

Evaluation of point pedotransfer functions in estimating field capacity and permanent wilting point water content

Parisa Kahkhamoghadam^{1*} 

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

Extended Abstract

Introduction

The amount of available water in the soil for crop use, called available water (AW), is described as the capacity of the soil to retain water and make it available for root uptake. Irrigation management, agricultural projects, and soil water balance are some of the well-known practical applications related to AW. It is generally accepted that matric potentials at -33 kPa and -1500 kPa represent FC and PWP, respectively. An attractive alternative to direct and often laborious measurements of these soil hydraulic properties is their estimation using soil pedotransfer functions (PTFs). The efficiency of PTFs is not the same in different locations and conditions, so the performance of each PTF should be evaluated according to the soil characteristics of each region. The Sistan Plain is one of the strategic border areas of eastern Iran and the edge of the desert. The main objective of this study is to evaluate the performance of 23 different PTF models in predicting soil water retention at matric potentials of -33 kPa and -1500 kPa in the Sistan Plain. In order to determine the best PTF that is appropriate for the conditions of the study area, 100 soil samples from the Sistan region were used.

Materials and Methods

In order to conduct this study, 100 soil samples were collected from a part of the Sistan Plain for laboratory analysis and transported to the laboratory. Particle size distribution (sand, silt, and clay) was measured by the hydrometric method, organic carbon by the Walkley-Black method, and bulk density by the cylinder method. Twenty-three PTFs were evaluated to predict water content (gravimetric and volumetric), including twelve functions for a matric potential of -33 kPa and eleven functions for a matric potential of -1500 kPa. PTFs can also be categorized based on the type of prediction, namely point and continuous PTFs, and in this study, point PTFs were evaluated. The selection of PTFs is limited to PTFs that use soil properties that are present in the dataset of the present study. The sum of squared error method was used to calibrate the models under study. In this study, NRMSE, ME, r, and RES criteria were used to fully evaluate the models.

Results and Discussion

The results showed that the changes in the amounts of sand, silt, and clay ranged from 14 to 56, 27 to 52, and 14 to 57 percent, respectively, which resulted in the creation of textural classes of loam, clay loam, sandy clay loam, clay, silty loam, and sandy loam. The function developed by Aina and Periaswamy (1985) with NRMSE, ME, r, and RES values of 0.61, 0.15, 1.48, and -0.148, respectively, had the least closeness to the measured values of θ_{33} . The results also show that among the PTFs examined for estimating θ_{33} , the PTF developed by dos Reis et al. (2024) with NRMSE, ME, r and RES values of 0.10, 0.01, 1.04 and -0.012, respectively, and in the next rank and with a slight difference, the PTFs developed by Oliveira et al. (2002) and Minasny and Hartemink (2011) with NRMSE, ME and r values of 0.10, 0.02 and 0.05 (same for both functions) had the best agreement with the measured values of θ_{33} . Meanwhile the function developed by Aina and Periaswamy (1985) with NRMSE, ME, r, and RES values of 0.61, 0.15, 1.48, and -0.148, respectively, had the least closeness to the measured values of θ_{33} . The summary of the evaluation of eleven PTFs for estimating θ_{1500} shows that the Dijkerman (1988) and Aina and Periaswamy (1985) functions provided the best performance among the functions studied, with ME of 0.00 and -0.01, NRMSE values of 0.15 and 0.16, and r of 1.02 and 0.95, respectively. The function developed by Oliveira et al. (2002) showed good performance for estimating θ_{33} , but it was the least close to the measured values of θ_{1500} with NRMSE, ME, r, and RES values of 0.84, 0.14, 1.83, and -0.138, respectively. Then, with the aim of improvement, the high-performance economic functions were selected and recalibrated. In estimating θ_{33} , the performance of both the dos Reis et al. (2024) and Oliveira et al. (2002) functions improved (albeit only slightly) by reducing NRMSE (0.08) and ME (0.00) to reach r of 1.00. The Dijkerman (1988) and dos Reis et al. (2024) functions also improved the estimation of θ_{1500} with NRMSE, ME, and r of 0.14, 0.00, and 1.00, respectively.

Conclusion

The results showed that among the PTFs used to estimate θ_{33} , the functions developed by dos Reis et al. (2024) and Oliveira et al. (2002) demonstrate the best agreement with the measured values. The functions developed by Dijkerman (1988) and Aina and Periaswamy (1985) also provide the highest performance in estimating θ_{1500} . The results of this study also show that some of the new functions presented in this field can provide good performance compared to the basic functions in predicting soil moisture content. The performance of PTFs for the study area is not affected by the number of their input components, and PTFs that require fewer inputs will not necessarily have lower performance. This is because PTFs depend on the location where they are developed and also on the soil structure. In order to improve the results of the functions of dos Reis et al. (2024) and Oliveira et al. (2002) were recalibrated to estimate θ_{33} , and the functions of Dijkerman (1988) and dos Reis et al. (2024) were recalibrated to estimate θ_{1500} . The selection of the aforementioned PTFs was based on high performance and minimum required input components, or in other words, the economy of the function. Recalibration further improved the performance of the aforementioned functions. θ_{33} , θ_{1500} and AW are key components in a wide range of studies such as crop modeling, hydrological modeling, water resources management, soil nutrient cycle modeling and soil pollution modeling, therefore the results presented in this study can be used in predicting soil moisture content and AW for the study area, using the soil pedotransfer function technique as an input parameter in various modeling.

Keywords: Available water, matric potential, particle size distribution, soil.

Article Type: Research Article

Acknowledgement

We would like to express our sincere gratitude to the University of Zabol for the financial and logistical support that significantly contributed to this research project.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement:

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Parisa Kahkhamoghadam: Conceptualization, methodology, formal analysis and investigation, visualization, resources, writing-original draft preparation, manuscript editing

*Corresponding Author, E-mail: Parisa Kahkhamoghadam, parisakahkhamoghadam@uoz.ac.ir

Citation: Kahkhamoghadam, P. (2026). Evaluation of point pedotransfer functions in estimating field capacity and permanent wilting point water content. *Water and Soil Management and Modeling*, 6(1), 192-207.

doi:10.22098/mmws.2025.18164.1652

Received: 23 August 2025, Received in revised form: 30 September 2025, Accepted: 30 September 2025, Published online: 21 March 2026

Water and Soil Management and Modeling, Year 2026, Vol. 6, No. 1, pp. 192-207

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





ارزیابی توابع انتقالی نقطه‌ای در برآورد رطوبت ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی دائم

پریسا کهخامقدم^۱

^۱ استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

چکیده

مدل‌های گیاهی و هیدرولوژیکی اغلب به مؤلفه‌های ورودی در مورد آب قابل دسترس برای گیاه (AW) نیاز دارند. با این وجود به دست آوردن چنین مؤلفه‌هایی پرزحمت و پرهزینه است. توابع انتقالی خاک (PTFs) یکی از روش‌های جایگزین برای تعیین خواص فیزیکی خاک مانند محتوای رطوبت خاک است. لذا هدف این پژوهش ارزیابی بیست و سه PTFs نقطه‌ای برای تخمین رطوبت خاک در پتانسیل‌های ماتریک ۳۳- θ_{33} و ۱۵۰۰- θ_{1500} کیلوپاسکال، برای صد نمونه از خاک‌های دشت سیستان است. در این پژوهش تلاش بر این بوده است که از جدیدترین توابعی که در این زمینه ارائه شده است نیز استفاده شود. نتایج حاکی از آن بود که تابع دوس‌ریس با مقادیر r ، ME، NRMSE و RES به ترتیب برابر ۰/۱۰، ۰/۰۱، ۰/۰۴ و ۰/۰۱۲- و سپس تابع اولیویرا و همکاران با مقادیر r ، ME، NRMSE و RES به ترتیب برابر ۰/۱۰، ۰/۰۲، ۰/۰۵ و ۰/۰۱۶-، بیش‌ترین انطباق را با مقادیر اندازه‌گیری شده θ_{33} داشته است. برای تخمین θ_{1500} نیز تابع دیجکرمن با مقادیر r ، ME، NRMSE و RES به ترتیب برابر ۰/۱۵، ۰/۰۰، ۰/۰۲ و ۰/۰۰۳- و در رتبه دوم تابع آینا و پریاسوامی با مقادیر r ، ME، NRMSE و RES به ترتیب برابر ۰/۱۶، ۰/۰۱، ۰/۰۹۵ و ۰/۰۰۹- بهترین عملکرد را ارائه کردند. همچنین نتایج این پژوهش نشان می‌دهد بهترین توابع در تخمین θ_{33} و θ_{1500} به ترتیب تنها به درصد شن و درصد رس بستگی دارند، لذا برای منطقه مورد مطالعه PTFs که به ورودی‌های کم‌تری نیاز دارند، لزوماً عملکرد پایین‌تری نخواهند داشت، بلکه عواملی مانند تعداد نمونه‌های خاک، ساختمان خاک و مکانی که توابع مورد بررسی توسط آن‌ها توسعه یافته‌اند نیز بر عملکرد آنها مؤثر است. در ادامه PTFs اقتصادی‌تر و با عملکرد بالاتر مورد واسنجی مجدد قرار گرفتند. در تخمین θ_{33} عملکرد هر دو تابع دوس‌ریس و اولیویرا و همکاران با کاهش NRMSE (۰/۰۸) بهبود یافته‌اند. توابع دیجکرمن و دوس‌ریس نیز با مقادیر NRMSE برابر ۰/۱۴، تخمین θ_{1500} را بهبود بخشیده‌اند. θ_{33} ، θ_{1500} و AW مؤلفه‌های کلیدی در طیف وسیعی از مطالعات مانند مدل‌سازی گیاهی، مدل‌سازی هیدرولوژیکی، مدیریت منابع آب، مدل‌سازی چرخه مواد غذایی خاک و مدل‌سازی آلودگی خاک هستند؛ بنابراین، نتایج این پژوهش می‌تواند در مباحث مربوط به مدیریت آبیاری و حفاظت از خاک در منطقه مورد مطالعه به کار گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: آب قابل دسترس برای گیاه، پتانسیل ماتریک، توزیع اندازه ذرات، خاک.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: پریسا کهخامقدم، parisakahkhamoghdam@uoz.ac.ir

استناد: کهخامقدم، پریسا (۱۴۰۵). ارزیابی توابع انتقالی نقطه‌ای در برآورد رطوبت ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی دائم. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۶(۱)، ۱۹۲-۲۰۷.

doi: 10.22098/mmws.2025.18164.1652

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۰۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۸، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۵، دوره ۶، شماره ۱، صفحه ۱۹۲ تا ۲۰۷

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

مسائل مهمی مانند کمبود آب برای کشاورزی، آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی و افزایش هزینه‌های سیستم‌های آبیاری، کشاورزان را تحت فشار زیادی قرار می‌دهد. بخش کشاورزی، بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب شیرین در سراسر جهان است (Gholami Sharafkhane et al., 2025) و لذا کشاورزان برای ادامه فعالیت‌های خود باید بهره‌وری مصرف آب را به‌طور چشم‌گیری افزایش دهند. در این راستا، دانشمندان برای کمک به زارعین مدل‌هایی را با سطوح مختلف پیچیدگی توسعه داده‌اند. مدل‌هایی مانند SPAW¹ (Saxton and Willey, 2006) و AquaCrop (Steduto et al., 2009) در مطالعات مختلف مربوط به مدیریت آب خاک در کشاورزی، در سراسر جهان به‌کار گرفته شده‌اند. مدل‌های گیاهی به خواص هیدرولیکی خاک، به‌ویژه مقدار آب موجود در خاک برای استفاده گیاه نیاز دارند (Kahkhamoghadam et al., 2024) و استفاده از این مدل‌ها به پژوهشگران کمک می‌کند تا بدون انجام آزمایش‌های متعدد، واکنش گیاهان به مدیریت‌های مختلف کشاورزی را مورد بررسی قرار دهند (Neysi et al., 2023). مقدار آب موجود در خاک برای استفاده گیاه که به آن آب قابل‌دسترس (AW)² گفته می‌شود، به‌عنوان ظرفیت خاک برای حفظ آب و در دسترس قرار دادن آن برای جذب ریشه‌ها توصیف می‌شود (Rosseti et al., 2022). حرکت آب در خاک، به‌ویژه در حالت غیراشباع، یکی از فرآیندهای کلیدی در طیف وسیعی از مطالعات مانند مدل‌سازی هیدرولوژیکی، مدیریت منابع آب، مدل‌سازی چرخه مواد غذایی خاک و مدل‌سازی آلودگی خاک است (Feddes et al., 2004). همچنین مدیریت آبیاری، پروژه‌های کشاورزی و بیلان آب در خاک، برخی از کاربردهای عملی شناخته شده مرتبط با AW هستند (Silva et al., 2014). آب قابل‌دسترس به‌عنوان رطوبت خاک (θ) بین ظرفیت مزرعه (FC)³ و نقطه پژمردگی دائم (PWP)⁴ شناخته می‌شود و دانستن آن برای ارزیابی ذخیره آب در خاک و مدیریت کارآمد محصولات کشاورزی ضروری است (Silva et al., 2014; Qiao et al., 2019).

در مطالعات، FC و PWP دو نقطه مهم از منحنی نگهداشت آب خاک (SWRC)⁵ را نشان می‌دهند. SWRC رابطه بین پتانسیل ماتریک خاک و محتوای رطوبت وزنی یا حجمی آن را توصیف می‌کند (Jury and Horton, 2004). شکل منحنی رطوبتی برای هر خاک منحصر به فرد است و به خواص فیزیکی و شیمیایی مختلف آن مربوط می‌شود و می‌توان آن را به‌عنوان

اثر انگشت یک خاک در نظر گرفت (Cornelis et al., 2001). به‌طور کلی پذیرفته شده است که پتانسیل‌های ماتریک در ۳۳- کیلوپاسکال و ۱۵۰۰- کیلوپاسکال به ترتیب نشان‌دهنده FC و PWP هستند (Botula et al., 2012). با این حال، اندازه‌گیری‌های مستقیم محتوای آب خاک در ۳۳- کیلوپاسکال و ۱۵۰۰- کیلوپاسکال و همچنین تعیین ویژگی‌های نگهداری آب در خاک، به‌ویژه برای مطالعات زیست‌محیطی در مقیاس منطقه‌ای گران و زمان‌بر هستند (Botula et al., 2014; Santra et al., 2018) و برای مدیریت خاک و محصول عملی نیست (Rosseti et al., 2022). بنابراین، برای غلبه بر این محدودیت، یک جایگزین جذاب برای اندازه‌گیری‌های مستقیم و اغلب پرهزینه این خواص هیدرولیکی خاک، تخمین آن‌ها با استفاده از توابع انتقالی خاک (PTFs)⁶ است (Botula et al., 2022; Rosseti et al., 2022). PTFs توابع پیش‌بینی‌کننده‌ای هستند که داده‌های زودیافت خاک مانند بافت (شن، سیلت و رس)، چگالی ظاهری، محتوای ماده آلی (یا کربن آلی) و یا سایر داده‌هایی که به‌طور معمول در بررسی‌های خاک اندازه‌گیری یا ثبت می‌شوند را با پارامترهای هیدرولیکی مانند SWRC مرتبط می‌کنند (van den Berg et al., 1997; Botula et al., 2012). بنابراین توابع خاک یک روش جایگزین برای تخمین ویژگی‌های پیچیده خاک مانند خصوصیات نگهداری آب در خاک در نظر گرفته می‌شوند (Rab et al., 2011). پیشرفت‌های زیادی در توسعه توابعی که رطوبت خاک را تخمین می‌زنند صورت گرفته است، با این وجود انتخاب یک PTF مناسب، ساده نیست؛ به‌عنوان مثال، یک PTF ممکن است برای یک منطقه خاص توسعه یافته باشد و برای مناطق دیگر مناسب نباشد و در استفاده از آن‌ها، برخی ملاحظات باید در نظر گرفته شوند (Rustanto et al., 2017). تفاوت خاک‌ها در مناطق معتدل و گرمسیری (dos Reis et al., 2024)، خاک‌ها با محتوای رس بیشتر، ظرفیت تبادل کاتیونی پایین‌تر، چگالی ظاهری بالاتر (Minasny and Hartemink, 2011) یا تفاوت در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها (Tomasella and Hodnett, 2004)، منجر به تفاوت در خواص هیدرولیکی آن‌ها می‌شود. علاوه بر این، باز هم احتمال نامناسب بودن PTFs برای یک منطقه وجود دارد حتی اگر PTFs از مجموعه داده‌های خاک از یک دامنه جغرافیایی مشابه به‌دست آمده باشند، و این ناکافی بودن احتمالاً به دلیل تفاوت در ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی خاص بین منطقه توسعه PTFs و منطقه‌ای که PTFs در آن استفاده می‌شود، رخ می‌دهد

⁴ permanent Wilting Point

⁵ soil water retention curve

⁶ pedotransfer functions

¹ Soil-Plant-Air-Water

² Available Water

³ Field Capacity

دشت سیستان یکی از نواحی استراتژیک مرزی شرق ایران و حاشیه کویر است. عواملی مانند تغییر اقلیم و بادهای محلی ۱۲۰ روزه در منطقه سیستان منجر به افزایش رویدادهای خطرناکی مانند خشکسالی در منطقه مذکور شده است (Kahkhamoghadam and Delbari, 2024) و چنین رویدادهایی مستلزم مطالعاتی است که به اطلاعاتی مانند AW (تفاضل FC و PWP)، به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های اصلی نیاز دارند (Rustanto et al., 2017). در سال‌های اخیر دولت اقداماتی مانند طرح ۴۶ هزار هکتاری آبیاری دشت سیستان، را برای توسعه کشاورزی در این منطقه انجام داده است. لذا با توجه به زمان‌بر و پرهزینه بودن روش‌های مستقیم، هدف اصلی این مطالعه، ارزیابی عملکرد ۲۳ مدل مختلف PTFs در پیش‌بینی نگهداشت آب خاک در پتانسیل‌های ماتریک ۳۳- و ۱۵۰۰- کیلوپاسکال در دشت سیستان است که شامل جدیدترین توابعی که در این زمینه ارائه شده نیز است. با توجه به اهمیت مطالب ذکر شده چنین پژوهشی تاکنون برای دشت سیستان صورت نگرفته است. در راستای تعیین بهترین PTFs که متناسب با شرایط منطقه مورد مطالعه باشد، از ۱۰۰ نمونه خاک منطقه سیستان استفاده شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

این مطالعه در بخشی از اراضی دشت سیستان در محدوده جغرافیایی بین ۶۰ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۵۰ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۵ دقیقه و تا ۳۱ درجه و ۲۸ دقیقه عرض شمالی صورت پذیرفت. این منطقه با میانگین ارتفاع از سطح دریا ۴۸۱ متر، بر اساس طبقه‌بندی کوپن دارای اقلیم خشک و بسیار گرم و با تابستان‌های گرم و خشک است (Chari et al., 2021). در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی دشت سیستان نشان داده شده است.

۲-۲- روش تحقیق

۲-۲-۱- اندازه‌گیری مستقیم نقاط رطوبتی

به‌منظور انجام این پژوهش ۱۰۰ نمونه خاک برای انجام آنالیزهای آزمایشگاهی برداشت و به آزمایشگاه منتقل شد. بعد از عبور از الک ۲ میلی‌متری برای همگن‌سازی، توزیع اندازه ذرات (شن، سیلت و رس) به روش هیدرومتری (Gee and Or, 2002)، کربن آلی به روش واکلی- بلک (Walkley and Black, 1934) و جرم مخصوص ظاهری نیز به روش سیلندر اندازه‌گیری شدند (Blake and Hartge, 1986). میزان رطوبت خاک در مکش‌های ۱۵۰۰- و ۳۳- کیلوپاسکال، با استفاده از صفحات فشاری و با پیروی از رویه‌های شرح داده شده در Cornelis et

(McBratney et al., 2002; Rustanto et al., 2017). با این حال توابع خاک نباید فراتر از کلاس‌های خاکی که برای آن‌ها توسعه داده شده‌اند، تعمیم داده شوند و هرچه پایگاه داده‌های توابع خاک همگن‌تر باشد، عملکرد مدل نیز بهتر خواهد بود (Souza et al., 2014). کارایی PTFs در مکان‌ها و شرایط مختلف یکسان نیست، لذا با توجه به ویژگی‌های خاک هر منطقه، عملکرد هر PTF باید مورد ارزیابی قرار گیرد (Martinez and Souza, 2020). در ادامه به مختصری از جدیدترین پژوهش‌های مرتبط با مطالعه حاضر پرداخته می‌شود.

(Razavi et al., 2014) با استفاده از ستون آب آویزان و صفحه فشاری منحنی رطوبتی را با خاک‌های شهرستان نقده اندازه‌گیری کردند. ایشان بیان کردند که نرم‌افزار رزتا و سپس تابع کمپل تعدیل‌شده، در شبیه‌سازی منحنی رطوبتی از دقت بالایی برخوردار هستند. در پژوهشی (Abdelbaki, 2021) به انجام ارزیابی جامعی از توابع نقطه‌ای و پیوسته برای خاک‌های ایالت متحده پرداخت و عملکرد هر تابع را برای خاک‌هایی با کلاس‌های بافتی مختلف و در چهار پتانسیل ماتریک ارزیابی نمود. در این پژوهش توابع با بهترین عملکرد در پتانسیل‌های ماتریک مختلف شناسایی شد و اشاره شد که نتایج این مطالعه برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی مفید است زیرا دقیق‌ترین PTF را برای هر کلاس بافت خاک شناسایی می‌کند. (Rosseti et al., 2022) در پژوهشی مشابه PTFs جدیدی را برای پیش‌بینی نگهداشت آب در پتانسیل‌های ماتریک ۳۳- و ۱۵۰۰- کیلوپاسکال خاک‌های برزیل تعیین کردند. ایشان بیان کردند که برای منطقه مذکور، کارآمدترین متغیرها در مکش ۳۳- کیلوپاسکال، درصد شن، رس و ریز تخلخل و در مکش ۱۵۰۰- کیلوپاسکال، درصد شن، سیلت و رس هستند. (dos Reis et al., 2024) نیز PTFs نقطه‌ای جدیدی را برای نقاط کلیدی منحنی رطوبتی آب خاک با استفاده از بافت خاک، چگالی ظاهری و ماده آلی توسعه دادند. در این پژوهش معادلات PTFs از رگرسیون‌های خطی و غیرخطی خواص فیزیکی اندازه‌گیری شده خاک استخراج شدند. ایشان اظهار داشتند که عملکرد PTFs جدید، در مقایسه با PTFs موجود و شناخته شده بهتر بوده؛ بنابراین، می‌توان آن‌ها را در خاک‌های نیمه‌گرمسیری، گرمسیری و معتدل و در طیف وسیع‌تری از بافت‌ها به‌کار برد. در پژوهش دیگر (Jaefarzade Andabili et al., 2025) با هدف ارائه توابع انتقالی خطی و غیرخطی، برای پیش‌بینی رطوبت در نقطه FC از خاک‌های شمال غربی ایران استفاده کردند. برای این منظور از خواص خاک شامل بافت، چگالی ظاهری و ماده آلی استفاده شد. نتایج ایشان حاکی از آن بود که توابع توسعه یافته، رطوبت در نقطه FC را کمی کم‌تر از مقدار واقعی تخمین می‌زنند.

بین مقدار رطوبت و مکش ماتریک بر اساس یک مدل منحنی مشخصه رطوبتی خاص مانند مدل وان گنوختن قابل توصیف است (Wösten et al., 2001; Rustanto et al., 2017). در این پژوهش PTFs نقطه‌ای مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. PTFs مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است. علاوه بر این، انتخاب PTFs محدود به توابعی است که از ویژگی‌هایی از خاک استفاده می‌کنند. که در مجموعه داده‌های پژوهش حاضر وجود داشته باشد. پیش‌بینی‌های PTFs انتخاب شده در واحد وزنی با ضرب آن در چگالی ظاهری خاک به واحد حجمی تبدیل شدند. لازم به ذکر است در این پژوهش تلاش بر این بوده است که از جدیدترین توابعی که توسط پژوهشگران خاک در این زمینه ارائه شده است نیز استفاده شود.

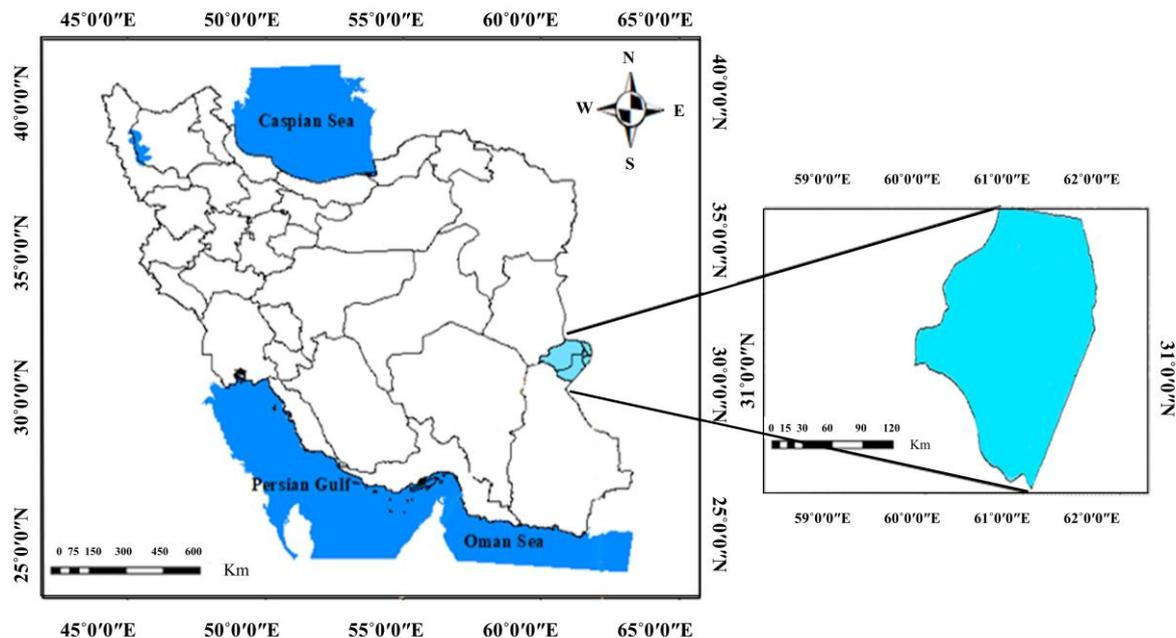
۳-۲-۲-۳- واسنجی

به منظور واسنجی مدل‌های مورد بررسی از روش مجموع مجذور مربعات خطا استفاده شد. طبق این ویژگی مقادیر ضرایب توابع به گونه‌ای تخمین زده می‌شوند که مجموع مجذور مربعات خطا (مقادیر اندازه‌گیری شده منهای پیش‌بینی شده) تا حد امکان کوچک باشد (Samaras et al., 2014; Tian et al., 2021). این روش با استفاده از گزینه solver در نرم‌افزار Excel صورت پذیرفت. در این پژوهش هفتاد نمونه از داده‌ها برای واسنجی و سی نمونه از داده‌ها برای ارزیابی استفاده شد.

al. (2005) تعیین شد. وزن مخصوص حقیقی و رطوبت باقی مانده (θ_r) مؤلفه ورودی هیچ کدام از توابع مورد استفاده در این پژوهش نبوده است و لذا اندازه‌گیری نشد. با این وجود اگر رطوبت باقی مانده به عنوان مؤلفه ورودی در توابع نقطه‌ای مورد نیاز باشد به صورت $\theta_{1500} = \theta_r$ در نظر گرفته می‌شود (Tian et al., 2021). پیش از تجزیه و تحلیل داده‌ها، نرمال بودن آماره‌های توصیفی و ویژگی‌های خاک با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمرینف و در محیط نرم‌افزار SPSS در سطح معنی‌داری ۵ درصد ارزیابی شد (Hosseini et al., 2021).

۲-۲-۲- توابع انتقالی (PTFs)

در این مطالعه بیست و سه PTFs برای پیش‌بینی محتوای رطوبتی خاک (وزنی و حجمی) مورد ارزیابی قرار گرفت که شامل دوازده تابع برای پتانسیل ماتریک ۳۳- و یازده تابع برای پتانسیل ماتریک ۱۵۰۰- کیلوپاسکال است. توابع توسعه یافته برای تخمین نگهداری آب در خاک را می‌توان بر اساس دامنه جغرافیایی، مجموعه داده‌های خاک برای توسعه PTFs (یعنی مجموعه داده‌های خاک بین‌المللی و محلی/ مکان خاص) طبقه‌بندی نمود؛ علاوه بر این، PTFs را می‌توان بر اساس نوع پیش‌بینی، یعنی توابع نقطه‌ای و پیوسته نیز دسته‌بندی کرد. PTFs با توجه به نحوه برآورد آن‌ها به دو گروه توابع نقطه‌ای و توابع پارامتریک (پیوسته) تقسیم می‌شوند؛ توابع نقطه‌ای، رابطه‌های رگرسیونی هستند که به طور معمول مقدار رطوبت را در مکش‌های ماتریک معین برآورد می‌کنند اما در توابع پیوسته رابطه



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت سیستان در استان سیستان و بلوچستان ایران
Fig 1. Geographical location of the Sistan Plain in Sistan and Baluchestan Province of Iran

جدول ۱ - فهرست PTFs انتخاب شده برای ارزیابی θ_{33} و θ_{1500} خاک‌های دشت سیستانTable 1. List of the selected PTFs used for evaluating θ_{33} and θ_{1500} of Sistan Plain soil

Pedotransfer functions [†]	Source
$W_{33}(\%) = (7 \cdot 38 + 0 \cdot 16SI + 0 \cdot 3CL + 1 \cdot 5OM - 3 \cdot 77)0 \cdot 95^{-1}$ $W_{1500}(\%) = -4 \cdot 19 + 0 \cdot 19SI + 0 \cdot 39CL + 0 \cdot 9OM$	Pidgeon (1972)
$W_{33}(g/g) = 0 \cdot 065 + 0 \cdot 004CL$ $W_{1500}(g/g) = 0 \cdot 006 + 0 \cdot 003CL$	Lal (1978)
$W_{33}(\%) = 67 \cdot 88 + 0 \cdot 55SA - 0 \cdot 13BD$ $W_{1500}(\%) = 2 \cdot 13 + 0 \cdot 31CL$	Aina and Periaswamy (1985)
$W_{33}(\%) = 9 \cdot 93 + 0 \cdot 29(CL + SI)$ $W_{1500}(\%) = 1 \cdot 07 + 0 \cdot 27(CL + SI)$	Arruda et al. (1987)
$W_{33}(\%) = 36 \cdot 97 - 0 \cdot 35SA$ $W_{1500}(\%) = 0 \cdot 74 + 0 \cdot 39CL$	Dijkerman (1988)
$W_{33}(Kg/Kg) = 0 \cdot 00333SI + 0 \cdot 00387CL$ $W_{1500}(Kg/Kg) = 0 \cdot 00038SA + 0 \cdot 00153SI + 0 \cdot 00341CL + 0 \cdot 03086BD$	Oliveira et al. (2002)
$\theta_{33}(\%) = 56 \cdot 37 - 0 \cdot 51SA - 0 \cdot 27SI$ $\theta_{1500}(\%) = 0 \cdot 71 + 0 \cdot 44CL$	Adhikary et al. (2008)
$\theta_{33}(\%) = 56 \cdot 5 - 7 \cdot 49BD - 0 \cdot 34SA$ $\theta_{1500}(\%) = 7 \cdot 95 + 0 \cdot 86OC + 0 \cdot 4CL - 0 \cdot 004(CL - 37 \cdot 7)^2$	Minasny and Hartemink (2011)
$W_{33}(g/g) = 0 \cdot 4193 - 0 \cdot 0035SA$ $W_{1500}(g/g) = 0 \cdot 0841 - 0 \cdot 00159SA + 0 \cdot 0021CL + 0 \cdot 0779BD$	Botula (2013)
$\theta_{1500}(m^3/m^3) = 0 \cdot 0112BD \times CL^{0 \cdot 755}$	Tian et al. (2021)
$\theta_{33}(m^3/m^3) = 0 \cdot 30488 - 6 \cdot 228 \times 10^{-4}SA^{1 \cdot 5} + 0 \cdot 0073864SA^{0 \cdot 5}LnSA$ $\theta_{1500}(m^3/m^3) = 0 \cdot 0302 + 0 \cdot 0066CL - 6 \cdot 12 \times 10^{-7}CL^3$	dos Reis et al. (2024)
$\theta_{33}(cm^3/cm^3) = -0 \cdot 0012SA + 0 \cdot 0021SI + 0 \cdot 3350$ (Linear) $\theta_{33}(cm^3/cm^3) = -0 \cdot 013\phi + 0 \cdot 271CL^{0 \cdot 094}$ (Nonlinear)	Jaefarzade Andabili et al. (2025)

[†] W_{33} , W_{1500} , θ_{33} , θ_{1500} , SA, SI, CL, OM (OM=1.724OC), BD, ϕ : gravimetric and volumetric soil-water retention at matric potential of -33 kPa and -1500 kPa, sand (%), silt (%), clay (%), soil organic matter (%), soil bulk density (g/cm³), total porosity (cm³/cm³) respectively.

که در آن، \bar{M} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده، n تعداد کل داده‌ها و \bar{I} شمارشگر است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- خصوصیات خاک‌های مورد مطالعه

برخی از خصوصیات اندازه‌گیری شده نمونه خاک‌های منطقه مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج حاکی از آن است که تغییرات درصد شن، سیلت و رس به ترتیب در دامنه ۱۴ تا ۲۷، ۵۶ تا ۵۲ و ۱۴ تا ۵۷ قرار گرفته است که سبب ایجاد کلاس‌های بافتی لوم، لوم رسی، لوم رسی سنی، رسی، لوم سیلتی و لوم سنی شده است. ضریب تغییرات θ_{33} و θ_{1500} به ترتیب برابر ۱۳/۴۰ و ۲۴/۲۰ است. ضریب تغییرات بالا بیان‌کننده پراکندگی بیش‌تر مؤلفه‌ها و ضریب تغییرات پایین بیان‌کننده پراکندگی کم‌تر به‌ازای یک واحد از میانگین هر مؤلفه است. Vinhal-freitas et al. (2017) اظهار داشتند که تنوع زیاد از کلاس‌های بافتی خاک می‌تواند تفاوت قابل توجهی در خصوصیات خاک‌ها و رابطه آن‌ها با نمو گیاه ایجاد کند. نتایج ضرایب همبستگی پیرسون (r) و معناداری بین متغیرهای وابسته (رطوبت خاک در پتانسیل ماتریک ۳۳- کیلوپاسکال و ۱۵۰۰- کیلوپاسکال) و متغیرهای مستقل (Rosseti et al., 2022) در جدول ۳ ارائه شده است. ویژگی‌های

۲-۲- معیارهای ارزیابی

چندین روش آماری مختلف توسط پژوهشگران برای ارزیابی (اعتبارسنجی) عملکرد مدل‌ها ایجاد و پیشنهاد شده است. در این پژوهش به منظور ارزیابی کامل مدل‌ها، از معیارهای ریشه مربع میانگین خطاهای نرمال شده (NRMSE)^۱، میانگین خطا (ME)^۲، آماره باقی‌مانده (RES)^۳ که بیانگر تفاوت بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده، و آماره r^4 نسبت بین مجموع مقادیر پیش‌بینی شده از مدل‌های مورد بررسی (P_i) به مقادیر اندازه‌گیری شده (M_i) است، استفاده گردید (Willmott, 1984; Bellochi et al., 2010; Haghverdi et al., 2012). مقادیر r کم‌تر و بیش‌تر از یک، به ترتیب نشان‌دهنده کم‌برآورد و بیش‌برآورد کردن توابع هستند. همچنین مقادیر ME منفی و مثبت نیز به ترتیب بیانگر کم‌برآورد و بیش‌برآورد کردن توابع هستند. آماره‌های مذکور به صورت معادلات زیر ارائه شده است:

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - M_i)^2 / n}}{\bar{M}} \quad (1)$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - M_i)}{n} \quad (2)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (3)$$

$$RES = P_i - M_i \quad (4)$$

³ Residual

⁴ relation between predicted and measured θ

¹ Normalized root mean square error

² Mean error

خاک ضرایب همبستگی معنی داری برای هر دو تخمین θ_{33} و θ_{1500} نشان می دهند. بالاترین ضریب همبستگی برای θ_{33} و θ_{1500} بین شن و رس مشاهده می شود. با استفاده از این خصوصیات زود یافت خاک مقادیر رطوبت در مکش های ۳۳- و ۱۵۰۰- برای PTFs جدول ۱ برآورد شد.

جدول ۲ - خلاصه برخی از آماره های توصیفی در ۱۰۰ نمونه خاک مورد مطالعه

Table 2. Summary of the selected descriptive statistics for the studied 100 soil samples

	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	BD (gr/cm ³)	OM (%)	θ_{33}	θ_{1500}
min	14	27	14	1.35	0.33	0.18	0.11
max	56	52	57	1.60	3.20	0.38	0.27
avg	30	34	35	1.45	1.40	0.28	0.14
SD	8.12	6.02	8.60	0.11	0.74	0.04	0.04
CV	31.40	15.96	30.51	5.49	45	13.40	24.20

† min, max, avg, SD, CV: minimum value, maximum value, average, standard deviation, coefficient of variation respectively.

جدول ۳- ضرایب همبستگی پیرسون (r) و معناداری بین متغیرهای وابسته (رطوبت خاک در پتانسیل ماتریک ۳۳- کیلو پاسکال و ۱۵۰۰- کیلو پاسکال) و متغیرهای مستقل

Table 3. Pearson's correlation coefficients (r) and significance between dependent variables (soil moisture at -33 kPa and -1500 kPa matric potentials) and independent variables

Matric potential		Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	BD (gr/cm ³)	OM (%)
θ_{33}	r	-0.95*	0.83*	0.94*	-0.87*	0.72*
θ_{1500}	r	-0.95*	0.86*	0.94*	-0.87*	0.72*

*Significant at 1% probability

پراکندگی را در مقایسه با سایر توابع دارا می باشد. این در حالی است که تابع توسعه یافته توسط dos Reis et al. (2024) با مقادیر NRMSE، ME، r و RES به ترتیب برابر ۰/۱۰، ۰/۰۱، ۰/۰۴ و ۰/۱۲- بیشترین انطباق را با مقادیر اندازه گیری شده θ_{33} داشته است. لازم به ذکر است که تابع dos Reis et al. (2024) از جدیدترین توابعی است که در این زمینه ارائه شده است. لذا برخی از توابع جدید ارائه شده در این زمینه نیز می توانند عملکرد خوبی در مقایسه با توابع پایه ای در پیش بینی رطوبت خاک در پتانسیل های مختلف ارائه نمایند. در رتبه بعد و با اختلاف اندکی PTF توسعه یافته توسط Oliveira et al. (2002)، Minasny and Hartemink (2011) و Pidgeon (1972) با ME یکسان (۰/۰۲) و با RES منفی به ترتیب برابر ۰/۱۶، ۰/۱۷ و ۰/۱۹ بهترین عملکرد را با مقادیر اندازه گیری شده ارائه کردند. با بررسی پراکندگی نمودارهای شکل ۲ نیز می توان به نتایج مشابهی رسید.

۳-۲- عملکرد توابع انتقالی در تخمین θ_{33}

نتایج دوازده PTFs مورد بررسی برای تخمین θ_{33} در جدول ۴ و شکل ۲ ارائه شده است. در این پژوهش سعی بر این بوده است، معیارهای ارزیابی که بتوانند به طور کامل عملکرد توابع را مورد بررسی قرار دهند، استفاده شود. بر اساس معیارهای ارزیابی منتخب که در قسمت مواد و روش ها ارائه شده است، نتایج حاکی از آن است که از میان PTFs مورد بررسی تنها دو تابع توسعه یافته توسط Lal (1978) و Adhikary et al. (2008) با ME منفی به ترتیب برابر ۰/۰۵- و ۰/۰۳- مقادیر θ_{33} را کم تر از مقادیر اندازه گیری شده ارائه کردند و سایر توابع بیش برآورد داشته اند. تابع توسعه یافته توسط Aina and Periaswamy (1985) با مقادیر NRMSE، ME، r و RES به ترتیب برابر ۰/۶۱، ۰/۱۵، ۰/۴۸ و ۰/۱۴۸- کم ترین نزدیکی را با مقادیر اندازه گیری شده θ_{33} داشته است و همان طور که در شکل ۲ نیز قابل مشاهده است، بیش ترین

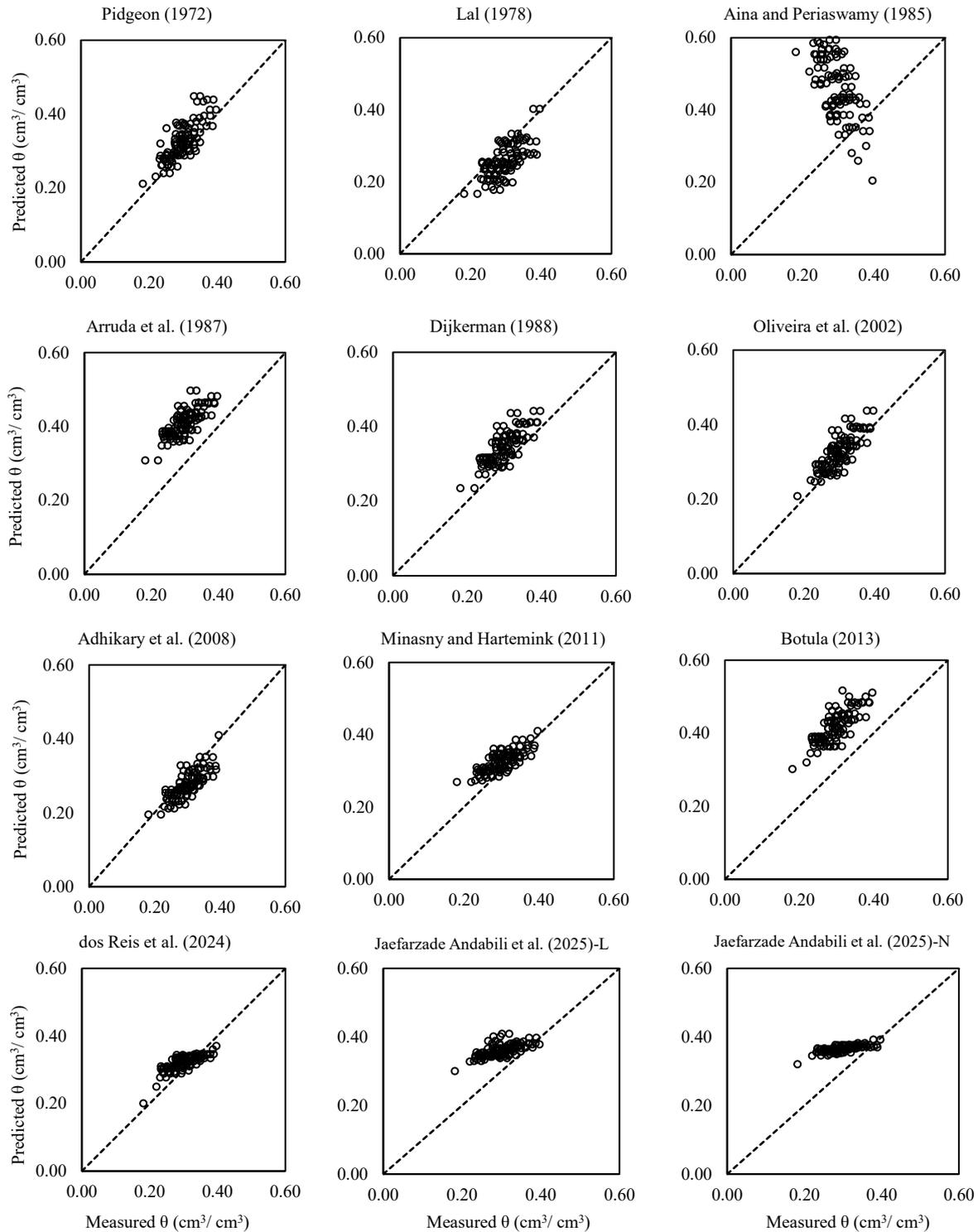
جدول ۴- مقادیر شاخص های آماری برای توابع انتقالی مورد بررسی در θ_{33}

Table 4. Statistical performance indices for the evaluated pedotransfer functions (PTFs) in estimating θ_{33}

PTFs	NRMSE	ME	r	RES
Pidgeon (1972)	0.12	0.02	1.06	-0.019
Lal (1978)	0.20	-0.05	0.84	0.051
Aina and Periaswamy (1985)	0.61	0.15	1.48	-0.148
Arruda et al. (1987)	0.34	0.10	1.33	-0.101
Dijkerman (1988)	0.15	0.04	1.12	-0.038
Oliveira et al. (2002)	0.10	0.02	1.05	-0.016
Adhikary et al. (2008)	0.13	-0.03	0.89	0.032
Minasny and Hartemink (2011)	0.10	0.02	1.05	-0.017
Botula (2013)	0.37	0.11	1.36	-0.111
Dos Reis et al. (2024)	0.10	0.01	1.04	-0.012
Jaefarzade Andabili et al., (2025)-L	0.20	0.05	1.17	-0.053
Jaefarzade Andabili et al., (2025)-N	0.22	0.06	1.19	-0.058

توسعه PTFs (Jaefarzade Andabili et al., 2025). تمامی PTFs توسعه یافته مذکور، در پژوهش حاضر مورد بررسی قرار گرفت و نهایتاً به دلیل پرهیز از اضافه‌گویی تنها دو تابع از ۱۰ تابع، یعنی بهترین

Martinez and Souza (2020) بیان کردند که کارایی PTFs در مکان‌ها و شرایط مختلف یکسان نیست و به ویژگی‌های خاک هر منطقه بستگی دارد. PTFs توسعه یافته توسط Jaefarzade Andabili et al. (2025) شامل ۵ تابع خطی و ۵ تابع غیر خطی است که برای خاک‌های شمال غربی ایران توسعه یافته است



شکل ۲- رطوبت اندازه‌گیری شده به پیش‌بینی شده در مکش ۳۳ کیلوپاسکال
 Figure 2. Measured versus predicted soil volumetric water content at -33 kPa

داشتند که عملکرد توابع مورد بررسی در محدوده مرطوب خاک می تواند متفاوت از عملکرد آن ها در محدوده خشک خاک باشد. در توابع (Dijkerman (1988 و Aina and Periaswamy (1985) برای تخمین θ_{1500} تنها از مؤلفه درصد رس خاک استفاده شده است این در حالی است که در تخمین θ_{1500} در تابع (Oliveira et al. (2002 علاوه بر درصد رس، از مؤلفه های شن، سیلت و چگالی ظاهری نیز استفاده شده است، با این وجود تابع (Oliveira et al. (2002 پایین ترین عملکرد را ارائه نموده است. بنابراین، می توان چنین بیان کرد که عملکرد PTFs برای منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر تعداد مؤلفه های ورودی آن ها قرار نمی گیرد و PTFs که به ورودی های کمتری نیاز دارند، لزوماً عملکرد پایین تری نخواهند داشت و این بدان سبب است که علاوه بر مؤلفه های ورودی، عواملی مانند تعداد نمونه های خاک، ساختمان خاک و مکانی که PTFs مورد بررسی توسط آن ها توسعه یافته اند نیز بر عملکرد آن ها در هر منطقه مؤثر است. (Abdelbaki et al. (2009 برای ۶۷۸ نمونه خاک ایالات متحده عملکرد PTFs، با تعداد مؤلفه های ورودی مختلف را مورد ارزیابی قرار دادند، ایشان نیز اظهار داشتند تعداد مؤلفه های ورودی، در عملکرد PTFs مؤثر نیست، که با نتایج این پژوهش نیز همخوانی دارد.

تابع توسعه یافته توسط (dos Reis et al. (2024 که از جدیدترین توابعی است که در این زمینه ارائه شده است و بیشترین انطباق را با مقادیر اندازه گیری شده θ_{33} ارائه نمود، برای تخمین θ_{1500} نیز با NRMSE و ME به ترتیب ۰/۲۳ و ۰/۰۳ عملکرد نسبتاً مناسبی را داشته است. نتایج شکل ۳ نیز حاکی از آن است که توابع (Oliveira et al. (2002 و Botula (2013 بیشترین انحراف را از خط یک به یک در مقایسه با سایر توابع نشان می دهند.

تابع خطی (L)^۱ و بهترین تابع غیرخطی (N)^۲ در نتایج جدول ۴ و شکل ۲ ارائه شد، با وجود اینکه PTFs مذکور برای خاک های ایران توسعه یافته است، اما در دسته بهترین توابع در تخمین θ_{33} ، برای خاک های سیستان قرار نگرفتند که این مهم می تواند به علت تفاوت خاک های منطقه خلخال در شمال غربی ایران با خاک های دشت سیستان باشد. لازم به ذکر است که θ_{1500} مورد بررسی این پژوهشگران قرار نگرفته است.

۳-۳- عملکرد توابع انتقالی در تخمین θ_{1500}

خلاصه ارزیابی یازده PTFs برای تخمین θ_{1500} در جدول ۵ و شکل ۳ ارائه شده است. PTFs مورد بررسی در این مطالعه عملکرد پیش بینی متفاوتی داشتند. نتایج نشان می دهد که توابع (Dijkerman (1988 و Aina and Periaswamy (1985) به ترتیب با ME برابر ۰/۰۰ و ۰/۰۱-، مقادیر NRMSE برابر ۰/۱۵ و ۰/۱۶ و r به ترتیب برابر ۱/۰۲ و ۰/۹۵ بهترین عملکرد را در میان توابع مورد بررسی ارائه کردند. تابع توسعه یافته توسط (Oliveira et al. (2002 با وجود اینکه عملکرد مناسبی را برای تخمین θ_{33} نشان داد (جدول ۳) اما با مقادیر NRMSE، ME، r و RES به ترتیب برابر ۰/۸۴، ۰/۱۴، ۱/۸۳ و ۰/۱۳۸- کمترین نزدیکی را با مقادیر اندازه گیری شده θ_{1500} داشته است. Botula (2012) بیان کردند که از میان PTFs مورد بررسی، تابع (Oliveira et al. (2002 بهترین عملکرد را در تخمین θ_{33} و بدترین عملکرد را در تخمین θ_{1500} برای خاک های منطقه جنوب غربی جمهوری دموکراتیک کنگو داشته است و لذا استفاده از توابع نقطه ای که برای منطقه ای خاص توسعه یافته باشند، می توانند برای رطوبت های مختلف، عملکردهای متفاوتی را ارائه نمایند که با نتایج این پژوهش نیز همخوانی دارد. در پژوهشی مشابه (dos Reis et al. (2024 عملکرد بیست PTFs نقطه ای را برای محدوده مرطوب و خشک خاک مورد بررسی قرار دادند و اظهار

جدول ۵- مقادیر شاخص های آماری برای توابع انتقالی مورد بررسی در θ_{1500}

Table 5. Statistical performance indices for the evaluated pedotransfer functions (PTFs) in estimating θ_{1500}

PTFs	NRMSE	ME	r	RES
Pidgeon (1972)	0.39	0.06	1.36	-0.060
Lal (1978)	0.26	-0.04	0.79	0.035
Aina and Periaswamy (1985)	0.16	-0.01	0.95	0.009
Arruda et al. (1987)	0.60	0.10	1.58	-0.095
Dijkerman (1988)	0.15	0.00	1.02	-0.003
Oliveira et al. (2002)	0.84	0.14	1.83	-0.138
Adhikary et al. (2008)	0.27	-0.04	0.77	0.037
Minasny and Hartemink (2011)	0.23	0.03	1.18	-0.030
Botula (2013)	0.76	0.12	1.74	-0.122
Tian et al., (2021)	0.26	0.03	1.21	-0.034
Dos Reis et al. (2024)	0.23	0.03	1.18	-0.030

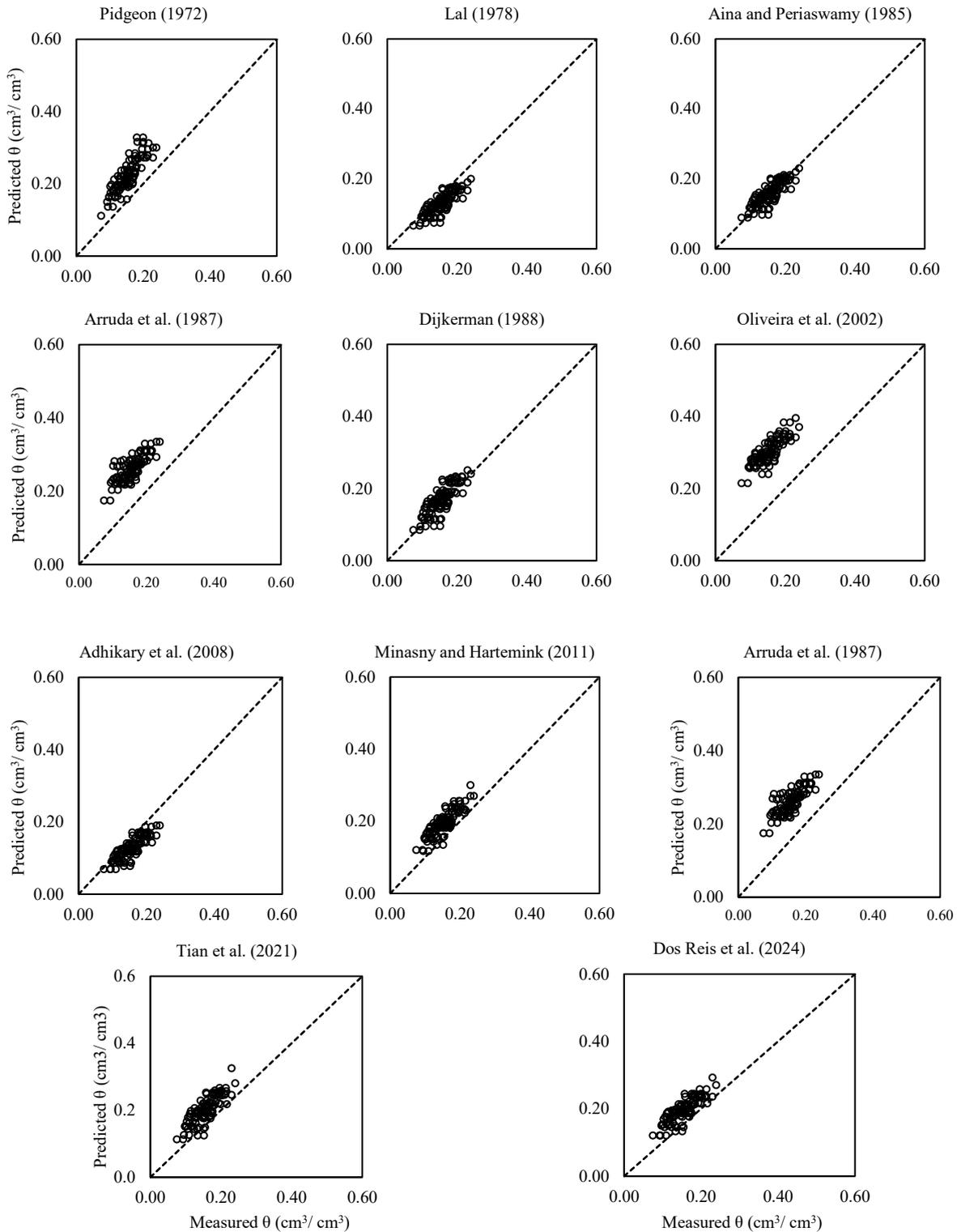
² Nonlinear

¹ Linear

۳-۴- واسنجی PTFs منتخب

دیگر نیز بیان کردند که قابلیت کاربرد PTFs در مجموعه داده‌های خاکی که خارج از منطقه‌ای است که در آن توسعه

برخی از پژوهشگران استفاده از PTFs را فقط برای کاربرد در یک منطقه خاص توسعه داده‌اند (Gijssman et al., 2002). برخی



شکل ۳- رطوبت اندازه‌گیری شده به پیش‌بینی شده در مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال

Figure 3. Measured versus predicted soil volumetric water content at -1500 kPa

جدول ۶- شاخص های آماری عملکرد توابع انتقالی اصلی در مقایسه با توابع انتقالی مجدد واسنجی شده برای پیش بینی محتوای رطوبتی خاک

Table 6. Statistical performance indices of the original pedotransfer functions compared with the recalibrated pedotransfer functions for predicting soil water content

PTFs			NRMSE	ME	r	RES
Dos Reis et al. (2024)	Original PTF	$\theta_{33}(m^3/m^3) = 0.30488 - 6.228 \times 10^{-4}SA^{1.5} + 0.0073864SA^{0.5}LnSA$	0.10	0.01	1.04	0.012
	Recalibrated PTF	$\theta_{33}(m^3/m^3) = 0.40842 - 4.354 \times 10^{-4}SA^{1.5} + 0.0002274SA^{0.5}LnSA$	0.08	0.00	1.00	0.000
Oliveira et al. (2002)	Original PTF	$W_{33}(Kg/Kg) = 0.00333SI + 0.00387CL$	0.10	0.02	1.05	0.016
	Recalibrated PTF	$W_{33}(Kg/Kg) = 0.00345SI + 0.00329CL$	0.08	0.00	1.00	0.001
Dijkerman (1988)	Original PTF	$W_{1500}(\%) = 0.74 + 0.39CL$	0.15	0.00	1.02	0.003
	Recalibrated PTF	$W_{1500}(\%) = 3.15 + 0.29CL$	0.14	0.00	1.00	0.000
dos Reis et al. (2024)	Original PTF	$\theta_{1500}(m^3/m^3) = 0.0302 + 0.0066CL - 6.12 \times 10^{-7}CL^3$	0.23	0.03	1.18	0.030
	Recalibrated PTF	$\theta_{1500}(m^3/m^3) = 0.0314 + 0.0051CL - 2.68 \times 10^{-7}CL^3$	0.14	0.00	1.00	0.000

نیاز دارد (علاوه بر درصد رس به ماده آلی نیز وابسته است) به عنوان تابع منتخب در نظر گرفته نشد. تفاوت در تعداد نمونه های خاک، ساختمان خاک، اقلیم، مکان و موقعیت جغرافیایی که PTFs مورد بررسی توسط آن ها توسعه یافته اند با خاک های مورد پژوهش، از دلایلی است که باعث می شود توابع با ورودی های کم تر گاهی بهتر از توابع با ورودی های بیش تر عمل کنند. ضرایب توابع منتخب، با روش حداقل کردن مربعات خطا مورد واسنجی مجدد قرار گرفتند.

PTFs منتخب با ضرایب مجدد کالیبره شده، و شاخص های آماری آنها (قبل و بعد از واسنجی مجدد) در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج جدول مذکور نشان می دهد توابع منتخب بعد از اینکه مورد واسنجی مجدد قرار گرفتند، در تخمین θ_{33} و θ_{1500} عملکرد بهتری را ارائه کرده اند. در تخمین θ_{33} عملکرد هر دو تابع dos Reis et al. (2024) و Oliveira et al. (2002) با کاهش NRMSE (۰/۰۸) و ME (۰/۰۰) و رسیدن به r برابر با ۱/۰۰ بهبود یافته اند (هرچند به میزان اندک). توابع Dijkerman (1988) و dos Reis et al. (2024) نیز با مقادیر NRMSE، ME و r به ترتیب برابر ۰/۱۴، ۰/۰۰ و ۱/۰۰، تخمین θ_{1500} را بهبود بخشیده اند. (Rustanto et al. (2017) ده PTFs نقطه ای و دو PTFs پیوسته را برای تخمین رطوبت خاک های اندونزی مورد بررسی و واسنجی مجدد قرار دادند. این پژوهشگران اظهار داشتند که نتایج پیش بینی ها بعد از واسنجی بهبود یافته است. در پژوهشی مشابه Rosseti et al. (2022) نیز برای خاک های برزیل، توابع انتقالی جدیدی را ارائه کردند و بیان کردند که توابع واسنجی شده جدید بهتر از توابع شرح داده شده در مقالات پیشین عمل می کند.

یافته اند، همیشه باید با ارزیابی های دقیق مورد بررسی قرار گیرد (Cornelis et al., 2001; Ungaro et al., 2005). بنابراین، ضرایب PTFs برای مناطقی غیر از جایی که در آن توسعه یافته، باید اصلاح و کالیبره شود (Rustanto et al., 2017; Abdelbaki, 2021; dos Reis et al., 2024).

مطابق جدول ۴، تابع dos Reis et al. (2024) که شکل آن به صورت نمایی است (جدول ۱)، بیش ترین تطابق را در تخمین θ_{33} نشان می دهد. در رتبه بعد و با اختلاف اندکی PTF Oliveira et al. (2002) که یک تابع خطی توسعه یافته توسط Oliveira et al. (2002) است و فقط به توزیع اندازه ذرات، به عنوان مؤلفه ورودی نیاز دارد، بهترین عملکرد را با مقادیر اندازه گیری شده ارائه نموده است (جدول ۴). لذا این دو تابع انتخاب و برای خاک های مورد بررسی، مجدد واسنجی شدند. تلاش بر این بوده است که PTFs با بهترین عملکرد که شکل های مختلف توابع (انواع رگرسیون شامل: خطی، لگاریتمی، چند جمله ای و ...) که به مؤلفه های ورودی کمتری نیز نیازمند باشند (توابع اقتصادی تر)، انتخاب شود. برای تخمین θ_{1500} نیز Dijkerman (1988) به عنوان تابع با بهترین عملکرد که به صورت خطی با درصد رس ارتباط دارد و در رتبه بعد تابع چند جمله ای dos Reis et al. (2024) برای واسنجی مجدد انتخاب شدند. تابع Aina and Periaswamy (1985) با این که دومین رتبه را از نظر عملکرد در تخمین θ_{1500} نشان داد، به دلیل شباهت شکل تابع آن (رابطه خطی با میزان رس خاک) با تابع Dijkerman (1988) انتخاب نشد.

تابع Minasny and Hartemink (2011) نیز از نظر آماری عملکردی مشابه با dos Reis et al. (2024) دارد، ولی به دلیل اینکه به مؤلفه های ورودی بیش تری نسبت به تابع مذکور

۴- نتیجه گیری

AW به عنوان رطوبت خاک (θ) بین ظرفیت مزرعه (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) شناخته می‌شود و دانستن آن برای ارزیابی ذخیره آب در خاک و مدیریت کارآمد محصولات کشاورزی ضروری است. پتانسیل‌های ماتریک در ۳۳- کیلوپاسکال و ۱۵۰۰- کیلوپاسکال به ترتیب نشان‌دهنده FC و PWP هستند. در این پژوهش بیست و سه PTFs نقطه‌ای برای پیش‌بینی محتوای رطوبتی خاک مورد ارزیابی قرار گرفتند که شامل دوازده تابع برای پتانسیل ماتریک ۳۳- و یازده تابع برای پتانسیل ماتریک ۱۵۰۰- کیلوپاسکال است. در این مطالعه توابع با بالاترین عملکرد برای تخمین θ_{1500} و θ_{33} در خاک‌های دشت سیستان تعیین شدند. با هدف بهبود نتایج، بهترین توابع با حداقل مؤلفه‌های ورودی، مورد واسنجی مجدد قرار گرفتند. انتخاب PTFs مذکور بر اساس عملکرد بالا و اقتصادی بودن توابع صورت گرفت. واسنجی مجدد باعث بهبود هر چه بیش‌تر عملکرد توابع مذکور شد. عدم استفاده از توابع پارامتریک (پیوسته) و هم‌چنین تعداد نمونه‌های خاک مورد استفاده در این پژوهش (۱۰۰ نمونه) از موارد محدودیت این پژوهش است. نتایج ارائه شده در این پژوهش می‌تواند در پیش‌بینی محتوای رطوبتی خاک و AW برای منطقه مورد مطالعه، با استفاده از تکنیک توابع انتقالی به عنوان پارامتر ورودی، در مدل‌سازی‌های مختلف به کار گرفته شود.

سپاسگزاری

بدین وسیله از حمایت‌های معنوی دانشگاه زابل سپاسگزاری به عمل می‌آید.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

پریسا کهخامقدم: مفهوم‌سازی، روش کار، تجزیه و تحلیل و بررسی، تهیه نقشه‌ها، منابع، نگارش پیش‌نویس اصلی. ویرایش و بازبینی مقاله

منابع

- چاری، محمدمهدی. (۱۳۹۹). پیش‌بینی چگالی ظاهری با استفاده از توابع انتقالی برای خاک‌های دشت سیستان. مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۰(۴)، ۱۵۴-۱۳۷. doi: 10.22069/ejsms.2021.18180.1964
- حسینی، سیده ویدا، داوری، مسعود، خالقی‌پناه، ناصر. (۱۳۹۹). توسعه و مقایسه توابع انتقالی خاک و توابع انتقالی طیفی برای برآورد نگهداشت آب در برخی از خاک‌های استان کردستان. مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۰(۳)، ۷۱-۵۱. doi: 10.22069/ejsms.2021.17865.1940
- حق‌وردی، امیر، قهرمان، بیژن، خشونددی، علی‌اصغر، جلیبی، محمد، عربی، زهرا. (۱۳۹۱). اعتبارسنجی و مقایسه چند تابع انتقالی نقطه‌ای و پارامتریک برای پیش‌بینی میزان رطوبت خاک در پتانسیل‌های ماتریک مختلف. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۱۹(۲)، ۲۲-۱. doi: 20.1001.1.23222069.1391.19.2.1.4
- رضوی‌قلعه‌جوق، سکینه، رسول‌زاده، علی، نیشابوری، محمدرضا. (۱۳۹۳). ارزیابی توابع انتقالی مختلف برای برآورد منحنی رطوبتی خاک در شهرستان نقده. پژوهش آب در کشاورزی، ۲۸(۳)، ۶۲۴-۶۱۳. doi: 10.22092/JWRA.2014.100011
- غلامی‌شرفخانه، مهدی، ضیائی، علی‌نقی، ناقدی‌فر، سیدمحمدرضا، اکبری، امیر. (۱۴۰۴). بررسی تأثیر شوری خاک و کیفیت آب بر عملکرد بنه‌های دختری زعفران با استفاده از مدل گیاهی و اندازه‌گیری میدانی. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۱۵(۱)، ۳۳۴-۳۱۷. doi: 10.22098/mmws.2023.14109.1390
- کهخامقدم، پریسا، ضیائی، علی‌نقی، داوری، کامران، کانونی، امین، صادقی، صدیقه. (۱۴۰۳). برنامه‌ریزی و تحویل بهینه آب در شبکه‌های آبیاری با ترکیب مدل AquaCrop و الگوریتم ژنتیک. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۱۴(۴)، ۲۶۸-۲۵۵. doi: 10.22098/mmws.2023.14039.1382
- کهخامقدم، پریسا، دلبری، معصومه. (۱۴۰۴). امکان‌سنجی پتانسیل انرژی باد در زابل با استفاده از توزیع ویبول. آمایش جغرافیایی فضا، ۱۵(۱)، ۱۷۸-۱۵۹. doi: 10.30488/gps.2025.478128.3779
- نیسی، کریم، اگدرنژاد، اصلان، عباسی، فریبرز. (۱۴۰۲). ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت و بهره‌وری آب تحت مدیریت مختلف کاربرد کود نیتروژن در کرج. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۱۳(۱)، ۴۱-۲۶. doi: 10.22098/mmws.2022.10969.1093

References

- Abdelbaki, A. M., Youssef, M. A., Naguib, E. M., Kiwan, M. E., and El-giddawy, E. I. (2009). Evaluation of pedotransfer functions for predicting saturated hydraulic conductivity for US soils. In 2009 Reno, Nevada, June 21-June

- 24, 2009 (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers. doi: 10.13031/2013.27309
- Abdelbaki, A. M. (2021). Assessing the best performing pedotransfer functions for predicting the soil-water characteristic curve according to

- soil texture classes and matric potentials. *European Journal of Soil Science*, 72(1), 154-173. doi: 10.1111/ejss.12959
- Adhikary, P. P., Chakraborty, D., Kalra, N., Sachdev, C. B., Patra, A. K., Kumar, S., Omar, R.K., Chandna, P., Raghav, D., Agrawal, K. and Sehgal, M. (2008). Pedotransfer functions for predicting the hydraulic properties of Indian soils. *Soil Research*, 46(5), 476-484. doi: 10.1071/SR07042
- Aina, P. O., and Periaswamy, S. P. (1985). Estimating available water-holding capacity of western Nigerian soils from soil texture and bulk density, using core and sieved samples. *Soil Science*, 140(1), 55-58.
- Arruda, F. B., Zullo Jr, J., and De Oliveira, J. B. (1987). Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 11(1), 11-15.
- Bellocchi, G., Rivington, M., Donatelli, M., and Matthews, K. (2010). Validation of biophysical models: issues and methodologies. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30(1), 109-130. doi: 10.1051/agro/2009001
- Botula, Y. D. (2013). *Indirect methods to predict hydrophysical properties of soils of Lower Congo* (Doctoral dissertation, Ghent University).
- Botula, Y. D., Cornelis, W. M., Baert, G., and Van Ranst, E. (2012). Evaluation of pedotransfer functions for predicting water retention of soils in Lower Congo (DR Congo). *Agricultural Water Management*, 111, 1-10. doi: 10.1016/j.agwat.2012.04.006
- Botula, Y. D., Van Ranst, E., and Cornelis, W. M. (2014). Pedotransfer functions to predict water retention for soils of the humid tropics: a review. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38, 679-698. doi: 10.1590/S0100-06832014000300001
- Blake, G. R., and Hartge, K. H. (1986). Bulk density. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, 5, 363-375. doi: 10.2136/sssabookser5.1.2ed.c13
- Chari, M. M. (2021). Predicting bulk density using pedotransfer functions for soils in Sistan plain. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 10(4), 137-154. doi: 10.22069/ejsms.2021.18180.1964. [In Persian]
- Cornelis, W. M., Khlosi, M., Hartmann, R., Van Meirvenne, M., and De Vos, B. (2005). Comparison of unimodal analytical expressions for the soil-water retention curve. *Soil Science Society of America Journal*, 69(6), 1902-1911. doi:10.2136/sssaj2004.0238
- Cornelis, W. M., Ronsyn, J., Van Meirvenne, M., and Hartmann, R. (2001). Evaluation of pedotransfer functions for predicting the soil moisture retention curve. *Soil Science Society of America Journal*, 65(3), 638-648. doi: 10.2136/SSSAJ2001.653638X
- Dijkerman, J. C. (1988). An ustult-aquult-tropept catena in Sierra Leone, West Africa, II. Land qualities and land evaluation. *Geoderma*, 42(1), 29-49. doi: 10.1016/0016-7061(88)90021-3
- dos Reis, A. M. H., Pires, L. F., and Armindo, R. A. (2024). New empirical-point pedotransfer functions for water retention data for a wide range of soil texture and climates. *International Soil and Water Conservation Research*, 12(4), 855-867. doi: 10.1016/j.iswcr.2024.01.001
- Feddes, R. A., de Rooij, G. H., and van Dam J. C. (2004). Unsaturated-Zone Modeling: Progress, Challenges and Applications. *Kluwer Academic*, 364 p. doi: 10.2136/vzj2006.0162br
- Gee, G. W., and Or, D. (2002). Particle-size analysis. *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods*, 5, 255-293. doi: 10.2136/sssabookser5.4.c12
- Gijsman, A. J., Jagtap, S. S., and Jones, J. W. (2002). Wading through a swamp of complete confusion: how to choose a method for estimating soil water retention parameters for crop models. *European Journal of Agronomy*, 18(1-2), 77-106. doi: 10.1016/S1161-0301(02)00098-9
- Gholami Sharafkhane, M., Ziari, A. N., Naghedifar, S. M., and Akbari, A. (2025). Investigation of the effect of soil salinity and water quality on saffron daughter corms using crop modeling and measured data. *Water and Soil Management and Modeling*, 5(1), 317-334. doi: 10.22098/mmws.2023.14109.1390. [In Persian]
- Haghverdi, A., Ghahreman, B., Khoshnood Yazdi, A. A., Joleini, M., and Arabi, Z. (2012). Evaluation and comparison between some point and parametric pedotransfer functions in predicting soil water contents in different matric potentials. *Journal of Water and Soil Conservation*, 19(2), 1-22. doi: 20.1001.1.23222069.1391.19.2.1.4. [In Persian]
- Hosseini, S. V., Davari, M., and Khaleghpanah, N. (2021). Developing and comparing pedotransfer functions and spectral transfer functions for predicting water retention in some soils of Kurdistan province. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 10(3), 51-71. doi:10.22069/ejsms.2021.17865.1940. [In Persian]
- Jaefarzade Andabili, S., Rasoulzadeh, A., Moghadam, J. R., Pollacco, J. A. P., and Fernández-Gálvez, J. (2025). Improved understanding of soil water content at field capacity and estimates from pedotransfer functions. *Irrigation and Drainage*, 74(2), 516-528. doi: 10.1002/ird.3032
- Jury, W. A., and Horton, R. (2004). *Soil Physics*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ.
- Kahkhamoghaddam, P., and Delbari, M. (2025). Feasibility of wind energy potential in Zabol using Weibull distribution. 15(1), 159-178. doi: 10.30488/gps.2025.478128.3779. [In Persian]

- Kahkhamoghadam, P., Ziaei, A. N., Davari, K., Kanooni, A., and Sadeghi, S. (2024). Scheduling and optimal delivery of water in irrigation networks by combining the AquaCrop model and genetic algorithm. *Water and Soil Management and Modeling*, 4(4), 255-268. doi: 10.22098/mmws.2023.14039.1382. [In Persian]
- Lal, R. (1978). Physical properties and moisture retention characteristics of some Nigerian soils. *Geoderma*, 21(3), 209-223. doi: 10.1016/0016-7061(78)90028-9
- Martinez, P., and Souza, I. F. (2020). Genesis of pseudo-sand structure in Oxisols from Brazil—A review. *Geoderma Regional*, 22, e00292. doi: 10.1016/j.geodrs.2020.e00292
- McBratney, A. B., Minasny, B., Cattle, S. R., and Vervoort, R. W. (2002). From pedotransfer functions to soil inference systems. *Geoderma*, 109(1-2), 41-73. doi: 10.1016/S0016-7061(02)00139-8
- Minasny, B., and Hartemink, A. E. (2011). Predicting soil properties in the tropics. *Earth-Science Reviews*, 106(1-2), 52-62. doi: 10.1016/j.earscirev.2011.01.005
- Neysi, K., Egdernezhad, A., and Abbasi, F. (2023). Evaluation of AquaCrop model for corn simulation under different management of nitrogen fertilizer in Karaj. *Water and Soil Management and Modeling*, 3(1), 26-41. doi: 10.22098/mmws.2022.10969.1093. [In Persian]
- Oliveira, L. B., Ribeiro, M. R., Jacomine, P. K. T., Rodrigues, J. J. V., and Marques, F. A. (2002). Funções de pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 26, 315-323. doi: 10.1590/S0100-06832002000200004
- Pidgeon, J. D. (1972). The measurement and prediction of available water capacity of ferrallitic soils in Uganda. *Journal of Soil Science*, 23(4), 431-441. doi: 10.1111/j.1365-2389.1972.tb01674.x
- Qiao, J., Zhu, Y., Jia, X., Huang, L., and Shao, M. A. (2019). Pedotransfer functions for estimating the field capacity and permanent wilting point in the critical zone of the Loess Plateau, China. *Journal of Soils and Sediments*, 19(1), 140-147. doi: 10.1007/s11368-018-2036-x
- Rab, M. A., Chandra, S., Fisher, P. D., Robinson, N. J., Kitching, M., Aumann, C. D., and Imhof, M. (2011). Modelling and prediction of soil water contents at field capacity and permanent wilting point of dryland cropping soils. *Soil Research*, 49(5), 389-407. doi: 10.1071/SR10160
- Razavi, S., Rasoulzadeh, A., and Neyshabouri, 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. doi: 10.22092/JWRA.2014.100011. [In Persian]
- Rossetti, R. D. A. C., Amorim, R. S. S., Raimo, L. A. D. L. D., Torres, G. N., Silva, L. D. C. M. D., and Alves, I. M. (2022). Pedotransfer functions for predicting soil-water retention under Brazilian Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 57, e02474. doi: 10.1590/S1678-3921.pab2022.v57.02474
- Rustanto, A., Booiij, M. J., Wösten, H., and Hoekstra, A. Y. (2017). Application and recalibration of soil water retention pedotransfer functions in a tropical upstream catchment: case study in Bengawan Solo, Indonesia. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 65(3), 307-320. doi: 10.1515/johh-2017-0020
- Samaras, D. A., Reif, A., and Theodoropoulos, K. (2014). Evaluation of radiation-based reference evapotranspiration models under different Mediterranean climates in central Greece. *Water Resources Management*, 28, 207-225. doi: 10.1007/s11269-013-0480-3
- Santra, P., Kumar, M., Kumawat, R. N., Painuli, D. K., Hati, K. M., Heuvelink, G. B. M., and Batjes, N. H. (2018). Pedotransfer functions to estimate soil water content at field capacity and permanent wilting point in hot Arid Western India. *Journal of Earth System Science*, 127(3), 35. doi: 10.1007/s12040-018-0937-0
- Saxton, K. E., and Willey, P. H. (2006). The SPAW model for agricultural field and pond hydrologic simulation. *Watershed Models*, 28(Sep), 400-435. doi: 10.1201/9781420037432.ch17
- Silva, B. M., Silva, É. A. D., Oliveira, G. C. D., Ferreira, M. M., and Serafim, M. E. (2014). Plant-available soil water capacity: estimation methods and implications. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38, 464-475. doi: 10.1590/S0100-06832014000200011
- Souza, J. M., Bonomo, R., Pires, F. R., and Bonomo, D. Z. (2014). Funções de pedotransferência para retenção de água e condutividade hidráulica em solo submetido a subsolagem. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 9(4), 606-613. doi: 10.5039/agraria.v9i4a3732
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., and Fereres, E. (2009). AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101(3), 426-437. doi: 10.2134/agronj2008.0139s
- Tian, Z., Chen, J., Cai, C., Gao, W., Ren, T., Heitman, J. L., and Horton, R. (2021). New pedotransfer functions for soil water retention curves that better account for bulk density effects. *Soil and Tillage Research*, 205, 104812. doi: 10.1016/j.still.2020.104812
- Tomasella, J., and Hodnett, M. (2004). Pedotransfer functions for tropical soils. *Developments in Soil Science*, 30, 415-429. doi: 10.1016/S0166-2481(04)30021-8
- Ungaro, F., Calzolari, C., and Busoni, E. (2005). Development of pedotransfer functions using a

- group method of data handling for the soil of the Pianura Padano-Veneta region of North Italy: water retention properties. *Geoderma*, 124(3-4), 293-317. doi: 10.1016/j.geoderma.2004.05.007
- van den Berg, M., Klamt, E., Van Reeuwijk, L. P., and Sombroek, W. G. (1997). Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. *Geoderma*, 78(3-4), 161-180. doi: 10.1016/S0016-7061(97)00045-1
- Vinhal-Freitas, I. C., Corrêa, G. F., Wendling, B., Bobulska, L., and Ferreira, A. S. (2017). Soil textural class plays a major role in evaluating the effects of land use on soil quality indicators. *Ecological Indicators*, 74, 182-190. doi: 10.1016/j.ecolind.2016.11.020
- Walkley, A., and Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38. doi: 10.1097/00010694-193401000-00003
- Willmott, C. J. (1984). On the evaluation of model performance in physical geography. *Spatial Statistics and Models*, 443-460. doi: 10.1007/978-94-017-3048-8_23
- Wösten, J. H. M., Pachepsky, Y. A., and Rawls, W. J. (2001). Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*, 251(3-4), 123-150. doi: 10.1016/S0022-1694(01)00464-4