/۰۰	**./۷۲	**./۷۲	**./۹۵	*./۱۶	*./۰۴	FIR (cm/h)
		۱/۰۰	**./۹۵	**./۷۹	**./۷۹	**./۱۰۰	*./۱۶	*./۱۰	MIR (cm/h)
	۱/۰۰	**./۹۱	**./۶۷	**./۶۷	**./۶۷	**./۹۱	*./۱۳	*./۱۵	EID (cm)

VCS: Very Coarse Sand, CS: Coarse Sand, MS: Medium Sand, FS: Fine Sand, VFS: Very Fine Sand, TRF: Total Rock Fragments, G: Gravel, Co: Cobble, CI: Cumulative Infiltration, II: Initial Infiltration, IIR: Initial Infiltration Rate, FIR: Final Infiltration Rate, Mean
 ** Significant at $p < 0.01$, *Significant at $p < 0.05$ Infiltration Rate, Effective Infiltration Depth.

نقش توزیع اندازه ذرات در شاخص‌های نفوذ آب به خاک

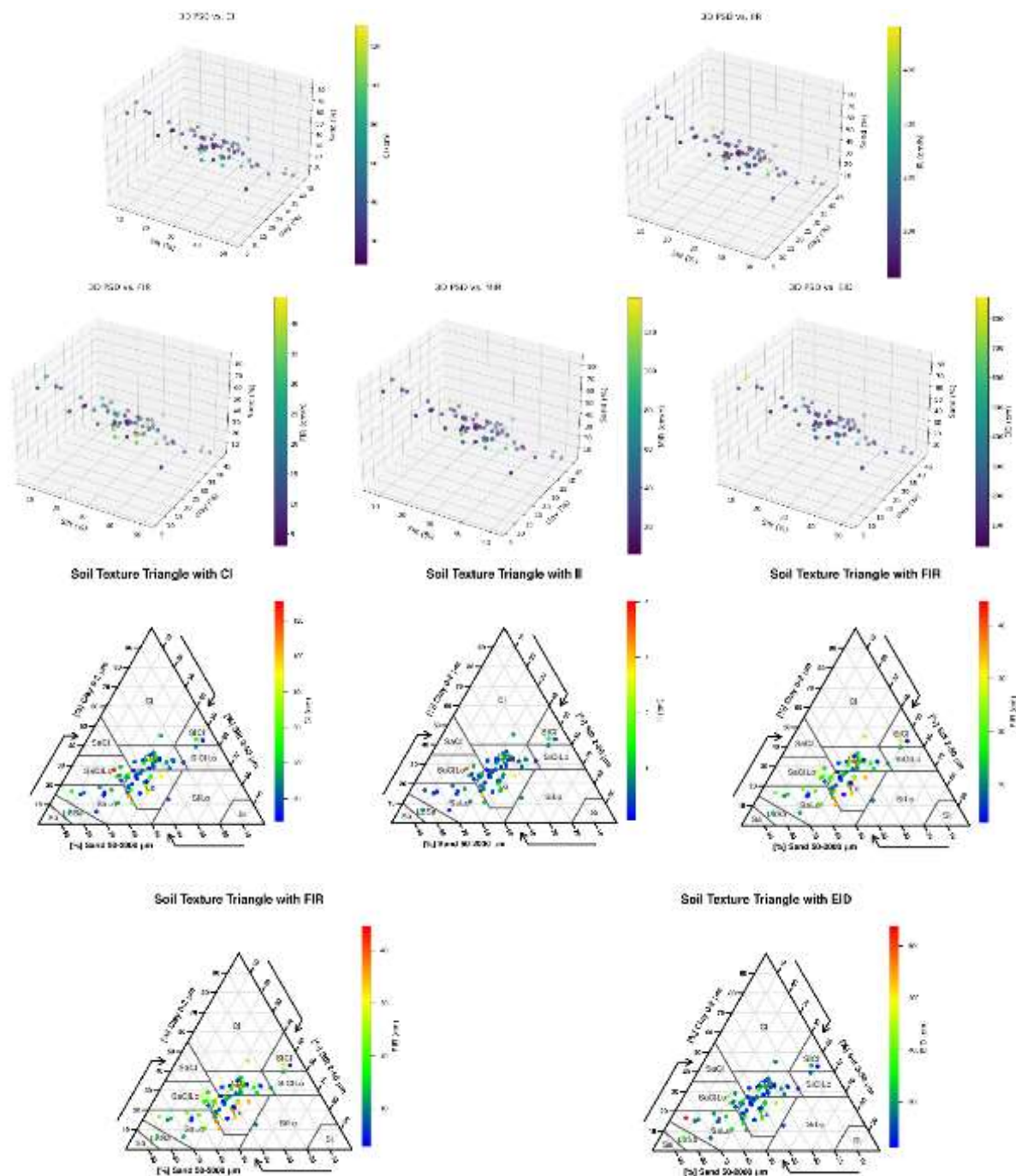
بررسی نمودارهای سه بعدی درصد نسبی ذرات اولیه و کلاس بافتی با شاخص‌های نفوذ (شکل ۳) نشان داد که در تمامی شاخص‌ها، افزایش درصد شن معمولاً با افزایش نفوذ تجمعی همراه بوده و در مقابل، افزایش درصد رس منجر به کاهش در مقادیر شاخص‌های نفوذ می‌شود که با نتایج Lado et al., (2004) همخوانی دارد. این پدیده به ساختار فیزیکی متفاوت این ذرات برمی‌گردد؛ به طوری که خاک‌های شنی با دارا بودن فضاهای بین‌ذره‌ای بیشتر، هدایت‌پذیری بالاتری نسبت به خاک‌های رسی دارند (Hillel, 2003). طبق نمودار سه بعدی، اثر ترکیبی بیشتر و مثبت شن و سیلت بر افزایش شاخص‌های نفوذ در مقایسه با سایر ترکیب ذرات اولیه قابل مشاهده است (جدول ۲). یافته‌های پژوهش Ravina and Magier, (1984) نیز نشان داده است نفوذ آب به خاک در بافت‌های سبک‌تر (رس کمتر از ۲۰ درصد و شن بالای ۵۰ درصد) بیشتر است. در این راستا، Lado et al., (2004) نیز ابراز داشتند نفوذ تجمعی که حاصل انتگرال زمانی از شدت نفوذ است در خاک‌های شنی بیشتر از خاک‌های رسی است. به طور کلی نتایج به دست آمده این پژوهش حاکی از این بود بیشترین مقادیر نفوذ تجمعی عموماً در نمونه‌هایی با کلاس‌های بافتی سبک قرار داشتند. در مقابل، به طور کلی کلاس‌های بافتی سنگین کمترین مقادیر نفوذ تجمعی را نشان دادند که با یافته‌های Jury and Horton, (2004) همخوانی دارد.

نقش غیرمستقیم توزیع اندازه ذرات در نفوذ آب به خاک

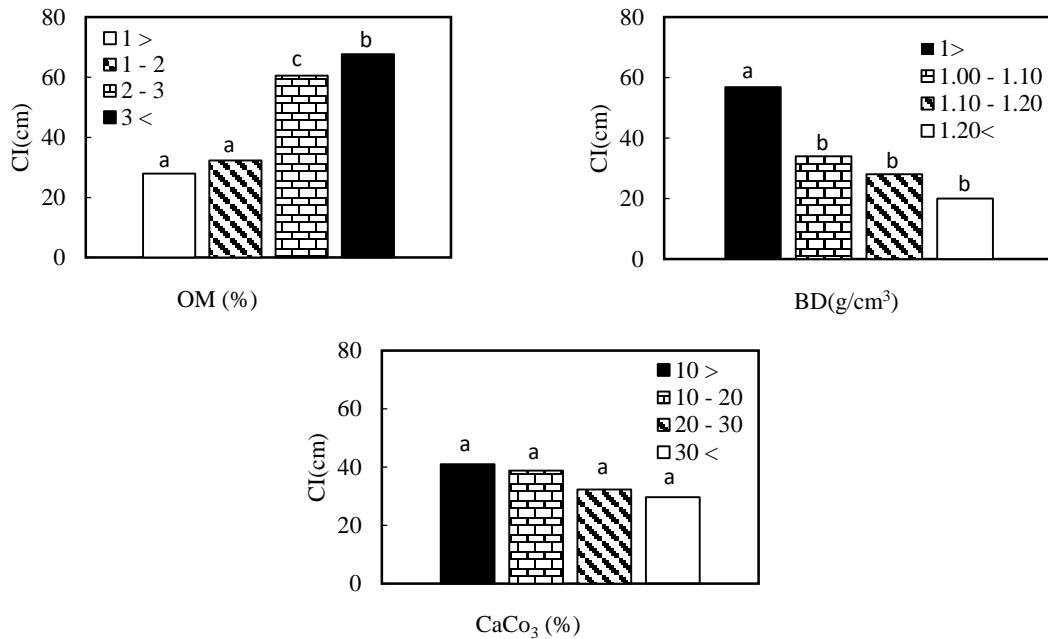
نتایج حاصل از آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه (One-Way ANOVA) نشان داد که تفاوت میانگین نفوذ تجمعی در بین گروه‌های مختلف چگالی ظاهری (شکل ۴) از نظر آماری معنی‌دار است ($p < 0.01 - F = 6.71$). از طرف دیگر در تحلیل پیرسون چگالی ظاهری (BD) و درصد شن و سیلت به ترتیب با ضریب 0.49 و -0.51 در سطح احتمال ۵ درصد همبستگی معنی‌داری داشت ($p < 0.05$). این یافته بیان‌گر آن است که با افزایش محتوای شن به دلیل کاهش تخلخل کل و افزایش فشردگی، چگالی ظاهری افزایش می‌یابد؛ در حالی که حضور بیشتر سیلت معمولاً موجب افزایش تخلخل و کاهش چگالی ظاهری می‌شود (Hillel, 1998). چگالی ظاهری (BD) با اندازه‌های مختلف ذرات شن نیز همبستگی معنی‌دار داشت؛ به طوری که ضرایب همبستگی پیرسون با بخش‌های شن بسیار درشت، درشت، متوسط و ریز به ترتیب برابر 0.40 ، 0.44 ، 0.49 و 0.42 به دست آمد. از طرفی دیگر چگالی ظاهری (BD) با شاخص‌های مختلف نفوذ رابطه منفی معنی‌داری نشان داد. مقادیر ضریب همبستگی پیرسون بین نفوذ تجمعی، نفوذ اولیه، شدت نفوذ نهایی و شدت نفوذ متوسط با چگالی ظاهری (BD) به ترتیب برابر -0.47 ($p < 0.01$)، -0.38 ($p < 0.05$)، -0.42 ($p < 0.05$) و -0.47 ($p < 0.01$) بود. این روابط منفی نشان می‌دهند که افزایش چگالی ظاهری (BD) منجر به کاهش شدت و مقدار نفوذ آب به خاک می‌شود که می‌تواند به دلیل کاهش تخلخل کل و کاهش اندازه و پیوستگی منافذ مؤثر باشد (Reynolds et al., 2009). 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 مانند چگالی ظاهری (BD) بر شاخص‌های نفوذ می‌گذارند. نتایج پژوهش Cleophas et al., (2022) نیز نشان می‌دهد، هرچه چگالی ظاهری افزایش یابد به عبارتی خاک متراکم‌تر شود، شدت نفوذ آب کاهش پیدا می‌کند. این امر اهمیت ویژگی توزیع اندازه ذرات را بیشتر نمایان می‌کند. مطالعات پیشین نیز بر اهمیت نقش توزیع اندازه ذرات بر ویژگی‌های فیزیکی خاک از جمله چگالی ظاهری، تخلخل، ساختمان خاک و هدایت هیدرولیکی تأکید کرده‌اند (Assouline, 2006; Tuller and Or, 2005).

نتایج همبستگی پیرسون به وضوح نشان داد که ماده آلی تأثیر زیادی بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک دارد. تمامی شاخص‌های مرتبط با نفوذپذیری خاک رابطه مثبت و معنی‌داری با ماده آلی نشان دادند. بیشترین ضریب همبستگی مربوط به نفوذ تجمعی ($r = 0.51$) و شدت نفوذ متوسط ($r = 0.51$) بود ($p < 0.01$). شدت نفوذ اولیه ($r = 0.44$, $p < 0.01$) و شدت نفوذ نهایی ($r = 0.30$, $p < 0.01$) نیز از این رابطه مثبت پیروی کردند. نتایج حاصل از تجزیه واریانس یک‌طرفه (One-Way ANOVA) ماده آلی (OM) نیز نشان داد، همه سطوح مختلف ماده آلی (کمتر از یک، ۱ - ۲، ۲ - ۳ و بیش از ۳ درصد) تأثیر بسیار معنی‌داری بر نفوذ تجمعی داشتند ($p < 0.01$). مقایسه میانگین‌ها به روش توکی نیز حاکی از آن بود که بین گروه‌های اول و سوم، اول و چهارم، دوم و سوم و چهارم تفاوت معنی‌دار وجود دارد ($p < 0.01$). این نتایج با یافته‌های پژوهش‌های متعددی در سراسر جهان همخوانی دارد که بر نقش کلیدی ماده آلی در بهبود خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک تأکید کرده‌اند (Lal, 2020). تأثیر بسیار معنی‌دار ماده آلی بر نفوذ تجمعی را می‌توان به نقش ماده آلی در تشکیل و پایداری خاک‌دانه‌ها نسبت داد (Six et al., 2004). این خاک‌دانه‌ها یک شبکه منافذ درشت (ماکروپور) پایدار را در خاک تشکیل می‌دهند که مسیرهای با سهولت برای حرکت آب فراهم کرده و در نتیجه حجم کل آب نفوذیافته را به طور چشمگیری افزایش می‌دهند.

(Kutlek and Nielsen, 1994). کربنات کلسیم با تمامی شاخص‌های نفوذ همبستگی منفی غیرمعنی‌دار داشت. همچنین همه سطوح مختلف کربنات کلسیم (کمتر از ۱۰، ۱۰ - ۲۰، ۲۰ - ۳۰ و بیش از ۳۰ درصد) تأثیر معنی‌داری بر نفوذ تجمعی نداشتند. در خاک‌های آهکی، کربنات کلسیم می‌تواند با تأثیر بر pH خاک و تشکیل ترکیبات نامحلول، منافذ خاک را مسدود کند (Lal, 2001) و این فرآیندها در نهایت منجر به کاهش هدایت هیدرولیکی و نفوذپذیری خاک می‌شوند. از طرفی طبق پژوهش Yavari et al., (2020) بیشتر خاک‌های کشور میزان آهک بالایی دارند و آهک بیشتر به صورت ذرات اولیه در خاک وجود دارد و کمتر به عنوان عامل سیمانی مشاهده می‌شود. طبق طبقه‌بندی (WRB, 2014) خاک‌های مورد مطالعه در این پژوهش نیز جزو خاک‌های شدیداً آهکی محسوب می‌شوند.



شکل ۳: نمودارهای سه بعدی توزیع اندازه ذرات اولیه و نمودارهای مثلث بافت خاک با شاخص‌های نفوذ

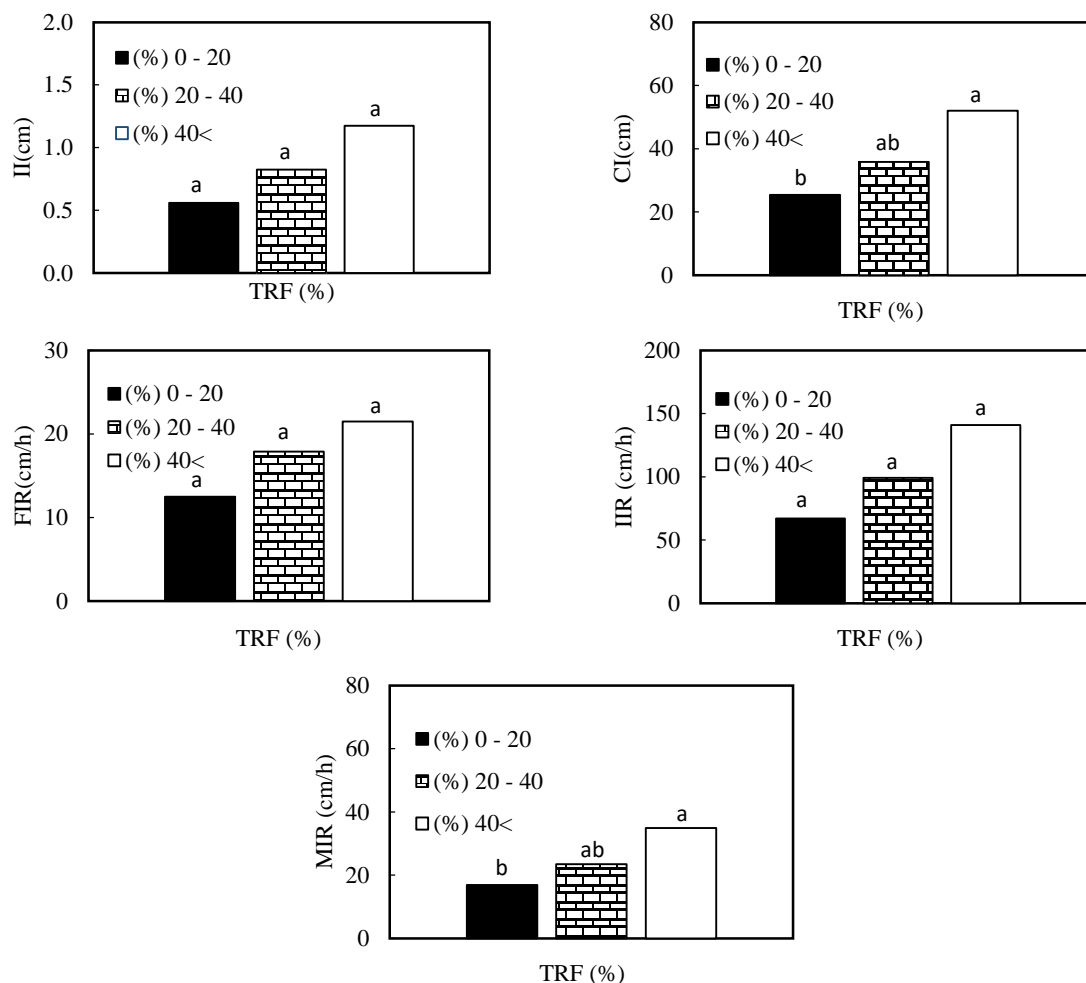


شکل ۴: ارتباط نفوذ تجمعی آب به خاک (CI) با چگالی ظاهری (BD)، ماده آلی (OM) و کربنات کلسیم (CaCO₃)
 حروف غیر مشابه نشان دهنده تفاوت معنی دار در سطح احتمال ۰/۰۱ است.

تأثیر بخش سنگی بر نفوذ آب به خاک

تحلیل مقایسه‌ای بین گروه‌های مختلف درصد سنگریزه (۰-۲۰، ۲۰-۴۰ و بیش از ۴۰ درصد) نشان داد که با افزایش مقدار سنگریزه، همه شاخص‌های نفوذ آب به خاک افزایش می‌یابد (شکل ۵). میانگین نفوذ تجمعی از ۲۵/۴۱ سانتی‌متر در گروه اول به ۵۲/۰۰ سانتی‌متر در گروه سوم و نفوذ اولیه از ۰/۵۶ به ۱/۱۸ سانتی‌متر افزایش یافت (شکل ۵). این افزایش قابل توجه می‌تواند ناشی از افزایش تخلخل کل، کاهش تراکم خاک، و ایجاد مسیرهای ماتریکسی برای جریان آب در خاک‌های دارای سنگریزه باشد (Poesen and Lavee, 1994; Hillel, 1998). ذرات درشت مانند سنگریزه می‌توانند ساختار خاک را بازتر کرده و باعث کاهش مقاومت مکانیکی در برابر نفوذ آب شوند، به‌ویژه زمانی که در ماتریس خاک توزیع مناسبی داشته باشند (Ravina and Magier, 1984). از نظر آماری گروه دوم (۲۰-۴۰ درصد) دارای خطای استاندارد نسبی (RSE) برابر با ۹/۷۱ درصد برای نفوذ تجمعی بود که بیانگر یکنواختی بیشتر و دقت بالاتر در برآورد میانگین است. در مقابل، گروه سوم (بیش از ۴۰ درصد) با وجود بالاتر بودن میانگین نفوذ، دارای RSE معادل ۲۱/۰۷ درصد بود که حاکی از افزایش پراکندگی داده‌ها و کاهش دقت برآورد است. این موضوع می‌تواند به توزیع ناهمگون سنگریزه، ایجاد خلل و فرج نامنظم و کاهش پیوستگی منافذ در درصدهای بالای سنگریزه مرتبط باشد (Nimmo, 2004).

نتایج آنالیز واریانس یک‌طرفه (ANOVA) نشان داد که تفاوت میانگین نفوذ تجمعی (CI) و شدت نفوذ متوسط (MIR) بین گروه‌های مختلف سنگریزه‌ای از نظر آماری در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود ($p < 0.05$). آزمون تعقیبی Tukey HSD نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین گروه اول و سوم سنگریزه در نفوذ تجمعی ($p = 0.014$) و شدت نفوذ متوسط ($p = 0.04$) وجود دارد. اما تفاوت در میانگین نفوذ اولیه و شدت‌های نفوذ اولیه و نهایی معنی‌دار نبود. به عبارت دیگر، نقش اصلی سنگریزه در بهبود نفوذپذیری، بیشتر در فاز پایدار و تجمعی نفوذ ظاهر می‌شود و این یافته با نتایج گزارش شده توسط Ahuja et al., (1998) نیز مطابقت دارد. پژوهش Fachi et al., (2023) نشان داد افزایش سنگریزه (بیش از ۶۰ درصد حجمی) در نیمرخ خاک، باعث افزایش نفوذ تجمعی و افزایش شدت نفوذ نهایی تا ۱۶ برابر نسبت به خاک بدون سنگریزه می‌شود. البته نتایج برخی پژوهش‌ها برخلاف این یافته است؛ به طوری که نتایج مطالعه Ma et al., (2024) در منطقه‌ی کوهستانی چین نشان می‌دهد که با افزایش درصد سنگریزه (از ۰ تا ۵۰ درصد)، عمق مرز تر شدن و نفوذ تجمعی تا حدود ۷۳ درصد کاهش می‌یابد. این مطلب مبین پیچیدگی و چند عاملی بودن فرآیند نفوذ آب به خاک است.



شکل ۵: نمودار میله‌ای سنگریزه‌کل با نفوذ تجمعی (CI)، نفوذ اولیه (II)، شدت نفوذ اولیه (IIR)، شدت نفوذ نهایی (FIR) و شدت نفوذ متوسط (MIR). حروف غیر مشابه نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش نقش توزیع اندازه ذرات و بخش سنگی در تعیین شاخص‌های نفوذ آب بررسی شد. نتایج نشان داد که سیلت تأثیر دوگانه‌ای بر شاخص‌های نفوذ دارد؛ به طوری که با عمق مؤثر نفوذ رابطه منفی و با نفوذ اولیه و شدت نفوذ اولیه رابطه مثبت و معنی‌داری داشت. در مقابل ذرات درشت‌تر مانند شن کل و اجزای آن با عمق مؤثر نفوذ همبستگی مثبت و معنی‌داری نشان دادند که نشان‌گر نقش این ذرات در افزایش خلل و فرج و تسهیل نفوذ آب است. از سوی دیگر، توزیع اندازه ذرات نه تنها به صورت مستقیم، بلکه از طریق اثرگذاری بر ساختمان خاک، چگالی ظاهری و توزیع خلل و فرج نیز به صورت غیرمستقیم بر نفوذ آب اثر می‌گذارد. یافته‌ها بیانگر آن است که ساختار فیزیکی خاک شامل اندازه و نسبت اجزای آن تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر الگوی نفوذ دارد. در این میان، نتایج نشان داد که ماده آلی به طور بسیار معنی‌داری نفوذ آب به خاک را افزایش می‌دهد که این اثر می‌تواند به دلیل نقش آن در تشکیل و پایداری خاک‌دانه‌ها و ایجاد شبکه منافذ درشت پایدار باشد. در مقابل کربنات کلسیم تأثیر معنی‌داری بر نفوذ آب به خاک نداشت. در بخش سنگی، افزایش درصد سنگریزه موجب بهبود نفوذپذیری فرآیند نفوذ شد. سنگریزه‌کل با شاخص‌های نفوذ تجمعی و شدت نفوذ متوسط دارای همبستگی مثبت و معنی‌دار بود. تحلیل مقایسه‌ای بین گروه‌های مختلف درصد سنگریزه (۰-۲۰، ۲۰-۴۰ و بیش از ۴۰ درصد) نشان داد که با افزایش مقدار سنگریزه همه شاخص‌های نفوذ آب به خاک افزایش می‌یابد. از آنجاکه روابط میان ویژگی‌های فیزیکی خاک و شاخص‌های نفوذ اغلب غیرخطی و چندعاملی‌اند، استفاده از روش‌های تحلیل چندمتغیره و الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تبیین دقیق‌تر این روابط ضروری به نظر می‌رسد.

پیشنهادها

با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش و چالش‌های مرتبط با پیش‌بینی و تحلیل فرآیند نفوذ آب به خاک، پیشنهاد می‌شود روند تحقیقات آتی در این زمینه به صورت: (۱) ترکیب شاخص‌های ساختاری خاک (مانند بعد فرکتالی، پایداری خاک‌دانه، خلل‌و فرج) با ویژگی‌های توزیع اندازه ذرات و سنگریزه برای بهبود قدرت پیش‌بینی مدل‌ها. (۲) استفاده از مدل‌های ترکیبی فیزیکی-یادگیری ماشین برای بهره‌برداری هم‌زمان از دانش نظری خاک‌شناسی و قدرت پیش‌بینی مدل‌های داده‌محور گسترش یابد.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

مقاله حاضر با پشتیبانی تجهیزاتی گروه علوم و مهندسی خاک و حمایت مالی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه زنجان انجام شد. حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه زنجان دانشکده کشاورزی در قالب پژوهانه پایان‌نامه دانشجویی نویسنده اول و همچنین پژوهانه برای سایر نویسندگان انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

جمع‌آوری داده‌ها تهیه گزارش پژوهش تحلیل داده‌ها نویسندگان به طور مساوی در کلیه مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش‌نویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.

مشارکت نویسندگان در مقاله مستخرج از پایان‌نامه تقریباً به شکل زیر باشد:

نویسنده اول: دانشجو: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش‌نویس مقاله

نویسنده دوم: استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

نویسنده سوم: استاد مشاور پایان‌نامه، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

این مقاله حاصل پژوهش صحرایی و نگارش مستقیم نویسندگان مقاله است و از هوش مصنوعی در هیچ مرحله‌ای بهره‌گرفته نشده است. نویسندگان مسئولیت کامل محتوای مقاله را بر عهده می‌گیرند.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه زنجان به خاطر پشتیبانی مالی در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود. نگارندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از همکاری و حمایت‌های گروه علوم و مهندسی خاک و به‌ویژه آزمایشگاه خاک‌شناسی دانشگاه زنجان و همچنین از داوران محترم این مقاله که با نظرات و پیشنهادهای خود در ارتقای علمی آن تلاش می‌کنند، صمیمانه قدردانی نمایند.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

این پژوهش در شورای گروه خاک‌شناسی و شورای دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان مطابق مصوبه شورای دانشکده دریافت کرده است. نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

REFERENCES

Ahuja, L. R., Fiedler, F., Dunn, G. H., Benjamin, J. G., & Garrison, A. (1998). Changes in soil water retention curves due

- to tillage and natural reconsolidation. *Soil Science Society of America Journal*, 62(5), 1228-1233.
- Ahuja, L. R., Naney, J. W., Green, R. E., & Nielsen, D. R. (1984). Macroporosity to characterize spatial variability of hydraulic conductivity and effects of land management. *Soil Science Society of America Journal*, 48(4), 699-702.
- Ajwa, H.A. & T.J. Trout. (2006). Polyacrylamide and water quality effects on infiltration in sandy loam soils. *Soil Science Society of America Journal*, 70: 643-650.
- Assouline, S. (2006). Modeling the relationship between soil bulk density and the water retention curve. *Vadose Zone Journal*, 5(2), 554-563.
- Assouline, S. (2013). Infiltration into soils: Conceptual approaches and solutions. *Water Resources Research*, 49(4), 1755-1772.
- Azadegan, B. (2025). Evaluation and comparison of measured and estimated infiltration rate in three soil textures. *Water and Irrigation Management*, 15(2), 221-233.
- Barthès, B. G., Kouakoua, E., Larré-Larrouy, M. C., Razafimbelo, T. M., de Luca, E. F., Azontonde, A., & Feller, C. L. (2008). Texture and sesquioxide effects on water-stable aggregates and organic matter in some tropical soils. *Geoderma*, 143(1-2), 14-25.
- Beck-Broichsitter, S., Schroeder, R., Mordhorst, A., Fleige, H., & Horn, R. (2023). Soil water diffusivity as function of the pore size distribution and precompression stress. *Soil and Tillage Research*, 229, 105675.
- Brakensiek, D. L., & Rawls, W. J. (1994). Soil containing rock fragments: effects on infiltration. *Catena*, 23(1-2), 99-110.
- Brakensiek, D. L., Rawls, W. J., & Stephenson, G. R. (1986). Determining the saturated hydraulic conductivity of a soil containing rock fragments. *Soil Science Society of America Journal*, 50(3), 834-835.
- Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124(1-2), 3-22.
- Castro, C., & Logan, T. J. (1991). Liming effects on the stability and erodibility of some Brazilian Oxisols. *Soil Science Society of America Journal*, 55(5), 1407-1413.
- Cleophas, F., Isidore, F., Musta, B., Ali, B. M., Mahali, M., Zahari, N. Z., & Bidin, K. (2022, August). Effect of soil physical properties on soil infiltration rates. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2314, No. 1, p. 012020). IOP Publishing.
- Cousin, I., Nicoulaud, B., & Coutadeur, C. (2003). Influence of rock fragments on the water retention and water percolation in a calcareous soil. *Catena*, 53(2), 97-114.
- Culley, J.L.B., 1993. Density and compressibility in Soil sampling and methods of analysis (ed. Carter, MR) 529–549.
- Duiker, S. W., Flanagan, D. C., & Lal, R. (2001). Erodibility and infiltration characteristics of five major soils of southwest Spain. *Catena*, 45(2), 103-121.
- Fachi, S. M., Gubiani, P. I., Pedron, F. D. A., & Rauber, L. R. (2023). Rock-soil skeleton increases water infiltration. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 47, e0230029.
- Feki, M., Ravazzani, G., Ceppi, A., Milleo, G., & Mancini, M. (2018). Impact of infiltration process modeling on soil water content simulations for irrigation management. *Water*, 10(7), 850.
- Hillel, D. (1982). Introduction to soil physics. Academic Press.
- Hillel, D. (1998). Environmental Soil Physics Academic Press. San Diego, CA.
- Hillel, D. (2003). Introduction to Environmental Soil Physics. Elsevier.
- Ilek, A., Kucza, J., & Witek, W. (2019). Using undisturbed soil samples to study how rock fragments and soil macropores affect the hydraulic conductivity of forest stony soils: Some methodological aspects. *Journal of Hydrology*, 570, 132-140.
- 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).
- Jury, W. A., & Horton, R. (2004). *Soil Physics*. John Wiley and Sons.
- Katuwal, S., Ashworth, A. J., & Owens, P. R. (2021). Preferential flow under high-intensity short-duration irrigation events in soil columns from a karst and nonkarst landscape. *Vadose Zone Journal*, 20(6), e20160.
- Klute, A. (Ed.). (1986). Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods (2nd ed.). *American Society of Agronomy and Soil Science Society of America*.
- Kutílek, M., & Nielsen, D. R. (1994). Soil hydrology. *Catena-Verlag*.
- Lado, M., A. Paz & M. Ben-Hur. (2004). Organic matter and aggregate size interactions in infiltration, seal formation, and soil loss. *Soil Science Society of America Journal*, 68: 935-942.
- Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. *Land degradation and development*, 12(6), 519-539.
- Lal, R. (2020). Soil organic matter and water retention. *Agronomy Journal*, 112(5), 3265-3277.
- Li, J., Wang, W., Guo, M., Kang, H., Wang, Z., Huang, J., & Bai, Y. (2020). Effects of soil texture and gravel content on the infiltration and soil loss of spoil heaps under simulated rainfall. *Journal of Soils and Sediments*, 20, 3896-3908.
- Ma, W., Zhang, X., Zhen, Q., & Zhang, Y. (2016). Effect of soil texture on water infiltration in semiarid reclaimed land. *Water Quality Research Journal of Canada*, 51(1), 33-41.
- Ma, Y., Wang, Y., Zhang, Y., Zhang, R., Yuan, C., Ma, C., & Bai, Y. (2024). Effects of gravel on the water infiltration process and hydraulic parameters of stony soil in the eastern foothills of Helan Mountain, China. *Scientific Reports*, 14(1), 16426.
- Mohammadi, M.H., & Refahi, H.G.H., (2005). Estimation of parameters of infiltration equations using soil physical characteristics. *Iranian Journal of Agriculture Science*, 36(6), 1391-1398.

- Nimmo, J. R. (2004). Porosity and pore size distribution. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, 3(1), 295-303.
- Orts, W. J., Sojka, R. E., & Glenn, G. M. (2000). Biopolymer additives to reduce erosion-induced soil losses during irrigation. *Industrial Crops and Products*, 11(1), 19-29.
- Page, A. L., Miller, R. H., & Keeney, D. R. (1982). Methods of soil analysis, part II. *American Society of Agronomy*, Madison, WI.
- Poesen, J., & Lavee, H. (1994). Rock fragments in top soils: significance and processes. *Catena*, 23(1-2), 1-28.
- Ravina, I., & Magier, J. (1984). Hydraulic conductivity and water retention of clay soils containing coarse fragments. *Soil Science Society of America Journal*, 48(4), 736-740.
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., & Saxton, K. E. (1982). Estimation of soil water properties. *Transactions of the ASAE*, 25(5), 1316-1320.
- Reynolds, W. D., Drury, C. F., Tan, C. S., Fox, C. A., & Yang, X. M. (2009). Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152(3-4), 252-263.
- sedayeeazar, Z., Mohammadi, M. H. and 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.
- Shabani A, Jahanbazi A, Ahmadi S H, Moghimi M M, Bahrami M.(2018). Assessing the infiltrability of gravelly soils under and between the orange and olive trees in Fasa city. *Journal of Water and Soil Science*, 22 (1) :175-185
- Shukla, M. K., Lal, R., Underwood, J., & Ebinger, M. (2004). Physical and hydrological characteristics of reclaimed minesoils in southeastern Ohio. *Soil Science Society of America Journal*, 68(4), 1352-1359.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., & Deneff, K. (2004). A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and tillage research*, 79(1), 7-31.
- Soil Survey Staff. (2014). Keys to Soil Taxonomy (12th ed.). USDA-Natural Resources Conservation Service.
- Tisdall, J. M., & OADES, J. M. (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33(2), 141-163.
- Tuller, M., & Or, D. (2005). Water films and scaling of soil characteristic curves at low water contents. *Water Resources Research*, 41(9).
- Turner, E.R. (2006). Comparison of infiltration equations and their field validation with rainfall simulation. M.Sc. Thesis, University of Maryland, USA, 202p.
- USDA Natural Resources Conservation Service. (2019). Soil quality indicators: Available water capacity. USDA-NRCS.
- Walkley, A. & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38.
- Wang, P., Su, X., Zhou, Z., Wang, N., & Zhu, B. (2023). Differential effects of soil texture and root traits on the spatial variability of soil infiltrability under natural revegetation in the Loess Plateau of China. *Catena*, 220, 106693.
- Weil, R., & Brady, N. (2016). The nature and properties of soils, 15th edn., edited by: Fox, D. D.[Google Scholar].
- Yavari, M., Mohammadi, M. and 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.
- 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.
- Zewide, I., (2021). Review paper on effect of natural condition on soil infiltration. *Chemistry*, 7(1), pp.34-41p.
- Zhang, Y., Zhang, M., Niu, J., Li, H., Xiao, R., Zheng, H., & Bech, J. (2016). Rock fragments and soil hydrological processes: significance and progress. *Catena*, 147, 153-166.
- Zhao, S. Y., Jia, Y. W., Gong, J. G., Niu, C. W., Su, H. D., Gan, Y. D., & Liu, H. (2020). Spatial variability of preferential flow and infiltration redistribution along a rocky-mountain hillslope, northern China. *Water*, 12(4), 1102.
- Zheng, Y., Chen, N., Zhang, C., Dong, X., & Zhao, C. (2021). Effects of rock fragments on the soil physicochemical properties and vegetation on the northeastern Tibetan Plateau. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 693769.