

برآورد پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی خاک با استفاده از حل عددی معکوس فرایند نفوذ آب به خاک در استوانه‌های-دوگانه

پریسا مشایخی^۱، شجاع قربانی دشتکی*^۲، محمدرضا مصدقی^۳، حسین شیرانی^۴، مهدی پناهی^۵، محمدرضا نوری^۶

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۱۵)

چکیده

آگاهی از منحنی مشخصه رطوبتی برای شبیه‌سازی جریان آب و پدیده‌های انتقال در کشاورزی و هیدرولوژی ضروری است. در پژوهش حاضر از نرم‌افزار HYDRUS-2D/3D برای برآورد پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی در سه بافت متفاوت خاک به روش معکوس، با استفاده از داده‌های نفوذسنج استوانه‌های-دوگانه، استفاده شد. برای این منظور، آزمایش نفوذ آب به خاک از طریق استوانه‌های-دوگانه در سه منطقه با بافت‌های مختلف رس سیلتی، لومی و لوم شنی در سه تکرار انجام شد. در هر منطقه نمونه‌های دست‌خورده و دست‌نخورده خاک از سه عمق (۰-۱۰، ۱۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متر) برداشت شده و برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند بافت، چگالی ظاهری، درصد رطوبت اولیه و درصد رطوبت اشباع در این نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. همچنین منحنی مشخصه رطوبتی خاک با استفاده از دستگاه جعبه شن برای مکش‌های کمتر از ۱۰۰ سانتی‌متر و دستگاه صفحه فشار برای مکش‌های ۱۰۰ تا ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد و پارامترهای مدل ون‌گنوختن با برازش این مدل بر داده‌های اندازه‌گیری‌شده منحنی مشخصه رطوبتی خاک توسط نرم‌افزار RETC به دست آمد. دقت و قابلیت اطمینان روش معکوس در تعیین پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی خاک در مقایسه با روش آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس ارزیابی‌های آماری صورت گرفته، منحنی مشخصه رطوبتی که از طریق پارامترهای هیدرولیکی برآورد شده به روش حل معکوس به دست آمد با منحنی مشخصه رطوبتی به دست آمده از طریق برازش مدل ون‌گنوختن بر داده‌های اندازه‌گیری‌شده به کمک برنامه RETC، هم‌خوانی بسیار خوبی داشت به طوری که شاخص‌های ضریب همبستگی پیرسون (r)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSD) $(m^3 m^{-3})$ ، اختلاف میانگین‌ها (MD) $(m^3 m^{-3})$ ، و قدر مطلق خطای میانگین‌ها (AMD) $(m^3 m^{-3})$ برای پارامترهای تخمینی در این روش، به ترتیب برابر با ۰/۹۸۸، ۰/۰۳۶، ۰/۰۰۸ و ۰/۰۱۲ بود. در این روش هم‌خوانی خوبی بین میزان رطوبت شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در نیم‌رخ خاک دیده شد ($R^2=0/936$).

واژه‌های کلیدی: پارامترهای ون‌گنوختن، مدل‌سازی معکوس، منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک، نرم‌افزار HYDRUS-2D/3D، نفوذسنج استوانه-دوگانه

۱-دانشجوی دکتری، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

۲-دانشیار گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد (مکاتبه کننده)

۳-دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۴-دانشیار گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رفسنجان

۵-استادیار گروه آبیاری و زهکشی موسسه تحقیقات خاک و آب

۶-دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

*. پست الکترونیک: Shoja2002@yahoo.com

(2012). در نرم‌افزار HYDRUS از الگوریتم بهینه‌سازی لونیگ-مارکواردت (Marquardt, 1963) برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک و انتقال گرما و املاح به روش حل معکوس با استفاده از داده‌های جریان گذرا و یا پایدار استفاده می‌شود.

هایدروس (HYDRUS) یک برنامه پیشرفته تحت ویندوز برای تجزیه و تحلیل و شبیه‌سازی حرکت آب، املاح و گرما در خاک بوده و قادر به برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک و یا پارامترهای انتقال املاح به روش حل معکوس می‌باشد. این برنامه توسط (Simunek *et al.*, 1999) در آزمایشگاه شوری خاک ایالات متحده پی‌ریزی شده که در بسیاری از پژوهش‌های مزرعه‌ای و آزمایشگاهی برای بهینه‌سازی و برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک به روش حل معکوس مورد استفاده قرار گرفته و نتایج آن نسبتاً رضایت‌بخش بوده است (Alletto *et al.*, 2015; Pollalis & Valiantzas, 2015; Rashid *et al.*, 2015; Mashayekhi *et al.*, 2016). تاکنون پژوهش‌های متعددی برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک از طریق داده‌های به‌دست‌آمده از نفوذسنج دیسکی (مکشی) (Tension/Disk infiltrometer) (Kelishadi *et al.*, 2014) و نفوذسنج مخروطی (Cone permeameter) (Vanclouster *et al.*, 2007) به روش حل معکوس ارائه شده است. اما در رابطه با استفاده از داده‌های نفوذسنج‌های استوانه-دوگانه در تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک پژوهش‌های چندانی انجام نگرفته است. از سوی دیگر، نفوذسنج‌های استوانه-دوگانه (Double-ring infiltrometers) در بسیاری از پژوهش‌های انجام‌شده در سال‌های اخیر، به عنوان یک روش برای اندازه‌گیری نفوذ آب به خاک و تعیین پارامترهای نفوذ استفاده شده است (Ghorbani Dashtaki *et al.*, 2009). بنابراین، در این پژوهش سعی بر آن است تا با استفاده از این داده‌ها و با به کارگیری روش حل معکوس، میزان کارایی استفاده از داده‌های به دست آمده از نفوذسنج‌های استوانه-دوگانه در شبیه‌سازی حرکت آب در خاک و تخمین بهینه پارامترهای هیدرولیکی خاک در شرایط خاک دست‌نخورده و در حال ترشدن (Wetting) مورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای و آزمایشگاهی

برای انجام این پژوهش، آزمایش نفوذ آب به خاک با استفاده از نفوذسنج‌های استوانه-دوگانه در ۳ منطقه رودشت، دشتی

بخش غیراشباع خاک اهمیتی فراوانی در چرخه‌ی آبی طبیعت دارد و یکی از مهم‌ترین شاخص‌هایی که ویژگی‌های این بخش را به صورت کمی بیان می‌کند، منحنی مشخصه رطوبتی خاک (SWRC) است که در بسیاری از پژوهش‌ها به عنوان اطلاعات پایه مورد استفاده قرار می‌گیرد (Khodaverdiloo *et al.*, 2011). منحنی مشخصه رطوبتی نشان‌دهنده‌ی ارتباط بین مقدار رطوبت و پتانسیل ماتریک خاک است که از طریق روش‌های مستقیم و غیرمستقیم متعددی قابل اندازه‌گیری است. انجام روش‌های مستقیم، هزینه‌بر و زمان‌بر بوده و نیازمند کار زیاد می‌باشد. (Mosaddeghi *et al.*, 2011). افزون بر این، به دلیل تغییرپذیری مکانی و زمانی زیاد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، تعداد نمونه‌های زیادی برای توصیف دقیق آنها در شرایط مزرعه نیاز است (Vereecken *et al.*, 2010; Schell *et al.*, 2012). بنابراین طی ۴۰ سال گذشته، روش‌های غیرمستقیم مختلفی برای برآورد این ویژگی‌ها ارائه شده است که یکی از آنها روش حل معکوس است (Simunek *et al.*, 2012). در این روش ویژگی‌های هیدرولیکی خاک از طریق اندازه‌گیری‌های درجا شامل اندازه‌گیری مقدار رطوبت و یا پتانسیل ماتریک خاک، نفوذ آب به خاک و ... در شرایط طبیعی و واقعی برآورد می‌شوند (Vereecken *et al.*, 2010; Greb *et al.*, 2009).

مدل‌سازی معکوس معمولاً شامل تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک با استفاده از حل عددی مکرر معادله‌ی ریچاردز می‌باشد. معادله ریچاردز یک معادله مشتق جزئی درجه دو غیرخطی برای توصیف پویایی آب در خاک در مدل‌سازی جریان اشباع و غیراشباع آب است که با توجه به ماهیت غیرخطی معادله، معمولاً نمی‌توان آن را به صورت تحلیلی حل نمود و باید با استفاده از روش‌های عددی حل شود (Tiago *et al.*, 2006).

رویکرد کلی در فرآیند بهینه‌سازی پارامترها، انتخاب یک تابع هدف به عنوان یک معیار جهت اندازه‌گیری میزان هم‌خوانی بین داده‌های اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده توسط مدل است که مستقیم یا غیرمستقیم به پارامترهای قابل تنظیم در آن مدل مربوط می‌شود. به گونه‌ای که دقیق‌ترین مقدار برای پارامترهای مدل مورد استفاده، با به حداقل رساندن این تابع هدف به دست می‌آید (Simunek *et al.*, 2011).

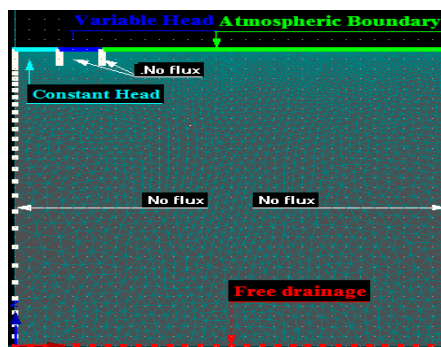
در این پژوهش از نرم‌افزار HYDRUS-2D/3D برای شبیه‌سازی نفوذ غرقابی آب به خاک در استوانه‌های-دوگانه، استفاده شد. بدین منظور، محدوده خاک زیر استوانه‌های-دوگانه به صورت یک ناحیه متقارن حول محوری به مرکزیت استوانه داخلی در نظر گرفته شد. شعاع استوانه‌های داخلی و خارجی به ترتیب ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر، عمق جای‌گذاری استوانه‌ها در خاک ۱۰ سانتی‌متر و عمق خاک ۱۵۰ سانتی-متر در نظر گرفته شد. شرط مرز ورودی برای استوانه‌های داخلی و خارجی، بار آبی ثابت (ارتفاع آب روی سطح خاک برابر ۱۰ سانتی‌متر) در نظر گرفته شد که برای استوانه داخلی ثابت و برای استوانه بیرونی با گذشت زمان متغیر بوده و با تغییر جزئی (نزدیک به صفر) همراه بود. شرایط مرزی برای محدوده سطح خاک در خارج از استوانه‌ها به صورت اتمسفری، تعریف شد. همچنین دیواره استوانه‌ها شرایط بدون جریان و برای مرز پایینی (عمق خاک) زهکشی آزاد تعریف شد (شکل ۱). در نرم‌افزار HYDRUS برای شبیه‌سازی حرکت آب در خاک از مدل منحنی مشخصه رطوبتی ون‌گنوختن و مدل هدایت هیدرولیکی ون‌گنوختن-معلم (Mualem, 1976; van Genuchten, 1980) با فرض $m=1-1/n$ که به ترتیب به شکل زیر هستند، برای کمی-نمودن ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در معادله ریچاردز استفاده شد:

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

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

و سرش‌بادران در استان اصفهان با سه نوع بافت خاک متفاوت (به ترتیب دارای بافت ریز، متوسط و درشت) و در ۳ تکرار انجام گرفت. قطر استوانه داخلی ۳۰ و قطر استوانه خارجی حدود ۶۰ سانتی‌متر بود که به صورت متحدالمرکز تا عمق حدود ده سانتی‌متر 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., 2013). سپس با حفر خاک‌رخ در هر منطقه، از قسمت میانی لایه‌های ۱۰-۰، ۳۰-۳۰ و ۶۰-۳۰ سانتی‌متری خاک نمونه‌برداری انجام شد. بافت خاک به روش هیدرومتری (Klute, 1986) و چگالی ظاهری در هر لایه به روش نمونه‌برداری با سیلندر نمونه‌برداری (با ارتفاع ۴ و قطر ۳/۵ سانتی‌متر) اندازه‌گیری شد (Blake & Hartge, 1986). منحنی مشخصه رطوبتی خاک با استفاده از دستگاه جعبه شن در مکش‌های زیر ۱۰۰ سانتی‌متر (شامل مکش‌های ۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر) در سه تکرار اندازه‌گیری شد. همچنین برای هر نمونه خاک دست‌خورده، میزان رطوبت در مکش‌های بالای ۱۰۰ سانتی‌متر (شامل مکش‌های ۳۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۳۰۰۰، ۷۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر) به کمک دستگاه صفحه فشار اندازه‌گیری شد (Klute, 1986).

پایاده‌سازی شرایط آزمایش نفوذ آب به خاک در محیط نرم‌افزار HYDRUS-2D/3D



شکل ۱- شرایط مرزی تعریف‌شده برای شبیه‌سازی آزمایش نفوذ از طریق استوانه‌های-دوگانه به وسیله‌ی مدل HYDRUS2D/3D

Figure 1- The boundary conditions for infiltration simulation through double-ring infiltrometers by HYDRUS2D/3D model

ماتریک در نقطه عطف منحنی مشخصه رطوبتی (cm^{-1}) ، n پارامتر شکل منحنی مشخصه رطوبتی $(-)$ ، Se درجه

در این رابطه θ_r رطوبت باقی‌مانده $(\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3})$ ، θ_s رطوبت اشباع $(\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3})$ ، α پارامتری مرتبط با عکس مکش

تجمعی اندازه‌گیری شده (I) در آزمایش نفوذسنج استوانه-های-دوگانه، به عنوان داده‌های ورودی برای شبیه‌سازی نفوذ آب به خاک و بهینه‌سازی پارامترها استفاده شد. در سناریوی دوم از میزان رطوبت اندازه‌گیری شده در ظرفیت زراعی خاک و داده‌های نفوذ تجمعی (FC+I) و در سناریوی سوم از میزان رطوبت خاک در نقطه پژمردگی دائم گیاه به عنوان داده اضافی در کنار داده‌های نفوذ تجمعی استفاده شد (I+PWP). در سناریوی چهارم از داده‌های نفوذ تجمعی، FC و PWP به صورت همزمان برای بهینه‌سازی استفاده شد (I+PWP+FC). برای ارزیابی نفوذ تجمعی محاسبه شده در سناریوهای تعریف شده ۱ تا ۴، از معیارهای آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، خطای اربیبی میانگین (MBE) و ضریب تبیین (R^2) بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده استفاده شد که به ترتیب در روابط ۴ تا ۶ ذکر شده است:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (I_i - \hat{I}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (I_i - I)^2} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I_i - \hat{I}_i)^2}{N}} \quad (5)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (I_i - \hat{I}_i)}{N} \quad (6)$$

در این فرمول‌ها N تعداد مشاهدات، I_i میزان نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده (cm^3) و \hat{I}_i میزان نفوذ تجمعی شبیه‌سازی شده (cm^3) می‌باشد. همچنین پارامترهای معادله ون-گنوختن با استفاده از نقاط منحنی مشخصه رطوبتی خاک اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه به کمک نرم‌افزار RETC برای هر نمونه خاک برآورد شدند. سپس برای مقایسه این پارامترها با پارامترهای هیدرولیکی برآورد شده به روش حل معکوس، از شاخص‌های ضریب همبستگی پیرسون (r)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSD) (m^3m^{-3})، اختلاف میانگین‌ها (MD) (m^3m^{-3}) و قدرمطلق اختلاف میانگین‌ها (AMD) (m^3m^{-3}) براساس روابط ۷ تا ۱۱ استفاده شد (Ghorbani dashtaki *et al.*, 2010):

اشباع موثر، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع (cm s^{-1}) و l پارامتر پیوستگی منافذ خاک (-) است. زمان نهایی نفوذ برای هر خاک برابر زمان نهایی نفوذ اندازه‌گیری شده در مزرعه در نظر گرفته شد.

آزمون حساسیت

تحلیل حساسیت یکی از جنبه‌های مهم در مدل‌سازی به روش‌های عددی و تحلیلی می‌باشد (Fuladipannah, 2012). در این مرحله ابتدا مدل با شرایط اولیه و مرزی تعریف شده در بالا برای هر یک از خاک‌های مورد مطالعه به صورت جداگانه و به روش مستقیم (Forward problem) اجرا شد و داده‌های نفوذ شبیه‌سازی شده در هر مورد استخراج شدند. برای این منظور پارامترهای مدل ون‌گنوختن-معلم با استفاده از چهار ویژگی زود یافت درصد رس، سیلت و شن و چگالی ظاهری اندازه‌گیری شده در خاک و به کمک برنامه Rosetta که در نرم‌افزار HYDRUS-2D/3D موجود است، استخراج شد و به عنوان تخمین‌های اولیه برای شبیه‌سازی نفوذ آب به خاک مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۱). سپس، برای انجام تحلیل حساسیت نفوذ آب به خاک نسبت به پارامترهای هیدرولیکی خاک (پارامترهای مدل ون-گنوختن-معلم شامل n , α , K_s , l , θ_s و θ_r)، برای هر بافت خاک پارامتر مورد نظر ۱ درصد تغییر داده شد در حالی که سایر پارامترها مقدار اولیه خود را داشتند و مدل با این ترکیب پارامتری اجرا شده و داده‌های نفوذ استخراج شدند. در نهایت میزان حساسیت هر کدام از پارامترها از رابطه (۳) محاسبه شد (Simunek *et al.*, 1999):

$$s(t, b) = \frac{|Y(b + \Delta b) - Y(b)|}{Y(b)} \quad (3)$$

که در آن $s(t, b)$ ضریب حساسیت یا تغییر نسبی در متغیر Y (نفوذ تجمعی آب در خاک) به ازای یک درصد تغییر در پارامتر b ، زمان t و $\Delta b = 0.01b$ است. با مشخص شدن پارامترهای حساس در این مرحله، این پارامترها وارد فرآیند بهینه‌سازی شده و پارامترهای غیر حساس در مقادیر تخمین اولیه ثابت در نظر گرفته شدند.

بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک به روش

حل معکوس در مدل HYDRUS-2D/3D

در این پژوهش، ۴ سناریو برای بهینه‌سازی پارامترهای منحنی مشخصه‌ی رطوبتی در خاک‌های مورد مطالعه در نظر گرفته شد. در سناریوی اول تنها از داده‌های نفوذ

جدول ۱- مقادیر اولیه پارامترهای مدل ون گنوختن-معلم برای سه کلاس بافتی خاک مورد

استفاده

Table 1- The initial values of van Genuchten-Mualem model parameters for three classes of soil texture

θ_r	θ_s	α	n	K_s	l	بافت خاک
($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	(cm^{-1})		(cm s^{-1})		Soil texture
0.040	0.387	0.004	1.66	0.0021	0.5	Sandy Loam
0.010	0.425	0.009	1.48	0.00095	0.5	Loam
0.099	0.525	0.012	1.4	0.000267	0.5	Silty Clay

$$r = \frac{\int_a^b (\theta(h)_{mi} - \bar{\theta}_{mi}) \cdot (\theta(h)_{pi} - \bar{\theta}_{pi}) dpF}{\sqrt{\int_a^b (\theta(h)_{mi} - \bar{\theta}_{mi})^2 dpF \cdot \int_a^b (\theta(h)_{pi} - \bar{\theta}_{pi})^2 dpF}} \quad (7)$$

$$MD = \frac{1}{b-a} \int_a^b (\theta(h)_{pi} - \theta(h)_{mi}) dh \quad (8)$$

$$AMD = |MD| \quad (9)$$

$$MSD = \frac{1}{b-a} \int_a^b (\theta(h)_{pi} - \theta(h)_{mi})^2 dh \quad (10)$$

$$RMSD = \sqrt{MSD} \quad (11)$$

$$\bar{\theta}_{pi} = \frac{1}{b-a} \int_a^b (\theta(h)_{pi}) dh \quad (13)$$

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است. بر این اساس سه نوع خاک مورد مطالعه در سه گروه بافتی متفاوت شامل رس سیلتی (Silty Clay)، لوم (Loam) و لوم شنی (Sandy Loam) قرار گرفتند. بر اساس نتایج آزمون حساسیت، در همه خاک‌ها کمترین ضریب حساسیت مربوط به پارامترهای پیوستگی منافذ (l) و رطوبت باقی‌مانده (θ_r) در معادله ون گنوختن-معلم بود (شکل ۲) که با نتایج حاصل از پژوهش Abbasi et al., (2003) هم‌خوانی دارد. بنابراین دو پارامتر θ_r و l به عنوان پارامترهای غیرحساس، کمترین تاثیر را بر شبیه‌سازی حرکت آب در خاک به روش معکوس داشته و بهتر است که در فرایند مدل‌سازی به روش حل معکوس از بهینه‌سازی این دو پارامتر صرف‌نظر نمود. همچنین پارامتر n بیشترین

در این روابط $\theta(h)_{mi}$ رطوبت اندازه‌گیری‌شده در یک مکش مشخص و $\theta(h)_{pi}$ رطوبت پیش‌بینی‌شده برای همان مکش مشخص می‌باشد که از طریق حل معادله ون گنوختن که پارامترهای آن به روش معکوس تخمین زده شده، به دست می‌آید. همچنین $i = 1, 2, \dots, N$ که N تعداد کل خاک‌های مورد مطالعه و ضرایب a و b به ترتیب حدود بالا و پایین مکش اعمال‌شده بر روی نمونه‌های خاک برای ایجاد منحنی نگهداشت آب در خاک می‌باشد. $\bar{\theta}_{mi}$ میانگین داده‌های میزان رطوبت در منحنی مشخصه رطوبتی اندازه‌گیری‌شده در دامنه مکش اعمال‌شده ($a-b$) و $\bar{\theta}_{pi}$ میانگین داده‌های میزان رطوبت در منحنی مشخصه رطوبتی شبیه‌سازی‌شده در همان دامنه می‌باشد که به ترتیب از روابط ۱۲ و ۱۳ محاسبه شدند:

$$\bar{\theta}_{mi} = \frac{1}{b-a} \int_a^b (\theta(h)_{mi}) dh \quad (12)$$

تخمینی در محیط HYDRUS برای شبیه‌سازی نفوذ آب به خاک از طریق استوانه‌های-دوگانه انتخاب شدند. نتایج مقایسه‌های آماری بین داده‌های نفوذ تجمعی شبیه‌سازی-شده به روش حل معکوس و داده‌های اندازه‌گیری‌شده نفوذ تجمعی از طریق استوانه‌های-دوگانه، در سناریوهای تعریف‌شده در جدول ۳ ارائه شده است.

همان‌طور که مشخص است، از میان سناریوهای تعریف‌شده در هر سه نوع بافت خاک، کمترین مقادیر MBE و RMSE و بیش‌ترین مقدار R^2 مربوط به سناریوی بود که در آن شبیه‌سازی با استفاده از مقادیر FC در کنار داده‌های نفوذ تجمعی به عنوان ورودی مدل برای حل معکوس استفاده شد (جدول ۳). بنابراین، این سناریو با کمترین میزان خطا در شبیه‌سازی نفوذ آب به خاک در آزمایش نفوذسنج استوانه‌های-دوگانه و بیش‌ترین ضریب تبیین (R^2) بین داده‌های نفوذ تجمعی اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده، دارای بهترین عملکرد در فرآیند بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک بوده است. Mashayekhi *et al.*, (2016) در برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی‌شده نفوذ تجمعی آزمایش استوانه‌های دوگانه به نتیجه کاملاً مشابهی رسیدند. پژوهشگران زیادی در پژوهش‌های خود به این نتیجه رسیدند که استفاده از داده‌های نفوذ تجمعی به عنوان داده ورودی در حل معکوس مسایل حرکت آب در خاک، به تنهایی اطلاعات کافی برای دستیابی به پاسخ مطمئن و منحصر به فرد را فراهم نمی‌کند و استفاده از اطلاعات تکمیلی و داده‌های اندازه‌گیری‌شده اضافی مانند میزان رطوبت و یا پتانسیل ماتریک در خاک در کنار داده‌های نفوذ تجمعی به همگراشدن روش حل معکوس و دستیابی به پاسخ‌های دقیق‌تر، کمک خواهد کرد (Hopmans *et al.*, 2002). جدول ۴ مقادیر بهینه‌شده پارامترهای هیدرولیکی در خاک‌های مورد مطالعه در سناریوی (I+FC) را نشان می‌دهد. در این جدول، پارامترهای θ_r و l به دلیل دارا بودن ضریب‌های حساسیت بسیار پایین در مقدار تخمین اولیه که به کمک برنامه ROSETTA برای این دو پارامتر تعیین شده بود، به صورت ثابت در نظر گرفته شدند. همچنین پارامتر θ_s در مقادیر اندازه‌گیری‌شده این پارامتر در خاک‌های مختلف، ثابت در نظر گرفته شد.

ضریب حساسیت را در خاک رس سیلتی در تمام مدت زمان نفوذ داشته است (ضریب حساسیت در حدود ۵) و پس از آن به ترتیب هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) و رطوبت اشباع (θ_s) قرار گرفتند (شکل ۲-الف). (Simunek *et al.*, 1998) در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک به روش معکوس از طریق آزمایش تبخیر از ستون خاک، به نتیجه مشابهی دست پیدا کردند. در تجزیه و تحلیل حساسیت انجام‌شده برای خاک Loam، نفوذ تجمعی آب به خاک به پارامترهای K_s ، n و θ_s حساس بود (شکل ۲-ب). در خاک Sandy Loam حساس‌ترین پارامتر برای شبیه‌سازی نفوذ آب به خاک، پارامتر K_s بود که میزان حساسیت این پارامتر با زمان اندکی افزایش داشت و سایر پارامترها از حساسیت بسیار کم‌تری برخوردار بودند (شکل ۲-ج). همچنین رطوبت اشباع (θ_s) در زمان‌های اولیه آزمایش از حساسیت بالایی برخوردار بود (ضریب حساسیت معادل ۰/۵۷) که با گذشت زمان از حساسیت آن کاسته شد. Mashayekhi *et al.* (2016) در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک به روش حل معکوس با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده نفوذ تجمعی در آزمایش استوانه‌های دوگانه به همین نتیجه رسیدند.

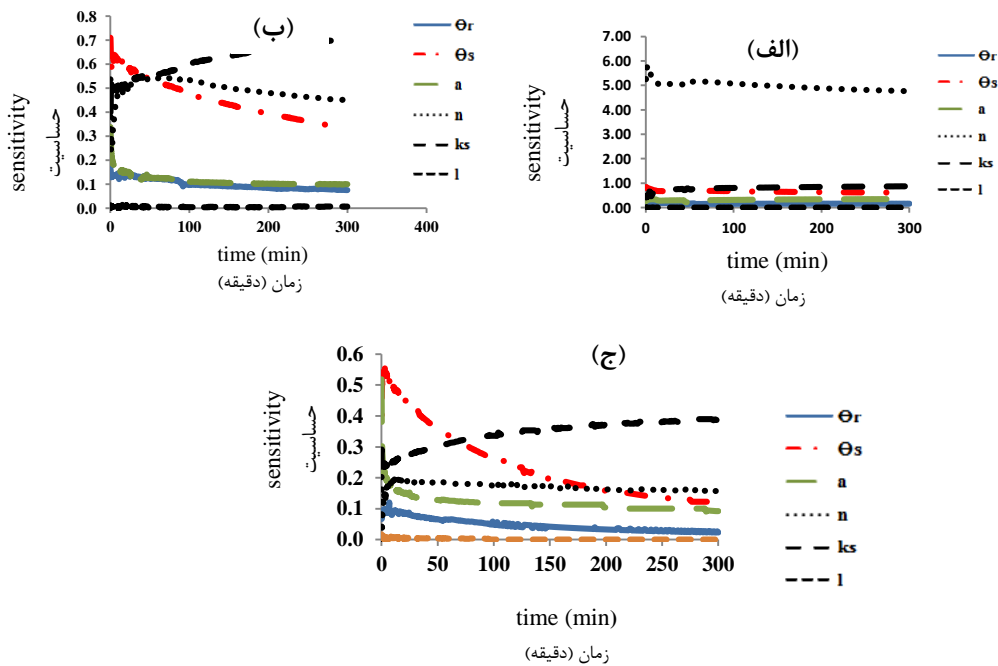
همچنین (Abbasi *et al.*, 2003) و (Rocha *et al.*, 2006) نتایج مشابهی در رابطه با میزان تاثیر پارامترهای هیدرولیکی خاک بر مقدار آب خاک و نیز میزان انتقال املاح در خاک ارائه نمودند. با توجه به حساسیت روش‌های حل معکوس به تعداد پارامترهای ورودی برای بهینه‌سازی، پارامترهای حساس برای بهینه‌سازی استفاده شد و سایر پارامترهای هیدرولیکی که تاثیر کم‌تری بر داده‌های نفوذ تجمعی شبیه‌سازی‌شده داشتند، در مقادیر تخمین اولیه-شان، ثابت در نظر گرفته شدند. همچنین از آن‌جا که از بین پارامترهای هیدرولیکی خاک، رطوبت خاک در حالت اشباع (θ_s) دارای مفهوم فیزیکی بوده و به صورت مستقیم قابل اندازه‌گیری است (Ritter *et al.*, 2003)، این پارامتر نیز در مقدار اندازه‌گیری‌شده، ثابت در نظر گرفته شد.

پژوهش‌های مختلف نیز نشان می‌دهند که با کاهش تعداد پارامترهایی که برای بهینه‌سازی در مدل مورد استفاده قرار می‌گیرند، احتمال دستیابی به پاسخ‌های بهینه با درصد اطمینان بیش‌تر و در زمان کوتاه‌تر توسط نرم‌افزار HYDRUS افزایش می‌یابد (Hopmans *et al.*, 2002). بنابراین در نهایت سه پارامتر α ، n و K_s به عنوان پارامترهای

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه

Table 2- Some physical properties of the studied soils

PWP ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	FC ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	چگالی ظاهری Bulk density (g cm^{-3})	رطوبت اشباع Saturated water content ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	بافت Texture	عمق Depth (cm)	شماره خاک Soil number
0.191	0.390	1.27	0.511	10	48	42	Silty Clay	0-10	1
0.184	0.387	1.30	0.503	14	46	40	Silty Clay	10-30	
0.169	0.379	1.35	0.47	14	46	40	Silty Clay	30-60	
0.181	0.333	1.45	0.443	30	44	26	Loam	0-10	2
0.176	0.354	1.56	0.414	33	41	26	Loam	10-30	
0.180	0.331	1.61	0.403	31	42	27	Loam	30-60	
0.112	0.220	1.59	0.395	44	49	7	Sandy Loam	0-10	3
0.121	0.252	1.66	0.386	46	47	7	Sandy Loam	10-30	
0.089	0.201	1.71	0.366	45	47	8	Sandy Loam	30-60	



شکل ۲- میزان حساسیت نفوذ تجمعی غرقابی آب به خاک به پارامترهای مدل ون گنوختن-معلم در خاک‌های (الف) رس سیلتی، (ب) لوم، و لوم شنی (ج)

Figure 2- Cumulative ponded infiltration sensitivity to the van Genuchten-Mualem model parameters in the soils (a) silty clay, (b) loam, and sandy loam (c)

جدول ۳- نتایج ارزیابی شبیه‌سازی نفوذ تجمعی آب به خاک توسط HYDRUS-2D/3D در سناریوهای تعریف شده

Table 3- Results of statistical comparisons of simulation of cumulative infiltration into the soil by HYDRUS-2D/3D in different scenarios

Silty Clay			Loam			Sandy Loam			سناریو
MBE	RMSE	R^2	MBE	RMSE	R^2	MBE	RMSE	R^2	Scenario
(cm^3)	(cm^3)		(cm^3)	(cm^3)		(cm^3)	(cm^3)		
476.45	772.63	0.9869	73.43	213.61	0.9998	118.45	661.87	0.9991	I
4.7	153.63	0.9983	7.65	79.02	0.9998	88.52	528.21	0.9995	I+ FC
5.5	186.92	0.9960	17.15	106.49	0.9997	105.98	642.47	0.9991	I+PWP
328.16	723.29	0.9883	19.13	194.30	0.9991	115.51	616.53	0.9993	I+FC+PWP

I: نفوذ تجمعی آب به خاک (Cumulative infiltration)

خوبی دیده می‌شود ($R^2=0.9363$) ولی دقت برآورد در خاک درشت‌بافت بیشترین است.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج نشان داد که روش حل عددی معکوس می‌تواند به عنوان یک روش نسبتاً ساده و سریع در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک، با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده نفوذ تجمعی در آزمایش نفوذسنج استوانه‌های دوگانه مد نظر قرار گیرد. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل حساسیت، نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده در آزمایش استوانه‌های- دوگانه از حساسیت زیادی نسبت به پارامترهای K_s ، n و a و θ_s برخوردار بود. از آنجا که θ_s دارای مفهوم فیزیکی بوده و به صورت مستقل و با روش‌های ساده آزمایشگاهی قابل اندازه‌گیری است، می‌توان با ثابت نگهداشتن این پارامتر در مقدار اندازه‌گیری شده آن، تعداد پارامترهای ورودی مدل را کاهش داده و از این طریق دقت تخمین سایر پارامترهای هیدرولیکی خاک را افزایش داد.

همچنین استفاده از اطلاعات تکمیلی مانند میزان رطوبت خاک در پتانسیل ماتریک برابر 330 سانتی‌متر (FC) در کنار داده‌های نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده در آزمایش استوانه‌های دوگانه، باعث کاهش خطا در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک شد.

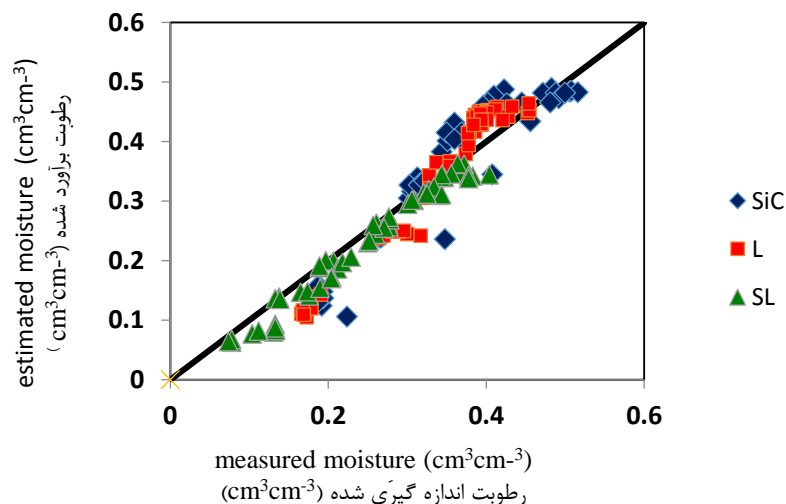
نتایج حاصل از ارزیابی‌های آماری انجام گرفته نشان داد که منحنی مشخصه رطوبتی به دست آمده به کمک پارامترهای مدل ون‌گنوختن (θ_s ، n ، a) که به روش حل معکوس توسط نرم‌افزار HYDRUS-2D/3D برآورد شدند، در مقایسه با منحنی مشخصه رطوبتی که با استفاده از پارامترهایی که از طریق برازش مدل ون‌گنوختن بر داده‌های اندازه‌گیری شده به کمک برنامه RETC تعیین گردید، از دقت قابل قبولی برخوردار بودند. در این ارزیابی شاخص‌های r ، $RMSD$ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)، AMD ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) و MD ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) برای پارامترهای تخمینی به روش حل عددی معکوس، به ترتیب برابر با 0.988 ، 0.036 ، 0.012 و 0.008 بود. این امر نشان می‌دهد که این روش می‌تواند جایگزین قابل اعتمادی برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی باشد و قادر است پارامترهای معادله ون‌گنوختن را با دقت قابل قبولی تخمین بزند. (Greeb *et al.*, 2009) در یک آزمایش نفوذ از طریق اندازه‌گیری میزان رطوبت و پتانسیل ماتریک خاک به نتیجه مشابهی دست یافتند. شکل ۲ پراکنش مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط روش حل معکوس را در اطراف خط یک به یک برای خاک‌های مورد استفاده نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، بین داده‌های رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده به روش حل معکوس با استفاده از داده‌های آزمایش استوانه‌های-دوگانه در بافت‌های مختلف، هم‌خوانی

جدول ۴- مقادیر پارامترهای هیدرولیکی خاک بهینه شده در سناریوی (I+FC)
Table 4- The optimized soil hydraulic parameters in scenario (3P + FC)

θ_r ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_s ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	α (cm^{-1})	n (-)	K_s (cm s^{-1})	عمق Depth	بافت Texture
0.099	0.525	0.0125	1.36	0.00030	0-10	SiC
		** (-0.577-0.605)	(-1.50-4.22)	(-0.0014-0.0015)		
0.097	0.511	0.0122	1.37	0.00030	10-30	SiC
		(-0.185-0.198)	(-0.97-3.72)	(-0.076-0.077)		
0.096	0.498	0.0117	1.40	0.00020	30-60	SiC
		(-2.959-2.982)	(-7.3-10.11)	(-0.056-0.056)		
0.010	0.425	0.007	1.41	0.00080	0-10	L
		(-0.63-0.079)	(0.56-2.25)	(-0.0010-0.0026)		
0.010	0.406	0.0085	1.39	0.0013	10-30	L
			(-1.40-4.20)	(-0.0125-0.0152)		
0.010	0.404	0.0070	1.40	0.0010	30-60	L
		(-0.046-0.060)	(-7.29-10.10)	(-0.0009-0.0019)		
0.050	0.457	0.0060	1.68	0.0111	0-10	SL
		(-0.065-0.079)	(0.28-3.08)	(-0.0767-0.0990)		
0.048	0.378	0.0060	1.66	0.0136	10-30	SL
		(-0.043-0.055)	(-6.26-9.58)	(-0.0667-0.0938)		
0.049	0.387	0.015	1.55	0.0120	30-60	SL
		(-0.492-0.522)	(-14.51-17.53)	(-0.0341-0.0345)		

*: پارامترهایی که در فرآیند شبیه‌سازی عددی مورد استفاده قرار نگرفته و در مقادیر مشخص شده، ثابت فرض شدند
(Parameters that were assumed to be constant in numerical simulation)

** : فواصل اطمینان ۹۵٪ (95% Confidence intervals)



شکل ۳- پراکنش مقادیر رطوبت حجمی خاک اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط روش حل معکوس
Figure 3- Measured vs. predicted soil water contents using the inverse modeling

References

- Abbasi F., Simunek J., Feyen J., van Genuchten M.Th., and Shouse P.J. 2003. Simultaneous inverse estimation of soil hydraulic and solute transport parameters from transient field experiments: homogeneous soil. *Transactions of American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 46(4): 1085–1095.
- Alletto L., Pot V., Giuliano S., Costes M., Perdrieux F., and Justes E. 2015. Temporal variation in soil physical properties improves the water dynamics modeling in a conventionally-tilled soil. *Geoderma*, 243(244): 18–28.
- Blake G.R., and Hartge K.H. 1986. Bulk density. In: *Methods of Soil Analysis*. Part 1, 2nd, Klute A. (Eds.), Agronomy. Monograph. 9. *American Society of Agronomy*, Madison, WI, pp. 363–375.
- Fuladipannah M. 2012. Sensitivity analysis of one dimensional hydrodynamic fully coupled model. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 12 (11): 1471–1476.
- Ghorbani Dashtaki S., Homae M., Mahdian M.H., and Kouchakzadeh M. 2009. Site-dependence performance of infiltration models. *Water Resources Management*, 23: 2777–2790. (In Persian)
- Ghorbani Dashtaki S., Homae M., and Khodaverdiloo H. 2010. Derivation and validation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve using a variety of soil data. *Soil Use and Management*, 26: 68–74.
- Gribb M.M., Forkutsa I., Hansen A., Chandler D.J., and McNamara J.P. 2009. The effect of various soil hydraulic property estimates on soil moisture simulations. *Vadose Zone Journal*, 8(2): 321–331.
- Hopmans J.W., Šimunek J., Romano N., and Durner W. 2002. In: *Methods of Soil Analysis: Part 4*, Klute A., (Eds.), Physical Methods. Published by: *Soil Science Society of America*, pp. 963–1008.
- Kelishadi H., Mosaddeghi M.R., Hajabbasi M.A., and Ayoubi S. 2014. Near-saturated soil hydraulic properties as influenced by land use management systems in Koohrang region of central Zagros, Iran. *Geoderma*, 213: 426–434.
- Khodaverdiloo H., Homae M., van Genuchten M.Th., and Ghorbani Dashtaki S. 2011. Deriving and validating pedotransfer functions for some calcareous soils. *Journal of Hydrology*, 399: 93–99.
- Klute A. 1986. *Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods*, 2nd Eds. Monograph. 9. *Soil Science Society of America*, Madison, WI, 1188 pp.
- Marquardt D.W. 1963. An algorithm for least squares estimation of non-linear parameters. *Journal of Industrial and Applied Mathematics*, 11: 431–441.
- 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. doi: 10.1515/intag-2015-0087.
- Mirzaee S., Zolfaghari A.A., Gorji M., Miles Dyck M., and Ghorbani Dashtaki S. 2013. Evaluation of infiltration models with different numbers of fitting parameters in different soil texture classes. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 10(4): 1-13.
- Mosaddeghi M.R., and Mahboubi A.A. 2011. Point pedotransfer functions for prediction of water retention of selected soil series in a semi-arid region of western Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 57(4): 327–342.
- Mualem Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3): 513–522.
- Pollalis E.D., and Valiantzas J.D. 2015. Isolation of a 1D infiltration time interval under ring infiltrometers for determining sorptivity and saturated hydraulic conductivity: numerical, theoretical, and experimental approach. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 141(2): 1-10.
- Rashid N.S.A., Askari M., Tanaka T., Šimunek J., and van Genuchten M.Th. 2015. Inverse estimation of soil hydraulic properties under oil palm trees. *Geoderma*, (241–242): 306–312.
- Rocha D., Abbasi F., and Feyen J. 2006. Sensitivity analysis of soil hydraulic properties on subsurface water flow in furrows, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132(4): 418–424
- Ritter A, Hupet F, Carpena RM, Lambot S and Vanclooster M. 2003. Using inverse methods for estimating soil hydraulic properties from field data as an alternative to direct methods. *Agricultural Water Management*, 59: 77–96.

- Simunek J., Wendroth O., and van Genuchten M.T.H. 1998. Parameter estimation analysis of the evaporation method for determining soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*, (62): 894–905.
- Simunek J., Sejna M., and van Genuchten M.T.H. 1999. HYDRUS-2D software for simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media. Version 2.0. International Ground Water Model Center, Colorado School of Mines, Golden.
- Simunek J., van Genuchten M.Th., and Sejna M. 2012. HYDRUS: model use, calibration, and validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 55(4): 1261–1274.
- Tiago B., Ramos M.C., Goncalves J.C.M., van Genuchten M.Th., and Pires F.P. 2006. Estimation of soil hydraulic properties from numerical inversion of tension disk infiltrometer data. *Vadose Zone Journal*, 5(2): 684–696.
- 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.

Inverse Estimation of the Soil Water Retention Curve Parameters Using Double-Ring Infiltration Data

Parisa Mashayekhi¹, Shoja Gorbani Dashtaki², Mohammad Reza Mosaddeghi³, Hossein Shirani⁴, Mehdi Panahi⁵, Mohammad Reza Nouri⁶

(Received: April 2016 Accepted: December 2016)

Abstract

Quantitative knowledge of soil water characteristic curve is crucial for modeling water flow and transport processes in agriculture and hydrology. In this study, HYDRUS2D/3D software was used to estimate the hydraulic parameters of van Genuchten-Mualem model via inverse modeling using double-ring infiltrometers. Double-ring infiltration experiment was conducted in three sites with different soil textures (i.e., silty clay, loam and sandy loam) with three replications. Disturbed and undisturbed soil samples were also collected from three depths (0–10, 10–30 and 30–60 cm) per each soil and some soil physical properties such as bulk density, texture, initial water content and saturated water content were measured. Soil water retention curve was determined for the matric suctions lower than 100 cm H₂O by sand box, and for the matric suction range 100–15000 cm H₂O using pressure plate. The van Genuchten model with Mualem's restriction was fitted to the soil water retention data by RETC software. The accuracy and reliability of the HYDRUS predictions were evaluated. The results showed that inverse estimation of soil hydraulic parameters provided a reliable alternative method for determining the soil water retention curve at horizon/field scale. The soil water retention curves obtained from the RETC fitting had very good correspondence with those derived from inverse modeling; the efficacy parameters of inverse estimation (i.e., Pearson's correlation coefficient (r), root of mean squared differences (RMSD, m³ m⁻³), absolute value of mean differences (AMD, m³ m⁻³) and the mean difference (MD, m³ m⁻³)) were 0.988, 0.036, 0.012 and 0.008, respectively. Also there was a good agreement between the water content values measured in the soil profile and those predicted by HYDRUS ($R^2= 0.936$).

Keywords: Double-ring infiltrometer, HYDRUS-2D/3D, Inverse modeling, Soil water retention curve, van Genuchten parameters

1-PhD Student, Department of Soil Science, College of Agriculture, University of Shahrekord, Shahrekord.

2-Associate Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, University of Shahrekord, Shahrekord.

3-Associate Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan.

4-Associate Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Vali-e-Asr University, Rafsanjan.

5-Assistant professor, Department of irrigation and soil physics, Soil and Water Research Institute

6-Associate Professor, Department of Irrigation Engineering, College of Agriculture, University of Shahrekord, Shahrekord.

* Corresponding author Email: Shoja2002@yahoo.com