



Prediction of saturated hydraulic conductivity with pedotransfer functions for Sistan Plain soils

Parisa Kahkhamoghadam 

Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran,

Email: parisakahkhamoghadam@uoz.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: July. 2, 2025

Revised: Aug. 6, 2025

Accepted: Aug. 25, 2025

Published online: Nov. 2025

Keywords:

Bulk density,

Organic matter,

Particle size distribution,

Porosity,

Sistan Plain.

ABSTRACT

One of the important parameters in the evaluation of soil hydrological properties is saturated hydraulic conductivity (Ksat), which plays an important role in modeling flow and solute transport in soil. Pedotransfer functions (PTFs) relate Ksat to readily available soil properties such as particle size distribution, bulk density, and organic matter, and have been widely developed due to their simplicity and high efficiency. The aim of this study is to evaluate the performance of twenty-three PTFs in predicting Ksat for 100 samples of Sistan soils. These functions were divided into three groups A, B, and C based on the input components. The results showed that when effective porosity is the only available data (Group A), the PTFs developed by Suleiman et al. (2001) and Ahuja et al. (1989) are the best models. If particle size distribution, bulk density, and porosity data are available (Group B), the PTFs developed by Cosby et al. (1984) and Ottoni et al. (2019) are the most accurate models. Among the PTFs that require organic matter in addition to particle size distribution and bulk density (Group C), the functions of Zuo and He (2021) and Wosten et al. (2001) showed the highest performance. Finally, if the availability of input data is not a limiting factor, the most accurate PTFs are those developed by Cosby et al. (1984), Zuo and He (2021), Ottoni et al. (2019), Wosten et al. (2001), respectively. The results can be used to predict Ksat in hydrological modeling for the study area.

Cite this article: Kahkhamoghadam, P., (2025) Prediction of saturated hydraulic conductivity with pedotransfer functions for Sistan Plain soils, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (9), 2411-2427.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.397907.669969>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.397907.669969>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Accurate prediction of soil processes usually requires accurate measurements of soil hydraulic properties. Determination of the saturated hydraulic conductivity (K_{sat}) is required for many studies related to irrigation, drainage, water movement, and solute transport in soils. K_{sat} can be obtained through direct laboratory or field measurements, however, in many cases, its direct measurement is time-consuming and laborious. On the other hand, K_{sat} can be estimated based on readily available soil properties such as texture, particle size distribution, bulk density, porosity, and organic matter content. This alternative indirect method is called soil pedotransfer functions (PTF). PTFs are regression-based models that use available information to provide estimates of other relevant factors and have attracted the attention of soil researchers mainly due to their simplicity and relatively high efficiency. Therefore, the aim of this study is to investigate the performance of 23 PTFs using readily available soil parameters to predict K_{sat} 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.

Method

In order to conduct this research, first, the saturated hydraulic conductivity of the soil was measured using the inverted well method at 100 points in the Sistan Plain.

Twenty-three PTFs were classified into three groups based on their required inputs. Group 1: This group of PTFs is an empirical relationship between K_{sat} and effective porosity. Seven functions from this group were evaluated in this study. Group 2: This group of PTFs requires more inputs than Group 1. The functions in this group predict K_{sat} based on particle size distribution (percentage of sand, silt, and clay), bulk density, and total porosity. Eight functions from this group were evaluated in this study. Group 3: This group of PTFs requires input components including particle size distribution, bulk density, and organic matter content. Eight functions from this group were evaluated in this study. Finally, logarithmic transformations were used for statistical analysis.

Results

Among the group 1 functions, the F3 model, which is the function developed by Suleiman et al. (2001), has the closest predictions to the measured values (GMER=1.15), followed by the Ahuja et al. (1989) model, F7, with a GMER of 1.50. Among the functions in Group 2, the F11 function (Cosby et al., 1984) is the closest to the measured values, with a slight difference. The Ottoni et al. (2019) function (F15), which is one of the most recent functions presented by soil researchers in the world, ranked second. The Saxton et al. (1986) (F13) and Brakensiek et al. (1984) (F12) functions also ranked third and fourth, respectively. Among the functions in Group 3, the functions F23, F18 and F21 have the best performance in this group. The Zuo and He (2021) function (F23), which is one of the most recent functions presented by soil researchers in this group, provides the most accurate K_{sat} predictions for the soils under study. Finally, the performance of the twenty-three functions examined in this study was examined. The results indicated that the Cosby et al. (1984) function, although it uses only two components of sand and clay percentage, has the highest performance. With a slight difference, the functions of Zuo and He (2021), Ottoni et al. (2019), Wosten et al. (2001) and Saxton et al. (1986) and in the next rank, the functions of Brakensiek et al. (1984) and Suleiman et al. (2001) also provided the highest performance among the three groups.

Conclusions

In this study, twenty-three PTFs were evaluated for K_{sat} prediction in the Sistan region. The results of this study showed that some of the new functions presented in this field can also provide good performance compared to the basic functions in predicting K_{sat} . Given that factors such as soil structure have received less attention in the development of PTFs, the accuracy of PTFs varies for different regions and their performance is not affected by the number of their input components. The results presented in this study can be used to predict K_{sat} in the study area, using the soil transfer function technique as an input parameter in various modeling.

Author Contributions

Conceptualization, P.K.; methodology, P.K.; software, P.K.; validation, P.K.; formal analysis, P.K.; investigation, P.K.; resources, P.K.; data curation, P.K.; writing—original draft preparation, P.K.; writing review and editing, P.K.; visualization, P.K.; supervision, P.K.; project administration, P.K.; funding acquisition, P.K. Authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the author.

Acknowledgements

The author wish to acknowledge the support from the University of Zabol, Iran for providing the financial support for this research project.

Ethical considerations

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

پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از توابع انتقالی برای خاک‌های دشت سیستان

پریسا کهخامقدم

گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران رایانامه: parisakahkhamoghadam@uoz.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی خصوصیات هیدرولوژیکی خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع (Ksat) می‌باشد که نقش مهمی در مدل‌سازی جریان، انتقال املاح و رسوب در خاک ایفا می‌کند. توابع انتقالی (PTF، پارامتر Ksat را به ویژگی‌های زود یافت خاک مانند توزیع اندازه ذرات، چگالی ظاهری و ماده آلی مرتبط می‌کنند و به دلیل سادگی و کارایی بالا بسیار توسعه داده شده‌اند. هدف از این مطالعه، ارزیابی عملکرد بیست و سه PTF در پیش‌بینی Ksat برای ۱۰۰ نمونه از خاک‌های سیستان می‌باشد. این توابع بر اساس مؤلفه‌های ورودی به سه گروه A، B و C تقسیم شدند. نتایج نشان داد زمانی که تخلخل مؤثر تنها داده موجود باشد (گروه A)، PTF‌های توسعه یافته توسط Suleiman et al. (2001) و Ahuja et al. (1989) بهترین مدل‌ها برای تخمین Ksat هستند. اگر داده‌های توزیع اندازه ذرات، چگالی ظاهری و تخلخل در دسترس باشند (گروه B)، PTF‌های توسعه یافته توسط Cosby et al. (1984) و Ottoni et al. (2019) دقیق‌ترین مدل‌ها برای پیش‌بینی Ksat می‌باشند. از بین PTF‌هایی که علاوه بر داده‌های توزیع اندازه ذرات و چگالی ظاهری به ماده آلی نیز نیاز دارند (گروه C)، توابع Zuo and He (2021) و Wosten et al. (2001) بالاترین عملکرد را نشان دادند. در نهایت اگر در دسترس بودن داده‌های ورودی عامل محدودکننده نباشد، دقیق‌ترین PTF‌ها، به ترتیب آنهایی هستند که توسط Cosby et al. (1984)، Zuo and He (2021)، Ottoni et al. (2019)، Wosten et al. (2001) توسعه یافته‌اند. نتایج این مطالعه می‌تواند برای پیش‌بینی Ksat در مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی برای منطقه مورد مطالعه به کار رود.
واژه‌های کلیدی: تخلخل، توزیع اندازه ذرات، چگالی ظاهری، دشت سیستان، ماده آلی.	

استناد: کهخامقدم، پریسا، (۱۴۰۴) پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از توابع انتقالی برای خاک‌های دشت سیستان، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.397907.669969>، ۲۴۱۱-۲۴۲۷، (۹)

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.397907.669969>

مقدمه

خاک با کنترل انتقال جرم و انرژی بین سطح زمین و جو، نقش مهمی در زیست کره زمین ایفا می کند (Amundson et al., 2015; Bittelli et al., 2015). به ویژه لایه سطحی خاک که از طریق نفوذ، تبخیر و تعرق، رواناب سطحی و تغذیه آب های زیرزمینی تأثیر قابل توجهی بر تعادل آب و انرژی سطح زمین می گذارد (Vereecken et al., 2016; Montzka et al., 2017). برای مثال، تقریباً ۶۰ درصد از بارش های که به سطح زمین می رسد از طریق زنجیره خاک- گیاه- اتمسفر به جو باز می گردد (Oki and Kanae, 2006; Katul et al., 2012). همچنین حدود نیمی از تولید زیست توده در مقیاس جهانی و چرخه کربن مرتبط با آن، به فرآیندهای خاک بستگی دارد (Cleveland et al., 2013). توصیف و پیش بینی دقیق این فرآیندهای خاک معمولاً نیاز به پارامترسازی دقیق خواص هیدرولیکی خاک (مانند: منحنی مشخصه آب خاک، منحنی هدایت هیدرولیکی اشباع و هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک) دارد. تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع (K_{sat}) برای بسیاری از مطالعات و کاربردهای مربوط به آبیاری، زهکشی، حرکت آب و انتقال املاح در خاک مورد نیاز است. با توجه به تغییرپذیری زمانی و مکانی خواص هیدرولیکی خاک، اغلب برای توصیف صحیح چنین خواصی حتی در مقیاس مزرعه، نیاز به تعداد زیادی اندازه گیری می باشد. در سال های اخیر تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K_{sat}) توسط پژوهشگران بسیار مورد بررسی قرار گرفته است (Ottoni et al., 2019; Zuo and He, 2021; Khatti and Kamaldeep, 2024). K_{sat} را می توان از طریق اندازه گیری های مستقیم آزمایشگاهی یا مزرعه ای به دست آورد، با این حال، در بسیاری از موارد، اندازه گیری مستقیم خواص هیدرولیکی خاک زمان بر و پرهزینه است و به ویژه برای کاربردهای در مقیاس بزرگ غیرعملی است (Vereecken et al., 2010; Dai et al., 2013). از طرف دیگر، می توان مقدار K_{sat} را بر اساس خواص زودیافت خاک که به طور گسترده تری در دسترس هستند مانند بافت، توزیع اندازه ذرات، چگالی ظاهری، تخلخل و محتوای ماده آلی تخمین زد. این روش غیر مستقیم جایگزین، توابع انتقالی خاک (PTF) نامیده می شود (Bouma et al., 1989). اصطلاح PTF به معنای انتقال داده های موجود به داده های مورد نیاز است. توابع انتقالی خاک همان مدل های مبتنی بر رگرسیون هستند که از اطلاعات موجود برای ارائه تخمین هایی از سایر عوامل مرتبط مورد نیاز استفاده می کنند (Warrick, 2003) و عمدتاً به دلیل سادگی و کارایی نسبتاً بالا، توجه محققین خاک را به خود جلب کرده اند. در ادامه به برخی از این پژوهش ها پرداخته می شود.

زرین فر و همکاران (۱۳۹۰) به ارزیابی ۹ روش متداول PTF برای ۴۹ نمونه خاک گراولی جهت تخمین K_{sat} در پردیس دانشگاه فردوسی پرداختند. در پژوهش مذکور اندازه گیری K_{sat} با استفاده از روش چاهک معکوس صورت پذیرفت. ایشان بیان کردند که K_{sat} دارای تغییرات شدید مکانی بوده و در پیش بینی K_{sat} با استفاده از PTF، مناسب ترین گزینه برای خاک های گراولی، استفاده از میانگین و انحراف معیار هندسی کل ذرات خاک می باشد. در تحقیق مشابه دیگری به منظور برآورد K_{sat} با استفاده از ۱۲ نوع PTF برای ۴۰ نقطه مختلف واقع در دشت ارومیه، از روش نفوذسنج گلف استفاده گردید. مدل آیمرون و همکاران با کمترین مقدار خطا دارای بهترین برآورد در اراضی مذکور بود (بهمنش و همکاران، ۱۳۹۴). زارع ایبانه و همکاران (۱۴۰۰) روش های برآورد K_{sat} را در اراضی نخلستان های شهرستان باوی از استان خوزستان مورد مقایسه قرار دادند. ارزیابی نتایج حاکی از آن بود که روش های استوانه های دوگانه، مدل رزتا و تابع انتقالی کاسبای و همکاران بیشترین دقت را دارا می باشند. در پژوهشی دیگر برآورد K_{sat} به روش تلفیق توابع انتقالی و سنجش از دور برای جنوب اهواز مورد بررسی قرار گرفت. این پژوهش با هدف به دست آوردن PTF برای برآورد K_{sat} با روش چاهک معکوس، در ۵۰ نقطه صورت پذیرفت. نتایج نشان داد ترکیب ویژگی های زودیافت خاک با شاخص های پوشش گیاهی بهترین نتایج را ارائه می کند (سرخه نژاد و همکاران، ۱۴۰۲).

Ottoni et al. (2019) برای مناطقی در برزیل و اروپا مشخصات خاک را اندازه گیری و از آنها برای توسعه PTF های جدیدی استفاده نمودند. سپس عملکرد آنها را بررسی و با پیش بینی های هفت PTF منتشر شده در منابع مقایسه کردند. ایشان اظهار داشتند PTF پیشنهادی بر اساس مؤلفه ورودی تخلخل مؤثر، دقیق ترین نتایج را در مقایسه با PTF هایی که فقط براساس بافت خاک یا چگالی ظاهری هستند، ارائه می کند. بیشتر PTF ها برای خاک های ایالت متحده و اروپا توسعه یافته اند، لذا Zuo and He (2021) ۱۰ ویژگی اساسی خاک را به عنوان مؤلفه های ورودی PTF ها برای پیش بینی K_{sat} در سه حوزه آبخیز در چین اندازه گیری نمودند. ایشان چند PTF منتشر شده در منابع را اصلاح و PTF های جدیدی را نیز توسعه دادند و اظهار داشتند ماده آلی خاک نقش مهمی در پیش بینی K_{sat} برای خاک های چین دارد. Qin et al. (2024) نیز برای ۵۱۵ نمونه خاک چین PTF جدیدی را ارائه نمودند. ایشان اظهار داشتند که از میان عوامل مؤثر، چگالی ظاهری و تخلخل مؤثر مهم ترین مؤلفه ورودی برای توابع پیشنهادی ایشان می باشد. Khatti and Kamaldeep (2024) تأثیر لایه های

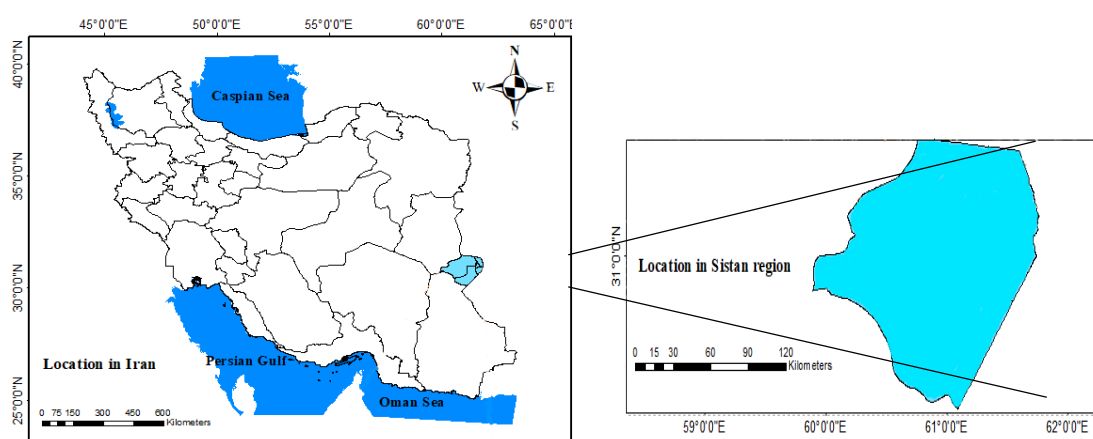
پنهان (HL) و نورون‌ها (N) را بر عملکرد مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN) در پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی خاک رسی مورد بررسی قرار دادند. مقایسه عملکرد نشان داد که مدل ANN مبتنی بر الگوریتم لونبرگ-مارکوارت مدل، به ضریب همبستگی ۰/۹۹، دست یافت. همچنین، مشاهده شد که وزن مخصوص رابطه مستقیمی با هدایت هیدرولیکی ندارد. Xia and Li (2024) یک بهینه‌سازی بیزی کارآمد و همچنین یک روش افزایش مقیاس تحلیلی^۲ را برای برآورد K_{sat} ترکیب نمودند. هم چنین برای بهبود بیشتر کارایی، یک الگوریتم محلی را برای حل مدل چند بعدی جریان آب نیز استفاده نمودند. مدل پیشنهادی کاربرد خوبی را ارائه نمود.

دشت سیستان یکی از نواحی استراتژیک مرزی شرق ایران می‌باشد که دارای حدود ۱۵۰ هزار هکتار اراضی با پتانسیل کشاورزی است و در سال‌های اخیر دولت اقداماتی را برای توسعه کشاورزی در این منطقه انجام داده است. لذا با توجه به زمان‌بر و پرهزینه بودن روش‌های مستقیم تعیین K_{sat} ، هدف این پژوهش بررسی عملکرد ۲۳ مدل مختلف PTF با استفاده از پارامترهای زودیافت خاک برای پیش‌بینی K_{sat} است که شامل جدیدترین توابعی که در این زمینه ارائه شده نیز می‌باشد. در راستای تعیین بهترین PTF که متناسب با شرایط منطقه مورد مطالعه باشد، از ۱۰۰ نمونه خاک منطقه سیستان استفاده گردید.

مواد و روش‌ها

اطلاعات مربوط به خاک‌ها

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 می‌باشد (چاری، ۱۳۹۹). به منظور انجام این پژوهش ابتدا هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از روش چاهک معکوس در ۱۰۰ نقطه اندازه‌گیری شد. در ادامه نمونه‌های خاک برای انجام آنالیزهای آزمایشگاهی در نقاط مذکور برداشت و به آزمایشگاه منتقل گردید. 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 والکی- بلک (Walkley and Black, 1934) و جرم مخصوص ظاهری نیز به روش سیلندر اندازه‌گیری شدند (Blake and Hartge, 1986). در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی دشت سیستان نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

توابع انتقالی خاک (PTF)

در این مطالعه بیست و سه مدل مختلف PTF خاک برای تخمین K_{sat} مورد ارزیابی قرار گرفت. توابع انتقالی خاک بر اساس ورودی‌های مورد نیازشان به سه گروه طبقه‌بندی شدند. توابع انتقالی گروه A وابسته به تخلخل مؤثر، توابع انتقالی گروه B وابسته به داده‌های توزیع اندازه ذرات (درصد شن، سیلت و رس)، چگالی ظاهری و تخلخل کل و توابع انتقالی گروه C به مؤلفه‌های ورودی شامل توزیع اندازه ذرات،

چگالی ظاهری و محتوای ماده آلی نیاز دارند. در ادامه به جزئیات هر گروه پرداخته می‌شود.

توابع انتقالی گروه A

این نوع PTF که اولین بار توسط Ahuja et al. (1984) توسعه داده شد، یک رابطه تجربی بین K_{sat} و تخلخل مؤثر می‌باشد (رابطه ۱).

$$K_{sat} = c \times \varphi_e^m \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن φ_e تخلخل مؤثر خاک است که به صورت تفاوت بین تخلخل کل و رطوبت در ظرفیت مزرعه (محتوای حجمی آب خاک در فشار ۳۳ کیلوپاسکال) تعریف می‌شود، c و m نیز ضرایب ثابت هستند (Ahuja et al., 1984; Abdelbaki et al., 2009). هفت تابع مورد بررسی از این گروه در جدول ۱ ارائه شده است. Forrest et al. (1985) مقادیر K_{sat} را در آزمایشگاه برای ۱۱۸ نوع خاک دست نخورده از استرالیا اندازه‌گیری و برای به دست آوردن ضرایب c و m استفاده نمودند. Minasny and McBratney (2000) برای توسعه یک PTF، از ۴۶۲ نمونه خاک استرالیا در پیش‌بینی K_{sat} استفاده نمودند. Suleiman et al. (2001) از داده‌های ۱۱ خاک با کلاس بافتی همگن و چندین نوع خاک دیگر برای به دست آوردن ضرایب c و m مدل Ahuja et al. (1984) استفاده کردند. Sychalski et al. (2007) سه PTF را برای پیش‌بینی K_{sat} بر اساس تخلخل مؤثر توسعه دادند. آنها از ۳۵ نمونه خاک اندازه‌گیری شده استفاده کردند که یکی از این توابع (F4) به شکل مدل Ahuja et al. (1984) است و دو تابع دیگر (F5، F6) رگرسیون‌های خطی چندگانه هستند که K_{sat} را به تخلخل مؤثر مرتبط می‌کنند. در نهایت مدل Ahuja et al. (1989) با ضرایب اصلی نیز مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۱. توابع انتقالی گروه A (PTFهایی که به ورودی تخلخل مؤثر نیاز دارند)

PTF	معادله (cm/hr) †	منبع
F1	$K_{sat} = 0.1 \text{ Exp}(10.8731 + 3.914 \text{Ln}(\varphi_e))$	Forrest et al. (1985)
F2	$K_{sat} = 2319.055 \varphi_e^{3.66}$	Minasny and McBratney (2000)
F3	$K_{sat} = 467.5 \varphi_e^{3.15}$	Suleiman et al. (2001)
F4	$K_{sat} = 4031.57 \varphi_e^{3.295}$	Sychalski et al. (2007)
F5	$K_{sat} = -2.52 + 581.598 \varphi_e^{1.5} - 6966.14 \varphi_e^{2.5} + 11693.78 \varphi_e^3$	Sychalski et al. (2007)
F6	$K_{sat} = -3.51 - 18154.6 \varphi_e^{1.5} - 12213.8 \varphi_e^2 \text{Ln} \varphi_e - 6925.78 \varphi_e / \text{Ln} \varphi_e$	Sychalski et al. (2007)
F7	$K_{sat} = 764.5 \varphi_e^{3.288}$	Ahuja et al. (1989)

† $\varphi_e K_{sat}$: به ترتیب هدایت هیدرولیکی اشباع (cm/hr) و تخلخل مؤثر خاک.

توابع انتقالی گروه B

در این مطالعه هشت تابع از این گروه مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۲). این گروه از PTFها به ورودی‌های بیشتری نسبت به گروه A نیاز دارند. توابع این گروه، K_{sat} را بر اساس داده‌های توزیع اندازه ذرات (درصد شن، سیلت و رس)، چگالی ظاهری و تخلخل کل پیش‌بینی می‌کنند. Puckett et al. (1985) از ۴۲ نمونه خاک ایالات متحده جهت توسعه یک تابع نمایشی برای پیش‌بینی K_{sat} بر اساس درصد رس استفاده نمودند. در ادامه Dane and Puckett (1994) با استفاده از تعداد بیشتری از داده‌ها، PTF توسعه‌یافته توسط Puckett et al. (1985) را اصلاح کردند. Julia et al. (2004) از نمونه‌های اندازه‌گیری شده خاک‌های اسپانیا در توسعه یک PTF برای پیش‌بینی K_{sat} بر اساس درصد شن استفاده نمودند. Cosby et al. (1984) از رگرسیون خطی چندگانه در توسعه یک PTF برای پیش‌بینی K_{sat} با استفاده از خواص اندازه‌گیری شده نمونه خاک‌های ایالات متحده با استفاده از درصد شن و رس بهره جستند. Brakensiek et al. (1984) یک PTF دیگر برای پیش‌بینی K_{sat} بر حسب درصد رس و شن و تخلخل خاک توسعه دادند. با همان پایگاه داده، Saxton et al. (1986) نیز یک PTF برای پیش‌بینی K_{sat} بر حسب درصد شن و رس ارائه نمودند. Jabro et al. (1992) از نمونه خاک‌های اندازه‌گیری شده بین‌المللی در توسعه PTF برای پیش‌بینی K_{sat} با استفاده از درصد سیلت و رس و چگالی ظاهری بهره گرفتند. Ottoni et al. (2019) با استفاده از نمونه خاک‌های Wosten et al. (1999) تابع دیگری بر حسب درصد سیلت، رس و چگالی ظاهری توسعه دادند. این محققین در کل از ۱۴۸۹ نمونه خاک استفاده نمودند. این تابع از جدیدترین توابع متعلق به این گروه است که توسط محققین ارائه شده و در این مطالعه برای خاک‌های سیستم به عنوان بخشی از ایران مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

جدول ۲. توابع انتقالی گروه B (PTFهایی که به ورودی‌های درصد شن، سیلت، رس، چگالی ظاهری و تخلخل نیاز دارند)

PTF	معادله (cm/hr) †	منبع
F8	$K_{sat} = 15 \cdot 696 \text{Exp}(-0 \cdot 1975CL)$	Puckett et al. (1985)
F9	$K_{sat} = 30 \cdot 384 \text{Exp}(-0 \cdot 144CL)$	Dane and Puckett (1994)
F10	$K_{sat} = 0 \cdot 0920 e^{0 \cdot 0491SA}$	Julia et al. (2004)
F11	$K_{sat} = 2 \cdot 54 \times 10^{(-0 \cdot 6 + 0 \cdot 012SA - 0 \cdot 0064CL)}$	Cosby et al. (1984)
F12	$K_{sat} = \text{Exp}[19 \cdot 52348\phi - 8 \cdot 96847 - 0 \cdot 028212CL + 0 \cdot 00018107SA^2 - 0 \cdot 0094125CL^2 - 8 \cdot 395215\phi^2 + 0 \cdot 077718SA\phi - 0 \cdot 00298SA^2\phi^2 - 0 \cdot 019492CL^2\phi^2 + 0 \cdot 0000173SA^2CL + 0 \cdot 02733CL^2\phi + 0 \cdot 001434SA^2\phi - 0 \cdot 0000035CL^2SA]$	Brakensiek et al. (1984)
F13	$K_{sat} = \text{Exp}[12 \cdot 01 - 0 \cdot 0755SA + (-3 \cdot 895 + 0 \cdot 03671SA + 0 \cdot 1103CL + 0 \cdot 00087546CL^2)/\theta_s]$	Saxton et al. (1986)
F14	$\text{Log } K_{sat} = 9 \cdot 56 - 0 \cdot 81 \text{LogSI} - 1 \cdot 09 \text{LogCL} - 4 \cdot 64BD$	Jabro et al. (1992)
F15	$K_{sat} = 51 \cdot 1 \times (0 \cdot 582 - 0 \cdot 00216SI - 0 \cdot 00232CL - 0 \cdot 203BD)^{1 \cdot 853}$	Otoni et al. (2019)

 † K_{sat} , SA, CL, S, BD, ϕ : به ترتیب هدایت هیدرولیکی اشباع (cm/hr)، درصد شن، درصد سیلت، درصد رس، چگالی ظاهری خاک (g/cm³) و تخلخل کل (cm³/cm³).

توابع انتقالی گروه C

این گروه از PTFها به مؤلفه‌های ورودی شامل توزیع اندازه ذرات، چگالی ظاهری و محتوای ماده آلی نیاز دارند. با این وجود فقدان اندازه‌گیری‌های ماده آلی در پایگاه‌های داده خاک، کاربرد توابع این گروه را محدود می‌کند. در این مطالعه هشت تابع از این گروه مورد بررسی قرار گرفتند (جدول ۳). Julia et al. (2004) از ۲۱۷۸ نمونه خاک‌های اسپانیا در توسعه یک PTF برای پیش‌بینی K_{sat} بر حسب درصد شن، رس و مواد آلی استفاده نمودند. Wosten et al. (1999) از نمونه خاک‌های اروپا در توسعه یک PTF برای پیش‌بینی K_{sat} بر حسب درصد رس، سیلت و مواد آلی و چگالی ظاهری استفاده کردند. سپس Wosten et al. (2001) دو PTF برای خاک‌های هلند توسعه دادند؛ یک تابع K_{sat} را با استفاده از مقادیر سیلت، ماده آلی و چگالی ظاهری پیش‌بینی می‌کند، و تابع دیگر با استفاده از مقادیر رس و ماده آلی و چگالی ظاهری K_{sat} را پیش‌بینی می‌کند. Vereecken et al. (1990) از نمونه خاک‌های بلژیک در توسعه یک PTF برای پیش‌بینی K_{sat} بر حسب مقادیر شن، رس و ماده آلی و چگالی ظاهری استفاده کردند. Weynants et al. (2009) از همان مجموعه داده‌ها برای توسعه یک PTF دیگر بر حسب مقادیر شن و ماده آلی و چگالی ظاهری استفاده نمودند. Li et al. (2007) نیز PTF دیگری را با استفاده از مقادیر شن، سیلت، رس، ماده آلی و چگالی ظاهری برای خاک‌های شمال چین توسعه دادند. Zuo and He (2021) از ۲۲۶۸ نمونه خاک دست نخورده و ۱۱۳۴ نمونه خاک دست خورده چین برای توسعه یک PTF با استفاده از مقادیر شن، رس، ماده آلی و چگالی ظاهری استفاده نمودند. لازم به ذکر است که تابع مذکور از جدیدترین توابعی این گروه است که توسط محققین خاک ارائه شده و در این مطالعه برای خاک‌های سیستم به عنوان بخشی از ایران مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

جدول ۳. توابع انتقالی گروه C (PTFهایی که به ورودی‌های توزیع اندازه ذرات، چگالی ظاهری و درصد ماده آلی نیاز دارند)

PTF	معادله (cm/hr) †	منبع
F16	$K_{sat} = 0 \cdot 1(-4 \cdot 994 + 0 \cdot 56728SA - 0 \cdot 131CL - 0 \cdot 0127OM)$	Julia et al. (2004)
F17	$K_{sat} = 0 \cdot 04167 \text{Exp}(45 \cdot 8 - 14 \cdot 34BD + 0 \cdot 001481SI^2 - 27 \cdot 5BD^{-1} - 0 \cdot 891 \text{Ln}(SI) - 0 \cdot 34 \text{Ln}(OM))$	Wosten et al. (2001)
F18	$K_{sat} = 0 \cdot 04167 \text{Exp}(-42 \cdot 6 + 8 \cdot 71OM + 61 \cdot 9BD - 20 \cdot 79BD^2 - 0 \cdot 02107OM^2 - 0 \cdot 0162CLOM - 5 \cdot 382BDOM)$	Wosten et al. (2001)
F19	$K_{sat} = 0 \cdot 04167 \text{Exp}(20 \cdot 62 - 0 \cdot 96 \text{Ln}CL - 0 \cdot 66 \text{Ln}SA - 0 \cdot 46 \text{Ln}OM - 8 \cdot 43BD)$	Vereecken et al. (1990)
F20	$24K_{sat} = \text{Exp}(1 \cdot 9582 + 0 \cdot 0308SA - 0 \cdot 6142BD - 0 \cdot 01566OM)$	Weynants et al. (2009)
F21	$K_{sat} = 0 \cdot 04167 \text{Exp}(7 \cdot 755 + 0 \cdot 0352SI + 0 \cdot 93 - 0 \cdot 967BD^2 - 0 \cdot 000484CL^2 - 0 \cdot 000322SI^2 + 0 \cdot 001SI^{-1} - 0 \cdot 0748OM^{-1} - 0 \cdot 643 \text{Ln}SI - 0 \cdot 0139BDCL - 0 \cdot 167BDOM + 0 \cdot 0298CL - 0 \cdot 03305SI)$	Wosten et al. (1999)
F22	$K_{sat} = 0 \cdot 04167 \text{Exp}(13 \cdot 262 - 1 \cdot 914 \text{Ln}SA - 0 \cdot 974 \text{Ln}SI - 0 \cdot 058CL - 1 \cdot 709 \text{Ln}OM + 2 \cdot 885OM - 8 \cdot 026 \text{Ln}BD)$	Li et al. (2007)
F23	$K_{sat} = \text{Exp}(1 \cdot 101 - 1 \cdot 516BD + 0 \cdot 029SA + 0 \cdot 284SOM - 0 \cdot 533 \text{Ln}CL)$	Zuo and He (2021)

 † K_{sat} , SA, CL, S, BD, ϕ , θ_s : هدایت هیدرولیکی اشباع (cm/hr)، درصد شن، درصد سیلت، درصد رس، درصد ماده آلی، چگالی ظاهری خاک (g/cm³),

 تخلخل کل (cm³/cm³), رطوبت اشباع (cm³/cm³) و رطوبت در 33Kpa (cm³/cm³).

آنالیز آماری

بهترین توصیف برای مقادیر K_{sat} استفاده از توزیع‌های لگاریتمی نرمال است و معمولاً از تبدیل‌های لگاریتمی برای توسعه PTF‌ها استفاده می‌شود (Abdelbaki et al., 2009; Minasny and McBratney, 2000). لذا در این مطالعه ارزیابی توابع ارائه شده در برآورد K_{sat} با استفاده از آماره نسبت خطا (ϵ)، نسبت خطای متوسط هندسی (GMER) و نسبت خطای انحراف معیار هندسی (GSEDR) صورت پذیرفت (Tietje and Hennings, 1996; Minasny and McBratney, 2000; Wagner et al., 2001; Abdelbaki et al., 2009). همچنین آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطا (ME) نیز معمولاً در ارزیابی عملکرد PTF‌ها استفاده می‌شوند (Schaap et al., 2001; Julià et al., 2004; Ghanbarian et al., 2017). از آنجایی که K_{sat} معمولاً دارای توزیع لگاریتمی نرمال است، برای تعیین این پارامترها بایستی داده‌های K_{sat} به لگاریتم‌های پایه ۱۰ تبدیل شوند (Ottoni et al., 2019; Qin et al., 2024). آماره‌های مورد استفاده در این مطالعه به صورت معادلات ۲ تا ۶ ارائه شده است:

$$\square = \frac{k_p}{K_m} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$GMER = \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(\epsilon_i)\right) \quad \text{رابطه ۳}$$

$$GSEDR = \exp\left[\left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [\ln(\epsilon_i) - \ln(GMER)]^2\right)^{1/2}\right] \quad \text{رابطه ۴}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\log_{10}(K_p) - \log_{10}(K_m)]^2} \quad \text{رابطه ۵}$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\log_{10} K_p - \log_{10} K_m) \quad \text{رابطه ۶}$$

که در آن n تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده، K_p و K_m به ترتیب هدایت هیدرولیکی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده می‌باشند. GMER برابر با یک، نشان‌دهنده تطابق دقیق بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده است؛ GMER کمتر از یک نشان‌دهنده تخمین کمتر از حد و GMER بزرگتر از یک نشان‌دهنده تخمین بیشتر از حد توسط تابع پیش‌بینی کننده است. GSEDR برابر با ۱ نشان‌دهنده تطابق کامل است و با انحراف مقادیر پیش‌بینی شده از مقادیر اندازه‌گیری شده افزایش می‌یابد. تمام تجزیه و تحلیل‌های آماری با نرم‌افزار Microsoft Excel انجام شد.

نتایج و بحث

برخی از خصوصیات اندازه‌گیری شده در نمونه خاک‌های منطقه مورد مطالعه در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج حاکی از آن است که تغییرات درصد شن، سیلت و رس به‌ترتیب در دامنه ۱۴ تا ۵۶، ۲۷ تا ۵۲ و ۱۴ تا ۵۷ قرار گرفته است که سبب ایجاد کلاس‌های بافتی لوم، لوم رسی، لوم رسی شنی، رسی، لوم سیلتی و لوم شنی شده است. ضریب تغییرات K_{sat} برابر ۴۹/۵ می‌باشد. ضریب تغییرات بالا بیان کننده پراکندگی بیشتر مؤلفه‌ها و ضریب تغییرات پایین بیان کننده پراکندگی کمتر به‌ازای یک واحد از میانگین هر مؤلفه می‌باشد. 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 نماید. با استفاده از این خصوصیات زودیاخت خاک (جدول ۴)، K_{sat} در توابع انتقالی جداول ۱، ۲ و ۳ برآورد گردید.

جدول ۴. خلاصه برخی از آماره‌های توصیفی در ۱۰۰ نمونه خاک مورد مطالعه

K_{sat} (cm/hr)	OM (%)	BD (gr/cm ³)	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	
۰/۳۰	۰/۳۳	۱/۳۵	۱۴	۲۷	۱۴	min
۶/۱۰	۳/۲۰	۱/۶۰	۵۷	۵۲	۵۶	max
۲/۳۰	۱/۴۰	۱/۴۵	۳۵	۳۴	۳۰	avg
۱/۵۰	۰/۷۴	۰/۱۱	۸/۶۰	۶/۰۲	۸/۱۲	SD
۴۹/۵۰	۴۵	۵/۴۹	۳۰/۵۱	۱۵/۹۶	۳۱/۴۰	CV

† min, max, avg, SD, CV, BD, OM: حداقل مقدار، حداکثر مقدار، میانگین، انحراف معیار، ضریب تغییرات، چگالی ظاهری خاک و درصد ماده آلی

عملکرد توابع انتقالی گروه A

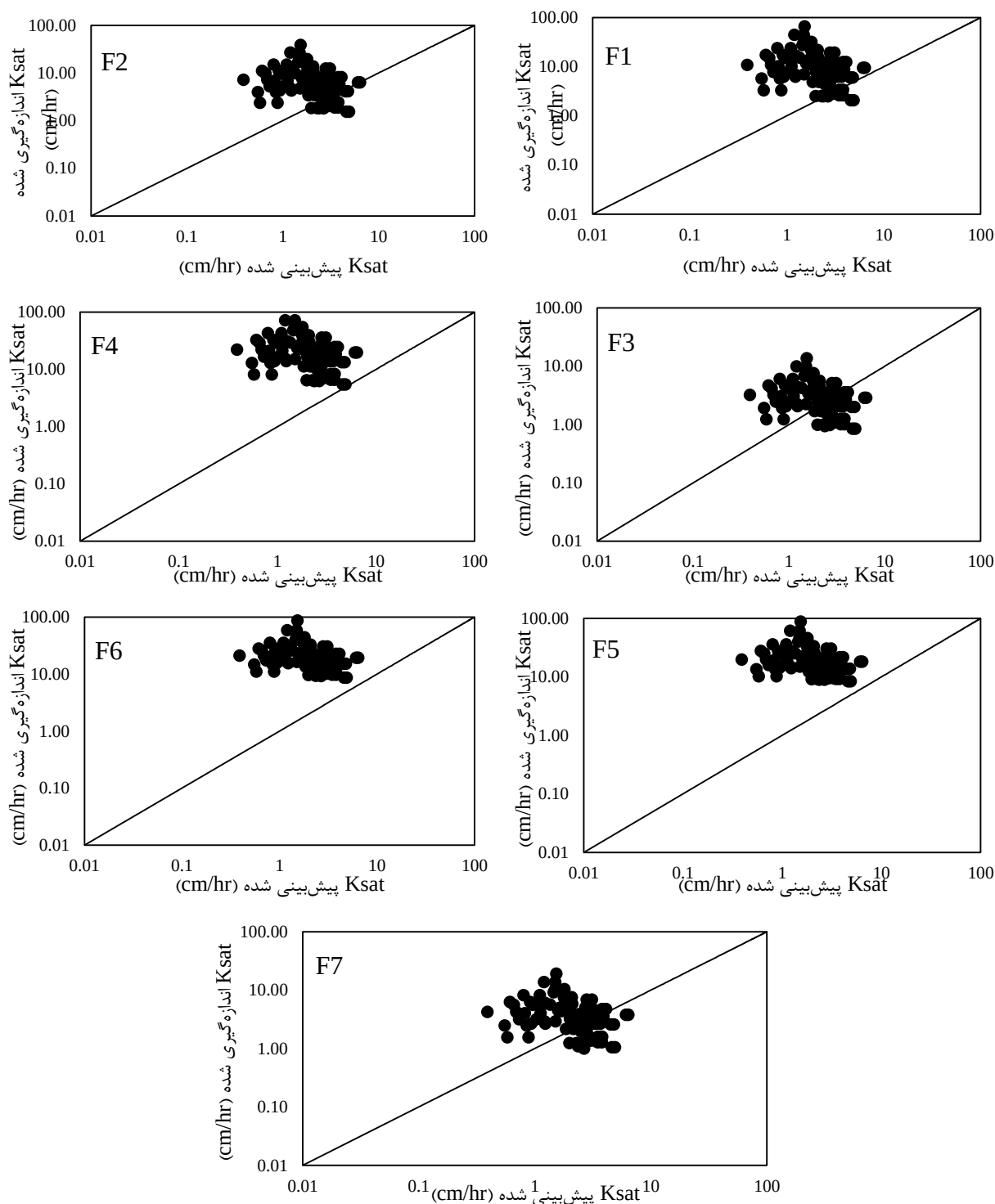
نتایج ارزیابی هفت PTF گروه A، در جدول ۵ و شکل ۲ ارائه شده است. مقادیر GMER بزرگتر از یک برای همه توابع، نشان می‌دهد که تمام توابع این گروه، مقادیر K_{sat} را بیش از حد برآورد نموده‌اند (جدول ۵). مدل F3 که تابع توسعه یافته توسط Suleiman et al. (2001) است، نزدیکترین پیش‌بینی‌ها را با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد ($GMER=1.15$) و پس از آن مدل F7 با GMER برابر با ۱/۵۰ بیشترین انطباق را با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. سه مدل توسعه یافته توسط Spychalski et al. (2007)، (F4، F5 و F6)، با وجود فرمول‌های متفاوت، اما پیش‌بینی‌های بسیار نزدیکی نسبت به یکدیگر ارائه نمودند. عملکرد ضعیف این سه مدل را می‌توان به تعداد اندک (۳۵ نمونه) مجموعه داده‌هایی که در توسعه مدل‌ها استفاده شده است، مرتبط دانست. مقادیر GSDER در محدوده ۱/۱۵ تا ۸/۳۷ متغیر است. تابع F3 که کمترین GMER را دارد، دارای مقدار میانه GSDER برابر با ۳/۰۴ می‌باشد. کمترین مقادیر RMSE و ME نیز به ترتیب مربوط به توابع F3 و F7 است. بنابراین، نتایج این ارزیابی نشان می‌دهد که توابع F3 و F7 به ترتیب دقیق‌ترین نتایج را در بین PTF‌های گروه A دارا می‌باشند. برای ارزیابی دقت PTF‌های مورد بررسی، مقادیر برآورد شده در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده K_{sat} ترسیم شد و با خط ۱:۱ مقایسه گردید. با بررسی پراکندگی نمودارهای شکل ۲ نیز می‌توان به نتایج مشابهی رسید. (Abdelbaki et al. (2009) برای ۱۹۱۱ نمونه خاک امریکا مقادیر K_{sat} تخمین زده شده با PTF‌های مختلف را مورد ارزیابی قرار داده و بیان کردند از میان توابعی که به ورودی تداخل مؤثر نیاز دارند، تابع توسعه یافته توسط Suleiman et al. (2001) بیشترین نزدیکی را با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد که با نتایج این پژوهش نیز هماهنگی دارد.

عملکرد توابع انتقالی گروه B

نتایج ارزیابی PTF‌های گروه B در جدول ۶ و شکل ۳ ارائه شده است. مطابق نتایج جدول ۶، توابع F11، F15، F13 و F12 به ترتیب با GMER برابر ۰/۹۵، ۰/۹۲، ۱/۱۰ و ۱/۱۲ و RMSE ۰/۳۰، ۰/۳۰، ۰/۳۳ و ۰/۴۵ بهترین عملکرد را دارا می‌باشند. با این وجود می‌توان بیان کرد که تابع F11 (Cosby et al., 1984) با اختلاف اندکی، بیشترین نزدیکی را با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد. تابع (Ottoni et al. (2019) F15) که از جدیدترین توابعی است که توسط پژوهشگران خاک در دنیا ارائه شده است در رتبه دوم قرار گرفت. عملکرد خوب این مدل را می‌توان به تعداد زیاد (۱۴۸۹ نمونه) مجموعه داده‌هایی که در توسعه مدل‌ها استفاده شده است، مرتبط دانست. توابع Saxton et al. (1986) F13) و (Brakensiek et al. (1984) F12) نیز به ترتیب در رتبه سوم و چهارم قرار دارند. سایر توابع مورد بررسی در این گروه (F8، F9، F10 و F14) با مقادیر GMER کوچکتر از یک و مقادیر منفی ME مقادیر K_{sat} را کمتر از حد برآورد نمودند که در این میان تابع F8 (Puckett et al., 1985) که از ۴۲ نمونه خاک در توسعه مدل آنها استفاده شده بود، ضعیف‌ترین عملکرد را نشان داد. مقادیر بالای GSDER بیان‌کننده پراکندگی زیاد نقاط برای توابع مورد بررسی است (Minasny and McBratney, 2000). برای خاک‌های مورد مطالعه، کمترین مقدار GSDER برای توابع F11 و F15 محاسبه گردید که همانطور که در شکل ۳ نیز قابل مشاهده است دارای کمترین میزان پراکندگی نسبت به سایر توابع این گروه می‌باشند. در پژوهشی زارع‌ایبانه و همکاران (۱۴۰۲) روش‌های برآورد K_{sat} را در اراضی نخلستان خوزستان مورد بررسی قرار دادند؛ ایشان بیان کردند که از میان توابع انتقالی مورد بررسی، تابع Cosby et al. (1984) نسبت به دیگر روش‌ها دارای دقت بیشتری می‌باشد. بهمنش و همکاران (۱۳۹۴) نیز بیان کردند که تابع Cosby et al. (1984) با اینکه فقط از دو مؤلفه درصد شن و رس استفاده می‌کند اما تخمین دقیقی از K_{sat} را ارائه می‌نماید.

جدول ۵. مقادیر شاخص‌های آماری برای توابع انتقالی گروه A

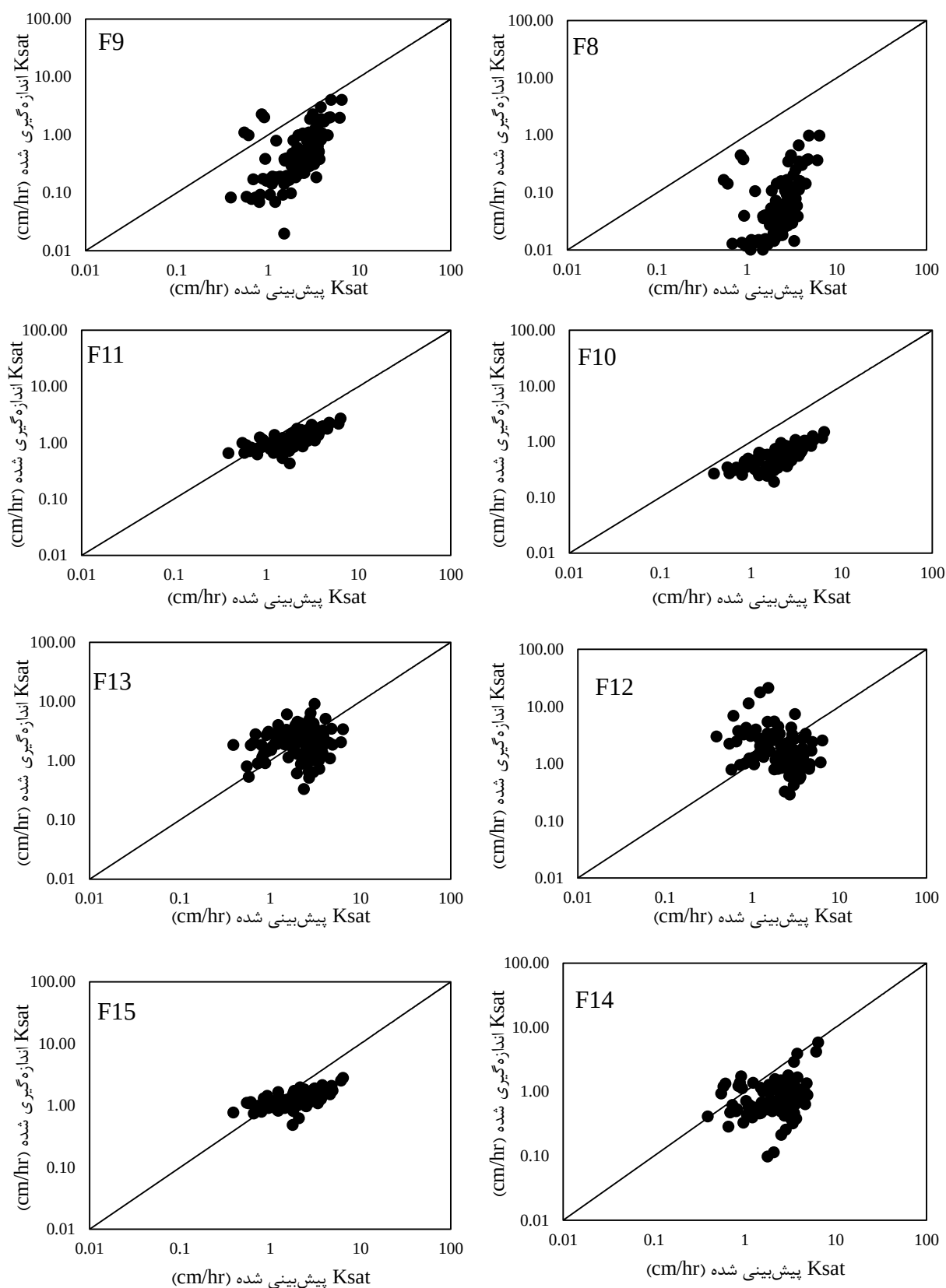
GSDER	GMER	ME	RMSE	PTF
۳/۵۷	۳/۶۸	۰/۵۶	۰/۷۸	F1
۳/۳۹	۲/۴۶	۰/۳۹	۰/۶۵	F2
۳/۰۴	۱/۱۵	۰/۰۶	۰/۴۸	F3
۳/۱۴	۷/۸۶	۰/۸۹	۰/۹۹	F4
۲/۶۰	۸/۰۹	۰/۹۰	۰/۹۸	F5
۲/۶۱	۸/۳۷	۰/۹۲	۰/۹۹	F6
۳/۱۳	۱/۵۰	۰/۱۷	۰/۵۲	F7



شکل ۲. مقادیر اندازه گیری شده در مقابل مقادیر پیش بینی شده K_{sat} (توابع انتقالی گروه A)

جدول ۶. مقادیر شاخص های آماری برای توابع انتقالی گروه B

GSDER	GMER	ME	RMSE	PTF
۳/۱۳	-۰/۳	-۱/۴۹	۱/۵۷	F8
۲/۱۶	-۰/۲۶	-۰/۵۷	۰/۶۶	F9
۲/۳۸	-۰/۲۷	-۰/۵۵	۰/۵۷	F10
۱/۹۲	-۰/۹۵	-۰/۰۱۴	۰/۳۰	F11
۲/۹۰	۱/۱۲	۰/۱۴	۰/۴۵	F12
۲/۰۷	۱/۱۰	۰/۰۱۸	۰/۳۳	F13
۲/۱۷	-۰/۴۰	-۰/۳۹	۰/۵۱	F14
۱/۹۷	-۰/۹۲	-۰/۰۱۵	۰/۳۰	F15



شکل ۳. مقادیر اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده K_{sat} (توابع انتقالی گروه B)

عملکرد توابع انتقالی گروه C

خلاصه ارزیابی PTF‌های گروه C در جدول ۷ و شکل ۴ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که توابع F21 و F18، F23 به‌ترتیب با GMER

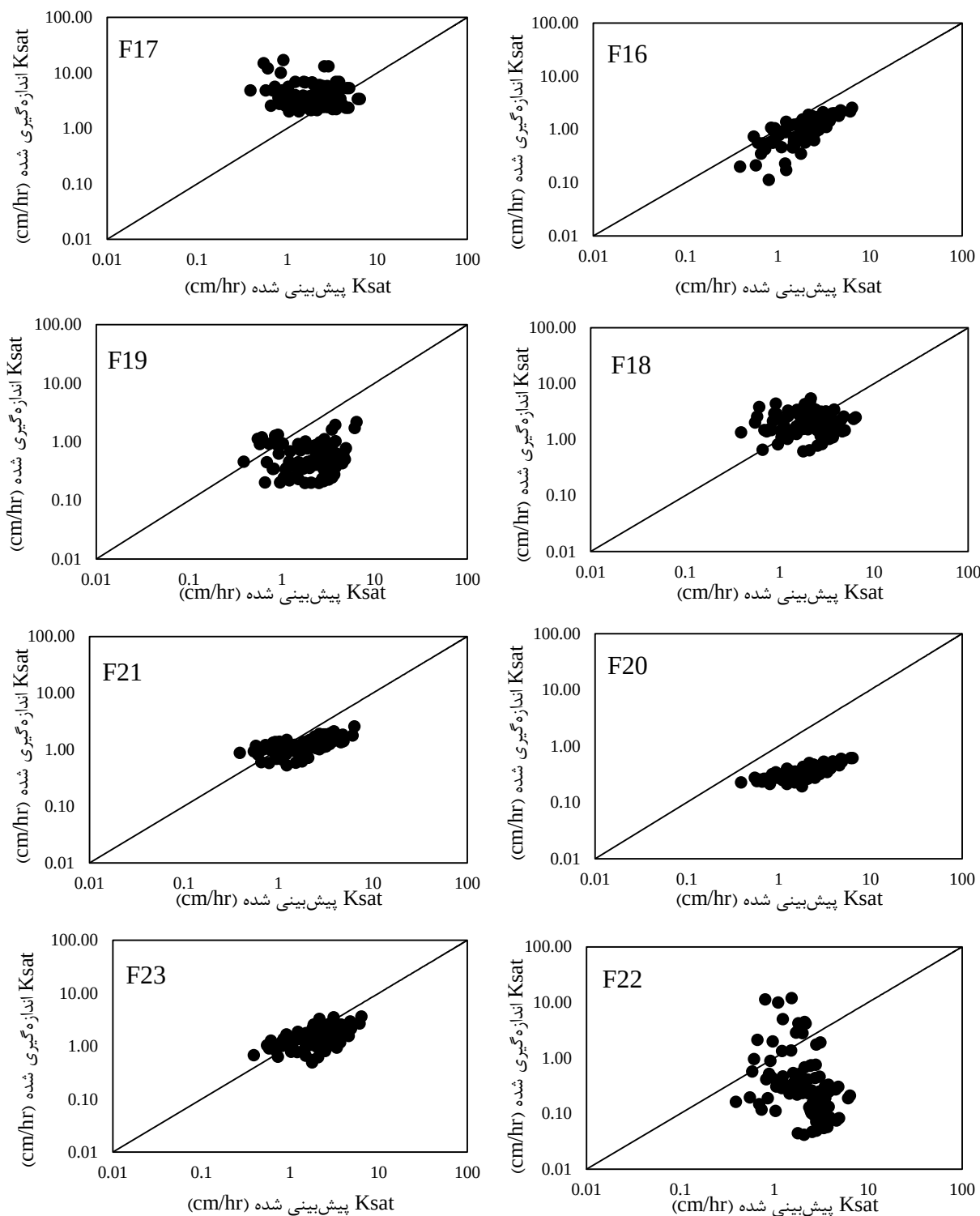
برابر ۰/۹۳، ۰/۹۲ و ۰/۶۰ و RMSE برابر ۰/۳، ۰/۳۲ و ۰/۳۵ بهترین عملکرد را در این گروه دارا می‌باشند. تابع Zuo and He (2021) (F23) که از جدیدترین توابعی است که در این گروه توسط محققین خاک ارائه شده است، دقیق‌ترین پیش‌بینی‌های K_{sat} را برای خاک‌های مورد بررسی ارائه می‌نماید. (2001) Wosten et al. (F18) نیز در رتبه دوم پس از F23 قرار دارد. ضعیف‌ترین عملکرد مربوط به تابع Li et al. (2007) (F22) با GMER برابر ۰/۱۴ و همچنین RMSE و ME به ترتیب ۱/۱۱ و ۰/۸۴ می‌باشد. نمودارهای شکل ۴ نیز تأیید کننده این نتایج می‌باشند. بیشترین میزان GSDER مربوط به تابع F22 (برابر ۵/۳۶) است که همان‌طور که در شکل ۴ نیز قابل مشاهده است، بیشترین پراکندگی را در مقایسه با سایر توابع این گروه دارا می‌باشد. به طور کلی با توجه به مقادیر منفی ME و مقادیر کمتر از یک برای GMER، می‌توان گفت توابع انتقالی گروه C (به جز F17) تمایل به پیش‌بینی کمتر از حد برای K_{sat} را دارند. در پژوهشی Abdelbaki et al. (2009) اظهار داشتند PTF‌هایی که برای تخمین K_{sat} به ورودی‌های توزیع اندازه ذرات، چگالی ظاهری و درصد ماده آلی نیاز دارند، مقادیر K_{sat} را کمتر از حد برآورد می‌نمایند که با نتایج این پژوهش نیز هماهنگی دارد. کلیشادی و همکاران (۱۳۹۲) بیان کردند که همه توابع انتقالی قادر به برآورد دقیق K_{sat} نمی‌باشند و این مهم می‌تواند به این دلیل باشد که توابع انتقالی وابسته به مکان هستند و همچنین در آنها کمتر به نقش ساختمان خاک توجه شده است.

جدول ۷. مقادیر شاخص‌های آماری برای توابع انتقالی گروه C

PTF	RMSE	ME	GMER	GSDER
F16	۰/۳۹	-۰/۲۵	۰/۵۵	۲/۴۰
F17	۰/۴۶	۰/۲۵	۱/۸	۲/۴۴
F18	۰/۳۲	-۰/۰۷۶	۰/۹۲	۲/۰۹
F19	۰/۶۹	-۰/۶۰	۰/۲۵	۲/۲۳
F20	۰/۷۷	-۰/۷۵	۰/۱۷	۱/۴۹
F21	۰/۳۵	-۰/۲۱	۰/۶۰	۱/۸۳
F22	۱/۱۱	-۰/۸۴	۰/۱۴	۵/۳۶
F23	۰/۳۰	-۰/۱۰	۰/۹۳	۱/۶۲

عملکرد همه توابع انتقالی

در ادامه عملکرد بیست و سه تابع مورد بررسی در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. هدف از این ارزیابی شناسایی توابع با بهترین عملکرد در زمانی بود که در دسترس بودن مؤلفه‌های ورودی عامل محدودکننده‌ای در انتخاب PTF‌ها نباشد. نتایج حاکی از آن بود که تابع Cosby et al. (1984) با اینکه فقط از دو مؤلفه درصد شن و رس استفاده می‌کند، با RMSE، ME، GMER و GSDER به ترتیب ۰/۳، ۰/۰۱، ۰/۹۵ و ۱/۹۲ بالاترین عملکرد را دارا می‌باشد. بنابراین توابع انتقالی که به ورودی‌های کمتری نیاز دارند، لزوماً عملکرد پایین‌تری نخواهند داشت و این به این سبب است که این توابع علاوه بر مؤلفه‌های ورودی به مکانی که در آن توسعه یافته‌اند و همچنین ساختمان خاک نیز بستگی دارند. با اختلاف اندکی توابع Zuo and He (2021)، Ottoni et al. (2019)، Wosten et al. (2001) و Saxton et al. (1986) با GMER بسیار نزدیک به یک به ترتیب ۰/۹۳، ۰/۹۲، ۰/۹۲ و ۱/۱ و در رتبه بعد آنها توابع Brakensiek et al. (1984) و Suleiman et al. (2001) با GMER برابر ۱/۱۲ و ۱/۱۵ نیز بالاترین عملکرد را در بین سه گروه ارائه نمودند. این در حالی است که مقادیر GSDER برای توابع مذکور از ۱/۶ تا ۳/۰۴ متغیر می‌باشد. مقادیر بالای GSDER بیان کننده پراکندگی زیاد نقاط برای توابع مورد بررسی می‌باشد که این مهم در اشکال ۱، ۲ و ۳ نیز قابل مشاهده است. نتایج این مطالعه نشان داد که عملکرد PTF‌ها برای منطقه مورد مطالعه لزوماً تحت تأثیر تعداد مؤلفه‌های ورودی آنها قرار نمی‌گیرد و عواملی مانند تعداد نمونه‌های خاک، ساختمان خاک و مکانی که توابع مورد بررسی توسط آنها توسعه یافته‌اند نیز بر عملکرد آنها در هر منطقه مؤثر می‌باشد. (2009) Abdelbaki et al. برای ۶۷۸ نمونه خاک ایالات متحده عملکرد PTF‌ها، با تعداد مؤلفه‌های ورودی مختلف را برای پیش‌بینی K_{sat} مورد ارزیابی قرار دادند؛ ایشان اظهار داشتند تعداد مؤلفه‌های ورودی PTF‌ها در عملکرد آنها مؤثر نیست. با وجود اینکه تاکنون PTF‌های زیادی برای پیش‌بینی K_{sat} در دنیا ارائه شده است، اما اگر در مناطقی مورد استفاده قرار گیرند که شرایط خاک آنها با مناطقی که PTF‌ها در آن توسعه یافته‌اند تفاوت زیادی داشته باشد، عملکرد آنها به میزان زیادی کاهش می‌یابد (Zuo and He, 2021)، که این نتایج، با دستاوردهای این پژوهش نیز هماهنگی دارد.



شکل ۴. مقادیر اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده K_{sat} (توابع انتقالی گروه C)

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، بیست و سه PTF برای پیش‌بینی K_{sat} در منطقه سیستان مورد ارزیابی قرار گرفتند. با توجه به مشکل نبود اندازه‌گیری‌های مربوط به برخی از ویژگی‌های خاک، این توابع بر اساس مؤلفه‌های ورودی به سه گروه تقسیم شدند. نتایج نشان داد که زمانی که اندازه‌گیری‌های موجود فقط تخریل مؤثر باشد، PTF توسعه‌یافته توسط Suleiman et al. (2001) و Ahuja et al. (1989) با مقادیر RMSE به ترتیب ۰/۴۸ و ۰/۵۲ بهترین مدل‌ها برای تخمین K_{sat} می‌باشند. اگر اندازه‌گیری‌های بیشتری مانند توزیع اندازه ذرات، چگالی ظاهری و تخریل در دسترس باشد، PTF توسعه‌یافته توسط Cosby et al. (1984) و Ottoni et al. (2019) با مقادیر RMSE برابر ۰/۳۰ برای هر

دو PTF، بهترین مدل‌ها برای پیش‌بینی K_{sat} محسوب می‌شوند. اگر علاوه بر توزیع اندازه ذرات و چگالی ظاهری، اندازه‌گیری‌های بیشتری از ویژگی‌های خاک مانند ماده آلی نیز در دسترس باشد، PTF توسعه‌یافته توسط Zuo and He (2021) و Wosten et al. (2001) با مقادیر RMSE به ترتیب ۰/۳۰ و ۰/۳۲ بهترین عملکرد را دارا می‌باشند. در نهایت، اگر تمام اندازه‌گیری‌های ویژگی‌های خاک موجود باشد، PTF‌های توسعه‌یافته توسط Cosby et al. (1984)، Zuo and He (2021)، Ottoni et al. (2019) و Wosten et al. (2001) به ترتیب بهترین مدل‌ها برای پیش‌بینی K_{sat} می‌باشند. نتایج این مطالعه نشان داد برخی از توابع جدید ارائه شده در این زمینه نیز می‌توانند عملکرد خوبی در مقایسه با توابع پایه‌ای در پیش‌بینی K_{sat} ارائه نمایند. با توجه با اینکه در توسعه PTF‌ها به عواملی از جمله ساختمان خاک کمتر توجه شده است، لذا دقت PTF‌ها برای مناطق مختلف متفاوت است و عملکرد آنها تحت تأثیر تعداد مؤلفه‌های ورودی آنها قرار نمی‌گیرد. نتایج ارائه شده در این مطالعه را می‌توان برای پیش‌بینی K_{sat} در منطقه مورد مطالعه، با استفاده از تکنیک توابع انتقالی خاک به عنوان پارامتر ورودی در مدل‌سازی‌های مختلف به کار گرفت؛ به این صورت که ابتدا پارامترهای اندازه‌گیری شده موجود خاک را شناسایی کرده و گروهی از PTF‌هایی را که به این ورودی‌ها نیاز دارند، انتخاب شوند. سپس PTF‌ها با بهترین عملکرد شناسایی و میانگین K_{sat} با استفاده از توابع منتخب محاسبه گردد.

منابع

- بهمنش، جواد، رضائی آبالو، الناز، محمدنژاد، بایرامعلی، زینالزاده، کامران، حبیب‌زاده‌آذر، بهنام. (۱۳۹۴). ارزیابی توابع انتقالی در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (مطالعه موردی: دشت ارومیه). *نشریه دانش آب و خاک*، ۲۵(۲)، ۱۲-۱.
- چاری، محمد مهدی. (۱۳۹۹). پیش‌بینی چگالی ظاهری با استفاده از توابع انتقالی برای خاک‌های دشت سیستان. *نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار*، ۱۰(۴)، ۱۵۴-۱۳۷.
- زارع‌ایبانه، حمید، سلیمانی، علی، جلیلی، سعید، جوزی، مهدی. (۱۴۰۰). مقایسه روش‌های برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در اراضی نخلستان. *نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۱۳(۵۲)، ۷۹۸-۱۸۳.
- زرین‌فر، سجاد، قهرمان، بیژن، داوری، کامران. (۱۳۹۰). ارائه توابع انتقالی جهت پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌های گراولی با استفاده از رگرسیون حداقل مربعات جزیی. *نشریه آب و خاک*، ۲۵(۳)، ۶۲۴-۶۱۷.
- سرخه‌نژاد، منصور، الباجی، محمد، ناصری، عبدعلی، برومندنسب، سعید. (۱۴۰۲). تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع لایه سطحی خاک به روش تلفیق توابع انتقالی و سنجش از دور (مطالعه موردی: اراضی جنوب اهواز). *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۱۵۴(۱)، ۱۲۲-۱۰۵.
- کلشادی، حمید، مصدقی، محمدرضا، حاج‌عباسی، محمدعلی، ایوبی، شمس‌اله. (۱۳۹۲). ارزیابی و توسعه توابع انتقالی برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در مقیاس زمین‌نما در زاگرس مرکزی. *تحقیقات کاربردی خاک*، ۱۱(۲)، ۳۳-۱۶.

REFERENCES

- Abdelbaki, A. M., Youssef, M. A., Naguib, E. M., Kiwan, M. E., & 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.
- Ahuja, L. R., Naney, J. W., Green, R. E., & Nielsen, D. R. (1984). Macroporosity to characterize spatial variability of hydraulic conductivity and effects of land management. *Soil Science Society of America Journal*, 48(4), 699-702.
- Amundson, R., Berhe, A. A., Hopmans, J. W., Olson, C., Sztein, A.E., & Sparks, D. L. (2015). Soil and human security in the 21st century. *Science*, 348(6235), 1261071.
- Behmanesh, J., Rezaei Abajelu, E., Mohammadnejhad, B., Zeinalzadeh, K., & Habibzadeh Azar, B. (2015). Evaluation of pedo-Transfer functions for estimating soil saturated hydraulic conductivity (Case study: Urmia Plain). *Water and Soil Science*, 25(2), 1-12. (In Persian)
- Bittelli, M., Campbell, G. S., & Tomei, F. (2015). *Soil physics with Python: transport in the soil-plant-atmosphere system*. Oxford University Press, New York, USA
- Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Bulk density. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, 5, 363-375.
- Bouma, J. (1989). Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advances in Soil Science*, 9, 177-213.
- Brakensiek, D. L., Rawls, W. J., & Stephenson, G. R. (1984). Modifying SCS hydrologic soil groups and curve numbers for rangeland soils. *ASAE Paper (PNR-84203)*.
- 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. (In Persian)
- Cleveland, C. C., Houlton, B. Z., Smith, W. K., Marklein, A. R., Reed, S. C., Parton, W., Del Grosso, S. J., & Running, S. W. (2013). Patterns of new versus recycled primary production in the terrestrial biosphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(31), 12733-12737.
- Cosby, B. J., Hornberger, G. M., Clapp, R. B., & Ginn, T. (1984). A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water resources research*, 20(6), 682-690.
- Dai, Y., Shangguan, W., Duan, Q., Liu, B., Fu, S., & Niu, G. (2013). Development of a China dataset of soil hydraulic parameters using pedotransfer functions for land surface modeling. *Journal of Hydrometeorology*, 14(3), 869-887.
- Dane, J. H., & Puckett, W. (1994). Field soil hydraulic properties based on physical and mineralogical information. In *Proceedings of the international workshop on indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils* (pp. 389-403). Riverside: University of California.
- Forrest, J. A., Beatty, J., Hignett, C. T., Pickering, J., & Williams, R. G. P. (1985). A survey of the physical properties of wheatland soils in eastern Australia. *CSIRO Australia Division of Soils*, Divisional Report No. 78.
- Gee, G. W., & Or, D. (2002). Particle-size analysis. *Methods of soil analysis: Part 4 physical methods*, 5, 255-293.
- Ghanbarian, B., Taslimitehrani, V., & Pachepsky, Y. A. (2017). Accuracy of sample dimension-dependent pedotransfer functions in estimation of soil saturated hydraulic conductivity. *Catena*, 149, 374-380.
- Jabro, J. D. (1992). Estimation of saturated hydraulic conductivity of soils from particle size distribution and bulk density data. *Transactions of the ASAE*, 35(2), 557-560.
- Julia, M. F., Monreal, T. E., del Corral Jimenez, A. S., & Melendez, E. G. (2004). Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction. *Geoderma*, 123(3-4), 257-277.
- Katul, G. G., Oren, R., Manzoni, S., Higgins, C., & Parlange, M. B. (2012). Evapotranspiration: A process driving mass transport and energy exchange in the soil-plant-atmosphere-climate system. *Reviews of Geophysics*, 50(3).
- Kelishadi, H., Mosaddeghi, M. R., Hajabbasi, M. A., & Ayoubi, S. (2014). Evaluating and developing pedotransfer functions to predict soil saturated hydraulic conductivity at landscape scale in central Zagros. *Applied Soil Research*, 1(2), 16-33. (In Persian)
- Khatti, J., & Grover, K. S. (2024). Assessment of hydraulic conductivity of compacted clayey soil using artificial neural network: An investigation on structural and database multicollinearity. *Earth Science Informatics*, 17(4), 3287-3332.
- Li, Y., Chen, D., White, R. E., Zhu, A., & Zhang, J. (2007). Estimating soil hydraulic properties of Fengqiu County soils in the North China Plain using pedotransfer functions. *Geoderma*, 138(3-4), 261-271.
- Minasny, B., & McBratney, A. B. (2000). Evaluation and development of hydraulic conductivity pedotransfer functions for Australian soil. *Soil Research*, 38(4), 905-926.
- Montzka, C., Herbst, M., Weihermüller, L., Verhoef, A., & Vereecken, H. (2017). A global data set of soil hydraulic properties and sub-grid variability of soil water retention and hydraulic conductivity curves. *Earth System Science Data*, 9(2), 529-543.
- Oki, T., & Kanae, S. (2006). Global hydrological cycles and world water resources. *science*, 313(5790), 1068-1072.
- Otoni, M. V., Otoni Filho, T. B., Lopes-Assad, M. L. R., & Rotunno Filho, O. C. (2019). Pedotransfer functions for saturated hydraulic conductivity using a database with temperate and tropical climate soils. *Journal of Hydrology*, 575, 1345-1358.
- Puckett, W. E., Dane, J. H., & Hajek, B. F. (1985). Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*, 49(4), 831-836.
- Qin, L., Tian, Z., Lin, L., Yi, C., & Chen, J. (2024). Evaluation and development of pedotransfer functions of saturated hydraulic conductivity for subtropical soils. *Geoderma*, 448, 116976.
- Saxton, K. E., Rawls, W., Romberger, J. S., & Papendick, R. I. (1986). Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil science society of America Journal*, 50(4), 1031-1036.
- Schaap, M. G., Leij, F. J., & Van Genuchten, M. T. (2001). Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of hydrology*, 251(3-4), 163-176.
- Sorkheh Nejad, M., Albaji, M., Naseri, A. A., & Boroomand Nasab, S. (2023). Estimation of saturated hydraulic conductivity of the soil surface layer by combining transfer functions and remote sensing (Case

- Study: South of Ahwaz Lands). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(1), 105- 122. (In Persian)
- Spychalski, M., Kaźmierowski, C., & Kaczmarek, Z. (2007). Estimation of saturated hydraulic conductivity on the basis of drainage porosity. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, 10(1), 04.
- Suleiman, A. A., & Ritchie, J. T. (2001). Estimating saturated hydraulic conductivity from soil porosity. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 44(2), 235-339.
- Tietje, O., & Hennings, V. (1996). Accuracy of the saturated hydraulic conductivity prediction by pedotransfer functions compared to the variability within FAO textural classes. *Geoderma*, 69(1-2), 71-84.
- USDA, N. (1999). United States department of agriculture. Natural Resources Conservation Service. Plants Database.
- Vereecken, H., Maes, J., & Feyen, J. (1990). Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. *Soil Science*, 149(1), 1-12.
- Vereecken, H., Schnepf, A., Hopmans, J. W., Javaux, M., Or, D., Roose, T., ... & Young, I. M. (2016). Modeling soil processes: Review, key challenges, and new perspectives. *Vadose zone journal*, 15(5), 1-57.
- Vereecken, H., Weynants, M., Javaux, M., Pachepsky, Y., Schaap, M. G., & Genuchten, M. T. V. (2010). Using pedotransfer functions to estimate the van Genuchten–Mualem soil hydraulic properties: A review. *Vadose Zone Journal*, 9(4), 795-820.
- Vinhal-Freitas, I. C., Corrêa, G. F., Wendling, B., Bobulska, L., & 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.
- Wagner, B., Tarnawski, V. R., Hennings, V., Müller, U., Wessolek, G., & Plagge, R. (2001). Evaluation of pedo-transfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set. *Geoderma*, 102(3-4), 275-297.
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1), 29-38.
- Warrick, A. W. (2003). *Soil water dynamics*. Oxford University Press. USA.
- Weynants, M., Vereecken, H., & Javaux, M. (2009). Revisiting Vereecken pedotransfer functions: Introducing a closed-form hydraulic model. *Vadose Zone Journal*, 8(1), 86-95.
- Wösten, J. H. M., Lilly, A., Nemes, A., & Le Bas, C. L. (1999). Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*, 90(3-4), 169-185.
- Wösten, J. H. M., Pachepsky, Y. A., & 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.
- Xia, Y., & Li, N. (2024). High-Resolution Estimation of Soil Saturated Hydraulic Conductivity via Upscaling and Karhunen–Loève Expansion within DREAM (ZS). *Applied Sciences*, 14(11), 4521.
- Zare Abyaneh, H., Soleimani, A., Jalili, S., & Jovzi, M. (2023). Comparison of Methods for Estimating Saturated Hydraulic Conductivity of Soil in Palmetum Lands. *Journal of Irrigation and Water engineering*, 13(52), 183-193. (In Persian)
- Zarrinfar, S., Ghahraman, B., & Davary, K. (2011). Development of Some pedotransfer functions to predict the saturated hydraulic conductivity of gravel soils using partial least square regression method. *Journal of Water and Soil*, 25(3), 617-624. (In Persian)
- Zuo, Y., & He, K. (2021). Evaluation and development of pedotransfer functions for predicting soil saturated hydraulic conductivity in the Alpine Frigid Hilly region of Qinghai Province. *Agronomy*, 11(8), 1581.