

اشتقاق توابع انتقالی در خاک‌های رسی استان کردستان

الهام مطلبی (نویسنده مسئول)^{۱*} و فریبا یوسفی^۲

*۱- استادیار، دانشکده کشاورزی، واحد گرمسار، دانشگاه آزاد اسلامی، گرمسار، ایران، e27_motallebi@yahoo.com

۲- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، گروه بیماری‌شناسی گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد

اسلامی، گرمسار، ایران، yosefifariba@ymail.com

تاریخ پذیرش: تیر ۱۳۹۶

تاریخ دریافت: خرداد ۱۳۹۶

To derive PTFs in clay soils Kurdistan

Elham Moltallebi (Corresponding author)^{1} and Fariba Yosefi²*

1 - Assistant Professor, Agriculture college, Garmsar Branch, Islamic Azad University, Garmsar, Iran, e27_motallebi@yahoo.com*

2- MS.c graduated, Department of Plant Pathology, Agriculture and Natural resources college, Science and Research branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, yosefifariba@ymail.com

Received: June 2017

Accepted: July 2017

Abstract

The soil unsaturated zone plays a significant role in hydrological cycle. One of the most characteristics of this zone, is the soil water retention curve that its parameters is needed as input in most of studies for determining hydraulic specification of the soil. One of the indirect method is the Pedo-Transfer function which contains a complex of regression equations to relate easily obtainable soil properties to its missing soil characteristics. In most parts of the world including Iran clay soil are found very much. These kind of soil own a very good power of fertility but their hydraulic functions characters such as swelling and preferential flow cause to them have been studied less. The goal of this study, is to produce Pedo-Transfer functions of this soils by the using of easily obtainable soil properties. 25 soil samples with day texture from Kordestan were gathered randomly. The particle size distribution, bulk density, calcium carbonate percentage were determined. The soil water retention curves for the entire range of interest were obtained using the pressure plate apparatus. For the separation of PTFs, independent variables were divided in to two groups. The first group include the particle size distribution, bulk density and calcium carbonate percentage. In second group, geometric diameter, geometric standard deviation, bulk density and calcium carbonate percentage were settled. From the independent variables, the best subset for evaluating specific point of soil water retention curve were selected by the acid of regression method. For two groups, regression formulas were achieved as multiple linear form. Results show that there is a suitable attention for evaluating the relations for the assess mint of soil water retention curve of the soil for application goals.

Keywords: Kordestan clay soil, Pedo-Transfer function, Soil water retention curve.

فصلنامه زیست‌شناسی سلولی و مولکولی گیاهی

سال ۱۳۹۶، دوره ۱۲، شماره ۱، صص ۵-۱۰

چکیده

بخش غیراشباع خاک در چرخه آبی طبیعت نقشی بسیار مهم دارد. یکی از ویژگی‌های این بخش، منحنی رطوبتی خاک است که پارامترهای آن به عنوان ورودی در اغلب مطالعات مورد نیاز است. یکی از روش‌های غیرمستقیم تعیین منحنی رطوبتی استفاده از توابع انتقالی خاک می‌باشد که مشتمل بر مجموعه‌ای از معادلات رگرسیونی است که ویژگی‌های زودیافت خاک را به ویژگی‌های دی‌ریافت آن مرتبط می‌سازد. خاک‌های رسی در بسیاری از نقاط جهان و از جمله ایران به مقدار فراوان یافت می‌شوند، لیکن رفتار هیدرولیکی آنها به دلیل برخی خصوصیات منحصر به فرد همچون پدیده جریان ترجیحی و آماس کمتر مورد کنکاش قرار گرفته است. هدف از این پژوهش، ایجاد توابع انتقالی این خاک‌ها با استفاده از ویژگی‌های زودیافت خاک بود. به همین منظور، ۲۵ نمونه خاک با بافت رسی از استان کردستان بطور تصادفی جمع‌آوری گردید. فراوانی نسبی ذرات، جرم ویژه ظاهری، درصد کربنات کلسیم و منحنی رطوبتی در پتانسیل‌های ماتریک صفر، ۳۳-، ۱۰۰-، ۵۰۰- و ۱۵۰۰- کیلوپاسکال اندازه‌گیری شد. برای اشتقاق توابع انتقالی، متغیرهای مستقل به دو گروه تقسیم شدند. گروه نخست شامل فراوانی نسبی ذرات خاک، جرم ویژه ظاهری و درصد کربنات کلسیم بود. در گروه دوم، میانگین هندسی قطر ذرات، انحراف معیار هندسی قطر ذرات، جرم ویژه ظاهری و درصد کربنات کلسیم قرار گرفتند. از بین متغیرهای مستقل، مناسب‌ترین ترکیب برای برآورد نقاط معینی از منحنی رطوبتی با استفاده از روش رگرسیون با بهترین زیرمجموعه انتخاب و معادلات رگرسیونی برای دو گروه با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه بدست آمد. نتایج نشان داد که دقت برآورد معادله‌های بدست آمده برای تخمین منحنی رطوبتی خاک برای اهداف کاربردی مناسب می‌باشد.

کلمات کلیدی: توابع انتقالی خاک، خاک‌های رسی کردستان، منحنی رطوبتی خاک

فصلنامه زیست‌شناسی سلولی و مولکولی گیاهی

سال ۱۳۹۶، دوره ۱۲، شماره ۱، صص ۵-۱۰

مقدمه و کلیات

حرکت آب در خاک به دو صورت اشباع و غیراشباع صورت می‌گیرد. در منطقه ریشه، گیاه معمولاً در شرایط غیراشباع قرار دارد. این بخش افزون بر تأمین آب مورد نیاز گیاهان، اکسیژن و مواد غذایی را نیز تأمین کرده و از اینرو نقشی مهم بر رشد گیاهان دارد. ویژگی‌های هیدرولیکی این بخش، تعیین می‌کند که چه مقدار از آب سطحی به درون خاک نفوذ کرده و چه مقدار به رواناب تبدیل

می‌شود. بنابراین، فرآیندهای جریان غیراشباع بسیار مهم و در عین حال پیچیده بوده و برای درک و توصیف آنها باید ویژگی‌های آن به صورت کمی بیان شوند. منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی از مهم‌ترین ویژگی‌های هیدرولیکی بخش غیراشباع خاک می‌باشند. این ویژگی‌ها، رطوبت و هدایت هیدرولیکی خاک در پتانسیل‌های ماتریک مختلف را بیان کرده و ویژگی‌هایی همچون توزیع اندازه منافذ، تخلخل کل، زهکشی، تهویه و نفوذ سطحی را نیز نشان می‌دهند. اندازه‌گیری مستقیم این ویژگی‌ها مستلزم صرف وقت و هزینه زیادی بوده و نیازمند نمونه‌برداری‌هایی فراوان است. بنابراین، استفاده از روش‌های غیرمستقیم که ارزان، سریع و قابل دسترس باشند، امروزه مورد توجه قرار گرفته‌اند. توابع انتقالی (PTF) یکی از روش‌های غیرمستقیم می‌باشند که منحنی رطوبتی، هدایت هیدرولیکی و سایر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک که در اصطلاح ویژگی‌های دیرپافت نامیده می‌شوند و یا پارامترهای موجود در معادلات تجربی و نظری مربوط به آنها را به ویژگی‌هایی از خاک که اندازه‌گیری آنها آسان، سریع و کم‌هزینه بوده و در مطالعات خاکشناسی متداول هستند و به ویژگی‌های زودپافت موسومند،

ارتباط می‌دهند. با آنکه تا سال ۱۹۸۹ توابعی با این نام وجود نداشته، لیکن مفهوم توابع انتقالی از مدت‌ها پیش برای تعیین ویژگی‌هایی از خاک که اندازه‌گیری آنها دشوار است، مورد توجه بوده است. شاید نخستین پژوهش در این زمینه را بتوان به *Briggs* و *McLane* (۱۹۰۷) نسبت داد که نتایج آن بعداً توسط *Briggs* و *Shantz* (۱۹۱۲) اصلاح شد. در این پژوهش‌ها، ضریب پژمردگی به صورت تابعی از اندازه ذرات تعریف شده بود. از این سال به بعد ایجاد و استفاده از این توابع توسط پژوهشگران مختلف روی خاک‌های نواحی مختلف عمومیت یافت. توابع انتقالی براساس میزان اطلاعات قابل دسترسی به ۳ گروه توابع انتقالی کلاسی، توابع انتقالی پیوسته و شبکه‌های عصبی مصنوعی تقسیم می‌شوند. توابع انتقالی کلاسی با این فرض که خاک‌های مشابه ویژگی‌های هیدرولیکی یکسانی دارند، ویژگی‌های هیدرولیکی را برای بافت‌های مختلف خاک برآورد می‌کنند. هرچند که این نوع توابع انتقالی برای استفاده ساده می‌باشند، لیکن دقت آنها در مقایسه با سایر توابع انتقالی کمتر است. از این گروه می‌توان به توابعی که *Wosten* و همکاران (۲۰۰۱) ارائه دادند، اشاره نمود. توابع انتقالی پیوسته، معادلات رگرسیونی ساده خطی یا غیرخطی هستند که امکان برآورد پیوسته ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را با وارد کردن برخی خصوصیات خاک مانند توزیع اندازه ذرات، جرم ویژه ظاهری و درصد ماده آلی فراهم می‌کنند. دقت این توابع (خداوردیلو و همایی، ۱۳۸۱؛ قربانی و همایی، ۱۳۸۱؛ فرخیان فیروزی و همایی، ۱۳۸۲) بیشتر از توابع کلاسی بوده لیکن هزینه بیشتری برای ایجاد آنها مورد نیاز است. *Mayer* و *Jarvis* (۱۹۹۹) توابعی را برای برآورد پارامترهای معادله منحنی

توابع نقطه‌ای این است که نتایج آنها را بطور مستقیم می‌توان در مدل‌های شبیه‌ساز بکار برد. *Zhuang* و همکاران (2001) با ترکیب مفهوم محیط غیریکنواخت (*NSMC*) و مدل تک پارامتری بروکس و کوری مدلی جدید را برای برآورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع پیشنهاد کردند. آن‌ها با مقایسه مدل پیشنهادی خود با چهار نمونه تک پارامتری *Brooks* و *Corey* (1964)، *Mualem* (1976)، *Paulsen* و نمونه وان گنوختن - معلم دریافتند که هرچند هیچ کدام از این نمونه‌ها برآورد واقعاً بهتری برای همه کلاس‌های بافتی ندارند، لیکن این مدل‌ها برای خاک‌های شنی و لومی بسیار مناسب می‌باشند. همچنین آنها نتیجه گرفتند که جرم ویژه ظاهری و فراوانی نسبی ذرات برای برآورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع باید به عنوان پارامترهای ورودی وارد مدل‌ها گردند (*Homaee* و *Farrokhian Firouzi* 2003). بخش زیادی از خاک‌های کشور را خاک‌های رسی تشکیل می‌دهند. به دلیل وقوع فرآیندهایی همچون آماس، جریان ترجیحی و یا ناپایداری جبهه رطوبتی، ویژگی‌های هیدرولیکی این خاک‌ها کمتر مورد کنکاش قرار گرفته است. با توجه به اینکه بخش اعظم این خاک‌ها تحت کشت بوده و اغلب از باروری مناسبی نیز برخوردارند، لذا امکان تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی آنها به روش‌های غیرمستقیم به منظور استفاده مطلوب و پایدار از آنها، مورد توجه این پژوهش بوده است.

فرآیند پژوهش

تعداد ۲۵ نمونه خاک و ۲۵ نمونه کلوخه از سری خاک‌های رسی استان کردستان جمع‌آوری و مورد مطالعه قرار گرفت. نمونه‌برداری از عمق ۲۵ سانتی‌متری و به صورت تصادفی و مرکب انجام شد.

رطوبتی خاک در شکل تغییر یافته *Hutson-Gass* از معادله *Brooks* و (*Corey, 1964*) با استفاده از داده‌های بافت خاک، جرم ویژه ظاهری و درصد مواد آلی برای خاک‌های انگلیس پایه‌ریزی کردند. آن‌ها گزارش کردند که توابع ایجاد شده برای همه افق‌های آلی و یا خاک‌هایی که جرم ویژه ظاهری آنها کمتر از ۰/۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب باشد، کارآیی خوبی دارد. توابع انتقالی را بر اساس روش‌های برآورد نیز می‌توان به دو گروه توابع نقطه‌ای و پارامتریک تقسیم کرد. توابع انتقالی نقطه‌ای توابعی تجربی هستند که مقدار رطوبت در یک پتانسیل یا مقدار هدایت هیدرولیکی در یک رطوبت را برآورد می‌کنند. چون نتایج حاصل از این توابع متناظر با نقاط منحنی رطوبتی می‌باشد، به آنها توابع انتقالی نقطه‌ای می‌گویند. از مزایای این توابع آن است که برآورد درستی برای نقاطی مشخص از منحنی رطوبتی ارائه می‌دهند. همچنین، با استفاده از این توابع می‌توان مهم‌ترین ویژگی یا ویژگی‌هایی از خاک که در برآورد مقدار رطوبت در یک مکش معین نقش دارند را بدست آورد. کاستی مهم این توابع آن است که برای تعیین منحنی رطوبتی به تعداد زیادی معادله رگرسیونی نیاز است که به این دلیل استفاده از آنها در مدل‌های شبیه‌ساز دشوار است. در توابع انتقالی پارامتریک فرض بر این است که روابط بین مقدار رطوبت و پتانسیل ماتریک را می‌توان با استفاده از معادلات تجربی - نظری به گونه‌ای مناسب توضیح داد. با این توابع می‌توان پارامترهای مفروض منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی را به برخی از ویژگی‌های خاک ارتباط داده و با انتقال روابط بدست آمده به معادلات، مقادیر رطوبت (θ) یا هدایت آبی اشباع (K_s) را بدست آورد. مزیت این توابع نسبت به

برنامه MiniTab (Ryan and Joiner, 1994) مشخص گردید. پس از نرمال کردن توزیع داده‌ها، با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه به روش بهترین زیرمجموعه متغیرها گزینش و وارد مدل شدند. به منظور ایجاد توابع انتقالی، متغیرهای مستقل به دو گروه تقسیم شدند. گروه اول شامل فراوانی نسبی ذرات خاک (شن، سیلت و رس)، جرم ویژه ظاهری و درصد کربنات کلسیم (TNV) و گروه دوم شامل TNV، جرم ویژه ظاهری، میانگین هندسی ((dg) و انحراف معیار هندسی قطر ذرات ((σg) خاک بود. توابع انتقالی نقطه‌ای نوع اول: این نوع توابع با استفاده از فراوانی نسبی ذرات، درصد کربنات کلسیم و جرم ویژه ظاهری مقادیر رطوبت را در پتانسیل ماتریک معین برآورد می‌کنند. این توابع ایجاد شده در جدول ۱ ارائه شده‌اند. با توجه به این جدول، توابع بدست آمده در سطح ۱ درصد معنی دار بوده و ضریب تبیین تعدیل شده ((R²_{adj}) بیان‌کننده میزان تغییرات متغیر وابسته توسط متغیرهای مستقل است. در تمامی توابع بدست آمده، فراوانی نسبی رس و جرم ویژه ظاهری باعلامت مثبت وارد مدل شده‌اند که این خود نشان‌دهنده تأثیر مثبت این عوامل بر میزان رطوبت خاک می‌باشد. در این خاک‌ها BD که به نوعی نشان‌دهنده وضعیت ساختمان خاک است، تحت تأثیر رس قرار دارد. پس بطور کلی می‌توان نتیجه گرفت که در خاک‌های رسی، این مقدار رس است که به دلیل خصوصیات منحصر به فرد خود و بخصوص سطح ویژه بالایی که دارد نقش بسزایی در نگهداشت آب در خاک ایفا می‌کند. توابع انتقالی نقطه‌ای نوع دوم: این گروه از توابع، توابعی هستند که با استفاده از متغیرهای درصد کربنات کلسیم، جرم ویژه ظاهری، میانگین هندسی قطر و انحراف معیار هندسی قطر

توزیع اندازه ذرات به روش هیدرومتری، جرم ویژه ظاهری به روش کلوخه، درصد کربنات کلسیم به روش خشتی‌سازی با اسید و منحنی رطوبتی در پتانسیل‌های ماتریک صفر، ۳۳-، ۱۰۰-، ۳۰۰-، ۵۰۰-، ۱۵۰۰- کیلوپاسکال با استفاده از دستگاه صفحات فشاری اندازه‌گیری گردید. میانگین هندسی قطر ذرات ((dg) و انحراف معیار هندسی قطر ذرات ((σg) با استفاده از روابط پیشنهادی شیرازی و بورسما محاسبه شد (Shirazi و Boersma, 1984):

$$dg = \exp(a)$$

$$\sigma g = \exp(b)$$

که در آنها a و b از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$a = 0.01 \sum_{i=1}^n f_i \ln m_i$$

$$b^2 = 0.01 \sum_{i=1}^n f_i \ln^2 m_i - a^2$$

پارامترهای معادله منحنی رطوبتی Van Genuchten (1980) شامل a ، n و θ_r با فرض $m = 1 - \frac{1}{n}$ با استفاده از برنامه کامپیوتری RETC بدست آمدند.

نتایج و بحث

فراوانی نسبی ذرات خاک به روش هیدرومتری بدست آمد. دامنه تغییرات مقدار شن از ۳ تا ۳۶ درصد، سیلت ۲۱ تا ۵۹ درصد و رس از ۳۰ تا ۶۸ درصد بود. مقدار آهک نمونه‌های خاک نیز از ۴/۲ تا ۵۷/۸ درصد و جرم ویژه ظاهری از ۱/۰ تا ۱/۵۴ گرم بر سانتی‌مترمکعب در نوسان بود. میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات نمونه‌های خاک به ترتیب از ۰/۰۳۷ تا ۰/۳۰۷ میلی‌متر و ۶/۲۴ تا ۲۱/۵۲ متغیر بوده است. به منظور پردازش داده‌ها، نخست نرمال بودن داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. وجود یا عدم وجود همراستایی چندگانه با استفاده از

مقایسه توابع انتقالی نقطه‌ای نوع اول و دوم نشان‌دهنده این است که در خاک‌های سنگین بافت استفاده از میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات برتری قابل توجهی بر استفاده از فراوانی نسبی ذرات ندارد. چون در هر دو حالت، این مقدار و نوع رس است که کنترل‌کننده میزان رطوبت می‌باشد. همبستگی بین مقادیر رطوبتی اندازه‌گیری و برآورد شده با استفاده از این توابع در شکل‌های ۱ و ۲ نمایش داده شده است.

ذرات خاک، نقاطی معین از منحنی رطوبتی را برآورد می‌کنند. توابع انتقالی نقطه‌ای نوع دوم که در این پژوهش بدست آمده‌اند در جدول ۲ ارائه شده‌اند. در تمامی توابع بدست آمده، فراوانی نسبی رس و جرم ویژه ظاهری باعلامت مثبت وارد مدل شده‌اند که این خود نشان‌دهنده این است که در خاک‌های رسی، این مقدار رس است که به دلیل خصوصیات منحصر به فرد خود و بخصوص سطح ویژه بالایی که دارد نقش بسزایی در نگهداشت آب در خاک ایفا می‌کند.

جدول ۱: توابع انتقالی ایجاد شده نقطه‌ای نوع اول

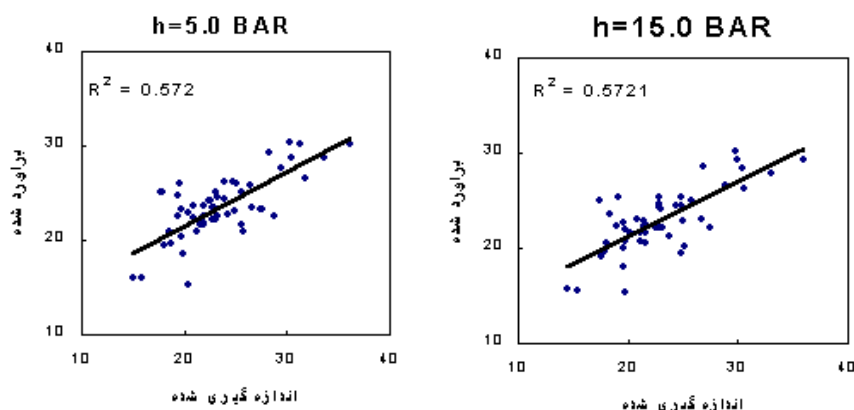
Table 1: First-generation point-generated transition functions

شماره تابع	متغیرهای وابسته	توابع انتقالی نقطه‌ای نوع اول	R^2_{adj}
۱	$s \theta$	$-19/7 + 0/532clay + 40/6BD$	۰/۷۳۱
۲	$33 \text{ kPa } \theta$	$-5/64 + 0/0775clay + 5/36BD - 0/383TNV^*$	۰/۶۹۰
۳	$100 \text{ kPa } \theta$	$0/861 + 0/0572clay + 0/330BD - 0/0598Sand^*$	۰/۶۹۲
۴	$300^* \text{ kPa } \theta$	$0/786 + 0/0916clay + 0/261BD - 0/0446TNV^*$	۰/۷۳۱
۵	$500 \text{ kPa } \theta$	$-13/4 + 0/454clay + 12/5BD$	۰/۷۴۵
۶	$1500 \text{ kPa } \theta$	$-7/1 + 0/426clay + 8/33BD$	۰/۷۳۸

جدول ۲: توابع انتقالی ایجاد شده نقطه‌ای نوع دوم

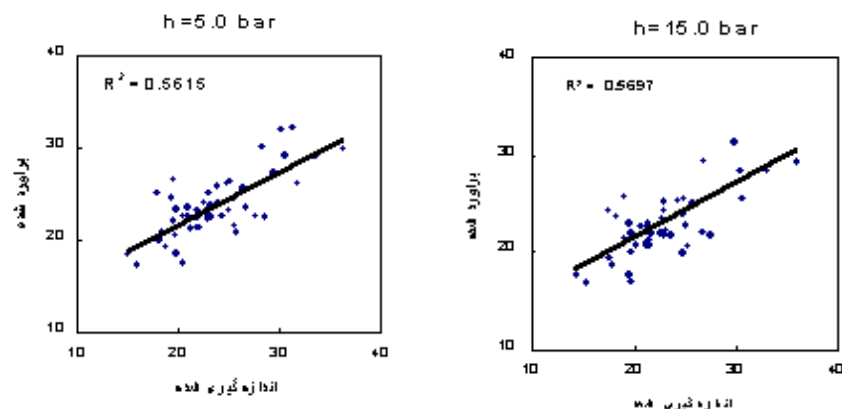
Table 2: Second-generation point-generated transition functions

شماره تابع	متغیرهای وابسته	توابع انتقالی نقطه‌ای نوع دوم	R^2_{adj}
۱	$s \theta$	$6/81 - 16/3dg^* + 11/6BD$	۰/۴۵۶
۲	$33 \text{ kPa } \theta$	$-70/0 - 30/8dg^* + 12/9^* \sigma g - 4/99TNV^* + 31/0BD$	۰/۵۳۶
۳	$100 \text{ kPa } \theta$	$-52/3 - 26/1dg^* + 12/0^* \sigma g - 4/15TNV^* + 18/4BD$	۰/۵۱۷
۴	$300^* \text{ kPa } \theta$	$-0/053 - 0/439dg^* + 0/218^* \sigma g - 0/0688TNV^* + 0/342BD$	۰/۵۲۰
۵	$500 \text{ kPa } \theta$	$-60/0 - 24/0dg^* + 15/7^* \sigma g - 2/30TNV^* + 16/3BD$	۰/۵۳۴
۶	$1500 \text{ kPa } \theta$	$-57/9 - 22/3^* \sigma g - 14/1TNV^* + 16/7BD$	۰/۵۲۴



شکل ۱: همبستگی بین مقادیر رطوبتی اندازه‌گیری شده و برآورد شده با استفاده از توابع نقطه‌ای نوع دوم

Fig 1: Correlation between measured moisture content and Estimated using second-order point functions



شکل ۲: همبستگی بین مقادیر رطوبتی اندازه گیری شده و برآورد شده با استفاده از توابع نقطه‌ای نوع اول

Fig 2: Correlation between measured moisture content and Estimated using first-order point functions

Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12 (3): 513-522.

Ryan, B. F. and B. L. Joiner. 1994. *MiniTab Handbook*. Durbuy press. 483 pp.

Shirazi, M. A. and L. Boersma. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 142-147.

Van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.

Van Genuchten, M. Th. F. J. Leij. and S. R. Yates. 1991. *The RETC code for quantifying the hydraulic function of unsaturated soils*. EPA/600/2-91/065, US salinity laboratory, USDA-ARS, Riverside, CA. 85 pp.

Wosten, J. H. M., Ya. A. Pachepsky and W. J. Rawls. 2001. *Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics*. *J. Hydrol.* 251: 123-150.

15. Zhuang, J., K. Nakayama, G. R. Yu and T. Miyazaki. 2001. Predicting unsaturated hydraulic conductivity of soil based on some basic soil properties. *Soil and tillage. Res.* 59.

منابع

خداوردیلو، ح. همایی، م. و ش. محمودی. ۱۳۸۱. تأثیر کربنات کلسیم بر منحنی رطوبتی خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک. *مجله علوم کشاورزی*. شماره ۱. ص ۷۷-۸۸.

فرخیان فیروزی، ا و همایی، م. ۱۳۸۱. اشتقاق توابع انتقالی خاک‌های گچی به منظور برآورد نقطه‌ای منحنی رطوبتی. *مجموعه مقالات هشتمین کنگره علوم خاک ایران*.

قربانی، ش و همایی، م. ۱۳۸۱. برآورد پارامتریک ویژگی‌های هیدرولیکی خاک‌های گچی با استفاده از توابع انتقالی. *مجموعه مقالات هشتمین کنگره علوم خاک ایران*.

Briggs, L. J. and H. L. Shantz. 1912. The wilting coefficient and its indirect measurement. *Botanical Gazette* 53: 20-37.

Briggs, L. J. and J. W. Mc Lane. 1907. *The moisture equivalent of soils*, USDA bureau of soil bulletin 45: 1-23.

Brooks, R. H. and A. Corey. 1964. *Hydraulic properties of porous media*. Hydrology paper no. 3 Colorado state. Univ. Fort Collins, Co.

Homaee, M. and A. Farrokhian Firouzi. 2003. Derivation of hydraulic functions of gypsiferous soils. *J. Exp. Botany.* 54: i 61.

Mayer, T. and N. J. Jarvis. 1999. *Pedotransfer functions to estimate soil water retention parameters for modified Brooks-Corey type model*. *Geoderma.* 91: 1-90.