Publisher: Soil Science Society of Iran

Journal of Soil Research

(Soil and Water Sci.)

https:// srjournal.areeo.ir/

Assessing the Estimated Soil Hydraulic Properties Using Pedotransfer Functions in Salt-Affected Soils

Meisam Rezaei[a*], Rasoul Mirkhani[a], Zahra Khanmohammadi[b], Hamed Rezaei[a], and Naser Davatgar[a]

[a] Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

[b] Department of Soil and Water Research, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Training Center, AREEO, Isfahan, Iran.

Article Info

Article Type
Research Article

Received
August 01, 2026
Revised
August 31, 2026
Accepted
September 22, 2026
Published online
November 16, 2026

Keywords
Pedotransfer functions
Salt-affected soils
Sistan plain
Soil hydraulic properties

[*]**Corresponding author's email**
Meisam.rezaei1@gmail.com

Extended Abstract

Background and Objectives: Estimating soil hydraulic properties using pedotransfer functions is both feasible and commonly practiced, leveraging readily measurable soil properties as input data in soil and water research. These estimated properties are essential for evaluating water and solute movement, as well as for managing water and salinity at various scales. The accurate description and estimation of soil water retention curves have been a primary focus of research for over six decades. However, estimating coefficients in empirical models remains challenging and time-consuming. Consequently, pedotransfer functions (PTFs), including neural network analysis and texture-based tables, have been employed to predict SWRC coefficients. The ROSETTA software package estimates soil hydraulic properties such as van Genuchten model parameters using a combination of bootstrap and artificial neural networks. Despite the use of pedotransfer functions for predicting soil hydraulic parameters in Iran, no study has specifically examined the application of these functions in estimating hydraulic parameters across different soil profile layers, particularly in salt-affected soils. The objective of this study was to evaluate the performance of the ROSETTA pedotransfer functions in estimating the hydraulic parameters of the Van Genuchten model across different layers of soil profiles in the salt-affected soils of the Sistan Plain, assessing these as preliminary input data for water management and salinity evaluation.

Materials and Methods: A total of 312 profiles was excavated in the Sistan Plain. Based on field observations and morphological characteristics (including color, texture, structure, presence of carbonates, gypsum, and roots), pedogenic (genetic) horizons were identified in each profile (ranging from 3 to 5 horizons per 100 cm profile). For statistical analysis and modeling purposes, the identified horizons were grouped into three pedogenic layers: surface (first), middle (second), and subsurface (third). Physical soil characteristics, including the sand, clay, and silt content, as well as bulk density and saturated hydraulic conductivity, were measured for each profile layer. Soil hydraulic properties, including Ks and the parameters of the van Genuchten model (residual (θr) and saturated (θs) soil water content, inverse of air entry pressure (α) and soil pore distribution (n)) were estimated by the ROSETTA software package. In order to evaluate the results, statistical indices of root mean square error (RMSE) and Nash-Sutcliffe coefficient (NSE) were used to compare the measured saturated hydraulic conductivity and saturated moisture with their estimated values.

Results: According to the results, the highest standard deviation among the estimated hydraulic properties occurred for Ks in all three examined layers. The estimated Ks values were significantly highest in the third layer, followed by the second and first layers. In contrast, the estimated θs and θr

values showed a significant decrease with increasing depth from the soil surface, while the n parameter showed a significant increase with depth. No significant difference was observed for α between the profile layers. A significant correlation was obtained between the estimated hydraulic properties and the measured soil properties, including bulk density, and the percentages of sand, silt, and clay. The measured values of saturated water content (θs), field capacity (FC), permanent wilting point (PWP), and plant available water (PAW) showed positive and significant correlations with clay and silt content. There was no significant correlation between the measured and estimated Ks values. Furthermore, the RMSE and NSE values from the regression relationship between measured and estimated Ks were 16.41 and -0.11, respectively. The RMSE and NSE values for the regression relationship between measured and estimated saturated water content were 0.06 and -1.11, respectively. The negative NSE values indicate that the mean of the measured data provides better predictions than the ROSETTA estimates, confirming the high uncertainty of the ROSETTA model in these salt-affected soils.

Conclusion: Analysis of the RMSE and NSE values from the regression relationship between measured and estimated Ks revealed high uncertainty in ROSETTA estimates for salt-affected soils, indicating a potential need for the development of regional pedotransfer functions that incorporate soil chemical properties (such as salinity and sodium content) as input variables. Also, more detailed considerations are suggested for soil and water management in the region.

Cite this article: Rezaei, M., Mirkhani, R., Khanmohammadi, Z., Rezaei, H., Davatgar, N., 2026. Assessing the Estimated Soil Hydraulic Properties Using Pedotransfer Functions in Salt-Affected Soils. Research Article, *Journal of Soil Research*, 40 (3), pp 361-376.

DOI: https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.373718.831
Publisher: Soil Science Society of Iran

Publisher: Soil Science Society of Iran

نشریه پژوهش‌های خاک

(علوم خاک و آب)

https:// srjournal.areeo.ir/

ارزیابی ویژگی‌های هیدرولیکی برآوردشده با توابع انتقالی درخاک‌های متأثر از نمک

میثم رضائی[۱*]، رسول میرخانی[۱]، زهرا خان‌محمدی[۲]، حامد رضایی[۱] و ناصر دواتگر[۱]

[۱] مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

۲ بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۱۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۳۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۸/۲۵

واژه‌های کلیدی

توابع انتقالی

خاک‌های متأثر از نمک

دشت سیستان

ویژگی‌های هیدرولیکی خاک

***ایمیل نویسنده مسئول**

Meisam.rezaei1@gmail.com

چکیده

در این پژوهش ویژگی‌های هیدرولیکی مدل ون‌گنوختن در لایه‌های مختلف پروفیل خاک در دشت سیستان، به منظور داده‌های ورودی اولیه در مدیریت آب و ارزیابی شوری، برآورد شد. به این منظور تعداد ۳۱۲ پروفیل در دشت سیستان حفر و ویژگی‌های فیزیکی شامل درصد ذرات شن، رس و سیلت، وزن مخصوص ظاهری و هدایت هیدرولیکی اشباع (Ks) افق‌های مختلف پدوژنیکی هر پروفیل شناسایی و اندازه‌گیری شد. افق‌های شناسایی شده به‌منظور تحلیل آماری و مدل‌سازی به سه لایه پدوژنیک سطحی (اول)، میانی (دوم) و زیرین (سوم) دسته‌بندی شدند. ویژگی‌های هیدرولیکی خاک شامل پارامترهای مدل ون‌گنوختن (رطوبت اشباع (θs)، رطوبت باقی‌مانده (θr)، عکس مکش ورود هوا (α) و توزیع ذرات (n)) با کمک بسته نرم‌افزاری ROSETTA در زبان برنامه نویسی پایتون برآورد شد. نتایج نشان داد که در هر سه لایه مورد بررسی، بیشترین مقدار انحراف معیار؛ بین ویژگی‌های هیدرولیکی برآورد شده برای Ks به‌دست آمد. بیشترین مقدار Ks برآورد شده به‌طور معنی‌داری در لایه سوم و سپس لایه دوم و لایه اول بود. مقادیر θ_s و θ_r، با افزایش عمق پروفیل از سطح خاک به‌طور معنی‌داری کاهش یافت درحالی‌که مقدار n، با افزایش عمق از سطح پروفیل‌ها، افزایش معنی‌دار نشان داد. تفاوت معنی‌داری برای α برآورد شده بین لایه‌های پروفیل‌های مورد مطالعه مشاهده نشد. بالا بودن عدم قطعیت با استفاده از توابع انتقالی استفاده شده نتایج نشان می دهد توسعه روابط انتقالی به ویژه برای خاک‌های متاثر از نمک مورد نیاز بوده و ملاحظات خود را می طلبد.

استناد: رضائی، م.، میرخانی، ر.، خان‌محمدی، ز.، رضایی، ح.، دواتگر، ن.، ۱۴۰۵. ارزیابی ویژگی‌های هیدرولیکی برآوردشده با توابع انتقالی درخاک‌های متأثر از نمک. مقاله پژوهشی، *نشریه پژوهش‌های خاک*، (۳) ۴۰، ص ۳۶۱– ۳۷۶.

DOI: https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.373718.831

مقدمه

در حال حاضر حفظ بهره‌وری کشاورزی هم‌زمان با افزایش تقاضای غذا برای جمعیت جهان در کنار کمبود سطح زمین و آب از مسائل کلیدی کشاورزی است. بنابراین اتخاذ روش های مدیریت مناسب آب و خاک به‌منظور افزایش کارایی استفاده از آب ورودی و کاهش محدودیت‌های تولید از خاک اهمیت زیادی دارد. بسیاری از شیوه‌های مدیریت خاک و آب و عملیات حفاظت از محیط‌زیست نیازمند دانش درباره تکامل آب و املاح در خاک زیرسطحی دارد. در طول چند دهه گذشته تعداد زیادی از مدل های رقومی به‌منظور شبیه‌سازی جریان آب و حرکت آلودگی در خاک‌های اشباع و غیر اشباع و سنگ‌های شکسته توسعه یافته‌اند. کاربرد این مدل‌ها اغلب به دلیل کمبود اطلاعات هیدرولیکی شامل منحنی نگهداشت آب خاک[1] (SWRC) و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع، می‌تواند محدود شود. به علاوه به دلیل تنوع مکانی و زمانی ذاتی ویژگی‌های هیدرولیکی در مزرعه، معمولاً تعداد زیادی نمونه برای توصیف صحیح توزیع فضایی ویژگی‌های هیدرولیکی مورد نیاز است. توصیف و برآورد دقیق منحنی نگهداشت آب خاک بیش از ۶۰ سال موضوع اصلی بسیاری از پژوهش‌ها بوده است. مدل‌های تجربی زیادی برای مدل‌سازی منحنی نگهداشت آب خاک توسعه یافته اند. متأسفانه برآورد ضریب‌ها در این مدل‌ها مشکل و زمان‌بر است. متعاقباً برخی از پژوهش‌ها نیز از توابع انتقالی[2] (PTFs) شامل تحلیل شبکه عصبی و استفاده از جداول بر اساس بافت خاک، برای پیش بینی ضرایب منحنی نگه‌داشت آب خاک بهره‌برده‌اند. برای نمونه بسته نرم‌افزاری ROSSETA ویژگی‌های هیدرولیکی خاک مانند پارامترهای مدل منحنی مشخصه رطوبتی ون‌گنوختن را با ترکیبی از خود راه‌انداز[3] و شبکه‌های عصبی مصنوعی با دقت قابل قبولی برآورد می‌کند. روش دیگر تخمین SWRC از توزیع اندازه ذرات بر اساس شباهت بین شکل منحنی نگه داشت آب و منحنی توزیع تجمعی اندازه ذرات است.

پیشینه پژوهش

ویژگی‌های هیدرولیکی خاک تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند بافت خاک، مینرالوژی رس، ساختمان خاک، چگالی ظاهری، شیمی و غلظت املاح خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی، تورم و فعالیت‌های بیولوژیکی خاک است (Leuther et al., 2019). هدایت هیدرولیکی اشباع یکی از ویژگی‌های پویای خاک است که ظرفیت خاک برای هدایت آب در خاک را مشخص می‌کند. هدایت هیدرولیکی اشباع متأثر از ویژگی‌های سیال و محیط متخلخل بوده و در بین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک دارای بیشترین تغییرپذیری مکانی است. ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در واقع بازتابی از ساختار محیط متخلخل خاک شامل هندسه محیط، اندازه و اتصالات آن است (Dexter, 1988). از آنجا که اندازه‌گیری مستقیم ویژگی‌های هیدرولیکی خاک مشکل، زمان‌بر و در سطح وسیع غیر ممکن است، توابع انتقالی مختلفی توسعه یافته‌اند که قادر به تخمین این ویژگی‌ها از ویژگی‌های زودیافت خاک هستند (Bai et al 2022). در پژوهشی Niu et al (2024)، توابع انتقالی را برای پیش‌بینی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در مناطق خشک چین توسعه دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که توابع انتقالی توسعه یافته برای منطقه مطالعاتی عملکرد بهتری در مقایسه با توابع انتقالی موجود مانند ROSSETA یا HYPRES بهتر داشته و مقدار RMSE بسته به نوع ویژگی هیدرولیکی ۲۵ تا ۸۳ درصد کاهش می‌یابد. همچنین پارامتر نگه‌داشت ون گنوختن α بیشترین تغییرات عمودی را از سطح خاک تا عمق ۲ متری داشت و پس از آن پارامترهای هدایت هیدرولیکی اشباع K_s، رطوبت باقی‌مانده ϑ_r، رطوبت مزرعه ϑ_{fc}، رطوبت نقطه پژمردگی ϑ_{wp}، رطوبت اشباع ϑ_s و شیب منحنی رطوبتی n به ترتیب قرار گرفتند. بر اساس نتایج توابع انتقالی توسعه یافته برای منطقه مطالعاتی، بهترین عملکرد در پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع را در خاک با بافت شنی و بدترین عملکرد را در بافت لوم رسی نشان داد. در پژوهش دیگری Wand et al (2024) پارامترهای هیدرولیکی ون‌گنوختن را در فلات تبت با استفاده از توابع انتقالی برآورد کردند. بر اساس یافته‌های این پژوهش، بیشترین ضریب تغییرات مربوط به پارامتر α بود که بیان‌گر بیشترین تنوع فضایی این پارامتر در مقیاس منطقه‌ای است. پس از α، بررسی ضریب تغییرات روند $n < \vartheta_s < \vartheta_r$ را دنبال نمود.

Vereecken et al (2010) از توابع انتقالی به‌منظور تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی معادله ون‌گنوختن- معلم استفاده کردند. نتایج نشان داد که دقیق‌ترین توابع انتقالی برای برآورد ویژگی‌های نگه داشت آب هنگام استفاده از بافت خاک، وزن مخصوص ظاهری و ماده آلی به‌دست می‌آید. در پژوهش دیگری Benson et al (2014) پارامترهای α و n ون‌گنوختن را بر پایه داده‌های توزیع اندازه ذرات برای شن‌های با اندازه مختلف برآورد نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که شن‌های با اندازه ذرات کوچک‌تر یا توزیع اندازه ذرات گسترده‌تر، منافذ کوچک‌تری داشته و بنابراین مکش ورود هوای بزرگ‌تر یا α کوچک‌تری خواهند داشت. شن‌های با توزیع اندازه ذرات گسترده‌تر همچنین توزیع اندازه منافذ گسترده‌تری دارند، پس SWRC به‌تدریج و با مقادیر

[1] soil water retention curve
[2] pedotransfer functions
[3] Bootstrap

کوچک‌تر n تغییر می‌کند. نتایج پژوهش Rezaei et al (2021) در یافتن پارامترهای هیدرولیکی مناسب برای توصیف حرکت آب و مدیریت پایدار در خاک‌های شور/ سدیمی نشان داد که همبستگی معنی‌داری بین ویژگی‌های هیدرولیکی و برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک وجود دارد. بر اساس این پژوهش اثر بافت، ساختمان خاک، مقدار آهک، مقدار گچ و ظرفیت تبادل کاتیونی (مینرالوژی رس) بر ویژگی‌های هیدرولیکی بیشتر از مقدار نمک بود.

Wang et al (2024) از ویژگی‌های خاک شامل مقدار شن، سیلت، رس، وزن مخصوص ظاهری، کربن آلی خاک و تخلخل برای برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی عکس مکش ورود هوا، توزیع ذرات، مقدار رطوبت اشباع و باقی‌مانده با استفاده از توابع هیدرولیکی مختلف از جمله ROSSETA در دو منطقه تبت استفاده نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که تفاوت معنی‌داری در مقدار وزن مخصوص ظاهری بین لایه‌های ۱۰-۰، ۲۰-۱۰ و ۳۰-۲۰ سانتی‌متری خاک وجود داشت درحالی که تفاوت معنی داری در مقادیر برآورد شده α، n، θ_r و θ_s بین لایه‌های خاک مشاهده نشد. رضوی و همکاران (۱۳۹۳) توابع انتقالی مختلف برای برآورد منحنی رطوبتی خاک را مورد ارزیابی قرار دادند. بر اساس نتایج این پژوهش نرم‌افزار ROSSETA با میانگین مقادیر معیارهای آماری RMSE، MAE، E' و d' به ترتیب برابر با ۰/۰۳۱، ۰/۰۲۴۷، ۰/۷۹۵۶ و ۰/۹۰۳۷ دقت بیشتری در شبیه سازی منحنی رطوبتی خاک در منطقه مورد مطالعه نسبت به سایر توابع انتقالی داشت.

بررسی منابع در کشور نشان داد که علی‌رغم استفاده از توابع انتقالی برای پیش‌بینی پارامترهای هیدرولیکی خاک، پژوهشی به بررسی استفاده از این توابع در برآورد پارامترهای هیدرولیکی در پروفیل خاک نپرداخته است. بنابراین این پژوهش با هدف ارزیابی دقت و عملکرد تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی مدل ون‌گنوختن -که در اغلب مطالعات برای خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه خشک استفاده می‌شود، در لایه‌های مختلف خاک با استفاده از بسته نرم‌افزاری ROSSETA در دشت سیستان انجام شد.

روش‌شناسی پژوهش

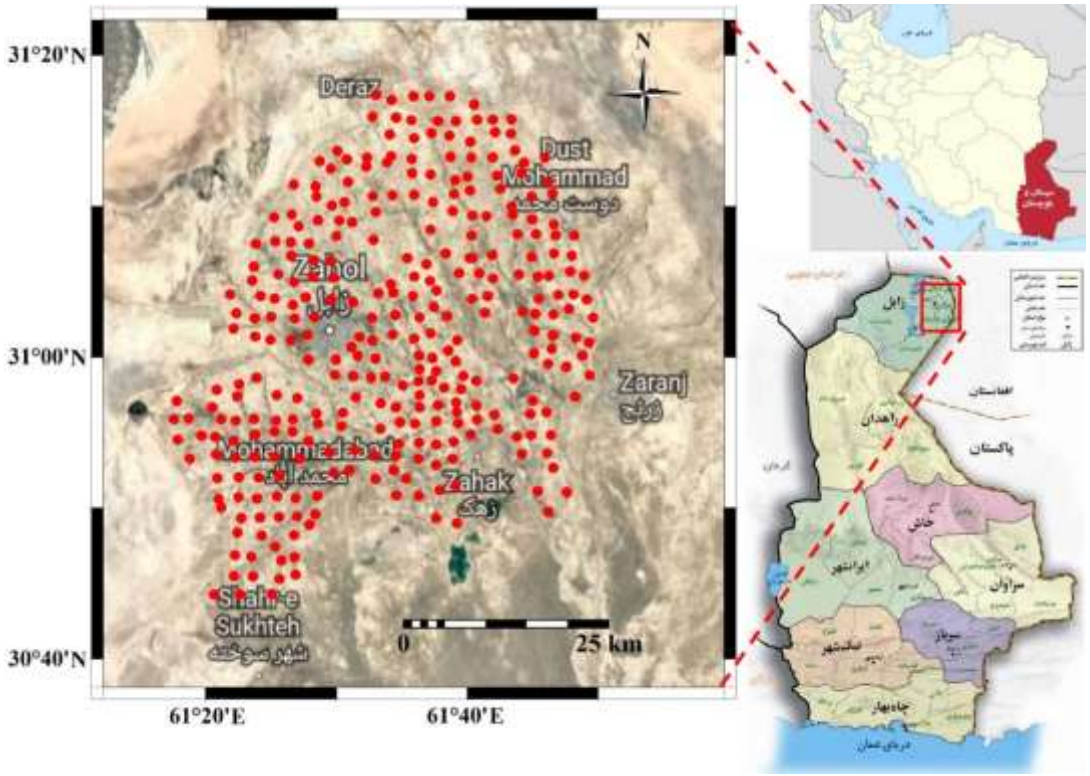
منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در دشت رسوبی سیستان واقع در جنوب شرقی ایران، با ارتفاع متوسط ۴۸۵ متر از سطح دریا، متوسط بارندگی سالانه ۵۰ تا ۵۵ میلی‌متـر و میزان تبخیر پتانسیل سالانه در حدود ۴۸۰۰ تا ۵۰۰۰ میلی‌متر انجام شد. اقلیم منطقه سیستان براساس طبقه بندی کوپن اصلاح شده، اقلیم صحرایی با آب و هوای خیلی گرم و خشک بیابانی با تابسـتان‌هـای طولانی و زمستان‌های ملایم قلمداد شده است. حدود ۱۵۰۰۰۰ هکتار از زمین‌های دشت سیستان دارای پتانسیل کشـاورزی بـوده و می‌تواند در چرخه تولید زراعی قرار گیرد. مهم‌ترین عامل مشخصه آب و هوایی این دشت بادهای ۱۲۰ روزه سیستان با سرعت بیش از ۱۰۰ کیلـومتر در ساعت اسـت که از اواسط خرداد ماه شروع و تا اوایل مهرماه ادامه دارد. این بادها می‌تواند منجر به انتقال شن و ماسه، تشـدید فرسـایش و افزایش میزان تبخیر شود. به‌طور معمول فصل کشاورزی در منطقه از مهر ماه تا پایان اردیبهشت است.

تعیین پروفیل‌ها و نمونه‌برداری از منطقه مورد مطالعه

به‌منظور انجام این پژوهش ۱۶ ناحیه عمرانی در دشت سیستان (شامل شهرستان‌های زهک، هامون، هیرمند، نیمروز و زابل) به وسعت ۴۶۰۰۰ هکتار انتخاب شد (شکل ۱). برای انتخاب نقاط نمونه‌برداری، ابتدا نقشه واحدهای هم‌آب طرح جامع آب‌رسانی منطقه تهیه گردید. سپس با استفاده از روش نمونه‌برداری شبکه‌ای منظم[4] با فواصل تقریبی ۲ کیلومتر در مناطق با تغییرات بیشتر و ۴ کیلومتر در مناطق نسبتاً یکنواخت، نقاط کاندید مشخص شدند. در نهایت با توجه به قابلیت دسترسی، نمایندگی هر واحد هم‌آب، و نتایج بازدیدهای صحرایی، تعداد ۳۱۲ نقطه جهت حفر پروفیل انتخاب گردید. سپس تعداد ۳۱۲ پروفیل حفر و نمونه‌های دست‌خورده و دست نخورده جهت تعیین ویژگی های فیزیکی شامل درصد ذرات اندازه‌ای شن، رس و سیلت، وزن مخصوص ظاهری و هدایت هیدرولیکی اشباع افق‌های پدوژنیک مختلف هر پروفیل برداشته شدند. تعداد افق‌های شناسایی شده در هر پروفیل بین ۳ تا ۵ متغییر بود. برای یکسان‌سازی داده‌ها در تحلیل‌های آماری و مدل‌سازی، افق‌های شناسایی شده بر اساس عمق و ویژگی‌های مشابه به سه لایه پدوژنیک سطحی، میانی و زیرین دسته‌بندی شدند (لازم به ذکر است که عمق دقیق هر الیه در پروفیل‌های مختلف متغیر بوده و دامنه تغییرات آن‌ها در جداول ۱ تا ۳ به‌صورت کامل ارائه شده است). در مجموع ۱۱۱۸ نمونه خاک مورد مطالعه قرار گرفت. موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری شده در (شکل ۱) نشان داده شده است.

[4] Grid Sampling



شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی و نقاط نمونه‌برداری شده در دشت سیستان.

Figure 1. Location of the study area and sampling points in the Sistan Plain.

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی خاک

نمونه‌های دست خورده ابتدا هوا خشک و سپس از الک دو میلی‌متر عبور داده شدند. ویژگی‌های فیزیکی خاک‌ها شامل بافت خاک به روش هیدرومتری در نمونه‌های دست خورده (Gee and Bauder, 1982)، چگالی ظاهری (Blake and Hartge, 1982)، و هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از روش بار ثابت (Amoozegar and Warrick, 1982) رطوبت اشباع (ϑ_s)، رطوبت ظرفیت مزرعه (FC) و رطوبت پژمردگی دائم (PWP) (Veihmeyer and Hendrickson, 1949) در نمونه‌های دست نخورده (استوانه فلزی ۱۰۰ سانتی‌متر مکعب) اندازه‌گیری شدند. مقدار آب قابل استفاده خاک برای گیاه[5] (PAW) از تفاضل مقدار رطوبت ظرفیت مزرعه و باقی‌مانده محاسبه شد.

برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک

با توجه به فقدان داده‌های هیدرولیکی از جمله هدایت هیدرولیکی لایه‌های مختلف خاک و همچنین عدم قطعیت مقادیر اندازه‌گیری شده، برای تعیین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک مانند رطوبت اشباع، رطوبت باقی‌مانده، هدایت هیدرولیکی اشباع و پارامترهای مدل ون‌گنوختن، از بسته نرم‌افزاری ROSETTA (روزتا) استفاده شد. Schaap et al (2001) برنامه کامپیوتری ROSETTA را که شامل پنج تابع انتقالی از نوع کلاسی و شبکه عصبی مصنوعی است را برای تخمین سلسله مراتبی نگه‌داشت آب خاک و هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع، توسعه دادند. سلسله مراتب در توابع انتقالی امکان پیش‌بینی پارامترهای هیدرولیکی با استفاده از داده‌های ورودی محدود (فقط کلاس‌های بافتی) تا داده‌های ورودی گسترده‌تر (بافت خاک، وزن مخصوص ظاهری، یک یا دو نقطه نگه‌داشت آب) را فراهم می‌کند.

در این پژوهش به‌منظور تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی، داده‌های زود یافت خاک مانند بافت خاک و وزن مخصوص ظاهری برای تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی پیچیده مورد استفاده قرار گرفتند. با توجه به تعداد زیاد لایه‌های خاک، از نسخه Rosetta-v3beta ارائه‌شده توسط Zhang and Schaap (2017) که در محیط نرم‌افزار پایتون برنامه‌نویسی شده است، استفاده شد. تابع ون‌گنوختن (vG) اغلب برای توصیف منحنی نگه‌داشت آب خاک در خاک‌های غیر اشباع و سنگ‌های شکسته

[5] Plant available water

به کار می‌رود. این تابع در (رابطه ۱) نشان داده شده است (van Genuchten, 1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^{1-1/n}} \quad \text{رابطهٔ (۱)}$$

در این رابطه θ مقدار رطوبت خاک ($cm^3\ cm^{-3}$)، θ_r مقدار رطوبت باقی‌مانده ($cm^3\ cm^{-3}$)، θ_s مقدار رطوبت اشباع ($cm^3\ cm^{-3}$)، h پتانسیل آب خاک (cm)، α، n و m پارامترهای تجربی بوده که α عکس مکش ورود هوا در هنگام خشک شدن خاک، n پارامتر مرتبط با شیب منحنی نگه‌داشت آب خاک و توزیع اندازه منافذ خاک است. بنابراین پارامترهای رطوبت اشباع (ϑ_s)، رطوبت باقی‌مانده (ϑ_r)، هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s)، شاخص توزیع منافذ (n) و عکس مکش ورود هوا (α) برای ۱۱۱۸ لایه خاک از ۳۱۲ پروفیل برآورد گردید.

پس از برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی توسط ROSETTA، همبستگی پیرسون بین این ویژگی‌ها با وزن مخصوص ظاهری، درصد ذرات شن، سیلت و رس خاک به وسیله نرم‌افزار SPSS 16 محاسبه شد. همچنین به‌منظور تجزیه و تحلیل آماری ویژگی‌های هیدرولیکی بین لایه‌های مختلف پروفیل‌ها، از نرم‌افزار SAS استفاده شد.

به‌منظور ارزیابی نتایج، هدایت هیدرولیکی اشباع و رطوبت اشباع اندازه‌گیری شده با هدایت هیدرولیکی اشباع و رطوبت اشباع برآورد شده مقایسه شد. به این منظور از شاخص‌های آماری خطای جذر میانگین مربعات[۶] (RMSE) و ضریب نش-ساتکلیف[۷] (NSE) استفاده شد. نحوه محاسبه RMSE در (رابطه ۲) نشان داده شده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(m_i - p_i)^2} \quad \text{رابطهٔ (۲)}$$

در این رابطه m_i مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه گیری شده و p_i مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع برآورد شده با ROSETTA و n تعداد مشاهدات است. مقادیر RMSE همواره غیر منفی و تا جای ممکن باید کم باشد. درصورتی‌که RMSE=۰ باشد، برازش کاملاً صحیح مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده اتفاق افتاده است.

برای محاسبه NSE از (رابطه ۳) استفاده شد:

$$NSE = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(m_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(m_i - m_i')^2}\right) \quad \text{رابطهٔ (۳)}$$

در این رابطه m_i' مقدار میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه گیری شده است. مقدار NSE از منفی بی‌نهایت تا ۱ متغیر است. مقدار NSE =۱ بیان‌گر ارتباط عالی بین مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده است. مقدار NSE =۰ نشان می‌دهد که محاسبه ویژگی مورد نظر با مدل به اندازه میانگین داده اندازه‌گیری شده دقیق است. در مقابل زمانی‌که NSE <۰ میانگین اندازه‌گیری شده پیش‌بینی بهتری نسبت به مدل داشته باشد، رخ می‌دهد. به بیان دیگر واریانس باقی‌مانده که در صورت کسر توضیح داده شده است بیشتر از واریانس داده‌ها در مخرج است.

نتایج و بحث

ویژگی‌های هیدرولیکی لایه‌های خاک

آماره‌های مربوط به ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی برای لایه‌های مختلف خاک در پروفیل‌های مورد مطالعه با استفاده از مدل ROSETTA در اراضی دشت سیستان در جداول ۱ تا ۳ نشان داده شده است. کم‌ترین عمق لایه اول ۱۰ سانتی متر، بیشترین مقدار آن ۴۸ سانتی‌متر و دامنه تغییرات ۳۸ سانتی متر بود. عوامل محیطی و آب و هوایی به‌ویژه وزش بادهای صد و بیست روزه سیستان می‌تواند از عوامل مؤثر در تشدید تغییرات عمق لایه سطحی خاک‌های سیستان باشد. با این وجود بررسی مقادیر چولگی[۸] و افراشتگی[۹] عمق، بیانگر توزیع نرمال این ویژگی در لایه اول بود. در لایه اول خاک‌ها در بین ویژگی‌های هیدرولیکی، بیشترین دامنه تغییرات با عدم یکنواختی بسیار زیاد برای هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) به‌دست آمد. با توجه به میانگین مقادیر ذرات شن، رس و سیلت اندازه‌گیری شده بافت خاک در لایه اول پروفیل‌های مورد مطالعه لوم به دست آمد، هرچند که مقدار شن از ۶ تا ۹۳ درصد و یا مقدار سیلت از ۳ تا ۷۶ درصد متغیر بود. بررسی مقادیر چولگی، افراشتگی و انحراف معیار ذرات شن، سیلت و رس در این لایه بیان‌گر نرمال بودن داده‌ها و دقت اندازه‌گیری آن‌ها بود (جدول ۱). هدایت هیدرولیکی اشباع و شاخص توزیع ذرات دارای توزیع غیر نرمال بودند. بیشترین مقدار انحراف معیار در بین ویژگی‌های هیدرولیکی لایه اول نیز مربوط به هدایت هیدرولیکی اشباع (۵/۶۴۸) بود. بیشترین مقدار انحراف معیار K_s برآورد شده توسط توابع انتقالی مختلف در خاک‌های سطحی و نیز عمق پروفیل از ۲۶/۱ تا ۱۱۹/۲ گزارش شده است (Borek *et al.*, 2021). بر اساس پژوهش‌ها تنوع مکانی زیاد بین افق‌های خاک در ارتباط با K_s، نتیجه ناهمگنی خاک است

[۶] Root-mean-square deviation
[۷] Nash-Sutcliffe efficiency
[۸] Skewness
[۹] Kurtosis

که می‌تواند پیش‌بینی K_s با استفاده از مدل‌های ریاضی را مختل کند (Rezaei et al., 2016a). نتایج پژوهش Sing et al. (2023) نشان داد که مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع در پایین شیب به طور معنی‌داری کمتر از قله و شیب میانی است. همچنین تغییر جزئی در ترکیب بافت خاک تحت توپوگرافی‌های مختلف مزرعه نیز ممکن است ویژگی‌های هیدرولیکی شامل K_s را تغییر دهد. پژوهش‌های دیگری به تغییرپذیری زمانی هدایت هیدرولیکی اشباع از جمله افزایش مقدار آن طی چهار سال ناشی از کشاورزی ارگانیک و ایجاد جریان‌های ترجیحی اشاره نموده‌اند (Abu-hashim et al., 2022). بنابراین ویژگی‌های هیدرولیکی از جمله K_s وابستگی زیادی به تغییرات مکان و زمان دارند. مقدار انحراف معیار سایر پارامترها روند $\alpha < \vartheta_r < \vartheta_s < n$ را نشان داد. مقادیر انحراف معیار پارامترهای هیدرولیکی مذکور به‌ویژه K_s می‌تواند متأثر از عوامل ذاتی همچون ته‌نشست رسوبات باشد. نتایج پژوهش Wang et al (2024) میانگین مقادیر برآورد شده ویژگی‌های هیدرولیکی α، n، ϑ_r و ϑ_s ون‌گنوختن را به ترتیب ۰/۱۵۸ cm^{-1}، ۱/۳۳، ۰/۰۷۶ cm^3cm^{-3} و ۰/۴۵۲ cm^3cm^{-3} گزارش نمود. همچنین مقدار زیاد انحراف معیار مربوط به عکس مکش ورود هوا در پژوهش مذکور نیز بیان‌گر تغییرپذیری زیاد این پارامتر بود.

جدول ۱- آماره‌های توصیفی ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی لایه اول خاک‌های دشت سیستان.

Table 1. Descriptive statistics of soil physical and hydraulic properties of the first layer in the Sistan plain.

	عمق Depth	شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	K_s	n	α	θ_s	θ_r
	cm	درصد٪			cm/day		cm^{-1}	cm^3/cm^3	
دامنه Range	38/0	93	72	41	62/734	0/398	0/010	0/138	0/122
کمینه Minimum	- 48	6	۳۳	2	0/146	0/183	0/004	0/362	0/057
بیشینه Maximum	-10	99	76	43	62/88	1/581	0/014	0/500	0/179
میانگین Mean	-22/72	40/71	42/05	17/24	8/207	1/338	0/007	0/419	0/113
خطای استاندارد Standard Error	0/319	0/51	0/36	0/48	0/68	0/066	2/85	0/078	0/231
انحراف معیار Standard Deviation	7/252	20/59	15/35	8/26	5/648	0/0891	0/020	0/0327	0/0261
چولگی Skewness	-0/453	0/624	-0.386	0/635	4/333	0/231	0/911	0/513	0/062
افراشتگی Kurtosis	-0/890	-0/36	-0/159	0/216	30/502	-0/762	0/40	-0/737	-0/730

θ_r، θ_s، α، n و K_s به‌ترتیب رطوبت حجمی باقی‌مانده، رطوبت حجمی اشباع، عکس مکش ورود هوا، شاخص توزیع ذرات و هدایت هیدرولیکی اشباع، از پارامترهای رابطه ون‌گنوختن- معلم است.

بر اساس آماره‌های چولگی و افراشتگی پارامترهای هیدرولیکی شامل هدایت هیدرولیکی اشباع، توزیع اندازه ذرات و رطوبت اشباع، دارای توزیع غیرنرمال بودند. این امر نشان‌دهنده غیریکنواختی شدید در اراضی دشت سیستان از نظر این متغیرها است. از سوی دیگر تغییرات رطوبت باقی‌مانده و عکس مکش ورود هوا از توزیع نرمال پیروی نمودند. همچنین دامنه تغییرات این دو پارامتر از سایر پارامترها کمتر بود. نتایج پژوهش Acevedo et al (2023) نشان داد که در میان تخمین‌های ROSETTA، بیشترین تغییرپذیری مربوط به هدایت هیدرولیکی اشباع بود و این تغییرپذیری به‌ویژه در خاک‌های متأثر از آتش سوزی مشخص‌تر بود، به‌گونه‌ای که مقدار اندازه‌گیری شده ۱۵/۸۵ سانتی‌متر در روز و مقدار برآورد شده به‌طور میانگین ۷۹/۱۴ سانتی‌متر در روز به دست آمد.

میزان عمق لایه دوم در پروفیل‌های مختلف از ۲۱ سانتی‌متر تا ۸۰ سانتی‌متر متغیر بود. علی‌رغم آن‌که میزان تغییرات عمق لایه دوم (۵۹ سانتی‌متر) بیشتر از لایه اول (۳۸ سانتی‌متر) بود، مقادیر چولگی و افراشتگی برای عمق لایه دوم کمتر از لایه اول به دست آمد (جدول ۲). همچنین بررسی مقادیر چولگی و افراشتگی برای عمق لایه دوم حاکی از نرمال بودن داده‌های عمق این لایه بود. دامنه تغییرات ذرات شن، سیلت و رس در لایه دوم به ترتیب ۹۵، ۷۹ و ۵۹ درصد به دست آمد. بررسی دامنه تغییرات ذرات رس و سیلت بین لایه اول و دوم خاک نشان داد که دامنه تغییرات مقدار رس در لایه اول از ۴۱ درصد تا ۵۹ درصد

در لایه دوم تغییر نموده است. همچنین دامنه تغییرات سیلت از ۷۲ درصد در لایه اول تا ۸۰ درصد در لایه دوم بوده است. این یافته بیان‌گر تغییرپذیری مقدار رس و سیلت از سطح پروفیل به لایه‌های پایین‌تر است. مقایسه مقدار رس و سیلت بین لایه اول و سوم پروفیل‌ها نیز روندی مشابه تغییرات بین لایه اول و دوم داشت.

بررسی پارامترهای هیدرولیکی ون‌گنوختن برآورد شده در لایه دوم نشان داد که مقدار رطوبت باقی‌مانده، رطوبت اشباع، توزیع ذرات و α در لایه دوم بیشتر از لایه اول بود. به‌علاوه دامنه تغییرات هدایت هیدرولیکی اشباع لایه دوم در مقایسه با لایه اول کمتر است درحالی‌که دامنه تغییرات رطوبت باقی‌مانده، رطوبت اشباع و نیز شاخص توزیع ذرات در مقایسه با لایه اول خاک، بیشتر بود. مقدار انحراف معیار برای هدایت هیدرولیکی اشباع در لایه دوم در مقایسه با لایه اول بیشتر بود، درحالی‌که مقدار چولگی و افراشتگی مربوط به K_s در لایه اول کمتر از لایه دوم به‌دست آمد (جداول ۱ و ۲). این یافته نشان‌دهنده این مطلب است که واریانس پارامتر هیدرولیکی K_s در لایه سطحی علاوه بر عوامل ذاتی بشدت متأثر از عوامل محیطی و مدیریتی است. لازم به ذکر است که این پارامترها علاوه بر تغییرپذیری مکانی دارای تغییرپذیری زمانی نیز هستند که معمولاً در مدل‌سازی نادیده گرفته می‌شوند و یا اینکه با کالیبره شدن/واسنجی مدل این ویژگی‌ها برای طول فصل بهینه می‌شود (Rezaei et al., 2016b). بر اساس مقادیر پارامترهای چولگی و افراشتگی، در میان ویژگی‌های هیدرولیکی برآورد شده در لایه دوم، توزیع رطوبت اشباع غیر نرمال است اما سایر ویژگی‌های هیدرولیکی توزیع نرمال داشتند.

جدول ۲- آماره‌های توصیفی مربوط به ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی لایه دوم خاک‌های دشت سیستان.

Table 2. Descriptive statistics of soil physical and hydraulic properties of the second layer in the Sistan Plain.

	عمق Depth	شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	K_s	n	α	θ_s	θ_r
	cm	درصد%			cm/day		cm^{-1}	cm^3/cm^3	
دامنه Range	59	95	80	59	44/07	0/430	0/013	0/144	0/168
کمینه Minimum	– 80	4	2	3	4/209	0/183	0/001	0/356	0/011
بیشینه Maximum	–21	99	82	62	48/279	1/613	0/014	0/50	0/179
میانگین Mean	–46/057	33/45	45/05	21/51	11/923	0/367	0/007	0/414	0/105
خطای استاندارد Standard Error	0/239	0/77	0/40	0/68	0/85	0/31	0/285	0/094	0/324
انحراف معیار Standard Deviation	11/047	25/64	18/20	14/60	10/095	0/114	0/002	0/039	0/034
چولگی Skewness	–0/348	0/76	-0/38	0/65	1/746	0/122	0/629	0/436	0/098
افراشتگی Kurtosis	–0/016	–0/45	–0/28	-0/59	1/924	-0/083	-0/321	-0/869	-0/931

θ_r، θ_s، α، n و K_s به‌ترتیب رطوبت حجمی باقی‌مانده، رطوبت حجمی اشباع، عکس مکش ورود هوا، شاخص توزیع ذرات و هدایت هیدرولیکی اشباع، از پارامترهای رابطه ون‌گنوختن- معلم است.

بیشترین دامنه تغییرات ویژگی عمق (۶۶ سانتی‌متر) در لایه سوم مشاهده شد. بررسی پارامترهای چولگی و افراشتگی نیز مبین توزیع غیر نرمال عمق این لایه بود. تغییرات عمق برای لایه سوم> لایه دوم > لایه اول بود (مقایسه جداول ۲،۱ و ۳). یکی از محدودیت‌های خاک_های دشت سیستان مطبق بودن آن‌هاست. تغییرات متفاوت عمق لایه‌های خاک می‌تواند متأثر از انباشت خاک توسط عواملی همچون رسوبات، بادهای ۱۲۰ روزه و سیلاب های فصلی در طول سالیان متمادی باشد. بررسی مقدار میانگین و نیز پارامترهای آماری مربوط به ذرات رس، سیلت و شن در لایه سوم مشابه دو لایه قبل بود. همچنین مشابه دو لایه اول و دوم، بیشترین دامنه تغییرات ذرات در لایه سوم مربوط به شن و سپس سیلت و رس بود. دامنه تغییرات هدایت هیدرولیکی اشباع در لایه سوم (۴۵/۹۸۷) در مقایسه با لایه اول (۶۲/۷۳۴) پروفیل‌های مورد مطالعه کمتر بود (مقایسه جداول ۱، ۲ و ۳). بررسی ویژگی‌های هیدرولیکی در لایه سوم نشان داد که ویژگی‌های برآورد شده به‌جز رطوبت اشباع و توزیع اندازه ذرات از توزیع نرمال پیروی می کنند. به‌طور کلی به‌نظر می‌رسد با افزایش عمق، رطوبت اشباع و توزیع اندازه ذرات بیش از آنکه متأثر از عوامل محیطی و مدیریتی باشند تابعی از عوامل ذاتی و مادری مانند دانه‌بندی ذرات خاک و بافت خاک هستند.

جدول ۳- آماره‌های توصیفی مربوط به ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی لایه سوم خاک‌های دشت سیستان.

Table 3. Descriptive statistics of soil physical and hydraulic properties of the third layer in the Sistan Plain.

	عمق Depth	شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	K_s	n	α	θ_s	θ_r
	cm	درصد%			cm/day		cm^{-1}	cm^3/cm^3	
دامنه Range	66	97	84	59	45/987	0/434	0/010	0/145	0/126
کمینه Minimum	–97	0	1	1	4/187	1/184	0/004	0/353	0/050
بیشینه Maximum	–31	97	85	60	50/174	1/618	0/014	0/498	0/176
میانگین Mean	–74/94	32/32	47/00	20/67	15/006	1/399	0/007	0/408	0/098
خطای استاندارد Standard Error	0/209	0/89	0/46	0/75	0/735	0/09	0/428	0/103	0/377
انحراف معیار Standard Deviation	15/66	28/90	21/51	15/50	11/032	0/126	0/003	0/042	0/037
چولگی Skewness	0/457	0/98	–0/57	0/52	1/069	–0/342	0/717	0/762	0/585
افراشتگی Kurtosis	–1/05	-0/38	–0/52	–0/96	0/157	–1/225	–0/624	–0/661	–0/992

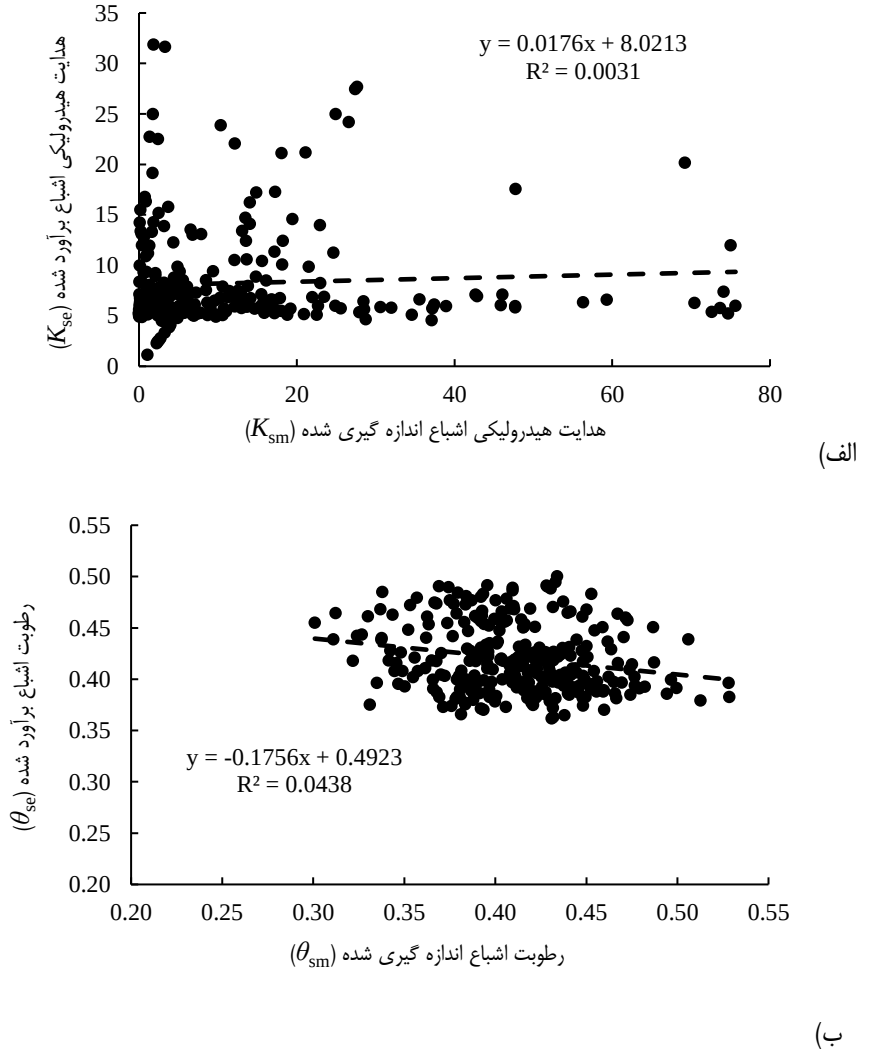
θ_r، θ_s، α، n و K_s به‌ترتیب رطوبت حجمی باقی‌مانده، رطوبت حجمی اشباع، عکس مکش ورود هوا، شاخص توزیع ذرات و هدایت هیدرولیکی اشباع، از پارامترهای رابطه ون‌گنوختن- معلم است.

ارزیابی پارامترهای برآوردشده

بررسی ضریب همبستگی پیرسون بین هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده و برآورد شده با ROSETTA نشان داد که همبستگی معنی‌داری بین دو پارامتر مذکور وجود نداشت. با توجه به مقدار ضریب تعیین (R^2=۰/۰۰۳۱)، رابطه رگرسیون خطی بین هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده و برآورد شده نیز بسیار ضعیف بود (شکل ۲. الف). مقدار RMSD محاسبه شده برای این رابطه ۱۶/۴۱ به دست آمد. مقدار ۰/۱۱- = NSE نیز تأییدکننده رابطه رگرسیونی ضعیف مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده هدایت هیدرولیکی اشباع بود. این یافته می تواند به‌ویژه ناشی از حجم کم نمونه خاک در روش اندازه‌گیری K_s در آزمایشگاه باشد که همه عوامل مؤثر در نفوذپذیری آب در خاک را شامل نمی‌شود. نتایج پژوهش Borek et al., (2021) در استفاده از توابع انتقالی ROSETTA برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع در جنوب غرب لهستان نشان داد که مقادیر RMSD رابطه رگرسیونی هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده در مزرعه و برآورد شده با ROSETTA در مقایسه با RMSD حاصل از رابطه هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و برآورد شده، بیشتر است. یکی از دلایل احتمالی عدم همبستگی معنی‌دار بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده هدایت هیدرولیکی اشباع، مربوط به حجم کم نمونه‌های مورد آزمایش در روش‌های آزمایشگاهی (۱۰۰ سانتی‌متر مکعب) و عدم انعکاس تمامی ناهمگنی‌های ساختاری خاک (مانند درشت‌منافذ، شکاف‌ها و کانال‌های ناشی از جریان ترجیحی) در این نمونه‌های کوچک است. به بیان دیگر، تابع انتقالی ROSETTA ویژگی‌های هیدرولیکی را بر اساس ویژگی‌های فیزیکی کل خاک (بافت و وزن مخصوص ظاهری) برآورد می‌کند که میانگین‌گیری از یک حجم بزرگ‌تر را نشان می‌دهد، در حالی که اندازه‌گیری آزمایشگاهی بر روی یک نمونه کوچک، ممکن است بسیار تحت تأثیر ریزساختار موضعی آن نمونه قرار گیرد و نماینده کاملی از کل خاک نباشد (Rezaei et al., 2016c).

همبستگی بین هدایت هیدرولیکی اشباع برآورد شده (K_{se}) و مقدار رس، هدایت هیدرولیکی اشباع برآورد شده و سیلت مثبت و معنی‌دار و همبستگی بین هدایت هیدرولیکی اشباع برآورد شده و شن منفی و معنی‌دار بود (جدول ۴). از سوی دیگر همبستگی منفی و معنی‌دار بین هدایت هیدرولیکی اشباع برآورد شده و وزن مخصوص ظاهری، نشان‌دهنده کاهش مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع با افزایش وزن مخصوص ظاهری یا کاهش تخلخل خاک است. نتایج مشابهی توسط Garcia-Gutierrez et al. (2018) و همچنین Zhao et al (2016) در بررسی هدایت هیدرولیکی اشباع در پلاتوهای لسی چین گزارش شده است. همبستگی‌های معنی‌داری بین ویژگی‌های هیدرولیکی برآورد شده با ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک از جمله وزن مخصوص

ظاهری و درصد شن، سیلت و رس نیز در سطح آماری یک درصد ($p < ۰/۰۱$) وجود داشت (جدول ۴). بیشترین ضریب همبستگی مربوط به رابطه بین مقدار رطوبت اشباع برآورد شده با مقدار شن خاک ($r=۰/۲۷۶$, $p < ۰/۰۱$) بود. بررسی ضریب پیرسون بین رطوبت ظرفیت مزرعه، رطوبت نقطه پژمردگی دائم و آب قابل دسترس با وزن مخصوص ظاهری، بیان‌گر کاهش معنی‌دار FC، PWP و AW با افزایش وزن مخصوص ظاهری بود. رابطه مشابهی بین FC، PWP و AW با مقدار شن خاک مشاهده شد درحالی که ارتباط بین FC، PWP و AW با مقدار رس و سیلت خاک مثبت و معنی‌دار بود (جدول ۴).



شکل ۲- (الف)- رابطه رگرسیونی هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده (K_{sm}) و هدایت هیدرولیکی اشباع برآورد شده (K_{se}). (ب): رابطه رگرسیونی رطوبت اشباع اندازه‌گیری شده (ϑ_{sm}) و رطوبت اشباع برآورد شده (ϑ_{se}).

Figure 2. (a) Regression relationship between measured (K_{sm}) and estimated (K_{se}) saturated hydraulic conductivity. (b) Regression relationship between measured (ϑ_{sm}) and estimated (ϑ_{se}) saturated water content.

جدول ۴- ضرایب همبستگی پیرسون بین ویژگی های هیدرولیکی برآورد شده و ویژگی‌های فیزیکی خاک در تمام لایه ها.

Table 4. Pearson correlation coefficients between estimated soil hydraulic properties and key physical properties across all layers.

رس Clay	سیلت Silt	شن Sand	وزن مخصوص ظاهری Bulk Density	متغیرها Variables
−0/271**	0/227**	0/253**	-0/123*	هدایت هیدرولیکی اشباع برآورد شده
0/276**	−0/296**	−0/200**	0/204**	رطوبت اشباع برآورد شده
0/254**	−0/267**	−0/187**	0/195**	رطوبت باقی‌مانده برآورد شده
0/292**	−0/348**	−0/167**	0/21**	عکس مکش ورود هوا برآورد شده
0/238**	0/255**	0/157**	-0/196**	توزیع ذرات برآورد شده
0/271*	−0/229**	− 0/104 ns	− 0/067 ns	هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده
−0/679**	0/621**	0/581**	−0/392**	رطوبت ظرفیت مزرعه
−0/59**	0/481**	0/572**	−0/296**	رطوبت نقطه پژمردگی دائم
−0/693**	0/741**	0/336**	−0/348**	آب قابل‌دسترس
−0/424**	0/445**	0/23**	−0/885**	رطوبت اشباع اندازه‌گیری شده

رابطه بین مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت در حالت اشباع، ظرفیت مزرعه، نقطه پژمردگی دائم و آب قابل استفاده خاک برای گیاه با ویژگی‌های هیدرولیکی برآورد شده و هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده در جدول ۵ نشان داده شده است. همبستگی منفی و معنی‌داری بین مقادیر رطوبت اشباع (ϑ_s) و رطوبت باقی‌مانده (ϑ_r) برآورد شده با مقادیر رطوبت اشباع، رطوبت ظرفیت مزرعه، رطوبت نقطه پژمردگی دائم و آب قابل‌دسترس خاک مشاهده شد (جدول ۵). بررسی رابطه رگرسیونی بین مقدار رطوبت اشباع اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه با مقدار رطوبت اشباع برآورد شده نشان داد که مقدار ضریب تعیین (R^2=۰/۰۴۴) است (شکل ۲. ب). همچنین میزان RMSD و NSE محاسبه شده برای این رابطه به ترتیب ۰/۰۶ و ۱/۱۱− به دست آمد. همان‌طور که قبلاً بیان شد مقدار NSE <۰ نشان می دهد که مقدار میانگین اندازه‌گیری شده ویژگی پیش‌بینی بهتری نسبت به مقدار برآورد شده توسط مدل دارد.

همبستگی بین مقدار رطوبت اشباع اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه با مقدار آب قابل دسترس نیز به‌صورت (r=۰/۴۲۳ , p < ۰/۰۱) به‌دست آمد.

اگرچه عملکرد ROSETTA در برآورد پارامترهای هیدرولیکی به‌ویژه K_s در این مطالعه با عدم قطعیت بالایی همراه بود، اما این یافته خود یک دستاورد علمی مهم محسوب می‌شود. چرا که نشان می‌دهد توابع انتقالی توسعه داده شده بر اساس پایگاه داده‌های جهانی، به‌ویژه در شرایط خاص اقلیمی و خاک‌شناسی مناطق خشک مانند دشت سیستان، از کارایی کافی برخوردار نیستند. این نتیجه، ضرورت انجام پژوهش‌های بیشتر برای توسعه توابع انتقالی ویژه منطقه‌ای را با استفاده از داده‌های گسترده‌تر فیزیکی و شیمیایی خاک، به‌وضوح نمایان می‌سازد. همچنین در پژوهش‌های آتی می‌توان از برآوردهای اولیه ROSETTA به‌عنوان داده‌های ورودی اولیه در مدل‌های شبیه‌سازی و سپس واسنجی آن‌ها با داده‌های اندازه‌گیری شده استفاده کرد (Rezaei et al., 2017).

جدول ۵- ضرایب همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های هیدرولیکی اندازه‌گیری شده خاک در آزمایشگاه.

Table 5. Pearson correlation coefficients between measured soils hydraulic in the laboratory.

هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده K_{sm}	رطوبت باقی‌مانده برآورد شده θ_r	رطوبت اشباع برآورد شده θ_{se}	متغیرها Variables
−0/355**	−0/212**	−0/217**	آب قابل دسترس
−0/49**	−0/242**	−0/257**	رطوبت ظرفیت مزرعه
−0/445**	−0/205**	−0/224**	رطوبت نقطه پژمردگی دائم
− 0/017 ns	−0/216**	−0/223**	رطوبت اشباع اندازه‌گیری شده

بررسی نتایج ویژگی‌های هیدرولیکی برآورد شده با ROSETTA بین لایه‌های مختلف خاک نشان داد که مقادیر رطوبت باقی‌مانده با افزایش عمق به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (p < ۰/۰۵). مقادیر رطوبت اشباع نیز با افزایش عمق پروفیل خاک کاهش یافت به‌گونه‌ای که مقدار θ_s بین لایه اول و سوم پروفیل خاک اختلاف معنی‌داری داشت اما تفاوت معنی‌داری بین لایه اول و دوم خاک برای θ_s مشاهده نشد. ویژگی هیدرولیکی عکس مکش ورود هوا ون‌گنوختن (α) تفاوت معنی‌داری بین لایه های خاک نداشت، درحالی‌که مقدار ویژگی توزیع ذرات برآورد شده توسط ROSETTA (n) به‌طور معنی‌داری در لایه سوم

پروفیل‌های مطالعه شده بیشتر از لایه دوم و لایه اول بود. روند مقدار n در لایه سوم>لایه دوم> لایه اول در پروفیل‌های پژوهش حاضر مشاهده شد. بررسی مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع برآورد شده در بین لایه‌های خاک نیز نشان داد که میانگین مقدار K_s در لایه سوم ($۱۵/۰ \text{cm day}^{-1}$) به‌طور معنی‌داری بیشتر از لایه دوم ($۱۱/۹۲ \text{ cm day}^{-1}$) و در لایه دوم نیز به شکل معنی‌داری بیشتر از لایه اول ($۸/۲۱ \text{ cm day}^{-1}$) بود ($p < ۰/۰۵$). Borek et al., (2021) مقدار میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک‌های سطحی را در آزمایشگاه ۲۱ cm day^{-1} و در مزرعه cm day^{-1} ۸۵، و مقدار میانگین K_s در تمام عمق‌ها را به روش آزمایشگاه ۲۱ cm day^{-1} به‌دست آوردند. این پژوهش‌گران تفاوت معنی‌داری در مقدار K_s اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه بین سطح و عمق‌های پایین‌تر پروفیل نیافتند.

با توجه به نتایج خطای جذر میانگین مربعات و ضریب NSE و نیز بررسی ضرایب همبستگی پیرسون می‌توان بیان نمود که عدم قطعیت ROSETTA در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع و رطوبت اشباع در منطقه مورد مطالعه زیاد بوده و تابع انتقالی روزتا(ROSETTA) در این منطقه چندان موفق نبوده است. همچنین احتمالاً عواملی مانند تغییر مقدار ذرات رس و سیلت بین لایه‌های مختلف پروفیل‌های مورد مطالعه، سبب تغییرپذیری مکانی و یا عمقی خاک شده است. این امر احتمالاً موجب تغییرات هدایت هیدرولیکی اشباع در پروفیل خاک و عدم همبستگی آن با مقادیر اندازه‌گیری شده است. به‌طور کلی نتایج بیانگر تغییرپذیری مکانی سطحی و عمقی بسیار زیاد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک به‌ویژه هدایت هیدرولیکی اشباع خاک است. مطبق بودن این خاک‌ها به‌همراه تغییرات ناگهانی ویژگی‌های هیدرولیکی می‌تواند عامل محدودکننده‌ای در مدیریت آب و خاک دشت سیستان باشد. بنابراین ملاحظات دقیق‌تری برای مدیریت خاک و آب منطقه پیشنهاد می‌شود.

شایان ذکر است که علاوه بر عوامل فیزیکی اندازه‌گیری شده در این پژوهش (بافت خاک و وزن مخصوص ظاهری)، عوامل شیمیایی نظیر شوری و سدیمی بودن خاک نیز تأثیرات عمیقی بر ساختمان خاک، پراکندگی ذرات رس و در نهایت، ویژگی‌های هیدرولیکی نظیر هدایت هیدرولیکی اشباع دارند (Rezaei et al., 2021; Leuther et al., 2019) با توجه به اینکه شوری و سدیم از ویژگی‌های بارز خاک‌های دشت سیستان محسوب می‌شوند، عدم لحاظ این پارامترها به‌عنوان داده‌های ورودی در توابع انتقالی عمومی مانندROSETTA، می‌تواند یکی از دلایل اصلی عدم قطعیت بالا در برآوردهای این تابع انتقالی در منطقه مورد مطالعه باشد. به‌عنوان مثال، حضور سدیم تبادلی بالا می‌تواند باعث پراکندگی ذرات رس و کاهش شدید هدایت هیدرولیکی شود که این پدیده در مدل‌های فیزیکی–تجربی لحاظ نمی‌گردد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش ویژگی‌های هیدرولیکی مدل ون گنوختن در لایه‌های مختلف پروفیل‌های خاک در دشت سیستان با استفاده از بسته نرم افزاری ROSSETA تخمین زده شد. نتایج نشان داد که در لایه‌های مورد مطالعه بیشترین مقدار میانگین ویژگی‌های هیدرولیکی برآورد شده، مربوط به هدایت هیدرولیکی اشباع بود. با افزایش عمق پروفیل خاک، مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع نیز افزایش معنی‌داری داشت. دامنه تغییرات و مقادیر انحراف معیار هدایت هیدرولیکی اشباع بیان‌گر تغییرپذیری مکانی و زمانی این ویژگی هیدرولیکی است. بررسی آماره‌های چولگی و افراشتگی پارامترهای هیدرولیکی در لایه اول خاک نشان داد که هدایت هیدرولیکی اشباع، توزیع اندازه ذرات و رطوبت اشباع دارای توزیع غیر نرمال هستند. این یافته حاکی از غیریکنواختی شدید در اراضی دشت سیستان از نظر این متغیرها است. ویژگی‌های هیدرولیکی برآورد شده رطوبت اشباع، رطوبت باقی‌مانده و شاخص توزیع ذرات تفاوت معنی‌داری بین لایه‌های پروفیل‌های مورد مطالعه داشتند اما تفاوت معنی‌داری بین لایه‌ها برای α مشاهده نشد. در این پژوهش پایگاه داده‌ای برای ویژگی‌های هیدرولیکی خاک به‌دست آمد که می‌تواند در پژوهش‌های آتی برای چرخه هیدرولوژی و مدل‌سازی مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به عدم وجود همبستگی بین مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده و برآورد شده و نیز مقدار زیاد RMSD حاصل از رابطه رگرسیونی K_{sm} و K_{se}، عدم قطعیت در برآوردها زیاد بوده و لذا توسعه توابع انتقالی ویژه منطقه پیشنهاد می‌شود. به‌عنوان محدودیت این پژوهش، باید اشاره کرد که علیرغم تأثیر بالقوه و قابل‌توجه پارامترهای شیمیایی خاک نظیر شوری، سدیم، نسبت جذب سدیم (SAR) و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) بر ویژگی‌های هیدرولیکی، تمرکز اصلی این مقاله بر ارزیابی تابع انتقالی ROSETTA بر اساس ویژگی‌های فیزیکی بوده است. به نظر می‌رسد عدم لحاظ این عوامل شیمیایی در کنار عوامل فیزیکی، یکی از دلایل اصلی عدم موفقیت تابع انتقالی عمومی ROSETTAدر برآورد دقیق ویژگی‌های هیدرولیکی در منطقه باشد. از این رو، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، با اندازه‌گیری هم‌زمان ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و ورود آنها به توابع انتقالی، توابع ویژه منطقه‌ای توسعه داده شوند تا دقت برآوردها افزایش یابد.

اگرچه به دلیل وسعت قابل‌توجه منطقه مورد مطالعه (۴۶،۰۰۰ هکتار) و تعداد بالای پروفیل‌های حفر شده (۳۱۲

پروفیل در ۱۶ ناحیه عمرانی)، پایگاه داده‌ای این پژوهش از قدرت نمایندگی بالایی برای دشت سیستان برخوردار است، با این حال، تعمیم مستقیم ضرایب برآورد شده به سایر مناطق بدون واسنجی، به‌دلیل تفاوت در شرایط اقلیمی، زمین‌شناسی و شیمی خاک، امکان‌پذیر نیست. با این وجود، روش‌شناسی بکار رفته در این مطالعه شامل نمونه‌برداری سیستماتیک، استفاده از مدل و تحلیل عدم قطعیت و همچنین نتیجه کلی مبنی بر عملکرد ضعیف توابع انتقالی عمومی در خاک‌های با شوری بالا و بافت‌های متغیر، می‌تواند به‌عنوان یک الگوی تحقیقاتی برای سایر مناطق خشک و نیمه‌خشک مدنظر قرار گیرد و محققان می‌توانند با بکارگیری این روش، به ارزیابی دقت توابع انتقالی در منطقه مورد مطالعه خود بپردازند.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

References

1. Abu-hashim, M., Lilientha, H., Schnug, E., Kucher, D., and Mohamed, E. S. (2022). Tempo-Spatial Variations in Soil Hydraulic Properties under Long-Term Organic Farming. Land, 11: 1655. https://doi.org/10.3390/land11101655
2. Acevedo, S.E., Martinez, S.I., Contreras, C.P., and Bonilla, C.A. (2023). Effect of data availability and pedotransfer estimates on water flow modelling in wildfire-affected soils. *Journal of Hydrology*, 617, Part B, 128919. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128919
3. Amoozegar, A and Warrick, A.W. (1982). Hydraulic conductivity of saturated soils: field methods. In: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R., (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA. pp. 735-768.
4. Bai, X., Shao, M., Jia, X., Zhao, C. (2022). Prediction of the van Genuchten model soil hydraulic parameters for the 5-m soil profile in China's Loess Plateau. *CATENA*, 210, 105889. *https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105889*
5. Benson, C.H. Chiang, I. Chalermyanont, T., and Sawangsuriya, A. (2014). Estimating van Genuchten Parameters α and n for Clean Sands from Particle Size Distribution Data. *Conference Paper in Geotechnical Special Publication*, 2-24.
6. Blake, G.R., Hartge, K.H., 1982. Bulk Density. In: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R., (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA. pp. 363-375.
7. Borek, L., Bogdal, A., and Kowalik, T. (2021). Use of Pedotransfer Functions in the Rosetta Model to Determine Saturated Hydraulic Conductivity (Ks) of Arable Soils: A Case Study. *Land*, 10: 959. https://doi.org/10.3390/land10090959
8. Dexter, A.R. (1988). Advances in characterization of soil structure. *Soil Tillage Research*, 11:199-238. https://doi.org/10.1016/0167-1987(88)90002-5
9. Gee, G.W., and Bauder, J.W. (1982). Particle size Analysis. In: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R., (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA. pp. 404–408.
10. Leuther, F., Schlüter, S., Wallach, R., and Vogel, H.J. (2019). Structure and hydraulic properties in soils under long-term irrigation with treated wastewater. *Geoderma*, 333: 90-98. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.015
11. Niu, L., Jia, X., Li, X., Zhao, C., Ren, L., Hu, W., Zhu, P., Li, D., Zhang, B., and Shao, M. (2024). Developing novel ensemble models for predicting soil hydraulic properties in China's

arid region. *Journal of Hydrology*, 636: 31354, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131354
12. Razavi, S., Rasoolzadeh, A., and Neyshabori, M R. (2014). Evaluation of Pedotransfer Functions for Estimating Soil Water Characteristic Curve in Naqadeh County. *Journal of Water Research in Agriculture*, *28*(3), 613-624. (In Persian) 10.22092/JWRA.2014.100011
13. Rezaei, M., Saey, T.; Seuntjens, P., Joris, I., Boenne, W., Van Meirvenne, M., and Cornelis, W. (2016b). Predicting saturated hydraulic conductivity in a sandy grassland using proximally sensed apparent electrical conductivity. *Journal of Applied Geophysics*, 126, 35–41. https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.01.012
14. Rezaei, M., Seuntjens, P., Joris, I., Wesley Boenne, W., Van Hoey, S., Campling, P., and Cornelis, W. (2016a). Sensitivity of water stress in a two-layered sandy grassland soil to variations in groundwater depth and soil hydraulic parameters. *Hydrology and Earth System Sciences* 20, 487-503. https://doi.org/10.5194/hess-20-487-2016
15. Rezaei, M., Shahbazi, K., Shahidi, R., Davatgar, N., Bazargan, K., Rezaei, H., Saadat, S., Seuntjens, P., and 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.2021.125777
16. Schaap, M.G., Leij, F.J. and van Genuchten, M.Th. (2001). Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251: 163–176. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00466-8
17. Singh, D., Mishra, A. K., Patra, S., Mariappan, S., Sngh, N., and Kar, S. K. (2023). Spatial variability of soil hydraulic and physical properties in erosive sloping agricultural fields. *Water Science and Engineering*, 16(1):57-66. https://doi.org/10.1016/j.wse.2022.07.004
18. Van Genuchten, M.Th. (1980). A closed form equation predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*, 44, 892-898. https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x
19. Veihmeyer, F.J., and Hendrickson, A.H. (1949). Methods of measuring field capacity and wilting percentages of soils. *Soil Sci*. 68: 75–94. https://doi.org/10.1097/00010694-194907000-00007
20. Vereecken, H., Weynants, M., Javaux, M., Pachepsky, Y., Schaap, M.G., and van Genuchten, M.Th. (2010). Using Pedotransfer Functions to Estimate the van Genuchten–Mualem Soil Hydraulic Properties: A Review. *Vados Zone Journal*, 9(4): 795- 820. https://doi.org/10.2136/vzj2010.0045
21. Wang, Z., Huang, L., and Shao, M. (2024) Development of pedotransfer functions for predicting hydraulic parameters of van Genuchten model by incorporating environmental variables on the Qinghai-Tibet Plateau. *Soil and Tillage Research*, 236, 105952. https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105952
22. Zhang, Y., and Schaap, M. G. (2017). Weighted recalibration of the Rosetta pedotransfer model with improved estimates of hydraulic parameter distributions and summary statistics (Rosetta3). *Journal of Hydrology*, 547, 39-53. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.01.004
23. Zhao, C.; Shao, M.; Jia, X.; Nasir, M.; and Zhang, C. (2016). Using pedotransfer functions to estimate soil hydraulic conductivity in the Loess Plateau of China. *CATENA*, 143, 1–6. https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.04.003