Journal of Iranian Water Engineering Research

Research Article, P. 63-76
https://doi.org/10.22034/ijwer.2025.521972.1084

Hydraulic conductivity of soil and the physical, chemical, and biological factors influencing on

Maryam Ghorbani[1*], **Ebrahim Shirmohammdi**[1]

[1]Assistant Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

Corresponding Author's E-mail: Maryamghorbani@uoz.ac.ir

Received: 07 May 2025 Accepted: 05 Aug. 2025
Revised: 04 June 2025 Published: 09 Oct. 2025

Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: Soil hydraulic conductivity is one of the most important physical properties of soil, indicating the soil's ability to transmit water under a hydraulic gradient. Knowledge of hydraulic conductivity plays a key role in water resources management, the design of irrigation and drainage systems, prediction of water infiltration, and control of groundwater pollution. Various physical, chemical, and biological factors affect the hydraulic conductivity of soil. Soil texture, as a physical factor, has a direct impact on hydraulic conductivity. Sandy soils often have high hydraulic conductivity due to their large and continuous pores, but they have low water retention capacity. Salts, as one of the chemical factors, alter soil structure through two pathways: physical (such as pore blockage caused by salt precipitation) and chemical (such as clay dispersion by sodium), thereby affecting water flow, permeability, and hydraulic conductivity of the soil.

Keywords: Organic matter, Salts, Soil pores, Soil texture.

Introduction: Soil hydraulic conductivity (K) is one of the most important physical properties of soil, indicating the soil's ability to transmit water under a hydraulic gradient. It is mathematically defined by Darcy's law (Equation (1): $i = K * dZ/dh$), where 'i' is the volumetric flux, 'K' is the hydraulic conductivity coefficient, and 'dZ/dh' is the hydraulic gradient. Hydraulic conductivity coefficient depends on both the physical properties of the soil matrix and the characteristics of the fluid. When the soil is fully saturated, it is termed saturated hydraulic conductivity (K_{sat}), a crucial parameter for predicting water infiltration, drainage, and solute transport in environmental, agricultural, and engineering applications (Carrick et al., 2011; Usowicz and Lipiec, 2021). Hydraulic properties are key indicators for understanding water behaviour in soil and play a determining role in sustainable land and water management. These properties, including moisture retention and hydraulic conductivity, are influenced by complex interactions of the soil's physical, chemical, and biological characteristics (Lin, 2003; Das Gupta et al., 2006; Usharani et al., 2019). Understanding these relationships is essential for analysing subsurface flow, designing irrigation/drainage systems, optimizing agricultural productivity, and predicting phenomena like flooding and groundwater contamination (Deb & Shukla, 2012; Gamie & De Smedt, 2018; Usowicz and Lipiec., 2021). Factors such as soil texture, bulk density, porosity, structure, organic matter, and land management significantly affect hydraulic conductivity.

Methidology: This study employed a systematic review methodology for the collection and analysis of references. The requisite data and findings were extracted by searching databases such as Web of Science, Scopus, and others, using keywords relevant to hydraulic conductivity. The final article selection criteria focused on empirical and modeling studies related to factors influencing soil hydraulic conductivity. Ultimately, from the gathered pool of articles, 64 scientific references (spanning from 1984 to 2024) were selected for the development of this paper. Over 50 percent of these sources were published in top-tier and mid-tier journals with high to good impact factors, including, but not limited to: Earth-Science Reviews, Environment International, Science of The Total Environment, Journal of Hydrology, Geoderma, Hydrology and Earth System Sciences, Geophysical Research Letters, Water Resources Research, Soil Science Society of America Journal, Vadose Zone Journal, Soil & Tillage Research, Frontiers in Plant Science, Scientific Reports, Plant and Soil, European Journal of Soil Science, Soil Use and Management, Journal of Soils and Sediments, Pedosphere, Hydrological Processes, Journal of Soil

Science and Plant Nutrition, Geocarto International, Land, and Agriculture. These references were utilized to examine research progress trends, identify key influential factors, and formulate a comprehensive synthesis of the subject.

Rezults and Discussion: Among the physical factors, soil texture plays the most important role; sandy soils with larger particles have higher hydraulic conductivity and lower water retention capacity, while clay soils, due to smaller particles and higher porosity, have lower conductivity (Cosby et al., 1984; Jarvis et al., 2013). Soil bulk density and porosity, especially pore connectivity, have a strong impact on saturated hydraulic conductivity; increasing soil compaction leads to an exponential decrease in hydraulic conductivity (Assouline, 2006). The Kozeny-Carman and Assouline models explain this relationship well. Among biological factors, plant roots and the activity of soil organisms such as earthworms and termites improve soil pore structure, leading to increased porosity and permeability (Tang et al., 2024; Kutílek and Jendele, 2008). Additionally, soil organic matter, especially biochar, contributes to enhancing hydraulic conductivity by increasing microbial activity and strengthening soil structure, although high amounts of it can cause pore blockage and reduce conductivity (Steiner et al., 2007; Rawls et al., 2004). The effect of biochar depends on the soil type, its origin, and the pyrolysis temperature (Zhang et al., 2016; Brockhoff et al., 2010). In the realm of chemical factors, soil salts, especially sodium ions, play an important role. Sodium causes dispersion of clay particles and deterioration of soil structure, leading to a decrease in hydraulic conductivity (Choudary et al., 2023). The effects of salts are complex and nonlinear; at moderate concentrations, conductivity may increase somewhat due to temporary structural stabilization, but at high concentrations, severe clay dispersion occurs, causing a decrease in conductivity (Zhang et al., 2024). New models, such as the one by Kramer et al. (2021), incorporate the phenomenon of moisture hysteresis to better model the irreversible reduction in hydraulic conductivity, providing improved opportunities for sustainable management of saline and sodic soils. The change in pH caused by alkaline compounds can have a dual effect on hydraulic conductivity; within certain ranges, it can improve conductivity, but at higher levels, it can lead to soil structure degradation and decreased hydraulic conductivity (Ali et al., 2021). Therefore, a comprehensive understanding of the interactions among physical, biological, and chemical factors, with special attention to soil texture, organic matter, and chemical properties, is essential for the optimal and sustainable management of soil and water resources.

Conclusion: The hydraulic conductivity of soil is affected by several factors, including texture, bulk density, living organisms, organic matter, soil management, salinity, and chemicals. In other words, any factor that alters the characteristics of soil pores and the fluid (water) can also change the hydraulic conductivity. To maintain and improve hydraulic conductivity, sustainable soil management, reduced compaction, increased organic matter, and salinity control are essential.

© 2023 University of Zabol, Zabol, Iran.

This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

نشریه علمی
پژوهش‌های مهندسی آب ایران

مقاله پژوهشی، ص ۷۶-۶۳
https://doi.org/10.22034/ijwer.2025.521972.1084

هدایت هیدرولیکی خاک و عوامل فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی موثر بر آن

مریم قربانی[1]*، ابراهیم شیرمحمدی[1]

[1]استادیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: Maryamghorbani@uoz.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۴
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۴ تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۷/۱۷
وبگاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir

چکیده: هدایت هیدرولیکی خاک یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی خاک است که نشان‌دهنده توانایی خاک در انتقال آب تحت تاثیر گرادیان هیدرولیکی است. آگاهی در مورد هدایت هیدرولیکی نقش کلیدی در مدیریت منابع آب، طراحی سیستم‌های آبیاری و زهکشی، پیش‌بینی نفوذ آب و کنترل آلودگی آب‌های زیرزمینی دارد. عوامل گوناگون فیزیکی، شیمیایی و زیستی بر هدایت هیدرولیکی خاک موثر هستند. بافت خاک به‌عنوان یک عامل فیزیکی تاثیر مستقیمی بر هدایت هیدرولیکی دارد. غالبا خاک‌های شنی به دلیل منافذ درشت و پیوسته، هدایت هیدرولیکی بالا؛ اما ظرفیت نگهداشت آب کمی دارند. نمک‌ها به‌عنوان یکی از عوامل شیمیایی از دو مسیر فیزیکی (مانند انسداد منافذ خاک ناشی از رسوب نمک) و شیمیایی (مانند پراکندگی رس‌ها توسط سدیم) ساختار خاک را تغییر می‌دهند و بر جریان آب، نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی خاک تاثیر می‌گذارند. برای حفظ و بهبود هدایت هیدرولیکی، مدیریت پایدار خاک، کاهش فشردگی، افزایش ماده آلی و کنترل شوری ضروری است.

کلید واژگان: املاح، بافت خاک، ماده آلی، منافذ خاک.

۱- مقدمه

هدایت هیدرولیکی، ویژگی از مواد متخلخل از جمله خاک‌ها است که نشان‌دهنده سهولت جریان آب از طریق فضاهای متخلخل یا شبکه‌های شکستگی تحت تاثیر گرادیان هیدرولیکی می‌باشد. ویژگی‌های هیدرولیکی خاک اساس مطالعه حرکت آب در خاک و انتقال املاح هستند (Carrick et al., 2011). این کمیت به‌صورت نسبت شار حجمی آب عبوری به گرادیان هیدرولیکی تعریف می‌شود و براساس قانون دارسی به شکل ریاضی زیر (رابطه (۱)) بیان می‌گردد:

$$i = K.\frac{dZ}{dh} \qquad (1)$$

که در آن: i نمایانگر شار حجمی جریان آب (حجم آب عبوری در واحد زمان بر واحد سطح)، K هدایت هیدرولیکی (ضریب نفوذپذیری هیدرولیکی) که به ویژگی‌های فیزیکی ماده و خواص سیال وابسته است، $\frac{dZ}{dh}$ گرادیان هیدرولیکی (میزان تغییر ارتفاع هیدرولیکی نسبت به طول مسیر جریان) می‌باشد. ضریب هدایت هیدرولیکی (K) به ویژگی‌های خاک مثل میزان نفوذپذیری ذاتی آن، همچنین به خصوصیات آب مانند چگالی، غلظت و میزان اشباع خاک

بستگی دارد.

وقتی خاک کاملا اشباع باشد، مقدار هدایت هیدرولیکی را هدایت هیدرولیکی اشباع (K_{sat}) می‌نامند که نشان‌دهنده سرعت حرکت آب در این شرایط است. این مقدار برای پیش‌بینی چگونگی نفوذ آب به داخل خاک، تخلیه آب اضافی و انتقال مواد محلول در خاک در زمینه‌هایی مثل محیط زیست، کشاورزی و مهندسی بسیار مهم و کاربردی است (Usowicz and Lipiec., 2021). باید توجه داشت که خواص هیدرولیکی خاک به‌عنوان شاخص‌های کلیدی در درک رفتار آب و انتقال آن در محیط متخلخل خاک، نقش تعیین‌کننده‌ای در مدیریت پایدار منابع آب و خاک ایفا می‌کنند. این خواص که شامل نگهداشت رطوبت، هدایت هیدرولیکی و نرخ نفوذپذیری هستند، تحت تاثیر عوامل پیچیده‌ای از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک قرار می‌گیرند (Lin, 2003; Das Gupta et al., 2006; Usharani et al., 2019).

درک روابط متقابل بین این پارامترها نه‌تنها برای تحلیل جریان آب زیرسطحی، طراحی سیستم‌های زهکشی، مطالعات هیدرولوژیکی، بهینه‌سازی سیستم‌های آبیاری و افزایش بهره‌وری کشاورزی ضروری است؛ بلکه در پیش‌بینی و مهار پدیده‌هایی مانند سیلاب، فرسایش و آلودگی آب‌های زیرزمینی نیز نقش کلیدی ایفا می‌کند (Deb & Shukla, 2012; Maalim & Melesse, 2013; Gwak & Kim, 2017; Gamie & De Smedt, 2018; Usowicz and Lipiec., 2021).

علاوه بر این، خواص هیدرولیکی خاک به‌عنوان پل ارتباطی بین چرخه هیدرولوژیکی و اکوسیستم‌های خاکی عمل می‌کنند. نگهداشت رطوبت که بیانگر توانایی خاک در حفظ آب در مقابل نیروهای مکشی است، مستقیما بر دسترسی گیاه به آب تاثیر نیز می‌گذارد (Bitterlich et al., 2018). همچنین هدایت هیدرولیکی تحت تاثیر بافت، جرم مخصوص ظاهری و تخلخل، ساختمان خاک، موجودات زنده، ماده آلی، مدیریت و تغییرات کاربری اراضی، شوری و مواد شیمیایی قرار دارد (Keesstra et al., 2018; Guo et al., 2022; Robinson et al., 2022; Zhong et al., 2022; Beck-Broichsitter et al., 2023; Gupta et al.,2024; Tang et al., 2024; Zhang et al., 2024). شکل ۱ عوامل موثر بر هدایت هیدرولیکی را نشان می‌دهد.

هدف از این مقاله مروری، معرفی عوامل کلیدی موثر بر هدایت هیدرولیکی خاک و شناسایی ارتباط این عوامل با یکدیگر برای جمع‌بندی دانش موجود در راستای کمک به پیش‌بینی و مدل‌سازی دقیق‌تر آن است.

۲- روش‌شناسی

در این مطالعه، یک روش مرور نظام‌مند برای جمع‌آوری و تحلیل منابع به کار گرفته شد. داده‌ها و یافته‌های مورد نیاز از طریق جستجو در پایگاه‌های اطلاعاتی Web of Science، Scopus و ... با استفاده از کلیدواژه‌های مرتبط با هدایت هیدرولیکی استخراج گردید. معیار انتخاب نهایی مقالات، تمرکز بر مطالعات تجربی و مدل‌سازی مرتبط با عوامل موثر بر هدایت هیدرولیکی خاک بود. در نهایت، از میان مقالات جمع‌آوری‌شده، ۶۴ منبع علمی (از سال ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۴) برای تدوین مقاله انتخاب شدند. بیش از ۵۰ درصد از این منابع در مجلات برتر و میانی با ضریب تاثیر عالی تا خوب چاپ شده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به Earth-Science Reviews، Environment International، Science of The Total Environment، Journal of Hydrology، Geoderma، Hydrology and Earth System Sciences، Geophysical Research Letters، Water Resources Research، Soil Science Society of America Journal، Vadose Zone Journal، Soil & Tillage Research، Frontiers in Plant Science، Scientific Reports، Plant and Soil، European Journal of Soil Science، Soil Use and Management، Journal of Soils and Sediments، Pedosphere، Pedosphere، Hydrological Processes، Journal of Soil Science and Plant Nutrition، Geocarto International، Land، Agriculture و ... اشاره کرد. به Earth-Science Reviews، Environment International، Science of The Total Environment، Journal of Hydrology و Geoderma اشاره کرد. این منابع برای بررسی روند پیشرفت پژوهش‌ها، شناسایی عوامل کلیدی موثر و تدوین جمع‌بندی جامعی از موضوع مورداستفاده قرار گرفتند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- عوامل فیزیکی

بافت خاک

توزیع ذرات شن، سیلت و رس در خاک (بافت خاک) یکی از تعیین‌کننده‌ترین عوامل خواص هیدرولیکی خاک محسوب می‌شود. مشخصه خاک‌های شنی، هدایت هیدرولیکی بالا و ظرفیت نگهداشت رطوبت پایین می‌باشد. در حالی که در خاک‌های رسی هدایت هیدرولیکی کم و ظرفیت نگهداشت رطوبت بالا است. به‌عبارت دیگر توزیع اندازه ذرات (PSD) برای درک این ویژگی‌ها بسیار مهم است. خاک‌های شنی که ذرات بزرگ‌تری دارند، تخلیه سریع آب را فراهم، اما آب کمتری را حفظ می‌کنند. در مقابل خاک‌های رسی با ذرات کوچک‌تر (به دلیل سطح بیشتر و تخلخل زیاد) آب بیشتری را نگهداری می‌نمایند. همچنین این خاک‌ها دارای هدایت هیدرولیکی کمتری در ماتریس خاک هستند (Cosby et al., 1984; Crespo et al., 2011; Jarvis et al., 2013; García-Gutiérrez et al., 2018).

Bittelli و همکاران (۲۰۱۵) در طی آزمایشی نشان دادند هدایت هیدرولیکی در خاک‌های شنی ۲۹ سانتی‌متر در ساعت، در خاک لوم رسی ۰/۰۹۱ سانتی‌متر در ساعت (بیش از ۳۰۰ برابر کمتر از خاک شنی) و در خاک‌های لومی در حدود ۴/۱ سانتی‌متر در ساعت بود. بنابراین بافت خاک به‌شدت بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک تاثیر می‌گذارد، اما طبقه‌بندی بافت به‌تنهایی پیش‌بینی کننده مناسبی نیست، زیرا تغییرپذیری زیادی در پارامترهای هیدرولیکی در یک گروه بافتی خاک وجود دارد (Gutmann & Small, 2005).

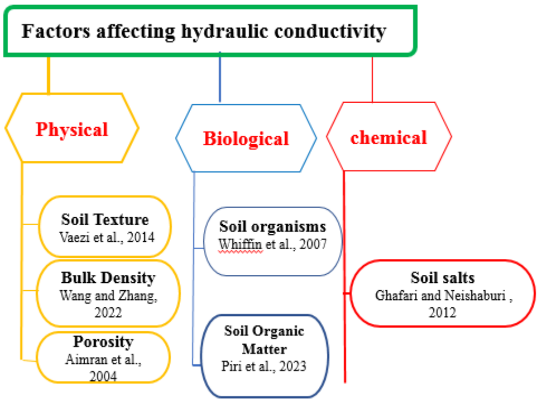
Factors affecting hydraulic conductivity
Physical
Biological
chemical
Soil Texture
Vaezi et al., 2014
Bulk Density
Wang and Zhang, 2022
Porosity
Aimran et al., 2004
Soil organisms
Whiffin et al., 2007
Soil Organic Matter
Piri et al., 2023
Soil salts
Ghafari and Neishaburi , 2012

Fig. 1 Factors affecting hydraulic conductivity

شکل ۱ عوامل موثر بر هدایت هیدرولیکی

خاک‌های شنی رفتار هیدرولیکی متمایزی دارند، اما بیشتر خاک‌ها تغییرپذیری درون‌گروهی قابل‌توجهی در پارامترهایی مانند وان‌گنوختن نشان می‌دهند که حرکت رطوبت را کنترل می‌کند (Schaap and Leij, 1998; Gutmann & Small, 2005). البته هدایت هیدرولیکی در نمونه‌های مختلف خاک و حتی از عمق‌های متفاوت یک خاک همیشه همبستگی قوی با بافت خاک ندارد. به‌عنوان مثال Jarvis و همکاران (۲۰۱۳) بیان کردند که هدایت هیدرولیکی اشباع در لایه سطحی خاک (عمق کمتر از ۳۰ سانتی‌متر) ارتباط ضعیفی با بافت خاک دارد. در عوض این ویژگی بیشتر به جرم مخصوص ظاهری خاک، محتوای کربن آلی و کاربری اراضی وابسته است.

جرم مخصوص ظاهری و تخلخل

جرم مخصوص ظاهری خاک به‌طور قابل‌توجهی بر هدایت هیدرولیکی تاثیر می‌گذارد و با تغییر اتصال منافذ و توزیع اندازه آن‌ها، هدایت هیدرولیکی اشباع را کاهش می‌دهد. خاک‌های همگن با جرم مخصوص ظاهری بالاتر در مقایسه با خاک‌های کم‌تراکم، به علت فشردگی منافذ درشت، کاهش قابل‌توجهی در هدایت هیدرولیکی اشباع نشان می‌دهند (Dec et al., 2008; Jarvis et al., 2013). معادله کوزنی و کارمن (رابطه (۲)) و مدل تابع هدایت هیدرولیکی آسولین (رابطه (۳)) به‌خوبی این روابط را توصیف می‌کنند و نشان می‌دهند که تراکم، عمدتا هدایت هیدرولیکی اشباع را کاهش می‌دهد (Assouline, 2006).

$$K=\frac{180\mu\,(1-\epsilon)^2}{{\Phi_s}^2{D_p}^2\epsilon^3} \qquad (2)$$

که در رابطه بالا: K هدایت هیدرولیکی اشباع، μ ویسکوزیته سیال، ϵ تخلخل بستر، Φ_s میزان کرویت ذرات بستر، D_p قطر ذرات کروی.

$$K_s = K_0 \times \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^n \qquad (3)$$

که در آن: K_s هدایت هیدرولیکی اشباع تحت تراکم، K_0 هدایت هیدرولیکی اشباع اولیه (بدون تراکم)، ϕ تخلخل خاک تحت تراکم، ϕ_0 تخلخل اولیه و n یک نمای متناسب با نوع خاک و شرایط است. این مدل نشان می‌دهد که با کاهش تخلخل (افزایش تراکم)، هدایت هیدرولیکی به‌صورت نمایی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر تراکم عمدتا هدایت هیدرولیکی اشباع را کاهش می‌دهد. مدل کوزنی-کارمن بر اساس ویژگی‌های فیزیکی ذرات و تخلخل، هدایت هیدرولیکی را دقیق و جزئی توصیف می‌کند، اما مدل آسولین یک فرمول تجربی ساده است که کاهش هدایت را فقط براساس تغییر تخلخل بیان می‌کند. به عبارتی، کوزنی-کارمن عمیق‌تر و بر پایه پارامترهای ساختاری است، در حالی که آسولین بیشتر روند کلی کاهش هدایت را نشان می‌دهد.

ترکیب پارامترهای هیدرولیکی و مکانیکی (مانند توزیع و اتصال شبکه منافذ و مقاومت خاک) به درک بهتر نفوذپذیری و انتقال آب در خاک کمک می‌کند. بین پتانسیل جریان آب در خاک و پخشیدگی رطوبت رابطه مستقیمی وجود دارد؛ و مقاومت مکانیکی خاک بر رفتار هیدرولیکی خاک، به‌خصوص در منافذ درشت و متوسط بیشتر تاثیر می‌گذارد. همچنین فشردگی، کاهش اتصال منافذ و افزایش اعوجاج، کارایی هیدرولیکی خاک‌ها را کاهش می‌دهند (Krümmelbein et al., 2006; Reszkowska et al., 2011; Beck-Broichsitter et al., 2023).

مواد آلی از جمله بیوچار می‌تواند در پایین آوردن جرم مخصوص ظاهری خاک موثر باشد. بیوچار ماده‌ای متخلخل با جرم مخصوص ۰/۰۵ تا ۰/۵۷ کیلوگرم بر مترمکعب است که این مقدار کمتر از جرم مخصوص ظاهری خاک‌های معدنی است. Laird و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند در خاک سیلتی، افزودن ۲۵ گرم بیوچار به ازای هر کیلوگرم خاک، جرم مخصوص ظاهری را از ۱/۵۲ به ۱/۳۳ گرم بر سانتی‌مترمکعب کاهش داد.

۳-۲- عوامل زیستی

موجودات زنده خاک

گیاهان با سیستم ریشه‌ای خود، ساختار منفذهای درشت خاک و در نتیجه هدایت هیدرولیکی آن را افزایش می‌دهند. در این میان نیز ریشه‌های راست نسبت به ریشه‌های افشان، مقادیر تخلخل درشت‌منفذی، قطر منافذ درشت و اتصال کلی منافذ را بهتر افزایش می‌دهند. اما ریشه‌های افشان اغلب در افزایش تعداد منافذ درشت موثرتر هستند (Tang et al., 2024).

مطالعه Hayashi و همکاران (۲۰۰۶) نشان داد که خاک‌های دست‌نخورده جنگلی به دلیل فعالیت‌های بیولوژیکی، دارای ساختار منافذ یکنواخت‌تر با منافذ انتقالی بزرگ‌تر و هدایت اشباع بالاتری نسبت به خاک‌های دست‌خورده هستند. این خاک‌ها ظرفیت نگهداری آب بیشتری داشته و باعث افزایش شعاع میانه منافذ و کاهش انتشارپذیری آب می‌شوند و در نتیجه نفوذپذیری خاک بهبود می‌یابد (Hayashi et al., 2006).

حیوانات خاکزی نیز در فرآیندهای فیزیکی خاک بسیار تاثیرگذار هستند. موجوداتی مانند کرم‌های خاکی، موریانه‌ها، مورچه‌ها و انکیترئیدها با فعالیت‌هایی مانند حفاری، تولید مدفوع و انتقال مواد آلی و معدنی، بر ساختار خاک تاثیر می‌گذارند؛ و منافذ ساختاری را در خاک تولید می‌کنند. این فعالیت‌ها باعث افزایش تخلخل، نفوذپذیری آب، تهویه و پایداری خاکدانه‌ها می‌شوند؛ که نتیجه آن افزایش چشمگیر هدایت هیدرولیکی خاک است. زیرا منافذ ساختاری شعاع بزرگ‌تر و اتصال بهتری نسبت به منافذ زمینه‌ای دارند (Kutílek and Jendele, 2008).

افزودن بیوچار به خاک باعث افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌ها، به‌ویژه قارچ‌ها می‌شود که نقش مهمی در بهبود ساختار خاک دارند. افزایش فعالیت میکروبی و رشد قارچ‌ها به تشکیل خاکدانه‌ها کمک می‌کند که باعث افزایش پایداری ساختار خاک و ایجاد تخلخل بیشتر می‌شود (Steiner et al., 2007). همچنین، توسعه ریشه‌ها و هیف‌های قارچی به باز شدن منافذ خاک و کاهش جرم

مخصوص ظاهری آن کمک می‌کند (Oguntunde et al., 2008; Qin et al., 2016). این عوامل در افزایش هدایت هیدرولیکی خاک بسیار مهم هستند. البته همیشه موجودات زنده خاک اثرات مثبت بر هدایت هیدرولیکی خاک ندارند؛ و گاها سبب انسداد زیستی می‌شوند، که در آن رشد میکروبی نفوذپذیری خاک را کاهش داده یا قطع می‌کند (Zhong et al., 2022). مثلا رسوب‌دهی کربنات میکروبی منافذ خاک را مسدود کرده و پایداری خاک را افزایش می‌دهد، اما برای تشکیل موثر کلسیت به رطوبت مطلوب نیاز دارد (Zhang et al., 2023).

ماده آلی خاک

ماده آلی خاک به دلیل تاثیرات پیچیده‌اش بر ساختمان خاک و فرآیندهای تشکیل خاکدانه‌ها می‌تواند به‌صورت مثبت یا منفی بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک تاثیر بگذارد (Sullivan et al., 2022). ماده آلی با کمک به تشکیل خاکدانه‌ها و ایجاد منافذ مناسب، ساختمان خاک را تقویت می‌کند که این امر باعث افزایش نفوذپذیری آب و کاهش جریان رواناب سطحی می‌شود. در واقع این عمل جنبه مثبت اثر ماده آلی را بر هدایت هیدرولیکی خاک نشان می‌دهد. با این حال، ماده آلی ممکن است باعث انسداد منافذ خاک و کاهش تخلخل موثر شود که در نهایت منجر به کاهش هدایت هیدرولیکی می‌گردد. این تاثیر به‌ویژه زمانی که غلظت ماده آلی زیاد باشد، برجسته‌تر است، زیرا می‌تواند منجر به تشکیل لایه‌ای متراکم شود که جریان آب را محدود کند.

تاثیر دقیق ماده آلی بر هدایت هیدرولیکی به نوع خاک و ویژگی‌های ماده آلی موجود بستگی دارد. به‌عنوان مثال، خاک‌هایی با محتوای بالای رس نسبت به خاک‌های شنی بیشتر در معرض انسداد منافذ توسط ماده آلی قرار دارند (Priori et al., 2021; Sharma et al., 2023). Rawls و همکاران (۲۰۰۴) نشان دادند مقدار کربن آلی بر نگهداشت آب در خاک موثر است و این تاثیر در مقادیر رطوبتی نزدیک به ظرفیت زراعی نسبت به نقطه پژمردگی دائم بیشتر است. کربن آلی ساختار خاک را نیز بهبود می‌بخشد و باعث افزایش پایداری خاکدانه‌ها و افزایش ظرفیت جذب آب در نزدیکی نقطه ظرفیت زراعی می‌شود. آن‌ها همچنین گزارش کردند که گنجاندن داده‌های ماده آلی در مدل‌های پیش‌بینی، دقت مدل را به‌طور قابل‌توجهی افزایش و مقدار خطا را کاهش می‌دهد. این موضوع اهمیت توجه به ماده آلی را در مدل‌سازی‌های هیدرولیکی خاک نشان می‌دهد.

البته شایان‌ذکر است که استفاده از مقادیر دقیق شن، سیلت و رس نسبت به کاربرد طبقه‌بندی کلی بافت خاک، بهبود اندکی در پیش‌بینی نگهداشت آب ایجاد کرد، اما تاثیر ماده آلی به‌مراتب چشمگیرتر بود (Rawls et al., 2004).

Eusufzai و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند افزودن کمپوست، کاه برنج و خاک‌اره به خاک لوم رسی موجب بهبود قابل‌توجه ویژگی‌های هیدرولیکی و ساختار منافذ خاک شد. این اصلاحات نه‌تنها ظرفیت نگهداشت آب و هدایت هیدرولیکی را افزایش داد، بلکه با افزایش تعداد، اندازه و کارایی منافذ درشت و متوسط، حرکت آب در خاک را بهبود بخشید و در نتیجه کیفیت و بهره‌وری خاک ارتقا یافت. به‌طور خلاصه می‌توان گفت مقادیر متوسط ماده آلی می‌توانند ساختار خاک را بهبود بخشیده و حرکت آب را تسهیل کنند، در حالی که مقادیر زیاد می‌توانند اثر معکوس داشته باشند. Uzoma و همکاران (۲۰۱۱) در طی آزمایشی نشان دادند که کاربرد ماده آلی بیوچار هم می‌تواند در افزایش هدایت هیدرولیکی خاک موثر واقع شود. آن‌ها گزارش کردند بیوچار از طریق افزایش تخلخل کل خاک، مسیرهای جدیدی برای حرکت آب ایجاد می‌کند. البته این افزایش در انواع بافت‌های خاک صادق نیست. به طوری که Zhang و همکاران (۲۰۱۶) گزارش کردند افزودن بیوچار به خاک شنی، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک را کاهش داد. زیرا این ذرات با افزایش پیچیدگی مسیر حرکت آب (اعوجاج) و پر کردن منافذ بزرگ خاک، نفوذپذیری خاک را کاهش می‌دهند. به عبارت دیگر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک تحت تاثیر ترکیبی از نوع خاک، ویژگی‌های بیوچار (اندازه ذرات، منشأ ماده اولیه، دمای پیرولیز) و میزان مصرف بیوچار قرار می‌گیرد.

در رابطه با میزان مصرف بیوچار در خاک، Brockhoff و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند که افزودن بیوچار به نسبت

۲۵ درصد به خاک شنی مرتعی، رطوبت خاک در ناحیه ریشه را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داد، اما با افزایش میزان مصرف، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک کاهش یافت. دمای پیرولیز (Pyrolysis) بیوچار هم می‌تواند بر هدایت هیدرولیکی خاک موثر باشد. به‌طور مثال نتایج پژوهش‌های Lei و Zhang (۲۰۱۳) حاکی از آن است که در ساخت بیوچار با افزایش دمای پیرولیز، هدایت هیدرولیکی خاک به‌طور تدریجی افزایش یافت. به طوری که افزایش هدایت هیدرولیکی از ۲/۴۵ به ۲/۸۰ سانتی‌متر بر ساعت با افزودن بیوچار کود دامی و از ۳/۱۰ به ۳/۴۰ سانتی‌متر بر ساعت با افزودن بیوچار چوب را گزارش کردند. آن‌ها دلیل این امر را به افزایش پایداری و تخلخل بیوچار در دماهای بالاتر نسبت دادند. با این وجود اثر بیوچار بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک متناقض است.

۳-۳- عوامل شیمیایی

املاح خاک

یکی دیگر از عواملی که بر هدایت هیدرولیکی آب در خاک موثر است املاح و نمک‌های موجود در خاک می‌باشند. نمک‌ها از دو مسیر فیزیکی (مانند انسداد منافذ ناشی از رسوب نمک) و شیمیایی (مانند پراکندگی رس‌ها توسط سدیم) ساختار خاک را تغییر داده و بر جریان آب و نفوذپذیری خاک تاثیر می‌گذارند (Singh et al., 2023).

مطابق با داده‌های جهانی، حدود ۸۳۲/۲ میلیون هکتار از اراضی تحت تاثیر شوری قرار دارند که ۵۸۱ میلیون هکتار آن به‌طور خاص با غلظت‌های بالای سدیم مواجه است. این شرایط منجر به تخریب ساختار خاک از طریق پراکندگی ذرات رس و کاهش پایداری خاکدانه‌ها می‌شود که نهایتا هدایت هیدرولیکی خاک را دچار اختلال می‌کند (Choudary et al. 2023). Machado و Serralheiro (۲۰۱۷) گزارش کردند در مناطقی مانند داکوتای شمالی، که ۱/۹ میلیون هکتار از خاک‌های آن تحت تاثیر غلظت‌های بالای سدیم قرار دارند، بی‌ثباتی و تخریب ساختمان خاک رخ می‌دهد. به عبارت دیگر سدیم ضخامت لایه دوگانه پخشیده اطراف ذرات رس را افزایش می‌دهد و ساختار خاک را مختل می‌کند. این شرایط منجر به کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع، افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک، تشکیل پوسته سخت سطحی، تهویه نامناسب، رواناب، فرسایش و در نهایت کاهش بهره‌وری گیاهان می‌شود.

شایان‌ذکر است که نتایج متناقضی از اثر سدیم در خاک مشاهده شده است. به طوری که Olorunfemi و همکاران (۲۰۱۶) دریافتند که غلظت‌های بالاتر سدیم تمایل به افزایش ظرفیت نگهداری آب خاک دارند، در حالی که Rezaei و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که غلظت‌های سدیم تاثیری بر ظرفیت نگهداری آب خاک ندارند.

در مقابل آب شور، کاربرد آب شیرین می‌تواند در کاهش هدایت هیدرولیکی موثر باشد. براساس آزمایش‌های میدانی و آزمایشگاهی، Rezaei و همکاران (۲۰۲۱) دریافتند که استفاده از آب شیرین منجر به کاهش قابل‌توجه هدایت هیدرولیکی اشباع نسبت به آب شور (حاوی یون سدیم) شد. این کاهش به اثر ترکیبی پدیده‌های پراکندگی رس، انحلال کربنات کلسیم و ژیپس و تغییرات در ترکیب محلول نسبت داده شده است. در واقع، حضور یون سدیم در آب شور باعث پراکندگی ذرات رس و کاهش پایداری ساختار خاک می‌شود، اما آب شیرین (فاقد یون‌های سدیم و با ترکیب یونی متفاوت) این اثر را تشدید می‌کند و در نتیجه هدایت هیدرولیکی را بیشتر کاهش می‌دهد.

همچنین، تغییرات در انحلال کلسیم کربنات، ژیپس (سولفات کلسیم دوآبه) و تغییر ترکیب محلول خاک نیز در این فرآیند نقش دارند. Zhang و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند در یک خاک رسی سیلتی، با افزایش محتوای کلرید سدیم در خاک از ۲/۲ گرم بر کیلوگرم به ۱۴/۱ گرم بر کیلوگرم، هدایت هیدرولیکی اشباع ابتدا از ۰/۶۲ میلی‌متر بر ساعت به ۰/۷۷ میلی‌متر بر ساعت افزایش یافت و سپس به ۰/۶۸ میلی‌متر بر ساعت کاهش پیدا کرد.

این رفتار غیرخطی که ابتدا به‌صورت افزایش اولیه و سپس کاهش خود را نشان داد ناشی از دو مکانیسم رقابتی است؛ ۱) افزایش اولیه هدایت هیدرولیکی با غلظت‌های متوسط نمک ممکن است با کاهش پتانسیل پراکندگی رس‌ها، پایداری موقت ساختار خاک بهبود یافته باشد؛ و ۲) کاهش نهایی هدایت هیدرولیکی در غلظت‌های بالاتر کلرید سدیم

بدین علت است که اثرات منفی سدیم (مانند پراکندگی ذرات رس و مسدود شدن منافذ) غالب می‌شود. به عبارت دیگر این الگو نشان‌دهنده وجود یک آستانه بحرانی برای غلظت کلرید سدیم است که پس از آن، اثرات مخرب شوری بر هدایت هیدرولیکی تشدید می‌گردد (شکل ۲-آ). برای خاک لوم شنی یک همبستگی مثبت ضعیف بین غلظت کلرید سدیم و هدایت هیدرولیکی مشاهده گردید. هنگامی که غلظت کلرید سدیم از ۲/۳ گرم بر کیلوگرم به ۱۴/۶ گرم بر کیلوگرم افزایش یافت، هدایت هیدرولیکی از ۴۵/۴۴ میلی‌متر بر ساعت به ۵۸/۵۵ میلی‌متر بر ساعت رسید (شکل ۲-آ). رفتار افزایشی و کاهشی هدایت هیدرولیکی در خاک رسی سیلتی به دلیل حساسیت ذرات ریز (رس) به پراکندگی ناشی از سدیم است. اما رفتار افزایشی هدایت هیدرولیکی در خاک لوم شنی می‌تواند ناشی از کاهش چسبندگی ذرات و باز شدن منافذ در اثر حضور یون‌های سدیم باشد. این تفاوت‌ها اهمیت بافت خاک را در پیش‌بینی اثرات شوری بر ویژگی‌های هدایت هیدرولیکی خاک برجسته می‌کند. همچنین شایان‌ذکر است مدل‌های زیادی وجود دارند که عمدتا فرض می‌کنند فرآیندهای تخریب و بهبود خاک همراه با کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع در اثر شوری و سدیمی بودن خاک کاملا برگشت‌پذیر هستند؛ یعنی کاهش هدایت هیدرولیکی با تغییر خواص شیمیایی آب خاک به‌سادگی قابل بازگشت است (Ali et al., 2019). اما بعضی از پژوهشگران معتقدند که این فرض نادرست است؛ و پراکندگی رس که یکی از عوامل اصلی کاهش هدایت هیدرولیکی است، فرآیندی برگشت‌ناپذیر محسوب می‌شود (Ezlit et al., 2013). به همین دلیل، کاهش قابل‌توجه هدایت هیدرولیکی (بیش از ۱۵ تا ۲۵ درصد نسبت به مقدار اولیه) به‌عنوان آستانه‌ای برای آسیب جبران‌ناپذیر خاک در نظر گرفته می‌شود (Bennett et al., 2019).

همچنین شواهد تجربی که فرایندهای تخریب و بهبود را با هم بررسی کرده‌اند، نشان می‌دهد که تغییرات هدایت هیدرولیکی دارای رفتار پسماند رطوبتی در خاک (وابستگی به مسیر تغییرات) هستند و این رفتار ممکن است بسته به نوع خاک متفاوت باشد (Levy et al., 2005)؛ بنابراین، مدل‌های جدید باید تفاوت بین تخریب و بهبود خاک را در نظر بگیرند و فرآیندهای برگشت‌ناپذیر مانند پراکندگی رس را در تحلیل کاهش هدایت هیدرولیکی لحاظ کنند تا بتوانند رفتار واقعی خاک‌های شور و سدیمی را بهتر پیش‌بینی کنند. در همین راستا Kramer و همکاران (۲۰۲۱) نخستین مدل برای بررسی اثر آب شور و سدیمی بر هدایت

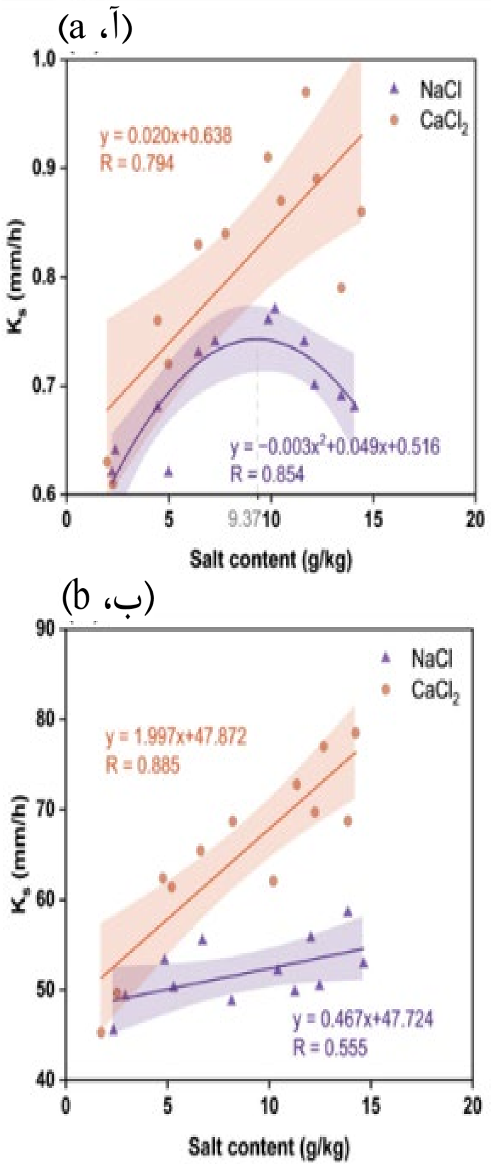

Fig. 2 Effects of sodium chloride (NaCl) and calcium chloride ($CaCl_2$) concentrations on the saturated hydraulic conductivity of soil for (a) silty clay soil and (b) sandy loam soil (Zang et al., 2024).

شکل ۲ اثرات مقادیر کلرید سدیم و کلرید کلسیم بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک برای (آ) خاک رسی سیلتی، و (ب) خاک لومی شنی (Zhang et al., 2024).

هیدرولیکی را ارائه دادند که پدیده پسماند رطوبتی در خاک را به‌طور صریح در نظر می‌گیرد. مدل معرفی‌شده برای نخستین بار به‌طور مستقیم اثرات آب‌های شور و سدیمی بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K_s) را با در نظر گرفتن پدیده هیسترسیس (پسماند رطوبتی) موردبررسی قرار می‌دهد. این مدل نشان می‌دهد که فرایند تخریب و ترمیم هدایت هیدرولیکی خاک به دلیل تغییر کیفیت آب کاملا قابل‌برگشت نیست و سوابق تغییرات شوری و سدیمی خاک تاثیر مهمی بر رفتار آینده آن دارد. با بهره‌گیری از تابع وزن، این مدل ویژگی‌های خاص هر نوع خاک مانند درصد رس را لحاظ کرده و میزان قابلیت برگشت‌پذیری هدایت هیدرولیکی را با شاخصی به نام قابلیت برگشت‌پذیری به‌صورت کمی اندازه‌گیری می‌کند. این روش امکان پیش‌بینی دقیق‌تر و مدیریت پایدارتر آسیب‌های خاک ناشی از آب شور و سدیمی را فراهم می‌آورد. برخلاف مدل‌های سنتی که فرض برگشت‌پذیری کامل دارند. این مدل با معرفی تابع وزن خاک و شاخص کمی قابلیت برگشت‌پذیری، اثرات غیرقابل‌برگشت ناشی از تغییرات شیمیایی آب و تاریخچه تخریب و بازسازی خاک را در نظر می‌گیرد و امکان مقایسه و پیش‌بینی دقیق‌تر تخریب خاک و مدیریت پایدار را فراهم می‌آورد. در مجموع، این مدل جدید می‌تواند ارزیابی ریسک تخریب خاک را بهبود بخشد، زیرا نشان می‌دهد چگونه تجمع رویدادهای کوچک تخریب می‌تواند به تخریب قابل‌توجه خاک منجر شود. همچنین امکان مقایسه کمی برگشت‌پذیری خاک‌های مختلف و شناسایی راهبردهای بهینه برای احیای خاک را فراهم می‌سازد. عدم در نظر گرفتن پدیده پسماند رطوبتی در خاک، توانایی پیش‌بینی این که آیا یک رژیم اقلیمی و آبیاری خاص منجر به تخریب بلندمدت زمین خواهد شد یا خیر را محدود می‌کند (Kramer and Mau, 2020). زمانی که حتی یک مکانیسم ساده پسماند رطوبتی در خاک در مدل‌ها لحاظ شود، نشان داده شده است که تغییرات در هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می‌تواند تجمعی باشد، به طوری که کاهش‌های کوچک اولیه در هدایت هیدرولیکی ممکن است به تخریب جدی منجر شود (Kramer and Mau, 2020).

با توجه به محدودیت منابع زمین و آب شیرین، استفاده بهینه از زمین از طریق بهره‌برداری از آب‌های شور و سدیمی احتمالا برای حفظ امنیت غذایی ضروری خواهد بود. با این حال، رسیدن به این هدف باید بدون ایجاد آسیب بلندمدت به خاک‌ها صورت گیرد.

همچنین، ترکیبات قلیایی از جمله کلسیم هیدروکسید و سدیم هیدروکسید با تغییر شیمیایی خاک، ساختار و عملکرد هیدرولیکی آن را تحت تاثیر قرار می‌دهند. مکانیسم اصلی این تاثیرات از طریق تغییر pH خاک و برهمکنش با ذرات رس اتفاق می‌افتد که می‌تواند اثرات متناقضی را موجب شود. به طوری که در pHهای بالا خاکدانه‌ها تشکیل می‌شوند که نفوذپذیری آب را بهبود بخشیده و هدایت هیدرولیکی را افزایش می‌دهد. با این حال، سطوح بسیار بالای pH می‌تواند باعث تخریب ذرات خاک و تشکیل لایه‌های متراکم شود که حرکت آب را محدود کرده و کاهش هدایت هیدرولیکی را به دنبال خواهد داشت (Ali et al. 2021).

۴- نتیجه‌گیری

هدایت هیدرولیکی خاک یکی از مهم‌ترین پارامترها در حفظ و بهبود کیفیت خاک و محیط زیست است. تنظیم آن به برهمکنش‌های اثر بافت، جرم مخصوص ظاهری و تخلخل، ساختمان خاک، موجودات زنده، ماده آلی، شوری و مواد شیمیایی بستگی دارد. در حقیقت این عوامل از طریق تاثیر بر ویژگی‌های منافذ خاک (حجم، اندازه، پیوستگی، اعوجاج منافذ) و نیز تاثیر بر خود سیال (چگالی و گرانروی آب)، ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را کنترل می‌کنند. درک این عوامل برای مدیریت پایدار خاک و احیای موثر محیط زیست ضروری است. با شناخت دقیق عوامل موثر و استفاده از روش‌های مدیریتی و فناوری‌های نوین، می‌توان به بهبود بهره‌وری خاک، حفاظت منابع آب و ارتقای سلامت اکولوژیکی دست یافت. این مسیر نیازمند تحقیقات بیشتر، آموزش و توسعه فناوری‌های نوین است تا بتوان به‌صورت پایدار از منابع خاک و آب بهره‌برداری کرد.

5- List of symboles

i ($m^3/(s.m^2)$)	Volumetric flux
K (m/s)	Saturated Hydraulic Conductivity
Ks (m/s)	Saturated hydraulic conductivity under consolidation

Acknowledgments

The authors sincerely thank the distinguished reviewers for dedicating their valuable time and providing insightful feedback, which significantly enhanced the quality of this manuscript.

Credit Authorship Contribution Statement

Conceptualization, M.G., E.S., and Writing-Original Draft Preparation, E.S., M.G., Writing-Review and Editing, E.S., M.G., Supervision, M.G., E.S.. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding

This research was funded by the University of Zabol (grant codes: IR-UOZ-GR-0801, IR-UOZ-GR-2742).

Data Availability Statement

Data generated or analyzed during this study are included in this article.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest

Refrences

Aimran, W., Amin, M.S.M and Eltaib,S.M. 2004. Effective porosity of paddy soils as an estimation of its saturated hydraulic conductivity. Geoderma. 121(3-4), 197-203. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.11.010

Ali, A.; Bennett, J. M.; Biggs, A. J. W. and Šimůnek, J. (2021). Development of a soil specific function for scaling hydraulic conductivity reduction using alkaline irrigation water in HYDRUS model. Paper presented at the 2021 Joint Australia and New Zealand Soil Science Conference, Cairns, Australia.

Ali, A., Biggs, A.J., Marchuk, A. and Bennett, J.M. (2019). Effect of Irrigation Water pH on Saturated Hydraulic Conductivity and Electrokinetic Properties of Acidic, Neutral, and Alkaline Soils. Soil Science Society of America Journal. https://doi.org/10.2136/sssaj2019.04.0123.

Assouline, S. (2006). Modeling the Relationship between Soil Bulk Density and the Hydraulic Conductivity Function. Vadose Zone Journal. 5, 697-705. https://doi.org/10.2136/vzj2005.0084.

Beck-Broichsitter, S., Schroeder, R., Mordhorst, A., Fleige, H. and Horn, R. (2023). Soil water diffusivity as function of the pore size distribution and precompression stress. Soil & Tillage Research, 229, 105675. https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105675.

Bennett, J. M., Marchuk, A., Marchuk, S. and Raine, S. R. (2019). Towards predicting the soil-specific threshold electrolyte concentration of soil as a reduction in saturated hydraulic conductivity: The role of clay net negative charge, Geoderma, 337, 122–131. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.08.030.

Bittelli, M., Campbell, G.S. and Tomei, F. (2015). Soil Physics with Python: Transport in the Soil–Plant–Atmosphere System. Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199683093.001.0001.

Bitterlich, M., Sandmann, M. and Graefe, J. (2018). Arbuscular Mycorrhiza Alleviates Restrictions to Substrate Water Flow and Delays Transpiration Limitation to Stronger Drought in Tomato. Frontiers in Plant Science, 9. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00154.

Brockhoff, S.R., Christians, N.E., Killorn, R.J., Horton, R. and Davis, D.D. (2010). Physical and Mineral-Nutrition Properties of Sand-Based Turfgrass Root Zones Amended with Biochar. Agronomy Journal. 102, 1627–1631. https://doi.org/10.2134/agronj2010.0188.

Carrick, S., Buchan, G., Almond, P. and Smith, N. (2011). Atypical early-time infiltration into a structured soil near field capacity: The dynamic interplay between sorptivity, hydrophobicity, and air encapsulation. Geoderma. 160(3-4), 579–589. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.11.006.

Choudary, Y. Sesha, Singh, K., Babu, T. S. Ramesh and Deepthi, G. (2023). Impact on Mechanical and Durable Properties of Rubber and Copper Slag-based Geo-polymer Mortar using Various Sodium Hydroxide Molarities and Proportions of Alkali Activator Solutions. Journal of Mining and Environment. 14(3), 853-870. https://doi.org/ 10.22044/jme.2023.12971.2354.

Cosby, B., Hornberger, G.M., Clapp, R.B. and Ginn, T.R. (1984). A Statistical Exploration of the Relationships of Soil Moisture Characteristics to the Physical Properties of Soils. *Water Resources Research, 20*, 682-690. https://doi.org/10.1029/WR020i006p00682.

Crespo, P., Bücker, A., Feyen, J., Breuer, L., Vaché, K.B. and Frede, H. (2011). Identification of the runoff generation processes in a montane cloud forest combining hydrometric data and mixing model analysis. Maskana. 2(1): 59-80. https://doi.org/10.18537/mskn.02.01.06.

Das Gupta, S., Mohanty, B.P. and Köhne, J. (2006). Soil Hydraulic Conductivities and their Spatial and Temporal Variations in a Vertisol. Soil Science Society of America Journal. 70 (6), 1872-1881. https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0201.

Deb, S.K. and Shukla, M.K. (2012). Variability of Hydraulic Conductivity Due to Multiple Factors. American Journal of Environmental Sciences, 8(5), 489-502. https://doi.org/10.3844/ajessp.2012.489.502.

Dec, D., Dörner, J., Becker-Fazekas, O. and Horn, R. (2008). Effect of Bulk Density on Hydraulic Properties of Homogenized and Structure Soils. Revista De La Ciencia Del Suelo Y Nutricion Vegetal, 8(1), 1-13. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912008000100001.

Eusufzai, M. K. and Fujii, K. (2012). Effect of Organic Matter Amendment on Hydraulic and Pore Characteristics of a Clay Loam Soil. Open Journal of Soil Science. 2(4), 372-381. https://doi.org/10.4236/ojss.2012.24044.

Ezlit, Y. D., Bennett, J. M., Raine, S. R. and Smith, R. J. (2013). Modification of the McNeal Clay Swelling Model Improves Prediction of Saturated Hydraulic Conductivity as a Function of Applied Water Quality, Soil Science Society of American Journal. 77, 2149. https://doi.org/10.2136/sssaj2013.03.0097.

Gamie, R. and De Smedt, F. (2018). Experimental and statistical study of saturated hydraulic conductivity and relations with other soil properties of a desert soil. European Journal of Soil Science, 69(2), 256-264. https://doi.org/10.1111/ejss.12519.

García-Gutiérrez, C., Pachepsky, Y.A. and Martín, M.A. (2018). Technical note: Saturated hydraulic conductivity and textural heterogeneity of soils. Hydrology and Earth System Sciences. 22(7), 3923-3932. https://doi.org/10.5194/hess-22-3923-2018.

Ghafari, H. and Neyshabouri, M.R. (2012). Salinity and sodicity effects of irrigation water on soil physical quality criteria. Journal of Water and soil. 26(1), 65-74 (In Farsi). https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.13630

Guo, Z., Li, P., Yang, X., Wang, Z., Lu, B., Chen, W., Wu, Y., Li, G., Zhao, Z., Liu, G., Ritsema, C.J., Geissen, V. and Xue, S. (2022). Soil texture is an important factor determining how microplastics affect soil hydraulic characteristics. Environment International. 165, 107293. https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107293.

Gupta, S.K., Kumar, M. and Srivastava, A.K. (2024). Hydraulic Conductivity of Soils: A Comprehensive Review of the Impacts of Chemicals, Soil Salinity, Organic Matter, and Land Use. IOP Conference Series. Earth and Environmental Science. 1327. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1327/1/012032.

Gutmann, E., & Small, E.E. (2005). The effect of soil hydraulic properties vs. soil texture in land surface models. Geophysical Research Letters, 32(2). https://doi.org/10.1029/2004GL021843.

Gwak, Y. and Kim, S. (2017). Factors affecting soil moisture spatial variability for a humid forest hillslope. Hydrological Processes, 31(2), 431 - 445. https://doi.org/10.1002/hyp.11039.

Hayashi, Y., Ken'ichirou, K. and Mizuyama, T. (2006). Changes in pore size distribution and hydraulic properties of forest soil resulting from structural development. Journal of Hydrology. 331(1-2), 85-102. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.05.003.

Jarvis, N., Koestel, J., Messing, I., Moeys, J. and Lindahl, A.M. (2013). Influence of soil, land use and climatic factors on the hydraulic conductivity of soil. Hydrology and Earth System Sciences, 17(12), 5185-5195. https://doi.org/10.5194/hess-17-5185-2013.

Keesstra, S., Mol, G., de Leeuw, J., Okx, J., de Cleen, M. and Visser, S. (2018). Soil-related sustainable development goals: Four concepts to make land degradation neutrality and restoration work. Land, 7(4), 133. https://doi.org/10.3390/land7040133.

Kramer, I., Bayer, Y., Adeyemo, T. and Mau, Y. (2021). Hysteresis in soil hydraulic conductivity as driven by salinity and sodicity–a modeling framework. Hydrology and Earth System Sciences. 25(4), 1993-2008. https://doi.org/10.5194/hess-25-1993-2021.

Kramer, I. and Mau, Y. (2020). Soil Degradation Risks Assessed by the SOTE Model for Salinity and Sodicity, Water Resources Research. 56 (10), e2020WR027456. https://doi.org/10.1029/2020WR027456.

Krümmelbein, J., Wang, Z., Zhao, Y., Peth, S. and Horn, R. (2006). Influence of various grazing intensities on soil stability and water balance of grassland soils in Inner Mongolia. Advances in GeoEcology. 38, 93–101.

Kutílek, M. and Jendele, L. (2008). The structural porosity in soil hydraulic functions – a review. Soil & Water Research, 3(Special Issue 1), S7–S20. Prague Institute of Technology, Prague, Czech Republic. https://doi.org/ 10.17221/1190-SWR.

Laird, D., Fleming, P., Wang, B.Q., Horton, R. and

Karlen, D. (2010). Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. Geoderma. 158 (3-4), 436–442. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.05.012.

Lei, O. and Zhang, R. (2013). Effects of biochars derived from different feedstocks and pyrolysis temperatures on soil physical and hydraulic properties. Journal of Soils and Sediments.13, 1561–1572. https://doi.org/10.1007/s11368-013-0738-7.

Levy, G.J., Goldstein, D. and Mamedov, A.I. (2005). Saturated Hydraulic Conductivity of Semiarid Soils: Combined Effects of Salinity, Sodicity, and Rate of Wetting. Soil Science Society of America Journal. 69 (3), 653-662. https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0232.

Lin, H. (2003). Hydropedology: Bridging Disciplines, Scales, and Data. Vadose Zone Journal. 2, 1 - 11. https://doi.org/10.2136/vzj2003.1000.

Maalim, F.K. and Melesse, A.M. (2013). Modelling the impacts of subsurface drainage on surface runoff and sediment yield in the Le Sueur Watershed, Minnesota, USA. Hydrological Sciences Journal, 58(3), 570 - 586. https://doi.org/10.1080/02626667.2013.774088.

Machado, R.M.A. and Serralheiro, R.P. (2017). Management Practices to Prevent and Mitigate Soil Salinization. 3(2), 30. https://doi.org/10.3390/horticulturae3020030.

Oguntunde, P.G., Abiodun, B.J., Ajayi, A.E. and van de Giesen, N. (2008). Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 171(4), 591–596. https://doi.org/10.1002/jpln.200625185.

Olorunfemi, I., Fasinmirin, J. and Ojo, A. (2016). Modeling Cation Exchange Capacity and Soil Water Holding Capacity from Basic Soil Properties. 5, 266–274. https://doi.org/10.18393/ejss.2016.4.266-274.

Piri, H., Mobaraki, M. and Mir, M. (2023). Comparison and application of random forest, CHAID and geostatistics models in predicting soil saturated hydraulic conductivity. Journal of Water and Soil Science. 10(2), 173-185. https://doi 10.22059/ije.2023.355562.1715.

Priori, S., Pellegrini, S., Vignozzi, N. and Costantini, E.A.C. (2021). “Soil Physical-Hydrological Degradation in the Root-Zone of Tree Crops: Problems and Solutions,”. Agronomy. 11(1), 68. https://doi: 10.3390/agronomy11010068.

Qin, X.B., Li, Y., Wang, H., Liu, C., Li, j., Wan, Y., Gao, Q., Fan, F., Liao, Y. (2016). Long-term effect of biochar application on yield-scaled greenhouse gas emissions in a rice paddy cropping system: A four-year case study in south China. Science of the Total Environment. (569-570), 1390–1401. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.222.

Rawls, W. J., Nemes, A. and Pachepsky, Ya. (2004). Effect of soil organic carbon on soil hydraulic properties. In: Pachepsky, Ya., Rawls, W.J. (Eds.), Soil Water Retention and Hydraulic Conductivity: Measurement, Methods, and Applications. Developments in Soil Science. Elsevier 30, pp. 95–114. https://doi.org/10.1016/S0166-2481(04)30006-1.

Reszkowska, A., Peth, S., Zhao, Y. and Gan, L. (2011). Influence of grazing on hydraulic properties of semiarid steppe soils. Plant and Soil. 340, 59–72. https://doi.org/10.1007/s11104-010-0405-3.

Rezaei, M., Shahbazi, K., Shahidi, R., Davatgar, N., Bazargan, K., Rezaei, H., Saadat, S., Seuntjens, P., Cornelis, W. (2021). How to Relevantly Characterize Hydraulic Properties of Saline and Sodic Soils for Water and Solute Transport Simulations. Journal Of Hydrology. 598, 125777. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125777.

Robinson, D.A., Nemes, A., Reinsch, S., Radbourne, A., Bentley, L. and Keith, A.M. (2022). Global Meta-Analysis of Soil Hydraulic Properties on the Same Soils with Differing Land Use. Science of The Total Environment. 852, 158506. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158506.

Schaap, M. and F. Leij. (1998). Database-related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions. Soil Science. 163, 765–779.

Sharma, A., Prakash, C., Goshu, E. L., & Sharma, R. (2023). An artificial intelligence based framework to analyze the landside risk of a mountainous highway. Geocarto International, 38(1). https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2186494.

Sheoran, S., Dahiya., R. Phogat, V.K. and Sheoran, H.S. (2019). Hydraulic Properties and Their Dependence on Physico-chemical Properties of Soils: A Review. Current Journal of Applied Science and Technology. 38(2), 1-7. https://doi.org/10.9734/CJAST/2019/v38i230355.

Singh, P., Sharma, S., Nisar, S. and Choudhary, O.P. (2023). Structural Stability and Organic Matter Stabilization in Soils: Differential Impacts of Soil Salinity and Sodicity. Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 23, 1751–1773. https://doi.org/10.1007/s42729-023-01136-3.

Steiner, C., Teixeira, W.G., Lehmann, J., Nehls, T., Luis, J., de Macêdo, V., Blum, W.E.H. and Zech, W. (2007). Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. Plant Soil. 291, 275–290. https://doi.org/10.1007/s11104-007-9193-9.

Sullivan, P.L., Billings, S.A., Hirmas, D., Li, L., Zhang, X., Ziegler, S., Murenbeeld, K., Ajami, H., Guthrie, A., Singha, K. et al. (2022). Embracing the Dynamic Nature of Soil Structure: A Paradigm Illuminating the Role of Life in Critical Zones of the Anthropocene. Earth-Science Reviews Journal. 225, 103873. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103873.

Tang, Y., Pan, H., Zhang, T., Cao, L. and Wang, Y. (2024). The Dynamics of Soil Macropores and Hydraulic Conductivity as Influenced by the Fibrous and Tap Root Systems. Agriculture, 14, 1676. https://doi.org/10.3390/agriculture14101676.

Usharani, K., Roopashree, K., Naik, D. (2019). Role of soil physical, chemical and biological properties for soil health improvement and sustainable agriculture. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry. 8(5), 1256-1267.

Usowicz, B., Lipiec, J. (2021). Spatial variability of saturated hydraulic conductivity and its links with other soil properties at the regional scale. Sci Rep 11, 8293. https://doi.org/10.1038/s41598-021-86862-3.

Uzoma, K.C., et al., Inoue, M., Andry, H., Fujimaki, H., Zahoor, A. and Nishihara, E. (2011). Effect of cow manure biochar on productivity under sandy soil condition. Soil Use Manage. 27, 205–212. https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00340.x.

Vaezi, A.R. (2014). Modeling runoff from semi-arid agricultural lands in Northwest Iran. Pedosphere 24(5), 595–604. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(14)60045-X.

Wang, L. and Zhang, X. (2022). Effects of soil bulk density on saturated hydraulic conductivity and soil water retention: A meta-analysis. Geoderma. 424, 115866. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115866.

Wang, Y. and Shi, B. (2023). Microbial‑induced carbonate precipitation (MICP) technology: a review on the fundamentals and engineering applications. Environmental Earth Sciences. 82(9), 229. https://doi.org/10.1007/s12665-023-10899-y.

Whiffin, V. S., van Paassen, L.A. and Harkes, M.P. (2007). Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique. Geomicrobiology Journal. 24(5), 417– 423. https://doi.org/10.1080/01490450701436505

Zhang, J., Chen, Q. and You, C.F. (2016). Biochar Effect on Water Evaporation and Hydraulic Conductivity in Sandy Soil. Pedosphere. 26(2), 265–272. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60041-8.

Zhang, K., Tang, C., Jiang, N., Pan, X.H., Liu, B., Zhang, X., Zuo, Y., Wang, T. and Han, Q. (2024). Salinity Effects on Soil Structure and Hydraulic Properties: Implications for Pedotransfer Functions in Coastal Areas. Land. 13(12):2077. https://doi.org/10.3390/land13122077

Zhong, M., Liu, B., Zhang, L., Wang, J., Chen, J., Li, J., Liu, Y. and Ming, L. (2022). Experimental Study on Microbial Induced Calcium Carbonate Precipitation to Enhance Reservoir Recovery. Iranian Journal of Biotechnology. 20 (1), e3024 - e3024. https://doi: 10.30498/ijb.2021.279942.3024.