

Research Article

Determinating the Threshold Value of Soil Organic Matter for Water Infiltration in Semi-Arid Region (Case Study: Zanjan Province)

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

1-Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

E-mail: vaezi.alireza@gmail.com or vaezi.alireza@znu.ac.ir

2- Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

Email: mortazayavari90@gmail.com

3-Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. Email: askari@znu.ac.ir

Received: July 8, 2026

Revised: August 9, 2026

Accepted: August 10, 2026

Published: August 20, 2026

Extended Abstract

Background and Objectives

Water infiltration is one of the most important indicators of soil physical quality and is strongly influenced by soil organic matter (SOM). Soil organic matter improves soil structure, porosity, and permeability while reducing the risk of soil erosion. Identifying the SOM threshold associated with improved water infiltration can help clarify soil hydrological behavior and support effective soil and water management in semi-arid regions. The objective of this study was to determine the critical threshold of SOM controlling water infiltration. Specifically, we examined the relationship between SOM and mean infiltration rate and used piecewise regression to identify the breakpoint and corresponding the SOM threshold. The findings are expected to provide a clearer understanding of the nonlinear role of SOM in the water infiltration process and establishing a scientific basis for improving infiltration modeling and promoting sustainable soil and water management in semi-arid region.

Materials and Methods

Water infiltration at each sampling site was measured using a double-ring infiltrometer following the method described by Bouwer (1986). The recorded field data were subsequently used to calculate mean infiltration rates. Soil samples were collected both as disturbed and undisturbed cores. Disturbed samples were collected from 0–60 cm to determine selected physical and chemical properties, whereas undisturbed samples were collected from 0–20 cm for bulk density determination. Particle-size distribution was determined according to the USDA textural classification system. Soil electrical conductivity and pH were measured in the saturated paste extract. Soil organic matter content was determined by potassium dichromate oxidation in an acidic medium, and calcium carbonate equivalent was measured using the acid neutralization method. Bulk density of undisturbed samples was determined using a metal cylinder (5 cm diameter × 5 cm height). Aggregate stability for aggregates smaller than 8 mm was assessed using the wet and dry-sieving method. To identify the threshold level of soil organic matter for water infiltration, an analytical approach was applied. First, a nonlinear piecewise regression model was fitted using various Python packages (scipy.optimize, NumPy, and Pandas) within the Google Colab environment (Python 3.x), employing a nonlinear least-squares algorithm. A 95% confidence interval was used to estimate the uncertainty associated with the threshold value. The model aimed to identify an optimal breakpoint in the relationship between soil organic matter and water infiltration, where a significant change in slope occurred. Prior to threshold determination, descriptive statistics including minimum, maximum, mean, coefficient of variation, and standard deviation were computed. The effects of the organic matter threshold on water infiltration were evaluated through the following steps: (i) data stratification and group-wise analysis, whereby the dataset was divided into two groups based on the breakpoint identified by piecewise regression and descriptive statistics were calculated for each group; (ii) comparison of means using an independent t-test with pooled variance to assess significant differences in infiltration indices between the two groups; and (iii) within-group linear regression analyses, in which simple linear models were fitted separately for each group to examine the nature of the relationship between soil organic matter and water infiltration, and coefficients of determination (r^2) were

calculated. Graphical analyses and means comparison were performed using Microsoft Excel (2016), the Python programming language (Version 3.x), and SPSS software (Version 2022).

Results

Correlation analysis showed a significant positive association between soil organic matter (SOM) and mean infiltration rate (MIR) ($r = 0.51^{**}$). Specifically, the MIR showed significant positive correlations with both the mean weight diameter (MWD_{wet}) ($r = 0.47^{**}$) and the geometric mean diameter (GMD_{wet}) ($r = 0.49^{**}$) of water-stable aggregates. The SOM was also positively associated with both MWD_{wet} ($r = 0.57^{**}$) and GMD_{wet} ($r = 0.55^{**}$). Piecewise regression analysis identified an optimal threshold (breakpoint) of 1.5% SOM in the relationship between the SOM and MIR. The means comparison before and after the breakpoint using an independent samples t-test confirmed a highly significant difference in water infiltration between the two groups ($p \leq 0.01$). The corresponding Cohen's d was 0.81, indicating a large effect size. In soils containing more than 1.5% organic matter, the SOM explained 32% of the variation in water infiltration. This finding suggests that once this threshold is exceeded, SOM becomes a relatively strong controlling factor that facilitates water infiltration into the soil. Overall, the results indicated that increasing SOM beyond 1.5% substantially enhanced water infiltration. The MIR was 19.27 cm h^{-1} in soils containing less than 1.5% organic matter, whereas it increased to 32.89 cm h^{-1} in soils with organic matter content above this threshold, representing an approximately 67% increase in water infiltration rate after exceeding the critical organic matter threshold.

Conclusion

This study clearly demonstrated that soil organic matter (SOM) is one of the most important soil properties influencing water infiltration. The relationship between soil water infiltration and SOM content was found to be nonlinear and threshold-dependent, indicating that simple linear models were insufficient to accurately describe this behavior. The application of piecewise regression enabled the identification of a breakpoint in the relationship between the average infiltration rate and SOM content. Based on this analysis, the SOM content of 1.5% was identified as the threshold influencing the infiltration rate in the semi-arid soils of the study area. This study demonstrated that, in the semi-arid region of the study area, the SOM content of 1.5% represents a critical threshold at which SOM begins to exert a significant influence on soil structural stability and water infiltration.

Keywords: Bulk density, Double rings, Infiltration rate, Piecewise regression, Soil structure.

Author Contributions

Conceptualization, A.V. and M.A.; methodology, A.V. and M.A.; software, A.V. and M.Y.; validation, A.V. and M.A.; formal analysis, A.V. and M.Y.; investigation, A.V. and M.A.; resources, A.V. and M.Y.; data curation, A.V. and M.Y.; writing-original draft preparation, A.V. and M.Y.; writing-review and editing, A.V.; visualization, A.V.; supervision, A.V.; project administration, A.V.; funding acquisition, A.V. and M.A. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Acknowledgements

This paper is published as a part of a PhD thesis supported by the Soil Science and Engineering Department of the University of Zanjan, Iran. The authors are thankful to the University of Zanjan for financial supports.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

Ethical considerations

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

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Cite this article: Vaezi, A.R., Yavari, M., & Askari, M.S. (2026). Determinating the threshold value of soil organic matter for water infiltration in semi-arid region (Case study: Zanjan province). *Journal of Soil and Plant Science*, 36(3), 17-36.

<https://doi.org/10.22034/sps.2026.73366.1048>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



Copyright © 2026 The Authors.
Publisher: The University of Tabriz





تعیین حد آستانه‌ای ماده آلی در نفوذ آب به خاک برای برخی خاک‌های منطقه نیمه‌خشک (مطالعه موردی: استان زنجان)

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

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

رایانامه: vaezi.alireza@gmail.com or vaezi.alireza@znu.ac.ir

۲- نویسنده مسئول، 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

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۱۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۹

چکیده

نفوذ آب به خاک فرایندی کلیدی در مدیریت منابع آب است و ویژگی‌های خاک در تغییر مقدار آن نقش مهمی دارند. هدف این پژوهش، شناسایی ویژگی‌های تعیین‌کننده خاک در فرایند نفوذ آب و در ادامه تعیین حد آستانه‌ای ماده آلی بود. برای این کار، آزمایش نفوذ آب به خاک در ۶۸ نقطه از استان زنجان در کاربری‌های مختلف زمین به‌صورت صحرایی با استفاده از حلقه‌های دوگانه انجام شد و ویژگی‌های مختلف خاک‌ها در نمونه‌های دست‌خورده و دست‌نخورده تعیین گردیدند. از روش ماتریس همبستگی پیرسون برای تعیین روابط خطی میان میانگین شدت نفوذ آب و ویژگی‌های خاک استفاده شد. نتایج نشان داد که شدت نفوذ آب در خاک همبستگی‌های بسیار معناداری به‌ترتیب با ماده آلی ($r = 0.51^{**}$)، پایداری خاکدانه‌ها ($r = 0.49^{**}$) و جرم مخصوص ظاهری ($r = -0.47^{**}$) داشت. بر اساس روش رگرسیون قطعه‌ای، سطح ۱/۵ درصد ماده آلی در خاک نقطه شکست تابع رابطه میان شدت نفوذ آب در خاک و مقدار ماده آلی بود. بنابراین، مقدار ۱/۵ درصد ماده آلی به‌عنوان حد آستانه اثرگذاری این متغیر بر نفوذ آب به خاک انتخاب شد؛ به‌طوری‌که تنها در مقادیر بالاتر از آن، نقش ماده آلی در شدت نفوذ آب در خاک بارز بود ($r = 0.57^{**}$). همچنین، همبستگی‌های معنادار میان شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها (میانگین وزنی و هندسی) و مقدار ماده آلی در بالاتر از حد آستانه ماده آلی (به‌ترتیب $r = 0.41^{**}$ و $r = 0.5^{**}$) وجود داشتند. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که مقدار ۱/۵ درصد ماده آلی در خاک به‌عنوان یک حد آستانه مهم اثرگذار بر شدت نفوذ آب در خاک‌های مورد پژوهش بود.

واژه‌های کلیدی: جرم مخصوص ظاهری، حلقه‌های دوگانه، رگرسیون بندبندی، ساختمان خاک، شدت نفوذ.

استناد به این مقاله: واعظی، ع.ر.، یآوری، م.، و عسکری، م.ص. (۱۴۰۵). تعیین حد آستانه‌ای ماده آلی در نفوذ آب به خاک برای برخی خاک‌های منطقه نیمه‌خشک (مطالعه موردی: استان زنجان). *نشریه دانش خاک و گیاه*، ۳۶(۳)، ۱۷-۳۶.

<https://doi.org/10.22034/sps.2026.73366.1048>

مقدمه

نفوذ آب به خاک یکی از فرایندهای کلیدی در چرخه هیدرولوژیکی بوده و نقش تعیین‌کننده‌ای در توزیع رطوبت خاک، تغذیه گیاه، کاهش رواناب و فرسایش ایفا می‌کند (Hillel, 2003; Beven, 2012). این ویژگی به‌عنوان یکی از شاخص‌های اصلی کیفیت فیزیکی خاک شناخته می‌شود و به‌طور گسترده برای ارزیابی اثرات کاربری زمین، عملیات مدیریتی، تخریب خاک و تغییرات اقلیمی روی رفتار هیدرولوژیکی خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد (Dexter, 2004; Franzluebbers, 2002). بر این اساس، شناخت عوامل تعیین‌کننده نفوذ آب به خاک و تبیین رفتار آن در پاسخ به تغییرات ویژگی‌های خاک، برای توسعه راهبردهای مدیریت خاک و آب امری ضروری است (Assouline, 2013). در این میان ماده آلی خاک نقش اساسی در تنظیم فرایندهای شیمیایی، فیزیکی و زیستی خاک ایفا می‌کند و از این طریق به‌طور غیرمستقیم بر فرایند نفوذ آب به خاک اثر می‌گذارد (Six et al., 2004; Lehmann & Kleber, 2015). بخش آلی خاک یک ویژگی پویا و تاحدامکان قابل مدیریت در خاک است که می‌تواند سبب بهبود نفوذ آب شود (Lal, 2015; Franzluebbers, 2002). در مناطق نیمه‌خشک، اهمیت ماده آلی در تعیین نفوذ آب بیشتر است، زیرا این زیست‌بوم‌ها معمولاً از محتوای اندک ماده آلی برخوردار بوده، به‌شدت نسبت به تخریب ساختمان خاک و کاهش نفوذ آب حساس هستند (Oldfield et al., 2019; Lal, 2020). در چنین شرایطی، حتی افزایش‌های جزئی در ماده آلی می‌تواند منجر به بهبود قابل‌توجه نفوذ آب و کاهش رواناب و فرسایش شود (Peng et al., 2025). در بررسی‌های انجام شده در خاک‌های مناطق نیمه‌خشک نقش ماده آلی در بهبود ساختمان خاک و نفوذپذیری و در نتیجه کاهش فرسایش‌پذیری خاک به اثبات رسیده است (Vaezi et al., 2008).

حد آستانه در مورد ویژگی‌های خاک عبارت از کمترین مقدار آن ویژگی هست که موجب تغییرات مورد انتظار در خاک شود. چنین مفهومی به‌طور گسترده برای شوری خاک مورد استفاده قرار گرفته است (Stavi et al., 2025; Kramer & Mau, 2023; Vaezi et al., 2021). این مفهوم را می‌توان برای ویژگی‌هایی مانند ماده آلی نیز به کار گرفت. در این صورت حد آستانه ماده آلی از نظر برخی ویژگی‌ها مانند نفوذ می‌تواند به‌عنوان کمترین مقدار ماده آلی برای بهبود نفوذپذیری خاک بیان شود. شناسایی حد آستانه ماده آلی خاک از دیدگاه اثربخشی آن در فرایند نفوذ آب به خاک، گامی کلیدی در مدل‌سازی رفتار هیدرولوژیکی خاک و ارائه توصیه‌های مدیریتی است. از شیوه‌های مختلف آماری برای بررسی این موضوع می‌توان بهره گرفت. روش‌های کلاسیک که شامل تحلیل گرافیکی داده‌ها (رویکرد کیفی و شهودی) و مقایسه بین گروه‌ها (مانند تجزیه واریانس یا ANOVA) هستند تنها مرز بین گروه‌هایی با رفتار نفوذ متفاوت را به‌عنوان آستانه تفسیر می‌کنند. درمقابل، رگرسیون قطعه‌ای (به‌عنوان روش آماری توانمند برای شناسایی نقطه شکست در توابع خطی بوده، می‌تواند حد آستانه‌ای کمی و دقیق برای متغیرهای خاک ارائه دهد (Muggeo, 2003).

روش‌های مبتنی بر درخت تصمیم نیز با تقسیم داده‌ها به زیرمجموعه‌های همگن، نقاط تقسیم‌آ را به‌عنوان آستانه تعیین کرده، امکان استفاده هم‌زمان از چند متغیر پیش‌بین را فراهم می‌کنند (Breiman et al., 2017). همچنین تحلیل تغییر نقطه برای شناسایی تغییرات ناگهانی در داده‌های زمانی یا مکانی به‌کار می‌رود (Killick & Eckley, 2017).

¹-Piecewise regression

²-Breakpoint

³-Split points

(2014) در مجموع، انتخاب روش مناسب به ساختار داده و هدف مطالعه وابسته است، در این میان رگرسیون قطعه‌ای به دلیل ارائه نتایج کمی شفاف، اغلب به عنوان روش پایه شناسایی شده است (Muggeo, 2003).

پژوهش‌های مختلفی در زمینه حدود آستانه‌ای ماده آلی انجام شده است. در برخی منابع خاک‌هایی با کربن آلی کمتر از ۲ درصد را بی‌ثبات از جنبه ساختار فیزیکی و به‌ویژه ساختمان خاک معرفی کرده‌اند (Kay & Angers, 1999). Ding et al., (2014) نشان دادند افزایش ماده آلی تا یک حد مشخص موجب کاهش تبخیر و افزایش نفوذ آب و در نتیجه بهبود کارایی مصرف آب می‌شود؛ به‌طوری که بیشترین اثر بازدارنده تبخیر در مقدار حدود ۳/۲ درصد ماده آلی مشاهده شد. در پژوهشی Cachipiendo et al., (2025) بیان داشتند مقادیر ماده آلی از ۳/۴۲ تا ۵/۵۵ درصد بیشترین کارایی را در افزایش آب قابل استفاده و پایداری نفوذ آب داشت؛ در حالی که مقادیر بیشتر از ۷/۹ درصد ماده آلی با کاهش کارایی نگهداشت رطوبت و افزایش خطر آبشویی همراه بود. (Peng, et al., 2025) نیز رابطه بین ماده آلی و آب قابل دسترس را با شیوه تحلیل چندگانه^۱ بررسی کردند و نتیجه گرفتند که مقدار آستانه ماده آلی برای این ویژگی خاک (آب قابل دسترس) متغیر هست و می‌توان آستانه‌های وابسته به شرایط اقلیمی و بافت خاک تعیین کرد. با وجود انجام برخی پژوهش‌ها در مورد آستانه ماده آلی از نظر ویژگی‌های مختلف خاک، اطلاعات زیادی در مورد این موضوع از نظر اثرگذاری بر فرایند نفوذ آب به خاک موجود نیست. اغلب مطالعات در مورد فرایند نفوذ آب در نهایت به ارائه رابطه میان شدت نفوذ آب و مقدار ماده آلی با استفاده از رگرسیون‌های خطی بسنده شده است (Minasny & McBratney, 2018; Dexter et al., 2008).

با وجود اهمیت روزافزون ماده آلی خاک در تنظیم فرایندهای هیدرولوژیکی خاک، شواهد علمی موجود نشان می‌دهد که تعیین مقادیر آستانه‌ای ماده آلی در خاک‌های مناطق نیمه‌خشک، به‌ویژه در شرایط اقلیمی و مدیریتی ایران، حائز اهمیت است. اغلب پژوهش‌های پیشین به بررسی روابط کلی و میانگین محور بین ماده آلی و نفوذ آب پرداخته‌اند و کمتر به شناسایی رفتارهای غیرخطی بین آنها توجه کرده‌اند. در همین راستا، کاربرد روش‌های آماری پیشرفته نظیر رگرسیون قطعه‌ای که توانایی بالایی در آشکارسازی روابط غیرخطی و تعیین نقاط آستانه‌ای دارند، هنوز به‌طور نظام‌مند و هدفمند در تحلیل پاسخ نفوذ آب به تغییرات ماده آلی مورد استفاده قرار نگرفته است. بر این اساس، هدف این پژوهش شناسایی ویژگی‌های تعیین کننده خاک در فرایند نفوذ آب در خاک‌های منطقه نیمه‌خشک بود و در ادامه تعیین حد آستانه‌ای ماده آلی خاک در فرایند نفوذ آب در خاک‌های این منطقه بود. انتظار می‌رود نتایج این پژوهش بتواند درک دقیق‌تری از نقش غیرخطی ماده آلی در فرایند نفوذ آب ارائه داده و مبنای علمی مناسبی برای بهبود مدل‌سازی نفوذ و مدیریت پایدار خاک و آب در مناطق نیمه‌خشک فراهم سازد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

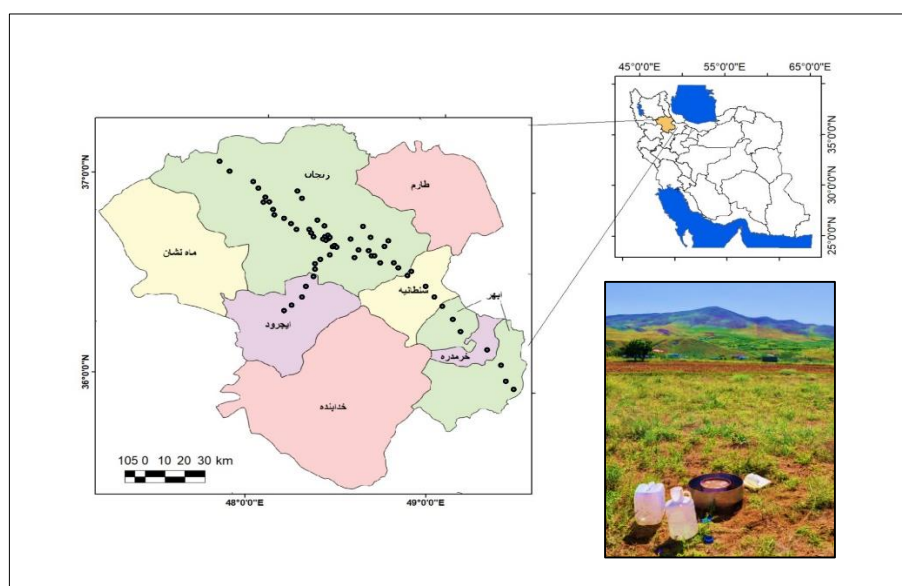
این مطالعه در استان زنجان واقع در عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۱۵ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۴۵ درجه و ۲۵ دقیقه شرقی انجام شد (شکل ۱). این منطقه بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن دارای اقلیم نیمه‌خشک با میانگین بارش سالانه ۳۲۴ میلی‌متر و میانگین درجه حرارت سالانه ۱۲

^۱ Metaanalysis

درجه سلسیوس است (IRIMO, 2024). از نظر زمین‌شناسی، سنگ مادر منطقه عمدتاً شامل تشکیلات آهکی، مارن، کنگلومرا و رسوبات آبرفتی کواترنری است (GOI, 2016). بر اساس سامانه رده‌بندی خاک‌های آمریکا (USDA)، خاک‌های منطقه اغلب شامل اینسپیتی‌سول (در دشت‌ها) و اریدی‌سول (در مناطق خشک‌تر) است (Soil Survey Staff, 2014). حدود ۶۲ درصد از سطح استان را کاربری مرتع و ۳۲ درصد را کاربری دیم تشکیل می‌دهد. مراتع عمدتاً از نوع درجه ۳ با پوشش گیاهی بین ۲۶ تا ۵۰ درصد هستند (Vaezi, 2017). مقدار ماده آلی خاک در کشت‌زارهای دیم منطقه از ۰/۳۲ تا ۱/۳ درصد تغییر می‌کند (Babaei et al., 2016).

آزمایش‌های صحرایی

برای انتخاب نقاط مطالعاتی برای اندازه‌گیری نفوذپذیری خاک، اطلاعات نقشه‌های خاک‌شناسی بررسی شد و به‌دنبال آن با بازدیدهای میدانی و در نظر گرفتن معیارهایی همچون تنوع بافت خاک و نوع کاربری زمین، ۶۸ نقطه در تابستان ۱۴۰۳ از سطح استان زنجان شناسایی شد و مورد انجام آزمایش‌های صحرایی و تجزیه‌های آزمایشگاهی قرار گرفت. از مجموع نقاط انتخاب شده، ۴۵ نقطه در کاربری مرتع، ۱۳ نقطه در کاربری زراعی، ۸ نقطه در کاربری باغی و ۲ نقطه در کاربری جنگلی قرار داشتند. برای اندازه‌گیری شدت نفوذ آب به خاک در هر نقطه آزمایش نفوذ با استفاده از روش حلقه دوگانه (Bouwer, 1986) انجام شد (شکل ۱). در این روش از دو حلقه هم‌مرکز با ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر بهره گرفته شد که قطر حلقه بیرونی ۶۰ سانتی‌متر و قطر حلقه داخلی ۳۰ سانتی‌متر بود. اندازه‌گیری میزان نفوذ انباشته 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 خوانش‌ها تا زمانی ادامه یافت که شدت نفوذ به حالت نسبتاً پایدار (شدت نفوذ نهایی) رسید. قابلیت نفوذ آب به خاک بر مبنای کل مقدار آب نفوذیافته به خاک طی مدت زمان نفوذ محاسبه شد و به‌صورت میانگین شدت نفوذ آب (MIR) بیان شد. این شاخص مبنای مقایسه خاک‌ها از نظر نفوذپذیری قرار گرفت و ارتباط آن با ویژگی‌های خاک بررسی شد.



شکل ۱- منطقه مورد پژوهش و موقعیت نقاط نمونه‌برداری (استان زنجان، ۱۴۰۳).

Figure 1- Research area and location of sampling points (Zanjan province, 1403).

اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک

نمونه‌های خاک برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی به صورت دست‌خورده از عمق صفر تا ۶۰ سانتیمتری و دست‌خورده از عمق صفر تا ۳۰ سانتیمتری برداشته شد تا بتوان هر دو جنبه خاک سطحی و نیم‌رخ مؤثر بر فرایند نفوذ آب را مورد بررسی قرار داد. نمونه‌های دست‌خورده برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مورد استفاده قرار گرفتند. نمونه‌های دست‌خورده نیز با استفاده از سیلندر فلزی برداشت شده، برای اندازه‌گیری جرم مخصوص ظاهری به کار گرفته شدند. جرم مخصوص ظاهری نمونه‌های دست‌خورده با استفاده از سیلندر فلزی به روش (Culley, 1993) تعیین شد. توزیع اندازه ذرات بر اساس طبقه‌بندی USDA انجام شد. برای این کار، ذرات درشت‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر با استفاده از روش الک خشک مطابق دستورالعمل‌های استاندارد Gee & Bauder, (1986) تفکیک شدند. سهم ذرات ریزتر از ۰/۰۵ میلی‌متر شامل سیلت و رس نیز به روش هیدرومتری براساس دستورالعمل ارائه شده توسط (Yavari et al, 2021) اندازه‌گیری شد؛ به طوری که خوانش‌های انجام شده در زمان‌های ۶ و ۲۴ ساعت برای تعیین درصد رس به کار رفت.

قابلیت هدایت الکتریکی (EC) در عصاره گل اشباع به وسیله هدایت الکتریکی سنج و واکنش خاک (pH) در گل اشباع (Thomas, 1996) با استفاده از pH سنج تعیین شدند. محتوای ماده آلی براساس اکسیداسیون ماده آلی خاک توسط دی‌کرومات پتاسیم در محیط اسیدی اندازه‌گیری شد (Walkley & Black, 1934). همچنین کربنات کلسیم معادل نیز براساس روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک نیم نرمال (Page et al., 1982) اندازه‌گیری شد. پایداری خاکدانه‌ها با روش الک تر برای همه خاکدانه‌های کوچکتر از ۸ میلی‌متر بر اساس روش Le Bissonnais, (1996) تعیین شد. در روش الک تر، پس از خیساندن آرام، تدریجی و از سمت پایین خاکدانه‌ها بر روی کاغذ صافی (به مدت ۱۰ دقیقه) و انتقال این خاکدانه‌ها بر روی سری الک؛ از دستگاه الک نوسانی با فرکانس نیم دور در ثانیه و ثبت پایداری خاکدانه‌ها در آب (آب شهری) استفاده شد. برای این کار، از سری الک با قطر چشمه در بازه‌های ۵/۸-۶، ۵/۵-۷/۵، ۴/۵-۶، ۲-۷/۵، ۲-۱، ۰/۱-۵ و ۰/۲۵-۰/۵ میلی‌متر استفاده شد. با جمع آوری، خشک کردن و توزین مواد بجا مانده روی هر غربال میانگین هندسی (GMD_{wet}) و وزنی (MWD_{wet}) قطر خاکدانه‌ها محاسبه شدند. میانگین هندسی (GMD_{wet}) قطر خاکدانه‌ها از روابط ۱ و ۲ و میانگین وزنی (MWD_{wet}) قطر خاکدانه‌ها از روابط ۱ و ۳ بدست آمدند (Kemper & Rosenau, 1986):

$$f_i = \frac{W_i(a+s) - W_i(s)}{\sum_{i=1}^n W_i(a+s) - \sum_{i=1}^n W_i(s)} \times 100 \quad (1)$$

$$GMD_{wet} = \exp \left(\sum_{i=1}^n f_i \log(\bar{X}_i) \right) \quad (2)$$

$$MWD_{wet} = \sum_{i=1}^n f_i \times \bar{X}_i \quad (3)$$

در این روابط، f_i : نسبت جرم خاکدانه‌های باقیمانده روی هر الک بر حسب گرم به جرم کل بر حسب گرم، $W_i(a)$: $W_i(s) + s$ 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 و n : تعداد کلاس‌های اندازه خاکدانه‌ها است.

نفوذ انباشته بیانگر مجموع عمق آب نفوذ یافته به خاک در طول مدت آزمایش بوده و بر حسب سانتی‌متر گزارش می‌شود و شاخص شدت نفوذ متوسط (MIR) نیز از تقسیم نفوذ انباشته بر کل زمان آزمایش برای هر خاک به دست می‌آید (ASTM, 2009). بدین ترتیب شدت نفوذ متوسط برای هر نمونه خاک بدست می‌آید. حداکثر شدت نفوذ متوسط برابر با بزرگ‌ترین مقدار و حداقل شدت نفوذ متوسط برابر با کوچک‌ترین مقدار در میان ۶۸ نمونه تعیین شد. میانگین شدت نفوذ (MIR) برای کل ۶۸ نمونه خاک نیز از میانگین حسابی تمام مقادیر شدت نفوذ متوسط به دست آمد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

ابتدا مجموعه‌ای از آماره‌های توصیفی شامل حداقل، حداکثر، میانگین، ضریب تغییرات (CV) و انحراف معیار (SD) برای شدت نفوذ آب و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها تعیین شدند. پس از آن همبستگی ساده پیرسون و همبستگی جزئی میانگین شدت نفوذ و ویژگی‌های خاک و نیز هم‌خطی بین ویژگی‌های خاک مورد بررسی قرار گرفت تا اثر مستقل هر ویژگی خاک روی شدت نفوذ متوسط ارزیابی شود. به منظور بررسی هم‌خطی بین متغیرهای مستقل، از شاخص عامل تورم واریانس (VIF) استفاده شد. بر این اساس، مقادیر بزرگ‌تر VIF نشان‌دهنده شدت بیشتر هم‌خطی هستند. مقدار VIF کمتر از ۵ نشان‌دهنده هم‌خطی ضعیف تا قابل قبول، بین ۵ تا ۱۰ نشان‌دهنده هم‌خطی متوسط، و مقادیر بزرگ‌تر از ۱۰ نشان‌دهنده هم‌خطی شدید تلقی می‌شود (O'Brien, 2007; James et al., 2013). ترسیم نمودار و مقایسه میانگین‌ها، با استفاده از نرم‌افزارهای (Excel, 2016)، زبان برنامه‌نویسی Python(x.3) و SPSS(2022) انجام شد.

تعیین حد آستانه‌ای ماده آلی برای شدت نفوذ متوسط آب به خاک

بر اساس نتایج ماتریس همبستگی ساده پیرسون و همبستگی جزئی، از میان ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک، ماده آلی دارای بیشترین ضریب همبستگی معنادار با میانگین شدت نفوذ بود. از این رو این ویژگی به عنوان متغیر منتخب برای تحلیل آستانه انتخاب شد. سپس رابطه این متغیر با میانگین شدت نفوذ بر مبنای ۶۸ مشاهده با استفاده از رگرسیون قطعه‌ای تحلیل شد. به منظور شناسایی حد آستانه‌ای ماده آلی برای نفوذ آب به خاک، ابتدا یک مدل رگرسیون خطی تک متغیره از نوع قطعه‌ای^۲ (Muggeo, 2003; Toms & Lesperance, 2003) با بهره‌گیری از بسته‌های مختلف (Pandas, scipy.optimize, NumPy) در محیط Google Colab پایتون (Python x.3) برازش داده شد. به منظور برآورد عدم قطعیت آستانه از سطح اطمینان ۹۵ درصد استفاده شد. مدل رگرسیون مذکور به دنبال یافتن یک نقطه شکست معنادار در منحنی رابطه بین شدت نفوذ متوسط آب و مقدار ماده آلی است که در آن شیب منحنی به طور معناداری تغییر می‌کند. معادله کلی این مدل به صورت رابطه ۵ است (Muggeo, 2003) و هدف از برازش مدل رگرسیون قطعه‌ای، برآورد نقطه شکست (ψ) یا همان حد آستانه ماده آلی است:

¹-Variance inflation factor

²-Piecewise

³-Breakpoint



$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 \times (x_i - \psi) \times I(x_i > \psi) + \epsilon_i \quad (5)$$

که در آن، y_i : شدت نفوذ متوسط، x_i : درصد ماده آلی، ψ : نقطه شکست (حد بحرانی) و β_0 : عرض از مبدا، β_1 : شیب خط قبل از نقطه شکست، β_2 : تغییر در شیب پس از نقطه شکست ($\beta_1 + \beta_2$)، $I(x_i - \psi)$: تابع شاخص اگر $x_i > \psi$ برابر یک است، در غیر این صورت صفر است. در رابطه ۵، تابع شاخص تعیین می‌کند که آیا هر مشاهده قبل یا بعد از نقطه شکست قرار دارد. این تابع برای مقادیر متغیر مستقل بزرگ‌تر از نقطه شکست، مقدار یک و برای مقادیر کوچک‌تر یا مساوی نقطه شکست، مقدار صفر در نظر می‌گیرد. به این ترتیب، بخش مربوط به تغییر شیب فقط برای داده‌هایی که بعد از نقطه شکست قرار دارند وارد مدل می‌شود و تغییر شیب رابطه پس از رسیدن به حد آستانه برآورد می‌گردد. و ϵ_i : خطا با توزیع نرمال با میانگین صفر است (Muggeo, 2003; Clayton et al., 2021). برای تحلیل حد آستانه‌ای ماده آلی از نظر شدت نفوذ آب به خاک دو مسیر دنبال شد: ۱) تقسیم داده‌ها و تحلیل گروهی؛ داده‌ها بر اساس نقطه شکست شناسایی شده توسط رگرسیون قطعه‌ای، به دو گروه مختلف، (الف- بدون رابطه معنادار میان شدت نفوذ و مقدار ماده آلی خاک و ب- دارای رابطه معنادار میان این دو متغیر) جدا شدند، مقایسه میانگین‌ها (آزمون t مستقل)؛ برای بررسی اختلاف آماری بین دو گروه از نظر شدت نفوذ آب، از آزمون t مستقل با واریانس تجمعی استفاده شد و ۲) رگرسیون خطی درون‌گروهی؛ در نهایت، برای بررسی رابطه بین شدت نفوذ آب و مقدار ماده آلی در هر یک از دو گروه، از مدل‌های رگرسیون خطی ساده استفاده شد و ضریب همبستگی و ضریب تبیین (r^2) هر مدل محاسبه شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک‌های مورد بررسی

نتایج جدول ۱ نشان داد که اجزای بافت خاک دارای تنوع قابل توجهی بوده و بخش شن بیشترین تغییرپذیری (۳۵/۰۴ درصد) را در میان اجزای بافت داشت، موضوعی که می‌تواند بر توزیع منافذ، هدایت هیدرولیکی و نفوذ آب اثرگذار باشد (Hillel, 2004). واکنش یا pH با کمترین تغییرات (۴/۵۳ درصد) پایدارترین ویژگی خاک بود و بیشتر نمونه‌ها در محدوده کمی تا نسبتاً قلیایی قرار گرفتند. درحالی‌که EC با ضریب تغییرات ۸۶/۷۹ درصد، بیشترین تغییرپذیری را در میان ویژگی‌های خاک نشان داد که بیانگر ناهمگنی زیاد توزیع شوری در منطقه و احتمال تأثیر عوامل موضعی مانند تفاوت در زهکشی، توپوگرافی و تجمع املاح محلول است (Richards, 1954). ماده آلی و کربنات کلسیم نیز پراکندگی بالایی نشان دادند و فراوانی زیاد آهک با شرایط نیمه‌خشک منطقه و تأثیر آن بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک سازگار است (Brady & Weil, 2017). میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها در روش الک تر از ۰/۴۱ تا ۱/۰۹ میلی‌متر نوسان داشت. میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در روش الک تر ضریب تغییرات بیشتری نسبت به میانگین هندسی نشان داد ($CV=46.48\%$). مقادیر جرم مخصوص ظاهری از ۰/۸۳ تا ۱/۵۲ g/cm^3 متغیر بود (میانگین برابر ۱/۰۹ g/cm^3)، که بیانگر اختلاف در وضعیت تخلخل خاک‌هاست.

^۱-Pooled variance

میانگین شدت نفوذ آب در ۶۸ نقطه مورد بررسی بین ۵/۳۰ و ۸۶/۹۳ سانتی‌متر بر ساعت و مقدار متوسط آن در منطقه ۲۴/۰۸ سانتی‌متر بر ساعت بود (جدول ۱) که نشان می‌دهد خاک‌ها در محدوده نفوذپذیری بسیار سریع (Vaezi, 2020) قرار دارند. دامنه وسیع تغییرات این ویژگی بیانگر ناهمگنی خاک‌ها بود. همچنین مقادیر پایین‌تر نفوذ احتمالاً ناشی از افزایش ذرات ریزدانه، ساختمان ضعیف و کاهش پیوستگی منافذ درشت بوده است (Nimmo, 2021؛ Hillel, 1998)، درحالی‌که مقادیر بالای نفوذ با توسعه منافذ درشت و پایداری خاکدانه‌ها مرتبط است (Basset et al., 2023؛ Jarvis et al., 2016).

جدول ۱- آماره‌های توصیفی ویژگی‌های خاک (۶۸ نمونه).

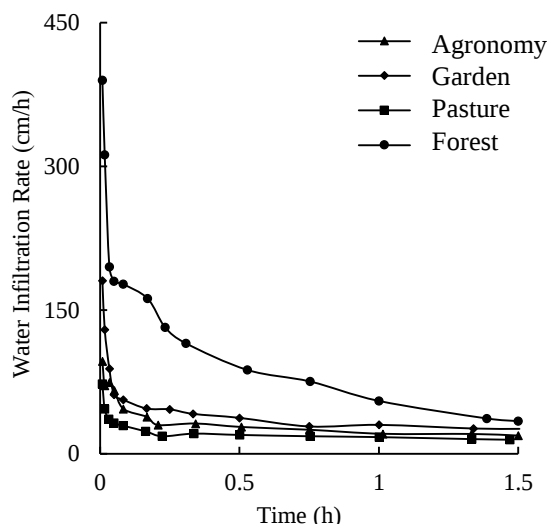
Table 1- Descriptive statistics of soil properties (68 samples).

Soil variable	Mean	Min	Max	Sd	CV (%)
Sand (%)	43.15	5.90	82.75	15.12	35.04
Silt (%)	31.87	6.44	51.28	9.21	28.91
Clay (%)	24.98	6.43	45.14	8.42	33.69
pH	7.93	6.96	8.51	0.36	4.53
EC (dS m ⁻¹)	1.51	0.40	6.15	1.21	79.86
OM (%)	1.27	0.01	4.32	1.01	80.16
CaCO ₃ (%)	17.65	0.00	47.50	9.27	52.52
GMD _{wet} (mm)	0.71	0.41	1.09	0.13	18.27
MWD _{wet} (mm)	0.82	0.09	1.98	0.38	46.48
BD (g/cm ³)	1.09	0.83	1.52	0.12	11.08
MIR (cm h ⁻¹)	24.08	5.30	86.93	16.87	70.06

OM: Organic matter, EC, Electrical conductivity, BD: Bulk density, GMD_{wet}: Geometric mean diameter of water-stable aggregates MWD_{wet}: Mean weight diameter of water-stable aggregate, MIR: Mean infiltration rate.

شکل ۲ منحنی شدت نفوذ آب به خاک در چهار کاربری را نشان می‌دهد. کاربری جنگل در تمام مراحل نفوذ آب، مقادیر بالاتری از شدت نفوذ را، نسبت به سایر کاربری‌ها نشان داد. همچنین شدت نفوذ آب در تمام مراحل آن در کاربری باغ نسبت به زراعت و کاربری زراعت نیز بیشتر از مرتع بود. نتایج نشان داد که تفاوت بین کاربری‌ها تنها به مراحل اولیه نفوذ محدود نبوده و در طول کل فرایند نفوذ نیز تداوم داشته است. از طرفی میانگین ماده آلی برای کاربری‌های جنگل، باغ، زراعت و مرتع به ترتیب برابر ۳/۳۶، ۱/۶۴، ۱/۵۸ و ۱/۰۲ درصد بود. بیشترین مقدار ماده آلی و شدت نفوذ در کاربری جنگل و کمترین مقادیر این دو ویژگی در کاربری مرتع مشاهده شد. این الگو می‌تواند ناشی از نقش ماده آلی در بهبود ساختمان و کیفیت فیزیکی خاک باشد. مطالعات پیشین نیز بر نقش مهم ماده آلی در بهبود ویژگی‌های هیدرولوژیکی خاک تأکید کرده‌اند. به عنوان مثال، (Blanco-Canqui et al., 2013) و Kay & Angers, (1999) بیان کردند افزایش ماده آلی معمولاً با افزایش پایداری خاکدانه‌ها و تخلخل و در نتیجه افزایش نفوذپذیری خاک همراه است. همچنین (Franzluebbers, 2002) و (Hamza & Anderson, 2005) ابراز داشتند تغییر کاربری اراضی و کاهش پوشش گیاهی می‌تواند از طریق کاهش ورودی بقایای آلی، تخریب ساختمان خاک و افزایش تراکم، ویژگی‌های نفوذ آب را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، نتایج حاضر نشان می‌دهد که کاربری‌های

جنگل و باغ ماده آلی بیشتری نسبت به سایر کاربری‌ها داشتند و این امر می‌تواند یکی از عوامل مهم در حفظ شدت نفوذ بالاتر در طول فرایند نفوذ آب در این کاربری‌ها باشد.



شکل ۲- منحنی شدت نفوذ آب برای کاربری‌های جنگل (۲ نقطه)، باغ (۸ نقطه)، زراعت (۱۳ نقطه) و مرتع (۴۵ نقطه).
Figure 2- Water infiltration rate curve for land uses of forest (2 points), garden (8 points), agronomy (13 points) and pasture (45 points).

ارتباط شدت نفوذ و ویژگی‌های خاک

نتایج همبستگی ساده پیرسون بین شدت نفوذ آب و برخی ویژگی‌های خاک در جدول ۲ نشان داده شده است. در میان ویژگی‌های مورد مطالعه، ماده آلی (OM) بیشترین همبستگی را با میانگین شدت نفوذ نشان داد ($r = 0.51$, $p \leq 0.01$). این نتیجه می‌تواند بیانگر نقش مهم ماده آلی در بهبود ساختمان خاک، افزایش تخلخل و تشکیل خاکدانه‌های پایدار باشد که از طریق ایجاد منافذ درشت، شرایط را برای نفوذ بیشتر آب فراهم می‌کنند (Bronick & Lal, 2005; Six et al., 2004; Nielsen, 1994). همچنین منافذ درشت ایجادشده سهم قابل توجهی در انتقال و نفوذ آب داشته و موجب افزایش معنادار شدت نفوذ می‌شوند (Kutílek & Beven & Germann, 2013; Nielsen, 1994). مطالعات اخیر نیز نشان داده‌اند که افزایش ماده آلی با بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک و افزایش منافذ درشت، نفوذ آب را ارتقا می‌دهد (Lingying et al., 2024; Basset et al., 2023). همچنین حضور ماده آلی در خاک می‌تواند نفوذ آب به خاک را افزایش داده و به دلیل تأثیر بر نفوذپذیری، ظرفیت نگهداری آب و پایداری ساختمان خاک را افزایش دهد (Franzluebbers, 2002). نتایج پژوهش‌های صورت گرفته در ایران نیز این یافته‌ها را تأیید کرده و نشان داده‌اند که مدیریت زمین از طریق تأثیر بر ماده آلی و ساختمان خاک، موجب تغییر در هدایت هیدرولیکی و نفوذ آب می‌شود (Kelishadi et al., 2014) و بهبود کیفیت خاک و پوشش گیاهی نیز با افزایش پایداری خاکدانه‌ها و بهبود شرایط فیزیکی خاک همراه است (Vaezi et al., 2017).

نتایج نشان داد همبستگی معناداری میان میانگین شدت نفوذ آب و میانگین وزنی ($r=0.47$, $p \leq 0.01$) و هندسی ($r=0.49$, $p \leq 0.01$) قطر خاکدانه‌ها و جرم مخصوص ظاهری ($r = -0.47$, $p \leq 0.01$) وجود دارد. این سه ویژگی خاک به نوبه خود تحت تأثیر ماده آلی خاک هستند به طوری که همبستگی معنادار میان میانگین وزنی ($r=0.57$, $p \leq 0.01$) و هندسی ($r=0.55$, $p \leq 0.01$) قطر خاکدانه‌ها و نیز میان جرم مخصوص ظاهری و ماده آلی ($r = -0.52$, $p \leq 0.01$) وجود دارد.

($p \leq 0.01$) مشاهده می‌شود (جدول ۲). در این راستا مطالعات میدانی و تجربی فراوانی نشان داده‌اند که افزایش ماده آلی خاک موجب بهبود ساختمان و توزیع مناسب منافذ و افزایش پایداری خاکدانه‌ها و در نهایت بهبود نفوذپذیری خاک می‌شود.

جدول ۲- ضرایب همبستگی ساده (پیرسون) بین متغیرهای اندازه‌گیری شده ($n=68$).

Table 2 - Simple Pearson correlation coefficient between measured variables ($n=68$).

Variables	Sand	Silt	Clay	pH	EC	OM	CaCO ₃	GMD _{wet}	MWD _{wet}	BD	MIR
Sand	1.00										
Silt	-0.87**	1.00									
Clay	-0.84**	0.47**	1.00								
pH	-0.03	0.01	0.04	1.00							
EC	-0.06	-0.01	0.12	0.43**	1.00						
OM	-0.23	0.14	0.26*	-0.12	0.26*	1.00					
CaCO ₃	-0.08	0.13	-0.01	-0.28*	0.14	-0.07	1.00				
GMD _{wet}	-0.03	0.03	0.02	0.08	0.01	0.55**	-0.00	1.00			
MWD _{wet}	-0.24*	0.23	0.19	0.08	-0.01	0.57**	-0.05	0.86**	1.00		
BD	0.48**	-0.51**	0.31**	0.06	-0.13	-0.52**	0.17	-0.39**	-0.57**	1.00	
MIR	0.03	-0.01	-0.06	0.06	0.122	0.51**	-0.13	0.49**	0.47**	-0.47**	1.00

OM: Organic matter; EC: Electrical conductivity; BD: Bulk density; GMD_{wet}: Geometric mean diameter of water-stable aggregates; MIR: Mean infiltration rate.

نتایج جدول ۲ نشان داد اجزای بافت خاک (سیلت، رس و شن) همبستگی معناداری با میانگین شدت نفوذ نداشتند. سایر متغیرها نیز از جمله pH، هدایت الکتریکی (EC) و کربنات کلسیم (CaCO₃) فاقد همبستگی معنادار با میانگین شدت نفوذ بودند. عدم وجود همبستگی معنادار بین میانگین شدت نفوذ و اجزای بافت خاک (رس، سیلت و شن) نشان می‌دهد که در مشخصه میانگین شدت نفوذ، جریان آب عمدتاً تحت تأثیر ویژگی‌های ساختمانی خاک قرار دارد و این ویژگی‌ها به نوبه خود متأثر از توزیع اندازه ذرات اولیه هستند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که عواملی نظیر پیوستگی منافذ، درصد منافذ درشت، مسیرهای گسترش ریشه، شکاف‌های بین کلوخه‌ها و آرایش فضایی منافذ نقش تعیین‌کننده‌تری در انتقال آب دارند و اثر مستقیم بافت خاک کاهش می‌یابد (Basset et al., 2023; Cao et al., 2024). همچنین گزارش‌ها حاکی از آن است که هدایت جریان آب در خاک‌های طبیعی بیش از آنکه به درصد رس، سیلت و شن وابسته باشد، به وجود و تداوم منافذ ساختمانی وابسته است (Bargués-Tobella et al., 2024). عدم معناداری pH نیز احتمالاً ناشی از دامنه محدود تغییرات آن در خاک‌های مورد مطالعه بوده است. در این دامنه محدود pH، تغییرات اسیدیته معمولاً قادر به ایجاد تغییر محسوس در ساختار خاک و ویژگی‌های هیدرولیکی نیست و اثر آن در مقایسه با عوامل فیزیکی خاک ناچیز می‌شود (Basset et al., 2023). همچنین، عدم همبستگی معنادار شدت نفوذ با EC می‌تواند ناشی از آن باشد که در دامنه شوری مشاهده‌شده در این مطالعه، غلظت املاح برای ایجاد تغییرات قابل‌توجه در پایداری خاکدانه‌ها، پراکنش رس یا آرایش منافذ کافی نبوده است. در محدوده‌های کم شوری، ساختار و معماری منافذ خاک نقش مهم‌تری از EC در کنترل نفوذ آب ایفا می‌کنند.

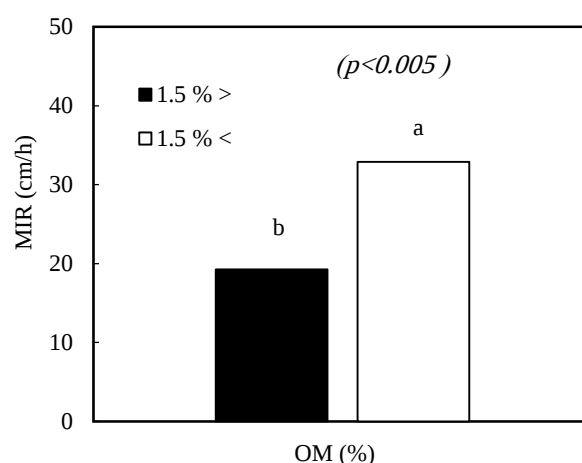
(Jarvis, 2020; Basset et al., 2023). در ارتباط با تأثیر کربنات کلسیم معادل (CaCO_3) بر شدت نفوذ نیز مطالعات جدید نشان داده‌اند که تأثیر آن بر نفوذ آب عمدتاً غیرمستقیم و از طریق تغییر پایداری خاکدانه‌ها، تخلخل و ویژگی‌های ساختمانی خاک اعمال می‌شود. بنابراین در خاک‌هایی که تغییرات ساختمانی تحت تأثیر عوامل دیگری مانند ماده آلی، فعالیت ریشه یا شبکه ماکروپورها قرار دارد، لزوماً رابطه معناداری بین مقدار CaCO_3 و شدت نفوذ مشاهده نمی‌شود (Bargués-Tobella et al., 2024). بین کربنات کلسیم معادل (CaCO_3) و pH خاک نیز همبستگی منفی معنادار ولی پائین مشاهده شد ($r = -0.28, p \leq 0.05$) که نشان می‌دهد در خاک‌های آهکی، pH تنها توسط مقدار آهک کنترل نشده و عوامل دیگری مانند ظرفیت بافری، مواد آلی و فرایندهای شیمیایی خاک نیز نقش مهمی دارند (Lal and Shukla, 2004; Hinsinger et al., 2003; Brady and Weil, 2017).

ماده آلی در میان ویژگی‌های مورد بررسی، بیشترین همبستگی مثبت را با میانگین شدت نفوذ (MIR) نشان داد. از طرفی نتایج رگرسیونی حاکی از عدم همخطی بین ویژگی‌های خاک در ارتباط با شدت نفوذ آب است؛ چرا که همه ویژگی‌های خاک به جز شن و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب دارای همخطی کمتر از حد آستانه ۵ نشان دادند (O'Brien, 2007; James et al., 2013). به‌طوری‌که مقادیر VIF برای ماده آلی، جرم مخصوص ظاهری، رس، سیلت، میانگین هندسی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب، واکنش خاک، قابلیت هدایت الکتریکی و کربنات کلسیم به‌ترتیب برابر ۲/۰۵، ۲/۳۳، ۱/۴۳، ۱/۷۲، ۴/۸۴، ۱/۳۶، ۱/۳۶ و ۱/۲۴ بود. شن دارای همخطی ۹/۵۱ بود که مطابق جدول ۱ ناشی از همبستگی بالا با سیلت است ($r = -0.87, p \leq 0.01$) و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب نیز دارای همخطی ۵/۵۸ بود که حاکی از همبستگی بالا با میانگین هندسی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب است ($r = 0.86, p \leq 0.01$). نتایج همبستگی جزئی نیز نشان داد که ماده آلی پس از کنترل اثر سایر ویژگی‌های خاک، رابطه مثبت با میانگین شدت نفوذ حفظ شد ($r = 0.21, p = 0.10$) که نشان‌دهنده مقدار روند مستقل اثر ماده آلی بر تغییرات نفوذ آب است. به‌طور کلی این یافته‌ها با تلفیق اثر ماده آلی بر سایر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نشان‌دهنده اهمیت این ویژگی خاک است. ماده آلی می‌تواند با اثرگذاری بر سایر ویژگی‌های خاک مانند پایداری خاکدانه‌ها نقش مهمی در فرایند نفوذ آب به خاک داشته باشد (Ma et al., 2024).

حد آستانه‌ای ماده آلی خاک برای نفوذ آب

برای دستیابی به حد آستانه ماده آلی از نظر فرایند نفوذ، رابطه خطی میان میانگین شدت نفوذ آب و مقدار ماده آلی خاک در ۶۸ نقطه مورد بررسی تحلیل شد. نتایج مدل رگرسیون قطعه‌ای (شکل ۵) نشان داد که مقدار ۱/۵ درصد ماده آلی، نقطه شکست یا حد آستانه‌ای رابطه بین شدت نفوذ آب به خاک و ماده آلی است. بر اساس مدل رگرسیون قطعه‌ای و با در نظر گرفتن سطح اطمینان ۹۵ درصد، این مقدار نشان‌دهنده‌ای از آستانه تأثیر ماده آلی بر شدت نفوذ است. شیب خط رگرسیون (شکل ۵) قبل و بعد از این حد آستانه‌ای برای میانگین شدت نفوذ به‌ترتیب ۱/۵۰- و ۱۳/۷۷ بود. نتایج آزمون t نشان داد که میانگین نفوذ آب در این دو گروه تفاوت بسیار معناداری دارد ($t = -3.00, df = 31.65, p \leq 0.005$). همچنین اندازه اثر بر اساس شاخص Cohen's d (Cohen, 1988) برابر ۰/۸۹ به‌دست آمد که بیانگر بزرگی قابل توجه اختلاف میانگین نفوذ آب در دو گروه قبل و بعد از حد آستانه‌ای است (شکل ۳). این نتیجه نشان می‌دهد که در مقادیر کمتر از ۱/۵ درصد ماده آلی، تغییرات ماده آلی تأثیر مشخصی بر نفوذ آب ندارد اما پس از عبور از این حد آستانه‌ای، افزایش شدت نفوذ همراه با افزایش ماده آلی با است. به‌گونه‌ای که میانگین شدت نفوذ در نمونه‌هایی با مقادیر ماده آلی کمتر از ۱/۵ درصد برابر با ۱۹/۲۷ سانتی‌متر بر ساعت بود (شکل ۳).

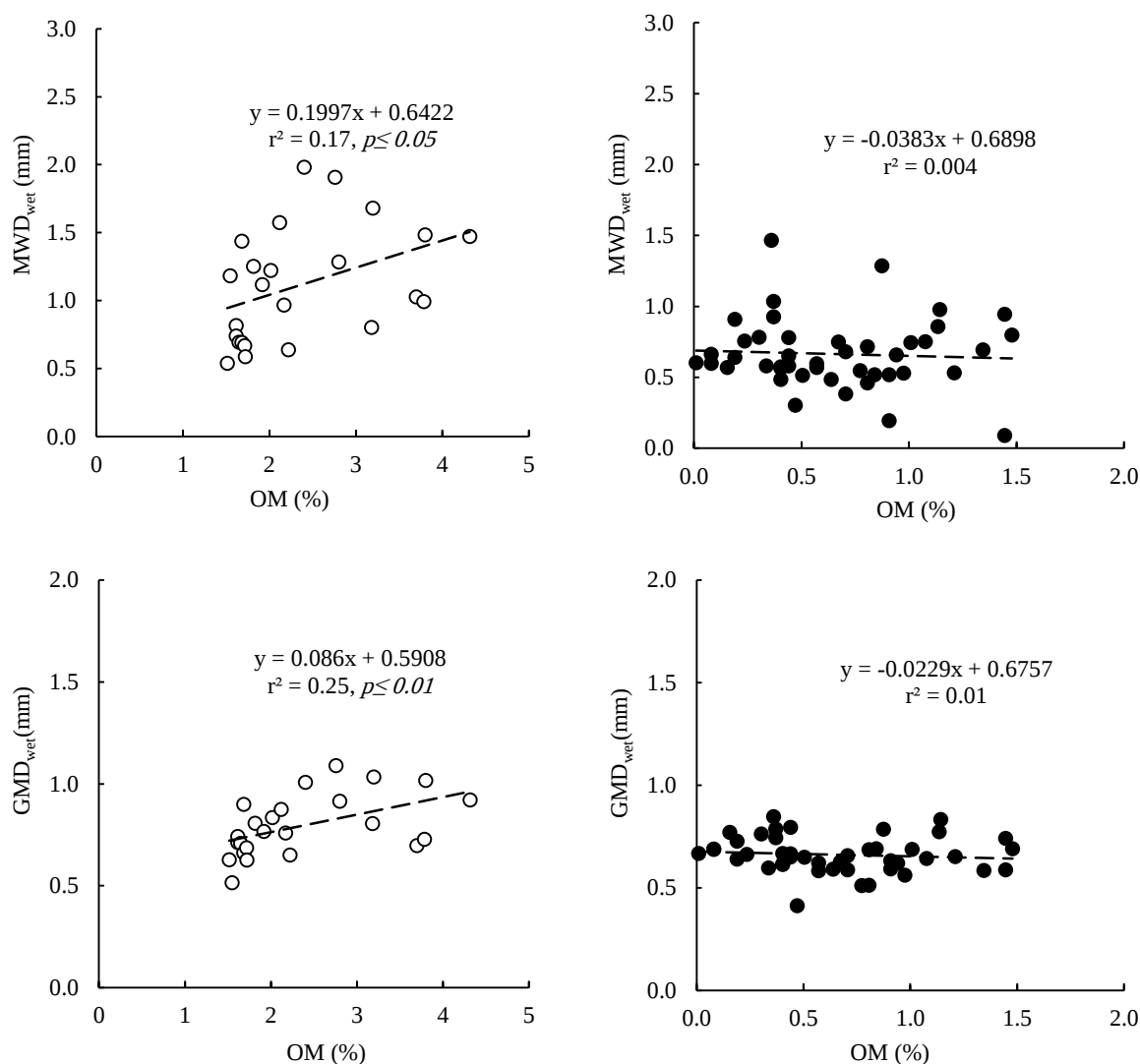
درمقابل در نمونه‌های دارای ماده آلی بیش از حد آستانه‌ای میانگین شدت نفوذ به ۳۲/۸۹ سانتی‌متر بر ساعت ارتقا یافت که بیانگر افزایش ۶۷ درصدی پس از عبور از حد آستانه‌ای ماده آلی است. این نتایج با یافته‌های مختلفی همخوانی دارد. (Cachipundo et al., 2025) نشان دادند در مقادیر بسیار کم یا بسیار زیاد ماده آلی، پاسخ خاک نسبت به نفوذ آب غیرخطی بوده و رفتار متفاوتی بروز می‌دهد، که این امر بیانگر وجود نقاط بهینه یا آستانه‌های عملکردی در رابطه ماده آلی و نفوذپذیری خاک است. افزایش ماده آلی معمولاً با کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش تخلخل مؤثر همراه است که حرکت آب در خاک را تسهیل می‌کند (Hudson, 1994; Franzluebbbers, 2002). این اثرات تا حد زیادی ناشی از افزایش فعالیت زیستی خاک و ترشح ترکیبات آلی تثبیت‌کننده منافذ درشت و مسیرهای جریان آب است (Lehmann & Kleber, 2015; Rabot et al., 2018). پژوهش‌های متعددی یافته‌های این پژوهش را تأیید می‌کنند. (Franzluebbbers, 2002) گزارش کرد که افزایش محتوای ماده آلی خاک، از طریق افزایش پایداری خاکدانه‌ها و توسعه منافذ درشت، موجب افزایش نفوذپذیری خاک می‌شود.



شکل ۳- مقایسه میانگین شدت نفوذ (MIR) با مقادیر ماده آلی (OM) در محدوده بیشتر و کمتر از حد آستانه.

Figure 3 - Comparison of average infiltration rate with organic matter values above and below the threshold.

نتایج رگرسیون خطی پایداری خاکدانه‌ها با ماده آلی خاک نیز پس از حد آستانه ۱/۵ درصد همبستگی معناداری با هم داشتند (شکل ۴). به‌طوری که میانگین وزنی ($r^2=0.17, p\leq 0.05$) و هندسی ($r^2=0.25, p\leq 0.01$) قطر خاکدانه‌ها در حالت تر پس از این حد آستانه‌ای رابطه‌ای معنادار با ماده آلی خاک نشان دادند. به‌طورکلی، این یافته‌ها بیانگر آن است که ماده آلی خاک پس از عبور از یک حد آستانه‌ای، نقشی تقویتی در بهبود رفتار نفوذ آب ایفا می‌کند و تغییرات آن می‌تواند منجر به جهش قابل توجه در نفوذ آب در خاک شود؛ موضوعی که اهمیت در نظر گرفتن رفتار آستانه‌ای ماده آلی در تحلیل‌های هیدرولوژیکی و مدیریت خاک را برجسته می‌سازد. با این حال گزارش‌های اندکی به تعیین کمی مقدار آستانه ماده آلی برای تغییر رفتار نفوذ پرداخته‌اند. در برخی مطالعات پیشین کمتر از ۲ درصد کربن آلی به‌عنوان حد بحرانی برای پایداری ساختمان خاک، حدود ۳/۲ درصد ماده آلی به‌عنوان مقدار بهینه برای کاهش تبخیر و افزایش نفوذ آب و دامنه ۳/۴۲ تا ۵/۵۵ درصد ماده آلی به‌عنوان محدوده مؤثر در افزایش آب قابل استفاده و نفوذ آب معرفی شده است (Kay & Angers, 1999; Ding et al., 2014; Cachipundo et al., 2025).

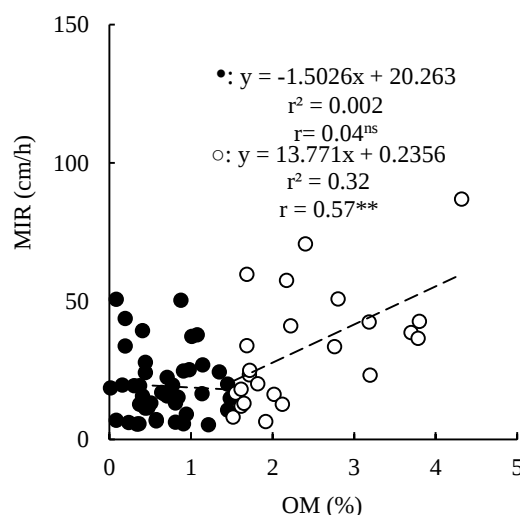


شکل ۴- رابطه خطی میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها با ماده آلی در محدوده کمتر از حد آستانه ۱/۵ درصد (دایره سیاه) و بیشتر از حد آستانه ۱/۵ درصد (دایره سفید).

Figure 4 - Linear relationship between weighted and geometric mean diameter of soil aggregates and organic matter in the range below the threshold of 1.5 percent (black circle) and above the threshold of 1.5 percent (white circle).

برای بررسی بیشتر حد آستانه‌ای ماده آلی بر مبنای نفوذ آب، داده‌ها به دو گروه کمتر و بیشتر از ۱/۵ درصد ماده آلی تقسیم شدند. نتایج برازش رگرسیون خطی (شکل ۵) نشان داد که میانگین نفوذ آب در این دو گروه تفاوت بسیار معناداری دارد ($r^2=0.32, p \leq 0.01$). در خاک‌های دارای کمتر از ۱/۵ درصد ماده آلی، رابطه بین ماده آلی و نفوذ آب بسیار ضعیف بود و ضریب تعیین، تنها ۰/۰۲ به دست آمد. این نتیجه نشان می‌دهد که در این محدوده، ماده آلی نقش تعیین‌کننده‌ای در تغییرات نفوذ آب ندارد. در مقابل، در خاک‌های دارای بیش از ۱/۵ درصد ماده آلی، رابطه مثبت و مشخصی بین ماده آلی و نفوذ آب مشاهده شد. در این گروه، ماده آلی توانست ۳۲ درصد از تغییرات میانگین شدت نفوذ را تبیین کند. نتایج حاکی از این بود که پس از عبور از حد آستانه‌ای ۱/۵ درصد، ماده آلی به یکی از عوامل مهم کنترل‌کننده نفوذ آب در خاک تبدیل می‌شود. این نتیجه با یافته‌های (Loveland & Webb (2003

که سطوح ۲ - ۱/۵ درصد را برای خاک‌های مناطق معتدل (در خاک‌های با بافت متوسط تا رسی) پیشنهاد کرده‌اند، هم‌خوانی دارد. کمتر بودن این حد در مناطق نیمه‌خشک می‌تواند ناشی از سازگاری اکولوژیک این سیستم‌ها با سطوح پایین‌تر ماده آلی باشد. همانطور که Oldfield et al. (2019) اشاره کرده‌اند، در اقلیم‌های نیمه‌خشک حتی کاهش‌های کوچک در ماده آلی خاک می‌تواند منجر به کاهش عملکرد و کیفیت خاک شود. تلفیق نتایج رگرسیون قطعه‌ای با تحلیل‌های آماری (آزمون t و رگرسیون درون گروهی) و رگرسیون خطی (شکل ۵) تصویر واضحی از تغییرات فرایند نفوذ آب به خاک در سطوح مختلف ماده آلی ارائه داد. به نظر می‌رسد ماده آلی در سطح ۱/۵ درصد یک حداقل آستانه عملکردی برای نفوذ آب به خاک است. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که علاوه بر نفوذ، ماده آلی دارای مقادیر آستانه‌ای برای بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک است و این رفتار را می‌توان با نقش ماده آلی در بهبود ساختمان خاک توضیح داد. به‌طوری‌که با کاهش ماده آلی به کمتر از یک حد بحرانی، پایداری خاک‌دانه‌ها، کیفیت ساختمان خاک، تخلخل و ظرفیت نگهداری آب به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد، در حالی‌که افزایش ماده آلی تا رسیدن به این آستانه موجب بهبود سریع عملکرد خاک می‌شود (Johannes et al., 2017; Murphy, 2015). در مقادیر ماده آلی زیر ۱/۵ درصد، ساختمان خاک هنوز ضعیف است و اثر مثبت ماده آلی به‌طور کامل ظاهر نمی‌شود. با افزایش ماده آلی و رسیدن آن به یک مقدار آستانه‌ای، پایداری خاک‌دانه‌ها و تخلخل خاک افزایش یافته و شرایط برای نفوذ آب بهتر فراهم می‌شود (Basset et al., 2023). از این‌رو، در سال‌های اخیر مفهوم حد آستانه‌ای ماده آلی به‌عنوان شاخصی مهم برای ارزیابی کیفیت و پایداری خاک مورد توجه قرار گرفته است و بسیاری از پژوهشگران بر تعیین این حدود برای ویژگی‌های مختلف خاک تأکید کرده‌اند (Bünemann et al., 2018; Wiesmeier et al., 2019).



شکل ۵- ارتباط میانگین شدت نفوذ (MIR) و مقدار ماده آلی خاک کمتر (دایره سیاه) و بیشتر از حد آستانه ای ۱/۵ درصد (نقاط سفید)

Figure 5 - Relationship between mean infiltration intensity (MIR) and soil organic matter (OM) content below (black circles) and above the threshold of 1.5 percent (white circles).

نتیجه‌گیری کلی

این پژوهش به‌وضوح نشان داد که ماده آلی یکی از ویژگی‌های مهم خاک از نظر تأثیر بر فرایند نفوذ آب است. رابطه بین نفوذ آب به خاک و ماده آلی خاک ماهیتی غیرخطی و آستانه‌ای دارد و استفاده از مدل‌های خطی ساده قادر به توصیف دقیق این رفتار نیست. به‌کارگیری رگرسیون قطعه‌ای منجر به شناسایی نقطه شکست رابطه میان میانگین شدت نفوذ و مقدار ماده آلی خاک شد. بر این اساس مقدار $1/5$ درصد ماده آلی به‌عنوان حد آستانه اثرگذاری ماده آلی برای شدت نفوذ در خاک‌های منطقه نیمه‌خشک است. در مقادیر کمتر این حد آستانه‌ای تغییرات ماده آلی اثری مشخص روی نفوذ آب نداشت، به‌گونه‌ای که ضرایب تعیین بسیار پایین رگرسیون خطی در این بازه نشان‌دهنده ارتباط ضعیف و نبود روند معنادار بود. در مقابل در بالاتر از این حد آستانه‌ای، ماده آلی به یک عامل تعیین‌کننده در تبیین فرایند نفوذ تبدیل شد و توانست بخش قابل توجهی از تغییرپذیری نفوذ آب به خاک (۳۲ درصد) را تبیین کند. افزایش چشمگیر بیش از ۶۷ درصدی شدت نفوذ آب به خاک و تفاوت بسیار معنادار میانگین‌های شدت نفوذ پیش و پس از حد آستانه‌ای، بیانگر آن است که در بالاتر از این حد منجر به جهشی معنادار در رفتار هیدرولوژیکی خاک می‌شود. این موضوع مرتبط به نقش سازنده ماده آلی در بهبود پایداری خاک‌دانه‌ها و در نتیجه افزایش پیوستگی منافذ درشت خاک هست. نتایج پژوهش حاضر از یک سو می‌تواند در شناسایی خاک‌های دچار محدودیت نفوذ بر مبنای ماده آلی خاک سودمند باشد و از سوی دیگر در برنامه‌ریزی برای حفظ و افزایش ماده آلی خاک جهت بهبود کیفیت فیزیکی خاک و افزایش شدت نفوذ آب مفید باشد.

شفاف‌سازی استفاده از هوش مصنوعی

در مراحل مختلف این پژوهش اعم از ایده‌پردازی، طراحی، جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها، نگارش متن یا ویرایش از ابزارهای هوش مصنوعی استفاده نشده است. در بخش چکیده مبسوط، ترجمه متن فارسی به انگلیسی با استفاده از هوش مصنوعی انجام و پس از آن ایرادهای نگارشی به‌وسیله نویسندگان مقاله برطرف گردید.

منابع مورد استفاده

References

- Assouline, S. (2013). Infiltration into soils: Conceptual approaches and solutions. *Water Resources Research*, 49(4), 755-1772. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20155>
- ASTM. (2009). Standard test method for infiltration rate of soils in field using double-ring infiltrometer. D3385-09, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Bronick, C.J., & 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>
- Bünemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., De Deyn, G., De Goede, R., & Brussaard, L. (2018). Soil quality—A critical review. *Soil biology and biochemistry*, 120, 105-125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Brady, N.C. & Weil, R.R. (2017). *The nature and properties of soils*. 15th Edn, Pearson Prentice Hall, USA. <https://doi.org/10.2134/agronj1952.00021962004400120013x>
- Bargués-Tobella, A., Winowiecki, L.A., Sheil, D., & Vågen, T.G. (2024). Determinants of field-saturated soil hydraulic conductivity across Sub-Saharan Africa: Texture and beyond. *Water Resources Research*, 60(1), e2023WR035510. <https://doi.org/10.1029/2023WR035510>
- Babaei, F., Vaezi, A.R., & Taheri, M. (2016). Modeling of soil organic carbon content using topographic indices and soil characteristics in rainfed wheat lands. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(3), 111-129. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22069/jwfst.2016.3189>

- Basset, C., Abou Najm, M., Ghezzehei, T., Hao, X., & Daccache, A. (2023). How does soil structure affect water infiltration? A meta-data systematic review. *Soil and Tillage Research*, 226, 105577. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105577>
- Beven, K., & Germann, P. (2013). Macropores and water flow in soils revisited. *Water Resources Research*, 49(6), 3071-3092. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20156>
- Beven, K.J. (2012). *Rainfall-runoff modelling: The primer*. John Wiley & Sons.
- Blanco-Canqui, H., Shapiro, C.A., Wortmann, C.S., Drijber, R.A., Mamo, M., Shaver, T.M., & Ferguson, R.B. (2013). Soil organic carbon: The value to soil properties. *Journal of Soil and Water Conservation*, 68(5), 129A-134A. <https://doi.org/10.2489/jswc.68.5.129A>
- Bouwer, H. (1986). Intake rate: cylinder infiltrometer. Pp. 825-844. In: *Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical methods*. SSA, Madison, USA. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c32>
- Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R.A., & Stone, C.J. (2017). *Classification and regression trees*. Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9781315139470>
- Bronick, C.J., & 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>
- Cachipuendo, C., Pacheco, A., Contero, R., & Sandoval, J. (2025). Optimization of irrigation efficiency and water retention in agroecological systems through organic matter management. *Water*, 17(21), 3037. <https://doi.org/10.3390/w17213037>
- Cao, Y., Zhang, K., Liu, S., & Wang, Y. (2024). A review of advancements in the theory and characterization of soil macropore structure. *PeerJ*, 12, e18442. <https://doi.org/10.7717/peerj.18442>
- Clayton, J., Lemanski, K., & Bonkowski, M. (2021). Shifts in soil microbial stoichiometry and metabolic quotient provide evidence for a critical tipping point at 1% soil organic carbon in an agricultural post-mining chronosequence. *Biology and Fertility of Soils*, 57(3), 435-446. <https://doi.org/10.1007/s00374-020-01532-2>
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Academic Press, Hillsdale, New Jersey, USA.
- Culley, J.L.B. (1993). Density and compressibility. Pp. 529-539. In: Carter, M.R. & Gregorich, E.G. (Eds.) *Soil sampling and methods of analysis*. CRC Press. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01052.5.x>
- D'Odorico, P., Bhattachan, A., Davis, K.F., Ravi, S., & Runyan, C.W. (2013). Global desertification: Drivers and feedbacks. *Advances in Water Resources*, 51, 326-344. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.01.013>
- Dexter, A.R. (2004). Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120(3-4), 201-214. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004>
- Dexter, A. R., Richard, G., Arrouays, D., Czyż, E. A., Jolivet, C., & Duval, O. (2008). Complexed organic matter controls soil physical properties. *Geoderma*, 144(3-4), 620-627. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.01.022>
- Ding, Y., Huang, H., Wang, L., Zhang, Z.Q., & Zhang, W.H. (2014). Effect of different organic matter content on soil moisture dynamics. *Applied Mechanics and Materials*, 477, 481-484. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.477-478.481>
- Franzluebbers, A.J. (2002). Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. *Soil and Tillage research*, 66(2), 197-205. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00027-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00027-2)
- Gee, G.W., & Bauder, J.W. (1986). Particle-size analysis. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, 5, 383-411. [https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15Digital Object Identifier \(DOI\)](https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15Digital Object Identifier (DOI))
- Hamza, M.A., & Anderson, W.K. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and tillage research*, 82(2), 121-145. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>
- Hillel, D. (2003). *Introduction to environmental soil physics*. Elsevier.
- Hillel, D. (2004). *Introduction to environmental soil physics*. Elsevier Academic Press.
- Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics*. Academic Press. San Diego, CA, USA.
- Hinsinger, P., Plassard, C., & Jaillard, B. (2006). Rhizosphere: a new frontier for soil biogeochemistry. *Journal of Geochemical Exploration*, 88(1-3), 210-213. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2005.08.041>
- Hudson, B. D. (1994). Soil organic matter and available water capacity. *Journal of soil and water conservation*, 49(2), 189-194. <https://doi.org/10.1080/00224561.1994.12456850>
- IUSS Working Group. (2014). *World reference base for soil resources 2014*. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.



- Jarvis, N., Koestel, J., & Larsbo, M. (2016). Understanding preferential flow in the vadose zone: Recent advances and future prospects. *Vadose Zone Journal*, 15(12), 1-11. <https://doi.org/10.2136/vzj2016.09.0075> Digital Object Identifier (DOI)
- Jarvis, N. J. (2020). A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: Principles, controlling factors and consequences for water quality. *European Journal of Soil Science*, 71(3), 279-302. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2007.00915.x>
- Johannes, A., Matter, A., Schulin, R., Weisskopf, P., Baveye, P. C., & Boivin, P. (2017). Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter? *Geoderma*, 302, 14-21. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.021>
- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). *An introduction to statistical learning: with applications in R* (Vol. 103). New York: springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-38747-0>
- Kay, B.D., & Angers, D.A. (1999). Soil structure and organic matter: II. Effects of tillage. *Soil & Tillage Research*, 53(1-2), 45-55.
- Kramer, I., & Mau, Y. (2023). Modeling the effects of salinity and sodicity in agricultural systems. *Water Resources Research*, 59(6), e2023WR034750. <https://doi.org/10.1029/2023WR034750>
- Kelishadi, H., Mosaddeghi, M.R., Hajabbasi, M.A., & Ayoubi, S. (2014). Near-saturated soil hydraulic properties as influenced by land use management systems in Koohrang region of central Zagros, Iran. *Geoderma*, 213, 426-434. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.008>
- Kemper, W.D., & Rosenau, R.C. (1986). Aggregate stability and size distribution. Pp. 425-442. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical properties*. SSSA, ASA, Madison, WI, USA. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17>
- Killick, R., & Eckley, I.A. (2014). changepoint: An R package for changepoint analysis. *Journal of Statistical Software*, 58, 1-19. <https://doi.org/10.18637/jss.v058.i03>
- Kutilek, M., & Nielsen, D.R. (1994). Soil hydrology. Catena-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6646-9>
- Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875-5895. <https://doi.org/10.3390/su7055875>
- Lal, R. (2020). Soil organic matter and water retention. *Agronomy Journal*, 112(5), 3265-3277. <https://doi.org/10.1002/agj2.20282>
- Lal, R., & Shukla, M.K. (2004). *Principles of soil physics*. CRC Press.
- Lehmann, J., & Kleber, M. (2015). The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528(7580), 60-68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>
- 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. https://doi.org/10.1111/EJSS.2_12311
- Lingying, X.U., Quanbo, Y.U., Shengjun, B.A.I., Meiyan, W.A.N.G., Weixia, S.U.N., Shengxiang, X.U., & Weiwen, Q.I.U. (2024). Soil organic carbon impact on soil physical properties through quantity and quality modifications. *Soil Advances*, 2, 100014. <https://doi.org/10.1016/j.soilad.2024.100014>
- Loveland, P., & Webb, J. (2003). Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review. *Soil and Tillage Research*, 70(1), 1-18. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00139-3](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00139-3)
- Ma, S., Cao, Y., Lu, J., Ren, T., Cong, R., Lu, Z., & Li, X. (2024). Response of soil aggregation and associated organic carbon to organic amendment and its controls: A global meta-analysis. *Catena*, 237, 107774. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107774>
- Minasny, B., & McBratney, A. B. (2018). Limited effect of organic matter on soil available water capacity. *European Journal of Soil Science*, 69(1), 39-47. <https://doi.org/10.1111/ejss.12475>
- Muggeo, V.M. (2003). Estimating regression models with unknown break-points. *Statistics in medicine*, 22(19), 3055-3071. <https://doi.org/10.1002/sim.1545>
- Murphy, B.W. (2015). Impact of soil organic matter on soil properties-a review with emphasis on Australian soils. *Soil Research*, 53(6), 605-635. <https://doi.org/10.1071/SR14246>
- Oldfield, E.E., Bradford, M.A., & Wood, S.A. (2019). Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields. *Soil*, 5(1), 15-32. <https://doi.org/10.5194/soil-5-15-2019>
- O'brien, R.M. (2007). A caution regarding rules of thumb for variance inflation factors. *Quality & quantity*, 41(5), 673-690. <https://doi.org/10.1007/s1135-006-9018-6>
- Page, A.L., Miller, R.H., & Keeney, D.R. (1982). *Methods of soil analysis, part 2. Chemical and microbiological properties*. ASA, SSSA, Madison, WI, USA. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c33>
- Peng, Y., Qin, J., Luo, W., Yang, L., & Mayer, M. (2025). Meta-analysis shows global water availability thresholds for the contents of soil organic carbon and its fractions are only partly affected by nitrogen addition. *Catena*, 256, 109130. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.109130>

- Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., & Vogel, H.J. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, 314, 122-137. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., & Denef, 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. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>
- Six, J.A.E.T., Elliott, E.T., & Paustian, K. (2000). Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(14), 2099-2103. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00179-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00179-6)
- Soil Survey Staff. (2014). *Keys to soil taxonomy*. Twelfth Edition, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, USA.
- Stavi, I., Thevs, N., & Priori, S. (2021). Soil salinity and sodicity in drylands: A review of causes, effects, monitoring, and restoration measures. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 712831. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.712831>
- Thomas, G.W., & Sparks, D.L. (1996). *Methods of soil analysis, Part 3-Chemical methods*. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA. <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.2136/sssabookser5.3>
- Toms, J.D., & Lesperance, M.L. (2003). Piecewise regression: a tool for identifying ecological thresholds. *Ecology*, 84(8), 2034-2041. <https://doi.org/10.1890/02-0472>
- Vaezi, A.R., Abbasi, M., Bussi, G., & Keesstra, S. (2017). Modeling sediment yield in semi-arid pasture micro-catchments, NW Iran. *Land Degradation & Development*, 28(4), 1274-1286. <https://doi.org/10.1002/ldr.2526>
- Vaezi, A.R., Abbasi, M., Keesstra, S., & Cerdà, A. (2017). Assessment of soil particle erodibility and sediment trapping using check dams in small semi-arid catchments. *Catena*, 157, 227-240. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.05.021>
- Vaezi, A.R., Sadeghi, S.H.R., Bahrami, H.A., & Mahdian, M.H. (2008). Modeling the USLE K-factor for calcareous soils in northwestern Iran. *Geomorphology*, 97(3-4), 414-423. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.05.02110.1016/j.geomorph.2007.08.017>
- Vaezi, A.R. (2020). *Water erosion: Processes and models*. First ed. University of Zanjan Press, Zanjan, Iran.
- Vaezi, A.R., Babaei, F. & Safiloo, H. (2025). Determining the Salinity Tolerance Threshold of Sardari Wheat in Rainfed Lands of Semi-Arid Region in Zanjan province. *Journal of Soil and Plant Science*, 35(4), 23-39. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22034/sps.2025.69805.1022>
- 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. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobley, E., Lang, B., von Lützow, M., Marin-Spiotta, E., & Kögel-Knabner, I. (2019). Soil organic carbon storage as a key function of soils-A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*, 333, 149-162. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>
- 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. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22059/IJSWR.2020.310061.668738>