

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

ABSTRACT

One of the important parameters in the evaluation of soil hydrological properties is saturated hydraulic conductivity (K_{sat}), which plays an important role in modeling flow and solute transport in soil. Pedotransfer functions (PTFs) relate K_{sat} 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 K_{sat} 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 K_{sat} in hydrological modeling for the study area.

Keywords: Bulk density, Organic matter, Particle size distribution, Porosity, Sistan Plain.

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

چکیده

یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی خصوصیات هیدرولوژیکی خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع (K_{sat}) می‌باشد که نقش مهمی در مدل‌سازی جریان، انتقال املاح و رسوب در خاک ایفا می‌کند. توابع انتقالی (PTF)، پارامتر K_{sat} را به ویژگی‌های زودیافت 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 K_{sat} 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 توسعه‌یافته توسط Suleiman et al. (2001) و Ahuja et al. (1989) بهترین مدل‌ها برای تخمین K_{sat} هستند. اگر داده‌های توزیع اندازه ذرات، چگالی ظاهری و تخلخل در دسترس باشند (گروه B)، PTF‌های توسعه‌یافته توسط Cosby et al. (1984) و Ottoni et al. (2019) دقیق‌ترین مدل‌ها برای پیش‌بینی K_{sat} 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) و Wosten et al. (2001) توسعه یافته‌اند. نتایج این مطالعه می‌تواند برای پیش‌بینی K_{sat} در مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی برای منطقه مورد مطالعه به کار رود.

واژه‌های کلیدی: تخلخل، توزیع اندازه ذرات، چگالی ظاهری، دشت سیستان، ماده آلی.

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 رنجیره 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 غیر اشباع 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 غیر عملی است (Vereecken et al., 2010; Dai et al., 2013). از طرف دیگر، می توان مقدار K_{sat} را بر اساس خواص زود یافت 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^۱ (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 آیمرن و همکاران با کمترین مقدار خطا دارای بهترین برآورد در اراضی مذکور بود (بهمنش و همکاران، ۱۳۹۴). زارعیان و همکاران (۱۴۰۰) روش های برآورد K_{sat} را در اراضی نخلستان های شهرستان بای 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 زود یافت خاک با شاخص های پوشش گیاهی بهترین نتایج را ارائه می کند (سرخه نژاد و همکاران، ۱۴۰۲).

¹ Pedotransfer function

Otoni et al. (2019) برای مناطقی در برزیل و اروپا مشخصات خاک را اندازه‌گیری و از آنها برای توسعه PTF های جدیدی استفاده نمودند. سپس عملکرد آنها را بررسی و با پیش‌بینی‌های هفت PTF منتشر شده در منابع مقایسه کردند. ایشان اظهار داشتند PTF پیشنهادی بر اساس مؤلفه ورودی تخلخل مؤثر، دقیق‌ترین نتایج را در مقایسه با PTF های که فقط براساس بافت خاک یا چگالی ظاهری هستند، ارائه می‌کند. بیشتر PTF ها برای خاک‌های ایالت متحده و اروپا توسعه یافته‌اند، لذا Zuo and He (2021) ۱۰ ویژگی اساسی خاک را به عنوان مؤلفه‌های ورودی PTF ها برای پیش‌بینی K_{sat} در سه حوزه آبخیز در چین اندازه‌گیری 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 پیش‌بینی K_{sat} برای خاک‌های 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 مهم‌ترین مؤلفه ورودی برای توابع پیشنهادی ایشان می‌باشد. Khatte and Kamaldeep (2024) تأثیر لایه‌های 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 لونیگ-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 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 شرقی 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.

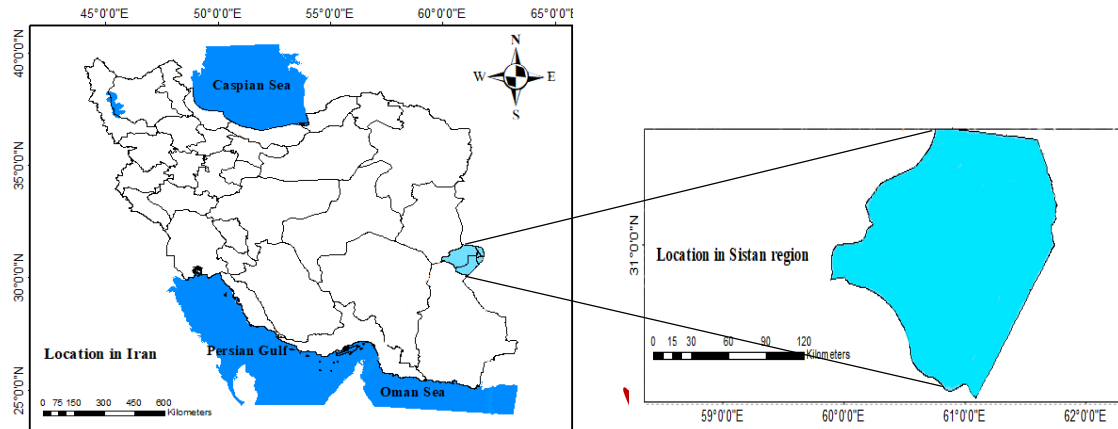
مواد و روش‌ها

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.

¹ DREAM (ZS)

² Karhunen-Loève (KL)



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).

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

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 (F_4) به شکل مدل Ahuja et al. (1984) است و دو تابع دیگر (F_5 , F_6) 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 (PTF هایی که به ورودی تخلخل مؤثر نیاز دارند)

منبع	معادله (cm/hr) †	PTF
Forrest et al. (1985)	$K_{sat} = 0.1 \text{Exp}(10 \cdot 8731 + 3 \cdot 914 \text{Ln}(\phi_e))$	F1
Minasny and McBratney (2000)	$K_{sat} = 2319 \cdot 055 \phi_e^{3.66}$	F2
Suleiman et al. (2001)	$K_{sat} = 467 \cdot 5 \phi_e^{3.15}$	F3
Spychalski et al. (2007)	$K_{sat} = 4031 \cdot 57 \phi_e^{3.295}$	F4
Spychalski et al. (2007)	$K_{sat} = -2 \cdot 52 + 581 \cdot 598 \phi_e^{1.5} - 6966 \cdot 14 \phi_e^{2.5} + 11693 \cdot 78 \phi_e^3$	F5
Spychalski et al. (2007)	$K_{sat} = -3 \cdot 51 - 18154 \cdot 6 \phi_e^{1.5} - 12213 \cdot 8 \phi_e^2 \text{Ln} \phi_e - 6925 \cdot 78 \phi_e / \text{Ln} \phi_e$	F6
Ahuja et al. (1989)	$K_{sat} = 764 \cdot 5 \phi_e^{3.288}$	F7

† ϕ_e : به ترتیب هدایت هیدرولیکی اشباع (cm/hr) و تخلخل مؤثر خاک.

توابع انتقالی گروه B

در این مطالعه نسبت تابع از این گروه مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۲). این گروه از PTF ها به ورودی های بیشتری نسبت به گروه A نیاز دارند. توابع این گروه، K_{sat} را بر اساس داده های توزیع اندازه ذرات (درصد شن، سیلت و رس)، چگالی ظاهری و تخلخل کل پیش بینی می کنند. (Puckett et al. (1985) از ۴۴ نمونه خاک ایالات متحده جهت توسعه یک تابع نمای برای پیش بینی K_{sat} بر اساس درصد رس استفاده نمودند. در ادامه (Dane and Puckett (1994) با استفاده از تعداد بیشتری از داده ها، PTF توسعه یافته توسط (Puckett et al. (1985) را اصلاح کردند. (Julia et al. (2004) از نمونه های اندازه گیری شده خاک های اسپانیا در توسعه یک PTF برای پیش بینی K_{sat} بر اساس درصد شن استفاده نمودند. (Cosby et al. (1984) از رگرسیون خطی چندگانه در توسعه یک PTF برای پیش بینی K_{sat} با استفاده از خواص اندازه گیری شده نمونه خاک های ایالات متحده با استفاده از درصد شن و رس بهره جستند. (Brakensiek et al. (1984) یک PTF دیگر برای پیش بینی 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 پیش بینی K_{sat} بر حسب درصد شن و رس ارائه نمودند. (Jabro et al. (1992) از نمونه خاک های اندازه گیری شده بین المللی در توسعه PTF برای پیش بینی K_{sat} با استفاده از درصد سیلت و رس و چگالی ظاهری بهره گرفتند. (Ottoni et al. (2019) با استفاده از نمونه خاک های (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 خاک های سیستان به عنوان بخشی از ایران مورد ارزیابی قرار می گیرد.

جدول ۲. توابع انتقالی گروه B (PTF هایی که به ورودی های درصد شن، سیلت، رس، چگالی ظاهری و تخلخل نیاز دارند)

منبع	معادله (cm/hr) †	PTF
Puckett et al. (1985)	$K_{sat} = 15 \cdot 696 \text{Exp}(-0 \cdot 1975CL)$	F8
Dane and Puckett (1994)	$K_{sat} = 30 \cdot 384 \text{Exp}(-0 \cdot 144CL)$	F9
Julia et al. (2004)	$K_{sat} = 0 \cdot 0920 e^{0 \cdot 0491SA}$	F10
Cosby et al. (1984)	$K_{sat} = 2 \cdot 54 \times 10^{(-0 \cdot 6+0 \cdot 012SA-0 \cdot 0064CL)}$	F11
Brakensiek et al. (1984)	$K_{sat} = \text{Exp} [19 \cdot 52348\phi - 8 \cdot 96847 - 0 \cdot 028212CL + 0 \cdot 00018107SA^2 - 0 \cdot 0094125CL^2 - 8 \cdot 395215\phi^2 + 0 \cdot 077718SA\phi - 0 \cdot 00298SA^2\phi^2 - 0 \cdot 019492CL^2\phi^2 + 0 \cdot 0000173SA^2CL + 0 \cdot 02733CL^2\phi + 0 \cdot 001434SA^2\phi - 0 \cdot 0000035CL^2SA]$	F12
Saxton et al. (1986)	$K_{sat} = \text{Exp}[12 \cdot 01 - 0 \cdot 0755SA + (-3 \cdot 895 + 0 \cdot 03671SA + 0 \cdot 1103CL + 0 \cdot 00087546CL^2)/\theta_s]$	F13
Jabro et al. (1992)	$\text{Log } K_{sat} = 9 \cdot 56 - 0 \cdot 81 \text{LogSI} - 1 \cdot 09 \text{LogCL} - 4 \cdot 64BD$	F14
Ottoni et al. (2019)	$K_{sat} = 51 \cdot 1 \times (0 \cdot 582 - 0 \cdot 00216SI - 0 \cdot 00232CL - 0 \cdot 203BD)^{1.853}$	F15

† ϕ : به ترتیب هدایت هیدرولیکی اشباع (cm/hr)، درصد شن، درصد سیلت، درصد رس، چگالی ظاهری خاک (g/cm^3) و تخلخل کل (cm^3/cm^3).

توابع انتقالی گروه C

این گروه از PTF ها به مؤلفه های ورودی شامل توزیع اندازه ذرات، چگالی ظاهری و محتوای ماده آلی نیاز دارند. با این وجود فقدان اندازه گیری های ماده آلی در پایگاه های داده خاک، کاربرد توابع این گروه را محدود می کند. در این مطالعه هشت تابع از این گروه مورد بررسی قرار گرفتند (جدول ۳). (Julia et al. (2004 از ۲۱۷۸ نمونه خاک های اسپانیا در توسعه یک PTF برای پیش بینی K_{sat} بر حسب درصد شن، رس و مواد آلی استفاده نمودند. (Wosten et al. (1999 از نمونه خاک های اروپا در توسعه یک PTF برای پیش بینی K_{sat} بر حسب درصد رس، سیلت و مواد آلی و چگالی ظاهری استفاده کردند. سپس (Wosten et al. (2001 دو PTF برای خاک های هلند توسعه دادند؛ یک تابع K_{sat} را با استفاده از مقادیر سیلت، ماده آلی و چگالی ظاهری پیش بینی می کند، و تابع دیگر با استفاده از مقادیر رس و ماده آلی و چگالی ظاهری K_{sat} را پیش بینی می کند. (Vereecken et al. (1990 از نمونه خاک های بلژیک در توسعه یک PTF برای پیش بینی K_{sat} بر حسب مقادیر شن، رس و ماده آلی و چگالی ظاهری استفاده کردند. (Weynants et al. (2009 از همان مجموعه داده ها 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 خاک های شمالی 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 خاک های سیستان به عنوان بخشی از ایران مورد ارزیابی قرار می گیرد.

جدول ۳. توابع انتقالی گروه C (PTF هایی که به ورودی های توزیع اندازه ذرات، چگالی ظاهری و درصد ماده آلی نیاز دارند)

منبع	معادله (cm/hr) †	PTF
Julia et al. (2004)	$K_{sat} = 0.1(-4.994 + 0.56728SA - 0.131CL - 0.0127OM)$	F16
Wosten et al. (2001)	$K_{sat} = 0.04167Exp(45.8 - 14.24BD + 0.001481SI^2 - 27.5BD^{-1} - 0.891Ln(SI) - 0.34Ln(OM))$	F17
Wosten et al. (2001)	$K_{sat} = 0.04167Exp(-42.6 + 8.71OM + 61.9BD - 20.79BD^2 - 0.02107OM^2 - 0.0162CLOM - 5.382BDOM)$	F18
Vereecken et al. (1990)	$K_{sat} = 0.04167Exp(20.62 - 0.96LnCL - 0.66LnSA - 0.46LnOM - 8.43BD)$	F19
Weynants et al. (2009)	$K_{sat} = Exp(1.9582 + 0.0308SA - 0.6142BD - 0.01566OM)/24$	F20
Wosten et al. (1999)	$K_{sat} = 0.04167Exp(7.755 + 0.0352SI + 0.93 - 0.967BD^2 - 0.000484CL^2 - 0.000322SI^2 + 0.001SI^{-1} - 0.0748OM^{-1} - 0.643LnSI - 0.0139BDCL - 0.167BDOM + 0.0298CL - 0.03305SI)$	F21
Li et al. (2007)	$K_{sat} = 0.04167Exp(13.262 - 1.914LnSA - 0.974LnSI - 0.058CL - 1.709LnOM + 2.885OM - 8.026LnBD)$	F22
Zuo and He (2021)	$K_{sat} = Exp(1.101 - 1.516BD + 0.029SA + 0.284SOM - 0.533LnCL)$	F23

† K_{sat} : هدایت هیدرولیکی اشباع (cm/hr)، درصد شن، درصد سیلت، درصد رس، درصد ماده آلی، چگالی ظاهری خاک (g/cm³), SA : تخلخل کل (cm³/cm³), BD : رطوبت اشباع (cm³/cm³) و رطوبت در 33Kpa (cm³/cm³).

آنالیز آماری

بهترین توصیف برای مقادیر K_{sat} استفاده از توزیع های لگاریتمی نرمال است و معمولاً از تبدیل های لگاریتمی برای توسعه PTF ها استفاده می شود (Minasny and McBratney, 2000; Abdelbaki et al., 2009). 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., 2017; Ghanbarian et al., 2004). 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:

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

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

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

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

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

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 بیان‌کننده پراکندگی بیشتر مؤلفه‌ها و ضریب تغییرات پایین بیان‌کننده پراکندگی کمتر به‌ازای یک واحد از میانگین هر مؤلفه می‌باشد (Vinh-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 زودیافت 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

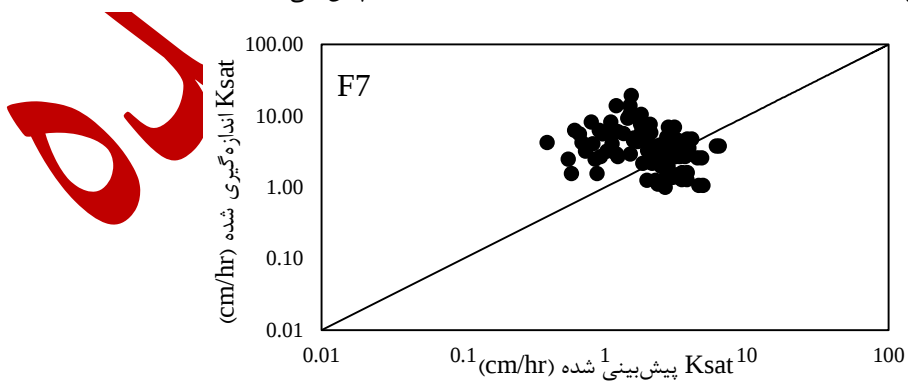
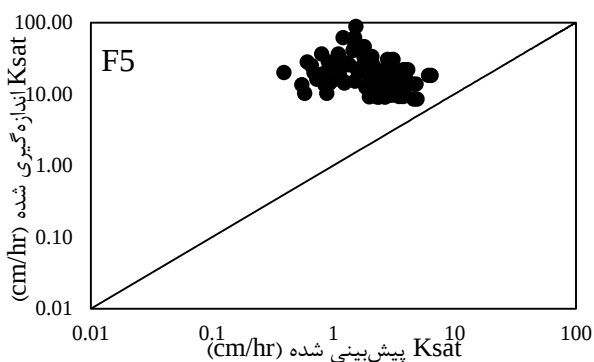
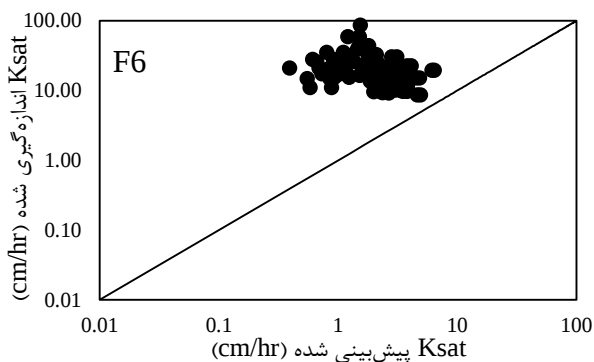
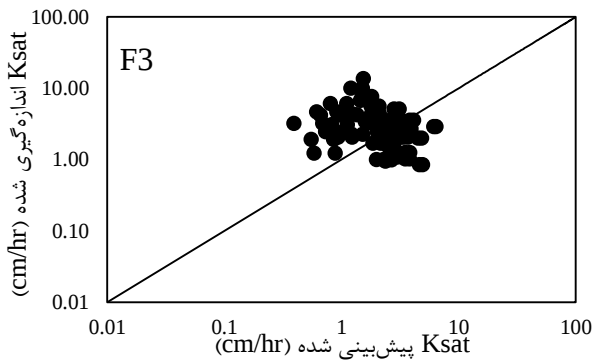
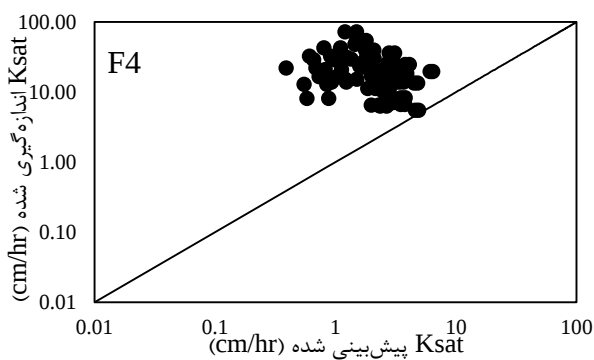
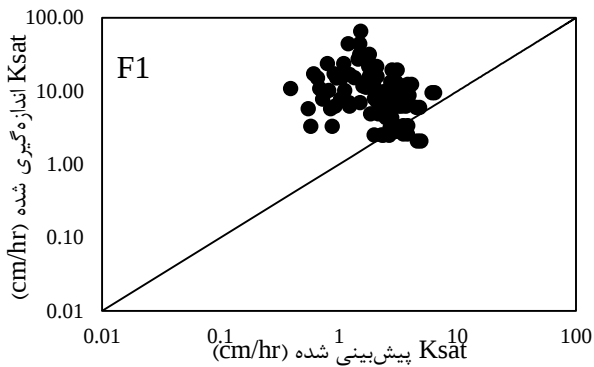
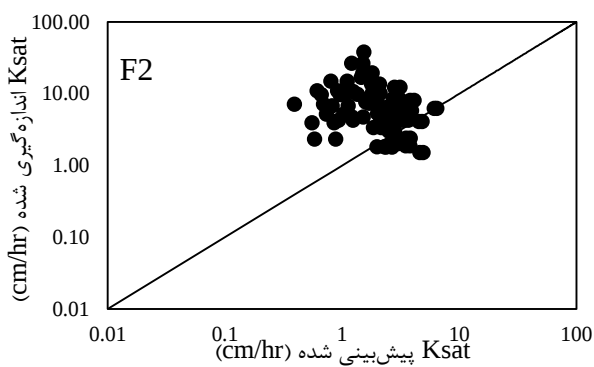
K_{sat} (cm/hr)	OM (%)	BD (gr/cm ³)	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	
۰/۳۰	۰/۳۳	۱/۳۵	۱۴	۲۷	۱۴	min
۶/۱۰	۳/۲۰	۱/۶۰	۵۷	۵۲	۵۶	max
۲/۳۰	۱/۴۰	۱/۴۵	۳۵	۳۴	۳۰	avg
۱/۵۰	۰/۷۴	۰/۱۱	۸/۶۰	۶/۰۲	۸/۱۲	SD
۴۹/۵۰	۴۵	۵/۴۹	۳۰/۵۱	۱۵/۹۶	۳۱/۴۰	CV
† OM, BD, CV, SD, avg, max, min: حداقل مقدار، حداکثر مقدار، میانگین، انحراف معیار، ضریب 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 Spsychalski 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 PTF های گروه A دارا می‌باشند. برای ارزیابی دقت PTF های 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 PTF های مختلف را مورد ارزیابی قرار داده و بیان کردند از میان توابعی که به ورودی تخریل 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.

جدول ۵. مقادیر شاخص‌های آماری برای توابع انتقالی گروه A

GSDER	GMER	ME	RMSE	PTF
۳/۵۷	۳/۶۸	۰/۵۶	۰/۷۸	F1
۲/۳۹	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



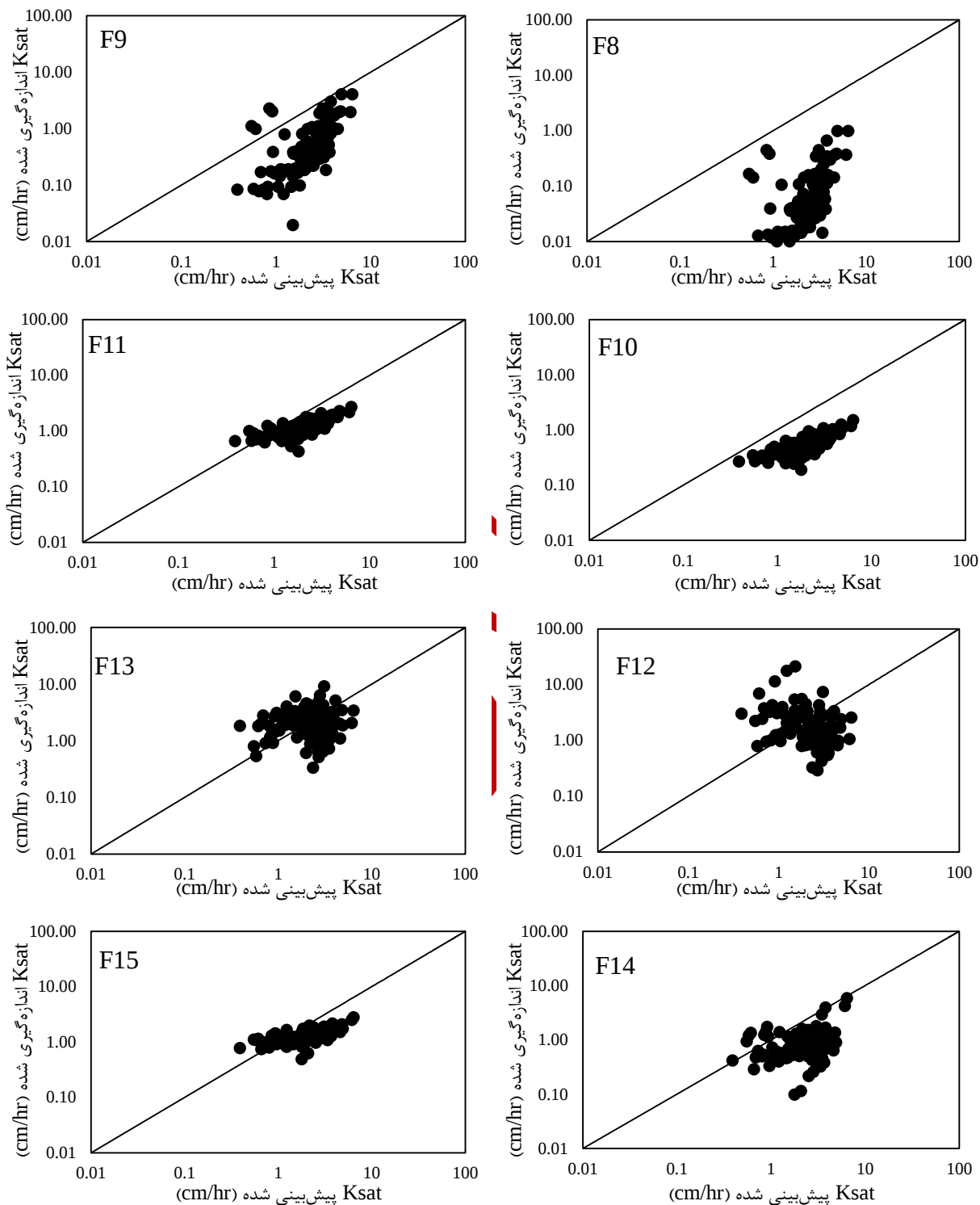
شکل ۲. مقادیر اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده K_{sat} (توابع انتقالی گروه A)

عملکرد توابع انتقالی گروه B

نتایج ارزیابی PTF های 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 می باشند. با این وجود می توان بیان کرد که تابع F11 (Cosby et al., 1984) با اختلاف اندکی، بیشترین نزدیکی را با مقادیر اندازه گیری شده دارد. تابع (F15) Ottoni et al. (2019) که از جدیدترین توابعی است که توسط پژوهشگران خاک در دنیا ارائه شده است در رتبه دوم قرار گرفت. عملکرد خوب این مدل را می توان به تعداد زیاد (۱۴۸۹ نمونه) مجموعه داده هایی که در توسعه مدل ها استفاده شده است، مرتبط دانست. توابع (F13) Saxton et al. (1986) و (F15) Brakensiek et al. (1984) 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، ضعیف ترین عملکرد را نشان داد. مقادیر بالای GSDER بیان کننده پراکندگی زیاد نقاط برای توابع مورد بررسی است (Minasny and McBratney, 2000). برای خاک های 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 می باشند. در پژوهشی زارع ایبانه و همکاران (۱۴۰۲) روش های 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 روش ها دارای دقت بیشتری می باشد. بهمنش و همکاران (۱۳۹۴) نیز بیان کردند که تابع (Cosby et al., 1984) با اینکه فقط از دو مؤلفه درصد شن و رس استفاده می کند اما تخمین دقیقی از K_{sat} را ارائه می نماید.

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

PTF	RMSE	ME	GMER	GSDER
F8	۱/۵۷	-۱/۴۹	۰/۰۳	۳/۱۳
F9	۰/۶۶	-۰/۵۷	۰/۲۶	۲/۱۶
F10	۰/۵۷	-۰/۵۵	۰/۲۷	۲/۳۸
F11	۰/۳۰	-۰/۰۱۴	۰/۹۵	۱/۹۲
F12	۰/۴۵	۰/۱۴	۱/۱۲	۲/۹۰
F13	۰/۳۳	۰/۰۱۸	۱/۱۰	۲/۰۷
F14	۰/۵۱	-۰/۳۹	۰/۴۰	۲/۱۷
F15	۰/۳۰	-۰/۰۱۵	۰/۹۲	۱/۹۷



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

عملکرد توابع انتقالی گروه C

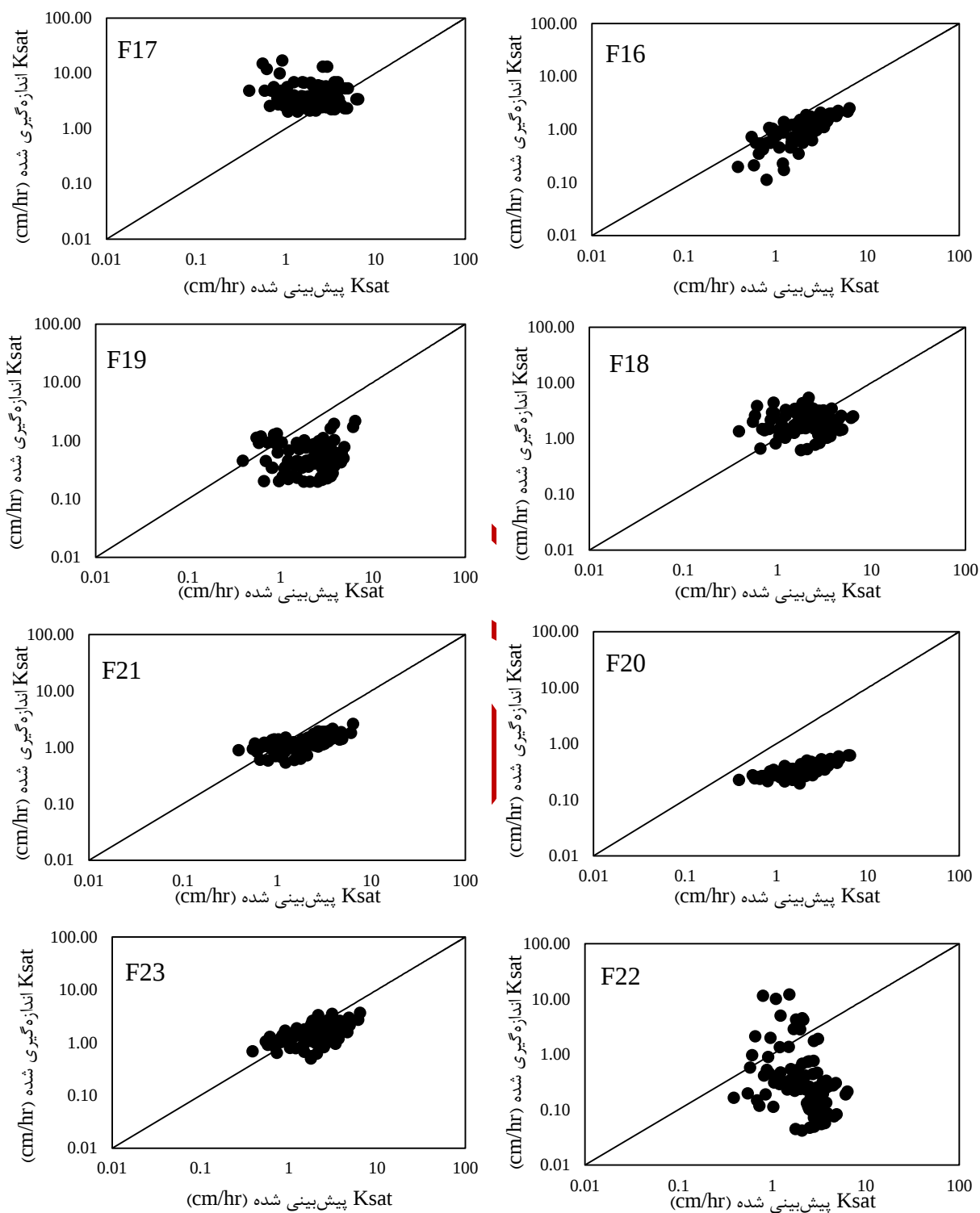
خلاصه ارزیابی PTF های گروه C در جدول ۷ و شکل ۴ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که توابع F23، F18 و F21 به ترتیب با GMER برابر ۰/۹۳، ۰/۹۲ و ۰/۶۰ و RMSE برابر ۰/۳، ۰/۳۲ و ۰/۳۵ بهترین عملکرد را در این گروه دارا می‌باشند. تابع (F23) Zuo and He (2021) که از جدیدترین توابعی است که در این گروه توسط محققین 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 (F22) Li et al. (2007) 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 PTF هایی 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 همخوانی 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	-۰/۳۱	۰/۶۰	۱/۸۳
F22	۱/۱۱	-۰/۸۴	۰/۱۲	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 یا بهترین عملکرد در زمانی بود که در دسترس بودن مؤلفه‌های ورودی عامل محدودکننده‌ای در انتخاب PTF ها 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، ۰/۱۰، 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



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

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 بیان‌کننده 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 PTF ها 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. (Abdelbaki et al. (2009 برای ۶۷۸ نمونه خاک ایالات متحده عملکرد PTF ها، با تعداد مؤلفه‌های ورودی مختلف را برای پیش‌بینی K_{sat} مورد ارزیابی قرار دادند؛ ایشان اظهار داشتند تعداد مؤلفه‌های ورودی PTF ها در عملکرد آنها مؤثر نیست. با وجود اینکه تاکنون PTF های 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 PTF ها 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.

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 تخلخل 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 تخلخل 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، PTF های 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 به اینکه در توسعه PTF ها به عواملی از جمله ساختمان خاک کمتر توجه شده است، لذا دقت PTF ها 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 PTF هایی را که به این ورودی‌ها نیاز دارند، انتخاب شوند. سپس PTF ها با بهترین عملکرد شناسایی و میانگین K_{sat} با استفاده از توابع منتخب محاسبه گردد.

سپاس‌گزاری

...

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- بهمنش، جواد، رضائی آباجلو، الناز، محمدنژاد، بایرامعلی، زینالزاده، کامران، حبیبزاده آذر، بهنام. (۱۳۹۴). ارزیابی توابع انتقالی در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (مطالعه موردی: دشت ارومیه). نشریه دانش آب و خاک، ۲۵(۲)، ۱-۱۲.
- چاری، محمدمهدی. (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، داورى، کامران. (۱۳۹۰). ارائه توابع انتقالی جهت پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌های گراولی با استفاده از رگرسیون حداقل مربعات جزئی. 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، ۵۴(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، ۱(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., Hopmans, J., 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.