

# Evaluation of Some Empirical and Semi-Empirical Equations for Soil Water Infiltration in Various Soil Texture Groups in a Semi-Arid Region

## Abstract

Water infiltration into soil is one of the key processes in the hydrological cycle and plays a decisive role in water resources management and runoff control. The objective of this study was to evaluate the performance of several empirical and semi-empirical infiltration equations in various soil texture groups (coarse, medium, and fine) of a semi-arid region in Zanjan Province. For this purpose, field infiltration experiments were conducted at 68 locations using the double-ring infiltrometer method. After soil sampling, selected soil properties were measured. The measured infiltration data were fitted using four empirical models (Kostiakov, Kostiakov–Lewis, SCS, and Sihag) and two semi-empirical models (Horton and Mishra–Singh). Model performance was evaluated using the coefficient of determination ( $R^2$ ), root mean square error (RMSE), mean absolute deviation (MAD), and mean absolute percentage error (MAPE). The results indicated that the Kostiakov–Lewis model exhibited the best overall performance for all three texture classes, particularly in fine-textured soils ( $R^2=0.999$ , MAPE=3.05%). The Kostiakov model also showed highly accurate and stable performance, especially in coarse-textured soils ( $R^2=0.999$ , MAPE=6.38%) and fine-textured soils ( $R^2=0.999$ , MAPE=7.01%). In contrast, the Sihag model demonstrated the weakest performance. The semi-empirical Horton and Mishra–Singh models showed moderate performance. Overall, the findings of this study indicate that simpler empirical models, due to their straightforward mathematical structure and lower dependency on parameters, provided higher accuracy and were the most suitable models for simulating water infiltration in the semi-arid regions of the study area.

**Keywords:** *Double-ring, Infiltration modeling, Infiltration rate, Soil permeability, Soil texture.*

پایان نامه

## EXTENDED ABSTRACT

### Background and purpose:

Water infiltration into soil, as a key process in the hydrological cycle, plays a vital role in water resources management, irrigation system design, flood prediction, and environmental conservation (Smith, 2002). Infiltration is the process by which water moves from the soil surface into the soil profile under the influence of gravitational forces (Klein & Klein, 2014). This process provides temporary water storage and facilitates its uptake by plants and soil organisms (USDOA, 2019). It is one of the best indicators of soil physical conditions and structural stability (Pinheiro, 2009). With regarding to the role of infiltration rate in surface and subsurface hydrology as well as irrigation, it has been extensively studied for more than two centuries (Milla & Kish, 2006; Ghorbani et al., 2009). In this context, modeling soil water infiltration plays a key role in water resources management, irrigation system design, and hydrological cycle prediction (Hillel, 1998). Accurate assessment of this soil physical property is essential for effective watershed management, runoff mitigation, and improved water use efficiency in agricultural lands (Vishwakarma et al., 2025). Under such conditions, a precise and comparative evaluation of infiltration models using field data from semi-arid regions of Iran is of both scientific and management significance. Therefore, the main objective of this study is to assess the accuracy of empirical models consist of Kostiakov, Kostiakov–Lewis, SCS, and Horton along with two semi-empirical models including Mishra–Singh and Sihagh, in semi-arid regions of Iran using the measured field data.

### Materials and methods:

This study was conducted in Zanjan province located from 35°35' to 37°15' N latitude and 45°25' to 47°15' E longitude. To investigate water infiltration rate and the physical–chemical properties of soils, 68 sampling sites were selected through field surveys based on criteria including land use, vegetation cover, soil texture, and available soil survey maps, in order to represent the dominant variability of soils in the area. Disturbed soil samples were collected from the 0–60 cm depth, and undisturbed samples were taken from the 0–20 cm depth using standard core cylinders. Disturbed samples were used to determine soil particle size distribution, electrical conductivity (EC), pH, organic matter content, and equivalent calcium carbonate, whereas undisturbed samples were used to measure bulk density in the laboratory. Particle size distribution was determined according to the USDA classification system, using dry sieving for particles larger than 0.05 mm and the hydrometer method described by Yavari et al. (2021) for finer particles (silt and clay). Based on the USDA textural classification, soils were grouped into three textural classes: coarse-textured (sandy loam and loamy sand), medium-textured (clay loam, loam, sandy clay loam and silt loam), and fine-textured soils (clay, silty clay and silty clay loam). Water infiltration experiments were carried out at each sampling site using the double-ring infiltrometer method (30 cm and 60-cm in diameters) in accordance with ASTM D3385. The infiltrated depth of water was recorded at specified time intervals until the infiltration rate approached a steady state, and the data were used to calculate cumulative infiltration, initial infiltration rate, and final infiltration rate. The measured infiltration data were fitted to four empirical models (Kostiakov, Kostiakov–Lewis, Soil Conservation Service, and Sayehag et al.) and two semi-empirical models (Horton and Mishra–Singh). Model parameters were estimated using the Solver tool in Excel by minimizing the

sum of squared errors. Model performance was evaluated using the coefficient of determination ( $R^2$ ), root mean square error (RMSE), mean absolute deviation (MAD), and mean absolute percentage error (MAPE). Statistical analyses and graphical representations were performed using SPSS and Excell software, respectively.

### **Results:**

The results of indicated that, across all three soil textural groups, simple empirical models—particularly the Kostiakov–Lewis and Kostiakov models appeared the most accurate, stable, and reliable performance in simulating water infiltration rate in the soils. In coarse-textured soils, the Kostiakov–Lewis model exhibited the best fit to observed data ( $R^2 = 0.999$ , RMSE = 0.38, MAPE = 5.07%, MAD = 0.31), while the Kostiakov model also accurately reproduced the actual infiltration trend even under conditions of high permeability and initial infiltration times ( $R^2 = 0.999$ , RMSE = 0.42, MAPE = 6.38%, MAD = 0.34). In contrast, more complex and semi-empirical models showed weaker performance. In medium-textured soils, the overall performance patterns of the models were similar to those in coarse-textured soils. Nevertheless, the magnitude of errors slightly increased which was attributed to the greater complexity of pore distribution and structural heterogeneity in these soils. However, the Kostiakov–Lewis model still provided the most accurate estimates in these soils ( $R^2 = 0.999$ , RMSE = 0.46, MAPE = 6.68%, MAD = 0.38) which is associated with the role of the final infiltration rate in improving the simulation of the infiltration process. In fine-textured soils, the Kostiakov–Lewis model ( $R^2 = 0.999$ , RMSE = 0.23, MAPE = 3.05%, MAD = 0.17) and, subsequently, the Kostiakov model with minimal error and the higher accuracy successfully simulated the infiltration rate process and the transition from initial to steady-state condition. Despite the SCS and Sayehag models showed relatively acceptable coefficients of determination,  $R^2$ , exhibited the higher errors across all textural groups, particularly in fine-textured soils. This result indicates the limitations of these models for various field locations and sensitivity to assumptions and empirical coefficients. The semi-empirical models of Horton and Mishra–Singh demonstrated intermediate performance and in consequence they did not provide sufficient accuracy for quantitative prediction of infiltration.

### **Conclusion:**

The study showed that simple empirical models, especially Kostiakov–Lewis appeared the most accurate, stable, and reliable simulation of water infiltration across all soil textural groups. The Kostiakov model also performed well, even in the soils with higher permeability and at initial infiltration times. In contrast, the semi-empirical models such as Horton, SCS, and Sihagh exhibited higher errors and unstable performance due to more sensitivity of models coefficient to soil variables. The Mishra–Singh model offered intermediate performance, serving as a middle-ground option. Slightly higher errors in medium-textured soils were attributed to greater heterogeneity of soil pores. Overall, the simplicity and statistical stability of Kostiakov–Lewis make it as a practical and reliable tool for simulating infiltration process in semi-arid soils.

### **Author Contributions:**

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

**Data Availability:**

Data will be made available from the authors on reasonable request

**Acknowledgements:**

The authors extend their sincere appreciation to the esteemed reviewers for their insightful comments and constructive suggestions, which greatly contributed to the scientific rigor and overall quality of this manuscript.

**Ethical considerations:**

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

**Conflict of interest:**

The author declares no conflict of interest.

ویراستاری نشده

# ارزیابی برخی معادلات تجربی و نیمه تجربی نفوذ آب به خاک در گروه‌های مختلف بافتی در منطقه نیمه خشک

## چکیده

نفوذ آب به خاک یکی از فرآیندهای کلیدی در چرخه هیدرولوژیکی بوده و نقش تعیین کننده‌ای در مدیریت منابع آب و مهار رواناب دارد. هدف این پژوهش ارزیابی کارایی برخی معادلات تجربی و نیمه تجربی نفوذ آب در گروه‌های مختلف بافت خاک (درشت، متوسط و ریز) در منطقه نیمه خشک در استان زنجان بود. بدین منظور، آزمایش صحرایی نفوذ در ۶۸ نقطه با استفاده از روش حلقه دوگانه انجام شد. پس از انجام نمونه برداری، برخی ویژگی‌های خاک‌ها اندازه‌گیری شدند. داده‌های نفوذ اندازه‌گیری شده با چهار مدل تجربی (کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوئیس، SCS و سایهاگ) و دو مدل نیمه تجربی (هورتون و میشر-سینگ) برازش داده شدند. ارزیابی عملکرد مدل‌ها با استفاده از شاخص‌های آماری ضریب تعیین ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین انحراف مطلق (MAD) و میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) انجام گرفت. نتایج نشان داد مدل کوستیاکوف-لوئیس در هر سه گروه بافتی و به ویژه در خاک‌های ریزبافت ( $R^2 = 0.999$ , MAPE = 3.05%, MAD = 0.17, RMSE = 23) بهترین عملکرد را داشت. مدل کوستیاکوف نیز عملکردی بسیار دقیق و پایدار به ویژه در خاک‌های درشت بافت ( $R^2 = 0.999$ , MAPE = 6.38%, MAD = 0.34, RMSE = 0.42) و ریزبافت داشت ( $R^2 = 0.999$ , MAPE = 7.01%, MAD = 0.27, RMSE = 0.34) داشت و در مقابل مدل سایهاگ ضعیف‌ترین عملکرد را نشان داد. مدل‌های نیمه تجربی هورتون و میشر-سینگ نیز عملکرد بیابینی داشتند. به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که مدل‌های تجربی ساده‌تر، به دلیل ساختار ریاضی ساده و وابستگی کمتر به ضرایب از دقت بالاتری برخوردار بودند و مناسب‌ترین مدل‌ها برای شبیه‌سازی نفوذ آب در خاک‌های منطقه نیمه خشک مورد مطالعه هستند.

کلیدواژه‌ها: بافت خاک، حلقه دوگانه، شدت نفوذ، مدل‌سازی نفوذ، نفوذپذیری خاک.

دریافت شده

نفوذ آب به خاک به عنوان یکی از فرآیندهای کلیدی در چرخه هیدرولوژی، نقش حیاتی در مدیریت منابع آب، طراحی سیستم‌های آبیاری، پیش‌بینی سیلاب و حفظ محیط‌زیست ایفا می‌کند (Smith, 2002). نفوذ فرآیند ورود آب از سطح به عمق خاک است که تحت تأثیر نیروی جاذبه قرار می‌گیرد (Klein & Klein, 2014). این فرآیند سبب ذخیره موقت آب می‌شود و زمینه جذب آن توسط گیاهان و موجودات خاک را فراهم می‌کند (USDOA, 2019). نفوذ آبی به‌بهترین شکل منعکس‌کننده شرایط فیزیکی خاک و پایداری ساختمان آن است (Pinheiro, 2009). به‌دلیل نقش فرآیند نفوذ در هیدرولوژی سطحی، زیرسطحی و آبیاری (Milla & Kish, 2006) بیش از دو قرن است که به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است (Ghorbani et al., 2009). در این میان، مدل‌سازی نفوذ آب به خاک نقش کلیدی در مدیریت منابع آب، طراحی سیستم‌های آبیاری و پیش‌بینی چرخه هیدرولوژیکی ایفا می‌کند (Hillel, 1998). ارزیابی دقیق این ویژگی برای مدیریت مؤثر حوزه‌های آبخیز، مهار تولید رواناب و افزایش بهره‌وری منابع آب، در اراضی کشاورزی ضروری است (Vishwakarma et al., 2025).

استفاده از مدل‌های تجربی نفوذ آب به خاک به دلیل پیچیدگی فرآیند نفوذ و تأثیر همزمان عوامل متعدد فیزیکی (مانند بافت خاک، ساختمان خاک، رطوبت اولیه و غیره)، شیمیایی (هدایت الکتریکی، سدیم تبادلی، ماده آلی و غیره) و زیستی (پوشش گیاهی، فعالیت بیولوژیکی و غیره)، برای پیش‌بینی و شبیه‌سازی نفوذ آب به خاک امری ضروری است (Hillel, 2003). مدل‌های تجربی که بر پایه مشاهدات میدانی و آزمایشگاهی و روابط ساده ریاضی استوار هستند، ساده‌ترین و پرکاربردترین ابزار برای برآورد نفوذ هستند (Risse et al., 1994). با این حال عدم توجه به مبانی فیزیکی حاکم بر فرآیند نفوذ؛ سبب محدودیت این مدل‌ها در تعمیم‌پذیری به شرایط مختلف شده است (Assouline, 2013). از جمله شناخته‌شده‌ترین مدل‌های تجربی می‌توان به مدل کوستیاکوف (Kostiakov, 1932) اشاره کرد. این مدل به‌عنوان یکی از اولین مدل‌های توانی، رابطه ساده‌ای بین نفوذ تجمعی (نفوذ انباشته) و زمان ارائه کرد (Kostiakov, 1932). برای رفع اشکال شدت نفوذ در زمان بی‌نهایت در مدل کوستیاکوف، مدل اصلاح‌شده کوستیاکوف - لوئیس (Lewis, 1937) که به مدل نفوذ پایه معروف است، ارائه شد. همچنین دفتر حفاظت خاک آمریکا (SCS) با معرفی مدل شماره منحنی (CN)، رویکردی کاربردی برای برآورد نفوذ در حوضه‌های آبخیز ارائه داد (USDA-SCS, 1986). مدل‌های هاگینز و مونک (۱۹۶۶)، کولیس-جورج (۱۹۷۷) و سایهاگ و همکاران (۲۰۱۷) نیز از جمله مدل‌های تجربی هستند. در این میان پژوهشگران با ارائه مدل‌های نیمه‌تجربی با تلفیق مبانی فیزیکی و روابط تجربی، سعی در رفع محدودیت‌های مدل‌های کاملاً تجربی داشتند. از این رو مدل‌های نیمه‌تجربی از اشکال ساده معادله پیوستگی و فرضیه‌های ساده در مورد رابطه شدت نفوذ - نفوذ تجمعی استفاده می‌کنند (Mishra et al., 2003). در این میان هورتون (۱۹۴۰) با معرفی یک مدل نماینده برآورد شدت نفوذ را در شرایط مختلف فراهم ساخت (Horton, 1940). مدل‌های هولتان (۱۹۶۱)، اورتون (۱۹۶۴)، سینگ و یو (۱۹۹۰) و میسرا و سینگ (۲۰۰۲) نیز نمونه‌هایی از مدل‌های نیمه‌تجربی هستند. ارزیابی‌های سیستماتیک نشان داده است که هیچ مدل جهانی واحدی برای بیان شدت نفوذ آب وجود ندارد و بهترین مدل برای هر منطقه به نوع خاک و شرایط محلی بستگی دارد (Smith et al., 2002).

با توجه به ماهیت تجربی یا نیمه‌تجربی معادلات نفوذ، ارزیابی دقت آنها پیش از بکارگیری آنها در هر منطقه ضروری است. در این راستا در پژوهش‌های گسترده‌ای در سراسر جهان به ارزیابی دقت و کاربرد مدل‌های تجربی در شرایط مختلف اقلیمی و خاکی پرداخته شده است. Smith et al., (1999) کارایی چندین مدل تجربی را در خاک‌های مختلف ایالات متحده مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که هیچ‌یک از مدل‌ها برتری مطلق ندارند و انتخاب مدل به شرایط محلی بستگی دارد. مطالعه Mishra

<sup>1</sup> Infiltrability

<sup>2</sup> Soil Conservation Service

Muneeraa (2003) نیز نشان داد که مدل کوستیاکوف - لویس در بسیاری از موارد از عملکرد قابل قبولی برخوردار است. et al., (2020) توانایی برخی مدل‌ها را برای تخمین میزان نفوذ بررسی نمودند. نتایج نشان داد که مدل هورتون مطابقت بیشتری با میزان نفوذ مشاهده شده داشت و این مدل برای خاک‌های سبک و بازه‌های زمانی کوتاه عملکرد مناسبی داشت، اما در خاک‌های سنگین و با رطوبت اولیه بالا دقت آن کاهش پیدا کرد. Faridah et al., (2023) مطالعه‌ای با هدف بررسی مدل‌های بر پایه زمان در خاک‌های با بافت رسی انجام دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل کوستیاکوف کمترین خطا را نسبت به سایر مدل‌ها داشت. Mesele, et al., (2024) با بررسی چند مدل تجربی و نیمه‌تجربی نشان دادند که مدل کوستیاکوف لویس در برآورد نفوذ در شرایط مختلف بافتی عملکرد بهتر و پایاتری نسبت به مدل‌های دیگر داشت. در ایران نیز تحقیقات ارزشمندی در این زمینه انجام شده است. Goodarzi et al., (2012) برای تخمین پارامترهای مدل‌های نفوذ و تعیین مدل مناسب، پژوهشی در دشت اشرینان لرستان به روش حلقه‌های دوگانه انجام دادند. ارزیابی مدل‌ها نشان داد که مدل کوستیاکوف مناسب‌ترین مدل برای برآورد میزان نفوذ تجمعی در این اراضی است. در مطالعه‌ای Vaezi & Salehi (2020) کارایی مدل‌های نفوذ را در کاربری‌های کشت دیم، کشت آبی و مرتع بررسی کردند. نتایج نشان داد از بین مدل‌های مورد بررسی، مدل کوستیاکوف کمترین مقدار خطا و بیش‌ترین ضریب کارایی را در کاربری مرتع نشان داد. Batoukhteh et al., (2021) ابراز داشتند، برآورد نفوذ تجمعی یا نفوذ انباشته در مدل کوستیاکوف - لویس در مقایسه با سایر مدل‌ها، از روند پایدارتری برخوردار بوده و در اکثر کلاس‌های بافتی خاک و کاربری‌های مورد بررسی حائز رتبه نخست ارزیابی بود.

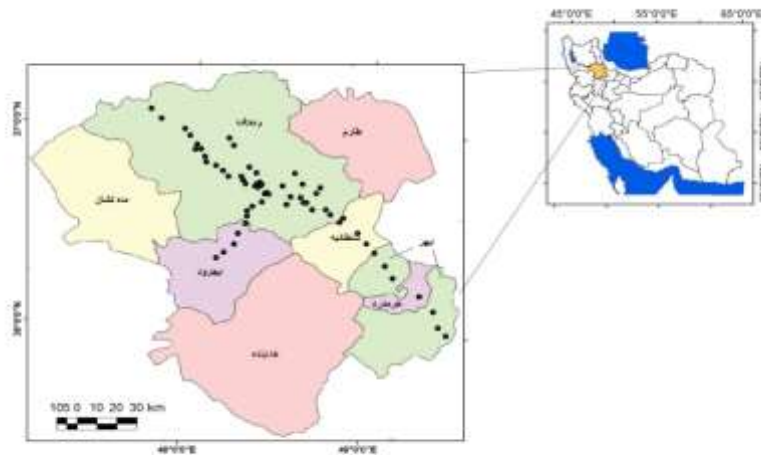
با وجود سابقه طولانی استفاده از مدل‌های تجربی و نیمه‌تجربی نفوذ آب در خاک و تحقیقات انجام‌شده در سراسر جهان، همچنان خلأهای پژوهشی به‌ویژه در ارتباط با به‌کارگیری برخی مدل‌ها در مناطق نیمه‌خشک مشاهده می‌شود. این مناطق به‌دلیل ویژگی‌های خاصی همچون بارش کم و نامنظم، پوشش گیاهی تنگه‌تبخیر بالا، وجود خاک‌های با ساختمان ضعیف و کمبود مواد آلی، شرایطی متفاوت و پیچیده را برای فرآیند نفوذ فراهم می‌کنند (Assouline & Muallem, 2002). بنابراین نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات انجام‌شده در سایر اقلیم‌ها، مانند مناطق مرطوب یا معتدل، الزاماً قابل‌تعمیم به این مناطق نیست. این مسئله ضرورت انجام ارزیابی‌های نظام‌مند، دقیق و مبتنی بر داده‌های میدانی بومی را بیش از پیش برجسته می‌کند. در ایران نیز باوجود انجام برخی مطالعات، بررسی‌های جامع و تطبیقی مدل‌های تجربی و نیمه‌تجربی نفوذ در شرایط متنوع خاک‌های مناطق نیمه‌خشک همچنان ناکافی است. در چنین شرایطی، ارزیابی دقیق و تطبیقی مدل‌های نفوذ با استفاده از داده‌های میدانی مناطق نیمه‌خشک ایران از جمله استان زنجان یک ضرورت علمی و مدیریتی محسوب می‌شود. بر همین اساس، هدف اصلی این پژوهش ارزیابی کارایی مدل‌های تجربی (کوستیاکوف، کوستیاکوف - لویس، SCS، هورتون) به‌همراه دو مدل میسر-سینگ و سایهاگ؛ که تاکنون در منطقه نیمه‌خشک ایران کمتر مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است؛ می‌باشد.

## 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 از نصف النهار گرینویچ، انجام شد. این منطقه بر اساس طبقه‌بندی دومارتن دارای اقلیم نیمه‌خشک، با میانگین بارش سالانه ۳۲۴ میلی‌متر است. از نظر زمین‌شناسی، سنگ مادر منطقه عمدتاً شامل تشکیلات آهکی، مارن، کنگلومرا و رسوبات آبرفتی کواترنری است (سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۹۵). این منطقه دارای توپوگرافی متنوعی شامل ارتفاعات کوهستانی (مانند رشته‌کوه‌های طارم و سلطانیه با ارتفاع بیش از ۳۰۰۰ متر از سطح دریا)، دشت‌های آبرفتی (نظیر دشت زنجان و ابهر) و مناطق کوه‌پایه‌ای با شیب‌های ملایم تا تند است. رژیم رطوبتی در مناطق کم ارتفاع Xeric ارتفاعات میانی Ustic و در ارتفاعات بالا Udic با بارش‌های بیشتر است. رژیم حرارتی در دشت‌ها Mesic، در ارتفاعات بالا Frigid است (Soil

(Survey Staff, 2022). بر اساس سامانه رده‌بندی خاک‌های آمریکا (USDA)، خاک‌های منطقه شامل آلفی سول (در ارتفاعات جنگلی)، اینسپتی سول (در دشت‌ها)، اریدی سول (در مناطق خشک‌تر) است (Soil Survey Staff, 2022).



شکل ۱. موقعیت نقاط نمونه‌برداری در منطقه مورد مطالعه (استان زنجان، ۱۴۰۳)

### نمونه‌برداری خاک و تجزیه‌های آزمایشگاهی

به منظور انجام آزمایش صحرایی نفوذ آب و نمونه‌برداری از خاک ۶۸ نقطه با انجام بازدیدهای میدانی انتخاب شدند. به طوری که معیارهایی نظیر کاربری اراضی، پوشش گیاهی، بافت خاک، ساختمان خاک و اطلاعات موجود از نقشه‌های خاک‌شناسی در نظر گرفته شد تا طیف وسیعی از تنوع غالب خاک‌های منطقه مورد بررسی لحاظ شود. نمونه‌برداری از عمق صفر تا ۶۰ سانتیمتر به عنوان لایه فعال هیدرولوژیکی خاک (Brady & Weil, 2017) به صورت دست‌خورده و از عمق صفر تا ۲۰ سانتیمتری به صورت دست‌نخورده (با استفاده از سیلندر استاندارد) انجام گرفت که تا حدودی هر دو جنبه سطحی و نیم‌رخ مؤثر بر فرآیند نفوذ آب به طور هم‌زمان مورد بررسی قرار گیرد. نمونه‌های دست‌خورده به منظور اندازه‌گیری مقادیر ویژگی‌های بافت خاک، قابلیت هدایت الکتریکی و واکنش خاک در عصاره گل اشباع، ماده آلی و کربنات کلسیم معادل و نمونه‌های دست‌نخورده برای اندازه‌گیری چگالی ظاهری به آزمایشگاه منتقل شدند. توزیع اندازه ذرات بر اساس طبقه‌بندی USDA انجام شد: (۱) برای تعیین ذرات درشت‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر، از روش الک خشک با سری الک مشخص (۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۵ میلی‌متر) طبق روش‌های استاندارد ارائه شده توسط (Gee & Bauder, 1986) استفاده شد. (۲) ذرات کوچکتر از ۰/۰۵ میلی‌متر (رس و سیلت) نیز، با روش هیدرومتری ارائه شده توسط (Yavari et al., 2021) انجام و قرائت در زمان‌های ۶ و ۲۴ ساعت، برای تعیین بخش رس (رابطه ۱)، و باقیمانده درصد نسبی ذرات اولیه پس از کسر مجموع درصد رس و شن (روش الک) برای تعیین بخش سیلت استفاده شد. براساس دسته‌بندی USDA (USDA, 2014; Hillel, 2003)، کلاس‌های بافت خاک نیز در سه گروه کلی قرار داده شدند: (۱) خاک‌های درشت‌بافت (Sand، Loamy Sand و Sandy Loam)، (۲) خاک‌های متوسط‌بافت (Silt Loam، Loam و Sandy Clay Loam) و (۳) خاک‌های ریزبافت (Sandy Clay، Silty Clay Loam، Silty Clay و Clay). ویژگی‌های شیمیایی خاک شامل قابلیت هدایت الکتریکی و واکنش خاک در گل اشباع (Thomas, 1996) با استفاده از pH متر دیجیتال، ماده آلی (Walkley & Page, 1934) براساس اکسیداسیون کربن آلی خاک توسط دی‌کرومات پتاسیم در محیط اسیدی و کربنات کلسیم معادل (et al., 1982) بر اساس روش خنثی‌سازی اسیدی نیز اندازه‌گیری شدند. از نمونه‌های دست‌نخورده نیز برای تعیین چگالی ظاهری با استفاده از سیلندر فلزی با ابعاد ۵ در ۵ سانتی‌متر برای عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری به روش (Culley 1993) استفاده شد.

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

در رابطه بالا  $P_{\text{Clay}}$ : درصد رس خاک،  $P[h_6]$  و  $P[h_{24}]$ : به ترتیب درصد ذرات اندازه‌گیری شده در زمان‌های ۶ و ۲۴ ساعت،  $d[h_6]$  و  $d[h_{24}]$ : به ترتیب قطر ذرات اندازه‌گیری شده متناظر با زمان ۶ و ۲۴ ساعت (میلی‌متر).

### اندازه‌گیری نفوذ آب به خاک در صحرا

آزمایش نفوذ در هر یک از ۶۸ نقطه با استفاده از روش حلقه دوگانه مطابق با استاندارد ASTM D3385 انجام شد. برای این منظور از حلقه دوگانه با قطر داخلی و خارجی به ترتیب ۳۰ و ۶۰ سانتیمتر استفاده شد (شکل ۲). ارتفاع آب در هر دو حلقه در طول آزمایش به طور مداوم و با استفاده از گیج‌های مدرج بررسی شد. سعی شد ارتفاع آب داخل حلقه داخلی و خارجی با تزریق آب به داخل حلقه‌ها در طول آزمایش بین ۵ الی ۱۰ سانتیمتر ثابت نگه داشته شود. عمق آب نفوذ یافته در حلقه داخلی در بازه‌های زمانی صفر، ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۸۰ و ۹۰ دقیقه اندازه‌گیری و ثبت گردید (ASTM, 2009). این روند تا زمانی که شدت نفوذ به یک مقدار تقریباً ثابت برسد، ادامه یافت. از داده‌های آزمایش صحرایی نفوذ برای محاسبه شاخص‌های نفوذ تجمعی (انباشته)، شدت نفوذ اولیه و شدت نفوذ نهایی استفاده شد.



شکل ۲. آزمایش صحرایی نفوذ آب به خاک در کاربری باغ و مرتع

### ارزیابی معادلات نفوذ آب به خاک

داده‌های نفوذ اندازه‌گیری شده با چهار مدل تجربی شامل: (۱) کوستیاکوف (۱۹۳۲)، (۲) کوستیاکوف-لوییس (۱۹۳۷)، (۳) SCS (۱۹۷۲)، (۴) سایهاگ و همکاران (۲۰۱۷) و دو مدل نیمه‌تجربی شامل: (۱) هورتون (۱۹۴۰) و (۳) میشر و سینگ (۲۰۰۲) برآزش داده شدند. ارزیابی معادلات نفوذ بر اساس وضعیت طبیعی و پراکنش بافت خاک در منطقه مورد مطالعه و براساس دسته‌بندی USDA (USDA, 2014; Hillel, 2003)، در سه دسته کلاس بافتی شامل: (۱) خاک‌های درشت‌بافت، (۲) خاک‌های متوسط بافت و (۳) خاک‌های ریزبافت انجام شد. معادلات و اجزای آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. مدل‌های نفوذ آب به خاک

| اجزای مدل   | معادله ریاضی       | مدل                    |
|---|--------------------|------------------------|
| که در آن‌ها، $I$ : نفوذ انباشته بر حسب سانتیمتر (cm)، $T$ : زمان بر حسب دقیقه (min)، $b$ و $k$ پارامترهای معادله بوده و وابسته به نوع خاک هستند | $I = KT^b$         | کوستیاکوف (۱۹۳۲)       |
| که در آن، $f$ : نفوذ نهایی بر حسب سانتیمتر بر دقیقه (cm/min)  | $I = KT^b + i_f T$ | کوستیاکوف-لوییس (۱۹۳۷) |

که در آن ها،  $a$  و  $b$ : تابعی از شماره منحنی نفوذ و از روی جدول ارائه شده بدست می آید. شماره منحنی نفوذ از  $0.5$  تا  $4/0$  متغیر است.  $I$ : مقدار نفوذ آبیافته از شروع نفوذ برحسب سانتیمتر (cm)،  $t$ : زمان از شروع نفوذ برحسب دقیقه (min) و  $a$  و  $b$ : ضرایب مربوط به نوع خاک هستند.  $C$ : برابر مقدار ثابت  $0.6985$  سانتیمتر یا  $0.275$  اینچ است.

$$I = at^b + c$$

دفتر حفاظت خاک آمریکا (۱۹۷۲)

که در آن ها،  $f(t)$ : نرخ نفوذ آب به خاک  $(L/T)$ ،  $m$  و  $n$ : ثابت‌های معادله هستند و  $c$ : نرخ نفوذ پایدار  $(L/T)$  است.

$$f(t) = mt^{-n} + p_i c$$

سایهاگ و همکاران (۲۰۱۷ا)

که در آن ها  $i$ : سرعت نفوذ آب به خاک در زمان  $t$   $(L/T)$ ،  $i_0$ : سرعت نفوذ اولیه برحسب سانتیمتر بر ساعت  $(L/T)$ ،  $c$ : سرعت نفوذ نهایی (پایه)،  $K$ : ضریب وابسته به نوع خاک است که با افزایش آن، سرعت نفوذ کاهش می‌یابد.  $x$ : عدد نپر برابر  $2/18$  و  $a$ : زمان بر حسب ساعت ( $h$ ) است.

$$i = i_c + (i_0 - i_c)e^{-Kt}$$

هورتون (۱۹۴۰)

$F_c$ : نفوذ نهایی  $S$ : حداکثر ظرفیت نگهداشت،  $K$ : ضریب کاهش نفوذ همانند ضریب هورتون است.

$$f = f_c + \frac{Sk}{(1 + kt)^2}$$

میشرا و سینگ (۲۰۰۲)

ضرایب مدل‌های مورد بررسی در نرم‌افزار Excel (2024) تعیین شد. بدین منظور با تعیین مقادیر پیش فرض منطقی برای ضرایب مدل‌ها، عمق آب نفوذ یافته و شدت نفوذ در زمان‌های متناظر به صورت اولیه تخمین زده شد. سپس مربعات خطا در زمان‌های متناظر با کسر مقادیر تخمینی اولیه از مقادیر نفوذ آب اندازه‌گیری شده محاسبه شد. در ادامه مقادیر پیش فرض ضرایب مدل‌ها که در مرحله قبل تعیین شده بود، به همراه مقدار مجموع مربعات خطا به عنوان ورودی به ابزار Solver داده شد. ضرایب نهایی مدل‌ها به گونه‌ای تخمین زده شد که مجموع مربعات خطا به کمترین مقدار خود برسد. سپس عمق آب نفوذ یافته و شدت نفوذ برای مدل‌های مختلف در زمان‌های متناظر استخراج گردید. همچنین دقت و کارایی مدل‌ها با استفاده از چهار معیار آماری شامل: (۱) ضریب تعیین ( $R^2$ )، (۲) ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، (۳) میانگین قدر مطلق انحراف (MAD) و (۴) میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) بررسی شدند (روابط ۲ تا ۵). ضریب تعیین ( $R^2$ )، بیان‌کننده روند شبیه‌سازی و درجه هم‌خطی بودن داده‌های اندازه‌گیری شده و برآوردی است و به عنوان شاخص میزان تبیین وابستگی مدل استفاده می‌شود. این شاخص بین صفر و یک است و هر چه به عدد یک نزدیکتر باشد روند شبیه‌سازی و برازش دقیق‌تر است. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، بیان‌کننده تفاوت میان مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل و مقدار واقعی است. مقدار آن همواره مثبت بوده و بهترین حالت عملکرد زمانی است که مقدار آن صفر شود. میانگین قدر مطلق انحراف (MAD) و میانگین درصد خطای مطلق (MAPE)، نشان‌دهنده دقت پیش‌بینی است. رتبه‌بندی مدل‌ها بر اساس شاخص‌های خطا صورت پذیرفت. تحلیل داده، توزیع نمودار و مقایسه میانگین، با استفاده از نرم‌افزارهای Excel (2016) و SPSS (2022) انجام شد.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{\sum_{t=1}^n (A_t - \bar{A})^2} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$MAD = \frac{\sum_{t=1}^n |A_t - F_t|}{n} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right|}{n} \times 100 \quad \text{رابطه ۵}$$

که در آن ها،  $A_t$ : مقادیر مشاهده شده،  $F_t$ : مقادیر پیش‌بینی شده،  $\bar{A}$ : میانگین مقادیر مشاهده شده،  $n$ : تعداد مشاهدات است.

## نتایج و بحث

<sup>3</sup> Root Mean Square Error

<sup>4</sup> Mean Absolute Deviation

<sup>5</sup> Mean Absolute Percentage Error

## بافت خاک‌های مطالعاتی

مطابق دسته‌بندی USDA (USDA, 2014; Hillel, 2003)، کلاس‌های بافتی در سه گروه کلی: (۱) خاک‌های درشت‌بافت (Sand، Loamy Sand و Sandy Loam)، (۲) خاک‌های متوسط‌بافت (Loam، Silt Loam، Sandy Clay Loam و Clay Loam) و (۳) خاک‌های ریزبافت (Sandy Clay، Silty Clay Loam، Silty Clay و Clay) قرار می‌گیرند. بر این اساس نتایج پژوهش حاضر نشان داد گروه متوسط‌بافت بیشترین فراوانی را در مجموعه خاک‌های مطالعاتی داشت (جدول ۲). در این گروه، چهار کلاس بافتی شامل Clay Loam ۲۲ نمونه، Loam ۱۹ نمونه، Sandy Clay Loam ۹ نمونه و Silt Loam ۱ نمونه قرار داشت که در مجموع ۵۱ نمونه معادل بزرگ‌ترین بخش از کل داده‌ها را تشکیل داد. گروه درشت‌بافت شامل دو کلاس Sandy Loam و Loamy Sand بود که به ترتیب ۱۲ و ۱ نمونه را دربرگرفت. این گروه بیانگر خاک‌هایی با درصد بالاتر شن و احتمالاً نفوذپذیری اولیه بیشتر است. در مقابل، گروه ریزبافت کمترین فراوانی را در مجموعه نمونه‌ها داشت و شامل بافت‌های Silty Clay ۲ نمونه، Clay ۱ نمونه و Silty Clay Loam ۱ نمونه بود. با توجه به انتخاب نقاط نمونه‌برداری با استفاده از نقشه‌های کاربری اراضی، نقشه‌های خاک و بازدیدهای میدانی برای نبل به انجام آزمایش در غالب خاک‌های منطقه، تعداد محدود این گروه بافتی نشان‌دهنده گستره کوچک خاک‌های با خصوصیات بلاستیسیته و چسبندگی بالا در منطقه مورد پژوهش است. به‌طور کلی، ترکیب بافتی نمونه‌ها نشان می‌دهد که خاک‌های متوسط‌بافت غالب بوده و می‌توان انتظار داشت که بخش عمده رفتارهای هیدرولیکی، مکانیکی و نفوذپذیری ثبت‌شده، تحت تأثیر ویژگی‌های این گروه باشد.

جدول ۲. فراوانی کلاس‌های بافتی منطقه مورد پژوهش

| نام گروه بافتی | بافت خاک        | تعداد خاک‌های مطالعاتی |
|----------------|-----------------|------------------------|
| درشت           | Sandy loam      | ۱۲                     |
|                | Loamy sand      | ۱                      |
| متوسط          | Clay loam       | ۲۲                     |
|                | Loam            | ۱۹                     |
|                | Sandy clay loam | ۹                      |
|                | Silt loam       | ۱                      |
| ریز            | Silty clay      | ۲                      |
|                | Clay            | ۱                      |
|                | Silty clay loam | ۱                      |

## ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها

میانگین واکنش خاک (pH) در سه گروه بافتی بین ۷/۹۲ تا ۷/۹۴ است، که نشان‌دهنده خاک‌های خنثی تا کمی قلیایی است (جدول ۳). میانگین قابلیت هدایت الکتریکی (EC) از ۲/۳۰ دسی زیمنس بر متر در خاک‌های ریزبافت به حدود ۱/۵۰ دسی زیمنس بر متر در درشت‌بافت کاهش داشت. در عین حال، ضریب پراکندگی بالا (۵۴-۱۱۲ درصد) نشانگر ناهمگنی در شوری خاک در گروه‌های بافتی است. خاک‌های ریزبافت معمولاً به دلیل ظرفیت نگهداری بالاتر آب و تجمع نمک، شوری بیشتری دارند، در حالی که در خاک‌های درشت‌دانه به علت زهکشی بهتر، املاح سریع‌تر شسته می‌شوند (Wang et al., 2021). مقدار ماده آلی (OM) از ۰/۶۹ درصد در خاک‌های درشت‌بافت تا ۱/۷۶ درصد در خاک‌های ریزبافت تغییر می‌کند. ضریب تغییرات (۷۴-۹۴ درصد) نشان می‌دهد تغییرپذیری ماده آلی نسبتاً زیاد است. این نتایج با پژوهش Šimanský & Lukac (2025) هم‌خوانی دارد. این پژوهشگران ابراز داشتند، خاک‌های درشت‌بافت به دلیل تهویه زیاد و تجزیه سریع‌تر، ماده آلی کمتری دارند؛ در مقابل خاک‌های ریزبافت به علت رطوبت بیشتر و محافظت فیزیکی، مواد آلی مقدار بیشتری دارند. بیشترین میانگین کربنات کلسیم (CaCO<sub>3</sub>) در خاک‌های متوسط‌بافت مشاهده شد (۱۸/۴۱ درصد). این ویژگی در ریزبافت‌ها ۱۲/۸۸ و در درشت‌بافت‌ها ۱۶/۱۳ درصد اندازه‌گیری شد. چگالی ظاهری (BD) با افزایش اندازه ذرات اولیه از ۱/۰۱ به ۱/۱۶ گرم بر سانتیمتر مکعب افزایش داشت. این ویژگی ضریب

تغییرات نسبتاً پایین (۸-۱۷ درصد) در گروه‌های بافتی داشت. خاک‌های ریزبافت دارای درصد رس بیشتر و مقدار شن کمتر است؛ خاک‌های متوسط‌بافت با نسبت متعادلی از سیلت، رس و شن دارای توزیعی متوازن است. خاک‌های درشت‌بافت با شن بیشتر و رس بسیار کم است. ویژگی‌های نفوذ آب به خاک در سه کلاس بافتی (ریز، متوسط و درشت‌بافت) رفتار متفاوتی داشتند. نفوذ انباشته (CI) در خاک‌های متوسط‌بافت (۳۶/۵۷ سانتیمتر) بالاتر از ریزبافت (۳۱/۲۴ سانتیمتر) و کمی بیشتر از درشت‌بافت (۳۵/۵۵ سانتیمتر) بود، اما ضریب تغییرات (حدود ۶۰-۷۴ درصد) نشان‌دهنده ناهمگنی زیاد نمونه‌ها است. شدت نفوذ اولیه (IIR) در خاک‌های ریزبافت بیشترین مقدار میانگین (۱۰۳/۵۰ سانتیمتر بر ساعت) را داشت، ولی خاک‌های درشت‌بافت، مقدار کمتری (۸۸/۱۵ سانتیمتر بر ساعت) را نشان دادند. شدت نفوذ نهایی (FIR) در کلاس بافتی متوسط بیشترین مقدار (۶۶/۶۳ سانتیمتر بر ساعت) و در کلاس بافتی ریز کمترین مقدار (۵۵/۶۹ سانتیمتر بر ساعت) مشاهده شد. این نتایج مبین پیچیدگی و چندعاملی بودن فرآیند نفوذ آب به خاک است که تحت تأثیر برهمکنش‌های خطی و غیرخطی بین ویژگی‌های مختلف خاک است (Morbidelli et al., 2018).

جدول ۳. ویژگی‌های خاک‌های منطقه مورد پژوهش

| ریز بافت |        | متوسط بافت |       | درشت بافت |        | ویژگی                   |
|----------|--------|------------|-------|-----------|--------|-------------------------|
| Mean     | CV     | Mean       | CV    | Mean      | CV     |                         |
| ۱۲/۰۶    | ۶۳/۹۸  | ۴۰/۰۶      | ۲۰/۹۵ | ۶۴/۸۴     | ۱۵/۰۵  | Sand (%)                |
| ۴۵/۲۰    | ۲۰/۲۶  | ۳۳/۵۲      | ۱۹/۲۳ | ۲۱/۳۲     | ۴۴/۱۳  | Silt (%)                |
| ۴۲/۷۵    | ۵/۳۱   | ۲۶/۴۲      | ۲۱/۱۱ | ۱۳/۸۴     | ۲۸/۹۲  | Clay (%)                |
| ۱/۰۱     | ۹/۳۲   | ۱/۰۷       | ۸/۰۳  | ۱/۱۶      | ۱۶/۹۴  | BD (g/cm <sup>3</sup> ) |
| ۷/۹۴     | ۴/۵۸   | ۷/۹۳       | ۴/۹۱  | ۷/۹۲      | ۲/۹۵   | pH                      |
| ۲/۳۰     | ۱۱۲/۴۲ | ۱/۴۶       | ۷۹/۶۵ | ۱/۵۰      | ۵۴/۴۵  | EC (ds/m)               |
| ۱/۷۶     | ۸۲/۲۲  | ۱/۳۷       | ۷۳/۹۹ | ۰/۶۹      | ۹۴/۳۸  | OM (%)                  |
| ۱۲/۸۸    | ۶۱/۱۹  | ۱۸/۴۱      | ۵۳/۶۸ | ۱۱/۱۳     | ۴۱/۴۶  | CaCO <sub>3</sub> (%)   |
| ۳۱/۲۴    | ۶۲/۵۵  | ۳۶/۵۷      | ۷۰/۶۷ | ۳۵/۵۵     | ۷۳/۹۹  | CI (cm)                 |
| ۱۰۳/۵۰   | ۵۴/۶۶  | ۱۰۱/۸۸     | ۸۸/۵۹ | ۸۸/۱۵     | ۱۰۰/۱۲ | IIR (cm/h)              |
| ۱۸/۹۰    | ۶۶/۱۵  | ۱۷/۰۳      | ۶۶/۶۲ | ۱۸/۲۰     | ۵۵/۶۹  | FIR (cm/h)              |

BD: Bulk Density, EC: Electrical Conductivity, OM: Organic Matter, CI: Cumulative Infiltration, IIR: Initial Infiltration Rate, FIR: Final Infiltration Rate.

### دقت مدل‌های نفوذ در گروه‌های بافت خاک

نتایج این پژوهش نشان داد که در هر سه گروه بافتی، مدل‌های تجربی ساده، به‌ویژه کوستیاکوف-لوئیس و کوستیاکوف دقیق‌ترین، پایدارترین و قابل‌اعتمادترین عملکرد را در شبیه‌سازی نفوذ آب به خاک داشتند (جدول ۴). در خاک‌های درشت‌بافت، مدل کوستیاکوف-لوئیس بهترین تطابق را با داده‌های مشاهده‌شده نشان داد ( $MAPE = 5.07\%$ ,  $MAD = 0.38$ ,  $RMSE = 0.38$ ,  $R^2 = 0.999$ ). و مدل کوستیاکوف نیز با دقت بالا توانست روند واقعی نفوذ را حتی در شرایط نفوذپذیری زیاد و در زمان نفوذ کوتاه بازنمایی کند ( $MAPE = 6.38\%$ ,  $MAD = 0.34$ ,  $RMSE = 0.42$ ,  $R^2 = 0.999$ ). در حالی که مدل‌های پیچیده‌تر و نیمه‌تجربی عملکرد ضعیف‌تری داشتند. در خاک‌های متوسط‌بافت، الگوی کلی عملکرد مدل‌ها مشابه خاک‌های درشت‌بافت بود، اما میزان خطاها اندکی افزایش یافت که این موضوع به پیچیدگی بیشتر توزیع منافذ و ناهمگنی ساختاری این خاک‌ها نسبت داد. باین‌حال، مدل کوستیاکوف-لوئیس همچنان بهترین برآورد را ارائه داد ( $MAPE = 6.68\%$ ,  $MAD = 0.38$ ,  $RMSE = 0.46$ ,  $R^2 = 0.999$ ) و نقش پارامتر نفوذ نهایی در بهبود شبیه‌سازی فرآیند نفوذ آشکار بود. در خاک‌های ریزبافت نیز مدل کوستیاکوف-لوئیس ( $R^2 = 0.999$  و  $MAPE = 3.05\%$ ,  $MAD = 0.17$ ,  $RMSE = 0.23$ ) و سپس کوستیاکوف با کمترین خطا و بیشترین دقت توانستند فرآیند نفوذ تدریجی و گذار از نفوذ اولیه به حالت پایدار را به‌خوبی شبیه‌سازی کنند. این یافته‌ها با نتایج پژوهش Batoukhteh et al., (2021) همخوانی داشت. این پژوهش‌گران ابراز داشتند در خاک‌های با بافت‌های متفاوت، مدل کوستیاکوف-لوئیس اغلب روند پایدارتر و مناسب‌تری برای پیش‌بینی نفوذ در مناطق نیمه‌خشک دارد. مدل کوستیاکوف-لوئیس با افزودن نفوذ نهایی، قادر

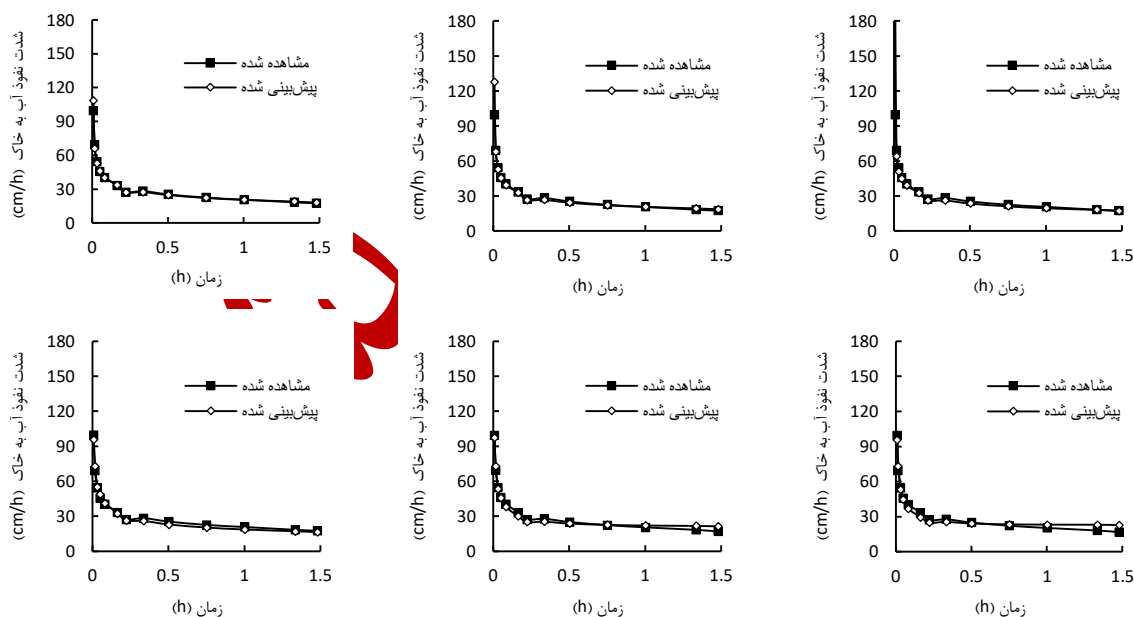
است محدودیت اصلی فرم کلاسیک کوستیاکوف را در شبیه‌سازی نفوذ در زمان‌های طولانی برطرف کند؛ که با نتایج گزارش شده توسط Mishra et al. (2003) هم‌خوانی دارد. در نتایج پژوهش حاضر نشان داد، مدل‌های SCS و سایهاگ در هر سه گروه بافتی، به‌ویژه در خاک‌های ریزبافت، علی‌رغم داشتن ضرایب تعیین نسبتاً مناسب، خطاهای بالاتری نشان دادند که بیانگر محدودیت آن‌ها در کاربرد نقطه‌ای و حساسیت به فرضیات و ضرایب تجربی است (جدول ۴). مدل‌های نیمه‌تجربی هورتون و میشرا-سینگ نیز عملکردی بینابینی داشتند و بدون کالیبراسیون دقیق، دقت کافی برای پیش‌بینی کمی نفوذ را فراهم نکردند. تعداد محدود گروه ریزبافت در این پژوهش نشان‌دهنده گستره کوچک خاک‌های با خصوصیات پلاستیسیته و چسبندگی بالا در منطقه مورد پژوهش است. به نظر می‌رسد ارزیابی کارایی مدل‌ها در این گروه بافتی همچنان نیاز به بررسی‌های بیشتر با انجام آزمایش‌های نفوذ صحرائی دارد.

جدول ۵. ارزیابی کارایی مدل‌های تجربی و نیمه‌تجربی برای خاک‌های با کلاس بافتی مختلف

| رتبه مدل | MAPE  | MAD  | RMSE | R <sup>2</sup> | نام مدل           | کلاس بافتی             |
|----------|-------|------|------|----------------|-------------------|------------------------|
| ۲        | ۶/۳۸  | ۰/۳۴ | ۰/۴۲ | ۰/۹۹۹          | کوستیاکوف         | درشت بافت<br>(n = 13)  |
| ۱        | ۵/۰۷  | ۰/۳۱ | ۰/۳۸ | ۰/۹۹۹          | کوستیاکوف - لوئیس |                        |
| ۳        | ۲۷/۴۱ | ۰/۷۶ | ۰/۸۸ | ۰/۹۹۳          | SCS               |                        |
| ۶        | ۲۲/۰۳ | ۰/۵۷ | ۷/۳۲ | ۰/۸۰۸          | سایهاگ            |                        |
| ۵        | ۱۸/۵۰ | ۵/۵۱ | ۶/۶۱ | ۰/۸۷۲          | هورتون            |                        |
| ۴        | ۱۷/۸۹ | ۵/۱۷ | ۶/۳۰ | ۰/۸۷۷          | میشرا - سینگ      |                        |
| ۲        | ۸/۷۶  | ۰/۴۳ | ۰/۵۱ | ۰/۹۹۹          | کوستیاکوف         | متوسط بافت<br>(n = 51) |
| ۱        | ۶/۶۸  | ۰/۳۸ | ۰/۴۶ | ۰/۹۹۹          | کوستیاکوف - لوئیس |                        |
| ۳        | ۲۳/۵۳ | ۰/۶۷ | ۰/۷۸ | ۰/۹۹۵          | SCS               |                        |
| ۶        | ۲۱/۹۴ | ۶/۳۹ | ۸/۲۳ | ۰/۸۶۳          | سایهاگ            |                        |
| ۵        | ۱۸/۸۷ | ۵/۳۰ | ۶/۹۹ | ۰/۸۹۹          | هورتون            |                        |
| ۴        | ۱۶/۴۳ | ۴/۷۵ | ۶/۳۷ | ۰/۹۰۵          | میشرا - سینگ      |                        |
| ۲        | ۷/۰۱  | ۰/۲۷ | ۰/۳۴ | ۰/۹۹۹          | کوستیاکوف         | ریزبافت<br>(n = 4)     |
| ۱        | ۳/۰۵  | ۰/۱۷ | ۰/۲۳ | ۰/۹۹۹          | کوستیاکوف - لوئیس |                        |
| ۳        | ۱۶/۳۸ | ۰/۹۳ | ۱/۰۹ | ۰/۹۸۸          | SCS               |                        |
| ۶        | ۲۲/۹۳ | ۵/۸۲ | ۷/۱۳ | ۰/۹۰۷          | سایهاگ            |                        |
| ۵        | ۲۰/۹۵ | ۴/۴۷ | ۵/۴۱ | ۰/۹۴۱          | هورتون            |                        |
| ۴        | ۱۷/۷۱ | ۳/۳۹ | ۴/۱۳ | ۰/۹۶۴          | میشرا - سینگ      |                        |

منحنی شدت نفوذ آب به خاک برای شش مدل ارزیابی شده در شکل ۳ نشان داده شده است. به‌طور کلی مدل کوستیاکوف - لوئیس از نظر پایداری آماری و تکرارپذیری شاخص‌های خطا، یکی از قابل‌اعتمادترین مدل‌های تجربی نفوذ در شرایط مزرعه‌ای محسوب می‌شود (Bayabil et al., 2019). در پژوهشی Saadi-Khani & Sohrabi, (2017) نیز نشان دادند مدل کوستیاکوف - لوئیس در منطقه نیمه‌خشک ایران نسبت به سایر مدل‌ها (کوستیاکوف، SCS، هورتون و فیلیپ) عملکرد منعطف‌تر و بهتری برای برآورد نفوذ دارد. با این حال، برخی پژوهش‌ها دیدگاه متفاوتی ارائه داده‌اند و اشاره کرده‌اند که مدل کوستیاکوف و مشتقات آن به دلیل ماهیت کاملاً تجربی فاقد تفسیر فیزیکی مستقیم هستند و در صورت تغییر دامنه زمانی آزمایش یا شرایط رطوبتی اولیه ممکن است پارامترهای آن فاقد قابلیت تعمیم باشند (Simunek et al., 2016; Vereecken et al., 2019). در این میان مدل SCS اساساً برای کاربردهای هیدرولوژیکی حوضه‌ای توسعه یافته و استفاده از آن در مقیاس نقطه‌ای و آزمایش‌های نفوذ صحرائی، به‌ویژه در خاک‌های با تغییرات شدید بافتی، با محدودیت همراه است (Mishra & Singh, 2013). این ضعف می‌تواند به ماهیت تجربی - منطقه‌ای مدل SCS و توسعه اولیه آن برای شرایط خاص هیدرولوژیکی و خاک‌های کشاورزی ایالات متحده مرتبط باشد (USDA-

نتایج ضعیف و ناپایدار مدل سایه‌گ در این پژوهش را نیز می‌توان به حساسیت بالای این مدل نسبت به ضرایب تجربی و عدم تطابق فرضیات آن با شرایط فیزیکی خاک‌ها نسبت داد. در این خاک‌ها تغییرات رطوبت اولیه، چگالی ظاهری و پیوستگی منافذ نقش تعیین‌کننده‌ای در کنترل نفوذ دارند؛ درحالی‌که مدل سایه‌گ قادر به بازنمایی مناسب این پیچیدگی‌ها نیست. مطالعات پیشین نیز عملکرد ضعیف این مدل را در خاک‌های با ناهمگنی ساختاری بالا گزارش کرده‌اند (Mishra & Singh, 2013; Swartzendruber, 1987). در این میان فرض کاهش نمایی ساده نفوذ در مدل هورتون پیچیدگی فرآیند نفوذ در خاک‌های با توزیع منافذ ریز و رفتار غیرخطی جریان آب را به‌طور کامل در نظر نمی‌گیرد. این محدودیت پیش‌تر نیز توسط Horton (1940) مورد تأکید قرار گرفته است مدل میسر-سینگ نیز به دلیل ترکیب مفاهیم تجربی و فیزیکی، می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای میانی بین مدل‌های ساده تجربی و مدل‌های فیزیکی دقیق‌تر در نظر گرفته شود؛ هرچند همچنان حساسیت آن به ضرایب ورودی کاربرد گسترده آن را محدود می‌کند (Mishra & Singh, 2003). در مجموع افزایش اندک خطا در خاک‌های متوسط‌بافت را نیز می‌توان ناشی از پیچیدگی بیشتر توزیع اندازه منافذ دانست؛ پدیده‌ای که در مطالعات میدانی نیز گزارش شده است (Morbidelli et al., 2017; Kutílek & Nielsen, 2015). در بسیاری از موارد، کالیبراسیون ضرایب مدل‌ها باعث بهبود دقت آن‌ها شده است (Javadi & Ostad-Ali-Askari, 2023). به‌طورکلی، در شرایط واقعی خاک‌های منطقه نیمه‌خشک منطقه مورد مطالعه، سادگی ساختار ریاضی و پایداری آماری سبب شده است مدل‌های تجربی ساده، به‌ویژه کوستیاکوف-لوئیس، مستقل از کلاس بافتی عمل کرده و علی‌رغم محدودیت‌های نظری، از نظر کاربردی بهترین گزینه برای شبیه‌سازی نفوذ آب به خاک باشند.



شکل ۳. منحنی شدت نفوذ آب به خاک در کل نمونه‌ها (n = 68)

کوستیاکوف (۱)، کوستیاکوف لوئیس (۲)، SCS (۳)، سایه‌گ (۴)، میسر و سینگ (۵) و هورتون (۶)

### نتیجه‌گیری کلی

این پژوهش با هدف ارزیابی و مقایسه کارایی مدل‌های تجربی و نیمه‌تجربی در گروه‌های بافت خاک در منطقه نیمه‌خشک در استان زنجان انجام شد. ارزیابی جامع با استفاده از شش مدل تجربی و نیمه‌تجربی نفوذ آب به خاک با تکیه بر داده‌های میدانی صورت پذیرفت. نتایج حاکی از این بود که در خاک‌های درشت‌بافت، متوسط‌بافت و ریزبافت، الگوی نسبتاً یکنواختی در عملکرد مدل‌ها وجود دارد. در هر سه گروه مقایسه‌ای مدل‌های تجربی ساده به‌ویژه کوستیاکوف و به‌طور برجسته‌تر کوستیاکوف-لوئیس

بالاترین دقت و پایداری را نشان دادند؛ به طوری که مقادیر  $R^2$  نزدیک به یک بود و کمترین RMSE، MAD و MAPE در تفکیک بافتی تکرارپذیر بود. نتایج نشان داد در هر سه گروه بافتی، مدل کوستیاکوف-لوئیس بهترین عملکرد را به ویژه در خاک‌های ریزبافت (MAPE = 3.05%, MAD = 0.17, RMSE = 0.23,  $R^2 = 0.999$ ) داشت. مدل کوستیاکوف نیز عملکردی بسیار دقیق و پایدار به ویژه در خاک‌های درشت‌بافت (MAPE = 6.38%, MAD = 0.34, RMSE = 0.42,  $R^2 = 0.999$ ) و ریزبافت داشت ( $R^2 = 0.999$ , MAPE = 7.01%, MAD = 0.27, RMSE = 0.34). در خاک‌های متوسط‌بافت، میزان خطا اندکی افزایش داشت، اما ترتیب عملکرد مدل‌ها تغییر نکرد و همچنان کوستیاکوف-لوئیس بهترین تخمین را داشت که نشان‌دهنده سازگاری مناسب این مدل با شرایط متعادل تر تخلخل و نگهداشت آب است. در مقابل، مدل SCS در هر چهار ارزیابی اگرچه تخمین قابل قبولی داشت، با این وجود به طور سیستماتیک با خطاهای بیشتری همراه بود که محدودیت آن را در شرایط ناهمگن بافتی نشان می‌دهد. مدل سایه‌گ در همه مقایسه‌ها ضعیف‌ترین و ناپایدارترین عملکرد را ثبت کرد و تغییرات گسترده شاخص‌ها، حساسیت بیش‌تر آن به کالیبراسیون ضرایب را آشکار ساخت. مدل‌های نیمه تجربی هورتون و میشر-سینگ نیز در تمام گروه‌های بافتی عملکردی متوسط داشتند و به ویژه در خاک‌های درشت و متوسط‌بافت، تمایل به بیش‌برآورد با افزایش خطا نشان دادند. به طور کلی با وجود تفاوت‌های بافتی خاک‌ها مدل‌های ساده‌تر و کم‌پارامتر به ویژه کوستیاکوف-لوئیس از نظر دقت، پایداری و قابلیت تعمیم، مناسب‌ترین گزینه برای تهیه‌سازی نفوذ آب در خاک‌های منطقه مورد مطالعه بودند. انتظار می‌رود نتایج این پژوهش به انتخاب مدل مناسب نفوذ آب به خاک کمک کند و به عنوان ابزاری کاربردی در مدیریت پایدار منابع آب و خاک، طراحی کارآمد سیستم‌های آبیاری و اجرای موفق پروژه‌های آبخیزداری در مناطق حساس به فرسایش نیمه‌خشک مورد استفاده قرار گیرد.

## پیشنهادها

با توجه به عملکرد برتر مدل‌های تجربی ساده در این پژوهش، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده از رویکردهای ترکیبی شامل مدل‌های تجربی کلاسیک و روش‌های یادگیری ماشین به منظور بهبود دقت پیش‌بینی نفوذ آب در خاک‌های مناطق نیمه‌خشک استفاده شود. همچنین اثر ویژگی‌هایی نظیر پایداری خاکدانه‌ها، تخلخل مؤثر، پیوستگی منافذ و رطوبت اولیه خاک، که در این پژوهش به صورت مستقیم بررسی نشدند، بر عملکرد معادلات نفوذ در مطالعات آتی مورد ارزیابی قرار گیرد.

## REFERENCES

- Assouline, S. (2013). Infiltration into soils: Conceptual approaches and solutions. *Water Resources Research*, 49(4), 1755-1772.
- Assouline, S., & Mualem, Y. (2002). Infiltration during soil sealing: The effect of areal heterogeneity of soil hydraulic properties. *Water Resources Research*, 38(12), 22-1.
- ASTM (2009). D3385-09, *Standard test method for infiltration rate of soils in field using double-ring infiltrometer*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Batoukhteh, F., Khoshravesh, M., & Dehghanisani, H. (2021). Evaluating Some Infiltration Models Under Different Soil Texture Classes and Land Uses. *Journal of Water Research in Agriculture*, 35(1), 73-87.
- Bayabil, H.K., Dile, Y.T., Tebebu, T.Y., Engda, T.A., & Steenhuis, T. S. (2019). Evaluating infiltration models and pedotransfer functions: implications for hydrologic modeling. *Geoderma*, 338, 159-169.
- Brady, N.C., & Weil, R.R. (2017). *The Nature and Properties of Soils*, 15th Edn (eBook).
- Chow, V.T., Maidment, D.R., & Larry, W. (1988). *Mays. Applied Hydrology*. International edition, MacGraw-Hill, Inc, 149.
- Collis-George N. (1977). Infiltration equations for simple soil systems. *Water Resources Research* 13(2): 395-403.

- Corwin, D.L. (2021). Climate change impacts on soil salinity in agricultural areas. *European Journal of Soil Science*, 72(2), 842-862.
- 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.
- de Oliveira, D.B.C., de Albuquerque Soares, W., & de Holanda, M.A.C.R. (2018). Analysis of Performance of One-dimensional Soil Water Infiltration Models. *Revista Águas Subterrâneas*, 32(1), 35-42.
- Faridah, S.N., Achmad, M., Jamaluddin, T. A., & Jasmira. (2023). Infiltration model of Mediterranean soil with clay texture.
- Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, 5, 383-411.
- Ghorbani Dashtaki, S., Homaei, M., Mahdian, M. H., & Kouchakzadeh, M. (2009). Site-dependence performance of infiltration models. *Water resources management*, 23(13), 2777-2790.
- Goodarzi, L., AKHOND, A. A. M., & Zarei, H. (2012). Evaluation and determination of infiltration models parameters in Oshtorinan plain.
- Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics* Academic Press. San Diego, CA.
- Hillel, D. (2003). *Introduction to environmental soil physics*. Elsevier.
- Holtan, H. N. (1961). A concept for infiltration estimates in watershed engineering (Vol. 41). *Agricultural Research Service, US Department of Agriculture*.
- Horton, R. E. (1940). An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. In *Soil science Society of America proceedings* Vol. 5, No. 399-417, p. 24.
- Huggins LF, Monke EJ. (1966). The mathematical simulation of the hydrology of small watersheds. Technical Report No. 1, Purdue Water Resources Research Centre, Lafayette.
- Huggins, L. F. (1966). *The mathematical simulation of the hydrology of small watersheds*. Purdue University.
- Javadi, A., & Ostad-Ali-Askari, K. (2023). Effect of different irrigation managements on infiltration equations and their coefficients. *CivilEng*, 4(3), 949-965.
- Klein, C., & Klein, V.A. (2014). Influence of soil management on water infiltration. *Revista Monografia ambiental- REMOA*, 13(5), 3915-3925.
- Kostiakov, A. N. (1932). On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. *Trans. 6th Cong. International. Soil Science, Russian Part A*, 17-21.
- Lewis, M. R. (1937). The rate of infiltration of water in irrigation-practice. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 18(2), 361-368.
- Mesele, H., Grum, B., Aregay, G., & Berhe, G.T. (2024). Evaluation and comparison of infiltration models for estimating infiltration capacity of different textures of irrigated soils. *Environmental Systems Research*, 13(1), 26.
- Milla, K., & Kish, S. (2006). A low-cost microprocessor and infrared sensor system for automating water infiltration measurements. *Computers and Electronics in Agriculture*, 53(2), 122-129.
- Mishra, S. K., & Singh, V. P. (2002). *SCS-CN-based hydrologic simulation package*.
- Mishra, S. K., & Singh, V. P. (2013). *Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology* (Vol. 42). Springer Science & Business Media.
- Mishra, S.K., Tyagi, J.V., & Singh, V.P. (2003). Comparison of infiltration models. *Hydrological processes*, 17(13), 2629-2652.

- Morbidegli, R., Corradini, C., Saltalippi, C., Flammini, A., Dari, J., & Govindaraju, R.S. (2018). Rainfall infiltration modeling: A review. *Water*, 10(12), 1873.
- Morbidegli, R., Saltalippi, C., Flammini, A., Cifrodelli, M., Picciafuoco, T., Corradini, C., & Govindaraju, R.S. (2017). In situ measurements of soil saturated hydraulic conductivity: Assessment of reliability through rainfall–runoff experiments. *Hydrological Processes*, 31(17), 3084-3094.
- Muneeraa, A.S., Naba Sayelba, K. & Hatem Kamalca, A. (2020). A comparative study to assess the suitable models for predicting the infiltration rate in an arid region. *Iraqi Journal of Civil Engineering* (2020) 014–001.
- Overton, D.E. (1966). Muskingum flood routing of upland streamflow. *Journal of Hydrology*, 4, 185-200.
- Page, A. L., Miller, R. H., & Keeney, D. R. (1982). *Methods of Soil Analysis*, part 2. Chemical and Microbiological Properties, 2.
- Parmesan, C., Morecroft, M.D., & Trisurat, Y. (2022). Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability (Doctoral dissertation, GIEC).
- Philip, J. R. (1969). Theory of infiltration. In *Advances in hydroscience* (Vol. 5, pp. 215-296). Elsevier.
- Pinheiro, A., Teixeira, L.P., & Kaufmann, V. (2009). Capacity of infiltration of water in a soil under different uses and practices of agricultural management. *Ambiente e agua, Taubaté*, 4(2), 188-199.
- Risse, L.M., Nearing, M.A., & Savabi, M.R. (1994). Determining the Green-Ampt effective hydraulic conductivity from rainfall-runoff data for the WEPP model. *Transactions of the ASAE*, 37(2), 411-418.
- Roger E. Smith, Keith R.J. Smettem, Philip Broadbridge, D.A. Woolhiser Smith, R. E. (2002). *Infiltration theory for hydrologic applications*. American Geophysical Union.
- Rome, F. (2017). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO); 2017. The future of food and agriculture: trends and challenges.[Google Scholar].
- Saadi-Khani, M.R., & Sohrabi, A., (2017). Effect of Land Use on the Performance of selected soil water Infiltration Models. *Soil Management and Sustainable Production*, 7(1), 127-138.
- Sadeghi, S.H., Loescher, H.W., Jacoby, P.W., & Sullivan, P.L. (2024). A simple, accurate, and explicit form of the Green–Ampt model to estimate infiltration, sorptivity, and hydraulic conductivity. *Vadose Zone Journal*, 23(4), e20341.
- Santos, T.E.D., Souza, E.R.D., & Montenegro, A.A. (2016). Modeling of soil water infiltration with rainfall simulator in different agricultural systems. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(6), 513-518.
- Seneviratne, S.I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Luca, A.D., & Allan, R. (2021). Weather and climate extreme events in a changing climate.
- Sihag, P., Tiwari, N.K., and Ranjan, S. (2017a). Estimation and intercomparison of infiltration models. *Water Science*, Vol. 31, No. 1, pp. 34-43.
- Soil Survey Staff. (2014). *Keys to Soil Taxonomy* (12th ed.). USDA-Natural Resources Conservation Service.
- Šimanský, V., & Lukac, M. (2025). Interactions between soil texture and cover crop diversity shape carbon dynamics and aggregate stability. *Land*, 14(10), 2044.
- Šimůnek, J., Van Genuchten, M.T., & Šejna, M. (2016). Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages. *Vadose zone journal*, 15(7), vzj2016-04.
- Singh, V.P., & Yu, F.X. (1990). Derivation of infiltration equation using systems approach. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 116(6), 837-858.
- Smith, R. E. (2002). *Infiltration theory for hydrologic applications*. American Geophysical Union.

- Smith, R.E., Corradini, C., & Melone, F. (1999). A conceptual model for infiltration and redistribution in crusted soils. *Water Resources Research*, 35(5), 1385-1393.
- Swartzendruber, D. (1987). A quasi-solution of Richards' Equation for the downward infiltration of water into soil. *Water Resources Research*, 23(5), 809-817.
- Thomas, G.W. (1996). Soil pH and soil acidity. p. 475- 490. In: D.L. Sparks et al. (eds.). *Method of Soil Analysis. Part 3. 3rd ed. Chemical and Microbiological Properties*. ASA and SSSA, Madison, WI, USA.
- United States Department of Agriculture (USDOA). (2019, March.) Soil Infiltration [Online]. Available from <https://agcrops.osu.edu/newsletter/corn-newsletter/2018-03/soil-infiltration>. 2018.
- USDA, S. (1972). *National engineering handbook, section 4: Hydrology*. Washington, DC, 127.
- Soil Survey Staff. (2022). *Keys to Soil Taxonomy (13th ed.)*. USDA-Natural Resources Conservation Service.
- Vaezi, A.R. and Salehi, Y. (2020). The Efficiency of water infiltration models in different land uses of the tahamchai catchment. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(5), 1281-1291.
- Vereecken, H., Weihermüller, L., Assouline, S., Šimůnek, J., Verhoef, A., Herbst, M., & Xue, Y. (2019). Infiltration from the pedon to global grid scales: An overview and outlook for land surface modeling. *Vadose Zone Journal*, 18(1), 1-53.
- Vishwakarma, D.K., Yadav, D., Kumar, R., Kumar, R., Bhat, S.A., Mirzania, E., & Kuriqi, A. (2025). Assessing the performance of various infiltration models to improve water management practices. *Paddy and Water Environment*, 23(1), 77-93.
- Walkley, A. & Black, I.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38.
- Wang, D., Wang, Z., Zhang, J., Zhou, B., Lv, T., & Li, W. (2021). Effects of soil texture on soil leaching and cotton (*Gossypium hirsutum* L.) growth under combined irrigation and drainage. *Water*, 13(24), 3614.
- Williams, J.R., Ying, O., Chen, J.S., & Ravi, V. (1998). Estimation of infiltration rate in the vadose zone: Application of selected mathematical models. Volume 2 (No. PB-98-147317/XAB). ManTech Environmental Technology, Inc., Research Triangle Park, NC (United States); Dynamac Corp., Ada, OK (United States); National Risk Management Research Lab., Subsurface Protection and Remediation Div., Ada, OK (United States).
- 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.