

Estimation of Field Capacity and Permanent Wilting Point of Plant Using Double-Rings Data and Inverse Numerical Solution in Different Soil Textures

PARISA MASHAYEKHI*

1. Soil and Water Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Isfahan, Iran.
(Received: Feb. 13, 2021- Revised: May. 23, 2021- Accepted: June. 8, 2021)

ABSTRACT

In this study, HYDRUS-2D/3D software was used to estimate the field capacity (FC) and permanent wilting point (PWP) using double-rings infiltration data via inverse solution. For this purpose, the double rings infiltration data obtained from 95 points of different regions in Isfahan were used as model input. The studied soils were classified into seven textural classes including Sandy Loam (SL), Clay (C), Loam (L), Silty Loam (SiL), Clay Loam (CL), Silty Clay Loam (SiCL), and Silty Clay (SiC). For most soil samples, the simulated values of FC and PWP were less than the measured values. The results showed that the lowest error value in estimating FC was related to SL texture ($R^2 = 0.884$ and $RMSE = 0.021$) and the highest error value for FC estimation was related to Clay texture ($R^2 = 0.1$ and $RMSE = 0.122$). Furthermore, the lowest and the highest error values for PWP estimation were observed in Loam ($R^2 = 0.858$ and $RMSE = 0.003$) and Clay ($R^2 = 0.21$ and $RMSE = 0.025$) soils, respectively. In general, the simulation error increased with increasing clay content in the soil. The estimated PWP values were relatively more consistent than the estimated FC values with their measured values, in all soil samples. Coefficients of determination (R^2) were 0.77 and 0.80 for FC and PWP in all soils, respectively. In general, the inverse numerical solution method had acceptable accuracy for estimating FC and PWP, especially in light textured soils.

Keywords: Double Rings, HYDRUS-2D/3D, Plant Available Water, Simulation.

برآورد رطوبت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم گیاه با استفاده از داده‌های استوانه‌های دوگانه و حل عددی معکوس در بافت‌های مختلف خاک

پریسا مشایخی^۱

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

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۵ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۳/۲ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۳/۱۸)

چکیده

در این پژوهش از نرم‌افزار HYDRUS- 2D/3D برای برآورد نقاط ظرفیت زراعی (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) با استفاده از رویکرد حل معکوس، استفاده شد. برای این منظور، داده‌های نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده به روش استوانه‌های دوگانه در ۹۵ نقطه از مناطق مختلف استان اصفهان به عنوان ورودی مدل مورد استفاده قرار گرفت. خاک‌های مورد مطالعه در هفت کلاس بافتی شامل لوم‌شنی (SL)، رسی (C)، لوم (L)، لوم سیلتی (SiL)، لوم رسی (CL)، لوم رس سیلتی (SiCL) و رس سیلتی (SiC) قرار گرفتند. در اکثر نمونه‌ها مقادیر شبیه‌سازی شده FC و PWP کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده آنها بود. نتایج نشان داد که کمترین میزان خطا در برآورد نقاط FC مربوط به بافت SL ($R^2 = 0/884$ و $RMSE = 0/021$) و بیشترین خطای برآورد FC مربوط به بافت C ($R^2 = 0/1$ و $RMSE = 0/122$) بود. همچنین کمترین خطای برآورد نقاط PWP مربوط به بافت L ($R^2 = 0/858$ و $RMSE = 0/03$) و بیشترین خطای برآورد PWP مربوط به بافت C ($R^2 = 0/21$) و $RMSE = 0/25$ بود. در کل میزان خطای شبیه‌سازی با افزایش میزان رس در خاک و سنگین تر شدن بافت خاک افزایش پیدا کرد. همچنین در همه خاک‌ها مقادیر PWP شبیه‌سازی شده نسبت به مقادیر FC شبیه‌سازی شده، همخوانی نسبتاً بیشتری با مقادیر اندازه‌گیری شده آنها داشت. مقادیر ضریب تبیین برای FC و PWP در همه خاک‌ها به ترتیب معادل $0/77$ و $0/80$ بود. در کل روش حل عددی معکوس از دقت قابل قبولی برای برآورد FC و PWP به ویژه در خاک‌های دارای بافت سبک برخوردار بود.

واژه‌های کلیدی: آب قابل استفاده گیاه، استوانه‌های دوگانه، شبیه‌سازی، نرم‌افزار HYDRUD-2D/3D

مقدمه

ویژگی‌ها برای برنامه‌ریزی و طراحی سیستم‌های مختلف آبیاری، برآورد آب قابل دسترس گیاه و تعیین عمق آبیاری برای زراعت و مدیریت زراعی هستند. (Novák & Havrila, 2006). ظرفیت زراعی آب باقیمانده در خاک پس از زهکشی خاک اشباع توسط نیروی جاذبه زمین است، که در این نقطه رطوبتی سرعت حرکت رو به پایین آب در خاک به یک مقدار حدقلی می‌رسد (Silva *et al.*, 2014). PWP به محتوای آب خاک گفته می‌شود که به شدت توسط ماتریس خاک حفظ می‌شود به طوری که ریشه‌ها نمی‌توانند آن را جذب کنند و گیاه پژمرده شده و دیگر نمی‌تواند شادابی خود را بازیابد (Dobarco *et al.*, 2019). 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

جریان غیر اشباع آب در خاک از اهمیت زیادی در حل مسایل مربوط به آبیاری و زهکشی، هیدرولوژی و حرکت املاح در خاک برخوردار است؛ بنابراین توصیف و شبیه‌سازی ویژگی‌های منطقه غیر اشباع خاک برای درک این مسایل ضروری است. از ویژگی‌های مهم در بخش غیراشباع خاک، منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیراشباع هستند که بیان ریاضی آنها برای استفاده در مدل‌سازی جریان آب و املاح در خاک ضروری است. پیش‌بینی رفتار هیدرولوژیکی و مکانیکی منطقه غیر اشباع معمولاً مستلزم آن است که توابع هدایت هیدرولیکی و منحنی مشخصه رطوبتی در یک دامنه وسیع از درجه اشباع به خوبی اندازه‌گیری شوند (Bahrami *et al.*, 2020). از جمله نقاط بسیار مهم در منحنی مشخصه رطوبتی میزان رطوبت موجود در ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم گیاه است. این دو ویژگی هنوز هم از پرکاربردترین

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 غیرخطی منحنی مشخصه رطوبتی و نیز هدایت هیدرولیکی، اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در مقیاس آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های کوچک خاک، به هیچ عنوان قادر به توصیف دقیق این ویژگی‌ها در مقیاس‌های بزرگتر مکانی در خاک نخواهند بود (Scell *et al.*, 2012; Lai and Ren, 2016). در نتیجه، روش‌های غیرمستقیم برای به دست آوردن پارامترهای هیدرولیکی خاک محبوبیت یافتند (Rucker, 2011, Mashayekhi *et al.*, 2017). از جمله روش‌های غیر مستقیم برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک، روش حل عددی معکوس است. این روش شامل محاسبات متعددی است که در آن پارامترها به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که پیش‌بینی‌های مدل به اندازه کافی با داده‌های اندازه‌گیری‌شده مطابقت داشته باشند (Šimůnek *et al.*, 2012). در این فرآیند، ابتدا یک مدل پارامتری برای نشان دادن ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در نظر گرفته می‌شود. فرآیند حل معکوس با حدس‌های اولیه از پارامترها شروع شده و به کمک یک مدل عددی که جریان آب در خاک را توصیف می‌کند، ویژگی‌های جریان محاسبه می‌شود. سپس یک روش بهینه‌سازی برای تنظیم پارامترها برای حداقل کردن تفاوت بین ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده و برآوردشده استفاده می‌شود (Minasny and McBratney, 2002). این روش برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی نسبت به سایر روش‌ها از جمله توابع انتقالی خاک (PTF) از دقت بسیار بیشتری برخوردار است؛ زیرا پارامترهای بهینه شده مستقیماً از داده‌های اندازه‌گیری‌شده برای یک مسئله خاص هیدرولوژیکی خاک برآورد می‌شوند (Kirkham *et al.*, 2019). پژوهش‌های مختلف نشان داده است که ویژگی‌های هیدرولیکی که به صورت معکوس از طریق اندازه‌گیری‌های درجا شامل اندازه‌گیری رطوبت خاک و یا پتانسیل ماتریک در شرایط واقعی برآورد می‌شوند، بسیار بهتر از اندازه‌گیری‌های انجام شده در مقیاس آزمایشگاهی و توابع انتقالی، شرایط جریان آب در خاک را توصیف می‌کنند (Vereecken *et al.*, 2010 و Gribb *et al.*, 2009). از آنجا که اندازه‌گیری برخی فرآیندهای جریان مانند نفوذ تجمعی یا تغییرات میزان آب خاک نسبت به سایر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، آسان‌تر است، پژوهشگران مختلف برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک از داده‌های نفوذ تجمعی اندازه‌گیری‌شده به روش‌های مختلف در حل روش‌های عددی معکوس استفاده کرده‌اند. به عنوان مثال (Raof and Pilpayeh (2013) از داده‌های اندازه‌گیری‌شده به وسیله نفوذسنج دیسکی (مکشی) (Tension/Disk

مشایخی: برآورد رطوبت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم گیاه ... ۱۷۵۵

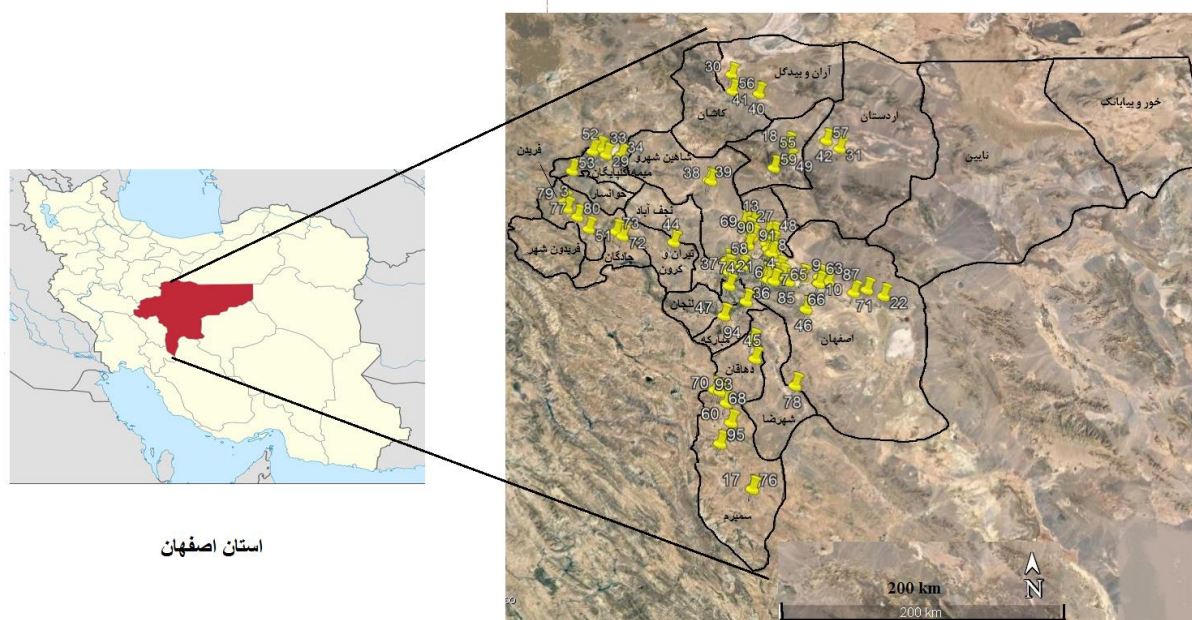
اندازه‌گیری شده به وسیله نفوذسنج مخروطی (Cone permeameter) و Mashayekhi *et al.* (2017) از داده‌های نفوذ استوانه‌های دوگانه برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی استفاده کردند. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، روش‌های مستقیم به دست آوردن منحنی مشخصه رطوبتی خاک (SWCC) در آزمایشگاه به کمک دستگاه‌های جعبه شن و صفحه فشار انجام می‌شود که زمان‌بر بوده و SWCC را در مسیر خشک شدن خاک اندازه‌گیری می‌کنند. ضمن این‌که نمونه برداشت‌شده توسط سیلندر معمولاً کوچک بوده و همان‌طور که قبلاً اشاره شد، نمی‌تواند تغییرپذیری ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در مقیاس صحرایی را پوشش دهد. افزون بر این‌ها، با وجود تلاش برای برداشت نمونه‌ی دست‌نخورده توسط سیلندر نمونه‌برداری، باز هم نمونه برداشت‌شده از نظر توزیع اندازه منافذ، دقیقاً شرایط طبیعی خود را نخواهد داشت. یکی از روش‌های استاندارد در اندازه‌گیری نفوذ آب به خاک روش استوانه‌های دوگانه است. در این روش نفوذ آب به خاک در شرایط طبیعی و بدون دستخوردگی خاک قابل اندازه‌گیری است. هدف از انجام این پژوهش، بررسی امکان استفاده از داده‌های مربوط به نفوذ تجمعی اندازه‌گیری‌شده به روش نفوذسنج‌های استوانه-دوگانه در برآورد نقاط FC و PWP در شرایط طبیعی خاک و در مسیر ترشدن، با کمک نرم‌افزار هایدروس (HYDRUS) (Šimůnek *et al.*, 1999) می‌باشد.

مواد و روش‌ها

جمع‌آوری داده‌ها: برای انجام پژوهش حاضر، داده‌های نفوذ تجمعی به دست آمده از آزمایش نفوذسنج‌های استوانه‌های دوگانه مربوط به نقاط مختلف استان اصفهان جمع‌آوری شد. این داده‌ها حاصل از مطالعات خاکشناسی صورت گرفته در این مناطق بود که عمدتاً در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان در طی ده سال اخیر انجام شده است. قطر استوانه‌های داخلی و خارجی مورد استفاده در این مطالعات به ترتیب معادل ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متر بود که به صورت متحدالمرکز تا عمق حدود ۳۰ سانتی-متر در خاک کوبیده شدند. ارتفاع ثابت آب در داخل استوانه‌ها در طول مدت آزمایش برابر ۱۰ سانتی‌متر بود. آزمایش‌های نفوذ تا زمانی ادامه یافتند که طی چندین قرائت متوالی (حداقل ۳ قرائت) شدت نفوذ تقریباً ثابت شده باشد یعنی نفوذ آب به خاک تقریباً به حالت ماندگار رسیده باشد (Mirzaee *et al.*, 2014). همچنین در هر نقطه که آزمایش اندازه‌گیری نفوذ آب به خاک از طریق استوانه‌های دوگانه انجام گرفته بود نمونه خاک در سه تکرار از عمق ۰ تا ۳۰ سانتیمتری برداشت شده و

(Klute, 1986). همچنین جرم مخصوص ظاهری از طریق نمونه- برداری با سیلندر نمونه برداری با ارتفاع ۴ و قطر ۳/۵ سانتی متر (Blake and Hartge, 1986) از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی متر در سه تکرار برای هر منطقه اندازه گیری شد. شکل (۱) پراکنش جغرافیایی نقاط مورد مطالعه را نشان می دهد. محدوده تغییرات برخی ویژگی های فیزیکی خاک های مورد پژوهش در جدول (۱) ارائه شده است. همان طور که مشخص است خاک های مورد مطالعه از نظر ویژگی های اندازه گیری شده در محدوده نسبتا وسیعی قرار داشتند. همچنین مقادیر مربوط به چولگی (Skewness) و کشیدگی (Kurtosis) داده ها که در تمام موارد بین ۲- تا ۲ قرار دارند، نشان می دهد که همگی ویژگی های اندازه گیری شده دارای توزیع نرمال بوده اند.

برای اندازه گیری بافت به روش هیدرومتر (Klute, 1986) و FC و PWP با استفاده از دستگاه صفحات فشاری اندازه گیری شد. برای اندازه گیری PWP، نمونه های خاک از الک دو میلی متری رد شده و در سیلندرهایی مخصوص دستگاه ریخته شد و برای FC نمونه های دست نخورده توسط سیلندرها در هر نقطه برداشته شد. سپس سیلندرهایی حاوی نمونه های خاک برای مدت ۲۴ ساعت با آب اشباع شدند. سیلندرهایی حاوی نمونه های اشباع خاک به دستگاه صفحات فشاری انتقال داده شد و برای به دست آوردن مقادیر FC و PWP به ترتیب فشارهای ۳۰۰ و ۱۵۰۰۰ بر روی نمونه اعمال شد. پس از ایجاد تعادل (زمانی که برای مدت دو تا سه روز هیچ آبی از دستگاه دفع نمی شد) نمونه ها از دستگاه خارج شده و مقدار رطوبت در هر نمونه به روش وزنی اندازه گیری شد



شکل ۱- پراکنش مناطق مطالعاتی دارای داده های نفوذ در استان اصفهان

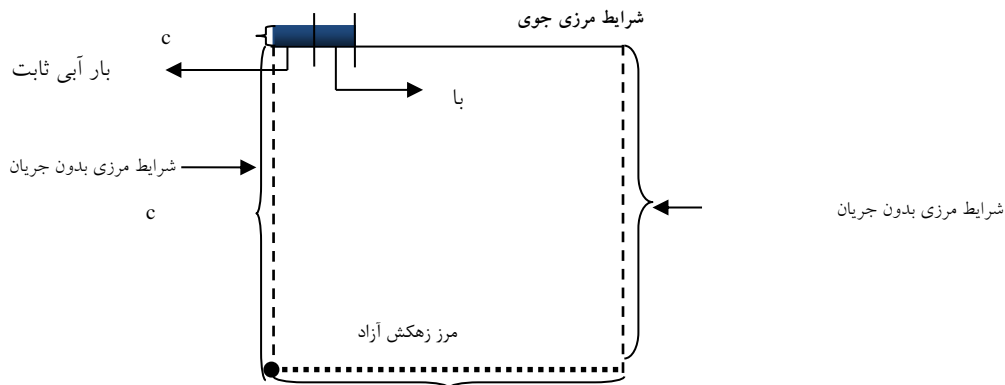
جدول ۱- دامنه تغییرات برخی ویژگی های فیزیکی در خاک های مورد مطالعه

ویژگی خاک	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	میانه	چولگی داده ها	کشیدگی داده ها
شن (%)	۵/۰	۷۸/۰	۲۸/۰۷	۱۷/۰۶	۳۴	۰/۸۱۴	-۰/۳۱۳
سیلت (%)	۱۳/۰	۶۶/۰	۴۲/۳۱	۱۰/۹۴	۴۰	۰/۲۶۵	-۰/۸۵۵
رس (%)	۹/۰	۶۰/۰	۲۹/۵۹	۱۲/۶۵	۲۹	-۰/۱۳۴	۰/۳۸۶
میانگین هندسی ذرات (mm)	۰/۰۰۵	۰/۲۱	۰/۰۴۶	۰/۰۵۰	۰/۰۲۴	۱/۷۷۴	۲/۰۱
انحراف معیار هندسی ذرات	۷/۱۲	۱۸/۵۱	۱۱/۵۸	۲/۶۵	۱۱/۹۵	۰/۲۴۷	-۰/۵۲۴
جرم مخصوص ظاهری (gcm ⁻³)	۰/۹۴	۱/۷۱	۱/۳۹	۰/۱۷	۱/۳۸	-۰/۵۳۱	۰/۵۴۵
نقطه ظرفیت زراعی (FC) (cm ³ cm ⁻³)	۰/۱۰۲	۰/۵۳۳	۰/۳۲۹	۰/۰۹۴	۰/۳۲۲	۰/۰۲۸	-۰/۱۶۸۷
نقطه پژمردگی دائم (PWP) (cm ³ cm ⁻³)	۰/۰۵۶	۰/۲۸۵	۰/۱۶۹	۰/۰۵۹	۰/۱۷۶	-۰/۰۴۵	-۱/۰۷۱

این منظور محدوده خاک زیر استوانه های-دوگانه به صورت یک ناحیه متقارن حول محوری به مرکزیت استوانه داخلی در نظر گرفته شد. شعاع استوانه های داخلی و خارجی به ترتیب ۱۵ و ۳۰ سانتی متر، عمق جای گذاری استوانه ها در خاک ۱۰ سانتی متر و

شبیه سازی شرایط آزمایش استوانه های دوگانه در-HYDRUS 2D/3D در این پژوهش از نرم افزار HYDRUS-2D/3D برای شبیه سازی نفوذ آب به خاک در آزمایش استوانه های دوگانه استفاده شد. برای

استوانه‌ها به صورت اتمسفری (Atmospheric boundary)، تعریف شد. همچنین دیواره استوانه‌ها شرایط بدون جریان (No flux) و برای مرز پایینی (عمق خاک) زهکشی آزاد (Free drainage) تعریف شد (شکل ۲). شرایط اولیه برای شبیه‌سازی حرکت آب در خاک نیز، بر اساس پتانسیل ماتریک تعریف شد.



شکل ۲- شبیه‌سازی آزمایش استوانه‌های دوگانه در محیط HYDRUS-2D/3D

واحد) به ترتیب هدایت هیدرولیکی غیراشباع، درجه اشباع مؤثر و پارامتر اعوجاج منافذ خاک است. بر اساس پژوهش‌های انجام شده، روش‌های حل عددی معکوس نسبت به تعداد پارامتر ورودی حساس بوده و با کاهش تعداد پارامترهای بهینه‌سازی دقت شبیه‌سازی افزایش می‌یابد. بر اساس پژوهش‌های انجام شده توسط مشایخی و همکاران (۲۰۱۶)، مشخص شد که از بین پارامترهای معادله ونگن‌اختن، در نفوذ آب به خاک در آزمایش استوانه‌های دوگانه، پارامترهای K_s ، n و α از حساسیت بسیار بیشتری در فرآیند شبیه‌سازی برخوردار هستند؛ به همین دلیل در این پژوهش برای انجام شبیه‌سازی نفوذ آب به خاک پارامتر l بر اساس منابع برابر 0.5 در نظر گرفته شد، همچنین رطوبت باقیمانده (θ_r) و رطوبت اشباع (θ_s) در مقادیری که توسط برنامه ROSETTA با توجه به بافت و چگالی ظاهری برای هر نوع خاک تخمین زده شد، ثابت در نظر گرفته شدند و تنها پارامترهای K_s ، n و α وارد فرآیند شبیه‌سازی شدند. در پایان مقادیر FC و PWP با استفاده از پارامترهای بهینه‌سازی شده معادله ونگن‌اختن برآورد شدند.

ارزیابی‌های آماری

برای ارزیابی مقادیر FC و PWP برآورد شده به روش حل عددی معکوس از شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و خطای بایاس میانگین (MBE) استفاده

عمق خاک ۱۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. شرط مرز ورودی برای استوانه‌های درونی و خارجی، بار آبی ثابت (Constant head) ارتفاع آب روی سطح خاک برابر ۱۰ سانتی‌متر) در نظر گرفته شد که برای استوانه درونی ثابت و برای استوانه بیرونی با گذشت زمان متغیر (Variable head) و با تغییر جزئی (نزدیک به صفر) بود. شرایط مرزی برای محدوده سطح خاک در خارج از

در این نرم‌افزار تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک با استفاده از حل عددی مکرر معادله ریچاردز به روش معکوس انجام می‌شود. معادله ریچاردز برای جریان آب در خاک به شکل زیر است (Richards, 1931):

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla [K(h) \nabla (h + z)] \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این معادله $C(h)$ به گنجایش ویژه رطوبتی خاک [L^{-1}] معروف است و نشان‌دهنده‌ی شیب منحنی نگهداشت آب خاک (SWCC) است. h بار ماتریک آب خاک (پتانسیل ماتریک) [L^{-1}] می‌باشد. t زمان [T]، K هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک [L]، z نشان‌دهنده بار ثقلی [L] است. مدل منحنی مشخصه رطوبتی ونگن‌اختن و مدل هدایت هیدرولیکی ونگن‌اختن - معلم (Mualem, 1976; Van Genuchten, 1980) با فرض $m=1-1/n$ که به ترتیب به شکل زیر هستند، برای کمی‌نمودن ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در معادله ریچاردز استفاده شد:

(رابطه ۲)

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

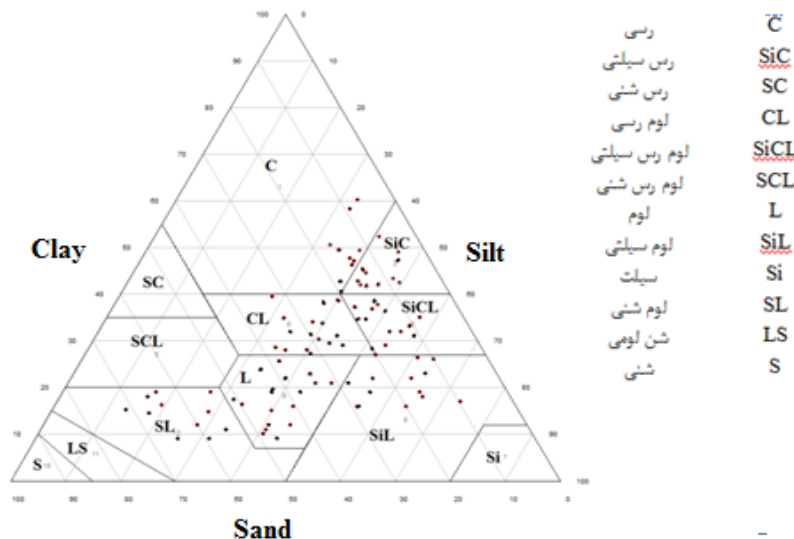
$$K(S_e) = K_s S_e^l [1 + (1 - S_e^{1/(1-1/n)})^{(1-1/n)}]^2 \quad (\text{رابطه ۳})$$

در روابط فوق $\theta(h)$ ، θ_r ، θ_s و θ_s ($L^3 L^{-3}$) به ترتیب رطوبت در مکش ماتریک h ، رطوبت باقی‌مانده و رطوبت اشباع، α و n پارامترهای شکل، $K(S_e)$ (LT^{-1}) و l (بدون

اندازه‌گیری شده، I_i میزان نفوذ تجمعی شبیه‌سازی شده است.

نتایج و بحث

خاک مناطق مورد مطالعه بر اساس سیستم طبقه‌بندی وزارت کشاورزی آمریکا (USDA)، در هفت گروه بافتی شامل ۱۵ نمونه بافت CL، ۱۲ نمونه بافت SiC، ۱۳ نمونه بافت SL، ۱۸ نمونه بافت L، ۱۱ نمونه بافت C، ۱۴ نمونه بافت SiCL و ۱۲ نمونه بافت SiL (در مجموع ۹۵ نمونه خاک) قرار گرفتند (شکل ۳).



شکل ۳- توزیع بافتی خاک افق سطحی در مناطق مورد مطالعه

محدوده مقادیر FC و PWP اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه به کمک دستگاه صفحات فشاری و مقادیر برآورد شده به کمک نرم‌افزار HYDRUS-2D/3D و با استفاده از داده‌های نفوذسنج دوگانه، به تفکیک بافت خاک، در جدول (۲) ارائه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده در خاک‌های مورد مطالعه در نقاط FC و PWP با سنگین شدن بافت خاک افزایش پیدا می‌کند. به بیان دیگر میزان نگهداشت آب در خاک در فشارهای مختلف با سنگین شدن بافت خاک افزایش می‌یابد. بیشترین میانگین FC و PWP اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده مربوط به خاک رسی و کمترین مقادیر مربوط به خاک لوم شنی بوده است (جدول ۲).

نتایج مقایسه‌های آماری بین داده‌های FC و PWP شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده برای بافت‌های متفاوت در جدول (۳) ارائه شده است.

مقادیر مثبت و منفی معیار خطای بایاس میانگین (MBE) به ترتیب نشان‌دهنده بیشتر و یا کمتر بودن مقادیر شبیه‌سازی شده نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده است. بنابراین با توجه به مقادیر پارامتر (MBE)، در همه بافت‌های مورد مطالعه، مقادیر

شد. هرکدام از این آماره‌ها به صورت زیر قابل محاسبه هستند:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (I_i - \hat{I}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (I_i - \bar{I})^2} \quad \text{(رابطه ۴)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I_i - \hat{I}_i)^2}{N}} \quad \text{(رابطه ۵)}$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (I_i - \hat{I}_i)}{N} \quad \text{(رابطه ۶)}$$

در این روابط N تعداد مشاهدات، I_i میزان نفوذ تجمعی

FC و PWP اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه به کمک دستگاه صفحات فشاری و مقادیر برآورد شده به کمک نرم‌افزار HYDRUS-2D/3D و با استفاده از داده‌های نفوذسنج دوگانه، به تفکیک بافت خاک، در جدول (۲) ارائه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده در خاک‌های مورد مطالعه در نقاط FC و PWP با سنگین شدن بافت خاک افزایش پیدا می‌کند. به بیان دیگر میزان نگهداشت آب در خاک در فشارهای مختلف با سنگین شدن بافت خاک افزایش می‌یابد. بیشترین میانگین FC و PWP اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده مربوط به خاک رسی و کمترین مقادیر مربوط به خاک لوم شنی بوده است (جدول ۲).

نتایج مقایسه‌های آماری بین داده‌های FC و PWP شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده برای بافت‌های متفاوت در جدول (۳) ارائه شده است.

مقادیر مثبت و منفی معیار خطای بایاس میانگین (MBE) به ترتیب نشان‌دهنده بیشتر و یا کمتر بودن مقادیر شبیه‌سازی شده نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده است. بنابراین با توجه به مقادیر پارامتر (MBE)، در همه بافت‌های مورد مطالعه، مقادیر

جدول ۲- دامنه تغییرات مقادیر FC و PWP اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در خاک‌های مورد مطالعه

میانگین	انحراف معیار	میانگین	حداقل	حداکثر	ویژگی (V/V)	تعداد نمونه خاک	بافت خاک
۰/۳۷۶	۰/۰۴۵	۰/۳۶۰	۰/۲۹۷	۰/۴۵۹	FC _m *	۱۵	لوم رسی (CL)
۰/۲۹۲	۰/۰۴۰	۰/۲۹۴	۰/۲۲۸	۰/۳۸	FC _s **		
۰/۱۷۶	۰/۰۲۱	۰/۱۸۷	۰/۱۴۳	۰/۲۲۵	PWP _m		
۰/۱۴۰	۰/۰۱۸	۰/۱۴۴	۰/۱۱	۰/۱۹	PWP _s		
۰/۴۲	۰/۰۹۴	۰/۴۰۱	۰/۲۰۷	۰/۵۰۷	FC _m	۱۲	رس سیلتی (SiC)
۰/۳۱۵	۰/۰۵۳	۰/۳۲۲	۰/۲۴۸	۰/۴۵۱	FC _s		
۰/۲۱۳	۰/۰۴۸	۰/۲۲۳	۰/۰۹۴	۰/۲۷۳	PWP _m		
۰/۱۸۵	۰/۰۴۴	۰/۱۸۰	۰/۱۳۹	۰/۲۷۲	PWP _s		
۰/۲۱	۰/۰۴۴	۰/۱۹۴	۰/۱۲۷	۰/۳۱۷	FC _m	۱۳	لوم شنی (SL)
۰/۱۸۹	۰/۰۴۴	۰/۱۸۲	۰/۱۱۹	۰/۲۹	FC _s		
۰/۰۹۴	۰/۰۱۷	۰/۰۹۱	۰/۰۶۶	۰/۱۲۴	PWP _m		
۰/۰۹۰	۰/۰۲۱	۰/۰۸۳	۰/۰۵۰	۰/۱۴۱	PWP _s		
۰/۲۵۲	۰/۰۶۶	۰/۲۵۴	۰/۱۶۰	۰/۳۹۹	FC _m	۱۸	لوم (L)
۰/۲۲۸	۰/۰۴۹	۰/۲۳۳	۰/۱۶۹	۰/۳۴۴	FC _s		
۰/۱۰۷	۰/۰۴۱	۰/۱۲۱	۰/۰۶۶	۰/۱۹۶	PWP _m		
۰/۱۰۰	۰/۰۳۴	۰/۱۰۹	۰/۰۶۰	۰/۱۷۷	PWP _s		
۰/۴۲۸	۰/۰۵۰	۰/۴۶۰	۰/۳۶۲	۰/۵۳۳	FC _m	۱۱	رسی (C)
۰/۳۵۲	۰/۰۲۱	۰/۳۵۱	۰/۳۱۸	۰/۳۹۰	FC _s		
۰/۲۵۰	۰/۰۲۲	۰/۲۵۰	۰/۲۱۱	۰/۲۸۵	PWP _m		
۰/۲۰۰	۰/۰۳۰	۰/۲۰۶	۰/۱۷۰	۰/۲۹۰	PWP _s		
۰/۳۰۰	۰/۰۴۷	۰/۳۱۲	۰/۱۶۸	۰/۳۷۹	FC _m	۱۴	لوم رس سیلت (SiCL)
۰/۲۵۱	۰/۰۵۰	۰/۲۵۷	۰/۱۳۰	۰/۳۵۲	FC _s		
۰/۱۲۴	۰/۰۴۳	۰/۱۷۶	۰/۰۵۶	۰/۲۵۷	PWP _m		
۰/۱۲۵	۰/۰۲۷	۰/۱۳۶	۰/۰۵۷	۰/۱۷۵	PWP _s		
۰/۳۰۰	۰/۰۸۸	۰/۳۰۶	۰/۱۰۲	۰/۳۹۲	FC _m	۱۲	لوم سیلت (SiL)
۰/۲۶۹	۰/۰۶۵	۰/۲۷۰	۰/۱۴۰	۰/۳۷۱	FC _s		
۰/۱۴۷	۰/۰۵۸	۰/۱۵۱	۰/۰۶۲	۰/۲۶۳	PWP _m		
۰/۱۳۰	۰/۰۷۰	۰/۱۴۹	۰/۰۶۷	۰/۲۹۳	PWP _s		

*m: اندازه‌گیری شده **s: شبیه‌سازی شده

جدول ۳- مقایسه آماری مقادیر FC و PWP اندازه‌گیری شده در خاک و شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار HYDRUS-2D/3D

رتبه نهایی	مجموع رتبه‌ها	MBE (cm ³ cm ⁻³)	RMSE (cm ³ cm ⁻³)	R ²	تعداد خاک	بافت خاک
FC						
۴	۱۳	(۵)-/۰/۰۶۷	(۵)/۰/۰۷۰	۰/۷۴۶*(۳)	۱۵	لوم رسی (CL)
۲	۶	(۲)-/۰/۰۲۱	(۲)/۰/۰۴۰	۰/۷۶۳*(۲)	۱۸	لوم (L)
۵	۱۸	(۶)-/۰/۰۷۹	(۶)/۰/۱۰۹	۰/۳۴۵*(۶)	۱۲	رس سیلتی (SiC)
۶	۲۱	(۷)-/۰/۱۰۹	(۷)/۰/۱۲۲	۰/۱*(۷)	۱۱	رسی (C)
۱	۳	(۱)-/۰/۰۱۲	(۱)/۰/۰۲۱	۰/۸۴۴*(۱)	۱۳	لوم شنی (SL)
۴	۱۳	(۴)-/۰/۰۵۴	(۴)/۰/۰۶۴	۰/۵۷۱*(۵)	۱۴	لوم رس سیلت (SiCL)
۳	۱۰	(۳)-/۰/۰۳۶	(۳)/۰/۰۶۲	۰/۶۸*(۴)	۱۲	لوم سیلت (SiL)
		-/۰/۰۵۱	۰/۰/۰۷۴	۰/۷۷۱	۹۵	همه بافت‌ها
PWP						
۴	۱۲	(۵)-/۰/۰۴۴	(۲)/۰/۰۰۵	۰/۴۶۱*(۵)	۱۵	لوم رسی (CL)
۱	۵	(۳)-/۰/۰۱۲	(۱)/۰/۰۰۳	۰/۸۵۸*(۱)	۱۸	لوم (L)
۵	۱۵	(۵)-/۰/۰۴۴	(۴)/۰/۰۱۵	۰/۳۶۸*(۶)	۱۲	رس سیلتی (SiC)
۶	۱۹	(۶)-/۰/۰۴۵	(۶)/۰/۰۲۵	۰/۲۱*(۷)	۱۱	رسی (C)
۲	۸	(۲)-/۰/۰۰۸	(۳)/۰/۰۱۴	۰/۷۱۳*(۳)	۱۳	لوم شنی (SL)
۳	۱۰	(۴)-/۰/۰۳۹	(۲)/۰/۰۰۵	۰/۵۸۲*(۴)	۱۴	لوم رس سیلت (SiCL)
۲	۸	(۱)-/۰/۰۰۲	(۵)/۰/۰۲۱	۰/۷۸۹*(۲)	۱۲	لوم سیلت (SiL)
		-/۰/۰۲۶	۰/۰/۰۱۰	۰/۷۹۸	۹۵	همه بافت‌ها

*رتبه از نظر آماره مورد بررسی

موجود در خاک دارای خاصیت انبساط و انقباض هستند و همین انبساط و انقباض در حین خیس و خشک شدن خاک سبب تغییر

دلیل این‌که سنگین‌تر شدن بافت خاک باعث افزایش خطای برآورد در فرآیند مدل‌سازی می‌شود این است که ذرات رس

در ناحیه غیراشباع منحنی مشخصه رطوبتی واقع شده که دارای پتانسیل ماتریک نسبتاً زیادی است و تحت تاثیر بافت، ساختمان، توزیع و پیوستگی منافذ خاک قرار دارد. در حالی که نقطه PWP در نزدیکی قسمت رطوبت باقی مانده و با پتانسیل ماتریک بسیار منفی بوده و غالباً تحت تاثیر بافت خاک قرار دارد و از آنجا که به پیاده سازی شرایط آزمایش در محیط نرم افزار، تنها بافت خاک به عنوان یکی از ورودی‌ها تعریف شده و ساختمان خاک و نیز توزیع منافذ در نظر گرفته نمی‌شود، مقادیر PWP با دقت بیشتری تخمین زده می‌شوند.

از آنجا که در بیشتر مطالعات آبیاری هدف از اندازه‌گیری FC و PWP، به دست آوردن میزان آب قابل استفاده گیاه است؛ بنابراین در این پژوهش مقادیر آب قابل استفاده گیاه که حاصل تفاضل مقادیر PWP از FC است نیز بیان شده است. جدول (۴) نتایج مقایسه‌های آماری بین داده‌های آب قابل استفاده شبیه سازی شده (حاصل تفاضل مقادیر FC و PWP برآورد شده به روش حل معکوس در محیط نرم افزار HYDRUS-2D/3D) و اندازه گیری شده (حاصل تفاضل مقادیر FC و PWP اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه به وسیله دستگاه صفحات فشاری) برای بافت‌های متفاوت را نشان می‌دهد.

اندازه منافذ خاک و نحوه توزیع آن‌ها در خاک می‌شود. حتی در برخی موارد به ویژه در بافت رسی منجر به ایجاد درز و ترک و به وجود آمدن جریان‌های ترجیحی در خاک می‌شوند. از آنجا که این درز و ترک‌ها و جریان‌ات ترجیحی در بسیاری از معادلات و مدل‌ها در نظر گرفته نمی‌شود، همین امر باعث افزایش خطا در فرآیند مدلسازی در خاک‌های با بافت ریز نسبت به خاک‌های درشت بافت می‌شود.

در مورد مقادیر PWP شبیه‌سازی شده کمترین مقادیر خطای شبیه‌سازی در بافت L (مقادیر R^2 و RMSE به ترتیب معادل ۰/۸۵۸ و ۰/۰۰۳) و بعد از آن در بافت‌های SiL و SL مشاهده شد. در اینجا هم مشابه FC بیشترین خطای شبیه‌سازی مربوط به بافت رسی بوده است (مقادیر R^2 و RMSE به ترتیب معادل ۰/۲۱ و ۰/۰۲۵) (جدول ۲). نکته جالب توجه این که بر اساس مقادیر به دست آمده برای آماره‌های مورد بررسی به ویژه مقادیر RMSE و MBE، به نظر می‌رسد در کل خطای شبیه‌سازی در برآورد PWP کمتر از FC بوده است و به بیان دیگر مدل مقادیر PWP را با دقت بیشتری نسبت به مقادیر FC برآورد نموده است. این امر می‌تواند به دلیل وابستگی بیشتر مقادیر PWP به بافت خاک نسبت به FC باشد. در منحنی مشخصه رطوبتی، نقطه FC

جدول ۴- نتایج مقایسه‌های آماری مقادیر آب قابل استفاده گیاه اندازه‌گیری شده در خاک و شبیه‌سازی شده توسط نرم افزار HYDRUS-2D/3D

رتبه نهایی	مجموع رتبه‌ها	MBE ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	RMSE ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	R^2	تعداد خاک	بافت خاک
آب قابل استفاده گیاه						
۶	۱۵	(۴)-۰/۰۲۳	(۴)۰/۰۳۹	* (۷)۰/۳۳۱	۱۵	لوم رسی (CL)
۲	۸	(۲)-۰/۰۰۹	(۲)۰/۰۲۸	(۴)۰/۷۰۶	۱۸	لوم (L)
۵	۱۴	(۶)-۰/۰۳۵	(۶)۰/۰۶۱	(۲)۰/۷۷۲	۱۲	رس سیلتی (SiC)
۷	۱۹	(۷)-۰/۰۶۴	(۷)۰/۰۷۱	(۵)۰/۵۶۲	۱۱	رسی (C)
۱	۳	(۱)-۰/۰۰۳	(۱)۰/۰۲۰	(۱)۰/۷۹۵	۱۳	لوم سنی (SL)
۳	۱۲	(۳)-۰/۰۱۵	(۳)۰/۰۳۱	(۶)۰/۴۹۶	۱۴	لوم رس سیلت (SiCL)
۴	۱۳	(۵)-۰/۰۳۴	(۵)۰/۰۴۸	(۳)۰/۷۴۶	۱۲	لوم سیلت (SiL)

*رتبه از نظر آماره مورد بررسی

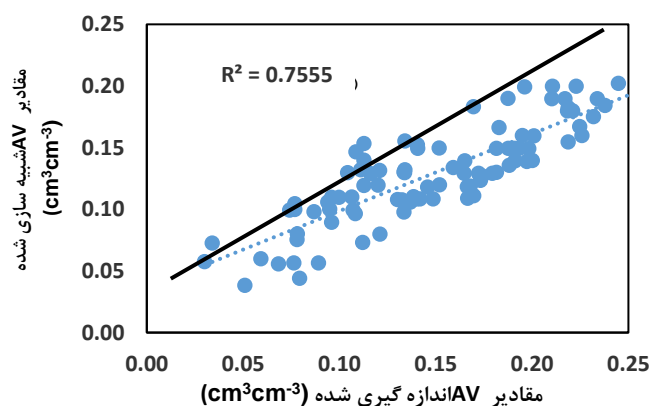
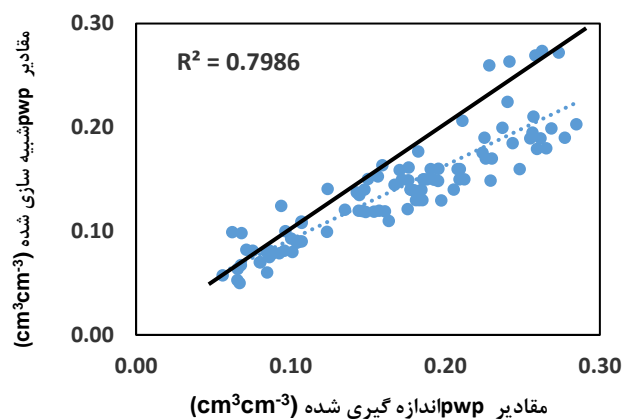
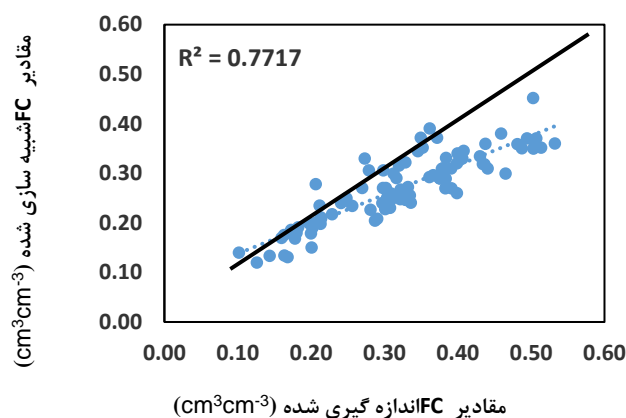
نقاط FC و PWP از خط یک به یک بیشتر شده است. در واقع با افزایش میزان رطوبت که نشان‌دهنده سنگین تر شدن بافت خاک است، خطای شبیه‌سازی افزایش پیدا کرده است. دلیل این موضوع همان‌طور که قبلاً گفته شد، در نظر نگرفتن درز و ترک در نتیجه انبساط و انقباض ذرات رس در بافت‌های سنگین است که در شرایط مدل‌سازی اعمال نمی‌شود. نقاط آب قابل استفاده گیاه از پراکندگی بهتری حول خط یک به یک نسبت به FC و PWP برخوردار بوده‌اند، با این وجود در همه موارد عمدتاً مقادیر FC، PWP و AV شبیه‌سازی شده کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده بوده است و در واقع مدل کم برآورد بوده است. اختلاف بین مقادیر

همان‌گونه که انتظار می‌رفت، بیشترین خطای شبیه‌سازی برای برآورد آب قابل استفاده گیاه مربوط به خاک رسی و کمترین خطای شبیه‌سازی مربوط به خاک SL بوده است.

شکل (۴) پراکنش مقادیر FC، PWP و آب قابل استفاده گیاه اندازه‌گیری شده و برآورد شده در اطراف خط یک به یک را برای خاک‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۴)، همبستگی نسبتاً خوبی بین مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در نقاط FC، AV و به ویژه PWP وجود داشته است (مقادیر R^2 به ترتیب معادل ۰/۷۷۱۷، ۰/۷۵۵۵ و ۰/۷۹۸۶ بوده است). همچنین با افزایش میزان رطوبت در خاک، فاصله

شدن خاک اندازه‌گیری می‌شوند؛ در حالی که در حین نفوذ آب به خاک در آزمایش استوانه‌های دوگانه، خاک در حال خیس شدن است و در واقع مقادیر FC و PWP برای خاک در حین خیس شدن برآورد می‌شوند.

اندازه‌گیری شده و برآورد شده این نقاط از منحنی رطوبتی به دلیل تفاوت در روش اندازه‌گیری آنها است. بدین معنی که در روش اندازه‌گیری مستقیم در آزمایشگاه نمونه‌های خاک در دستگاه صفحات فشاری تحت فشار مورد نظر قرار گرفته و در واقع نقاط مختلف منحنی رطوبتی، از جمله FC و PWP در حین خشک



شکل ۴- پراکنش مقادیر الف- ظرفیت زراعی (FC)، ب- نقطه پژمردگی دائم (PWP) و ج- آب قابل استفاده (AV) اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط روش حل معکوس در خاک‌های مورد مطالعه

با یکدیگر متفاوت خواهند بود (Maqsood *et al.*, 2004). Tomasella *et al.* (2003) نیز گزارش نمودند که در طی فرآیند خشک و خیس شدن، ویژگی‌های متفاوتی در خاک، دامنه خشک

منحنی رطوبتی بسته به این که خاک در حال خشک شدن یا خیس شدن باشد، دارای دو شاخه متمایز خشک و خیس شدن است و این دو شاخه از نظر شکل و پارامترهای توصیف کننده آن

بیشتری تخمین زده شدند. همچنین مقادیر PWP شبیه‌سازی- شده از همخوانی بیشتری نسبت به مقادیر FC شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده این نقاط برخوردار بودند. دلیل این امر وابستگی بیشتر FC به ساختمان خاک و توزیع و چگونگی قرارگیری منافذ موجود در خاک است که این ویژگی‌ها نیز تحت تاثیر میزان رس خاک می‌باشد در حالی که PWP بیشتر تحت تاثیر بافت خاک قرار دارد. عمده دلیل اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده به روش حل معکوس با داده‌های اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه به کمک صفحات فشاری در این است که در شرایط طبیعی مقادیر مختلف منحنی مشخصه رطوبتی از جمله FC و PWP در حالت خیس شدن خاک و در آزمایشگاه این ویژگی‌ها تحت شرایط خشک شدن خاک اندازه‌گیری می‌شوند و رفتار منحنی مشخصه رطوبتی در این دو وضعیت متفاوت می‌باشد. در کل با توجه به این که در شرایط طبیعی و واقعی، در فرآیندهایی مانند آبیاری و یا نفوذ آب به خاک در واقع خاک در حال خیس شدن است و اندازه‌گیری نقاط مختلف منحنی مشخص رطوبتی در حین خیس شدن به واقعیت نزدیک‌تر بوده و برای انجام برنامه‌ریزی‌های مختلف آبیاری از اطمینان بالاتری برخوردار هستند. از سوی دیگر همان‌طور که قبلاً هم بیان شد، در آزمایشگاه اندازه‌گیری منحنی مشخص رطوبتی از نمونه‌های بسیار کوچک خاک استفاده می‌شود که در نتیجه تعمیم دادن نتیجه به مقیاس مزرعه و مقیاس‌های بزرگ میدانی از دقت قابل قبولی برخوردار نخواهد بود. بر این اساس به نظر می‌رسد داده‌های رطوبتی برآورد شده به روش حل معکوس و با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در شرایط طبیعی از ارزش قابل قبولی برخوردار باشند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Bahrami, A., Aghamir, F., Bahrami, M. and Khodaverdiloo, H. (2020). Inverse modeling towards parameter estimation of the nonlinear soil hydraulic functions using developed multistep outflow procedure. *Journal of Hydrology*, 590, 125446.
- Blake, G.R. and Hartge, K.H. (1986). Bulk density. In: *Methods of soil analysis. Part 1, 2nd edn* (ed. A. Klute),. Agronomy Monographs. 9. ASA, Madison, WI. pp. 363-375
- Dobarco, R.M., Cousin, I., Le Bas, C. and Martin, M. (2019). Pedotransfer functions for predicting available water capacity in French soils, their applicability domain and associated uncertainty. *Geoderma*, 336, 81-95.
- Gribb, M. M., Forkutsa, I., Hansen, A., Chandler, D. G. and McNamara, J. P. (2009). The Effect of Various Soil Hydraulic Property Estimates on Soil Moisture Simulations. *Vadose Zone Journal*, 8, 321-331.
- Huang, J., Wu, P. and Xining, Z. (2013). Effects of rainfall intensity, underlying surface and slope gradient on soil infiltration under simulated rainfall experiments. *Catena*, 104, 93-102.
- Kirkham, J.M., Smith, C., Doyle, R.B. and Brown, P.B. (2019). Inverse modelling for predicting both water and nitrate movement in a structured-clay soil (Red Ferrosol). *Peer Journal*, 6, e6002.
- Klute, A. (1986). *Methods of Soil Analysis. Part 1-Physical and Mineralogical Methods. 2nd ed.*, Agronomy No. 9. ASA/SSSA Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- Lai, J. and Ren, L. (2016). Estimation of effective hydraulic parameters in heterogeneous soils at field scale, *Geoderma*, 264, 28-41
- Maqsood A, Bussière B, Mbonimpa M and Aubertin M.

و خیس منحنی رطوبتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. پژوهش‌های مختلفی نیز نشان دادند که مقادیر پارامترهای مختلف منحنی رطوبتی از جمله رطوبت اشباع و رطوبت باقیمانده در خاک در شاخه خشک شدن بیشتر از شاخه خیس شدن است (Toluee et al., 2014). به نظر می‌رسد همین امر باعث کمتر بودن مقادیر شبیه‌سازی شده این نقاط منحنی مشخصه رطوبتی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده آنها در این پژوهش بوده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش مقادیر رطوبت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دایم گیاه با استفاده از داده‌های نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده توسط استوانه‌های دوگانه در نرم‌افزار HYDRUS 2D/3D و با رویکرد حل معکوس در بافت‌های مختلف خاک برآورد شدند. نتایج نشان داد که مدل با دقت نسبتاً قابل قبولی مقادیر FC و PWP را در همه بافت‌های مورد مطالعه برآورد نمود. دقت مقادیر برآورد شده FC و PWP در خاک‌های با بافت سبک‌تر بالاتر بود. کمترین میزان خطای برآورد در بافت SL مشاهده شد. میزان خطا با افزایش درصد رس موجود در خاک افزایش پیدا کرد و بیشترین خطا در بافت SiC مشاهده شد. در واقع وجود انبساط و انقباض در ذرات رس بر روی توزیع اندازه منافذ و چگونگی قرار گرفتن آنها تاثیر گذاشته و همچنین باعث ایجاد درز و ترک در خاک می‌شود. با توجه به این که این عوامل در شرایط مدلسازی لحاظ نمی‌شود. در واقع اثرات انقباض و انبساط ذرات رس و یا وجود درز و ترک که در حالت واقعی و طبیعی در خاک‌های با بافت سنگین وجود دارد، در شرایط مدل‌سازی لحاظ نمی‌شود؛ به همین دلیل پیاده‌سازی مدل برای خاک‌های با بافت سبک‌تر به شرایط واقعی نزدیکتر بوده و داده‌های FC و PWP با دقت

- (2004). Hysteresis effects on the water retention curve: A comparison between laboratory results and predictive models. Pp. 8-15. Proceedings of the 57th geotechnical conference, Canada.
- Mashayekhi, P., Ghorbani Dashtaki, S., Mosaddeghi, M.R., Shirani, H. and 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.
- Mashayekhi P., Ghorbani Dashtaki S., Mosaddeghi M.R., Shirani H. and Nouri M.R. (2017). Estimation of soil hydraulic parameters using double-ring infiltrometer data via inverse method. *Iranian Journal of Water and Soil Research*, 47(4), 829-838. (In Persian)
- Minasny, B. and McBratney, A.B. (2002). The Neuro-m method for fitting neural network parametric pedotransfer functions. *Soil Science Society of America Journal*, 66,352- 361.
- Mirzaee, S., Zolfaghari, A. A., Gorji, M., Dyck, M., & Ghorbani Dashtaki, S. (2014). Evaluation of infiltration models with different numbers of fitting parameters in different soil texture classes. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60(5), 681-693.
- Mousavi Dehmurdi, A., Ghorbani Dashtaki, Sh. And Mashayekhi, P. (2018). Evaluation of double-ring infiltrometers method for measuring the vertical infiltration in different soil textures using HYDRUS. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(3), 241-253. (In Farsi).
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3), 513-522.
- Novák, V. and Havrila, J. (2006). Method to estimate the critical soil water content of limited availability for plants. *Biologia Journal*, 61(19), 289-293.
- Qiao, J., Zhu, Y., Jia, X., Huang, L., & Shao, M. A. (2019). Pedotransfer functions for estimating the field capacity and permanent wilting point in the critical zone of the Loess Plateau, China. *Journal of Soils and Sediments*, 19(1), 140-147.
- Raouf, M. and Pilpayeh, A. R. (2013). Estimating soil wetting profile under saturated infiltration process by numerical inversion solution in land slopes. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 13(6), 732-736.
- Rucker, D. F. (2011). Inverse upscaling of hydraulic parameters during constant flux infiltration using borehole radar. *Advances in Water Resources*, 34(2), 215-226.
- Toluee, R., Neyshabouri, M.R. and Rasoulzadeh, A. (2014). Estimating Parametrs of Brooks-Corey Soil Water Retention Curve for Drying and Wetting Branches by Pedotransfer Functions. *Water and soil science*, 25(3), 195-210. (In Persian).
- Tomasella, J., Pachepsky, Y.A., Crestana, S. and Rawls, W.J. (2003). Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. *Soil Science Society of America Journal*, 67, 1085-1092.
- Silva, B.M., Silva, É.A., Oliveira, G.C., Ferreira, M.M. and Serafim, M.E. (2014). Plant-available soil water capacity: estimation methods and implications. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38, 464-475.
- Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1,318-333.
- Šimůnek, J. Kodesová, R. and Gribb, M. M. (1999). Estimating hysteresis in the soil water retention function from modified cone penetrometer test. *Water Resources Research*, 35, 1329-1345.
- Šimůnek, J., Šejna, M. and van Genuchten, M. Th. (2012). HYDRUS: model use, calibration and validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 55(4), 1261-1274.
- Vanclooster, M., Javaux, M. and Lambot, S. (2007). Recent advances in characterizing flow and transport in unsaturated soil at the core and field. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*, 3, 19-35
- 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. and van Genuchten, M.Th. (2010). Using pedotransfer functions to estimate the van Genuchten-Mualem soil hydraulic properties: A review. *Vadose Zone Journal*, 9, 795-820.