



Print ISSN: 2251-7480
Online ISSN: 2251-7400

Journal of
Water and Soil
Resources Conservation
(WSRCJ)

Web site:

<https://wsrcj.srbiau.ac.ir>

Email:

iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

Vol. 14
No. 1 (53)

Received:
2023-12-08

Accepted:
2024-04-24

Pages: 17-28

Assessment of Different Rosetta Software Levels on Some Soil Hydraulic Properties Estimation

Parisa Mashayekhi^{1*} and Mohsen Dehghani²

1) Assistant professor of Soil and Water Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Isfahan, Iran

2) Assistant professor of Soil and Water Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Isfahan, Iran

*Corresponding author emails: mashayekhi_enj@yahoo.com

Abstract:

Background and Aim: Field capacity (FC) and permanent wilting point of the plant (PWP) are the most important points in the moisture characteristic curve. These parameters are very important for managing, planning and designing different irrigation systems and different agricultural management. The traditional methods to determine these properties are difficult and time-consuming. Pedotransfer functions (PTFs) have been widely used to predict soil hydraulic parameters in favor of expensive laboratory or field measurements. Rosetta is one of many PTFs and is based on artificial neural network (ANN) analysis which allows the estimation of van Genuchten water retention parameters and their uncertainties. This research was conducted with the aim of investigating the effect of different input levels of ROSETTA software in estimating FC and PWP.

Method: To conduct the present research, the data related to the physical characteristics of about 280 soil samples from different parts of Isfahan province were used. The studied soils classified into 8 textural classes including clay loam, silty clay loam, sandy loam, loam, clay, silty loam, sandy loam and sandy clay loam. In order to estimate the parameters of the van Genuchten equation three levels of the ROSETTA's inputs including 1) the use of textural class (TC), 2) the percentage of sand, clay and silt particles (SSC) and 3) the percentage of sand and clay particles and silt plus bulk density (SSC+BD) were used. They were calculated by ROSETTA, through the van Gnochten equation and compared with the values measured in the laboratory using pressure plates. Accuracy and reliability of the estimated parameters were evaluated by, modified efficiency coefficient (E'), modified agreement index (d'), the mean and the standard deviation of the root of mean squared differences (RMSD), Normalized root of mean squared differences (NRMSD) and mean bias error (MBE).

Results: The results showed that in heavy textural soils such as clay (C), silty clay (SiC) and silty clay loam (SiCL), the first scenario (TC) is more accurate than the other two scenarios and FC values estimated with less error. On the other hand, in the loamy sand (LS) and sandy loam (SL) textures, the third scenario (SSC+BD) had the most accuracy in estimating the parameters of the van Genuchten model. Regarding the rest of the soil textures, the second scenario (SSC) had the highest accuracy in FC estimation. In terms of the correlation coefficient values between the measured and estimated FC values, respectively, the second scenario (SSC) ($R^2=0.5282$), the first scenario (TC) ($R^2=0.3992$) and the third scenario (SSC+BD) ($R^2=0.4116$) were placed. Unlike FC, the PWP values estimated in different scenarios did not show a clear dependence on the texture, but the highest correlation coefficient between the measured and estimated PWP values by ROSETTA software was observed in the second scenario (SSC), ($R^2=0.5185$), followed by the third scenario (SSC+BD) ($R^2=0.4930$) and the first scenario (TC) ($R^2=0.476$).

Conclusion: In general, in the most of the studied soils, using the percentage of sand, clay and silt particles (SSC), as ROSETTA's input, had the lowest amount of error in the estimation of the parameters of the van Genuchten equation. Therefore, the estimated FC and PWP using second scenario (SSC) had acceptable accuracy compared to their measured values.

Keywords: Field capacity, Modeling, Permanent wilting point, ROSETTA



ارزیابی سطوح مختلف ورودی نرم افزار Rosetta در برآورد برخی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک

پریرسا مشایخی*^۱ و محسن دهقانی^۲

(۱) استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان ایران.

(۲) استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان ایران

*ایمیل نویسنده مسئول: mashayekhi_enj@yahoo.com

چکیده:

مقدمه و هدف پژوهش: ظرفیت مزرعه (FC) و نقطه پژمردگی دائم گیاه (PWP) از جمله مهمترین نقاط در منحنی مشخصه رطوبتی خاک هستند. این پارامترها از اهمیت زیادی در مدیریت، برنامه ریزی و طراحی سیستم های مختلف آبیاری و مدیریت کشاورزی برخوردار می‌باشند. روش های مستقیم اندازه‌گیری این پارامترها بسیار دشوار و زمان بر است. توابع انتقال پدو (PTF) به طور گسترده ای برای پیش بینی پارامترهای هیدرولیکی خاک به نفع اندازه گیری های آزمایشگاهی یا میدانی گران قیمت استفاده شده اند. Rosetta یکی از انواع توابع انتقالی بر اساس شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) است که امکان تخمین پارامترهای هیدرولیکی معادله ون‌گن‌اختن و عدم قطعیت آنها را فراهم می‌کند. از آنجا که این نرم‌افزار در بسیاری از نرم‌افزارهای متداول بررسی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک از جمله هایدروس، دیسک و ... برای برآورد اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرد، این تحقیق با هدف بررسی میزان دقت سطوح مختلف ورودی نرم افزار ROSETTA در تخمین FC و PWP انجام شد.

روش پژوهش: برای انجام پژوهش حاضر از داده‌های مربوط به ویژگی‌های فیزیکی حدود ۲۸۰ نمونه خاک از مناطق مختلف استان اصفهان استفاده شد. خاک های مورد مطالعه در ۹ کلاس بافتی شامل لوم رسی، لوم رسی سیلتی، رس سیلتی، لوم شنی، لوم، رسی، لوم سیلتی، لوم شنی و لوم رسی شنی طبقه بندی شدند. به منظور تخمین پارامترهای معادله ون گنوختن سه سطح از ورودی نرم‌افزار Rosetta شامل (۱) استفاده از کلاس بافتی (TC)، (۲) درصد ذرات شن، رس و سیلت (SSC) و (۳) درصد شن و رس و سیلت به علاوه چگالی ظاهری خاک (SSC+BD) استفاده شد. مقادیر FC و PWP با استفاده از پارامترهای هیدرولیکی تخمین زده شده توسط ROSETTA، از طریق معادله ون گنوختن محاسبه و با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه به کمک دستگاه صفحات فشاری، مقایسه شدند. برای ارزیابی آماری میزان دقت پارامترهای برآورد شده از شاخص‌های آماری متفاوتی مانند جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) خطای بایاس میانگین (MBE)، ضریب کارایی اصلاح شده (E') و شاخص مطابقت اصلاح شده (d') استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که در خاک‌های با بافت ریز مانند رس (C)، رس سیلتی (SiC) و لوم رسی سیلتی (SiCL)، سطح اول ورودی‌ها (TC) دقیق‌تر از دو سناریو دیگر بود و مقادیر FC با خطای کمتری برآورد شد. به نظر می‌رسد وجود مقادیر بالای درصد رس در این بافت خاک سبب ایجاد خطا در اندازه‌گیری درصد ذرات رس، سیلت و شن می‌شود؛ به‌گونه‌ای که در این بافت‌ها استفاده از کلاس بافتی از دقت بالاتری نسبت به استفاده از درصد ذرات تشکیل‌دهنده بافت خاک (سناریو دوم) در برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک برخوردار بوده است. از سوی دیگر، در بافت‌های درشت شن لومی (LS) و لوم شنی (SL)، سطح سوم (SSC+BD) بیشترین دقت را در تخمین پارامترهای مدل ون‌گنوختن داشت. در مورد بقیه بافت‌های خاک، سطح دوم (SSC) بیشترین دقت را در برآورد FC داشت. از نظر مقادیر ضرایب همبستگی بین مقادیر FC اندازه‌گیری شده و برآورد شده، به ترتیب، سناریو دوم (SSC) ($R^2=0.4927$)، سناریو اول (TC) ($R^2=0.3992$) و سناریو سوم (SSC+BD) ($R^2=0.3715$) قرار گرفتند. بر خلاف $FC(vv^{-1})$ ، مقادیر $PWP(vv^{-1})$ برآورد شده توسط نرم‌افزار در سناریوهای مختلف مورد مطالعه در بافت‌های مختلف از روند مشخصی تبعیت نکرد، اما در اکثر بافت‌های خاک مورد مطالعه، بیشترین ضریب همبستگی بین مقادیر PWP اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط نرم‌افزار ROSETTA در سناریو دوم (SSC) مشاهده شد ($R^2=0.4758$) و به دنبال آن سناریو سوم (SSC+BD) ($R^2=0.4458$) و سطح اول (TC) ($R^2=0.4382$) قرار گرفتند.

نتایج: به طور کلی در اکثر خاک های مورد مطالعه استفاده از سناریو دوم یعنی درصد ذرات ماسه، رس و سیلت (SSC) به عنوان ورودی کمترین میزان خطا را در تخمین پارامترهای معادله ون‌گنوختن داشت. بنابراین، $FC(vv^{-1})$ و $PWP(vv^{-1})$ برآورد شده با استفاده از سناریو دوم (SSC) در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده‌شان از دقت قابل قبولی برخوردار بودند.

کلید واژه‌ها: ظرفیت زراعی، مدل‌سازی، نقطه پژمردگی دائم، ROSETTA

مقدمه

آگاهی از ویژگی‌های هیدرولیکی خاک به دلیل تاثیر بر حرکت آب در خاک، برای پیش‌بینی حرکت آب و املاح در خاک، حل مسائل مختلف آبیاری و زهکشی، تعیین نیاز آبی گیاهان، مقدار آب موجود در خاک، کنترل شوری و مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری بسیار ضروری است (Alletto et al., 2015). بیان کمی رطوبت و هدایت آبی خاک برای مطالعه و مدل‌سازی حرکت آب و املاح در خاک بسیار مهم است. دقت در برآورد و مدل‌سازی جریان آب و املاح در خاک به دقت در برآورد ویژگی‌ها و پارامترهای هیدرولیکی خاک بستگی دارد (Zhang et al., 2016). ظرفیت زراعی (FC) و نقطه پژمردگی دائمی (PWP) متغیرهای ورودی مهمی در طیف گسترده‌ای از مدل‌های زراعی- هیدرولوژیکی هستند؛ بنابراین تخمین دقیق آنها از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است (Qiao et al., 2018). امروزه روش‌های آزمایشگاهی مختلفی برای اندازه‌گیری مستقیم این پارامترها وجود دارد. با این وجود، پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهد که به دلیل تغییرپذیری مکانی و زمانی زیاد این ویژگی‌ها، ناهمگون بودن خاک و ماهیت غیر خطی منحنی مشخصه رطوبتی و نیز هدایت هیدرولیکی، اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در مقیاس آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های کوچک خاک، به هیچ عنوان قادر به توصیف دقیق جریان‌ات و فرآیندهای نقل و انتقالات در مقیاس‌های بزرگتر مکانی در خاک نخواهند بود (Lai and Ren, 2016; Zhang and Schaap, 2017; Asgarzadeh et al., 2014). در بسیاری از موارد برای انجام اندازه‌گیری‌ها به روش مستقیم نیاز به ایجاد یک شرایط مرزی و اولیه مشخص است که پیاده‌سازی آن به ویژه در مقیاس مزرعه دشوار است و شرایط جریان نیز می‌بایست در طول آزمایش پایدار باشد (Abd Rashid et al., 2015)؛ بنابراین دلایلی که گفته شد، پژوهشگران برای برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، به سمت روش‌های غیرمستقیم روی آوردند. از جمله این روش‌ها می‌توان به استفاده از توابع انتقالی (PTFs) رگرسیونی خطی و غیرخطی (Dobarco et al., 2019; Gunarathna et al., 2019; Rastgou et al., 2020)، شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs) (Charles and Oluwapelumi, 2021; Trejo-Alonso et al., 2021) و روش حل معکوس (Šimůnek et al., 2012) اشاره کرد.

توابع انتقالی خاک (PTFs) و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) بین پارامترهای دیرپافت خاک مانند منحنی مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی و پارامترهای زودپافت خاک مانند بافت، چگالی ظاهری و مقدار ماده آلی که اندازه‌گیری آنها آسان، سریع و کم‌هزینه است و در پژوهش‌های خاکشناسی متداول‌اند، ارتباط برقرار می‌کنند (Rastgou et al., 2020). از

کاستی‌های توابع انتقالی در تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، تعیین مقدار عددی هر یک از پارامترها است که از طریق بهترین برازش معادلات رگرسیونی بر داده‌های آزمایشگاهی به دست می‌آید. از آنجا که مقادیر این پارامترها برای هر سری از داده‌ها تغییر می‌کند، این معادلات برای هر سری از داده‌های جدید نیازمند برازش دوباره و نیز تعیین مقادیر جدید برای پارامترها است. ضمن آن که تحقق شرایط اعتبار رگرسیون گیری مانند نرمال بودن توزیع خطاها حول میانگین نیز از دیگر محدودیت‌های کاربرد این توابع است. افزون بر این، تخمین پارامترها در مجموعه‌های کوچک داده‌های تجربی با تعداد محدود نمونه خاک توأم با خطا می‌باشد. از آنجا که توابع انتقالی خاک روابطی تجربی هستند، به منظور استفاده عملی از آنها در سایر مناطق لازم است دقت و کارایی آنها در برابر داده‌ها و پایگاه‌های اطلاعاتی خاک‌های مختلف ارزیابی و راست‌آزمایی شود (Babaeian et al., 2013). بیشتر پژوهش‌های انجام شده، ANNs را توانمندتر از روش‌های رگرسیونی دانسته‌اند؛ با این وجود این مدل‌های پیش‌بینی‌کننده‌های ناپایداری بوده و تغییرات اندک در داده‌های آموزش، ممکن است مدل‌های بسیار متفاوتی ایجاد کند که نهایتاً نتایج متفاوتی در عملکرد مدل در پیش‌بینی به وجود خواهد آمد. همچنین برخلاف روش‌های رگرسیونی، ANNs توابع (روابط) فرم بسته و کاربر پسندی برای بررسی روابط علت و معلولی بین ورودی‌ها و خروجی‌ها ارائه نمی‌دهند (Trejo-Alonso, 2021). به طور کلی، همه پژوهشگران به این نتیجه رسیده‌اند که معمولاً وقتی تعداد پارامترهای ورودی به بیش از سه پارامتر می‌رسد توابع انتقالی مبتنی بر شبکه عصبی بهتر از مدل‌های رگرسیونی عمل می‌کنند (Trejo-Alonso, 2021). برنامه Rosetta به عنوان پرکاربردترین توابع انتقالی برای تخمین سلسله مراتبی ضرایب منحنی رطوبتی بر مبنای شبکه‌های عصبی مصنوعی ارائه شده است (Schaap et al., 2001).

نرم‌افزار Rosetta با ماهیت شبکه عصبی مصنوعی می‌تواند ویژگی‌های هیدرولیکی خاک مانند پارامترهای مدل منحنی مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی خاک را با دقت قابل قبولی برآورد کند (Schaap and van Genuchten, 2001). به همین دلیل در بیشتر پژوهش‌هایی که در آنها نیاز به تخمین اولیه پارامترهای هیدرولیکی است، از بسته نرم‌افزاری Rosetta برای این منظور استفاده شده است (Nakhaei and Šimůnek, 2014).

گفته می‌شود اگر چه Rosetta هنگام آزمایش بر روی مجموعه داده‌های بزرگ لزوماً بهتر از سایر توابع انتقالی نیست (Schaap et al., 2004 و Vereecken et al., 2010)؛ اما تا حدود زیادی در زمینه هیدرولوژی منطقه ریشه که در آن از

هیدرولیکی خاک وجود دارد. با توجه به بررسی منابع انجام شده، تا کنون بررسی‌های نسبتاً محدودی در رابطه با مقایسه بین استفاده از سطوح مختلف نرم‌افزار Rosetta در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک انجام گرفته است که نتایج متفاوتی را در بر داشته است. از سوی دیگر در پژوهش‌های انجام شده مشخصاً بر روی میزان دقت پارامترهای هیدرولیکی برآوردشده در تخمین نقاط FC و PWP در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری‌شده این پارامترها در آزمایشگاه با استفاده از دستگاه صفحات فشاری، مطالعه‌ای انجام نگرفته است. بنابراین در این پژوهش به بررسی اثر سطوح مختلف ورودی نرم افزار Rosetta در تخمین مقادیر FC و PWP در بافت‌های مختلف خاک پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

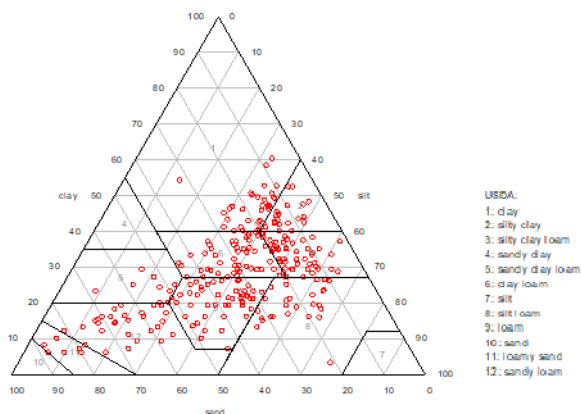
برای انجام پژوهش حاضر، از داده‌های مربوط به ویژگی‌های فیزیکی حدود ۲۸۰ نمونه خاک مربوط به نقاط مختلف استان اصفهان استفاده شد. استان اصفهان با مساحتی حدود ۱۰۶۷۸۶ کیلومترمربع بین ۳۰ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی و ۴۹ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۳۱ دقیقه طول شرقی، واقع شده است. استان اصفهان دارای متوسط ارتفاع معادل ۱۵۰۰ متر از سطح دریا و میانگین بارش سالانه در حدود ۱۳۰ میلیمتر است که امروزه مسائل آب در آن منطقه را در رأس مسائل قرار داده است. نمونه‌های خاک به صورت پراکنده از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری اراضی مختلف برداشت شد. رژیم حرارتی در اغلب نقاط استان Thermic و رژیم رطوبتی Xeric و Mesic می‌باشد. انواع فیزیوگرافی مناطق مورد مطالعه شامل فلات‌ها و تراس‌های قدیمی، دشت‌های دامنه‌ای، دشت آبرفتی و دشت سیلابی بود که عمدتاً بر اساس سیستم رده بندی خاک (Soil Taxonomy) در رده-های Haplic Calcisols و Haplic Gypsisols قرار داشتند (Fathi & Tehrani, 2017). این خاک‌ها از لحاظ درصد موادالی (۰/۰۵ تا ۲/۱ درصد)، شوری (۰/۷۹ تا ۹/۵۱ دسی-زیمنس بر متر) و درصد آهک (۲ تا ۵۴ درصد) در دامنه نسبتاً وسیعی قرار داشتند.

برای انجام این پژوهش ویژگی‌های فیزیکی شامل بافت، چگالی ظاهری و مقادیر FC و PWP مورد استفاده قرار گرفتند. بافت خاک به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1962)، چگالی ظاهری به روش نمونه‌برداری با سیلندر با ارتفاع ۴ و قطر ۳/۵ سانتی‌متر (Blake & Hartge, 1986)، FC و PWP با استفاده از دستگاه صفحات فشاری در مکش‌های ۳۳۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی متر (Klute, 1986) بود.

یک رویکرد سلسله مراتبی برای برآورد پارامترهای نگهداشت آب در خاک در معادله ون گنوختن، هدایت هیدرولیکی اشباع (Ks) و هدایت هیدرولیکی غیراشباع استفاده می‌شود، منحصر به فرد است؛ به ویژه این که Rosetta می‌تواند عدم قطعیت پارامترهای تک متغیره را از برآوردهای خود ارائه دهد (Zhang and Schaap, 2017). در بررسی انجام شده توسط مشایخی و همکاران (۲۰۱۶)، میزان رطوبت حجمی برآورد شده توسط Rosetta از دقت بالاتری نسبت به میزان رطوبت حجمی برآورد شده به کمک توابع انتقالی برخوردار بود.

در نرم‌افزار Rosetta برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک از پنج گروه داده‌های ورودی مختلف می‌توان استفاده کرد. این پنج گروه شامل ۱- کلاس بافتی خاک، ۲- درصد ذرات تشکیل دهنده خاک (بافت خاک) ۳- بافت خاک همراه با چگالی ظاهری خاک، ۴- بافت، چگالی ظاهری و میزان رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی خاک (FC)، ۵- بافت، چگالی ظاهری، میزان رطوبت در نقطه پژمردگی گیاه (PWP)، سالاها^۱ و همکاران (۲۰۲۳) در برآورد معکوس میزان رطوبت در خاک با استفاده از نرم‌افزار HYDRS-1D گزارش نمودند که هر چه تعداد متغیرهای ورودی بیشتری مورد استفاده قرار بگیرد، پارامترهای هیدرولیکی برآوردشده توسط نرم‌افزار Rosetta از دقت بالاتری در برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی برخوردار خواهد بود. در پژوهش انجام گرفته توسط ابراهیمی و رئوف (۲۰۰۷) استفاده از بین سطوح مختلف ورودی در Rosetta، سطح ورودی بافت بعلاوه چگالی ظاهری بیشترین دقت در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک را داشت. نتایج پژوهش انجام گرفته توسط گوپتا و گراگ^۲ (۲۰۱۵) نشان داد که سطح دوم مدل Rosetta (استفاده از توزیع اندازه ذرات خاک) نسبت به سایر سطوح تعریف شده در مدل Rosetta، با دقت بالاتری ویژگی‌های هیدرولیکی خاک منطقه مورد مطالعه را برآورد نموده است. این پژوهشگران معتقد بودند که استفاده از متغیر چگالی ظاهری به عنوان ورودی در سطوح ۳ تا ۵ سبب کاهش دقت در تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی شده است؛ چرا که داده‌های مربوط به میانگین چگالی ظاهری مورد استفاده در مدل، نشان-دهنده توزیع واقعی این پارامتر در منطقه مورد نظر نبوده است. بنابراین، توصیه نمودند که زمانی که اطلاعات محدودی در مورد توزیع چگالی ظاهری خاک وجود دارد و یا چگالی ظاهری به طور قابل توجهی در پروفایل خاک متفاوت است، از توزیع اندازه ذرات به عنوان داده‌های ورودی برای مدل Rosetta استفاده شود.

با توجه به نقش تخمین‌های اولیه پارامترهای معادله ونگنوختن در نرم افزار Rosetta بر خروجی نرم‌افزارهای مختلف از جمله HYDRUS، RETC، DISC و... لزوم انجام مطالعات بیشتر در خصوص میزان دقت این نرم‌افزار در برآورد ویژگی‌های



شکل ۱. توزیع کلاس بافتی خاک‌های مورد مطالعه بر روی مثلث بافت خاک

بر اساس نتایج آنالیز خاک، نمونه‌های مورد نظر در ۹ کلاس بافتی لوم رسی (CL)، لوم رس سیلتی (SiCL)، شنی لومی (LS)، لوم (L)، رس (C)، لوم سیلتی (SiL)، شن لومی (LS)، رس سیلتی (SiC) و لوم رس شنی (SCL) قرار گرفتند. توزیع کلاس بافتی خاک‌های مورد مطالعه بر روی مثلث بافت خاک در شکل ۱ و محدوده تغییرات برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک-های مورد پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است. برای بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون کولموگراف-اسمیرنوف در محیط SPSS استفاده شد. در حالت کلی چنانچه چولگی و کشیدگی در بازه (۲، -۲) باشد داده‌ها از توزیع نرمال برخوردار هستند. بر این اساس کلیه متغیرهای اندازه‌گیری شده در این پژوهش، از توزیع نرمال برخوردار بودند (جدول ۱).

جدول ۱. دامنه تغییرات برخی ویژگی‌های فیزیکی در خاک‌های مورد مطالعه

بافت خاک	تعداد نمونه خاک	ویژگی خاک	حداکثر	حداقل	میانگین	انحراف معیار	کشیدگی	چولگی
لوم رسی	۵۰	Sand(%)	۴۴	۱۴/۴	۲۹/۷۷۸	۳/۳۵۹	۰/۱۴۴	۰/۶۲۶
		Silt(%)	۵۳	۲۵	۳۸/۰۱۴	۶/۳۱۸	۰/۱۹۱	۰/۰۴۷
		Clay(%)	۴۶/۶	۲۵/۶	۳۲/۲	۴/۴۰۲	۰/۷۵۰	۰/۵۴۷
		$(g/cm^3) \rho b^*$	۱/۶۸	۱/۱۹	۱/۴۴۱	۰/۱۱۱	۰/۳۱۹	۰/۵۸۶
		$^{**}(v/v)FC$	۰/۵۳۱	۰/۱۹۶	۰/۳۴۳	۰/۰۹۶	۰/۱۴۳	۰/۱۶۷
		$(v/v)PWP$	۰/۲۸۸	۰/۱۲	۰/۱۸۹	۰/۰۵۰	۰/۵۴۸	
لوم رس سیلتی	۴۸	Sand(%)	۲۴	۲	۱۵/۰۲۲	۴/۶۱۱	۰/۶۲۹	۰/۰۵۹
		Silt(%)	۶۴/۷	۳۸	۵۱/۳۹	۶/۲۴	۰/۰۷۸	۰/۵۸۵
		Clay(%)	۴۰	۲۸	۳۳/۶۹	۳/۴۲۸	۰/۰۳۵	۰/۱۹۵
		$(g/cm^3) \rho b$	۱/۷۱	۱/۰۳۴	۱/۴۰۶	۰/۱۲۹	۰/۲۲۳	۰/۵۶۵
		$(v/v)FC$	۰/۵۵۱	۰/۲۴	۰/۳۵۵	۰/۰۷۶	۰/۵۸۶	۰/۳۱۷
		$(v/v)PWP$	۰/۲۹۱	۰/۱۲	۰/۱۹۱	۰/۰۳۹	۰/۷۳۳	
شنی لومی	۹	Sand(%)	۸۸	۸۰	۸۳/۲۲	۳/۲۳	۰/۵۱۵	۰/۱۵۶
		Silt(%)	۱۴	۴	۹/۳۳	۳/۷۷	۰/۰۴۴	۰/۶۴۹
		Clay(%)	۱۲	۶	۷/۴۴	۲/۱۸۶	۱/۴۸۱	۱/۲۴
		$(g/cm^3) \rho b$	۱/۶۶	۱/۳۵	۱/۵۱۹	۰/۱۰۸	۰/۱۳۷	۰/۱۱۲
		$(v/v)FC$	۰/۱۲	۰/۰۷۲	۰/۰۹۲	۰/۰۳۹	۰/۳۲۴	۰/۲۵۴
		$(v/v)PWP$	۰/۰۸۰	۰/۰۳۵	۰/۰۵۲	۰/۰۱۸	۰/۲۹۸	
لومی	۴۷	Sand(%)	۵۲	۲۸	۳۹/۹۲	۶/۸۴۳	۰/۱۲۲	۰/۲۱۹
		Silt(%)	۴۹/۱	۲۸	۴۰	۶/۲۳۷	۰/۴۹۵	۰/۸۶۹
		Clay(%)	۲۷/۲	۷	۲۰/۰۸	۴/۴۶	۰/۰۹	۱/۴۰۴
		$(g/cm^3) \rho b$	۱/۷۶	۰/۹۴	۱/۴۰۵	۰/۱۶۹	۰/۰۵	۱/۰۳۵
		$(v/v)FC$	۰/۴۶۴	۰/۱۵۳	۰/۲۷۹	۰/۰۹۰	۰/۰۸۳	۰/۱۱۲
		$(v/v)PWP$	۰/۲۱۸	۰/۰۸۳	۰/۱۳۷	۰/۰۴۶	۰/۳۹۲	
رسی	۳۰	Sand(%)	۳۲/۳	۴	۱۷/۵۸	۶/۶۸	۰/۴۶۱	۰/۲۱۵
		Silt(%)	۴۸	۱۳/۷	۵۳/۱۳	۵/۵۶	۱/۲۶	۰/۶۳۷
		Clay(%)	۶۰	۴۰	۴۷/۴۲	۴/۹۴	۰/۵۶۴	۰/۵۳۱
		$(g/cm^3) \rho b$	۱/۵۶	۱/۱۸	۱/۴۱	۰/۰۹۷	۰/۱۹۴	۰/۳۳۸
		$(v/v)FC$	۰/۶۲۵	۰/۲۱	۰/۳۹۸	۰/۱۰۳	۰/۰۴۹	۰/۲۶۷
		$(v/v)PWP$	۰/۳۱۲	۰/۱۳	۰/۲۲۶	۰/۰۴۷	۰/۳۷۶	
لوم سیلتی	۲۹	Sand(%)	۳۴	۸	۲۱/۰۹۷	۷/۲۸	۰/۰۳۸	۰/۰۲۱
		Silt(%)	۷۵/۷	۵۱	۵۸/۸۳	۶/۰۵۲	۰/۶۵۷	۰/۳۵۱
		Clay(%)	۳۸	۳/۱	۲۰/۰۶۹	۶/۰۶۲	۰/۲۰۴	۱/۱۶۴
		$(g/cm^3) \rho b$	۱/۷	۱/۲	۱/۴۴	۰/۱۰۶	۰/۱۵۴	۰/۸۱۱

چولگی	کشیدگی	انحراف معیار	میانگین	حدافل	حداکثر	ویژگی خاک	تعداد نمونه خاک	بافت خاک
-۰/۱۶۰۲	-۰/۳۱۹	۰/۰۶۸	۰/۳۲۷	۰/۱۱	۰/۴۲۷	(v/v)FC		
۰/۲۲۴	۰/۶۴۱	۰/۰۳۵	۰/۱۵۱	۰/۲۲	۰/۲۱۹	(v/v)PWP		
۱/۷۴۶	-۱/۵۵۱	۸/۹۶	۶۴/۱۲	۳۱	۷۸	Sand(%)		
۱/۳۶۱	۱/۱۷۹	۷/۸۳	۲۱/۹۴	۱۱	۴۸	Silt(%)	۳۲	لوم شنی
-۰/۲۷۷	-۰/۲۸۶	۳/۶۵	۱۳/۸۹	۶	۲۱	Clay(%)		
-۰/۱۸۰۰	-۰/۴۹۵	۰/۱۰۵	۱/۴۶	۱/۲۳	۱/۶۲	(g/cm ³) ρ b		
۱/۰۶۲	۰/۶۱۵	۰/۰۶۵	۰/۱۷۹	-۰/۰۸۶	۰/۳۱۷	(v/v)FC		
۱/۶۴۷	۱/۱۹۵	۰/۰۳۴	۰/۰۹۳	-۰/۰۵۴	۰/۱۷۸	(v/v)PWP		
۱/۶۷۵	-۰/۷۵۲	۵/۸۳۱	۵۴	۴۸	۶۸	Sand(%)		
۰/۲۸۶	-۰/۹۴۸	۶/۰۸	۲۱/۴۴	۹	۲۷	Silt(%)		
۰/۵۰۲	۰/۰۸۵	۲/۶۸۲	۲۴/۲۲	۲۰	۲۹	Clay(%)	۸	لوم رس شنی
-۰/۸۱	۰/۶۰۸	۰/۰۶۸	۱/۴۷۹	۱/۳۸۴	۱/۵۷۵	(g/cm ³) ρ b		
-۱/۰۰۱	۰/۱۳۹	۰/۰۶۱	۰/۱۷۵	-۰/۱۴۶	۰/۲۰۲	(v/v)FC		
-۱/۵۸۱	-۰/۳۷۴	۰/۰۳۷	۰/۱۰۶	-۰/۰۸۷	۰/۱۲۶	(v/v)PWP		
-۱/۰۰۹	-۱/۰۰۹	۴/۴۶	۱۲/۶۵	۵/۸	۲۰	Sand(%)	۲۰	
۰/۷۱۱	-۰/۳۸۶	۳/۱۱	۴۳/۳۹	۳۸/۷	۴۹/۷	Silt(%)		
۱/۴۸	۱/۸۷	۳/۴۲	۴۳/۹۰	۴۰	۵۲/۲	Clay(%)		
-۰/۰۶۹	-۱/۲۳	۰/۱۰۵	۱/۴۳	۱/۲۴	۱/۶۰	(g/cm ³) ρ b		رس سیلتی
-۰/۱۴	-۱/۶۰۱	-۰/۰۹۴۶	-۰/۳۸	-۰/۲۶	-۰/۵۱	(v/v)FC		
۰/۰۹	-۱/۶۴	۰/۰۳۸	۰/۲۲۵	۰/۱۷	۰/۲۷	(v/v)PWP		
۰/۲۹۳	۰/۱۷۷	۱۹/۷۲۱	۳۱/۹۳	۲	۸۸	Sand(%)		کل خاک‌های
۰/۳۸۰	-۰/۳۷۵	۱۳/۳۷	۳۹/۶۲	۴	۷۵/۷	Silt(%)		مورد مطالعه
-۰/۶۳۷	۰/۱۴۵	۱۱/۹۴	۲۸/۴۷	۳/۱۰	۶۰/۲	Clay(%)		Studied soils
-۰/۶۴۹	۱/۷۲	۰/۱۲۷	۱/۴۲۹	۰/۹۴	۱/۷۶	(g/cm ³) ρ b	۲۷۴	
-۰/۰۹۸	-۰/۶۰۱	۰/۱۱۳	۰/۳۱۲	۰/۰۷۲	۰/۶۲۵	(v/v)FC		
-۰/۰۰۴	-۰/۵۹۸	۰/۰۶۳	۰/۱۶۷	-۰/۰۲۵	۰/۳۱۲	(v/v)PWP		

* ρb: جرم مخصوص ظاهری خاک، **: نسبت حجمی به حجمی

ارزیابی‌های آماری: برای مقایسه مقادیر FC و PWP

برآوردشده به کمک نرم‌افزار ROSETTA در سه سطح مورد مطالعه با مقادیر FC و PWP اندازه‌گیری شده از شاخص‌های آماری متفاوتی مانند جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، خطای بایاس میانگین (MBE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، ضریب کارایی اصلاح شده (E') و شاخص مطابقت اصلاح شده (d') استفاده شد. هر کدام از این آماره‌ها از روابط زیر قابل محاسبه هستند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I_i - \hat{I}_i)^2}{N}} \quad (2)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (I_i - \hat{I}_i)}{N} \quad (3)$$

$$E' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |I_i - \hat{I}_i|}{\sum_{i=1}^N (I_i - I'_i)} \quad (4)$$

$$d' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |I_i - \hat{I}_i|}{\sum_{i=1}^N ((I_i - I'_i) - |\hat{I}_i - I'_i|)} \quad (5)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{X_{max} - X_{min}} \quad (6)$$

در این روابط N تعداد مشاهده‌ها، I_i مقادیر اندازه‌گیری شده، I'_i مقادیر برآوردشده، I میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده، I'_i میانگین مقادیر برآورد شده هر ویژگی، X_{max} و X_{min} به ترتیب حداکثر و

برآورد نقاط FC و PWP: در این پژوهش برای برآورد

پارامترهای معادله ون‌گنختن از نرم‌افزار ROSETTA ورژن 1.2 استفاده شد. برای هر نمونه خاک، پارامترهای معادله ون‌گنختن در سه سطح شامل (۱) تنها با استفاده از کلاس بافتی (TC)، (۲) درصد ذرات شن و رس و سیلت (SSC) و (۳) درصد ذرات شن و رس و سیلت بعلاوه چگالی ظاهری (SSC+BD)، برآورد شده و سپس مقادیر رطوبت حجمی خاک در مکش‌های ۳۳۰ سانتی‌متر و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر که به ترتیب معادل رطوبت در ظرفیت زراعی (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) می‌باشند، در هر سطح بر اساس معادله ون‌گنختن (Van Genuchten, 1980) محاسبه شد.

(۱)

$$\theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^{1 - \frac{1}{n}}} r \theta = (h \theta)$$

در رابطه فوق (h) θ (L³L⁻³), θ_r (L³L⁻³) و θ_s (L³L⁻³) به ترتیب رطوبت در مکش ماتریک h، رطوبت باقی‌مانده و رطوبت اشباع، α و n پارامترهای شکل منحنی مشخصه رطوبتی می‌باشند.

مقدار d' هرچه بیشتر باشد یعنی مقادیر تخمین زده شده به مقادیر اندازه گیری شده نزدیک‌تر است (Salazar et al., 2008).

نتایج و بحث

جدول ۲ نتایج آنالیز آماری مقایسات انجام گرفته بین سطوح مختلف در نرم‌افزار ROSETTA شامل سطح (۱) براساس کلاس بافت خاک (TC)، سطح (۲) درصد ذرات تشکیل-دهنده بافت خاک (SSC) و سطح (۳) درصد ذرات تشکیل-دهنده بافت خاک بعلاوه چگالی ظاهری (SSC+BD) در برآورد FC و PWP را نشان می‌دهد.

حداقل مقدار اندازه‌گیری شده هر متغیر می‌باشند. سطوحی که دارای مقادیر RMSE و MBE کوچکتر باشد، از خطای کمتری برخوردار است. همچنین مقادیر مثبت و منفی معیار MBE به ترتیب نشان-دهنده بیشتر و یا کمتر بودن مقادیر برآورد شده نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده است. ضریب کارآیی اصلاح شده (E') در محدوده یک تا منفی بی‌نهایت متغیر است. E' برابر با یک نشان‌دهنده برابری مقادیر تخمین زده شده با اندازه‌گیری بوده و هرچه مقدر آن از یک کمتر باشد دقت مقادیر تخمین زده شده کمتر می‌باشد. d' شاخص مطابقت اصلاح شده است که محدوده آن از صفر تا یک است.

جدول ۲. نتایج ارزیابی آماری مقادیر رطوبت برآورد شده در نقطه ظرفیت مزرعه FC در بافت‌های مختلف

بافت خاک	سطوح مختلف ورودی Rosetta	RMSE	NRMSE	MBE	E'	D'	مجموع رتبه‌ها	رتبه نهایی
لوم رسی	Textural	$(3) \times 0.125$	$(3) \times 0.373$	$(3) \times 0.081$	$(2) \times 0.005$	$(3) \times 0.692$	۱۵	۳
	SSC	$(1) \times 0.108$	$(1) \times 0.332$	$(1) \times 0.052$	$(1) \times 0.111$	$(1) \times 0.753$	۵	۱
	SSC+BD	$(2) \times 0.117$	$(2) \times 0.353$	$(2) \times 0.073$	$(3) \times 0.109$	$(2) \times 0.707$	۱۰	۲
لومی	Textural	$(2) \times 0.960$	$(2) \times 0.316$	$(3) \times 0.036$	$(2) \times 0.048$	$(3) \times 0.718$	۱۲	۳
	SSC	$(1) \times 0.85$	$(1) \times 0.278$	$(1) \times 0.028$	$(1) \times 0.084$	$(1) \times 0.761$	۵	۱
	SSC+BD	$(3) \times 0.96$	$(2) \times 0.316$	$(2) \times 0.029$	$(2) \times 0.073$	$(2) \times 0.719$	۱۰	۲
رسی	Textural	$(1) \times 0.118$	$(1) \times 0.284$	$(1) \times 0.060$	$(1) \times 0.163$	$(1) \times 0.761$	۵	۱
	SSC	$(2) \times 0.132$	$(2) \times 0.317$	$(2) \times 0.078$	$(2) \times 0.123$	$(2) \times 0.739$	۱۰	۲
	SSC+BD	$(2) \times 0.132$	$(3) \times 0.319$	$(3) \times 0.088$	$(3) \times 0.086$	$(3) \times 0.721$	۱۴	۳
لوم رس سیلنتی	Textural	$(1) \times 0.70$	$(1) \times 0.275$	$(1) \times 0.022$	$(2) \times 0.192$	$(2) \times 0.830$	۷	۱
	SSC	$(2) \times 0.74$	$(2) \times 0.330$	$(1) \times 0.022$	$(1) \times 0.056$	$(1) \times 0.836$	۷	۱
	SSC+BD	$(2) \times 0.74$	$(2) \times 0.330$	$(3) \times 0.055$	$(3) \times 0.216$	$(3) \times 0.766$	۱۳	۲
لوم شنی	Textural	$(3) \times 0.072$	$(3) \times 0.313$	$(1) \times 0.005$	$(3) \times 0.502$	$(3) \times 0.768$	۱۳	۳
	SSC	$(2) \times 0.65$	$(2) \times 0.281$	$(3) \times 0.123$	$(2) \times 0.528$	$(2) \times 0.793$	۱۱	۲
	SSC+BD	$(1) \times 0.64$	$(1) \times 0.279$	$(2) \times 0.008$	$(1) \times 0.541$	$(1) \times 0.796$	۶	۱
رس سیلنتی	Textural	$(1) \times 0.86$	$(1) \times 0.270$	$(1) \times 0.041$	$(1) \times 0.094$	$(1) \times 0.815$	۵	۱
	SSC	$(2) \times 0.88$	$(2) \times 0.278$	$(2) \times 0.045$	$(3) \times 0.062$	$(2) \times 0.806$	۱۱	۲
	SSC+BD	$(3) \times 0.102$	$(3) \times 0.324$	$(3) \times 0.059$	$(2) \times 0.093$	$(3) \times 0.765$	۱۴	۳
لوم سیلنتی	Textural	$(2) \times 0.109$	$(2) \times 0.428$	$(1) \times 0.048$	$(2) \times 0.074$	$(1) \times 0.762$	۸	۲
	SSC	$(1) \times 0.106$	$(1) \times 0.411$	$(1) \times 0.048$	$(1) \times 0.114$	$(3) \times 0.722$	۷	۱
	SSC+BD	$(3) \times 0.118$	$(3) \times 0.449$	$(2) \times 0.059$	$(3) \times 0.035$	$(2) \times 0.745$	۱۳	۲
شن لومی	Textural	$(2) \times 0.036$	$(2) \times 0.486$	$(1) \times 0.001$	$(3) \times 0.835$	$(3) \times 0.881$	۱۱	۳
	SSC	$(1) \times 0.107$	$(1) \times 0.374$	$(2) \times 0.009$	$(2) \times 0.873$	$(2) \times 0.905$	۸	۲
	SSC+BD	$(1) \times 0.107$	$(1) \times 0.374$	$(3) \times 0.016$	$(1) \times 0.880$	$(1) \times 0.908$	۷	۱
لوم رس شنی	Textural	$(2) \times 0.036$	$(3) \times 0.152$	$(1) \times 0.001$	$(3) \times 0.835$	$(3) \times 0.881$	۱۲	۳
	SSC	$(1) \times 0.107$	$(1) \times 0.114$	$(2) \times 0.009$	$(2) \times 0.873$	$(2) \times 0.905$	۸	۱
	SSC+BD	$(1) \times 0.107$	$(2) \times 0.229$	$(3) \times 0.016$	$(1) \times 0.880$	$(1) \times 0.908$	۱۱	۲
کل خاک‌های مورد مطالعه Studied soils	Textural	$(2) \times 0.98$	$(3) \times 0.201$	$(3) \times 0.048$	$(1) \times 0.164$	$(3) \times 0.620$	۱۲	۳
	SSC	$(1) \times 0.94$	$(1) \times 0.183$	$(1) \times 0.028$	$(3) \times 0.116$	$(1) \times 0.763$	۷	۱
	SSC+BD	$(3) \times 0.102$	$(2) \times 0.197$	$(2) \times 0.044$	$(2) \times 0.117$	$(2) \times 0.745$	۱۱	۲

*: رتبه از نظر آماره مورد بررسی، RMSE: جذر میانگین مربعات خطا، MBE: خطای بایاس میانگین، NRMSE: ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده، E' : ضریب کارآیی اصلاح شده و d' : شاخص مطابقت اصلاح شده

می‌شود. بنابراین در خاک‌های ریزبافت خطای روش بایکاس بیشتر از خاک‌های درشت بافت است و با افزایش درصد رس خاک، انحراف روش بایکاس افزایش می‌یابد. جی و اور^۴ (۲۰۰۲) منبع عمده خطا را در نحوه قرائت هیدرومتر می‌دانند و معتقدند، خطایی در حدود $1 \pm$ گرم بر لیتر در قرائت هیدرومتر، منجر به ۲ درصد خطا در اندازه‌گیری رس می‌شود.

همچنین همانطور که در بالا گفته شد در ارتباط با بافت‌های درشت بافت و شنی استفاده از جرم مخصوص ظاهری سبب افزایش دقت نرم‌افزار ROSETTA در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک شد. ذرات رس موجود در خاک دارای خاصیت انبساط و انقباض هستند و همین انبساط و انقباض در حین خیس و خشک شدن خاک سبب تغییر در اندازه، توزیع و چگونگی قرار گرفتن منافذ در خاک می‌شود؛ از آنجا که میزان خلل و فرج و منافذ موجود در خاک بر چگالی ظاهری خاک تاثیر گذار است، لذا در خاک‌هایی که دارای مقادیر مختلفی رس هستند مقادیر چگالی ظاهری بسیار متغیر است و همین امر موجب ایجاد خطا در برآورد چگالی ظاهری خاک می‌شود. به بیان دیگر یک نمونه سیلندر با ابعاد نسبتاً کوچک نمی‌تواند با دقت قابل قبولی تغییرپذیری بالای چگالی ظاهری در خاک‌های با بافت متوسط تا ریز بافت، معمولاً را پوشش دهد. سالاوه^۵ و همکاران (۲۰۲۳) نیز در مطالعات خود به نتایج مشابهی دست پیدا کردند. به عقیده این پژوهشگران نیز در مطالعه انجام شده مقادیر چگالی ظاهری که به عنوان ورودی به مدل داده شدند توزیع چگالی ظاهری در پروفیل خاک را به خوبی نشان نمی‌دهد. در مطالعه انجام شده توسط گراگ و گوپتا^۶ (۲۰۱۵) نیز نتایج مشابهی را ارائه دادند. به عقیده این پژوهشگران تغییرات موجود در چگالی ظاهری خاک در طول پروفیل سبب کاهش دقت در برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی در نرم افزار ROSETTA می‌شود. این پژوهشگران توصیه نمودند که زمانی که دانش محدودی از توزیع چگالی ظاهری در پروفیل خاک وجود دارد، تنها از توزیع اندازه ذرات برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک با مدل ROSETTA استفاده گردد.

از سوی دیگر در خاک‌های با بافت شنی از آنجایی که خلل و فرج کل نسبت به خاک‌های رسی کمتر بوده و پدیده انبساط و انقباض وجود ندارد؛ لذا چگالی ظاهری در قسمت‌های مختلف خاک از تغییرپذیری کمتری برخوردار بوده و استفاده از آن به عنوان اطلاعات پایه و ورودی در نرم افزار ROSETTA سبب کاهش خطا در برآورد پارامترهای معادله ون‌گنختن شد.

شکل ۲ پراکندگی مقادیر FC برآورد شده توسط نرم‌افزار ROSETTA در سطوح مختلف را در برابر مقادیر FC اندازه‌گیری شده و همچنین ضرایب همبستگی بین داده‌های برآورد شده و اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد.

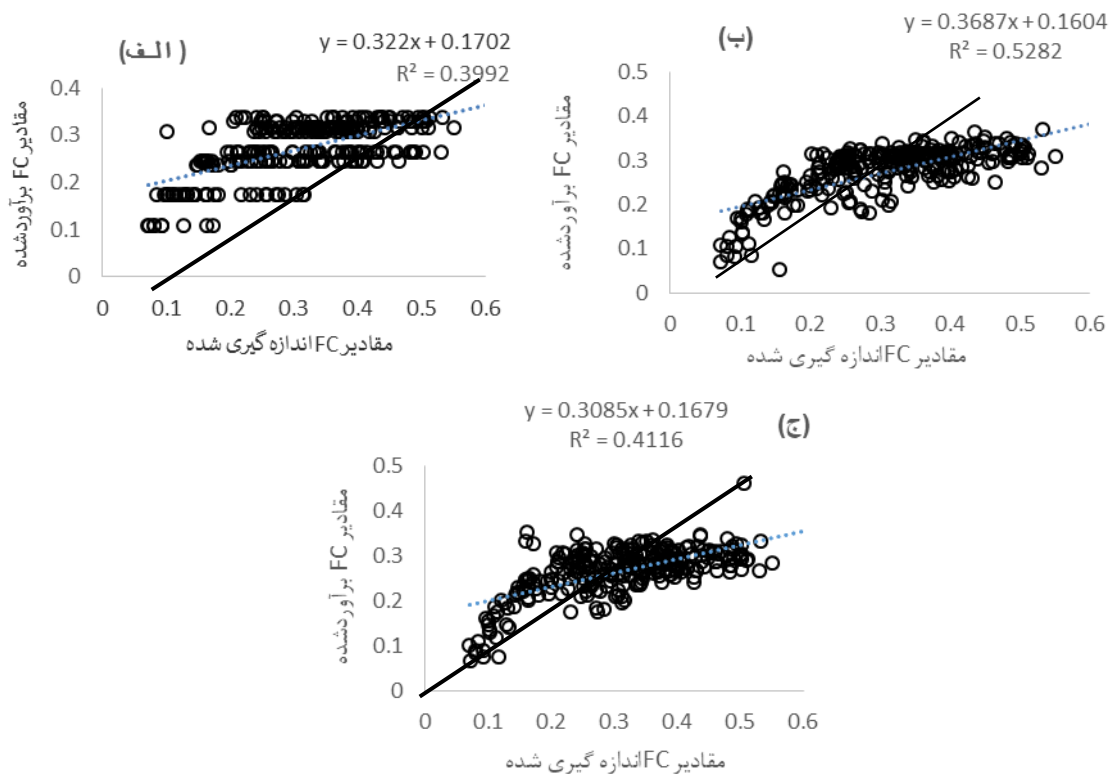
بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۲ در ارتباط با خاک‌های با درصد بالاتر رس مانند بافت‌های رسی (C) و رس سیلتی (SiC) سطح اول (TC) نسبت به دو سطح دیگر از دقت بیشتری برخوردار بوده و مقادیر FC را با خطای کمتری برآورد نموده است. از سوی دیگر در دو خاک درشت بافت شنی لومی (LS) و لوم شنی (SL) سطح سوم بیشترین دقت را در برآورد پارامترهای مدل ون‌گنختن داشته‌اند. در مورد بقیه بافت‌های خاک سطح دوم از بالاترین دقت در برآورد FC برخوردار بوده است.

به نظر می‌رسد وجود مقادیر بالای درصد رس در بافت خاک سبب ایجاد خطا در اندازه‌گیری درصد ذرات رس، سیلت و شن می‌شود؛ به گونه‌ای که در این بافت‌ها استفاده از کلاس بافتی (سطح اول) از دقت بالاتری نسبت به استفاده از درصد ذرات تشکیل دهنده بافت خاک (سطح دوم) در برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک برخوردار بوده است. در حال حاضر روش رایج اندازه‌گیری بافت خاک در اغلب آزمایشگاه‌های خاکشناسی، روش استفاده از هیدرومتر با فواصل زمانی ۴۰ ثانیه (برای اندازه‌گیری درصد شن) و ۲ ساعت (اندازه‌گیری درصد رس و سیلت) می‌باشد (Bouyoucos, 1962). این روش بر مبنای سرعت ته‌نشینی ذرات تشکیل دهنده بافت خاک و بر اساس اندازه قطر ذرات و میزان گرانیوی سیالی است که ذرات خاک در آن غوطه‌ور هستند.

در دمای ثابت، زمان سقوط ذرات به اندازه آنها و عمق مؤثر نفوذ هیدرومتر (میانگین فاصله طی شده توسط ذرات) بستگی دارد. با تغییرات دمایی تعلیق، گرانیوی تعلیق تغییر و در نتیجه سرعت سقوط ذرات نیز تغییر می‌یابد. از طرف دیگر مقدار عمق مؤثر نفوذ هیدرومتر خود به مقادیر ذرات موجود در تعلیق وابسته است. بنابراین به‌طور کلی زمان لازم برای سقوط یک ذره از عمق مؤثر نفوذ هیدرومتر، علاوه بر قطر ذره به فراوانی آن نیز بستگی دارد. به عبارت دیگر این زمان، در خاک‌های مختلف متفاوت است.

یاوری و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که روش رایج قرائت بافت، بخش رس را با میانگین خطای بیشتری نسبت به سیلت و شن اندازه‌گیری می‌کند و با ریزبافت شدن خاک میزان انحراف این روش از مقدار واقعی، افزایش می‌یابد. بر اساس مطالعات این پژوهشگران مدت زمان مناسب برای اندازه‌گیری درصد رس در خاک، زمان ۸ ساعت بوده و ۲ ساعت را زمان مناسبی برای قرائت درصد رس ندانستند.

بر اساس پژوهش‌های انجام شده توسط برتا^۷ و همکاران (۲۰۱۴) در زمان قرائت ۲ ساعت ممکن است بخش قابل ملاحظه‌ای از ذرات سیلت به حالت معلق در تعلیق وجود داشته باشد. اگر قرائت ۲ ساعت به عنوان مرز زمانی، برای تعیین بخش سیلت و رس در نظر گرفته شود، بخشی از سیلت که معلق در تعلیق است جزء بخش رس خاک تلقی شده و موجب بیش-اندازه‌گیری بخش رس و در نهایت کم‌اندازه‌گیری بخش سیلت



شکل ۲. مقادیر FC برآورد شده توسط نرم افزار ROSETTA در سطح یک (کلاس بافتی) (الف)، سطح دو (درصد ذرات شن، رس و سیلت) (ب) و سطح سه (درصد ذرات شن، رس و سیلت + چگالی ظاهری) (ج) در برابر مقادیر FC اندازه گیری شده

جدول ۳ نتایج ارزیابی آماری مقادیر برآورد شده PWP در سطوح مختلف در خاک‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. برخلاف FC، مقادیر PWP برآورد شده در سطوح مختلف روند مشخصی از خود نشان ندادند اما در کل و در غالب خاک‌های مورد مطالعه سطح دوم یعنی استفاده از درصد ذرات تشکیل‌دهنده بافت خاک کمترین خطا را در تخمین پارامترهای معادله ون گنختن داشته اند که منجر به دقت بیشتر در برآورد میزان رطوبت در نقطه PWP شده است.

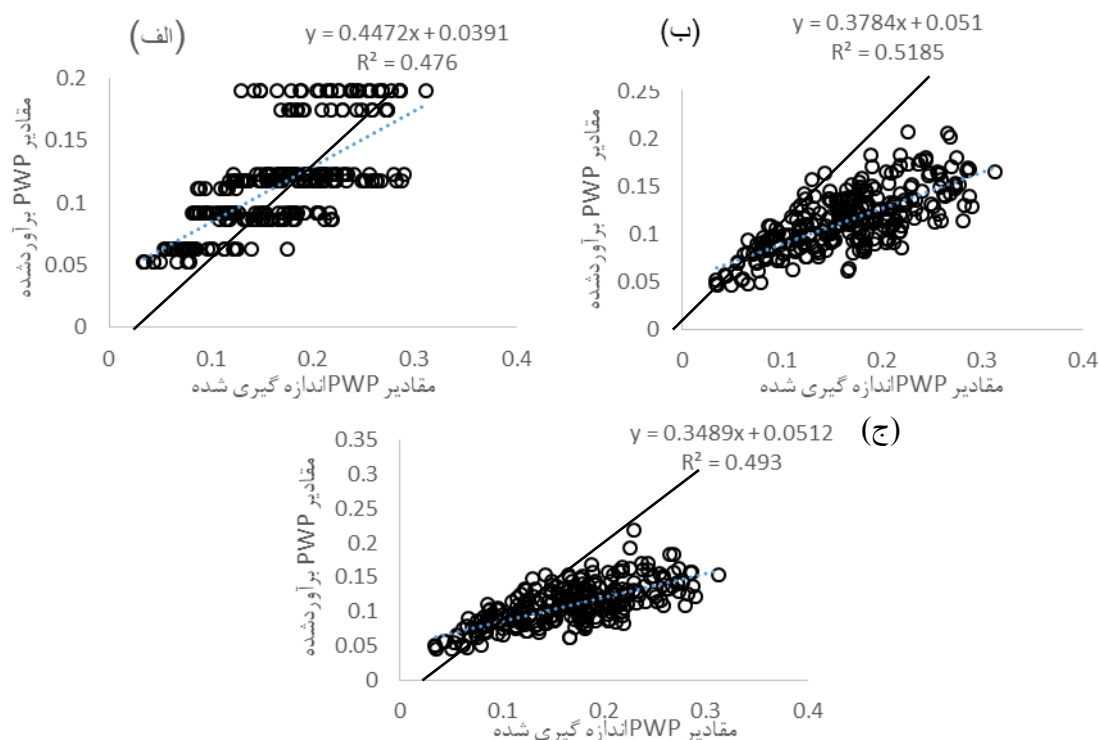
همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است بیشترین مقدار ضریب همبستگی بین مقادیر FC اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط نرم‌افزار ROSETTA مربوط به سطح دوم (SSC) بوده است ($R^2=0.5282$) و بعد از آن به ترتیب سطح اول (TC) با ضریب همبستگی معادل ۰/۳۹۹۲ و سطح سوم (SSC+BD) با ضریب همبستگی ۰/۴۱۱۶ قرار گرفتند. این نتایج اطلاعات ارائه شده در جدول ۲ را تایید می‌نماید.

جدول ۳. نتایج ارزیابی آماری مقادیر رطوبت برآورد شده در نقطه پژمردگی دائم گیاه PWP در بافت‌های مختلف

رتبه نهایی	مجموع	D'	E'	MBE	NRMSE	RMSE	سطوح مختلف ورودی	بافت خاک
۳	۱۰	(۳)۰/۴۸۸	(۲)۰/۶۴۸	(۳)۰/۰۷۲	(۲)۰/۵۱۹	(۲)۰/۰۸۸	Textural	لوم رسی
۲	۸	(۱)۰/۵۱۸	(۳)۰/۷۲۵	(۱)۰/۰۵۱	(۳)۰/۶۷۶	(۳)۰/۱۱۴	SSC	
۱	۶	(۲)۰/۴۹۹	(۱)۰/۶۲۵	(۲)۰/۰۷۱	(۱)۰/۵۰۹	(۱)۰/۰۸۶	SSC+BD	
۲	۹	(۳)۰/۵۷۰	(۲)۰/۱۵۰	(۲)۰/۰۴۶	(۲)۰/۴۸۴	(۲)۰/۰۶۴	Textural	لومی
۱	۴	(۱)۰/۵۹۱	(۱)۰/۱۰۵	(۱)۰/۰۴۵	(۱)۰/۴۷۸	(۱)۰/۰۶۳	SSC	
۲	۹	(۲)۰/۵۶۸	(۳)۰/۱۵۵	(۳)۰/۰۷۱	(۳)۰/۴۹۳	(۲)۰/۰۶۴	SSC+BD	
۱	۴	(۱)۰/۷۹۴	(۱)۰/۲۸۵	(۱)۰/۰۳۶	(۱)۰/۳۲۲	(۱)۰/۰۵۹	Textural	رسی
۲	۸	(۲)۰/۷۰۵	(۲)۰/۰۸۳	(۲)۰/۰۶۱	(۲)۰/۴۱۷	(۲)۰/۰۷۶	SSC	
۳	۱۲	(۳)۰/۶۶۴	(۳)۰/۰۰۶	(۳)۰/۰۶۹	(۳)۰/۴۵۲	(۳)۰/۰۸۲	SSC+BD	
۳	۱۰	(۳)۰/۳۰۸	(۳)۰/۴۴۸	(۳)۰/۰۶۶	(۲)۰/۶۹۱	(۱)۰/۰۷۴	Textural	لوم سیلتی

رتبه نهایی	مجموع	D'	E'	MBE	NRMSE	RMSE	سطوح مختلف ورودی	بافت خاک
۱	۴	(۱)-/۰/۴۱۴	(۱)-/۱/۲۱	(۱)-/۰/۰۵۸	(۱)-/۰/۶۷۴	(۱)-/۰/۰۷۴	SSC	
۲	۷	(۲)-/۰/۳۴۱	(۲)-/۱/۳۸۵	(۲)-/۰/۰۶۳	(۱)-/۰/۶۷۴	(۱)-/۰/۰۷۴	SSC+BD	
۳	۱۱	(۳)-/۰/۷۲۹	(۳)-/۰/۵۵۲	(۳)-/۰/۰۳۰	(۳)-/۰/۳۲۶	(۳)-/۰/۰۴۵	Textural	لوم شنی
۱	۴	(۱)-/۰/۸۳۳	(۱)-/۰/۶۸۵	(۱)-/۰/۰۱۴	(۲)-/۰/۲۸۵	(۱)-/۰/۰۳۲	SSC	
۲	۹	(۳)-/۰/۸۱۶	(۲)-/۰/۶۶۵	(۲)-/۰/۰۱۸	(۱)-/۰/۲۶۷	(۲)-/۰/۰۳۴	SSC+BD	
۲	۸	(۲)-/۰/۴۹۹	(۲)-/۰/۸۵۷	(۲)-/۰/۰۷۰	(۲)-/۰/۴۷۵	(۲)-/۰/۰۸۰	Textural	لوم رس
۱	۴	(۱)-/۰/۵۲۶	(۱)-/۰/۷۹۷	(۱)-/۰/۰۶۶	(۱)-/۰/۲۳۶	(۱)-/۰/۰۷۸	SSC	سیلنی
۳	۱۱	(۳)-/۰/۴۸۶	(۳)-/۰/۸۹۳	(۲)-/۰/۰۰۷	(۳)-/۰/۴۸۷	(۳)-/۰/۰۸۲	SSC+BD	
۱	۴	(۱)-/۰/۷۷۳	(۱)-/۰/۲۰۳	(۱)-/۰/۰۴۲	(۱)-/۰/۵۸۶	(۱)-/۰/۰۶۲	Textural	رس سیلنی
۲	۸	(۲)-/۰/۶۵۵	(۲)-/۰/۱۰۰	(۲)-/۰/۰۶۲	(۲)-/۰/۷۴۵	(۲)-/۰/۰۷۷	SSC	
۳	۱۲	(۳)-/۰/۶۱۷	(۳)-/۰/۲۰۰	(۳)-/۰/۰۶۶	(۳)-/۰/۸۱۲	(۳)-/۰/۰۸۵	SSC+BD	
۱	۵	(۱)-/۰/۸۹۷	(۳)-/۰/۸۶۳	(۱)-/۰/۰۱۷	(۱)-/۰/۳۷۴	(۱)-/۰/۰۱۷	Textural	شن لومی
۳	۷	(۲)-/۰/۸۹۶	(۲)-/۰/۸۶۳	(۲)-/۰/۰۰۱	(۱)-/۰/۳۷۴	(۱)-/۰/۰۱۷	SSC	
۲	۶	(۱)-/۰/۸۹۷	(۱)-/۰/۸۶۴	(۳)-/۰/۰۰۲	(۱)-/۰/۳۷۴	(۱)-/۰/۰۱۷	SSC+BD	
۳	۱۲	(۳)-/۰/۸۵۵	(۳)-/۰/۶۵۰	(۳)-/۰/۰۱۹	(۳)-/۰/۳۵۸	(۳)-/۰/۰۳۹	Textural	لوم رس
۲	۸	(۲)-/۰/۸۷۰	(۲)-/۰/۶۸۹	(۲)-/۰/۰۱۷	(۲)-/۰/۲۹۹	(۲)-/۰/۰۳۶	SSC	شنی
۱	۴	(۱)-/۰/۸۸۰	(۱)-/۰/۷۲۳	(۱)-/۰/۰۱۲	(۱)-/۰/۲۹۳	(۱)-/۰/۰۳۴	SSC+BD	
۲	۷	(۳)-/۰/۶۲۳	(۱)-/۰/۰۹۱	(۲)-/۰/۰۵۰	(۱)-/۰/۲۸۴	(۱)-/۰/۰۶۹	Textural	کل خاک‌های
۱	۸	(۲)-/۰/۶۲۰	(۲)-/۰/۱۱۶	(۱)-/۰/۰۴۸	(۲)-/۰/۳۲۸	(۳)-/۰/۰۷۶	SSC	مورد مطالعه
۲	۹	(۱)-/۰/۵۹۱	(۳)-/۰/۱۴۹	(۳)-/۰/۰۵۴	(۳)-/۰/۳۷۹	(۲)-/۰/۰۷۳	SSC+BD	Studied soils

*: رتبه از نظر آماره مورد بررسی، RMSE: جذر میانگین مربعات خطا، MBE: خطای بایاس میانگین، NRMSE: ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده، E': ضریب کارآیی اصلاح شده و d': شاخص مطابقت اصلاح شده



شکل ۳. مقادیر PWP برآورد شده توسط نرم افزار ROSETTA در سطح یک (الف)، سطح دو (ب) و سطح سه (ج) در برابر مقادیر FC اندازه گیری شده

بافت‌های خاک سطح دوم (SSC) از بالاترین دقت در برآورد FC برخوردار بوده است. نتایج ارزیابی آماری مقادیر برآورد شده PWP در سطح مختلف در خاک‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، مقادیر PWP برآورد شده در سطوح مختلف روند نسبتاً مشخصی نسبت به بافت از خود نشان ندادند اما در کل و در غالب خاک‌های مورد مطالعه سطح دوم یعنی استفاده از درصد ذرات تشکیل‌دهنده بافت خاک کمترین خطا را در تخمین پارامترهای معادله ون‌گنختن داشتند که منجر به دقت بالاتر در برآورد میزان رطوبت در نقطه PWP شده است.

در کل در مورد غالب خاک‌های مورد مطالعه، سطح دوم (SSC) کمترین میزان خطا را در برآورد پارامترهای معادله ون‌گنختن داشت و مقادیر FC و PWP را با دقت قابل قبولی در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده آنها برآورد نمود. با توجه به بررسی منابع انجام گرفته وجود تغییر پذیری بالا در چگالی ظاهری در طول پروفیل‌های خاک به ویژه با افزایش درصد رس و احتمال خطای بالا در تخمین دادن نتایج حاصل از چگالی ظاهری اندازه‌گیری شده به روش سیلندر در مقیاس میدانی، دقت مدل در هنگام استفاده از این پارامتر به عنوان ورودی کاهش پیدا می‌کند و استفاده از درصد ذرات تشکیل‌دهنده بافت خاک نتایج بهتر و دقیق‌تری را به همراه خواهد داشت.

شکل ۳ پراکندگی مقادیر PWP برآورد شده توسط نرم‌افزار ROSETTA در سطوح مختلف را در برابر مقادیر PWP اندازه‌گیری شده و همچنین ضرایب همبستگی بین داده‌های برآورد شده و اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. بر اساس اطلاعات ارائه شده در شکل ۳، بیشترین مقدار ضریب همبستگی بین مقادیر PWP اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط نرم‌افزار ROSETTA مربوط به سطح دوم (SSC) بوده است ($R^2=0.5185$) و بعد از آن به ترتیب سطح سوم (SSC+BD) با ضریب همبستگی معادل ۰/۴۹۳ و سطح اول (TC) با ضریب همبستگی ۰/۴۷۶ قرار گرفتند. این نتایج اطلاعات ارائه شده در جدول ۳ را تایید می‌نماید.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که در ارتباط با خاک‌های با بافت ریز مانند رسی (C)، رس سیلتی (SiC)، سطح اول یعنی برآورد پارامترهای هیدرولیکی با استفاده از کلاس بافتی خاک نسبت به دو سطح دیگر از دقت بیشتری برخوردار بوده و مقادیر FC را با خطای کمتری برآورد نموده است. در دو بافت درشت بافت شن لومی (LS) و لوم شنی (SL) سطح سوم (SSC+BD) بیشترین دقت را در برآورد پارامترهای مدل ون‌گنختن و متعاقباً FC محاسبه شده داشتند. در مورد سایر

Reference:

- Abd Rashid, N.S., Askari, M., Tanaka, T., Simunek, J. & van Genuchten, M.Th. (2015). Inverse estimation of soil hydraulic properties under oil palm trees. *Geoderma*, 241–242, 306–312.
- Alletto, L., Pot, V., Giuliano, S., Costes, M., Perdrioux, F. & Justes, E. (2015) Temporal variation in soil physical properties improves the water dynamics modeling in a conventionally-tilled soil. *Geoderma*, 243(244), 18–28.
- Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M.R., Dexter, A.R., Mahboubi, A.A. & Neyshabouri, M.R. (2014). Determination of soil available water for plants: consistency between laboratory and field measurements. *Geoderma*, 226–227, 8–20.
- Babaeian, E., Homaei, M. & Noroozi, A.A. (2013). Assessing spectrotransfer functions and pedotransfer functions in predicting soil water retentions. *Conservation of soil and water resources*, 3(2), 25-43. (In Persian with English abstract).
- Blake, G.R. & Hartge, K.H. (1986) Bulk density. In: Klute A, Ed, *Methods of Soil Analysis, Part 1—Physical and Mineralogical Methods*, 2nd Edition, Agronomy Monograph 9, American Society of Agronomy—Soil Science Society of America, Madison, 363-382.
- Bouyoucos, G.J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. *Agronomy Journal*, 54(5), 464-465.
- Beretta, A.N., Silbermann, A.V., Paladino, L., Torres, D., Bassahun, D., Musselli, R. & García-Lamohte, A. (2014). Análisis de textura del suelo con hidrómetro: modificaciones al método de Bouyoucos. *Ciencia e Investigación Agraria*, 41(2), 263-271.
- Charles, W. & Oluwapelumi, O. (2021). Predictive modelling of soils' hydraulic conductivity using artificial neural network and multiple linear regression. *Applied Sciences*.3. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03974>.
- Dobarco, M.R., Isabelle, C.I., Bas, C.L. & Martin, M.P. (2019). Pedotransfer functions for predicting available water capacity in French soils, their applicability domain and associated uncertainty. *Geoderma*, 336, 81–95. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.08.022>.
- Ebrahimi, F. & Raouf, M. (2015). Effect of different Rosetta Predictive Model on Soil Hydraulic Properties. Estimation Using HYDRUS-2D and Effect of Land use changing on their. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 2(9), 303-313. (In Persian with English abstract).

- Fathi, M. & Tehrani, M. (2017). Zinc Availability in Relation to Selected Soil Properties and landscape Position in Calcareous Soils of Esfahan Province. 15th Iran Soil Science Congress, Isfahan University of Technology
- Garg, N.K. & Gupta, M. (2015). Assessment of improved soil hydraulic parameters for soil water content simulation and irrigation scheduling. *Irrigation Science*, 33(4), 247–264.
- Gee, G.W. & Or, D. (2002). 2.4 Particle-size analysis. *Methods of Soil Analysis*, 4(598), 255-293.
- Gunarathna MH, Sakaic K, Nakandakaric T, Momiid K, Kumaria MKN, & Amarasekaraa MGTS. (2019). Pedotransfer functions to estimate hydraulic properties of tropical Sri Lankan soils. *Soil & Tillage Research*, 190, 109–119. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.02.009>.
- Klute, A. (1986). *Methods of Soil Analysis. Part 1- Physical and Mineralogical Methods*. 2nd ed., Agronomy No. 9. ASA/SSSA Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- Mashayekhi, P., Ghorbani Dashtaki, S., Mosaddeghi, M.R, Shirani, H. & Mohammadi Nodoushan, A.R. (2016). Different scenarios for inverse estimation of soil hydraulic parameters from double ring infiltrometer data using HYDRUS 2D/3D. *International Agrophysics*, 30(2), 203-210.
- Nakhaei, M. & Šimůnek, J. (2014). Parameter estimation of soil hydraulic and thermal property functions for unsaturated porous media using the HYDRUS-2D code. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 62(1), 7–15.
- Rastgou, M., Bayatb, H., Mansoorizadehc, M. & Gregoryd, A.S. (2020). Estimating of soil water retention curve: Comparison of multiple nonlinear regression approach and random forest data mining technique. *Computers and Electronics in Agriculture*, 174. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105502>.
- Salahou, M.Kh., Chen, Y., Jiao, X. & Lu, H. (2023). Inverse Modelling to Estimate Soil Hydraulic Properties at the Field Scale. *Mathematical Problems in Engineering 2022*, Article ID 4544446, 11 pages. <https://doi.org/10.1155/2022/4544446>.
- Salazar, O., Wesstrom, I. & Joel, A. (2008). Evaluation of drainmod using saturated hydraulic conductivity estimated by a pedotransfer function model. *Agricultural Water Management*, 95, 1135 – 1143.
- Šimůnek, J., van Genuchten, M.Th. & Šejna, M. (2012). HYDRUS: model use, calibration, and validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 55(4), 1261–1274.
- Schaap, M.G., Leij, F.J. & van Genuchten, M.Th. (2001). ROSETTA: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251, 163–176. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00466-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00466-8).
- Schaap, M.G., Nemes, A. & van Genuchten, M.Th. (2004). Comparison of models for indirect estimation of water retention and available water in surface soils. *Vadose Zone Journal*, 3, 1455–1463. <http://dx.doi.org/10.2136/vzj2004.1455>.
- Schelle, H., Iden, S.C., Schlüter, S., Vogel, H.J. & Durner, W. (2012). Identification of effective flow processes and properties from virtual soils using inverse modeling. *Geophysical Research Abstracts*, 14.
- Trejo-Alonso, J., Carlos Fuentes, C., Chávez, C., Quevedo, A., Gutierrez-Lopez, A., & Brandon González-Correa, B. (2021). Saturated Hydraulic Conductivity Estimation Using Artificial Neural Networks. *Water*, 13(705). <https://doi.org/10.3390/w13050705>.
- Van Genuchten, M. Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892–898.
- Vereecken, H., Weynants, M., Javaux, M., Pachepsky, Y., Schaap, M.G. & Van Genuchten, M. Th. (2010). Using pedotransfer functions to estimate the Van Genuchten- Mualem soil hydraulic properties: a review. *Vadose Zone Journal*, 9(795). <http://dx.doi.org/10.2136/vzj2010.0045>.
- Yavari, M., Mohammadi, M.H. & Shahbazi, K. (2020). Comparison of Some Methods for Measuring Primary Soil Particle Size Distribution and Introducing Appropriate Times for the Four-Reading Method for Determining Soil Texture. *Iran Journal of Soil Water Research*, 51(12), 2999-3015. (In Persian with English abstract). DOI: 10.22059/ijswr.2020.310061.668738.
- Zhang, Y., Schaap, M.G, Guadagnini, A. & Neuman, S.P. (2016). Inverse modeling of unsaturated flow using clusters of soil texture and pedotransfer functions. *Water Resource Research*, 52, 1–14. <http://dx.doi.org/10.1002/2016WR019016>.
- Zhang, Y. & Schaap, M.G. (2017). Weighted recalibration of the Rosetta pedotransfer model with improved estimates of hydraulic parameter distributions and summary statistics (Rosetta3). *Journal of Hydrology*, 547, 39–53.

یادداشت‌ها

¹ Salahou² Garg and Gupta³ Beretta⁴ Gee and Or⁵ Salahou⁶ Garg and Gupta