

Journal of Soil and Plant Science

E-ISSN: 3092-6106
<https://sps.tabrizu.ac.ir>

Research Article

Relationship between Water Infiltration Indices and Fractal Dimension of Soil Particle Size Distribution in Semi-Arid Areas of Zanjan Province

Ali Reza Vaezi¹, Mortaza Yavari², Mohammad Sadegh Askari³

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

E-mail: vaezi.alireza@znu.ac.ir

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

E-mail: mortazayavari90@gmail.com

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

Received: November 08, 2025

Revised: February 14, 2026

Accepted: February 16, 2026

Published: February 16, 2026

Extended Abstract

Background and Objectives

Water infiltration into the soil is regarded as one of the key processes in the hydrological cycle and water resources management. This process not only plays a crucial role in the efficient utilization of water resources, but is also fundamental to runoff modeling, groundwater recharge, and soil conservation. Among the factors influencing soil infiltration behavior, soil physical structure, particularly particle size distribution (PSD) has a direct effect on total porosity, pore size distribution and continuity, and hydraulic conductivity. However, these properties result from the complex interaction between PSD and other soil attributes such as aggregate stability, organic matter content, and bulk density. Assessment of soil structure solely through classical geometric approaches is insufficient to describe inherent natural complexity of the soil. In this context, the concept of fractal dimension has been introduced as a tool for characterizing irregular, complex, and self-similar structures of the soils. The application of fractal theory, particularly in relation to soil hydraulic properties such as water infiltration indices still requires further investigation. Given the complex and multifactorial nature of the infiltration process, analyzing the fractal dimension of primary particle size distribution may help to clarify the role of this characteristic as a complementary and useful variable in advanced and multivariate infiltration models. This issue is of particular importance in soils of semi-arid regions, which often exhibit weak structural development. Therefore, the objective of this study was to investigate the possible relationship between soil water infiltration indices and the fractal dimension of particle size distribution.

Methodology

In this study, to investigate the relationship between soil water infiltration indices and the fractal dimension of particle size distribution (PSD), a wide range of soil particle size distributions in a semi-arid region was employed. Accordingly, 68 sampling sites were selected across Zanjan province, Iran, a representative semi-arid region with a mean annual precipitation of approximately 324 mm. Soil water infiltration at each site was measured using a double-ring infiltrometer. At each location, 14 consecutive readings of infiltration depth were recorded at specified time intervals (0, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 80, and 90 min), and measurements continued until the infiltration rate reached to steady-state conditions, allowing the calculation of soil water infiltration indices. To evaluate soil infiltration behavior, the following indices were examined: (1) cumulative infiltration at 90 min (CI), (2) initial infiltration at 30 s (II), (3) final infiltration rate (FIR), and (4) mean infiltration rate (MIR). For the determination of soil properties, disturbed soil samples were collected using a hand shovel from the 0–60 cm soil depth, considered the active hydrological layer of the soil. Particle size distribution was determined according to the USDA classification using the hydrometer method. Initial soil moisture content prior to infiltration experiments was determined by collecting soil samples from the 0–20 cm depth using metal cylinders (5 cm × 5 cm) and oven-

drying them at 105 °C. Bulk density was measured using undisturbed soil samples collected with metal cylinders of known volume. The fractal dimension of soil particle size distribution was calculated using the models proposed by Bird *et al.* and Tyler and Wheatcraft. As these models may describe different aspects of soil structure, both were applied and evaluated in this study. To assess the effects of the fractal dimension of PSD on soil water infiltration characteristics: (1) mean comparisons were performed to examine statistically significant differences among fractal dimension classes and infiltration indices using Tukey's honestly significant difference (HSD) test; and (2) Pearson correlation analysis was employed to evaluate correlations among variables with different distributions.

Results

The results of Pearson correlation analysis and analysis of variance (ANOVA) indicated that no statistically significant correlations existed between the fractal dimension of particle size distribution and the various soil water infiltration indices. Moreover, differences in infiltration indices among the fractal dimension classes (< 2.7, 2.7–2.8, and > 2.8) were not statistically significant. Nevertheless, examination of the mean values of infiltration indices across different fractal dimension ranges revealed relatively consistent increasing or decreasing trends for some infiltration indices. Comparison of the corresponding fractal dimension values further showed that the model proposed by Bird *et al.* generally estimated lower fractal dimension values of the primary particle size distribution than the model of Tyler and Wheatcraft, particularly at lower fractal dimension ranges.

Conclusions

Overall, findings of the present study disclosed lack of statistically significant correlations between soil water infiltration indices and the fractal dimension of primary particle size distribution which can be attributed to the complex, multifactorial, and nonlinear nature of the soil water infiltration process. Soil water infiltration results from the simultaneous interaction of soil physical, chemical, and biological properties. Therefore, the fractal dimension of particle size distribution, as a single index, is insufficient to fully explain variations in water infiltration or differences among soils. Under such conditions, this parameter may be more appropriately employed as a complementary explanatory variable within multivariate frameworks or advanced modeling approaches.

Keywords: Cumulative infiltration, Double-ring, Initial infiltration, PSD fractal dimensions, Soil hydraulic behavior.

Author Contributions

Conceptualization, A.V. and M.Y.; methodology, A.V. and M.Y.; software, A.V. and M.Y.; validation, A.V. and M.Y.; 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.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

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

Cite this article: Vaezi, A.R., Yavari, M. & Askari, M.S. (2025). Relationship between water infiltration indices and fractal dimension of soil particle size distribution in semi-arid areas of Zanjan province. *Journal of Soil and Plant Science*, 35(4), 117-133.

<https://doi.org/10.22034/sps.2026.70136.1023>

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



Copyright © 2025 The Authors.
Publisher: The University of Tabriz

OPEN  ACCESS
JOURNALS

مقاله پژوهشی

ارتباط شاخص‌های نفوذ آب با بعد فراکتالی توزیع اندازه ذرات خاک در مناطق نیمه‌خشک استان زنجان

علی‌رضا واعظی^۱، مرتضی یآوری^۲، محمدصادق عسکری^۳۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: vaezi.alireza@znu.ac.ir

۲- نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

رایانامه: mortazayavari90@gmail.com۳- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: askari@znu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۷	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۷	تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۱/۲۷

چکیده

نفوذ آب به خاک یکی از فرایندهای کلیدی در مدیریت منابع آب است و درک ارتباط آن با ویژگی‌های ساختاری خاک همچون بعد فراکتال توزیع اندازه ذرات اولیه (PSD) اهمیت زیادی دارد. این پژوهش با هدف بررسی ارتباط بین شاخص‌های نفوذ آب و بعد فراکتال PSD در برخی خاک‌های منطقه نیمه‌خشک زنجان انجام شد. برای این کار، آزمایش صحرایی نفوذ با حلقه‌های دوگانه در ۶۸ نقطه با طیف نسبتاً متنوع از بافت خاک انجام و نفوذ اولیه (۳۰ ثانیه)، نفوذ انباشته (۹۰ دقیقه) و شدت نفوذ متوسط و نهایی به‌عنوان شاخص‌های نفوذ آب به خاک اندازه‌گیری شدند. همچنین، PSD به‌صورت آزمایشگاهی تعیین و بعد فراکتال آن‌ها با مدل‌های بیرد و همکاران و تیلر و ویت‌کرفت محاسبه شدند. نتایج آزمون‌های پیرسون و تحلیل واریانس نشان داد که بین شاخص‌های نفوذ آب و بعد فراکتالی PSD، رابطه و تفاوت آماری معناداری وجود نداشت. با این حال، تغییرات میانگین شاخص‌های نفوذ در سطوح مختلف بعد فراکتال (کمتر از ۲/۷، ۲/۸ - ۲/۷ و بیشتر از ۲/۸) نشان‌دهنده روندهای افزایشی یا کاهشی نسبتاً منظم به‌ویژه در مورد نفوذ انباشته بود. همچنین، مدل بیرد و همکاران نسبت به مدل تیلر و ویت‌کرفت در مقادیر متناظر بعد فراکتال PSD، بیش‌برآورد داشت و این تفاوت به‌ویژه در مقادیر کم بعد فراکتال بارزتر بود. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که بعد فراکتالی PSD به‌تنهایی قادر به تبیین تغییرپذیری شاخص‌های نفوذ آب نیست که به ماهیت پیچیده و چندعاملی فرایند نفوذ مربوط است. از این رو، بعد فراکتال می‌تواند صرفاً به‌عنوان یک متغیر تبیینی مکمل در کنار سایر عوامل مؤثر مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: حلقه‌های دوگانه، بعد فراکتال ذرات اولیه خاک، رفتار هیدرولیکی خاک، نفوذ اولیه، نفوذ انباشته.**استناد به این مقاله:** واعظی، ع.ر.، یآوری، م.، و عسکری، م.ص. (۱۴۰۴). ارتباط شاخص‌های نفوذ آب با بعد فراکتالی توزیع

اندازه ذرات خاک در مناطق نیمه‌خشک استان زنجان. نشریه دانش خاک و گیاه، ۳۵(۴)، ۱۱۷-۱۳۳.

<https://doi.org/10.22034/sps.2026.70136.1023>

مقدمه

نفوذ آب به خاک یکی از فرایندهای کلیدی در چرخه هیدرولوژیکی و مدیریت منابع آب به شمار می‌رود. این فرایند نه تنها در بهره‌برداری بهینه منابع آبی نقش دارد بلکه در مدل‌سازی رواناب، تغذیه آب‌های زیرزمینی و حفاظت از خاک نیز اهمیت ویژه‌ای دارد (Hillel, 1998). یکی از عوامل مؤثر بر رفتار نفوذ، ساختار فیزیکی خاک به‌ویژه از منظر توزیع اندازه ذرات^۱ (PSD) است که به‌طور مستقیم بر مقدار تخلخل، پیوستگی حفرات و هدایت هیدرولیکی خاک اثر می‌گذارد (Jury & Horton, 2004). با این حال، این ویژگی‌ها حاصل برهم‌کنش پیچیده PSD با عواملی نظیر ساختمان خاک، پایداری خاک‌دانه‌ها، مقدار ماده آلی و چگالی ظاهری هستند (Hillel, 1998; Six et al., 2004; Bronick & Lal, 2005).

بررسی ساختار خاک از منظر هندسه کلاسیک، پاسخ‌گوی کامل پیچیدگی‌های طبیعی آن نیست. در این راستا مفهوم بعد فراکتال^۲ به‌عنوان شاخصی برای توصیف ساختارهای نامنظم، پیچیده و خودهمانند^۳ مطرح شده است (Mandelbrot, 1983). مفهوم بعد فراکتال برای اولین بار به‌وسیله مندلبروت ریاضی‌دان انگلیسی در سال ۱۹۶۷ معرفی شد (Mandelbrot, 1967). موضوع اصلی فراکتال‌ها توصیف دامنه وسیعی از ساختارهای طبیعی نامنظم، قطعات ریز یا درشت و ذراتی با اندازه‌های مختلف است که دارای اشکال هندسی نامنظمی هستند و این ذرات از طریق مقیاس ویژه‌ای با یکدیگر ارتباط دارند (Mandelbrot, 1983). به‌طور کلی، از مفهوم بعد فراکتال علاوه بر ارزیابی توزیع اندازه ذرات می‌توان برای ارزیابی ساختمان خاک (Zolfaghari & Hajabbasi, 2008)، پایداری خاک‌دانه‌ها (Pirmoradian et al., 2005)، نفوذپذیری خاک (Omidvar, 2021)، منحنی رطوبتی (Kravchenko & Zhang, 1998) و هدایت هیدرولیکی اشباع (Rawls et al., 1993) استفاده نمود.

بعد فراکتالی ابزار مناسبی برای برآورد رابطه توزیع اندازه ذرات با ویژگی‌های مرتبط با آن است (Tyler & Wheatcraft, 1992; Bird et al., 2000; Huang et al., 2002). بعد فراکتال توزیع اندازه ذرات را می‌توان به‌صورت توابع جرم ذرات کوچک‌تر از یک اندازه‌ی مشخص، روش تعدیل شده‌ی جرم- قطر و روش‌های مبتنی بر تعداد ذرات و سطح ویژه تعیین نمود (Filgueira et al., 2006). معمولاً توابع بعد فراکتالی با لگاریتم‌گیری از طرفین معادله به‌صورت خطی درمی‌آیند و با استفاده از رگرسیون خطی ساده بعد فراکتال به‌دست می‌آید. با این حال، تفاوت بر سر انتخاب برازش خطی (Sepaskhah & Tafteh, 2013) و غیرخطی این روابط برای تعیین بعد فراکتال هنوز وجود دارد (Filgueira et al., 2006). مقدار بعد فراکتال PSD معمولاً با افزایش فراوانی ذرات ریز (رس و سیلت) افزایش یافته و با افزایش درصد شن کاهش می‌یابد؛ به‌گونه‌ای که خاک‌های ریزبافت دارای مقادیر بالاتری از بعد فراکتال هستند (Bai et al., 2020).

پژوهشگران در سراسر دنیا مفهوم بعد فراکتالی را برای توصیف ویژگی‌های فیزیکی خاک مورد بررسی قرار داده‌اند. تیلر و ویت‌کرفت (Tyler & Wheatcraft, 1992) مدلی برای تعیین بعد فرکتال توزیع اندازه ذرات بیان کردند که با استفاده از این رابطه از روی منحنی دانه‌بندی به‌سادگی بعد فرکتال توزیع اندازه ذرات به‌دست می‌آید. این مدل بر فرض خودهمانندی توزیع اندازه ذرات استوار است و عمدتاً بیانگر سهم ذرات ریز و فرایندهای وابسته به مکش ماتریک و جذب موئینگی است. در مقابل مدلی که به‌وسیله بیرد و همکاران (Bird et al., 2000) ارائه شده

بر توزیع جرمی ذرات تأکید دارد که یافته‌های بعدی نیز کاربرد این مدل را در تحلیل رفتار هیدرولیکی خاک تأیید کرده‌اند (Huang & Zhang, 2005).

شو و سان (Xu & Sun, 2002) منافذ خاک را از طریق هندسه فراکتالی توصیف نمودند و بعد فراکتالی را بر اساس اندازه‌گیری‌های تخلخل خاک به‌دست آوردند. آن‌ها عنوان کردند که ویژگی‌های آب خاک را می‌توان با استفاده از بعد فراکتالی کمی نمود. (Jing & Shangguan, 2006) نیز توزیع اندازه خاکدانه‌ها را با استفاده از مفاهیم فراکتال مشخص کردند. بعد فراکتالی توزیع اندازه ذرات در برخی موارد می‌تواند شاخص مناسب‌تری در توصیف ویژگی‌های ریزمقیاس، نسبت به بعد فراکتالی خاکدانه‌ها فراهم کند (Perfect & Kay, 1995). احمدی و همکاران (Ahmadi et al., 2011) رابطه بعد فراکتالی خاکدانه‌ها را با ویژگی‌های فیزیکی خاک، شامل اجزای بافت خاک و تخلخل و هدایت هیدرولیکی مؤثر بررسی کردند و همبستگی مثبت بالا و معناداری بین بعد فراکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌ها با درصد رس و تخلخل کل و همبستگی منفی میان بعد فراکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌ها با شن و میانگین هندسی قطر ذرات را گزارش کردند.

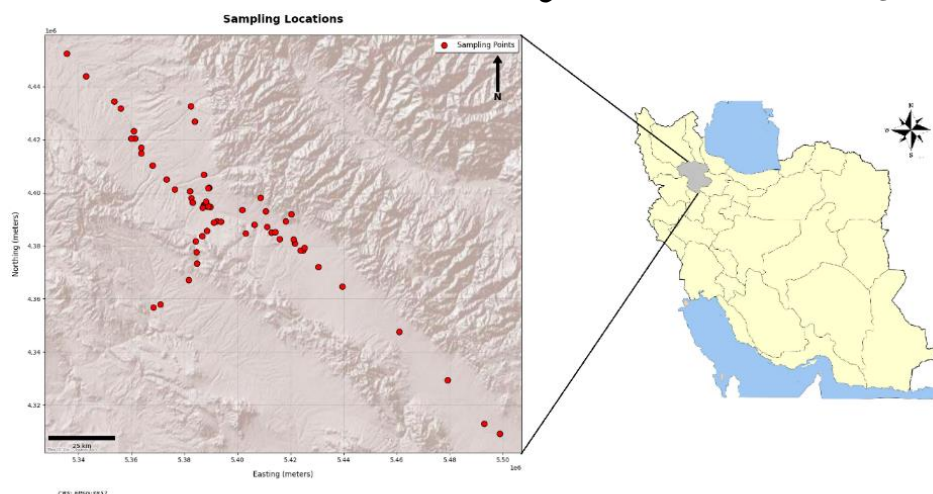
با وجود پژوهش‌های فراوان، صحت و کاربرد تئوری فراکتال توزیع اندازه‌ای ذرات خاک برای برآورد ویژگی‌های خاک هنوز به‌عنوان هدفی برای تحقیق به‌وسیله پژوهش‌گران دنبال می‌شود (Bai et al., 2020). پژوهش‌های جدید تأکید دارند که رابطه بین بعد فراکتال PSD و شاخص‌های نفوذ آب اغلب غیرخطی است (Chen et al., 2023). در برخی مطالعات، همبستگی خطی ضعیف یا غیرمعناداری بین شاخص‌های نفوذ و بعد فراکتال گزارش شده است (Omidvar, 2021). درمقابل، ممکن است در خاک‌های نسبتاً همگن یا با توزیع محدود اندازه ذرات، همبستگی نسبتاً قوی‌تری بین شاخص‌های نفوذ و بعد فراکتال مشاهده شود (Yu & Cheng, 2002). با این حال، کاربرد تئوری فراکتال؛ خصوصاً برای برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک مانند شاخص‌های نفوذ آب به خاک نیاز به پژوهش‌های بیشتری دارد. با توجه به ماهیت پیچیده و چندعاملی فرایند نفوذ، بررسی بعد فراکتال توزیع اندازه ذرات اولیه می‌تواند اثر این ویژگی را به‌عنوان متغیری مکمل و قابل استفاده در مدل‌های پیشرفته و چندمتغیره نفوذ مشخص نماید. مطالعه این موضوع در خاک‌های منطقه نیمه‌خشک که اغلب ساختمان ضعیفی دارند (Verheye, 2009) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف از این پژوهش، بررسی ارتباط شاخص‌های نفوذ آب به خاک با بعد فراکتالی توزیع اندازه ذرات با استفاده از مدل‌های Tyler & Wheatcraft (1992) و Bird et al. (2000) بود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

برای بررسی ارتباط شاخص‌های نفوذ آب به خاک و بعد فراکتال توزیع اندازه ذرات خاک، دامنه‌ای نسبتاً وسیع از توزیع اندازه ذرات خاک در منطقه نیمه‌خشک مد نظر قرار گرفت. نقاط مورد مطالعه با در نظر گرفتن معیارهایی همچون نوع کاربری زمین، پوشش گیاهی، بافت خاک و اطلاعات موجود از نقشه‌های خاک‌شناسی انتخاب شد؛ به‌طوری‌که انجام آزمایش در گستره‌ای از خاک‌های غالب منطقه صورت گیرد. دراین‌راستا ۶۸ نقطه از استان زنجان به‌عنوان یکی از مناطق نیمه‌خشک ایران با میانگین بارش سالانه از ۳۲۴ میلی‌متر برای نمونه‌برداری خاک انتخاب شد. بدین‌منظور، ۴۵ نقطه در کاربری مرتع، ۱۳ نقطه در کاربری زراعی، ۸ نقطه در کاربری باغی و ۲ نقطه در کاربری جنگلی انتخاب شدند (شکل ۱). منطقه نمونه‌برداری منطبق بر 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 با مساحتی نزدیک به ۲۱۸۴۱ کیلومتر مربع است (Khoshraftar, 2009).



شکل ۱- موقعیت نقاط نمونه‌برداری در منطقه مورد مطالعه.

آزمایش‌های صحرایی

برای تعیین نفوذ آب به خاک در نقاط مورد نظر، از حلقه‌های دوگانه استفاده شد. قطر داخلی و خارجی حلقه‌ها به ترتیب ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متر بود و در هر مکان، ۱۴ قرائت متوالی از عمق نفوذ آب در فواصل زمانی مشخص (صفر، ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۸۰ و ۹۰ دقیقه) ثبت گردید و تا رسیدن شدت نفوذ به حالت پایدار ادامه یافت تا شاخص‌های نفوذ آب به خاک به دست آید (ASTM, 2009).

تعیین شاخص‌های نفوذ آب به خاک

برای ارزیابی رفتار نفوذ آب در خاک، چهار شاخص مورد بررسی قرار گرفت: (۱) نفوذ انباشته^۱ (CI)، (۲) نفوذ اولیه^۲ ۳۰ ثانیه^۳ (II)، (۳) شدت نفوذ نهایی^۴ (FIR) و (۴) شدت نفوذ متوسط^۵ (MIR). برای تعیین نفوذ انباشته، مجموع عمق آب نفوذیافته در بازه زمانی صفر تا زمان رسیدن به شدت نفوذ پایدار (۹۰ دقیقه) اندازه‌گیری شد. این شاخص که به نوبه خود تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک است (Hillel, 1998) نمایانگر ظرفیت کلی خاک برای پذیرش آب در طول مدت نفوذ است (Elrick & Reynolds, 2002). از سوی دیگر، برای بررسی نفوذ اولیه آب به خاک مقدار نفوذ ثبت شده در ۳۰ ثانیه ابتدایی فرایند نفوذ به عنوان شاخص نفوذ اولیه در نظر گرفته شد (ASTM, 2009). این شاخص به طور خاص بیانگر نرخ ورود سریع آب به خاک در مراحل ابتدایی اشباع نشده خاک است. شدت نفوذ نهایی نشان‌دهنده شدت نفوذ ماندگار در دقایق پایانی آزمایش است. این شاخص، زمانی قابل محاسبه است که تغییرات شدت نفوذ بین چند بازه زمانی متوالی بسیار اندک باشد (کمتر از ۱۰ درصد)، به طوری که منحنی

¹ Double Ring Infiltrometer

² Cumulative Infiltration

³ Initial Infiltration

⁴ Final Infiltration Rate

⁵ Mean Infiltration Rate

نفوذ تقریباً به حالت پایدار برسد. شدت نفوذ متوسط، از تقسیم نفوذ تجمعی بر کل زمان آزمایش به دست می‌آید و میانگین شدت نفوذ در طول کل دوره نفوذ را ارائه می‌دهد. این شاخص برای مقایسه کلی عملکرد خاک‌های مختلف از نظر نفوذپذیری مفید است. این شاخص‌ها به عنوان مبنایی برای تحلیل و بررسی اثر توزیع اندازه و ابعاد فراکتالی روی رفتار نفوذ پذیری مورد استفاده قرار گرفتند.

اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک

نمونه‌های دست‌خورده خاک با استفاده از بیل دستی از عمق صفر تا ۶۰ سانتی‌متری (Hillel, 1998) به عنوان لایه فعال هیدرولوژیکی خاک (Brady & Weil, 2017) برداشت شدند. نمونه‌ها ابتدا هواخشک شده و پس از کوبیدن از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. بر اساس اندازه ذرات، دو روش تفکیکی برای تعیین توزیع اندازه ذرات بر اساس طبقه‌بندی USDA مورد استفاده قرار گرفت: (۱) تعیین ذرات درشت‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر. برای این کار از روش غربال خشک با سری الک مشخص (۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۵ میلی‌متر) طبق روش‌های استاندارد ارائه شده به وسیله گی و بادر (Gee & Bauder, 1986) استفاده و بخش شن تعیین شد. (۲) تعیین درصد ذرات کوچک‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر. برای این منظور از روش هیدرومتری (Yavari et al., 2021) استفاده شد و خوانش هیدرومتر در زمان‌های ۶ و ۲۴ ساعت انجام گرفت و بخش رس از رابطه (۱) به دست آمد. نتایج حاصل از دو روش فوق ترکیب شده و توزیع اندازه ذرات برای هر نمونه خاک تعیین شد. برای تعیین بخش سیلت، باقیمانده درصد نسبی ذرات اولیه پس از کسر مجموع درصد رس (روش هیدرومتری) و شن (روش الک) محاسبه شد. این داده‌ها مبنای محاسبه بعد فراکتال توزیع اندازه ذرات و تحلیل ارتباط آن با شاخص‌های نفوذ آب به خاک قرار گرفتند.

$$P_{\text{clay}} = P_{[6h]} - \left(\frac{P_{[6h]} - P_{[24h]}}{\ln\left(\frac{d_{[6h]}}{d_{[24h]}}\right)} \right) \left(\ln\left(\frac{d_{[6h]}}{0.002}\right) \right) \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن: P_{Clay} : درصد رس خاک، $P_{[h6]}$ و $P_{[h24]}$: به ترتیب درصد ذرات اندازه‌گیری شده در زمان‌های ۶ و ۲۴ ساعت، $d_{[h6]}$ و $d_{[h24]}$: به ترتیب قطر ذرات اندازه‌گیری شده متناظر با زمان ۶ و ۲۴ ساعت (میلی‌متر). سنگریزه کل با استفاده از روش ارائه شده به وسیله گی و بادر (Gee & Bauder, 1986) تعیین شد. برای اندازه‌گیری چگالی ظاهری خاک، نمونه‌های دست‌نخورده با استفاده از سیلندرهای فلزی با حجم معلوم (با ابعاد ۵ در ۵ سانتی‌متر) از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متر برداشت شدند و چگالی ظاهری آن‌ها با روش کالی (Culley, 1993) اندازه‌گیری شد. پیش از انجام آزمایش‌های نفوذ، رطوبت اولیه خاک با تهیه نمونه خاک و خشک کردن آن‌ها در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس تعیین شد.

تعیین بعد فراکتال توزیع اندازه ذرات

برای محاسبه بعد فراکتال توزیع اندازه ذرات خاک از مدل پیشنهادی بیرد و همکاران (Bird et al., 2000) و تیلر و ویت‌کرفت (Tyler & Wheatcraft, 1992) استفاده شد. مدل بیرد و همکاران (Bird et al., 2000) بر اساس رابطه

توانی ساده (رابطه ۲) بین ویژگی‌های مرتبط با ذرات خاک (مانند طول، سطح، جرم و حجم) و مقیاس مشاهده‌ای (اندازه‌گیری) به‌دست آمد (مدل بیرد و همکاران):

$$P(d \leq d_i) = cd_i^{3-D_m} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن، $P(d \leq d_i)$: درصد جرمی تجمعی ذرات کوچک‌تر از d_i : حد بالایی اندازه ذرات در هر کلاس اندازه، D_m : بعد فراکتالی جرمی توزیع اندازه ذرات خاک و c : ضریب ثابت مقیاس مرکب است. با گرفتن لگاریتم از طرفین رابطه (۲)، معادله به‌صورت خطی در می‌آید:

$$\log P(d \leq d_i) = \log c + (3 - D_m) \log d_i \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این صورت، با رسم نمودار $\log p(d \leq d_i)$ در برابر $\log d_i$ شیب خط برازش داده‌شده برابر با $3 - D_m$ خواهد بود و بعد فراکتال به‌صورت زیر محاسبه شد:

$$D_m = 3 - \text{Slope} \quad \text{رابطه (۴)}$$

مدل تیلر و ویت‌کرفت (Tyler & Wheatcraft, 1992) با فرض ساختار فراکتالی ذرات خاک، رابطه‌ای بین جرم تجمعی ذرات و اندازه آن‌ها را ارائه می‌دهد. رابطه مورد استفاده به‌صورت زیر است (رابطه ۵):

$$\frac{M(< R_i)}{M_t} = \left(\frac{R_i}{R_{\max}} \right)^{3-D_m} \quad \text{رابطه (۵)}$$

با لگاریتم‌گیری، رابطه بالا به‌صورت زیر درمی‌آید:

$$\log \left[\frac{M(< R_i)}{M_t} \right] = (3 - D_m) \log \left(\frac{R_i}{R_{\max}} \right) \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$D_m = 3 - \text{Slope} \quad \text{رابطه (۷)}$$

که در آن، $M(< R_i)$: جرم تجمعی ذرات با قطر کمتر یا مساوی R_i ، M_t : جرم کل نمونه خاک، R_i : قطر ذره، $R_{\max}$: حداکثر قطر ذرات (۲ میلی‌متر). با رسم نمودار $\log \left[\frac{M(< R_i)}{M_t} \right]$ در مقابل $\log \left(\frac{R_i}{R_{\max}} \right)$ ، شیب خط برازش و از روی آن D_m تعیین می‌شود.

با توجه به‌اینکه مدل‌های تیلر و ویت‌کرفت (Tyler & Wheatcraft, 1992) و بیرد و همکاران (Bird et al., 2000)، هر یک جنبه متفاوتی از ساختار خاک را توصیف و تبیین می‌کنند در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفتند. مدل تیلر و ویت‌کرفت (Tyler & Wheatcraft, 1992) حساس به ذرات ریز و فرایندهای وابسته به مکش ماتریک و جذب موئینه‌ای است، درحالی‌که مدل بیرد و همکاران (Bird et al., 2000)، بیشتر بازتاب‌دهنده نقش ذرات درشت‌تر در خاک بوده و برای تحلیل جریان ترجیحی و ماکروپورها کاربرد دارد (Huang & Zhang 2005).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای بررسی ارتباط ویژگی‌های نفوذ آب به خاک و بعد فراکتال توزیع اندازه ذرات دو شیوه تحلیل داده استفاده شد: (۱) تجزیه واریانس برای بررسی تفاوت‌های معنادار آماری بین گروه‌های مختلف بعد فراکتال و شاخص‌های

نفوذ آب به خاک و مقایسه میانگین‌ها به‌روش آزمون توکی. ۲) تعیین همبستگی پیرسون برای ارزیابی رابطه خطی بین متغیرها. ضریب همبستگی (r) با استفاده از رابطه زیر به‌دست آمد (رابطه ۸):

$$r = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad \text{رابطه (۸)}$$

که در آن، r : ضریب همبستگی پیرسون، x : مقادیر اولین مجموعه داده‌ها، y : مقادیر دومین مجموعه داده‌ها و n : تعداد کل مقادیر یا اندازه نمونه است. تحلیل داده‌ها و ترسیم نمودار با استفاده از نرم‌افزارهای (XLSTAT, 2016) Excel و SPSS (2022) انجام شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک‌های مورد بررسی

نتایج حاصل از تحلیل آماری توزیع اندازه ذرات (اجزای شن، سیلت و رس) در نمونه‌های خاک مورد بررسی، نشان‌دهنده تنوع قابل‌توجه در ترکیب بافتی و پراکندگی نسبی داده‌ها در سطح منطقه مورد مطالعه است (جدول ۱). در بررسی اجزای شن، شن کل با دامنه تغییرات بسیار گسترده‌ای بین ۵/۹۰ تا ۸۲/۷۵ درصد، بیشترین تنوع را نشان داد. اجزای مختلف شن، از شن خیلی درشت (VCS) با میانگین ۵/۶۶ درصد تا شن خیلی ریز (VFS) با میانگین ۱۳/۱۳ درصد، توزیعی نسبتاً متمرکز در بازه‌های میانی داشتند. مقادیر میانگین شن ریز (FS) و شن متوسط (MS) به‌ترتیب ۱۰/۰۳ و ۷/۳۹ درصد بود. میانگین شن درشت (CS) ۶/۹۴ درصد بود، اما انحراف معیار داده‌های آن بالاتر بود که بیانگر پراکندگی بیشتر بود. در میان اجزای ریزدانه، رس با دامنه ۶/۴۳ تا ۴۵/۱۴ درصد و سیلت با دامنه ۶/۴۴ تا ۵۱/۲۸ درصد، هر دو توزیع‌هایی متقارن با پراکندگی نسبی بالا داشتند. میانگین رس برابر با ۲۴/۹۸ درصد و سیلت برابر با ۳۱/۸۷ درصد به‌دست آمد که تطابق آن‌ها با میانه بیانگر نبود چولگی در توزیع است.

میانگین سنگریزه کل در خاک‌ها (TRF) ۲۸/۳۳ درصد و انحراف معیار آن ۱۱/۴۷ درصد بود. رطوبت اولیه خاک (θ_i) که یکی از عوامل شناخته‌شده و مؤثر بر فرایند نفوذ آب به خاک، خصوصاً شدت نفوذ اولیه است (Hillel, 1998; Philip, 1957)، در دامنه ۴/۳۷ تا ۲۴/۷۱ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب تغییر داشت و میانگین آن نیز ۱۱/۳۷ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب بود. بر اساس نظریه نفوذ فیلپ، هرچه رطوبت اولیه خاک کمتر باشد مکش ماتریک افزایش یافته و سهم جذب موئینه‌ای در مراحل ابتدایی نفوذ بیشتر خواهد بود (Philip, 1957). مقادیر چگالی ظاهری از ۰/۸۳ در خاک‌های ناپایدار تا ۱/۵۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب متغیر بود (میانگین ۱/۰۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب)، که بیانگر تفاوت در وضعیت تخلخل خاک‌ها است. به‌طور کلی، توزیع آماری اجزای بافت خاک نشان‌دهنده ویژگی‌های پیچیده و متنوع فیزیکی خاک در کاربری‌های مختلف زمین در منطقه مورد مطالعه است.

جدول ۱- آماره‌های توصیفی برخی ویژگی‌های خاک.

Standard deviation	Mean	Minimum	Maximum	Soil variable
۹/۲۱	۳۱/۸۷	۶/۴۴	۵۱/۲۸	Silt (%)
۸/۴۲	۲۴/۹۸	۶/۴۳	۴۵/۱۴	Clay (%)
۱۵/۱۵	۴۳/۱۵	۵/۹۰	۸۲/۷۵	Sand (%)

۳/۴۵	۵/۶۶	۰/۰۸	۱۷/۰۷	VCS (%)
۴/۲۷	۶/۹۴	۰/۴۰	۲۲/۳۸	CS (%)
۳/۸۰	۷/۳۹	۰/۷۷	۱۹/۰۱	MS (%)
۳/۶۶	۱۰/۰۳	۱/۴۷	۱۸/۶۵	FS (%)
۴/۱۹	۱۳/۱۳	۱/۹۸	۲۵/۴۸	VFS (%)
۱۱/۴۷	۲۸/۳۳	۵/۰۹	۶۱/۲۹	TRF (%)
۴/۲۱	۱۱/۳۷	۴/۳۷	۲۴/۷۱	Θ_i (cm ³ /cm ³)
۰/۱۲	۱/۰۹	۰/۸۳	۱/۵۲	BD (g/cm ³)

VCS: Very Coarse Sand, CS: Coarse Sand, MS: Medium Sand, FS: Fine Sand, VFS: Very Fine Sand, TRF: Total Rock Fragment, Θ_i : Initial Moisture Content, BD: Bulk Density

ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و بعد فراکتال توزیع اندازه ذرات

بررسی داده‌های نفوذ اولیه آب به خاک (II) در نمونه‌های مورد مطالعه نشان‌دهنده تنوع قابل‌توجه در میزان نفوذپذیری اولیه است. مقدار حداکثر نفوذ اولیه برابر با ۴ سانتی‌متر و حداقل آن ۰/۱۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد (جدول ۲) که دامنه وسیعی از ویژگی‌های فیزیکی خاک را بازتاب می‌دهد. میانگین نفوذ اولیه برابر با ۰/۸۳ سانتی‌متر بوده و با توجه به انحراف معیار آن (۰/۷۳)، داده‌ها پراکندگی متوسطی در اطراف میانگین دارند. این ویژگی‌ها می‌تواند بیانگر تنوع گسترده‌ای در میزان نفوذپذیری خاک است و نمایانگر تفاوت‌های قابل‌توجه در توزیع اندازه ذرات اولیه، ساختمان، چگالی ظاهری، ماده آلی، توانایی جذب اولیه آب و سایر ویژگی‌های مؤثر خاک باشد (Hillel, 1998; Rawls et al., 2003; Brady & Weil, 2017). مقدار حداکثر نفوذ انباشته (CI) برابر با ۱۳۰/۴۰ سانتی‌متر و حداقل آن ۷/۹۵ سانتی‌متر بود. شدت نفوذ متوسط (MIR) نیز با میانگین ۲۴/۰۸ سانتی‌متر بر ساعت و انحراف معیار ۱۶/۸۷ دامنه قابل‌توجهی داشت (از ۵/۳۰ تا ۸۶/۹۳ سانتی‌متر بر ساعت). برای شدت نفوذ نهایی (FIR)، میانگین ۱۷/۳۶ سانتی‌متر بر ساعت، انحراف معیار ۱۱/۰۴ سانتی‌متر بر ساعت و دامنه ۳/۰۰ تا ۴۴/۴۰ سانتی‌متر بر ساعت ثبت شد.

بر اساس نتایج حاصل از محاسبه بعد فراکتال توزیع اندازه ذرات خاک با استفاده از مدل تیلر و ویت‌کرفت (Tyler & Wheatcraft, 1992)، مقدار بعد فراکتال در نمونه‌های مورد بررسی بین حداقل ۲/۳۵ تا حداکثر ۲/۸۷ متغیر بود (جدول ۲). میانگین بعد فراکتال برابر با ۲/۷۰ به‌دست آمد. نتایج محاسبه بعد فراکتال توزیع اندازه ذرات خاک با روش بیرد و همکاران (Bird et al., 2000) نیز نشان داد که مقدار بعد فراکتال در نمونه‌ها از ۲/۶۰ تا ۲/۸۹ تغییر می‌کند و میانگین آن ۲/۷۹ است. نتایج نشان داد که انحراف استاندارد بعد فراکتال در مدل تیلر و ویت‌کرفت (۰/۱) بیشتر از روش بیرد و همکاران (۰/۰۶) است، که حاکی از پراکندگی بالاتر و حساسیت بیشتر مدل تیلر و ویت‌کرفت (Tyler & Wheatcraft, 1992) نسبت به توزیع اندازه ذرات خاک است. مدل بیرد و همکاران (Bird et al., 2000) دارای پایداری و یکنواختی بیشتر در تخمین بعد فراکتال است، درحالی‌که مدل تیلر و ویت‌کرفت (Tyler & Wheatcraft, 1992) نوسانات بیشتری داشت. این تفاوت می‌تواند ناشی از تفاوت در فرضیات مدل یا حساسیت به توزیع ذرات غیرهمگن باشد. میانگین ضریب تعیین برازش خطی لگاریتمی داده‌های توزیع اندازه ذرات (۶۸ نمونه) با رسم نمودار $\log p$ ($d \leq d_i$) در برابر $\log d_i$ برای مدل بیرد و همکاران (Bird et al., 2000) و رسم نمودار $\log M$ ($< R_i$) - $\log M_i$ در برابر $\log R_i - \log R_{max}$ برای مدل تیلر و ویت‌کرفت (Tyler & Wheatcraft, 1992) به‌ترتیب برابر ۰/۹۱ و ۰/۹۳ بود که حاکی از برازش مناسب داده‌ها است.

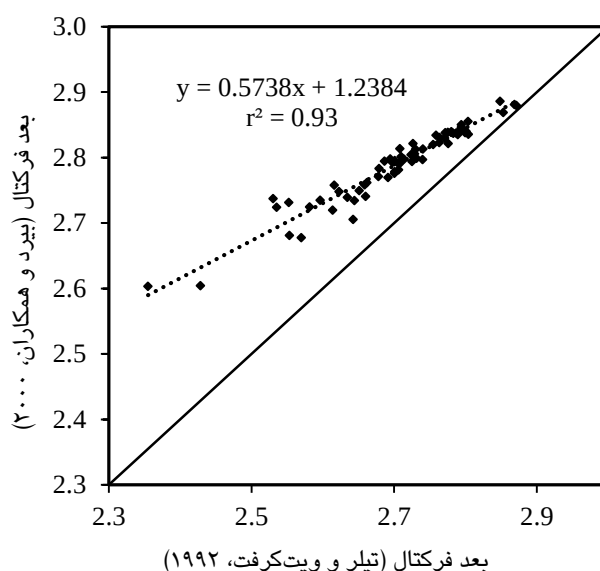
جدول ۲- آماره‌های توصیفی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و بعد فراکتال (n=68).

Variable	CI (cm)	II (cm)	MIR (cmh ⁻¹)	FIR (cmh ⁻¹)	D _m (Bird et al., 2000)	R ² (Bird et al., 2000)	D _m (Tyler and Wheatcraft, 1992)	R ² (Tyler and Wheatcraft, 1992)
Maximum	۱۳۰/۴۰	۴/۰۰	۸۶/۹۳	۴۴/۴۰	۲/۸۹	۰/۹۹	۲/۸۷	۰/۹۹
Minimum	۷/۹۵	۰/۱۰	۵/۳۰	۳/۰۰	۲/۶۰	۰/۹۱	۲/۳۵	۰/۷۶
Mean	۳۶/۲۱	۰/۸۳	۲۴/۰۸	۱۷/۳۶	۲/۷۹	۰/۹۱	۲/۷۰	۰/۹۳
Standard deviation	۲۵/۲۹	۰/۷۳	۱۶/۸۷	۱۱/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۱	۰/۰۵

II: Initial Infiltration, CI: Cumulative Infiltration, MIR: Mean Infiltration, FIR: Final Infiltration Rate.

ارتباط بعد فراکتال روش بیرد و همکاران (۲۰۰۰) و روش تیلر و ویت‌کرفت (۱۹۹۲)

ارزیابی ارتباط بعد فراکتال ذرات خاک بین دو روش بیرد و همکاران (Bird et al., 2000) و تیلر و ویت‌کرفت (Tyler & Wheatcraft, 1992) نشان داد که بین مقادیر حاصل از این دو روش ضریب تعیین قوی وجود دارد ($r^2 = 0.93$). همچنین، توزیع نقاط در اطراف خط رگرسیون نسبتاً متراکم و یکنواخت بود. به‌طور کلی، بعد فراکتال PSD بدست آمده با مدل بیرد و همکاران (Bird et al., 2000) نسبت به مقادیر متناظر در مدل تیلر و ویت‌کرفت (Tyler & Wheatcraft, 1992) بیش‌برآورد داشت. بااین‌حال، این بیش‌برآوردی در مقادیر کم بعد فراکتال توزیع اندازه ذرات چشم‌گیر بود (شکل ۲). این نتایج می‌تواند به‌این دلیل باشد که بعد فراکتالی PSD در مدل بیرد و همکاران (Bird et al., 2000) نسبت به تبیین نقش ذرات درشت خاک عملکرد بهتری دارد (Huang & Zhang 2005). مدل تیلر و ویت‌کرفت (Tyler & Wheatcraft, 1992) نیز عمدتاً بیانگر سهم ذرات ریز در مقیاس‌های کوچک‌تر است و حساسیت بالاتری نسبت به فرایندهای وابسته به مکش ماتریک و جذب موئینه‌ای دارد (Deng et al., Perfect & Kay, 1995; 2018).



شکل ۲- مقایسه بعد فراکتال توزیع اندازه ذرات مدل‌های Tyler & Wheatcraft (1992) و Bird et al. (2000).

تغییرات شاخص‌های نفوذ با بعد فراکتال

نتایج آزمون همبستگی پیرسون نشان داد که بین بعد فراکتالی توزیع اندازه ذرات خاک و شاخص‌های مختلف نفوذ آب، همبستگی معنادار وجود ندارد (جدول ۳). برای تحلیل واریانس، بعد فراکتال توزیع اندازه ذرات به سه بازه کمتر از ۲/۷، بین ۲/۷ تا ۲/۸، و بیشتر از ۲/۸ دسته‌بندی شد. نتایج آزمون تحلیل واریانس با آزمون حداقل تفاوت معنادار توکی حاکی از آن بود که تفاوت شاخص‌های نفوذ آب بین گروه‌های مختلف بعد فراکتال از نظر آماری (در سطح احتمال ۹۵ درصد) معنادار نیست (شکل ۳). با این حال، بررسی مقادیر میانگین شاخص‌های نفوذ در گروه‌های مختلف بعد فراکتال (کمتر از ۲/۷، ۲/۷ - ۲/۸ و بیشتر از ۲/۸) نشان داد که در شاخص‌های نفوذ، تغییرات نسبتاً منظم افزایشی یا کاهش‌ی با افزایش بعد فراکتال وجود داشت. در این گروه‌ها برای شاخص‌های نفوذ انباشته و اولیه، بعد فراکتال روند کاهش‌ی داشت.

با این حال، میانگین مقادیر نفوذ انباشته در گروه‌های متناظر بعد فراکتالی PSD در روش بیرد و همکاران (Bird et al., 2000) بیشتر از روش تیلر و ویت‌کرفت (Tyler & Wheatcraft, 1992) بود. این رفتار را می‌توان از دیدگاه ساختار خاک و تأثیر ریزدانه‌ها بر فرایند نفوذ تبیین کرد. این نتایج در راستای مطالعات پیشین نیز قرار می‌گیرد که گزارش کرده‌اند بعد بالای فراکتال PSD می‌تواند با کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت خاک در برابر عبور آب مرتبط باشد؛ برای مثال یو و چنگ (Yu & Cheng, 2002) نشان دادند که بعد فراکتال بالاتر بیانگر ساختار متراکم‌تر خاک است که موجب کاهش نفوذ می‌شود. هرچند این یافته رابطه علت و معلولی نیست، بلکه می‌تواند به علت وابستگی و همسویی با توزیع اندازه ذرات باشد. با این وجود بعد فراکتالی صرفاً می‌تواند بخشی از تغییرپذیری نفوذ آب به خاک را توضیح دهد و تفسیر آن باید در کنار سایر شاخص‌های خاک انجام شود. در نتیجه بعد فراکتالی را باید به عنوان یک شاخص توصیفی مکمل در نظر گرفت که به تنهایی نمی‌تواند به عنوان ابزاری مستقل برای تبیین کامل رفتار نفوذ آب در خاک باشد.

در روش بیرد و همکاران (Bird et al., 2000) با افزایش بعد فراکتال نفوذ اولیه افزایش یافته و از ۰/۷۳ سانتی‌متر (در بازه $D_m > 2/7$) به ۰/۹۰ سانتی‌متر (در بازه $D_m < 2/8$) رسیده است (شکل ۳). مطالعات متعددی این روند را تأیید کرده‌اند؛ به عنوان مثال، یو و چنگ (Yu & Cheng, 2002) نشان دادند که خاک‌هایی با بعد فراکتال بیشتر تمایل بیشتری به افزایش سرعت اولیه نفوذ داشتند، چرا که این خاک‌ها می‌توانند به دلیل غالب بودن ذرات ریزتر و افزایش سطح ویژه، ظرفیت نگهداشت آب بیشتری داشته و نفوذ اولیه در آن‌ها بیشتر باشد. در مقابل، در روش تیلر و ویت‌کرفت (Tyler & Wheatcraft, 1992) روند تغییرات نفوذ اولیه با بعد فراکتالی منظم نبود. در بازه $D_m < 2/7$ مقدار نفوذ اولیه ۰/۷۵ سانتی‌متر، در بازه $D_m = 2.7-2.8$ برابر با ۰/۸۹ سانتی‌متر، و در بازه $D_m > 2/8$ اندکی کاهش یافت و به ۰/۸۶ سانتی‌متر رسید. این رفتار غیریک‌دست در روش تیلر و ویت‌کرفت (Tyler & Wheatcraft, 1992) ممکن است به دلیل حساسیت بیشتر این روش به تغییر درصد ذرات ریز (به ویژه ذرات رس) نسبت به روش بیرد و همکاران (Bird et al., 2000) باشد (Mohammad Mahdi & Dahmardeh Ghaleno, 2020). با این وجود تحلیل شاخص‌های نفوذ و تغییرات آن صرفاً بر مبنای تغییرات بعد فراکتال PSD منطقی نبوده و نیاز به بررسی هم‌زمان عوامل مختلف مؤثر در فرایند نفوذ دارد.

نتایج پژوهش حاضر نشان داد در روش بیرد و همکاران (Bird et al., 2000)، با افزایش بعد فراکتال، شدت نفوذ نهایی در بازه‌ای بین ۲۰/۸۳ تا ۱۶/۰۸ سانتی‌متر بر ساعت تغییر یافت. همچنین شدت نفوذ متوسط وابستگی مشخصی به سطوح بعد فراکتال نشان داد؛ به طوری که در مقادیر کمتر از ۲/۷ میلی‌متر مقدار آن برابر با ۱۸/۲۴ سانتی‌متر بر ساعت؛ در بازه ۲/۷ تا ۲/۸ میلی‌متر برابر با ۱۸/۰۵ سانتی‌متر بر ساعت بود و در مقادیر بزرگ‌تر از

۲/۸ به ۱۶/۰۸ سانتی‌متر بر ساعت کاهش داشت. همچنین در روش تیلر و ویت‌کرفت (Tyler & Wheatcraft, 1992)، این ویژگی در مقادیر کمتر از ۲/۷ میلی‌متر برابر با ۱۷/۷۶ سانتی‌متر بر ساعت، در بازه ۲/۷ تا ۲/۸ میلی‌متر برابر با ۱۶/۹۷ سانتی‌متر بر ساعت بود و در مقادیر بیش از ۲/۸ میلی‌متر به ۱۶/۶۵ سانتی‌متر بر ساعت کاهش پیدا کرد. شدت نفوذ نهایی نیز در این روش در سطوح مختلف بعد فراکتال تغییرپذیر بود، به‌طوری‌که برای مقادیر کمتر از ۲/۷ میلی‌متر مقدار ۱۷/۷۶ سانتی‌متر بر ساعت در بازه ۲/۷ تا ۲/۸ میلی‌متر میانگین ۱۶/۹۷ سانتی‌متر بر ساعت و در مقادیر بالاتر از ۲/۸ میلی‌متر مقدار ۱۸/۹۰ سانتی‌متر بر ساعت به‌دست آمد.

به‌طور کلی، عدم وجود روابط معنادار آماری بین شاخص‌های نفوذ آب و بعد فراکتالی توزیع اندازه ذرات اولیه را می‌توان به ماهیت پیچیده، چندعاملی و غیرخطی فرایند نفوذ آب در خاک نسبت داد. در پژوهش اخیر که به‌وسیله چن و همکاران (Chen et al., 2023) انجام شده است نیز این یافته را تأیید می‌کنند. این پژوهشگران ابراز داشتند رابطه بین شاخص‌های نفوذ آب و بعد فراکتال PSD اغلب غیرخطی بوده و همبستگی خطی ضعیف یا غیرمعناداری بین شاخص‌های نفوذ و بعد فراکتال وجود دارد. در چنین شرایطی، این ویژگی می‌تواند به‌عنوان یک متغیر تبیینی مکمل در مدل‌های چندمتغیره یا روش‌های پیشرفته مدل‌سازی مورد استفاده قرار گیرد.

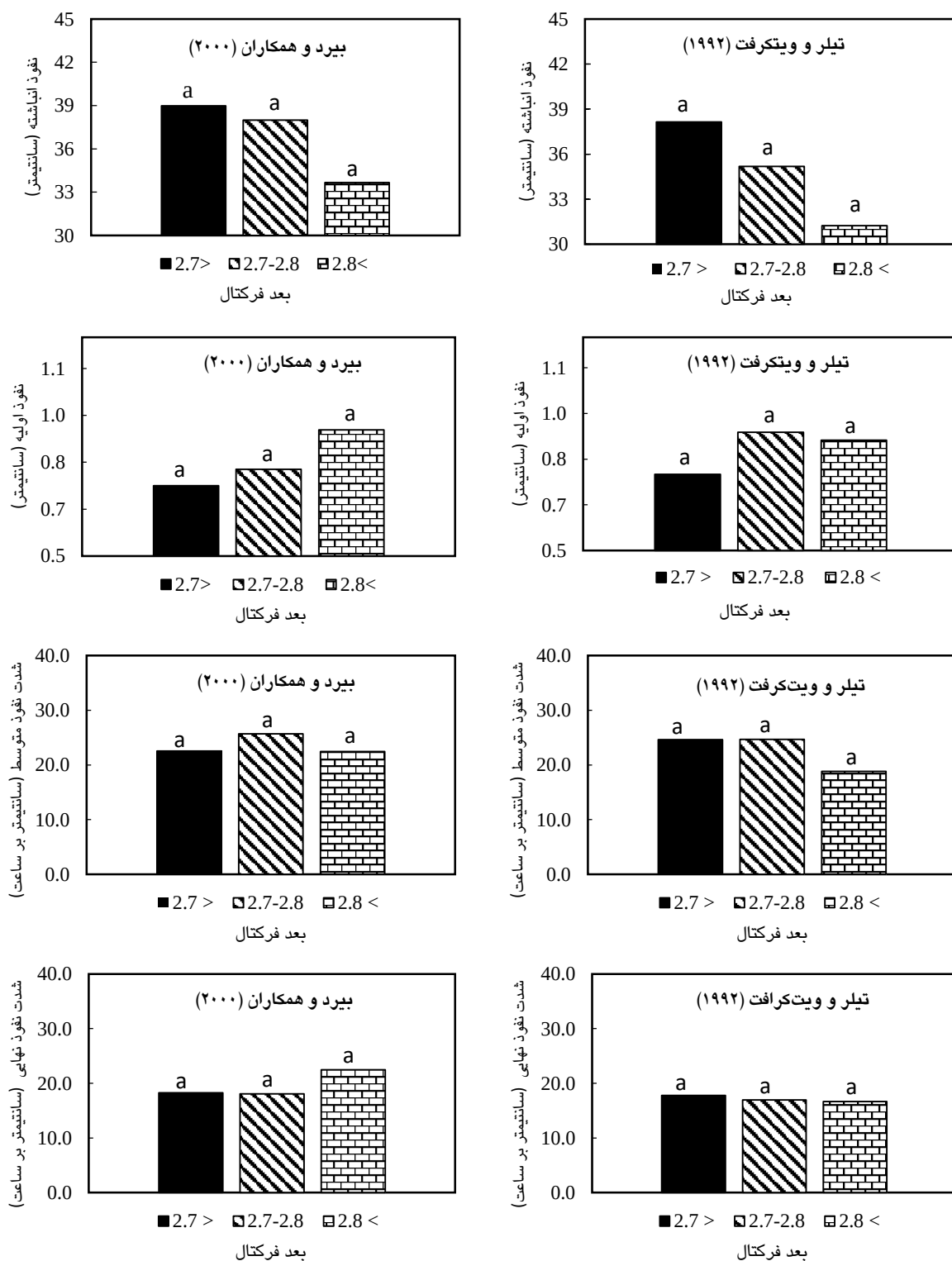
به‌طور کلی، نتایج این پژوهش حاکی از آن است که ارتباط بین شاخص‌های نفوذ آب و بعد فراکتال توزیع اندازه ذرات به‌صورت مستقیم و ساده نیست. نفوذ آب به خاک فرایندی بسیار پیچیده و وابسته به برهم‌کنش هم‌زمان عوامل مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک است که هیچ شاخص منفردی به‌تنهایی قادر به تبیین کامل تغییرپذیری نفوذ نیست (Beven & Germann, 2013; Jarvis, 2020). لذا تنها با شاخص بعد فراکتالی نمی‌توان تغییرات نفوذ در خاک و یا تفاوت در نفوذ بین خاک‌ها را تجزیه و تحلیل کرد.

جدول ۳- ماتریس همبستگی ویژگی‌های خاک (n=68).

TRF	BD	Θ_i	D_{mT}	D_{mB}	MIR	FIR	II	CI	Variable
								۱/۰۰	CI
							۱/۰۰	۰/۷۹**	II
						۱/۰۰	۰/۶۰**	۰/۸۷**	FIR
					۱/۰۰	۰/۸۷**	۰/۷۹**	۱/۰۰**	MIR
			۱/۰۰	۰/۹۷	-۰/۰۳	-۰/۰۲	۰/۰۹	-۰/۰۴	D_{mB}
			۱/۰۰	۰/۹۷	-۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۱۱	-۰/۰۳	D_{mT}
		۱/۰۰	۰/۳۰	۰/۲۸	-۰/۰۲	-۰/۰۵	۰/۰۱	-۰/۰۲	Θ_i
	۱/۰۰	-۰/۳۴**	-۰/۴۴**	-۰/۳۵**	-۰/۴۷**	-۰/۴۲**	-۰/۳۷**	-۰/۴۵**	BD
۱/۰۰	۰/۱۲	-۰/۰۸	-۰/۲۸*	-۰/۲۹*	۰/۱۹	۰/۱۲	۰/۱۸	۰/۲۰	TRF

CI: Cumulative infiltration, II: Initial infiltration, FIR: Final infiltration rate, MIR: Mean infiltration, D_{mB} : Fractal dimension (Bird et al, 2000), D_{mT} : (Tyler and Wheatcraft, 1992), Θ_i : Initial moisture content, BD: Bulk density, TRF: Total rock fragment.

** : معنادار در سطح احتمال ۰/۰۱، * : معنادار در سطح احتمال ۰/۰۵



شکل ۳- مقایسه میانگین‌های نفوذ اولیه (۳۰ ثانیه)، نفوذ انباشته (۹۰ دقیقه)، شدت نفوذ متوسط و نهایی بین سه گروه از خاک‌ها با سه دامنه بعد فراکتالی. حروف لاتین متفاوت روی ستون‌ها نشان‌دهنده معناداری با آزمون توکی در سطح احتمال ۹۵ درصد است.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج کلی پژوهش نشان داد که بین بعد فراکتالی توزیع اندازه ذرات و شاخص‌های مختلف نفوذ آب در خاک همبستگی معناداری وجود نداشت. نتایج تحلیل واریانس نیز بیانگر آن بود که تغییرات شاخص‌های نفوذ آب در سطوح مختلف بعد فراکتال از نظر آماری معنادار نبود. با این حال، بررسی مقادیر میانگین شاخص‌های نفوذ نشان داد که در برخی موارد تغییراتی نسبتاً منظم و رونددار با افزایش بعد فراکتال مشاهده گردید. مقایسه روش‌های محاسبه بعد فراکتال نیز نشان داد که مدل بیرد و همکاران (Bird et al., 1992) نسبت به مدل تیلر و ویت‌کرفت (Tyler & Wheatcraft, 1992) مقادیر متناظر بعد فراکتال توزیع اندازه ذرات را بیش‌برآوردی داشت و این تفاوت به‌ویژه در مقادیر کم بعد فراکتال بارزتر بود. به‌طور کلی، عدم وجود همبستگی معنادار بین شاخص‌های نفوذ آب و بعد فراکتالی توزیع اندازه ذرات اولیه را می‌توان به ماهیت پیچیده، چندعاملی و غیرخطی فرایند نفوذ آب در خاک نسبت داد. نفوذ آب حاصل برهم‌کنش هم‌زمان ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک است. بنابراین، بعد فراکتال توزیع اندازه ذرات به‌عنوان یک شاخص منفرد توان تبیین کامل تغییرات نفوذ آب یا تفاوت‌های نفوذ بین خاک‌ها را ندارد.

پیشنهادها

بر اساس محدودیت‌ها و یافته‌های این پژوهش، چند مسیر مطالعاتی برای تکمیل تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود: نخست استفاده از تحلیل مسیر^۱ و مدل معادلات ساختاری برای بررسی ارتباط توزیع اندازه ذرات اولیه و بعد فراکتال به‌همراه سایر ویژگی‌های مؤثر در فرایند نفوذ آب در خاک با شاخص‌های نفوذ است. در گام دوم مطالعه اثر افق‌های خاک بر شاخص‌های نفوذ آب است. ویژگی‌های نیم‌رخ خاک می‌تواند اطلاعات بهتری از رابطه بعد فراکتال توزیع اندازه ذرات با وضعیت نیم‌رخ خاک را در اختیار بگذارد.

منابع مورد استفاده

References

- Ahmadi, A., Neyshabouri, M.R., & Asadi, H. (2011). Relationship between fractal dimension of particle size distribution and some physical properties of soils. *Water and Soil Science*, 20(4), 73-81. (in Persian with English abstract).
- ASTM (2009). D3385-09, *Standard test method for infiltration rate of soils in field using double-ring infiltrometer*. ASTM International, West Conshohocken, PA. <https://doi.org/10.1520/D3385-18>
- Bai, Y., Qin, Y., Lu, X., Zhang, J., Chen, G., & Li, X. (2020). Fractal dimension of particle-size distribution and their relationships with alkalinity properties of soils in the western Songnen Plain, China. *Scientific Reports*, 10(1), 20603. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77676-w>
- 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>
- Bird, N. R. A., Perrier, E., & Rieu, M. (2000). The water retention function for a model of soil structure with pore and solid fractal distributions. *European Journal of Soil Science*, 51(1) 55-63. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2000.00278.x>
- 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>

^۱-Path analysis

- 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>
- Chen, K., Wang, C., & Liang, F. (2023). Fractal-based hydraulic model of unsaturated flow in deformable soils considering the evolution of pore size distribution. *Journal of Hydrology*, 620 (Part B), 129501. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129501>
- 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/10.1201/9781420005271>
- Deng, J., Ma, C., & Yu, H. (2018). Different soil particle-size classification systems for calculating volume fractal dimension-a case study of *Pinus sylvestris* var. *Mongolica* in Mu Us Sandy Land, China. *Applied Sciences*, 8(10), 1872. <https://doi.org/10.3390/app8101872>
- Elrick, D. E., & Reynolds, W. D. (2002). Measuring water transmission parameters in vadose zone using ponded infiltration techniques. *Journal of Agricultural and Marine Sciences*, 7(2), 17-22. <https://doi.org/10.24200/jams.vol7iss2pp17-22>
- Filgueira, R. R., Fournier, L. L., Cerisola, C. I., Gelati, P., & García, M. G. (2006). Particle-size distribution in soils: A critical study of the fractal model validation. *Geoderma*, 134(3-4), 327-334. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.03.008>
- Gee, G.W. & Bauder J.W. (1986). Particle size analysis. In: *Methods of soil analysis: Part 1. Physical and mineralogical methods*, 5.1, Second Edition, SSSA Book Series 9, Madison, Wisconsin, USA. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>
- Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics*. Academic Press. San Diego, CA, USA.
- Huang GuanHua, H. G., & Zhan WeiHua, Z. W. (2002). Fractal property of soil particle size distribution and its application. *Acta Pedologica Sinica*, 39(4), 490-497.
- Huang, G., & Zhang, R. (2005). Evaluation of soil water retention curve with the pore-solid fractal model. *Geoderma*, 127(1-2), 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.11.016>
- 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/ejss.12973>
- Jing, S. U., & Shanguan, Z. P. (2006). A fractal method of estimating soil structure changes under different vegetations on Ziuling Mountains of the Loess Plateau, China. *Agricultural Sciences in China*, 5(7), 530-538. [https://doi.org/10.1016/S1671-2927\(06\)60088-6](https://doi.org/10.1016/S1671-2927(06)60088-6)
- Jury, W. A., & Horton, R. (2004). *Soil physics*. John Wiley & Sons, USA, 384 pages.
- Khoshraftar, R. (2009). Geotourism in Zanzan Province. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 18(72), 97-102. <https://doi.org/10.22071/gsj.2010.57147>
- Kravchenko, A., & Zhang, R. (1998). Estimating the soil water retention from particle-size distributions: a fractal approach. *Soil Science*, 163(3), 171-179. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.34661>
- Mandelbrot, B.B (1967). How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, 156(3775), 636-638. <https://doi.org/10.1126/science.156.3775.636>
- Mandelbrot, B.B. (1983). *The Fractal Geometry of Nature*. W.H. Freeman, San Francisco, USA, 460p.
- Mohammad Mahdi, C., & Dahmardeh Ghaleno, M. R. (2020). Evaluating fractal dimension of the soil particle size distributions and soil water retention curve obtained from soil texture components. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(12), 1668-1678.(in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1686140>
- Omidvar, E. (2021). Fractal analysis of the infiltration curve and soil particle size in a semi-humid watershed. *European Journal of Soil Science*, 72(3), 1373-1394. <https://doi.org/10.1111/ejss.13054>
- Perfect, E., & Kay, B. D. (1995). Applications of fractals in soil and tillage research: a review. *Soil and Tillage Research*, 36(1-2), 1-20. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(96\)81397-3](https://doi.org/10.1016/0167-1987(96)81397-3)
- Philip, J. R. (1957). The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. *Soil science*, 83(5), 345-358.
- Pirmoradian, N., Sepaskhah, A. R., & Hajabbasi, M. A. (2005). Application of fractal theory to quantify soil aggregate stability as influenced by tillage treatments. *Biosystems Engineering*, 90(2), 227-234. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.11.002>

- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., & Logsdon, S. D. (1993). Predicting saturated hydraulic conductivity utilizing fractal principles. *Soil Science Society of America Journal*, 57(5), 1193-1197.
- Rawls, W. J., Pachepsky, Y. A., Ritchie, J. C., Sobecki, T. M., & Bloodworth, H. (2003). Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma*, 116(1-2), 61-76.
[https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00094-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00094-6)
- Sepaskhah, A. R., & Tafteh, A. (2013). Pedotransfer function for estimation of soil-specific surface area using soil fractal dimension of improved particle-size distribution. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 59(1), 93-103. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.1080/03650340.2011.602632>
- 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. [doi:10.1016/j.still.2004.03.008](https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008)
- Tyler, S. W., & Wheatcraft, S. W. (1992). Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations. *Soil Science Society of America Journal*, 56(2), 362-369.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600020005x>
- Verheye, W. (2009). Soils of arid and semi-arid areas. *Land Use, Land Cover and Soil Sciences*, 7, 67-95.
- Xu, Y.F., & Sun, D. A. (2002). A fractal model for soil pores and its application to determination of water permeability. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 316(1-4), 56-64.
[https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(02\)01331-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(02)01331-6)
- 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>
- Yu, B., & Cheng, P. (2002). A fractal permeability model for bi-dispersed porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(14), 2983-2993. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(02\)00014-5](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(02)00014-5)
- Zolfaghari, A. A., & Hajabbasi, M. A. (2008). Effect of different land use treatments on soil structural quality and relations with fractal dimensions. *International Journal of Soil Science*, 3(2), 101-108. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.3923/ijss.2008.101.108>